農業気象 (*J. Agr. Met.*) 49 (2): 81–90, 1993

冬季の成木茶園における温度分布 と樹体の凍結・融解

高市 益行*・米谷 力**

(* 大阪府立大学農学部農業気象環境学研究室)
(** 奈良県農業試験場茶業分場)

Temperature Distribution and Freeze-Thaw Process
of Mature Tea Plants in a Tea Garden in Winter

Masuyuki TAKAICHI* and Tsutomu YONETANI**

(* Lab. of Agricultural and Environmental Meteorology, College of Agriculture,
University of Osaka Prefecture, Gakuen-cho, 1-1, Sakai, Osaka 593, Japan)
(** Tea Branch, Nara Prefectural Agricultural Experiment Station,
Yatahara-cho Otsu 470-1, Nara 630-21, Japan)

The relationship between temperature distribution around a mature tea bush and its freeze-thaw process was studied in winter. The coldest parts of a bush in nighttime were the top or the lee shoulder for a horizontal plot and the down-slope side shoulder for the row across the contour line on a slope in many cases. Temperature difference (ΔT) between the bush top leaves (T_{lTOP}) and air at 150 cm height (T_{a150}) could be expressed as a following simple equation:

$$\Delta T = T_{lTOP} - T_{a150} = A U_{150}^{-0.5} Rn$$

where A : an empirical constant, U_{150} : wind speed at 150 cm height, Rn : net radiation above tea bushes. Values of A were $0.0320 \text{ (J}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C m}^{2.5} \text{ s}^{0.5}\text{)}$ for the bush with few elongated shoots above the plucking table and 0.0227 for the one with many of them, respectively.

The times required for freeze to spread over the aboveground part of the bush were from about 20 to 90 minutes. The freezing of the bush top leaves were initiated nearly at the dew-point temperatures around them (T_{dewTOP}) when T_{dewTOP} were about -2°C to -4°C . For lower humidity ($T_{dewTOP} < -4^\circ\text{C}$), the freezing initiated without dew or frost formation on leaves. These results were almost the same as those of young tea plants reported previously.

The latest thawing of the bush was at the bottom trunk and this part occasionally kept frozen to the following nights. In daytime a situation that the bottom trunk was still in freeze while the bush top leaves were already thawed was observed. This status might increase the water deficit stress if there were high transpiration demands.

Among simple methods to estimate the initiation of the freezing, the ones using T_{lTOP} and T_{dewTOP} could make relatively good estimates with about 20–30 minutes of root mean square error for the samples.

Key words: Freezing temperature, Freezing injury, Tea plant, Leaf temperature.

キーワード: 茶樹, 凍結温度, 凍結被害, 葉温

1989年7月26日 全国大会にて一部発表

1991年4月7日 全国大会にて一部発表

1992年9月11日 受付, 1993年6月14日 受理

1. ま え が き

植物体に凍害・霜害が発生するには、その凍結が必須条件である(Sakai and Larcher, 1987)。凍結開始のメカニズムに関する研究は多く、凍結開始に影響する要因として、結露の有無(羽生ら, 1986; 岡野ら, 1989)、氷核活性細菌の状態(牧野, 1985; 馮ら, 1989; 劉ら, 1991)などが報告されている。また、凍結が生じた場合の被害程度は、最低温度が同じでも、凍結開始温度(山中ら, 1982; Andrews *et al.*, 1986)や凍結時の温度低下速度(原田・中山, 1961)、凍結の継続時間(北浦, 1967; 鳥屋尾ら, 1974)、融解時の昇温速度(吉田・酒井, 1967)などの要因により変化することが知られている。したがって、凍害・霜害の被害要因の解析、発生の予測、防除法の検討などを行う際に、低温の程度だけではなく、上記の凍結-融解に関わる諸要因を考慮に入ればより詳細な検討が可能になると思われる。しかし、野外の植物体の凍結-融解に関する資料は一般に不足しており、茶樹についてもその実態については不明な点が多い。

著者らは前報(高市・米谷, 1990)で、幼木茶園における冬季・夜間の樹体の温度分布の特徴、凍結の実態、気象条件と凍結開始温度の関係などについて報告した。本研究では、成木園において、前報と同様に、冬季・夜間の株周辺の温度分布の特徴を明らかにするための観測を実施し、気象条件と凍結-融解との関係について解析を行った。また、樹体の凍結-融解を気象条件から推定する方法について若干の考察を行ったので、それらの結果を報告する。

2. 観測場所および方法

観測は、1987年と1989年の1-2月に奈良市矢田原町の奈良県農業試験場茶業分場内の茶園(海拔約420m, 品種‘やぶきた’, 成木園, ほぼ水平な区画に植栽, 南北うね, うね間1.5m)で実施した。また、傾斜地の株周辺の温度分布を調べるため、1990年3月に奈良県添上郡月ヶ瀬村の造成茶園(通称エンガ団地, 円錐丘状, 海拔355-385m, うね間1.5m, 品種‘やぶきた’, Takaichi (1989)参照)で観測を行った。

観測 I として、1987年に株周辺の詳細な温度分布の把握に重点を置いた観測を行った。供試園(樹齢21年, 二番茶摘採後放任)の中央付近で、うね間地表から高さ150 cmまでの範囲の株の周辺・内部に気温センサー(筒の直径約10mm, 熱電対は線径0.1mmのJIS-T型)を多数配置し、数m離れた場所からエアポンプで吸引して気温を測定した。株頂部で天空に露出した5枚の葉を

