冬季の夜間におけるソラマメ葉の熱収支について

高 市 益 行

(大阪府立大学農学部)

Nocturnal Heat Budget of a Broad Bean Leaf During Mid-winter

Masuyuki TAKAICHI

(College of Agriculture, University of Osaka Prefecture, Sakai 591)

1. ま え が き

冬季・夜間には天空に露出した植物体の温度（葉温，芽の温度など）は周囲の気温より低くなっており，その温度差は植物体と周辺気層の間の熱収支の結果で決まる。この差は葉面でも通常1–3℃程度の限られたものであるが，植物の耐寒性の限界付近ではこの程度の温度差でも低温被害の有無に関わる場合がある。また，植物の耐寒性はふつう温度だけで議論されることが多い。しかし，植物体温が同じであってもその平衡温度を決定する熱収支の状態が異なれば，植物の受ける影響は違ってくると思われる。このように，凍霜害・寒害などの低温被害を検討する際には，単に温度だけではなく周辺空気との間の熱収支についても検討することが望ましい。

植物体の熱収支に関する研究は，葉面については，光合成・蒸散といった観点から風洞を用いて多くの精密な実験がなされており，長谷場（1984）に詳しくまとめられている。しかし，Turrell（1962）に見られるような夜間の野外を対象にした葉面の熱収支の基礎的研究は少ない。一方，凍霜害・寒害の防除の立場からは，従来より葉や芽における熱収支が検討されてきた（中川，1960；Businger，1965；Hamer，1986）。しかしそのほとんどは散水氷結法における必要散水量の算出を目的としたものである。結霜や凍結–融解現象は植物の低温被害に密接に結びつくとしてされているが，このときの植物体の熱収支の実態に関しては明らかに資料が不足している。

本研究では，冬季・夜間の野外における葉面上の熱収支の実態に関する基礎的資料として，ソラマメの葉を用いて，まず，葉面の熱収支項の夜間推移パターンについて調べ，葉の凍結時間中の熱収支項を評価してみた。次に，冬季における葉面の結霜の頻度や熱収支各項の変動

範囲を調べ，比較的低温になった場合の葉面の熱収支の特徴について検討した。

2. 材料および観測・解析方法

2.1 材料および観測方法

観測は大阪府立大学構内の実験圃場で行った。ソラマメ (*Vicia Faba* L., 品種：ばしょう成り一寸) 幼苗の葉を用いて葉面の熱収支を調べた。ソラマメは大阪近県でも冬季にしばしば寒害を受けることがある。

1985年–1986年の冬季に，実験圃場の一部にソラマメを12m畝に3列栽培した（12月6日定植，畝間約90cm，株間40cm）。その中央部にある株から天空に十分露出した葉を1枚選んで水平に固定し，解析の対象とした。測定葉の横に模型葉（同形の黒色アルミ板）を並べ，蒸散量の評価に利用した。Fig.1に測定葉と模型葉の略図を示す。0.1mm T型熱電対を測定葉の裏面中央部の1点に貼り付けて葉温 T_l を測定した。葉の下1cmで気温 T_a を測定した。葉の横30cmで熱電対通風乾湿計を用いて水蒸気圧 e_a を測定した。葉面高さでの風速 U を無指向性の熱線風速計（日本科学工業 Model 6071）で，葉身の縁の横7cmで測定した。

葉面が結露・結霜状態にあるかどうかは，測定葉と模型葉の温度変化や模型葉に貼り付けた結露センサーの抵抗値変化などから以下の基準により判別した。

(i) 凍結の有無は葉温が一時的に気温よりも高くなることでわかる。凍結時に凍露であったかどうかは，その横に並べた模型葉の温度に結露水の凍結による昇温が見られるかどうかで判断した。

(ii) 葉が凍結していない場合， $e_l < e_a$ （ここで e_l は葉温での飽和水蒸気圧）， $T_l \geq 0^\circ\text{C}$ の時は結露状態とした。しかし $e_l < e_a$ ， $T_l < 0^\circ\text{C}$ の時は，葉内が凍結せず葉面が結霜している状態と，過冷却した結露状態の両方が考えられるので，このときは判別不能とした。

