無加温パイプハウス栽培におけるホウレンソウとコマツナの 秋から早春にかけての耐凍性の変化

田村 晃

秋田県農業試験場 010-1231 秋田県雄和町

Changes in the Freezing Tolerance of Spinach (*Spinacia oleracea* L.) and Komatsuna (*Brassica campestris* L.)
from Autumn to Early Spring in an Unheated Greenhouse

Akira Tamura

Akita Agricultural Experimental Station, Yuwa, Akita 010-1231

Summary

The relationships between freezing tolerance of spinach (*Spinacia oleracea* L.) and komatsuna (*Brassica campestris* L.) plants and air temperature, water content, and sugar concentration were investigated in an unheated greenhouses from autumn to early spring in 1996–99. Freezing tolerance was expressed as the temperature at which 15% (T_{EL15}) or 50% (T_{EL50}) of electrolyte leakage from leaf blade tissues occurred. The T_{EL15} and T_{EL50} of spinach and komatsuna decreased gradually from October to January. In the coldest season, the T_{EL15} and T_{EL50} were decreased to $-12 \sim -16^{\circ}\text{C}$ and $-13 \sim -18^{\circ}\text{C}$ in spinach, and $-12 \sim -14^{\circ}\text{C}$ and $-13 \sim -17^{\circ}\text{C}$ in komatsuna, respectively. From mid-February, the T_{EL15} and T_{EL50} of spinach and komatsuna increased with a rise of air temperature. There was a high correlation between the freezing tolerance and the mean minimum air temperatures for 7 days before the measurement were made. The freezing tolerance of spinach and komatsuna increased only slightly when the mean minimum air temperature was between 8 and 2°C , but increased considerably when the temperature decreased below 2°C . The changes in the freezing tolerance of spinach and komatsuna also correlated with leaf water content. The freezing tolerance increased as the leaf sugar content increased from 10 to $20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$ in spinach and from 10 to $35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ FW}$ in komatsuna. Further increases in sugar content had no effect on freezing tolerance in both species.

Key Words: freezing tolerance, komatsuna, low temperature, spinach, water and sugar content.

緒 言

北東北地域では、近年、夏秋トマトやキュウリ栽培等を主体にしてパイプハウス面積が拡大しつつある。しかし、これらのハウスの大部分は冬期には利用されていない。従って、遊休化しているハウスを利用して、周年的な農業生産体系を可能にするために、冬期における葉菜類生産技術を確立する必要がある。

北東北地域における冬期の最低気温は、沿岸部で -8°C 、内陸部で -15°C 程度になる。このため、冬期に無加温ハウスを使用し、凍結傷害を回避して葉菜類を栽培するためには、耐凍性に及ぼすハウス内気温の影響を明らかにし、その知見をハウスの温度管理等に反映させることが重要である。

耐凍性の季節変化に関しては、樹木類で詳細に研究されている(酒井, 1982)。しかし、草本作物の耐凍性の季節変化に関しては、コムギ(阿部, 1996)や牧草(内山, 1998)で多くの報告があるものの、葉菜類に関する報告は少ない。また、生育時の気温が葉菜類の耐凍性に及ぼす影響を解析した研究例は極めて少ない。

そこで、本研究では無加温ハウス栽培におけるホウレンソウとコマツナの秋期から早春期にかけての耐凍性の変化を1996/97年、1997/98年および1998/99年の3ヵ年にわたって調査し、耐凍性とハウス内気温との関係を解析した。

一方、植物の耐凍性機構に関する研究は生理学の分野において精力的に行われている。凍結傷害の初発部位とされる細胞膜においては、低温馴化に伴ってリン脂質の不飽和度が増加する(Uemuraら, 1995)。また、耐凍性には可溶性の糖が密接に関わっており(Sasakiら, 1996;

1998), 低温馴化に伴って増加する糖は液胞外に多く蓄積される (Koster・Lynch, 1992). さらに, 耐凍性の増大に伴い組織内の水の束縛度が増加するが (Yoshida ら, 1997), その束縛度の増加には糖が関与すること (吉田ら, 1998) が報告されている. これらの報告は, 耐凍性と生体膜や植物体内の水および糖が密接な関係をもっていることを示唆している. そこで, 本研究ではハウレンソウとコマツナの耐凍性の変化に伴って, 植物体内の水分および糖含量がどのように変化しているのかを調査した.

