

積雪寒冷地域における冬期葉菜類栽培に関する研究：
特に、ホウレンソウとコマツナの耐凍性、糖および
アスコルビン酸に注目して

田 村 晃

Studies on Leafy Vegetable Cultivation in the Snowed Cold
Region in Winter with Special Emphasis on Freezing Toler-
ance, Sugar and Ascorbic Acid Contents of Spinach
(*Spinacia oleracea* L.) and Komatsuna (*Brassica rapa* L.)

Akira TAMURA

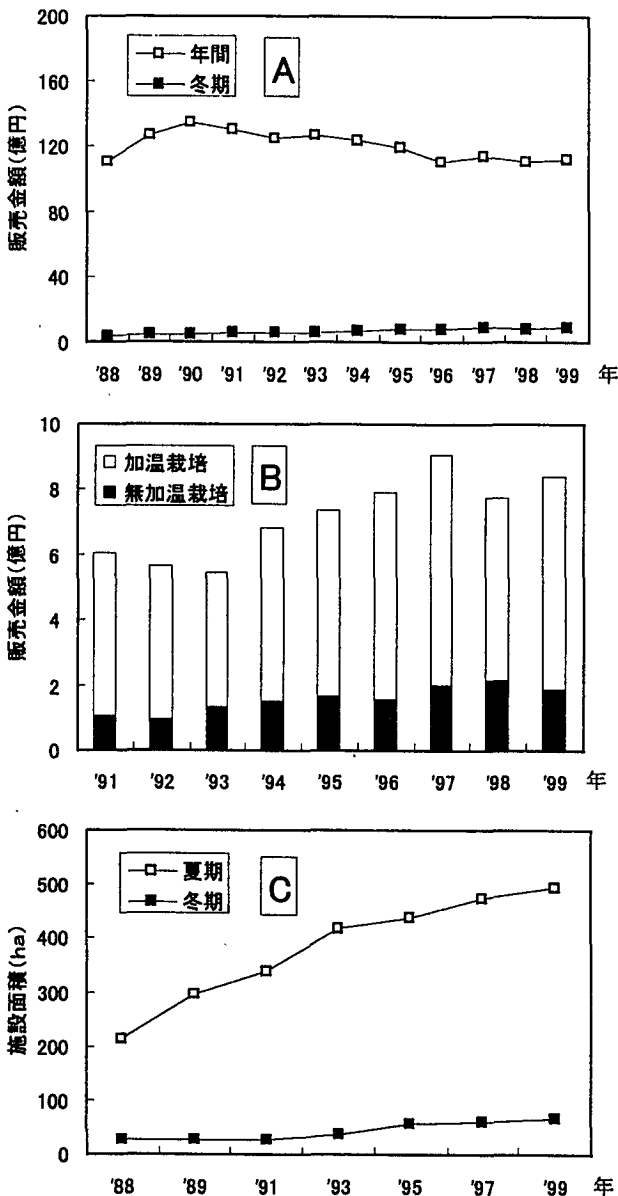
目 次

I 緒 論	2	IV 凍結傷害を回避した糖とビタミンC含量の 高いホウレンソウとコマツナの生産技術	70
II ホウレンソウとコマツナの耐凍性	6	1 播種期と生育および収穫時期	70
1 本研究で供試する品種の選定と作物の 凍結および凍結傷害	6	2 移植栽培における生育、耐凍性および 糖とビタミンC含量	75
2 ホウレンソウとコマツナの個体レベル での耐凍性の評価	12	3 ホウレンソウとコマツナの品種と生育、 耐凍性および糖・ビタミンC含量	80
3 低温遭遇がホウレンソウとコマツナの適合 溶質の変化と耐凍性の増大に及ぼす影響	18	4 ハウス内での保温資材の使用がコマツナ の耐凍性および糖とビタミンC含量に及ぼ す影響	86
4 ホウレンソウとコマツナの異なる葉位 における耐凍性の差異	24	5 ハウス内への外気導入がホウレンソウと コマツナの耐凍性および糖とビタミンC含 量に及ぼす影響	96
5 様々な環境要因がホウレンソウとコマ ツナの耐凍性に及ぼす影響	31	6 ホウレンソウとコマツナの糖およびビタ ミンC含量の簡易推定法	106
6 栽培期間中の気温がホウレンソウとコ マツナの耐凍性に及ぼす影響	54	V 総合考察	111
III ホウレンソウとコマツナの糖および ビタミンC含量	62	VI 摘 要	122
1 低温処理がコマツナの糖とビタミンC 含量に及ぼす影響	62	Summary	124
2 ハウス内気温がホウレンソウとコマツ ナの糖およびビタミンC含量に及ぼす影響	66	謝 辞	127
		引用文献	127

I 緒 論

1 冬期の野菜生産

日本海側の冬期の気象の特徴は、低温、多雪に加え、日射量が著しく少ないことにある。このような気象的な制約を受け、農家の栽培作物の選択枝は夏期は稲、野菜、花き等、豊富にあるのに対し、冬期は非常に少ない。このため、農家は出稼ぎや季節的な在宅他産業就労を余儀なくされている。このことから、積雪寒冷地域において、周年農業生産体系の確立は重要な研究テーマの一つとなっている。



第1図 秋田県の年間および冬期(12月～3月)の野菜生産額(A)、冬期野菜(12月～3月)の生産状況(B)、ハウス面積と冬期の利用状況(C)
[農産園芸の概要(秋田県農政部)より作成]

第1図Aに秋田県の野菜の農協系統販売金額を示す⁴⁾。年間の農協系統販売金額は約120億円で推移している。その中で、冬期(本研究では冬期を12月から4月の4ヶ月間に定義した)の農協系統販売金額は6～8億円で、年間農協系統販売金額の5～7%を占めているにすぎない。

冬期に販売されている野菜はウド、タラノメ、コゴミなどの山菜類や促成アスパラガス、ミツバなどの加温栽培が多く、冬期販売金額の約80%を占めている(第1図B)。一方、ハウレンソウなどの無加温栽培は約20%を占めているにすぎない。加温栽培はボイラーなどの設備費やランニングコストなどがかかるため、栽培経験のない農家は、取り組みを始めるのに二の足を踏む事例が多く、なかなか冬期の生産が伸びない現状にある。

ところで、近年、秋田県においては徐々にハウス面積が増加してきている(第1図C)。しかし、これらのハウスは夏期にはトマト、キュウリなどの野菜や花き栽培などに使用されているものの、冬期には使用されておらず、約90%(面積比)は雪に埋もれている。これらの遊休化しているハウスを有効に利用し、低コストな葉菜類生産技術が確立されるならば、周年農業生産体系の一翼を担う有力な手段になると考えられる。そこで、筆者は1995年から冬期のハウレンソウ(*Spinacia oleracea* L.)とコマツナ(*Brassica rapa* L.)の栽培技術確立に関する研究を開始した。

2 耐凍性の研究意義

秋田県内の沿岸部と内陸部の年最低気温を第1表に示す(アメダスデータ、気象庁)。沿岸部は日本海を北上する対馬暖流の影響を受け、気温が比較的低下せず、能代市、秋田市、本荘市における過去10年の平均年最低気温は、それぞれ -8.3°C 、 -4.9°C 、 -8.9°C である。また、1975年以降の最低気温の極値は、それぞれ -12.4°C 、 -9.9°C 、 -14.9°C である。これらのことから、冬期にハウレンソウやコマツナを栽培する場合、沿岸部では、通常年で $-5\sim-9^{\circ}\text{C}$ 、非常に強い寒波の到来時には -15°C 程度の最低気温を考慮しておく必要がある。一方、内陸部は最低気温が沿岸部よりも低下する。鹿角市、大曲市、湯沢市における過去10年の平均年最低気温は、それぞれ -16.1°C 、 -13.9°C 、 -13.8°C である。また、1975年以降の最低気温の極値

は、それぞれ -22.4°C 、 -17.6°C 、 -17.2°C である。内陸部の中でも、特に県北の鹿角市では最低気温が低下する。冬期にハウレンソウやコマツナを栽培する場合、鹿角市、大曲市、湯沢市では、通常年でそれぞれ