(iii)すでに葉が凍結している場合、 $e_l < e_a$ のときは結霜状態とした（葉内が凍結し葉面が結露している状態は凍結時の葉温からみて考慮しなかった）。 $e_l \geq e_a$ のときには結露・結霜のない凍結とした。

また、参考までに、地面付近の気層の安定度の目安として、地上1 m、3 mの高さの風速・気温からリチャードソン数 Ri を計算した。解析期間は1986年1月10日～2月28日の冬季の50日間である。この間、測定葉は同一で大きさや高さに変化はなかったが（大きさ：2.6 cm×3.8 cm、高さ：うね上面から4 cm）、2月10日以降は、茎頂部が若干生長した（葉の展開までには至らなかった）。測定葉は凍結－融解を何度も繰り返したが、外観上の異常は認められなかった。

なお、ソラマメの葉は凍結すると膨圧を失って垂れ下がるが、本報では葉を水平に固定して熱交換を調べた。

Fig. 1 The artificial model leaf (a) and the broad bean leaf (b) measured for heat budget. Both leaves were supported horizontally. (leaf size: 2.6cm×3.8cm)

2.2 熱収支項の計算方法

個葉の熱収支式の基本型は一般に用いられる式 (Businger, 1965; 武智, 1968; Barfield et al., 1981) に葉内水分の凍結潜熱の項を加え、次のように置いた。

$$R_n = S + lE + C \frac{dT_l}{dt} + l_f I \quad (1)$$

ここで、 R_n ：葉面の純放射量、 S ：顕熱フラックス、 l ：水の相変化に伴う潜熱（蒸発潜熱： l_v 、融解潜熱： l_f ）、 E ：単位葉面積・単位時間あたりの蒸発（あるいは結露、結霜）量、 C ：単位葉面積あたりの熱容量、 T_l ：葉温、 t ：時間、 I ：葉内水分（結露水を含む）の単位時間あたりの凍結量である。潜熱 l は、結霜－昇華の相変化のときは $l = l_v + l_f$ となる。ここでは呼吸による生理熱は無視した。熱収支各項の符号は、 R_n は葉面からの損失を負に、 lE と S は受熱の場合を負にとった。

葉面の熱収支各項を計算する際、葉内水分が凍結して葉温が急上昇し、その後もとの葉温にもどるまでの間の非定常時と、それ以外の定常時とで計算方法を分けた。これは、小型純放射計（後述）を用いた R_n の測定値は精度があまり良くなかったため、定常時には R_n の測定値は使用せず、 S と lE をそれぞれ独自に求め、 R_n はその両者の和とした。非定常時では、 $l_f I$ が直接決定できず熱収支式の残差項となり、 R_n の測定値が必要になるので、やむなく R_n の測定値を使用した。したがって、非定常時の熱収支項の値は、大略の把握にとどまっている。

(1) 定常時の熱収支項の計算方法

定常時には、葉面の熱収支式は S 、 lE 、 R_n の3項で計算した。葉の凍結による葉温の非定常の変化が終ったときに $l_f I$ はほとんど0になったので (Fig. 6 参照)、一旦凍結した後の定常時にはそれ以上の凍結の進行は微少であると考えて、その後も S 、 lE 、 R_n の3項のみで計算した。

顕熱フラックス S は、葉の代表長と風速、葉－気温差から、層流の境界層輸送の式を用いて算出した。熱伝達係数 h を用いると S は、

$$S = 2h(T_l - T_a) \quad (2)$$

と表わせ、 T_l 、 T_a はそれぞれ葉温、気温である。係数の2は両面での熱交換を表す。 h は便宜上、自由対流熱伝達係数 h_n と強制対流熱伝達係数 h_f との和とした (長谷場, 1973)。すなわち、