材料および方法

1. 供試材料の育成

ハウレンソウ (*Spinacia oleracea* L.) は 'ソロモン', コマツナ (*Brassica campestris* L.) は 'せいせん7号' を供試した. 耐凍性の変化を測定するにあたり, 生育ステージの違いに由来する耐凍性程度の差を排除するため, ほぼ一定の大きさ (ハウレンソウ, コマツナともに草丈が 20~30 cm) の個体を用いた. このため, 両作物を各年ともに 9~11 月にかけて時期をずらして播種し, 秋から早春にかけての長期間にわたる耐凍性測定時に, 一定の大きさの植物体が得られるようにした.

ハウレンソウとコマツナは秋田農試内の 100 m² のパイプハウス内で栽培した. 各年ともに, 第 1 回目の播種前に窒素, リン酸, カリをそれぞれ 1 kg・a⁻¹, 苦土石灰, ようりん, 稲ワラ堆肥をそれぞれ 10, 4, 200 kg・a⁻¹, ハウスの全面に施用した. 1 回当たりの播種面積は 15 m² 程度とし, 条間は 20 cm, 株間は 2~3 cm で手播きした. 間引きは本葉 2~4 枚時に行い, 株間を約 5 cm とした. また, 10 月以前および 2 月下旬以降はハウスのサイドを開放して換気を図り, 11 月から 2 月中旬にかけてはハウスを密閉した. ハウス内気温は直径 0.3 mm の銅・コンスタンタン熱電対を直径 5 cm の通風型塩ビ管内にセットし, ハウス内中央部で地上 1 m の地点を測定した.

2. 試料の採取

キャベツでは 3~6 時間程度の脱馴化処理 (15 °C, 20

°C, 25 °C / 暗処理) で耐凍性が低下することが知られている (Sasaki ら, 2001). そこで, 耐凍性の測定に供する試料の採取は脱馴化が起こるのを避けるために午前 8 時から 8 時 30 分の間に行った.

3. 耐凍性の評価

耐凍性は電解質漏出テストで評価した. 試料には下葉を取り除き, 内葉の展開した葉身部を供した. 試料の秤量, 凍結の誘発, 凍結 (2.5 °C・hr⁻¹ の速度で温度降下) / 融解 (暗黒下 4 °C), 電気伝導度 (EC) 測定などは前報 (田村, 2000) と同様の方法で行った.

ハウレンソウとコマツナの幼植物体では, 老化した下位葉を除いた葉身部において, 凍結傷害により葉片組織から電解質の 50% が漏出する温度 (T_{EL50}) は葉身部の大部分 (面積比 90% 以上) が傷害を受ける温度に相当し, 一方, 15% が漏出する温度 (T_{EL15}) は軽微な傷害 (面積比で 30% 以下) を受ける温度に相当する (田村, 2000). そこで, 耐凍性の評価は, 広く耐凍性の指標に用いられている T_{EL50} と T_{EL15} の双方で示した. 電解質漏出割合は次式により算出した.

電解質漏出割合 = (各凍結温度における EC - A) / (B - A)

A: 暗黒下, 4 °C で保存した非凍結試料の EC

(傷害率 0%)

B: 乳鉢で磨砕し, 細胞を完全に破砕した試料の EC

(傷害率 100%)

4. 葉身の水分および糖含量の測定

採取した試料を 80 °C で 24 時間通風乾燥し, 生体重当たりの水分含量を求めた. 糖含量の測定はアンスロン硫酸法 (田村, 1999) で行った.