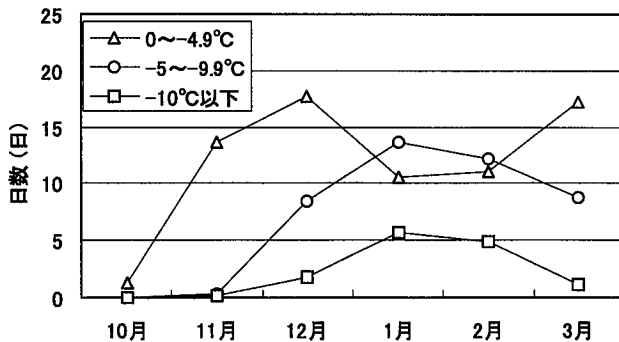
-16°C 、 -14°C 、 -14°C 、非常に強い寒波の到来時にはそれぞれ -22°C 、 -18°C 、 -17°C 程度の最低気温を考慮しておく必要がある。

第1表 1993年から2002年にかけての秋田県内各地の年最低気温の極値

	沿岸部			内陸部		
	能代市	秋田市	本荘市	鹿角市	大曲市	湯沢市
1993年	-5.0	-4.7	-4.2	-14.2	-12.3	-12.0
1994年	-6.7	-6.9	-9.2	-14.7	-15.7	-16.1
1995年	-8.0	-7.4	-8.6	-16.7	-16.5	-15.3
1996年	-8.5	-7.5	-7.2	-14.3	-13.3	-11.6
1997年	-8.7	-8.1	-8.9	-13.6	-13.9	-14.8
1998年	-7.5	-6.9	-11.1	-17.8	-11.0	-10.8
1999年	-12.4	-9.9	-12.4	-19.6	-15.0	-17.2
2000年	-9.2	-7.3	-8.9	-19.6	-10.6	-10.5
2001年	-8.6	-7.0	-9.2	-14.5	-15.8	-14.7
2002年	-7.9	-6.9	-9.6	-16.4	-14.5	-15.4
平均	-8.3	-4.9	-8.9	-16.1	-13.9	-13.8
極値	-12.4	-9.9	-14.9	-22.4	-17.6	-17.2
	1999.2.4	1999.2.4	1991.2.20	1977.1.27	1986.2.2	1999.2.4

さらに、寒波の到来の時期もハウレンソウやコマツナの栽培に大きな影響を及ぼす。第2図に鹿角市における過去10年間(1993~2002年)の10月から3月にかけての 0°C 以下、 -5°C 以下、 -10°C 以下の寒波の到来日数を示す(アメダスデータ, 気象庁)。鹿角市では10月から最低気温が氷点下になる日が訪れる。そして11月には月のほぼ半数が氷点下になり、11月の最低気温の極値は -11.4°C (1998年11月22日)である。ハウレンソウやコマツナが未だ十分に低温馴化していない段階で強く凍結すると、傷害が引き起こされる可能性が高い。

このような気象条件で冬期の葉菜類栽培を行う場合、葉菜類の凍結傷害を回避することが極めて重要である。



第2図 鹿角市における過去10年間(1993~2002年)の10月から3月にかけての 0°C 以下、 -5°C 以下、 -10°C 以下の寒波の平均到来日数

そのためには、植物の耐凍性に関する知見を深めることが必要不可欠である。そこで、ハウレンソウとコマツナの耐凍性に関する研究を実施した。

3 これまでの耐凍性に関する研究

1) 凍結傷害機構

植物が晩秋から早春にかけて、自然条件で徐々に氷点下に冷却されると、通常、細胞外凍結が誘発される。細胞外が凍結すると、細胞膜を境にして、細胞内外に水ポテンシャル差が生じ、細胞内の水が細胞外に移動し、細胞内は脱水される。細胞外凍結による傷害は、凍結脱水の結果引き起こされる⁵⁹⁾。

凍結傷害は細胞内の溶質が融解後に流出する現象が最初に確認されることから、細胞膜の損傷が凍結傷害に最も深く関係していると考えられている。Fujikawa¹²⁾はフリーズ・レプリカ電子顕微鏡法により、ヒトの赤血球の観察から、細胞外凍結による傷害発生と細胞膜構造の変化との間に重要な関係があることを示した。Gordon-Kamm・Steponkus¹⁸⁾は細胞外凍結による傷害が、細胞膜の構造変化と密接に関連していることを植物細胞において初めて示し、凍結傷害を受けた場合には、フリーズ・レプリカ法の細胞膜破断面に膜タンパク質粒子の欠如した部位や、脂質二重膜層がシリンダー状の逆ミセル構造となるヘキサゴナルII相への転移を認めた。また、細胞外凍結による、

細胞膜構造の変化の発生と細胞膜損傷の結果として細胞外に漏出する電解質量で表される傷害発生率との間に密接な関係のあることが確認され、さらに、これらの細胞膜の構造変化は、細胞膜と他の細胞内膜との異常接近した部分のみに形成されることが確認された^{13), 14)}。これらのことから、細胞外凍結による凍結傷害は、細胞膜と細胞内膜が異常接近することにより、細胞膜と細胞内膜が非生理的な膜融合を起こし、膜全体が不安定化する結果もたらされると提案されている¹⁵⁾。

2) 耐凍性の増大機構

一般に、温帯性の植物は低温馴化により耐凍性が増大する。耐凍性の増大・消失過程において、細胞内外の溶質⁵⁵⁾、細胞膜脂質組成⁵⁵⁾、可溶性タンパク質⁵⁵⁾、細胞内微細構造⁵⁰⁾、細胞内の水の状態⁵⁴⁾など多種多様な変化がみられ、これらの変化と耐凍性の増大・消失とが密接に関連していることから、耐凍性増大機構は複雑な様相を呈している。

前述したが、凍結傷害は細胞外凍結により細胞内が著しく脱水・収縮させられ、細胞膜と細胞内膜とが異常接近することにより、細胞膜の構造が変化し、膜機能が損傷されたときにひきおこされる。この考え方の上に立つならば、これを防御する機構を考えれば耐凍性機構を整理してとらえることが可能と思われる。

その観点からは、防御機構として、(1)細胞外凍結時において細胞内の脱水量を減らすこと、(2)細胞膜と他の内膜との異常接近を防止すること、(3)膜脂質組成を水和度の高い分子種へ変換し、脱水条件下で安定した膜構造を構築すること、の三点が考えられる。

(1) 細胞外凍結時における細胞内脱水量の軽減

細胞外凍結時における細胞内から細胞外への水の移動は、細胞内外の水ポテンシャルの差によって生じる。したがって、細胞内の脱水量を減らすには、細胞内の浸透濃度を高め、細胞内の水ポテンシャルを低下させることが有効である。

浸透濃度が高まるには、無機イオン、糖、遊離アミノ酸、グリシンベタイン（以後、ベタイン）などの低分子の溶質濃度が高まる必要がある。しかし、酵素反応は、正や負の電荷を持つ基質が酵素の反応中心にある特定の酸性や塩基性アミノ酸残基に結合することで可能になるので、正電荷をもつ基質の結合は細胞内に高濃度の正イオンが存在すれば拮抗阻害を受け、また、負の電荷をもつ基質の結合は高濃度の負イオンが存在すれば拮抗阻害を受ける。さらに高イオン強度

下では、酵素の疎水部分が互いに結合して酵素活性を失う⁴⁶⁾。

糖類、ベタイン、プロリンは電荷が分子全体として中性であり、高濃度に蓄積しても生体高分子の構造を乱すことがなく、しかも浸透圧調節に寄与しており、このような性質から、適合溶質と呼ばれている⁴⁶⁾。適合溶質とは植物が浸透圧ストレスに应答して、細胞内に蓄積する低分子有機化合物で、糖（グルコース、フルクトース、スクロース）や糖の誘導體（ソルビトール、マンニトール、トレハロースなど）、ベタイン類（グリシンベタイン、プロリンベタイン、アラニンベタインなど）、アミノ酸（プロリン）、スルホニウム化合物（3-ジメチルスルホニオプロピオネート）などがあげられる⁴⁶⁾。浸透濃度の上昇には、適合溶質濃度の上昇が有効であると考えられる。

(2) 細胞膜と細胞内膜との異常接近の防止

i 糖

細胞が乾燥や細胞外凍結により、脱水条件下にさらされた時の生体膜に対する糖の役割には、二つの考え方が提唱されている。一つはCroweら⁷⁾の考え方で、「脱水により水が取り去られた状態で膜間に残った糖のOH基と膜のリン脂質との水素結合による相互作用により、膜の安定性が保たれる」という考え方である。今一つはKoster³⁷⁾の考え方で、「脱水により水が取り去られた状態で膜間に残った糖は、脂質2重層の接近を制限することができ、流動相から固相への転移を引き起こす横からの物理的な圧搾を減少させることができる。この糖がリン脂質の相転移に及ぼす影響は、糖と脂質との特異的な相互作用によるのではなくて、その代わりとして、単純な熱力学で説明することができる」という考え方である。