選び、裏面ほぼ中央部に線径0.1mmの熱電対を貼付けて葉温を測定した。地温(1 cm, 10 cm)の測定には線径0.3mmの熱電対を用いた。これらの気温・葉温・地温とアイスジャーとの温度差に対応する出力電圧を、手動切替スイッチ(約2秒毎に各測定点を切替え)を介してペンレコーダに記録し、4回反復した平均値を解析に使用した。また、高さ150 cmで純放射量 R_n を純放射計(英弘精機, CN-1)で、風速 U_{150} を無指向性熱線風速計(日本カノマックス社 model 6071)で測定し、5分間の平均値を使用した。

観測 II として、樹体の凍結-融解の把握に重点を置いた観測を1989年に行った(Fig. 1)。供試園(樹齢23年, 二番茶摘採後放任)のほぼ中央で、地中10 cmから高さ150 cmまでの範囲の気温・地温の分布を観測 I と同様の熱電対センサーで測定した。また、枝の中に細孔をあけて熱電対(線径0.1mm JIS-T型)を挿入して茎温を測定した(深さ約2mm, 枝の直径が4mm以下の細い枝ではその中心部)。株の頂部(摘採面の中央)とその両側の肩部(株頂部と裾部の中間の位置)で、天空に露出した葉を各3枚選び、葉温を測定した。水蒸気圧 E_a は高さ150 cmと株頂部付近(高さ約100 cm)で熱電対通風乾湿計によって測定した。その他、地上150 cmで純放射量 R_n を純放射計(英弘精機, CN-11)で、風速 U_{150} を熱線風速計(前掲)で測定した。枝の温度と葉-気温差は、ハイブリッドレコーダ(横河電機 3087 型, 5秒毎の打点記録)とペンレコーダ(横河電機 3056 型, 連続記録)に記録した。気温, 地温, R_n , U_{150} は、データロガー(江藤電機, サーモダック E)を用いて10秒毎に計測し、その

Fig. 1. Arrangement of each sensor around a mature tea bush in observation II (1989).

4 分間平均値をパーソナルコンピュータの磁気ディスクに収録した。

枝や葉の凍結開始は、前報（高市・米谷，1990）と同様に、その部位の茎温・葉温の一時的な上昇によって判定した。また、融解中の部位では、他の部位が順調に昇温していても 0℃ 付近で温度がしばらく一定になる現象が見られるので、それによって融解開始時刻・終了時刻を判定した。

また、傾斜地茶園における株周辺の温度分布の観測では（観測Ⅲ），斜面の中腹（斜面長約 200 m，上端から約 50 m の地点，傾斜角約 11 度）で，等高線に添ったうね（以下では横うねと記す）について観測を行った。気温，地温， R_n ， U_{150} については前掲のセンサー，データロガーを用いて計測・収録し，それらの 5 分間平均値を解析に使用した。

3. 観測結果および考察

3.1 冬季・夜間の成木園の株周辺の温度分布の特徴

水平な場所に植栽された株について，その周辺の夜間の気温・地温の分布の例を Fig. 2 に示す（A：等温線図，B：鉛直プロファイル）。この時刻では純放射量 R_n と風速 U_{150} はそれぞれ -49 W/m^2 ， 0.7 m/s で，株面付近の気温が最も低温となり，株内部の気温は土壤の高温の影響のためにやや高くなった。土壌表層の温度は，うね間では天空との放射交換により株の直下の表層土壌よりも

低温である。高さ 150 cm 気温と株頂部の摘採面直上の気温 ($T_{a\text{TOP}}$) との間には約 2℃ の差が生じている。風向はうねに沿う方向で，樹体周辺の気温で最も低温になる位置は頂部の摘採面ほぼ中央になった。

このような株面の温度分布は気流に大きく影響されるので，株頂部気温 ($T_{a\text{TOP}}$) と両肩部（株面の頂部中央と裾部との中間の位置）の気温 ($T_{a\text{S}}$) との差が，気流の状態によってどのように変化するかを調べた (Fig. 3)。図中の各点は，観測日夜間の毎正時のデータのうち，株面上の R_n が -50 W/m^2 の場合のみをプロットしたものである。

気流がうね方向に沿う場合（うね方向 $\pm 23^\circ$ ，Fig. 3A），両肩部気温と株頂部気温の間にあまり大きな差は生じないが， U_{150} が 0.3 m/s 以下の弱い風の場合は U_{150} が小さくなるにつれて肩部よりも頂部の方が低温になってくるような傾向が見られる。

一方，気流がうねを横切る方向の場合（うねの直角方向 $\pm 45^\circ$ ，Fig. 3B），両肩部と株頂部との気温差はうねに沿う風向の場合よりもバラツキが大きくなる。風速 U_{150} が $0.3\text{--}0.8 \text{ m/s}$ 程度のときは，頂部の方が両肩部よりも高温になる傾向が見られる。 U_{150} が 0.4 m/s 以下で弱いときは，風下側肩部の方が風上側よりもわずかに低温になった。このように，風上側肩部，株頂部，風下側肩部の順序に低くなる状態は，高橋ら（1961）の観測結果の中にも認められる。また， U_{150} が 1 m/s 以上のかなり強風の場合には，風上側や頂部が風下側より低温にな

Fig. 2. An example of temperature distribution around a mature tea bush planted on a horizontal plot (Jan. 23, 1987).
(A) Isotherms, (B) Vertical profiles.