$$h = h_n + h_f \quad (3)$$

h_n と h_f は、一般に次の形で表わされる。

$$h_n = A_1 (Pr Gr)^{0.25} k_a / D \quad (4)$$

$$h_f = A_2 (Pr)^{0.38} Re^{0.5} k_a / D \quad (5)$$

ここで、 A_1 、 A_2 ：定数、 Pr ：プラントル数、 Gr ：グラスホッフ数、 k_a ：空気熱伝導率、 D ：葉の代表長、 Re ：レイノルズ数である。係数 A_1 は上面、下面の平均値で0.53 (Gates, 1980) を用いた。 A_2 については、屋外に設置した風洞の気流中と自然気流中の両方の条件下で、上下両面を湿ったティッシュペーパーで挟んで完全湿面としたアルミ小円板の蒸発量の秤量値を基準にして算出した。すなわち、後述の(6)式の水蒸気拡散速度 D_w を求め、(7)式で h に換算し、 A_2 を決定したところ0.86となった。これは他の研究者の屋外における測定例よりも若干小さい (Pearman et al., 1972)。Fig. 2 は、その小円板の蒸発（結霜）量の計算値 E_e と秤量値 E_m とを比較した結果である。各点は冬季・夜間の約20分間の平均値で、その大部分は蒸発側にあり結霜側は2点しか得ていない。秤量値を基準にすると、 E_e は大きいときで約15%の違いが見られる。

つぎに、ソラマメ葉の潜熱フラックス lE の算出方法

であるが、結露あるいは結霜の場合には葉面は完全湿面とみなせ顕熱伝達と相似の形で計算できる。しかし、蒸散時には気孔の影響を考慮する必要がある。ここでは、気孔拡散速度を式に入れる方法ではなく、ソラマメ葉の横に蒸散のないアルミ模型葉（同形同大）を並べ、両者の温度差から算出する方法をとった。

まず、結露・結霜時の潜熱フラックスを $IE_{(-)}$ とすると、次式で計算できる。

$$IE_{(-)} = \rho D_w \frac{0.622}{P} (e_l - e_a) \quad (6)$$

ここで、 ρ ：空気密度、 D_w ：水蒸気拡散速度、 e_l ：葉面上の水蒸気圧、 e_a ：空気中の水蒸気圧、 P ：大気圧である。 D_w はThom(1968)やHamer(1981)と同様にして次式の関係を用いた。

$$D_w = 1.08 D_h = 1.08 h / C_P \rho \quad (7)$$

ここで D_h ：熱の拡散速度、 C_P ：空気のだ圧比熱である。

一方、蒸散時の潜熱フラックスを $IE_{(+)}$ とすると、これはソラマメ葉と模型葉の熱収支式を連立させて整理した次式より算出できる。

$$IE_{(+)} = 2 h_m (T_m - T_a) - 2 h (T_l - T_a) - 2 \epsilon \sigma (T_l^4 - T_m^4) \quad (8)$$

ここで、 $IE_{(+)}$ ：蒸散時の潜熱フラックス； h_m 、 h ：それぞれ模型葉、ソラマメ葉面上の熱伝達係数、 T_m ：模型葉の温度、 ϵ ：葉面の射出率でソラマメ葉、模型葉とも0.95とした、 σ ：Stefan-Boltzmann定数である。

定常時の葉面の純放射量 R_n は、顕熱と潜熱の和として算出した。

(2) 非定常時の熱収支項の計算方法

葉内水分の凍結が進行する20～30分間だけ非定常の計算方法を用いた。 IE と S は、定常時と同様に算出した。

R_n の計算には、小型純放射計（試作品、感部縦6mm×横32mm、ポリエチレン被覆）で葉の縁の横2cmでの純放射量を測定し、天空からの放射量のデータ（下側に黒体キャップをかぶせた純放射計による）を用いて、計算する方法をとった。この方法による R_n は、 S と IE の和よりも若干大きかったので、定常時と非定常時との間の変化を連続させるために非定常時の計算値に補正係数を掛けた。

貯留熱項 $C \cdot \Delta T_l / \Delta t$ は、次式（Turrell et al., 1962）によって求めた C と、自記記録から読み取った葉温変化速度から算出した。

$$C = c \times M / LA \quad (\text{J cm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) \quad (9)$$

$$c = (0.008W + 0.20) \times 4.186 \quad (\text{J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) \quad (10)$$

ここで、 C ：単位葉面積あたりの熱容量、 c ：葉の比熱、 M ：葉重（生重）、 LA ：葉面積、 W ：葉の含水率（%）で、夜間に採取した葉身のサンプルの生重、乾物重から求めた。