両者は、細胞内が脱水された状態における糖と膜との関係に対する考え方に差異がある。しかし、糖が脱水により水が取り去られた状態で膜間に残り、生体膜の保護作用をしているという観点では同一である。また、糖が膜間に存在し、膜と膜との異常接近を防止するという観点でも両者に差異はない。

リポソーム表面に直接結合した糖は、リポソーム間の接触を妨げるスペーサーとしての働きをし、脱水によるリポソームの融合を防止することが報告されている²¹⁾。この事実は、膜どおしの異常接近を防止する糖の役割を強く示していると思われる。低温に遭遇することにより増加する糖が、細胞膜と細胞内膜との間に存在するならば、膜間のスペーサーとして働き、細胞

膜と細胞内膜との異常接近を防止するために有効であると考えられる。

ii 低温で誘導されるタンパク質

低温に遭遇することにより、特異的に誘導される可溶性のタンパク質の存在が多く、植物で知られている⁸³⁾。これらの可溶性タンパク質は熱に安定で、親水性が高い特徴を持っている。これらのタンパク質の機能は、未だ明確にはされていないが、水和度が非常に高いことから、糖と同様に、あるいは、糖との相乗作用により、細胞膜と他の細胞内膜との間に存在して、スペーサーの役割を果たしている可能性がある。

また、Steponkusら⁷⁹⁾はシロイヌナズナにおいて、低温誘導されるCOR15amタンパク質は葉緑体内に局在し、葉緑体の内膜の構造を変化させることで細胞膜のヘキサゴナルII相転移を防止していることを報告している。このことは、低温遭遇で誘導されるタンパク質の中には、生体膜と直接・間接的な相互に作用し、膜の異常接近を防止する機能をもっているタンパク質も存在することを示唆している。

(3) 脱水条件下における安定した生体膜脂質の構築

Yoshida⁸⁵⁾はポプラ靱皮組織の耐凍性とトリグリセリド、リン脂質の季節変化を調べた。その結果、ポプラ靱皮組織の耐凍性は秋から冬にかけて増大し、冬から春にかけて消失するが、リン脂質は耐凍性の増大と同様の増加、減少動向を示し、逆に、中性脂肪であるトリグリセリドは秋から冬にかけて減少し、冬から春にかけて増加した。このことから、トリグリセリドとリン脂質との相互転換が明らかにされた。さらに、Uemura・Steponkus⁸⁶⁾、Uemuraら⁸⁷⁾は、細胞膜の脂質について精査し、低温馴化により、細胞膜リン脂質の細胞膜全脂質におけるモル比がライムギ、エン麦、シロイヌナズナでそれぞれ37から43%、29から40%、47から57%に増加し、水和度の低いセレブシドがそれぞれ16から10%、30から23%、7から4%に減少するのに伴って、これらの植物の耐凍性が増大することを明らかにした。

これらのことから、低温に馴化するとトリグリセリドやセレブシドなどが減少し、リン脂質が増加する。リン脂質の増加は水分子の保持能力を高め、膜どうしの異常接近を防止し、凍結脱水に耐える機能を生体膜に付与すると考えられている⁷¹⁾。さらに、不飽和度の高いリン脂質が増加することにより、細胞内脱水条件下における生体膜の安定化がもたらされ、植物の耐凍性の増大に寄与していると考えられる。

(4) ベタインとプロリン

環境ストレス下において、ベタインとプロリンの浸透濃度上昇に対する寄与が知られており⁴⁶⁾、近年、環境ストレス下におけるベタインとプロリンの果たす役割について注目されている。

i ベタイン

ベタインは葉緑体で合成され、葉緑体内に高濃度に蓄積されている²⁰⁾。そして、葉緑体に蓄積したベタインは細胞質にも輸送され、細胞質においても浸透圧調節に関与していると考えられている。また、ベタインは浸透圧調節機能のみではなく、塩、高温および低温ストレス下において生体高分子化合物の高次構造を保持する作用があると考えられている²⁴⁾。

環境ストレス下でベタインを合成する植物種と合成しない植物種のあることが知られており、ハウレンソウやコムギ、オオムギなどはベタインを合成し、シロイヌナズナ、ナタネ、タバコ、イネなどはベタインを合成しない⁶⁾。近年、ベタインを合成しない植物に合成遺伝子を導入し、ベタインの機能の解析が行われている。Sakamotoら⁵⁶⁾はシロイヌナズナにベタインを噴霧し、外からベタインを与えた場合、シロイヌナズナの耐凍性が向上すること、また、シロイヌナズナにベタイン合成遺伝子を導入すると、耐凍性が向上することを確認した。このことから、ベタインは耐凍性向上に寄与していることが示された。ベタインは凍結下における生体膜の安定性にも貢献していると考えられている⁵⁷⁾。

ii プロリン

多くの植物は環境ストレスを受けると細胞内にプロリンを蓄積する⁸²⁾。プロリンはストレス下で細胞内に高濃度に蓄積しても酵素活性を阻害しないと考えられている⁴⁷⁾。また、浸透圧調節以外にもタンパク質の保護⁶⁵⁾、活性酸素の除去⁶⁹⁾などの機能を持つと考えられている。Nanjoら⁴⁸⁾はプロリン分解系の律速酵素であるProDH (proline dehydrogenase) のアンチセンスを導入したシロイヌナズナは、凍結ストレスや塩ストレス耐性が増加したことを報告している。このことから、プロリンは耐凍性増大にも貢献していると考えられる。

4 本研究の目的と論文の構成

本研究は、積雪寒冷地域において周年農業生産を実現するため、ネックとなっている冬期において、ハウレンソウとコマツナの生産技術を確立することを目的として実施した。そのために、まず第一に、両作物の

耐凍性に関する知見を深めることが必要不可欠であると考えた。その上で、冬期の寒冷気象を活かして、両作物の品質を高め、安定して生産する技術を確立することが必要であると考えられる。以上の観点から、本論文を以下のように構成した。

II ホウレンソウとコマツナの耐凍性

北東北地域において冬期にホウレンソウとコマツナ栽培を実施しようとするとき、両作物の耐凍性に関する知見を深めることが必要不可欠である。本研究では、始めに圃場におけるコマツナの凍結の観察結果と、ホウレンソウとコマツナの凍結傷害について、また、両作物の耐凍性の評価方法について報告する。次に、両作物の耐凍性に関する基礎知見を得ることを目的にして行った、低温遭遇と耐凍性、葉位と耐凍性の2つの実験結果について報告し、さらに、実際の冬期栽培における環境要因を想定し、気温、地温、光条件、土壌水分、土壌養分といった環境要因が両作物の耐凍性に及ぼす影響を把握するために行った実験結果を報告する。そして、この項の最後に、凍結傷害回避技術を確立するために、実際栽培圃場における両作物の耐凍性について精査した結果を報告する。

II ホウレンソウとコマツナの耐凍性

はじめに

凍結傷害防御機構(耐凍性増大機構)に関しては、(1)細胞外凍結時に細胞内の脱水量を減らすこと、(2)細胞膜と細胞内膜との異常接近を防止すること、(3)生体膜脂質組成を水和度の高い分子種へ変換し、脱水条件下で安定した膜構造を構築すること、の三点が考えられる。本章では、低温遭遇によりホウレンソウとコマツナの浸透濃度と適合溶質である糖、ベタイン、プロリンがどのように変化し、それが耐凍性の変化とどのような因果関係にあるのかを解析する。そして、浸透濃度、糖、ベタイン、プロリンが耐凍性向上にどのような役割を果たしているのかを推論した。

また、ハウス栽培における凍結傷害回避のための基礎知見を得ることを目的に、気温、地温、光、土壌水分、土壌養分条件が両作物の耐凍性にどのような影響を及ぼすのかを調査した。