結 果

第 1 図に 1996/97 年, 1997/98 年および 1998/99 年の 3 ヶ年におけるハウス内の最高, 最低および平均気温を示す. 最高気温は年次変動が 5~10 °C 程度と大きかった. 10 月には 23~30 °C で推移し, その後次第に低下して, 1 月上旬は最低の 6~12 °C となった. そして 2 月上旬以降

Fig. 1. Seasonal courses of the mean (△, 1996-97; ●, 1997-98; ■, 1998-99), the maximum (△, 1996-97; ○, 1997-98; □, 1998-99), and the minimum (▲, 1996-97; ●, 1997-98; ■, 1998-99) air temperatures in the greenhouse from September to March.

は上昇に転じ、2月下旬から3月下旬には15~25℃となった。最低気温は年次変動が2~5℃程度で、最高気温に比べ小さかった。10月には7~13℃で推移し、その後次第に低下して、12月下旬から2月下旬は最低の-4~0℃となった。3月上旬には上昇に転じ、-3~4℃となった。

第2図に曇天日(1999年1月8~10日)と晴天日(1999年1月22~24日)のハウス内気温の日変化を示す。1月8, 9, 10日の積算日射量はそれぞれ3.6, 3.3, 3.7 MJ·day⁻¹, 1月22, 23, 24日のそれはそれぞれ9.9, 6.2, 11.8 MJ·day⁻¹であった。曇天日には日中のハウス内気温の上昇はわずかであり、最低気温に近い温度の時間帯が長く続いた。晴天日においては9~12時にかけて気温が急激に上昇したが、20℃を越える時間帯は2~3時間で、15時頃からは急激に低下し、最低気温に近い温度の時間帯が長く続いた。

第3図にハウレンソウとコマツナの耐凍性の変化を示す。ハウレンソウの T_{EL15} は3年間を通してみると、

Fig. 2. Diurnal changes of air temperatures on cloudy (■, Jan. 8 to 10/1999) and sunny days (□, Jan. 22 to 24/1999) in the greenhouse.

Fig. 3. Changes in the freezing tolerance of spinach (A, T_{EL15} ; B, T_{EL50}) and komatsuna (C, T_{EL15} ; D, T_{EL50}) leaves. (Δ , 1996-97), ($\circ$, 1997-98), ($\square$, 1998-99).

10~11月上旬には約-5℃で、その後12月下旬にかけて次第に低下し、1~2月上旬は-12~-16℃となった。そして、2月中旬以降は次第に高まり、3月には-6~-11℃となった。 T_{EL50} は秋から早春にかけて T_{EL15} とほぼ同様の傾向で推移し、1~2月上旬には-13~-18℃となった。コマツナの T_{EL15} は3年間をとおしてみると、10~11月中旬には約-5℃で、その後次第に低下し、1~2月上旬には-11~-14℃となった。そして、2月中旬以降は次第に高まり、3月には-8~-12℃となった。 T_{EL50} は T_{EL15} とほぼ同様の傾向で推移し、1~2月上旬には-13~-16℃となった。なお、1998年10月12日の耐凍性測定時には、細胞外凍結を誘発するために-3.3℃で植氷し、その温度下に2時間放置した時点で、電解質漏出率がハウレンソウ、コマツナでそれぞれ21%, 23%であったので、 T_{EL15} は決定できなかった。

次に、耐凍性測定前3, 7, 10日間におけるハウス内の最高、最低および平均気温と T_{EL15} との関係を解析し、2次回帰式により求めた決定係数(R^2)を第1表に示す。ハウレンソウ、コマツナともに最低気温と T_{EL15} の間において最も高い相関関係が認められ、中でも、耐凍性測定前7日間および10日間の最低気温と T_{EL15} の間に極めて高い相関関係が認められた。なお、 T_{EL50} も T_{EL15} と同様に最低気温との間において最も高い相関関係が認められた(データ省略)。

第4図に耐凍性測定前7日間の平均最低気温とハウレンソウおよびコマツナの T_{EL15} , T_{EL50} との関係を示す。平均最低気温が8℃から2℃程度に低下するにつれて、ハウレンソウの T_{EL15} は-5℃から-7℃程度まで緩やかに低下し、平均最低気温が2℃以下になると、急激に低下した。 T_{EL50} も T_{EL15} と同様に平均最低気温が10℃から2℃

Table 1. The coefficient of determination (R^2) between the maximum, minimum or mean air temperature in the greenhouse and T_{EL15} of spinach and komatsuna leaves calculated by the quadratic regression.