葉内水分の凍結潜熱 $l_f I$ は熱収支式の残差項として求めた。

3. 結果および考察

3.1 葉面の凍結温度と風速

1986年の解析期間（1月10日～2月28日）の気温経過を大阪管区気象台のデータを用いて平年値と比較すると、日最低気温はこの期間の大部分で平年を下回っており、特に2月の月平均値は平年より2.1℃も低く経過していた。解析期間の50日中、33日で測定葉（2.6 cm × 3.8 cm）の凍結が確認された。Fig.3は凍結時の葉温 T_f と葉面の高さでの風速 U との関係のみたもので、凍結時に結露していた場合（凍露）を黒丸、そうでない場合を白丸とした。 U が大きいときは凍結温度が低くならない傾向が認められ、葉身が-2.5℃以下まで過冷却するのは U が0.2 m/s以下の微風のときであった。羽生ら（1986）はダイズの葉を用いた室内実験で、葉面が結露していると非結露時に比べて平均して0.8℃高い温度で凍結することを報告している。しかし、本図の野外条件の場合、葉面の結露の有無による凍結温度の違いは区別できなかった。凍結温度のパラッキには、測定葉以外の部位からの凍結の伝播が関与している可能性も考えられる。

Fig. 2 Relationship between the estimated evaporation rate (E_e) and the weighed value (E_m) from wet disk surfaces in various size. Solid symbols are in natural wind and open symbols are in wind tunnel air flow at outdoor.

Fig. 3 Relation between freezing temperature of the broad bean leaf (2.6cm×3.8cm) (T_f) and wind speed at the leaf level (U). Open circles are occasions when the leaf surface without dew and solid circles are occasions when the leaf surface with dew.

Fig. 4 Nocturnal variations of Richardson number (Ri), the leaf and air temperatures (T_l , T_a), heat budget terms (R_n , S , IE) for the broad bean leaf of 2.6cm×3.8cm, and wind speed U , on a clear windy night (10–11 Jan. 1986). R_n , S and IE are net radiation, sensible heat flux and latent heat flux, respectively. U and T_a are the values for near the leaf. Arrows indicate the time of leaf freezing.

3.2 葉面の熱収支の夜間推移

3.2.1 強風下, 弱風下の葉面の熱収支の比較

Fig.4は強風であった1986年1月10日–11日の夜間, Fig.5はその翌日のほとんど無風であった1月11日–12日の観測結果である。両日とも測定葉は同一で2.6cm×3.8cmの大きさである。1月10日–11日の夜は快晴であったが季節風が強く、葉の近傍でも1m/s前後の風が吹いていた。リチャードソン数 Ri は、ほとんどの時刻で0.2以下で安定度は弱かった。一方、1月11日–12日の夜は、 U が0.1m/s以下の値を示した時刻が多く、 Ri は大きく、特に21時以降は0.5以上で安定度はかなり強かった。風が強い10–11日の夜では夕刻からの T_a , T_l の低下は小さかった。風が弱い11–12日では温度低下は大きく、18:00から6:00までの T_a と T_l の低下量はそれぞれ−8.0℃と−9.1℃であった。葉面付近の空気中の水蒸気圧と相対湿度の18:00から6:00の間の平均値は、10–11日では5.10 mb, 77%で、11

Fig. 5 Nocturnal variations of Richardson number, leaf and air temperatures, heat budget terms for the broad bean leaf, and wind speed, on a clear calm night (11–12 Jan., 1986). Abbreviates and the leaf size are the same as Fig. 4.

-12日では4.96 mb, 95%であった。

潜熱フラックス l_e は、風が強い10-11日の夜ではかなりの量の蒸散を示し、凍結した葉でも風速が大きいと脱水されることを示している。このため、風が強いにもかかわらず、葉-気温差(平均 -1.15°C)は風の弱い11-12日(平均 -1.34°C)と大差はない。このことは、乾燥した夜間では、風速の増大が葉-気温差を小さくする効果はあまりなく、防霜ファンも暖気の輸送の点では効果があるが葉-気温差を縮める効果は小さいことを示唆する。一方、風の弱かった11-12日の l_e を見ると、凍結約1時間後の20:30頃から結霜が始まり、その後 $-20 \sim -40 \text{ W/m}^2$ 程度になっている。この値は、Sevarini (1980)が観測した地表面の結霜の潜熱フラックスとほぼ同じ大きさであった。