さらに、実際栽培において凍結傷害を回避するためのハウス内気温管理に対する知見を得ることを目的に、ハウス栽培におけるホウレンソウとコマツナの耐凍性

III ホウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量

冬期の気温が低い当地域では、一定期間内(12~3月)における単位面積当たりの生産量は、関東や西南地域に比べると少なく、量的な生産面では不利である。また、冬期に葉菜類栽培を実施する場合、農家は厳しい寒さの中での収穫作業や除雪作業が伴う。したがって、農家の冬期葉菜類栽培に取り組む気持ちを喚起するためには、凍結傷害を回避して葉菜類栽培が可能であることを示すのみでは必ずしも十分ではなく、さらに、冬期の低温条件が葉菜類の品質を高めるための利点であることを示す必要がある。そこで、気温、特に低温条件がホウレンソウとコマツナの糖とビタミンC含量に及ぼす影響について調査したので報告する。

IV 凍結傷害を回避した高品質な冬期葉菜類の生産技術確立

冬期にホウレンソウとコマツナを生産するための播種期、品種、栽培方法などを検討し、凍結傷害を回避し、糖とビタミンC含量の高いホウレンソウとコマツナを生産するための栽培技術に関する試験を実施したので、その結果を報告する。

の季節変化を調査し、栽培期間中の気温と両作物の耐凍性との関係を解析した。

1 本研究で供試する品種の選定と作物の凍結および凍結傷害

1) 目的

ホウレンソウとコマツナの生産現場には多数の品種が導入されている。本研究は、冬期に両作物の生産技術を確立することを目的に実施したが、多数の品種を実験に供試することは不可能である。そこで、本研究で供試する品種を決定するために、低温条件でも草丈がよく伸長し、生体重がよく増加する品種の選定を実施した。

次に、ホウレンソウとコマツナの耐凍性研究に先立ち、本節では、ハウス栽培においてコマツナがどの程度の温度で凍結するのかを観察した。また、ホウレンソウとコマツナがもっている耐凍性を越えた寒さにさらされ、凍結した場合、どのような凍結傷害が引き起こされるのかを観察した。

2) 方法

(1) 本研究で採用する品種の決定について

ハウレンソウは17品種、コマツナは6品種を供試した。ハウレンソウは1996年11月1日に農試内（秋田市）の300㎡の硬質プラスチックハウスに播種した。施肥量は窒素、リン酸、カリをそれぞれ1 kg/a、苦土石灰、ようりんをそれぞれ10、4 kg/a施用した。栽植密度は条間20cm、株間5 cm（100個体/㎡）とした。コマツナは1995年10月25日に農試内の100㎡のパイプハウスに播種した。施肥量、栽植密度はハウレンソウと同様にした。

(2) 植物体の凍結

2001年2月10日から11日にかけて、ハウス内の気温と葉身および葉柄温を調査した。測定は打点式記録計（山武ハネウエル株式会社製、DPR500）を使用し、センサーは0.3mm銅・コンスタンタン熱電対を用いて実施した。葉身温は葉身の葉裏（地表面からの高さ15 cm）に0.3mmの銅・コンスタンタン熱電対を幅0.5cm、長さ2 cmのセロハンテープで張りつけて測定した。葉柄温は葉柄（地表面からの高さ5 cm）に同様の熱電対を差し込んで測定した。ハウス内気温は同様の熱電対を直径5 cm、長さ8 cmの塩ビ管に入れ、直射日光が当たらないようにして、葉身および葉柄温を測定した個体付近の地表面からの高さ15cmの地点を測定した。

(3) ハウレンソウとコマツナの凍結傷害

2001年12月下旬から2002年1月上旬にかけてのハウス内の平均、最高、最低気温はそれぞれ約0℃、4℃、-3℃で経過したが、2002年1月5日夜から7日にかけて寒波が到来し、6日の外気の最低気温は-13.1℃、ハウス内の最低気温は-11.0℃となった。この時に、ハウレンソウとコマツナの耐凍性が增大していない品種は凍結傷害を受けた。凍結傷害の様子を1月9日午前9時頃と1月18日午前10時頃に観察し、凍結傷害の写真をとった。

3) 結果および考察

(1) 本研究で採用する品種の決定について

第3図A, Bにハウレンソウの草丈と生体重を示す。草丈は‘夏秋理想’、‘ソロモン’、‘オーライ’の順に、生体重は‘コンバット’、‘ホークス’、‘ソロモン’の順に大きかった。‘ソロモン’は草丈の伸長、生体重の増加が低温下でも優れていたため、本研究には‘ソロモン’を供試することに決定した。第3図C, Dにコマツナの草丈と生体重を示す。‘せいせん7号’は草丈の伸長、生体重の増加ともに最も優れ

ていた。そこで、本研究には‘せいせん7号’を供試することに決定した。

なお、ハウレンソウとコマツナ品種の生育、耐凍性、糖とビタミンC含量などの詳細な検討はⅢ章、3節で行った。

(2) 植物体の凍結

2001年2月10日の外気の平均、最高、最低気温、日照時間（アメダスデータ、秋田県雄和町大正寺）はそれぞれ-1.5℃、2.3℃、-5.2℃、0.4時間、2月11日のそれはそれぞれ-4.7℃、-4.0℃、-5.6℃、0.3時間であった。

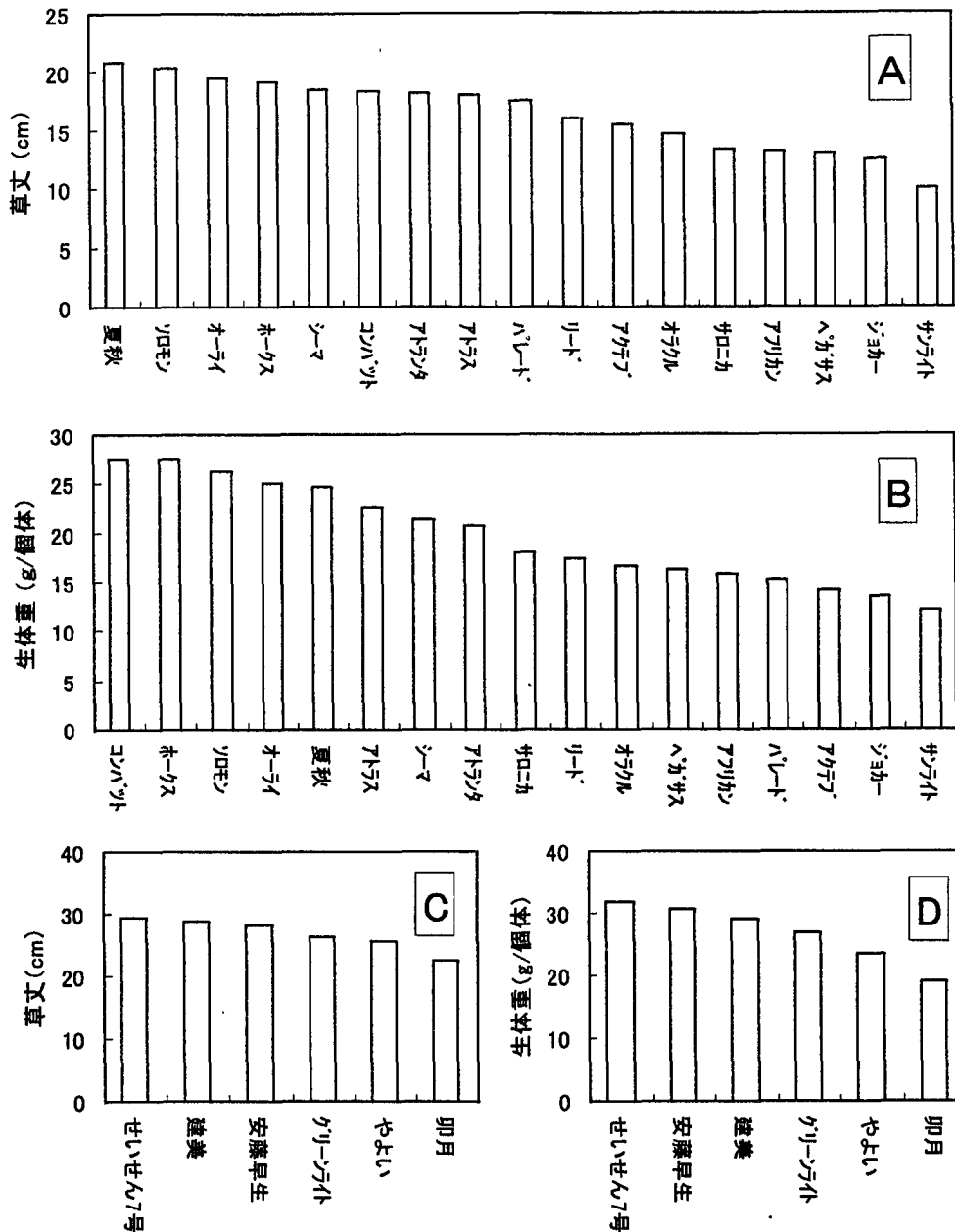
第4図にコマツナの葉身および葉柄の凍結に伴う潜熱の発生の観察結果を示す（2001年2月10日）。ハウス内気温は11時頃（約4℃）から低下し、16時30分頃0℃になり、18時20分頃、約-1.8℃になった。この時、葉身温は約-2.0℃、葉柄温は約-1.4℃であり、葉身、葉柄はほぼ同時に凍結による潜熱の発生が観測された。この結果から、葉身は約-2℃、葉柄は約-1.4℃で凍結が開始したことが判明した。