Air temperature	Spinach			Komatsuna		
	3 days ^z	7 days	10 days	3 days	7 days	10 days
Mean maximum	0.367	0.516	0.618	0.261	0.371	0.469
Mean minimum	0.852	0.904	0.907	0.862	0.899	0.897
Mean	0.826	0.866	0.897	0.781	0.815	0.853

^z Number of days before the day of T_{EL15} determination. **Fig. 4.** Relationships between the mean minimum air temperatures during the 7 days before the measurement and the freezing tolerance of spinach (A, T_{EL15} ; B, T_{EL50}) and komatsuna (C, T_{EL15} ; D, T_{EL50}) leaves. ($\blacktriangle$, $\triangle$; 1996–97), ($\bullet$, $\circ$; 1997–98), ($\blacksquare$, $\square$; 1998–99). Open and closed symbols indicate that the data were obtained with plants that were or were not exposed to the daily minimum air temperature of below 0 °C during the 7 days before the measurement of freezing tolerance, respectively.

程度に低下するにつれて、緩やかに低下し、2 °C以下になると急激に低下した。コマツナの T_{EL15} は平均最低気温が 8 °C から 2 °C 程度に低下するにつれて、−4 °C から −6 °C 程度まで緩やかに低下し、平均最低気温が 2 °C 以下になると、急激に低下した。 T_{EL50} も T_{EL15} と同様に最低気温が 10 °C から 2 °C 程度に低下するにつれて、緩やかに低下し、2 °C 以下になると急激に低下した。なお、平均最低気温が 2 °C 付近における耐凍性測定前 7 日間の日最低気温は −3.8~7.8 °C の範囲にあったが (データ省略)、ハウレンソウ、コマツナともに 0 °C 以下の最低気温に遭遇すると耐凍性が急激に増大する傾向がみられた。

第 5 図に耐凍性測定前 7 日間の平均最低気温とハウレンソウ、コマツナ葉身の水分含量との関係を示す。ハウレンソウの水分含量は平均最低気温が 10 °C から 2 °C 程度に低下するにつれて、約 92 g $H_2O \cdot 100 g^{-1}FW$ から 91 g

$H_2O \cdot 100 g^{-1}FW$ に緩やかに減少したが、2 °C 以下になると急激に減少した。コマツナの水分含量は平均最低気温が 10 °C から 2 °C 程度に低下するにつれて、約 93 g $H_2O \cdot 100 g^{-1}FW$ から 91 g $H_2O \cdot 100 g^{-1}FW$ に緩やかに減少したが、2 °C 以下になると急激に減少した。

第 6 図に耐凍性測定前 7 日間の平均最低気温とハウレンソウ、コマツナ葉身の糖含量との関係を示す。両作物ともに平均最低気温が 8~4 °C 程度に低下するにつれて、糖含量は 10 mg $\cdot g^{-1}FW$ から 12 mg $\cdot g^{-1}FW$ に緩やかに増加した。しかし、平均最低気温が 0 °C を下回ると糖含量は急激に高まった。

第 7 図にハウレンソウとコマツナ葉身の水分含量と耐凍性との関係を示す。3 年間を通して両作物ともに水分含量と T_{EL15} 、 T_{EL50} との間には正の相関関係が認められ、水分含量が低下すると T_{EL15} 、 T_{EL50} が低下した。第 8 図に

ホウレンソウとコマツナ葉身の糖含量と耐凍性との関係を示す。ホウレンソウでは糖含量が $10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ から

Fig. 5. Relationships between the mean minimum air temperatures during the 7 days before the measurement of freezing tolerance and the water content of spinach (A) and komatsuna (B) leaves. Symbols are the same as those in Fig. 3.