Fig. 3. Changes in the air temperature difference between bush top (Ta_{TOP}) and shoulders (Ta_S) with wind conditions. (A) wind along the row, (B) wind across the row (Observation I: 1/22, 1987, II: 1/27, 1/30 and 2/3, 1989).

り、これは通常考えられる分布とは逆になっている。本報告とは別の赤外線熱映像カメラ（日本電子、サーモグラフィ 3010）による株面葉温の分布の観察の際にも、風速が強い場合に風上側肩部が風下側よりも低温になる現象が見られた。この理由として、強風による葉面からの蒸散（あるいは凍結葉からの脱水）が考えられるが、この点についてはさらに詳しく検討する必要がある。

なお、葉とその近傍の温度差（葉－気温差）については、 R_n が -70 から -80 W/m^2 、 U_{150} が 0.3 から 0.5 m/s 程度の条件において、株頂部の天空に露出した葉で $1.5 - 2.0^\circ\text{C}$ 、摘採面より内部の深さ約 15 cm の位置では $0.3 - 0.5^\circ\text{C}$ となった。深さ 30 cm の位置では、葉－気温差は R_n に関わらず 0.2°C 以下になってほとんど変化しないという結果が得られた。

以上は水平な区画に植栽された株についての結果であるが、次に、傾斜面の等高線植え（横うね）の株周辺および内部の気温・地温分布の例を示す（Fig. 4）。この時刻の R_n は -76 W/m^2 、 U_{150} は 0.3 m/s で、比較的強い放射冷却が生じていた。風は山側から谷へ流下し、うねを横切る方向であった。摘採面の中央では比較的高温で、気温が最低となる位置は気流の遮られる谷側の肩部から裾部にかけての部位になった。この位置の気温と株頂部気温との差は約 1.5°C であった。山側の裾部は、山側隣のうねの株面が低温であり、気流も遮るので、株頂部よりも低温になった。

傾斜地茶園の晩霜害において被害が激甚でない場合に

Fig. 4. An example of temperature distribution around a mature tea bush planted on a slope along the contour line (March 21, 1990). (A) Isothermals, (B) Vertical profiles.

は、株面の谷側が被害を受け山側は無被害であったり、その逆であったり、また、株の頂部だけが筋状に被害を受けたりする。これは、Fig. 3 に示したような温度分布と気流との関係によって生じたものと考えられる。今回の傾斜面横うねの温度観測結果では、株面直上の気温には株面山側の高温部と谷側の低温部との間で約 1.5℃ の差が見られた。 Rn や U_{150} が同程度であれば、晩霜期夜間でも同程度の温度差が予想され、この差は被害発生温度付近では、被害の有無を分けるのに十分な大きさである。

3.2 株面温度（株頂部葉温）と高さ 150 cm 気温との関係

凍害・霜害を対象にする場合、被害と直接関わるのは株面の葉温である。ここでは、水平な場所に植栽されたうねについて、高さ 150 cm 気温 (Ta_{150}) と株頂部葉温 (Tl_{TOP}) との間の差が気象条件によってどの程度になるのかを調べた。 Tl_{TOP} は株面温度のほぼ最低値となるが、うねを横切る弱い風が吹く夜には ($0.2 \leq U_{150} < 1 \text{ m/s}$ 程度)、最低値より高くなる場合もある (Fig. 3 参照)。 Tl_{TOP} と Ta_{150} との差 ΔT と、純放射量 (Rn)、風速 (U_{150}) との関係を表現する式として、前報 (高市・米谷, 1990) と同様に、 ΔT が Rn に比例し U_{150} の 0.5 乗に反比例する形を用いた。すなわち、

$$\Delta T = A \cdot U_{150}^{-0.5} \cdot Rn \quad (1)$$

ここでは係数 A は定数として扱った。夜間 (20:00–06:00) の毎正時の観測データを用いて係数 A を最小自乗法によって求めた結果、観測 I では $0.0320 \text{ (J}^{-1} \cdot \text{℃} \cdot \text{m}^{2.5} \cdot \text{s}^{0.5}\text{)}$ (データ範囲: $0.2 \leq U_{150} < 1.9 \text{ m/s}$, $-85 \leq Rn < -1 \text{ W/m}^2$)、観測 II では 0.0227 (データ範囲: $0.2 \leq U_{150} < 1.8 \text{ m/s}$, $-89 \leq Rn < -4 \text{ W/m}^2$) となった。観測 I (1987 年) と II (1989 年) の株面の状態を比較すると、両者とも二番茶摘採後に放任したものであるが、刈取り時期やその後の管理、気象条件の違いなどのため、株面の突出枝の状態が大きく異なった (1987 年: ほとんどなし、1989 年: 20 cm 四方の範囲に長さ 15–25 cm のものが 5–8 本程度伸長)。係数 A (株面上の温度勾配と Rn , U_{150} との関係) が観測 I と II の間でかなり異なった理由としては、観測期間の気層の安定度や土壌水分条件の違いなども考えられるが、株面の突出枝の状態が最も大きく影響しているものと推察される。