第5図に2001年2月11日0時から翌日0時にかけてのハウス内気温と葉身および葉柄の温度を示す。ハウス内気温は0時から8時にかけて約-2℃で経過した。8時から13時にかけて上昇し、13時には8℃となった。以後低下し、17時30分には0℃になり、23時には約-3℃になった。葉身温は0時から8時にかけてはほぼハウス内気温と同様の約-2℃で経過した。葉身温は8時からハウス内気温と同様に上昇し、9時頃に0℃になった。葉身温はその後13時頃まで上昇し、この間は、ハウス内気温よりも1~2℃ほど高めに経過した。葉身温は13時以降、ハウス内気温と同様に低下し、17時頃、0℃になった。葉身温が約-1.8℃（18時30分頃）の時点で葉身の凍結による潜熱が発生し、葉身の凍結が観察された。葉柄温は0時から8時にかけてハウス内気温、葉身温よりも0.5℃ほど高い約-1.5℃で経過した。ハウス内気温と葉身温は8時から10時にかけて急激に上昇したが、この間の葉柄温の上昇は非常に緩やかで、10時に約-0.6℃となり、10時15分頃、0℃となった。10時から13時にかけては葉柄温も急上昇した。13時以降はハウス内気温の低下とともに葉柄温も低下し、17時30分頃、0℃になった。葉柄温が約-1℃（18時30分頃）の時点で凍結による潜熱が発生し、葉柄の凍結が観察された。

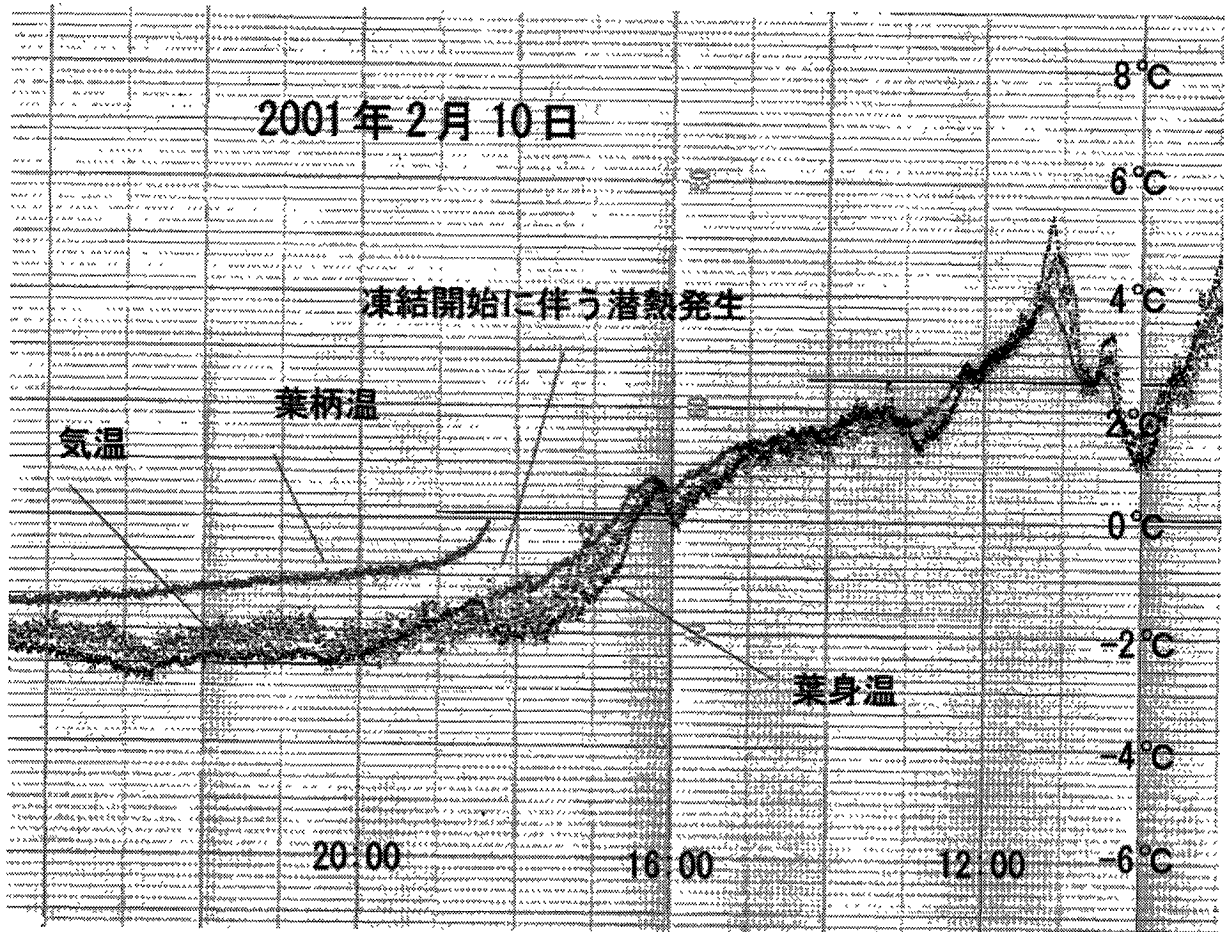
この観察結果から、葉身温は8時頃から、ハウス内の気温の上昇と同様に高まるが、葉柄温は葉身温より

も遅く上昇し、0℃になった時刻は、葉身が9時、葉柄が10時15分で、両者の温度上昇には時間差があることが明らかになった。また、日没後のハウス内では、

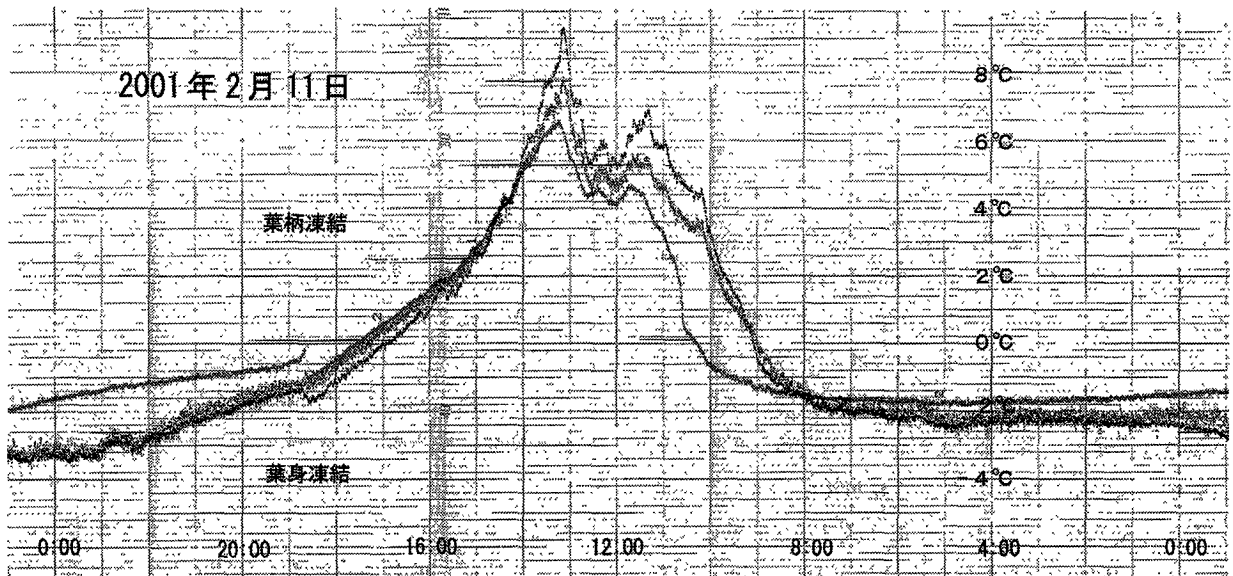
葉身温が約-2℃、葉柄温が約-1℃と比較的高い温度で凍結を開始することが明らかになった。