顕熱フラックス S は、10-11日では $-60 \sim -110 \text{ W/m}^2$ 程度の範囲でかなり大きく、風の弱い11-12日の夜は $-30 \sim -40 \text{ W/m}^2$ の値である。

純放射量 R_n は、10-11日の夜は変動が大きく、夕刻から明け方まで $-40 \sim -70 \text{ W/m}^2$ の間で変動し、一定の変化傾向は示さなかった。ところが11-12日では R_n には夕刻から3:00頃までマイナス側で絶対値が増大し、その後減少する傾向があった。両夜とも葉面の R_n の変動傾向は草地表面上1.5 mで観測された純放射量の変動と一致していたので、静穏な夜に葉面の R_n の絶対値が明け方に向けて減少するのは、地表面温度の低下に伴う上向き放射量の減少によるものであろう。 R_n の絶対値の減少に伴って、明け方には S や l_e も小さくなる。

3.2.2 葉の凍結時間中の熱収支配分

凍結時間中の熱収支項を観測した例をFig.6に示す(1984年12月8日-9日)。測定葉の大きさは先の2例とは異なっている($2.5 \text{ cm} \times 4.9 \text{ cm}$)。この夜は葉面上でまず結露が見られ、その後葉温が下がって凍結し(凍露)、以後は昇華による結霜が続いた。風は夜間を通じて弱かった。

測定葉は -2.7°C まで過冷却したのち21:54に凍結した。葉温変化は典型的な凍結カーブを描いている。非定常時のみ計算した貯留熱 B と葉内水分の凍結潜熱フラックス $l_f I$ は、他の熱収支各項と分けて示した。凍結直後は葉温の上昇に伴って S , l_e は放熱側になり、 R_n の絶対値は大きくなっている。貯留熱 $B = C \Delta T_l / \Delta t$ は、昇温中は 1.9°C/min と昇温速度が大きかったので 44 W/m^2 になった。一方、凍結のピークが過ぎて T_l が低下するときは低下速度が小さいので -2 W/m^2 程度になり、これは本測定の誤差の範囲である。葉の表面についた露と葉内水分の凍結潜熱 $l_f I$ は、凍結した瞬間で -80 W/m^2 となっている。 $l_f I$ は凍結後30分でも多少認められ

Fig. 6 Nocturnal variations of Richardson number, leaf and air temperatures, heat budget terms for the broad bean leaf, and wind speed on a clear calm night (8-9 Dec. 1984). Where $l_f I$ is the latent heat flux of leaf water freezing, B is the heat storage in the leaf ($B = C \Delta T_l / \Delta t$). The leaf size is $2.5 \text{ cm} \times 4.9 \text{ cm}$. The other abbreviates are the same as Fig. 4.

た。 $l_f I$ のうちの露と葉内水分の占める割合は不明であるが、模型葉面上では露の凍結による昇温の時間は1分程度で短かったので、露の割合は小さいものとする。

3.3 最低気温発現時刻の葉面の状態と熱収支

観測期間の夜間における葉面の熱収支の状態を知るために、葉の周囲気温 T_a の最低値発現時刻 (t_{min}) の熱収支の変動について調べた (Fig. 6)。期間中 t_{min} の時刻では風の弱い日が多く、 R_i が0.2以上で安定な日が圧倒的に多かった。 R_i が小さく中立状態にある日は、 T_a はあまり低下しない。解析期間は平年よりかなり低温で経過したので、 T_l が -7°C 以下になる日(観測地としては非常に低温)が8日あった。葉が凍結しても、その後 T_l が -5°C 程度までしか低下しない場合には、朝になって融解した後すぐに葉の膨圧は回復したが、このような低温の後では膨圧の回復が午後まで遅れることもあった。圃場の一部の株では葉身の先から数mmが枯れる現象が見られたが、測定株およびその周辺の株では膨圧は正常