Fig. 5 は、係数 A の算出の際に用いたデータについて、 ΔT の計算値と実測値を比較したものである。観測 I, II とともに、多くのデータで計算値と実測値との差は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内であるが、最大では 1.5°C 程度になった。両者の間の相関係数は、観測 I, II それぞれ 0.842, 0.844 であり高くはないが、(1) 式が ΔT と Rn , U_{150} とのおおまかな

Fig. 5. Relationships between ΔT (measured) and ΔT (calculated) using equation (1).

$$(\Delta T = Tl_{TOP} - Ta_{150})$$

関係を表現する 1 つの方法として利用できると思われる。観測 I, II の係数を用いると、晴れて風が弱い条件である $Rn = -90 \text{ W/m}^2$, $U_{150} = 0.3 \text{ m/s}$ の場合、 ΔT は株面に突出枝のない状態では約 -4°C 、株面に突出枝がある状態では約 -5.5°C になることを示している。

観測現地では、寒害を軽減するため、秋整枝を行わず、突出枝を延ばして越冬させる管理方法が一部で取られている。本研究の係数 A の違いは、この管理方法の葉温への効果を表わしているものと考えられ、高橋ら (1961) による、自然樹形で枝条を伸ばす手摘み園の方が弧状仕立のハサミ摘み園よりも葉温が高温になり凍霜害を受けにくいとする考え方を支持している。

また、高市・米谷 (1990) では、しきわらが施された幼木について、高さ 35 cm 葉温 (Tl_{35}) と Ta_{150} との差に関する係数 A の値として 0.0238 を報告した。 Rn , U_{150} が同じであれば、突出枝が多い場合には成木の株頂部葉温は Tl_{35} とほぼ同程度になり、突出枝がなく摘採面がそのままの成木では頂部葉温は Tl_{35} よりも低くなることが推測される。

3.3 成木樹体の凍結開始温度と気象条件との関係

Fig. 6 に、成木の枝の各部位の凍結開始時刻 (図 B) とその時刻頃の株周辺の温度プロファイル (図 A) の例を示す。温度分布の形は、Fig. 2 と同様に夜間の放射冷却時に一般的にみられる形である。この図では株元はまだ凍結開始前であるが、その温度は既に -1°C 以下に過冷却しており、地上部全体が凍結可能な状態になっていたことを示している。

各部位の凍結開始時刻は、枝条 A や C では株面が早く内部は遅く、枝条 B では逆に株元が早く表層部は遅かつ

Fig. 6. An example of vertical temperature profiles (A) and time of freeze initiation at each part (B) of a mature tea plant (Jan. 24, 1989). Solid arrows indicate the directions of freeze spreading.

た。この日の樹体の凍結が最も早かったのは中央部の18:50で株元の凍結はその23分後であった。このような樹体内の凍結の開始・移行方向や地上部全体に凍結が波及する時間は、前報の幼木の場合と同様に日ごとに異なった。冬季の成木では、凍結が樹体の一部で検知されてから株元に伝わるまで数十分程度で伝わって、凍結部と非凍結部の境界は幼木と同様に株元の地際部になることが多かった。

葉層では非常に多数の枝条が分岐しているので、凍結が樹体地上部全体に波及する時間が比較的短い(20-30程度)夜については、今回の凍結測定点だけでは樹体で最初に凍結を開始する部位は確定できなかった。しかし、温度低下の緩やかな夜には、葉層の一部だけが一旦凍結し、その後は温度低下につれて株元の方へゆっくり進行していく例も見られた。これらのことから、樹体の凍結が最初に始まる部位は、一般に、株面表層部の複数箇所であると推察される。

次に、株頂部の葉について、凍結開始時の葉温とその周囲の露点温度との関係について調べ、幼木の高さ h が35 cmの葉(葉温が最低温を示す部位: ○および△)と比較した(Fig. 7)。■記号が成木のデータで、各プロットは天空に露出した3枚の葉の平均値である。葉面近くの露点温度が測定できたのは7例で、これらは幼木のプロットと同様に分布しており、樹体で最も低温とみなせる部位における凍結開始温度と露点温度の関係は、幼木と成木の間で大差はないようである。この関係を簡単に表現

Fig. 7. Relationships between the freezing temperature of the bush top leaves and the dew-point temperature around them. (○: young plant leaves ($h=35$ cm), △: young plant leaves ($h=35$ cm), covered with black cheese-cloth, ■: mature plant leaves ($h=90$ cm)).