第3図 ホウレンソウとコマツナ品種の草丈 (A, ホウレンソウ; C, コマツナ) と生体重 (B, ホウレンソウ; D, コマツナ) の比較
 注: ホウレンソウ; 1996年11月1日播種, 1997年2月10日調査。コマツナ; 1995年10月25日播種, 1996年2月21日調査。



第4図 コマツナの葉身および葉柄の凍結に伴う潜熱の発生

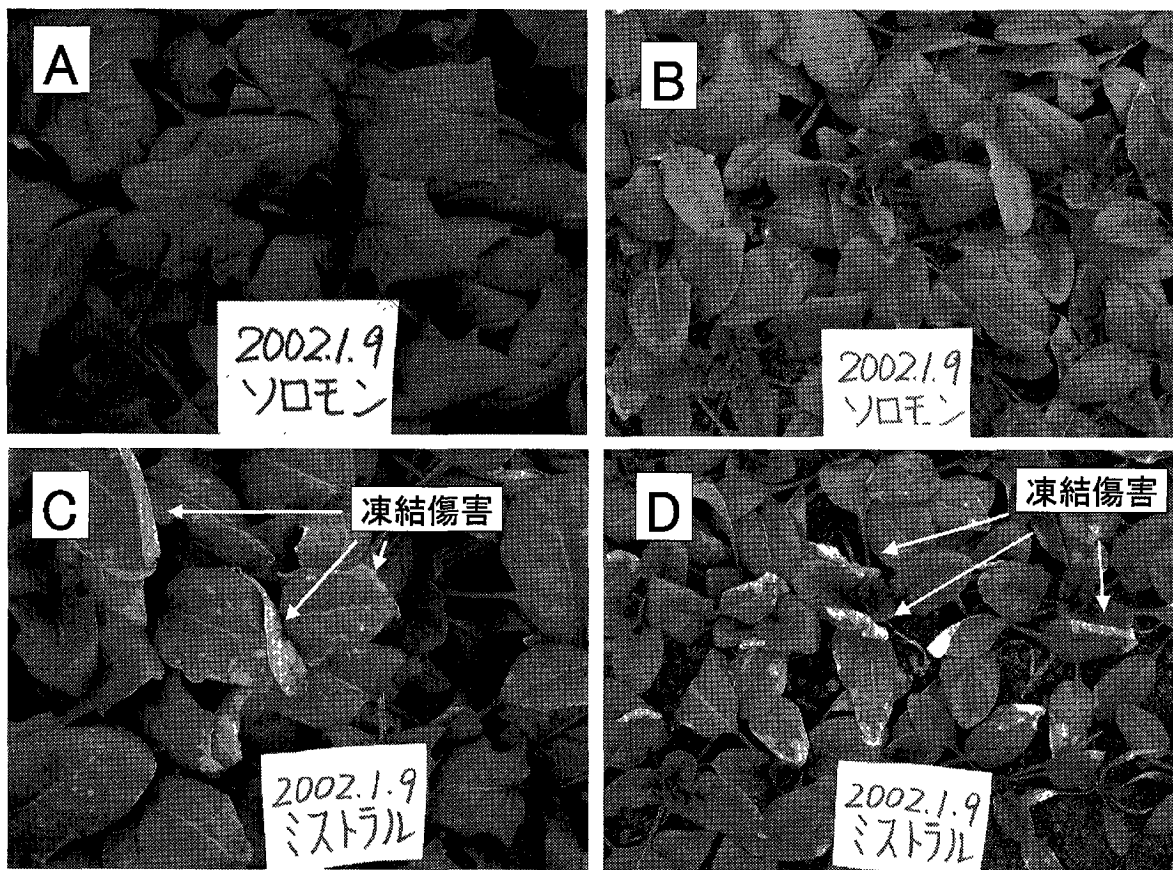


第5図 ハウス内気温とコマツナの葉身および葉柄の温度

(3) ホウレンソウとコマツナの凍結傷害

凍結傷害を受けたホウレンソウを第6図C(2001年10月10日播種), D(2001年10月17日播種)に示す。凍結傷害を受けないホウレンソウは、通常、緑色をしているが(第6図A, 10月10日播種; B, 10月17日播種)、凍結傷害を受け、乾燥すると葉身が白化する。盛夏に土壌が乾燥した条件下で直射日光を受け、強度

に萎凋した葉身も白化する場合がある。しかし、その場合は、白化する部分に規則性がみられ、太陽に対して直角に面した葉身部分が白化する(データ省略)。凍結傷害を受けると、葉縁部分は葉縁に沿って、葉身中央部では不整形に白化する。そして、傷害を受ける葉身の部位には規則性がみられない。



第6図 凍結傷害を受けないホウレンソウ(A, B)と凍結傷害を受けたホウレンソウ(C, D)

第7図に凍結傷害を受けたホウレンソウ個体(A)と、葉位ごとの凍結傷害(B)、凍結傷害を受けた個葉の拡大写真(C)を示す(2001年1月9日撮影)。品種は‘ミストラル’で、2001年10月10日に播種したものである。ホウレンソウは、ハウス内気温が比較的高い10月から11月に葉柄が長く、気温が低いときに葉柄が短くなる。凍結傷害は主に葉柄の長い葉、すなわち、気温が比較的高い時期に出葉した葉に多くみられる。第7図Bでも葉柄の長い1~4Lは凍結傷害を受けた部分が大きく、5Lは少々凍結傷害がみられ、6~7Lは凍結傷害がみられない。このように、凍結傷害は気温が高い時期に出葉した葉に多くみられる。凍結傷害は葉身の葉縁部、葉身の中

央部に発生し、部位、形状は不規則である(第7図C)。

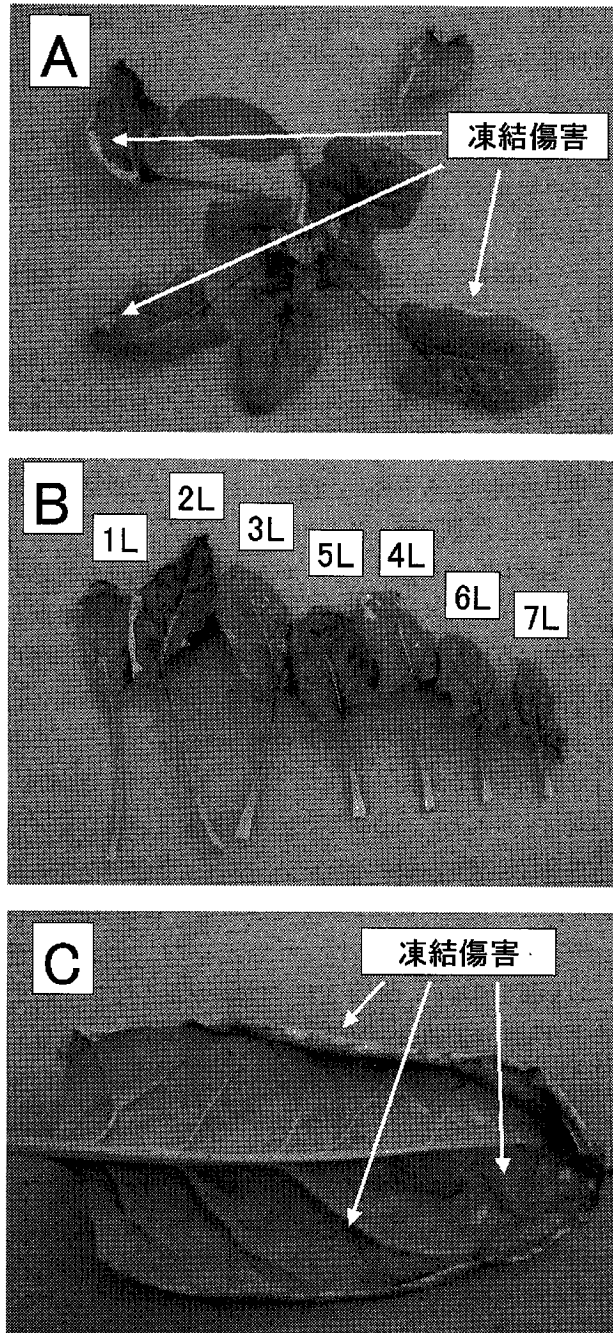
第8図B凍結傷害を受けたコマツナを示す。コマツナにおいても、凍結傷害を受けると、葉縁部や葉身中央部が白化する。