に回復し先枯れは起こらなかった。

t_{min} の時刻の葉面の状態を各測定要素の自記記録から判別し、本図(Fig.7)の R_i のグラフの下に記号で示した。50日中の45日が判別できた。葉面が結露も結霜もしていない状態にあった日(×, □)が20日、結霜状態(△, ▲)は22日、結露状態(●)は3日であった。結露・結霜のなかった日の半数で葉内水分の凍結がみられた(□)。結霜状態の日はすべて葉内の凍結があった。結霜状態のうちの半数は凍露の後の結霜で(▲)、残り半数が凍露の見られない結霜(△)であった。同じ表面状態が2-3晩続いて発生する傾向がみられる。今年の気象条件では凍露後の結霜と凍露のない結霜は偶然同数になり、

Fig. 7 Variations in Richardson number, air and leaf temperatures, heat budget terms for the broad bean leaf and wind speed, at the time of minimum air temperature (t_{min}) during the analyzed period. Symbols under the R_i panel indicate the state of the leaf; ×: Not frozen and dry, ●: Not frozen and wet with dew, □: Frozen and dry, △: Frozen and wet with frost, ▲: Frozen (with dew freezing) and wet with frost. Abbreviates and the leaf size are the same as Fig. 4.

観測現地では凍露の場合もかなりあることがわかった。

t_{min} の時刻の葉面の熱収支項の解析期間中の変動を見ると、 IE が蒸散側にある日は少なかった。2月10日以降は茎頂が生長を始め、その影響のため熱収支各項は徐々に小さくなっている。測定葉が天空に十分露出していた1月中では、 R_n の値は強く冷却される日で -60 W/m^2 程度、弱い時で -20 W/m^2 前後であった。

つぎに、特に低温となる日には熱収支各項はどの程度の範囲にあるのかを見るため、Fig.7のデータのうち、茎頂の生長がまだ始まっておらず、測定葉が天空に十分露出していた、2月10日までのデータを気温 T_a について整理した(Fig.8)。 IE は T_a が高いときは蒸散側にあり、低温の場合は結霜側にある。 S は T_a が高いときには値が大きくなる場合もあり、散らばりもふえる傾向にあった。このときには風速が大きい場合が多いが、Fig.4と同様に、風速が増加しても蒸散による潜熱損失のために葉-気温差はあまり変化しないので、風速の影響は S に直接でくる。 R_n には T_a に伴う傾向は特に認められなかった。 T_a が -4.0°C 以下の非常に低温となった場合を見ると、この測定葉($2.6 \text{ cm} \times 3.8 \text{ cm}$)については、 IE の受熱が $0 \sim 20 \text{ W/m}^2$ 、 S の受熱は $20 \sim 40 \text{ W/m}^2$ 、 R_n の熱損失は $30 \sim 60 \text{ W/m}^2$ 程度の範囲にあった。図示

Fig. 8 Changes of the heat budget terms and the other parameters with air temperatures near the leaf at t_{min} . Abbreviates and symbols are the same as Fig. 7.

しなかったが、 R_n の変動のパターンを草地表面上1.5 mでの純放射量と比べると、80–95%の若干小さい値になり、変動傾向は一致していた。

4. ま と め

圃場に栽培したソラマメ幼苗の葉を用いて、冬季・夜間の葉面における熱収支の特徴を調べた。葉の代表長、風速、葉–気温差から層流の熱伝達の式を用いて、葉面の熱収支各項を算出した。その結果をまとめると以下のようである。

(1) 葉の凍結温度は風速が大きいときには高くなる傾向が見られた。野外では葉面の結露の有無による凍結温度の違いは見出せなかった。

(2) 快晴・静穏で非常に低温になる夜は、冷却が進んだ明け方には葉面の熱収支各項の絶対値が小さくなる傾向が見られた。風の強い日は時刻経過に伴うそれらの変化傾向は見出せなかった。

(3) 空気が乾燥して風が強い場合には、凍結した葉でも脱水がおり、その潜熱は葉面高さでの風速が1 m/s以上では20–40 W/m²程度になる。このため、葉–気温差は風が強い割には小さくならない。