すると以下になると考えられる。(1) 葉温が約 -2°C 以下になるまでは結露があっても凍結しない、(2) 露点温度が約 -2°C から約 -4°C の場合には、葉温が露点温度付近になると凍結を始める、(3) 露点温度が約 -4°C 以下の非常に乾燥している場合には、葉面には結露・結霜がなくても葉温が -4°C 付近で凍結を開始する、ということである。なお、図中の折れ線は、3.5節で凍結開始を推定する際に利用した関係である。

植物体の凍結開始は偶発的で、室内実験の同一の条件でも凍結開始温度はかなりの幅になることが知られている(羽生ら, 1986; 岡野ら, 1989)。今回の凍結開始時の葉温は約 -2°C から -4°C という比較的高く狭い範囲になった。木本類の凍結に関しては, Andrews *et al.* (1986) はモモの枝について, 供試サンプルが大きくなると凍結開始温度が高くなることを指摘している。また, Ashworth *et al.* (1985) は晩霜期の野外のネクタリン樹の枝について -0.5°C から -2.6°C というかなり高い凍結開始温度を報告している。今回の茶樹でも凍結開始時の枝の温度はほぼ同程度であった。鈴木ら (1985) による切り枝を用いた室内実験(2月で -11°C 程度)と比較して, 野外での茶樹の凍結開始の温度範囲がかなり高く狭い範囲に集まるのは, 凍結可能な過冷却状態にある枝条が多数存在して凍結の機会が多く, また, 樹体の一ヶ所で始まった凍結が過冷却している樹体に急速に伝わるためと考えられる。

牧野 (1985) は静岡県において, 野外の茶芽の氷核活性細菌の季節変化を調べ, その細菌の氷核形成の最高温度は -2°C で平均形成温度は -2.7°C であったことを報告している。本研究における露点が約 -4°C 以上の条件について, 葉温が露点温度付近で凍結を開始したのは, 株面の葉面で生じた結露が凍結する(凍露), あるいは昇華による結霜が生じたりして, その植水作用によって葉内が凍結を始めたと考えられる。Anderson *et al.* (1987) はモモの枝の内部に氷核活性細菌と同等の高い氷核活性をもつ物質が存在することを示唆しており, この物質が乾燥した日の茶樹の凍結の下限値を葉温で -4°C (枝の温度で約 -2 から -3°C)程度に規定している可能性がある。

本研究の茶樹成木の凍結開始のデータは, 耐凍性が最も高い時期についてである(築瀬ら, 1974)。晩霜期の葉の凍結開始温度については, 鈴木ら (1985) は室内実験で, 新葉は成葉より高い温度で凍結を開始することを報告しており, 野外においても新葉の凍結開始温度は今回の結果より高くなって, さらに狭い温度範囲で凍結が始まる可能性がある。また, 劉ら (1991) は氷核活性細菌は高温で経過すると凍結核活性を失うことを報告しており, 晩霜期の凍結開始の実態の解明が望まれる。

3.4 成木樹体の融解の特徴と気象条件

Fig. 8 に, 融解時の株周辺の温度分布の例を示す。図Aは株頂部の枝(直径24mm)が融解を開始した時刻の温度分布で, 株頂部の葉身は既に融解した部分とまだ凍結した部分が混在する状態で, 樹体の最低温度の部位は株元になっている。この株頂部の枝は, 融解の開始から終了までに11分を要した。図Bは同じ朝について, 株元樹幹部の枝(直径19.4mm)の融解が完了した時刻の温

Fig. 8. An example of temperature distribution at the thawing of a mature tea plant in a clear morning (Jan. 22, 1989).

(A) At the start of thawing at the top stem.
(B) At the end of thawing at the bottom trunk.

度分布である。株元の融解は株面より大きく遅れ, 株元が融解を終えた時には葉身の温度は約 4°C になっている。この日の株元の枝の融解は開始から終了までに25分を要した。株元が融解終了頃の温度分布は, 高さ約20cm以下の地面に近いところでは, 地中温度が高く, 地際部の温度が最低で夜間の温度分布の特徴が残っているが, 株面では日射も強まっているので, 葉温が高い昼間の分布形になっている。

Table 1に, 株頂部と株元樹幹部の2箇所の枝について, 最低気温発現時刻($t_{\min}$)の気象条件, そして樹幹部の融解が終了した時刻(t_{thaw})の気象条件を示した。株元樹幹部の融解所要時間(P_{thaw})は, 幼木では数分程度で短い, 成木では非常に時間がかかり, 1月25日, 1月30日, 1月31日では表層部が融解しても地際ではさらに2-3時間後に融解が終了した。また, 1月28日, 29日, 2月4日のように, 昼間の気温上昇が小さいときには, 樹幹部は凍結したまま翌日あるいは翌々日まで続く場合もあった。これらのうち, 1月29日, 2月4日では株面の葉層は昼間には融解していたが, このような状態は地下からの水分移動が制限されているので, 特に乾燥・強風条件下では水分欠乏のストレスが促進されると思われる。

最低気温が低い場合には, 株元における凍結した水分

Table 1 Micrometeorological conditions at the minimum temperature occurrence and at the completion of thawing at tea bush bottom trunk (1/21–2/4, 1989).