$20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 程度に高まるのに伴って $T_{\text{EL}15}$, $T_{\text{EL}50}$ が低下した。しかし、糖含量が $20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 以上に高まっても $T_{\text{EL}15}$, $T_{\text{EL}50}$ は変化しなかった。コマツナでは糖含量が $10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ から $35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 程度に高まるのに伴って $T_{\text{EL}15}$, $T_{\text{EL}50}$ が低下した。しかし、糖含量が $35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ 以上に高まっても $T_{\text{EL}15}$, $T_{\text{EL}50}$ は変化しなかった。第9図にホウレンソウとコマツナ葉身の水分含量と糖含量との関係を示す。両作物ともに水分含量が $91 \text{ g H}_2\text{O} \cdot$

Fig. 6. Relationships between the mean minimum air temperatures during the 7 days before the measurement of freezing tolerance and the sugar content of spinach (A) and komatsuna (B) leaves in 1998–99.

Fig. 7. Relationships between the water content and the freezing tolerance of spinach (A, $T_{\text{EL}15}$; B, $T_{\text{EL}50}$) and komatsuna (C, $T_{\text{EL}15}$; D, $T_{\text{EL}50}$) leaves. Symbols are the same as those in Fig. 3.

Fig. 8. Relationships between the sugar content and the freezing tolerance of spinach (A, T_{EL15} ; B, T_{EL50}) and komatsuna (C, T_{EL15} ; D, T_{EL50}) leaves in 1998–99.

100 g⁻¹FWから86 g H₂O・100 g⁻¹FWに減少するのに伴って糖含量が増加した。しかし、水分含量が86 g H₂O・100 g⁻¹FW付近では水分含量の減少を伴わずに糖含量が増加した。

考 察

コムギ(阿部, 1996)や牧草(Moriyamaら, 1995)の耐凍性(LT₅₀, 半数個体致死温度)は9月から12月にかけて、また、キャベツ(五十嵐, 1994)の耐凍性(T_{EL50})は12月中旬から1月下旬にかけて増大することが報告されている。本研究でも、ハウレンソウとコマツナの耐凍性は10月から次第に増大し、厳寒期にハウレンソウでは T_{EL15} , T_{EL50} がそれぞれ-12~-16°C, -13~-18°C, コマツナではそれぞれ-11~-14°C, -13~-16°Cとなった。また、ハウス内気温が上昇した3月には両作物ともに耐凍性は減少した(第3図)。

Fuller・Eagles(1980)はペレニアルライグラスの耐凍性は夜間の低温によって決定されると報告している。ハウレンソウとコマツナにおいては、耐凍性測定前7日間の最低気温と耐凍性との間に極めて高い相関関係が認められた(第1表)。冬期のハウス内は曇天日、晴天日ともに最高気温に近い温度の時間帯は短時間であり、最低気温に近い温度の時間帯が日没後から翌朝まで長時間継続する(第2図)。日中の葉温は日射量が増加すると気温よりも高めに推移し、低風速の場合ほど気温との差異が大きくなる(武知ら, 1962)。また、夜間には葉温は気温とほぼ同程度に推移する(佐藤・岩波, 1968)。密閉下のハウス内では風速は極めて低い。従って、本調査において、日中の葉温は気温よりも高めに、夜間のそれは気温とほぼ同程度に推移したと考えられる。このことから、葉温が

Fig. 9. Relationships between leaf water content and sugar concentration of spinach (A) and komatsuna (B) in 1998–99