(4) 葉面が結霜状態に至る過程について、凍露の後の結霜と凍露のない結霜の起こった日数を調べたところ、今回の解析期間ではほぼ同数になった。

(5) 葉の周囲気温が–4℃以下の比較的低温になった時の葉面の熱収支各項の大きさは、2.6 cm × 3.8 cm程度の葉では結霜による受熱が0–20 W/m²、顕熱の受熱が20–40 W/m²、純放射量の損失が30–60 W/m²程度の範囲にあった。

謝 辞

本研究室の小元敬男教授、上和田勉助手には終始御助言と励ましをいただき、鯉谷憲教務技師には測器に関して御教示をいただきました。また、愛媛大学農学部の長谷場徹也教授から貴重な御助言を賜りました。記してここに感謝の意を表します。

引用文献

- Barfield, B. J., Walton, L. R. and Lacey, R. E., 1981: Prediction of sprinkler rates for nighttime radiation frost protection. *Agric. Meteorol.*, **24**, 1–9.
- Businger, J. A., 1965: Protection from the cold, Section 1 Frost protection with irrigation. *Meteorological monographs*, **6** (28), 74–80.
- Gates, D. M., 1980: *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag, New York, 611 PP.
- Hamer, D. J. C., 1986: The heat balance of apple buds and blossoms. Part II. The water requirements for frost protection by overhead sprinkler irrigation. *Agric. For. Meteorol.*, **37**, 159–174.
- 羽生寿郎, 松岡延浩, 今 久, 中山敬一, 1986: 作物の霜害と環境条件, 第2報 グ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.
- 長谷場徹也, 1973: 植物の蒸散に関する農業気象学的研究, 愛媛大学農学部紀要, **18**, 1–141.
- 長谷場徹也, 1984: 植物の葉面境界層輸送係数. 農業気象, **40**, 63–72.
- 中川行夫, 1960: 凍霜害対策の氷結法の散水量 — 植物の熱収支よりの決定 —. 農及園, **35**, 1325–1326.
- Pearman, G. I., Weaver, H. L. and Tanner, C. B., 1972: Boundary layer heat transfer coefficients under field conditions. *Agric. Meteorol.*, **10**, 83–92.
- Sevarini, M. and Olivieri, B., 1980: Experimental evaluation of latent heat flux during nighttime radiative hoarfrost. *Boundary-Layer Meteorol.*, **19**, 119–124.
- 武智 修, 1968: 植物の葉温と熱収支. 農業気象, **24**, 95–102.
- Thom, A. S., 1968: The exchange of momentum, mass and heat between artificial leaf and airflow in a wind tunnel. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **94**, 44–55.
- Turrell, F. M., Austin, S. W. and Perry, R. L., 1962: Nocturnal thermal exchange of citrus leaves. *Amer. J. Bot.*, **49**, 97–109.

Summary

Nocturnal heat budgets of a broad bean leaf were studied in field conditions during mid-winter by using the heat transfer equations for laminar flow. The heat budget terms of the leaf supported horizontally were estimated. The results were summarised as follows:

- 1) Freezing temperatures of the measured leaf (2.6 cm × 3.8 cm) were tended to be higher when wind was strong. Effect of the leaf surface dew on freezing temperature was not apparent.
- 2) Each value of the heat budget terms was fluctuated without trend by time on clear windy

night. On clear calm night, air and leaf temperatures dropped greatly. The values of the heat budget terms tended to decrease near dawn.

- 3) In the dry and windy conditions, the large amount of water was removed from the frozen leaf, so that the latent heat fluxes of the leaf reached to $20\sim40\text{ W/m}^2$ when wind speed was over 1 m/s (at the height of the leaf). Thus temperature difference between leaf and air became larger than the difference expected in case of no transpiration.
- 4) Number of days that have frost without frozen dew on the leaf were casually the same as the number of days that have frost with frozen dew during the analyzed period. It was sometimes occurred that dew on the leaf was frozen at this experimental site.
- 5) When the minimum air temperature near the leaf dropped below -4.0°C , the values of the heat budget terms for the leaf of $2.6\text{cm}\times 3.8\text{cm}$ were in the range of $0\sim-20\text{ W/m}^2$ for IE , $-20\sim-40\text{ W/m}^2$ for S , and $-30\sim-60\text{ W/m}^2$ for R_n , respectively.