At Minimum Temperature Occurrence							At Completion of Thawing of Bottom Trunk							
Date	$t_{\min}$	Rn	U_{150}	Ta_{150}	Tl_{TOP}	T_{BOT}	Date	t_{thaw}	P_{thaw}	Rn	U_{150}	Ta_{150}	Tl_{TOP}	T_{BOT}
1989	(JST)	(W/m ²)	(m/s)	(°C)	(°C)	(°C)		(JST)	(min)	(W/m ²)	(m/s)	(°C)	(°C)	(°C)
1/22	7:30	−60.0	0.54	−1.8	−3.3	−0.8	1/22	8:40	25	72.9	0.75	1.6	3.8	−0.2
1/25	7:05	−57.1	0.38	−4.6	−7.4	−5.0	1/25	11:00	77	381.4	1.04	5.7	7.2	0.2
1/26	1:00	−70.0	0.22	−2.1	−4.4	−1.3	1/26	8:10	197	18.6	1.36	3.5	3.4	0.2
1/28	7:30	−57.9	1.26	−3.9	−4.9	−2.9	1/28	(Freeze continued, $Ta_{150\max} = -1.1$)						
1/28	21:40	−81.4	0.80	−5.5	−7.6	−3.8	1/29	(Freeze continued, $Ta_{150\max} = 0.7$)						
1/30	1:25	−67.1	0.45	−5.6	−8.7	−5.1	1/30	10:25	83	295*	(0.9)*	3.8	9.5*	0.3
1/31	5:55	−61.0	0.10	−4.8	−8.3	−5.0	1/31	10:40	80	307*	(1.2)*	8.1	11.8*	0.3
2/04	1:45	−69.2	0.39	−5.1	−8.2	−4.7	2/04	(Freeze continued, $Ta_{150\max} = 2.9$)						

(Note) T_{BOT} : stem temperature at the bottom trunk.

P_{thaw} : period from the start to the completion of thawing at the bottom trunk.

$Ta_{150\max}$: daily maximum air temperature at 150 cm.

*: Interpolated Estimates from hourly data.

量が多くなるので、融解が遅れる方向に働くと考えられる。しかし一方、最低気温が低い日には晴れて風が弱いことが多く、このような条件の日の翌朝は、日射も強く昇温が大きくなるので、逆に融解速度を早める働きもある。最低気温時の株元樹幹部の温度とその部位の融解所要時間、融解終了時刻との関係については、低温になる日には融解が遅れる場合が多いが、明らかな関係は得られなかった。

3.5 気象条件からの樹体の凍結の推定の可能性

樹体の凍結開始は、株面表層の枝の中に小孔をあけて熱電対を挿入して茎温を測る方法で比較的確実に検出できるが、ここでは、株頂部の凍結開始を気象条件から推定するいくつかの簡易な方法について考察した。

方法(1) 株頂部葉温 Tl_{TOP} とその周辺の露点温度 $Tdew_{TOP}$ の観測値を用いる。

Fig. 7 に示した破線は、露点によって凍結開始温度が変化する様子を簡略な形で表わしたものであるが、この破線のように、

$$Tdew_{TOP} \geq -1.9^{\circ}\text{C} \text{ のとき } Tl_{TOP} \leq -2.1^{\circ}\text{C}$$

$$-1.9 > Tdew_{TOP} \geq -3.5^{\circ}\text{C} \text{ のとき}$$

$$Tl_{TOP} \leq Tdew_{TOP} - 0.2^{\circ}\text{C}$$

$$-3.5 < Tdew_{TOP} \text{ のとき, } Tl_{TOP} \leq -3.7^{\circ}\text{C}$$

となる最初の時刻を凍結開始時刻とする ($tf1$)。

方法(2) 高さ 150 cm の気温 Ta_{150} 、純放射量 Rn 、風速 U_{150} 、露点 $Tdew_{150}$ から推定した Tl_{TOP} 、 $Tdew_{TOP}$ の値を用いる。 Tl_{TOP} 、 $Tdew_{TOP}$ は以下の式で求める。

$$Tl_{TOP} = Ta_{150} + A1 Rn U_{150}^{-0.5} \quad (2)$$

$$Tdew_{TOP} = A2 Tdew_{150} + A3 \quad (3)$$

定数 $A1$ には 0.0227 を、 $A2$ 、 $A3$ には晴天で弱風の夜間のデータから直線回帰によって求めた $A2 = 1.095$ 、 $A3 = -0.61$ を使用した。これを方法(1)の判定条件にかけて

それを満たす時刻を凍結開始時刻の推定値 ($tf2$) とする。

また、参考として以下の単純な方法についても調べてみた。

方法(3) Ta_{150} が -0.9°C (凍結開始時の平均値) 以下になった時刻を凍結開始時刻の推定値 ($tf3$) とする。

方法(4) Tl_{TOP} が -2.8°C (凍結開始時の平均値) 以下になった時刻を凍結開始時刻の推定値 ($tf4$) とする。

方法(5) Tl_{TOP} の高さ 150 cm 気象条件からの推定値を使用する。 Tl_{TOP} の推定値を(1)式で求め、それが -2.8°C になったときを凍結開始時刻の推定値 ($tf5$) とする。

Table 2 に凍結開始時の気象データ(5 分間平均値)および上記の方法による推定時刻($tf1$ から $tf5$)を示す。株頂部付近の水蒸気圧のデータは 2 月 3 日までの期間しか得られなかった。誤差を RMSE (平均 2 乗誤差の平方根: Root Mean Square Error) でみると、 Tl_{TOP} と $Tdew_{TOP}$ に推定値を用いる方法(2)では 21 分である。また、高さ 150 cm 気温だけを用いる方法(3)の場合には、葉温低下速度の絶対値 $|dTl/dt|$ が大きい日には誤差は比較的小さいが、2 月 10 日や 2 月 19 日のように $|dTl/dt|$ が小さな日には極端に大きくなる場合もあり、 Ta_{150} だけでは安定した推定は無理のようである。 $tf4$ や $tf5$ は葉温 (あるいはその推定値) だけを用いた推定であるが、RMSE はそれぞれ 17 分、22 分と比較的小さかった。湿度データを併用する方法(1)、(2)は、RMSE が小さく極端な誤差を生じないので信頼性が高はと考えられる。

このように株頂部の葉温と露点温度が実測あるいは推定できれば冬季の樹体の凍結開始時刻の推定は可能である。晩霜期の凍結に関しては、凍結開始温度が冬季と多少異なることが考えられる。晩霜害が発生する静穏な快

Table 2 Comparison of estimates for the freeze initiation at the top of tea bush using meteorological elements (1/21–2/19, 1989).