最低気温に近い温度帯に長時間保たれたことが、耐凍性と最低気温の間の密接な関係を示した理由のひとつであると考えられる。

一方、Sasakiら(2001)はキャベツにおいて、3~6時間の短時間脱馴化処理によって耐凍性が減少し、脱馴化処

理温度が高いほど ($15^{\circ}\text{C} < 20^{\circ}\text{C} < 25^{\circ}\text{C}$ /暗処理)耐凍性の減少度合いが大きいことを報告している。このことは、ハウス内の最高気温も耐凍性に影響を及ぼすことを示唆している。北東北日本海側地域において、12月~2月の冬期でもまれに日中のハウス内最高気温が 20°C を越えることがある(第1図)。もし本研究において、この時期に日中の高温によって脱馴化が起こったとすれば、最高気温と耐凍性との間に高い相関関係がみられるはずである。しかし、平均最高気温と耐凍性との相関関係は、平均最低気温と耐凍性との相関関係に比べてかなり小さかった(第1表)。このことから、冬期において、ハウレンソウやコマツナが日中の高温によって脱馴化した可能性は小さいと考えられる。このことには、当地域が冬期においては寡日射のために日中もハウス内気温が低温で推移する日が多いこと、また、まれにハウス内気温が上昇しても、脱馴化を引き起こす高温に遭遇する時間が非常に短いこと(第2図)が関係していると考えられる。

アルファルファ(内山, 1998)やオーチャードグラス、ペレニアルライグラス、チモシー(Moriyamaら, 1995)においては、耐凍性測定前5日間の平均最低気温が 10°C 以下になると耐凍性の増大が誘導される。ハウレンソウとコマツナにおいては、耐凍性測定前7日間の平均最低気温が約 11°C (1998年10月12日)では $T_{\text{EL}15}$ が -3°C 以上であった。しかし、平均最低気温が 8°C になると $T_{\text{EL}15}$ が約 -4°C に低下した(第4図)。このことから、ハウレンソウとコマツナにおいては平均最低気温が 10°C 以下で耐凍性の増大が誘導されるとみられる。

アルファルファ(内山, 1998)やコムギ(阿部, 1996)においては平均最低気温が $10 \sim -5^{\circ}\text{C}$ まで、キャベツ(五十嵐, 1994)においては平均最低気温が $10 \sim 6^{\circ}\text{C}$ まで低下するのに伴って、耐凍性が直線的に増大する。しかし、ハウレンソウとコマツナの耐凍性は、平均最低気温が 8°C から 2°C にかけては緩やかに、平均最低気温が 2°C 以下になると急激に増大した(第4図)。Kacperska(1978)はナタネにおいて、耐凍性の増大にいくつかの段階があることを示唆し、第1ステージを cold acclimation (凍結を伴わない)、第2ステージを frost hardening (凍結を伴う)と位置づけている。本研究において、平均最低気温が 2°C 付近における耐凍性測定前7日間の日最低気温は $-3.8 \sim -7.8^{\circ}\text{C}$ の範囲内にあったが、 0°C 以下の最低気温に遭遇した場合に耐凍性が急激に増大した(第4図)。このことから、平均最低気温が 2°C 付近まで低下し、かつ 0°C 以下の気温に遭遇することによりハウレンソウとコマツナの耐凍性が急激に増大することが示唆される。

第4図の最低気温と耐凍性との関係は、ハウレンソウ、コマツナともに最低気温と葉身水分含量との関係(第5図)と良く一致した。また、両作物ともに水分含量と $T_{\text{EL}15}$ 、 $T_{\text{EL}50}$ との間には正の相関関係が認められた(第7図)。植物体水分含量の減少によって、葉身の水ポ