第9図A, Bにビニルトンネルなどで被覆し、過湿条件下で強く凍結した場合に受けたコマツナの凍結傷害を示す。第9図Cは過湿になり、トンネルのビニルフィルムに露滴がついている状態である。ハウス内で保温をはかるためにビニルトンネルなどで被覆し、トンネル内部が過湿条件下で強く凍結すると新葉部分が水浸状になり、後にその部分が壊死する。

このように、凍結傷害を受けると葉身の白化(第6~8図)や、新葉が壊死(第9図)し、ホウレンソウ

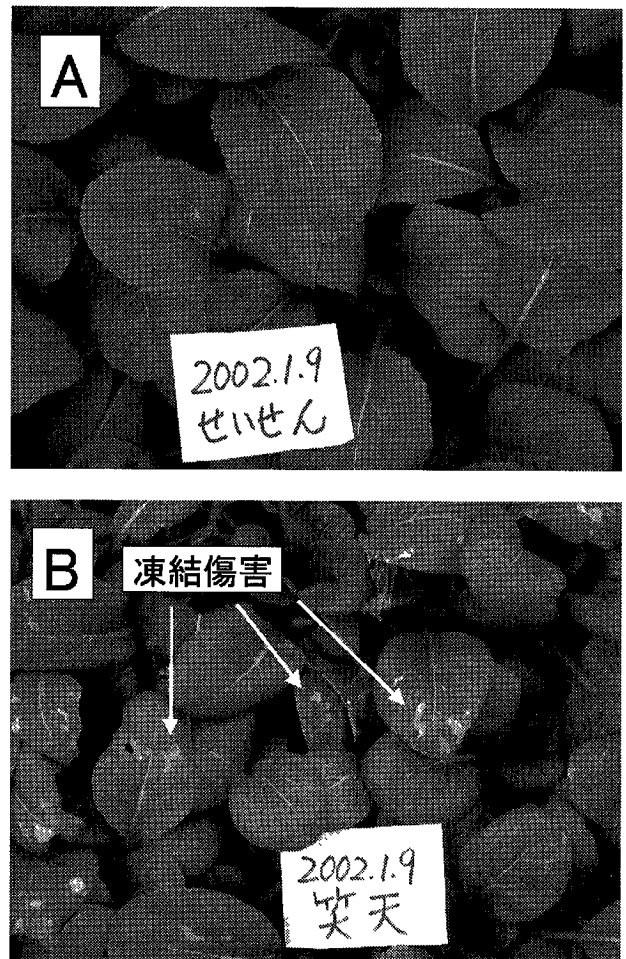
やコマツナは商品性が著しく低下するか、ないしは、商品性がなくなる。また、生育途中で凍結傷害を受け

ると、生育が著しく遅延するか、ないしは、栽培継続が不可能になる。

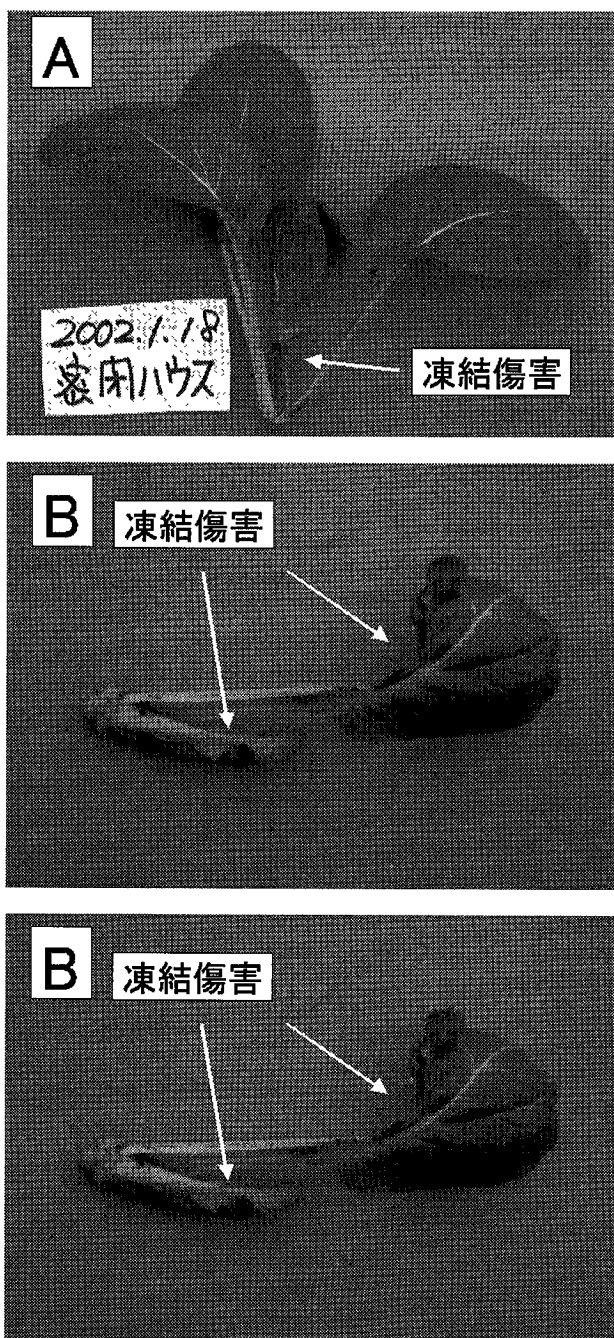


第7図 凍結傷害を受けたホウレンソウ
(2002年1月9日撮影)

A, 凍結傷害を受けた個体; B, 葉位ごとの凍結傷害;
C, 凍結傷害を受けた葉身



第8図 凍結傷害を受けないコマツナ (A)
と凍結傷害を受けたコマツナ (B)



第9図 ハウス内の湿度が高い条件で凍結傷害を受けたコマツナ
A, 凍結傷害を受けた個体； B, 凍結傷害の拡大写真；
C, ハウス内の露滴

5) 要約

本研究における一連の実験に供試するハウレンソウとコマツナ品種を決定するために、ハウレンソウで17品種、コマツナで6品種を比較検討した。その結果、低温条件下でも草丈の伸長が早く、生体重がよく増加する品種として、ハウレンソウでは‘ソロモン’、コマツナでは‘せいせん7号’を選定した。

コマツナは18時30分頃、葉身温が約 -2.0°C 、葉柄温が約 -1.4°C の時点で葉身、葉柄ほぼ同時に凍結による潜熱の発生が観測された。このことから、日没後のハウスにおいては、葉身は約 -2°C 、葉柄は約 -1.4°C と比較的高い温度で凍結を開始することが明らかになった。葉身温は8時頃からハウス内の気温の上昇に伴って高まるが、葉柄温は葉身温の上昇よりも遅い時間帯から上昇し、両者の温度上昇には時間差があることが明らかになった。

ハウレンソウとコマツナがもっている耐凍性を超えた寒さにさらされ、凍結した場合、両作物は凍結傷害を受ける。凍結傷害は気温が比較的高い時期に出葉した葉に多くみられ、葉身の葉縁部、葉身の中央部に発生し、部位、形状は不規則であった。また、ハウス内で保温をはかるためにビニルトンネルなどで被覆し、トンネル内部が過湿条件で強く凍結すると新葉部分が水浸状になり、後にその部分が壊死する傷害が発生した。このように、凍結傷害を受けると葉身の白化や、新葉が壊死し、ハウレンソウやコマツナは商品性が著しく低下するか、ないしは、商品性がなくなる。また、生育途中で凍結傷害を受けると、生育が著しく遅延するか、ないしは、栽培継続が不可能になる。