Condition at freeze initiation						Estimated time of freeze initiation (JST) and differences (min)				
Date	Time (JST)	Tl (°C)	Rn (W/m ²)	U (m/s)	$\Delta Tl / \Delta t$ (°C/min)	$tf1$	$tf2$	$tf3$	$tf4$	$tf5$
1/21	6:35	-2.6	-87	0.70	-5.9($\times 10^{-2}$)	6:40(+5)	6:30(-5)	6:30(-5)	6:30(-5)	6:20(-15)
1/24	19:10	-3.3	-76	0.15	-4.1	19:00(-10)	18:40(-30)	19:05(-5)	19:00(-10)	18:30(-40)
1/25	19:35	-2.1	-66	0.72	-0.5	19:45(+10)	19:05(-30)	19:45(+10)	20:05(+30)	18:55(-40)
1/27	17:40	-3.5	-96	0.79	-5.5	17:45(+5)	18:00(+20)	17:30(-10)	17:35(-5)	17:35(-5)
1/29	17:45	-3.5	-64	0.25	-7.3	17:20(-25)	17:20(-25)	17:35(-10)	17:25(-20)	17:20(-25)
1/30	17:50	-3.5	-79	0.30	-7.1	17:30(-20)	17:25(-25)	17:55(+5)	17:35(-15)	17:25(-25)
2/03	17:40	-2.2	-71	0.73	-4.3	17:40(0)	17:35(-5)	17:40(0)	18:15(+35)	17:40(0)
2/10	23:35	-1.8	-37	1.27	-1.9	—	23:35(0)	22:00(-95)	23:40(+5)	23:35(0)
2/11	18:20	-2.5	-54	0.12	-5.3	—	18:00(-20)	19:15(+55)	18:05(-15)	18:00(-20)
2/12	18:20	-2.8	-80	0.13	-6.6	—	18:00(-20)	18:10(-10)	18:05(-15)	18:00(-20)
2/13	19:35	-2.0	-41	0.54	-2.4	—	19:05(-30)	20:20(+45)	19:15(-20)	19:15(-20)
2/14	18:20	-2.9	-89	0.62	-7.6	—	18:20(0)	18:35(+15)	18:10(-10)	18:20(0)
2/19	18:40	-2.6	-86	0.53	-1.7	—	18:20(-20)	19:45(+65)	18:35(-5)	18:20(-20)
Root mean square error (min)						(13.5)	20.7	38.2	17.3	22.0

(Note) $tf1$: Estimates using observed Tl and $Tdew_{TOP}$.
 $tf2$: Estimates using Rn , U_{150} , Ta_{150} and Ea_{150} .
 $tf3$: Time when observed $Ta_{150} < -0.9^{\circ}\text{C}$.
 $tf4$: Time when observed $Tl < -2.8^{\circ}\text{C}$.
 $tf5$: Time when calculated $Tl < -2.8^{\circ}\text{C}$.

晴の夜間の凍結開始時刻の推定については、温度低下速度が大きいため、上式の凍結開始温度の設定をそのまま用いても大きな時刻差にはならないと推察される。

次に、融解の推定についてであるが、葉身の融解時には葉温が0℃付近に維持される時間はほとんどなく、周りの環境変化によく追従することがわかったので、葉温の推移が推定できれば、葉内の組織氷点を仮定してその温度まで昇温した時点で融解が開始・終了するとみなして実用上問題は無いと思われる。しかし、株元地際部については、融解の開始から終了までの時間が長く、融解終了を推定するためには、樹体の凍結水分量を把握する必要があると思われ、気象条件だけを用いて推定するのはかなり困難であると考えられる。

4. ま と め

成木茶園における冬季・夜間の株周辺の温度分布と樹体の凍結・融解の実態について調べた。株面上で最低温度になる部位は、気流の影響を大きく受け、水平な場所に植栽された株では、頂部から風下側肩部が最も低温になることが多く、傾斜面の等高線うねでは谷側の肩部から裾部が最も低温になることが多かった。高さ150 cm気温と株頂部葉温との温度差 ΔT と、風速 U_{150} 、純放射量 Rn との関係を、 $\Delta T = A U_{150}^{-0.5} Rn$ という式で表現した場合、係数 A の値は、突出枝が多い株面では0.0227 ($\text{J}^{-1} \text{C} \text{m}^{2.5} \text{s}^{0.5}$)、突出枝のない株面では0.0320となった。この式は、晴天で風が弱く、 Rn が約 -90 W/m^2 、