テンシャルが低下するとともに細胞内溶質濃度が増大し、その結果、細胞外凍結時における細胞質や細胞膜の脱水ストレスが緩和された可能性がある。植物の低温馴化過程で、細胞内に糖類、プロリン、グリシンベタインなどの中性溶質が多量に蓄積されることが知られている(吉田, 1999)。樹木においては可溶性の糖と糖アルコール(酒井, 1982)、コムギにおいては可溶性の糖と多糖類(吉田ら, 1998)、キャベツにおいては可溶性の糖(Sasakiら, 1996; 1998)など、多くの植物において糖と耐凍性が密接に関連していることが報告されている。ハウレンソウ、コマツナの糖含量は、平均最低気温が $8 \sim 4^{\circ}\text{C}$ 程度に低下するにつれて $10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ から $12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ に緩やかに増加し、平均最低気温が 0°C 以下になると急激に増加した(第6図)。このような最低気温と糖含量との関係は、最低気温と耐凍性との関係(第4図)と類似し、気温低下による耐凍性の増大は糖含量の増加と密接に関係していることを示唆する。しかし、ハウレンソウでは $20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ 、コマツナでは $35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FW}$ 以下の糖含量領域では糖含量と耐凍性との間には高い相関関係がみられたが、それ以上の領域では両者の関係は緩慢になった(第8図)。また、両作物ともに、上記の糖含量以下の領域では糖含量の増加と水分含量の減少との間には密接な関係が認められたが、それ以上の領域では糖含量の増加は水分含量の減少を伴わなかった(第9図)。これらのことを総合して考えると、耐凍性増大過程には、水分含量の減少を伴う葉身糖含量の増加が密接に関係する前期段階と、糖含量以外の要因の関与が大きくなる後期段階とがあるのではないかと考えられる。この点と、水分含量の減少および糖含量の増加との因果関係、水分含量の減少を伴わない糖含量増加の生理的意義などは今後の課題である。

本研究の結果、ハウレンソウとコマツナの耐凍性は耐凍性測定前7日間の平均最低気温と密接に関係しており、この値が 2°C 以下になると耐凍性が急激に増大することが明らかになった。北東北地域で無加温ハウス内の平均最低気温が氷点下になるのは、概ね12月上中旬以降で、 $T_{\text{EL}15}$ はハウレンソウ、コマツナともに12月下旬には -10°C 以下になった。従って、厳寒期には両作物ともに十分に低温馴化しており、凍結傷害を受ける危険性は小さい。むしろ、11月中旬~12月中旬にかけての急激な寒波の到来時や、2月下旬~3月にかけて日射量が豊富になり、日中のハウス内気温が上昇する時期に凍結傷害が引き起こされる危険性がある。従って、これらの凍結傷害を回避するためには、11月中旬~12月中旬の最低気温が $0 \sim -2^{\circ}\text{C}$ 程度になる時点で、夜間にハウスを開放して耐凍性程度を増大させ、また、2月中旬以降においてはハウス内気温を上昇させないようハウスを開放して脱馴化を防止することが重要であると考えられる。

摘 要

無加温ハウス栽培におけるハウレンソウとコマツナの秋から早春にかけての耐凍性の変化を 1996/97 年, 1997/98 年および 1998/99 年の 3 ヶ年にわたって調査し, 耐凍性とハウス内気温, 葉身の水分および糖含量との関係を検討した.

ハウレンソウとコマツナの耐凍性は 10 月から次第に増大し, 厳寒期にはハウレンソウでは T_{EL15} , T_{EL50} (葉片組織から凍結傷害により電解質の 15 % ないしは 50% 漏出する温度) がそれぞれ $-12 \sim -16^{\circ}\text{C}$, $-13 \sim -18^{\circ}\text{C}$, コマツナではそれぞれ $-11 \sim -14^{\circ}\text{C}$, $-13 \sim -16^{\circ}\text{C}$ になった. また, ハウス内気温が上昇した 3 月には両作物ともに耐凍性は減少した. 両作物とも, 耐凍性測定前 7 日間の平均最低気温と耐凍性との間に極めて高い相関関係が認められ, 平均最低気温が 8°C から 2°C にかけては緩やかに, 平均最低気温が 2°C 以下になると急激に耐凍性が増大した. このような耐凍性の変化は葉身水分含量の変化と良く一致した. また, ハウレンソウでは約 $10 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$, コマツナでは約 $10 \sim 35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$ の領域では糖含量が高まるにつれて耐凍性が増大した. しかし, それ以上の領域では糖含量と耐凍性との関係は小さかった.

謝 辞 本研究を実施するにあたり, 秋田農試の田口多喜子氏からは多大の協力を頂きました. また, 本論文を作成するにあたり, 岩手大学農学部付属寒冷バイオシステム研究センターの上村松生教授からご指導を頂きました. 深く感謝申し上げます.

引用文献

- 阿部二郎. 1996. 作物の耐凍性の季節的变化. 低温生物工学会誌. 42: 1-5.
- Fuller, M. P. and C. F. Eagles. 1980. The effect of temperature on cold hardening of *Lolium perenne* seedlings. J. Agric. Sci. Camb. 95: 77-81.
- 五十嵐大造. 1994. キャベツの凍害防止に関する研究. 神奈川園試報. 44: 112-116.
- Kacperska, A. 1978. Mechanism of cold acclimation in herbaceous plants. p.139-152. In: P. H. Li and A. Sakai(eds.). Plant cold hardiness and freezing stress. Academic Press, New York, San Francisco and London.
- Koster K. and D. V. Lynch. 1992. Solute accumulation and compartmentation during the cold acclimation of Puma Rye. Plant Physiol. 98: 108-113.
- Moriyama, M., J. Abe, M. Yoshida and Y. Tsurumi. 1995. Seasonal changes in freezing tolerance, moisture content and dry weight of three temperate grasses. Grass Sci. 41: 21-25.
- 酒井 昭. 1982. 植物の耐凍性と寒冷適応. p. 19-126. 学会出版センター. 東京.
- Sasaki, H., K. Ichimura and M. Oda. 1996. Changes in sugar content during cold acclimation and deacclimation of cabbage seedlings. Ann. Bot. 78: 365-369.
- Sasaki, H., K. Ichimura, K. Okada and M. Oda. 1998. Freezing tolerance and soluble sugar content affected by water stress during cold-acclimation and de-acclimation in cabbage seedlings. Scientia Hort. 76: 161-169.
- Sasaki, H., K. Ichimura, S. Imada and M. Oda. 2001. Loss of freezing tolerance associated with decrease in sugar concentrations by short-term deacclimation in cabbage seedlings. Scientia Hort. 70: 294-298.
- 佐藤 庚・岩波悠紀. 1968. 気温, 地温がポット植え水稻各部の温度に及ぼす影響. 日作紀. 38: 241-246.
- 武知 修・長谷場徹也・泊 功・秋元稔万. 1962. 葉温に関する研究 (1). 農業気象. 18: 89-91.
- 田村 晃. 1999. 寡日射条件下における低温処理がコマツナ (*Brassica campestris* L.) の糖およびアスコルビン酸含有率に及ぼす影響. 園学雑. 68: 409-413.
- 田村 晃. 2000. コマツナとハウレンソウの個体レベルでの耐凍性の評価. 園学雑. 69: 332-338.
- Uemura, M., R. A. Joseph and P. L. Steponkus. 1995. Cold acclimation of *Arabidopsis thaliana*. Effect on plasma membrane lipid composition and freeze-induced lesions. Plant Physiol. 109: 15-30.
- 内山和宏. 1998. ハードニング誘導機構の解明. マメ科作物. p.14-21. 厳寒環境下における作物のハードニング機構の解明. 農水技術会議. 東京.
- Yoshida M., J. Abe, M. Moriyama, S. Shimokawa and Y. Nakamura. 1997. Seasonal changes in physical state of crown water associated with freezing tolerance in winter wheat. Physiol. Plant. 99: 363-370.
- 吉田みどり・森山真久・川上 顕. 1998. 低温認識による耐凍性と病害抵抗性の発現と分化. 植物の化学調節. 33: 213-221.
- 吉田静夫. 1999. 凍結傷害と耐凍性. 細胞工学. (別冊植物細胞工学 11): 30-34.