U_{150} が0.3 m/sという条件では、 ΔT が約 -4°C (突出枝が多い)、約 -5.5°C (突出枝なし)になることを示す。

1月–2月下旬の観測期間中、凍結が生じた夜には地上部全体が凍結し、凍結が全体に波及するのに要する時間は約20分から1時間数十分で、幼木よりも長かった。株頂部葉身の凍結開始温度とその周囲の露点温度との関係は、幼木で得られた関係と大差がなく、凍結開始のメカニズムは幼木と同様に最も低温となる部位の葉温とその周囲の露点温度によって決まると考えられた。すなわち、葉温が約 -2°C 以上であれば葉面に結露があっても凍結せず、葉の周囲の露点が約 -2°C から約 -4°C のときには葉温が露点付近になると凍結を始め、葉の周囲の露点が -4°C 以下の乾燥した夜では葉面に結露・結霜がなくても葉温が -4°C 付近で凍結を開始する、ということである。

樹体の融解終了時刻は、株元の樹幹部で最も遅くなった。最高気温が約 3°C 以下の日には、株面の葉層が融解しても株元の樹幹部では凍結したまま翌日に続く状態がしばしば現われた。この状態では、乾燥・強風が伴う場合には、水分欠乏ストレスが促進されると思われる。

冬季の凍結開始時刻を気象条件から推定する簡単な方法について考察したところ、株頂部葉温とその周囲の露点データを用いると、RMS誤差で約20分程度で推定できることがわかった。今後、晩霜期における樹体の凍結–融解現象の解明が望まれる。

謝 辞

本研究の観測にあたって測定場所の長期の使用をご快諾いただいた、当時の奈良県農業試験場茶業分場長 中義次氏に深く感謝いたします。また、夜間観測の際には茶業分場の職員の方々に便宜をはかっていただきました。大阪府立大学農学部の大谷 憲氏には計測器関係でアドバイスをいただきました。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- Anderson, J. A., Ashworth, A. N. and Davis, G. A., 1987: Nonbacterial ice nucleation in peach shoots. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **112**, 215–218.
- Andrews, P. K., Proebsting, Jr., E. L. and Gross, D. C., 1986: Ice nucleation and supercooling in freeze-sensitive peach and sweet cherry tissues. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **111**, 232–236.
- Ashworth, E. N., Anderson, J. A., Davis, G. A. and Lightner, G. W., 1985: Ice formation in *Prunus persica* under field conditions. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **110**, 322–324.
- 馮 玉香, 羽生寿郎, 岡野通明, 中山敬一, 今 久, 1989: 作物の霜害に及ぼす氷核活性細菌の影響について. *農業気象*, **45**, 7–12.
- 羽生寿郎, 松岡延浩, 今 久, 中山敬一, 1986: 第2報 ダイズ苗葉面の乾湿が凍結温度に及ぼす影響. *農業気象*, **41**, 331–335.
- 原田重雄, 中山 仰, 1961: 凍結・融解の速度と寒害発生との関係について. *茶業技術研究*, **25**, 11–15.
- 北浦 澄, 1967: 晩霜による桑の凍結および被害に関する研究. *蚕糸試験場報告*, **22**, 207–328.
- 牧野孝宏, 1985: 茶樹新芽の霜害と氷核活性細菌. *植物防疫*, **39**, 14–17.
- 岡野通明, 羽生寿郎, 中山敬一, 今 久, 1989: ダイズ苗葉の凍結温度への葉面露量の影響. *農業気象*, **44**, 275–280.
- 劉 志民, 岡野通明, 中山敬一, 羽生寿郎, 今 久, 松岡延浩, 1991: 氷核活性細菌 *Pseudomonas syringae* の氷核活性に及ぼす培養温度の影響について. *農業気象*, **47**, 11–14.
- Sakai, A. and Larcher, W., 1987: *Frost survival of plants*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 284.
- 鈴木義則, 青木正敏, 山本晴彦, 関谷次郎, 1985: 茶樹耐凍性の季節変動に関する研究(2) 温度環境と凍結温度の変化. *九州の農業気象*, 第**21**号, 61–62.
- 高橋恒二, 青野英也, 田中静夫, 築瀬好充, 吉川 茂, 1961: 茶樹の凍霜害に関する研究, 降霜時の微細気象と凍霜害の応急的ならびに栽培的防止法の研究. 東海近畿農業試験場研究報告, 茶業部**8**, 30–162.
- Takaichi, M., 1989: Nature of frost damage distribution in tea gardens – a case study of the frost damage on 9 may 1988 in Nara Prefecture. *Bull. Univ. Osaka Pref.*, Ser. B, **41**, 51–60.
- 高市益行, 米谷 力, 1990: 幼木茶園における温度分布と樹体の凍結. *農業気象*, **46**, 71–77.
- 鳥屋尾忠之, 家弓実行, 勝尾 清, 松下 繁, 1974: チャの耐寒性の品種間差異と早期検定. *茶業試験場研究報告*, **9**, 1–72.
- 山中捷一郎, 羽生寿郎, 西山 司, 中山敬一, 1982: 作物の霜害と環境条件 第1報 ダイズ苗の霜害と凍結温度との関係. *農業気象*, **38**, 23–28.
- 築瀬好充, 青野英也, 杉井四郎, 1974: 茶樹の越冬傷害の発生機構とその防止法. *茶業試験場研究報告*, **10**, 1–90.
- 吉田静夫, 酒井 昭, 1967: 植物の凍害におよぼす融解速度の影響 I 急速融解の害. *低温科学, 生物篇*, **25**, 23–31.