2 ハウレンソウとコマツナの個体レベルでの耐凍性の評価

本項は筆者の園芸学会雑誌への発表論文⁷⁶⁾を基に、編集・加筆したものである。

1) 目的

一般に温帯性植物は秋から冬にかけて徐々に低温にさらされると耐凍性を増大させる(低温馴化)。しかし、耐凍性の大きさは植物の種類や品種により、また、同一種や同一品種でも低温馴化過程で遭遇した気温などの様々な環境要因により異なる^{2), 55)}。北東北地域において、厳寒期の最低気温は、例年沿岸部で -8°C 、内陸部で -15°C 程度になる。このため、冬期に凍結傷害を回避して作物を栽培するには、作物の耐凍性と気温などの環境要因との因果関係を把握し、作物の種類、品種の選定や栽培時期を決定することが重要である。

作物の耐凍性の評価方法には、原形質分離法、蛍光色素法、細胞・組織の生死による方法、電気伝導度による方法などがあるが⁵⁹⁾、一般には細胞・組織・個体の生死による方法と凍結させた組織や細胞から漏出する電解質を電気伝導度（以後、EC）で測定して評価する方法（電気伝導度法）が広く行われている。

個体の生死による耐凍性の評価にはコムギに関して多くの研究例がある⁵²⁾、⁴⁰⁾。個体の生死による耐凍性の表示は実際圃場の現実近似している利点がある。しかし、軟弱葉菜類などのように葉が折損しやすい場合や個体の大きな作物では、コムギのように大量の個体を限られたスペースのプログラムフリーザーで凍結することは困難である。

一方、耐凍性を測定する方法の一つに、電気伝導度法がある⁸⁾。この方法は少量のスペースで大量の試料を測定できる。また、圃場で栽培されている作物をサンプリングして測定することもできる。

植物の耐凍性機構を研究している多くの研究者は電気伝導度法により、電解質の50%が漏出した温度 (T_{EL50} , temperature at which 50% electrolyte leakage occurs) で耐凍性を示している⁸⁷⁾、⁴⁵⁾。野菜においてこの評価法を使用した報告には五十嵐²³⁾の事例があり、キャベツ葉片組織の耐凍性をTEL50で表示している。しかし、これまでに組織からの電解質漏出程度と作物個体レベルの凍結傷害との関係は調査されていなかった。そこで、本報告では、コマツナとホウレンソウにおいて、凍結傷害が葉先や葉縁に若干みられるものの、その後の生育に大きな影響のない程度、すなわち、栽培継続可能な範囲内の凍結傷害が引き起こされる温度と組織からの電解質漏出程度との関係を検討した。

2) 方法

(1) 供試試料の育成

東北農業試験場（盛岡市）のガラス室内で試料を育成した。市販培養土（元気くん1号、コープケミカル）を充填した直径9 cmの黒ポリ鉢にホウレンソウ品種‘ソロモン’は1998年11月28日、コマツナ品種‘せいせん7号’は12月7日に1鉢当たり4～5粒ずつ播種した。播種後、最低気温を4℃程度に保った無加温ガラス室内で育成したが、生育が緩慢なため1999年1月18日に最低気温を10℃程度に保った加温ガラス室に移動した。試料は子葉展開時点で3個体/鉢に間引き、さらに、ホウレンソウでは本葉4枚時、また、コマツナでは本葉2枚時に1個体/鉢とした。

なお、試料の育成期間中は鉢付近の地上20 cmの気温をサーミスタ温度計（TR-71S型、ティアンドデイ社）で測定した。

(2) 低温馴化方法

低温馴化には東北農業試験場内の温度勾配ハウス[間口3.6m, 奥行26m, 鉄骨硬質プラスチックハウス、入口からの外気導入とハウス奥からの空気排出および温風暖房の併用によりハウスの入口（低温部位）から奥部（高温部位）に向けて最大7℃の温度勾配を設定できる]を利用した。

コマツナは2月4日に予備馴化（ハウス入口より20 m地点）を開始し、2月7日から15日に低温馴化を行った。また、ホウレンソウは2月14日に予備馴化を開始し、2月16日から24日に低温馴化を行った。コマツナ、ホウレンソウとも、低温馴化程度に較差をつけるため、ハウスの入口から1、12、17.5mの3地点に配置した（ハウスの入口側から順に、低温区、中温区および高温区とする）。

予備馴化および低温馴化中は地上50cmの気温を通風型白金抵抗温度計（GK100型、イー・エス・ディ社）で測定した。

(3) 凍結処理方法

i 個体の凍結-融解処理

凍結処理には空冷式プログラムフリーザー（LU-112型、TABAI社）2台を用いた。コマツナは2月15日、また、ホウレンソウは2月24日に低温、中温、高温区からプログラムフリーザー1台当たり各8鉢を入庫し、-3℃で2時間放置した後、植水して凍結を誘発させた。植水後、3時間放置し、凍結に伴って発生する潜熱が十分に逸散するのを確認してから、-2.5℃/hrの速度で温度を降下させた。植物体の温度が概ね-10、-13、-16、-19℃に達した時点でプログラムフリーザーごとに、各区2鉢ずつ取り出し、暗黒下4℃で翌朝まで緩やかに融解させた。なお、植物体の温度は葉柄に熱電対温度センサーを挿入して測定した。

ii 電気伝導度の測定

コマツナでは低温馴化を開始した2月15日に老化下位葉を除く第3～5葉、また、ホウレンソウでは2月24日に同じく第5～8葉を採取した。各試料を5 mm角に刻み、0.5gを秤量して試験管（14mm×100mm）に入れ、蒸留水を0.1ml加えてパラフィルムで栓をした後、前項の植物個体と同時にプログラムフリーザーに入庫し、同様の方法で凍結-融解処理を行った。なお、反復数は2回とし、組織の温度は試験管内に熱電対温度

センサーを挿入して測定した。また、凍結させずに暗黒下4℃で保持した試料と、乳鉢で磨砕した試料を準備し、それぞれ傷害率0%および100%の組織とした。

(4) 凍結傷害の評価方法

i 個体の凍結傷害程度

凍結処理の翌朝から約10℃で管理し、コマツナは3月1日(凍結処理14日後)、ホウレンソウは3月9日(凍結処理13日後)に凍結傷害を調査した。凍結傷害程度は次の5段階に分類した(第10図)。なお、老化下位葉(コマツナでは第1~2葉, ホウレンソウでは第1~4葉)の凍結傷害は考慮しなかった。

Stage 0: 凍結傷害がみられない。

Stage 1: 凍結傷害が葉先や葉縁に若干みられる

ものの、その後の生育に大きな影響がない。

Stage 2: 凍結傷害が大きく、その後の生育に影響がある。

Stage 3: 致死してはいないものの、凍結傷害が著しい。

Stage 4: 凍結傷害により致死している。

ii 個葉の傷害率

コマツナでは第3~5葉、ホウレンソウでは第5~8葉について、凍結傷害により致死あるいは変色した部分の面積割合を0、10、20、40、60、80、100%刻みで葉位ごとに目視で求め、次式により個葉の傷害率を算出した。なお、個葉の傷害率は植物個体の傷害調査と同日に行った。

個葉の傷害率 = Σ (各葉位の傷害面積割合) / 調査葉数

iii 電気伝導度法による傷害率

凍結処理の翌朝、試験管に8mlの蒸留水を加え、ロータリーシェーカー(R-20型, 大洋科学工業社)を用いて室温、暗黒下で4時間振とうした。振とう後、溶液のECを測定し、次式により傷害率を算出した。

凍結傷害率 = $(\text{各処理区のEC} - \text{傷害率0\%のEC}) / (\text{傷害率100\%のEC} - \text{傷害率0\%のEC})$

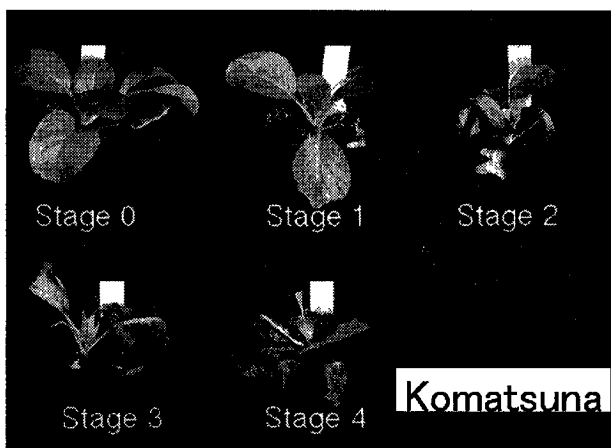
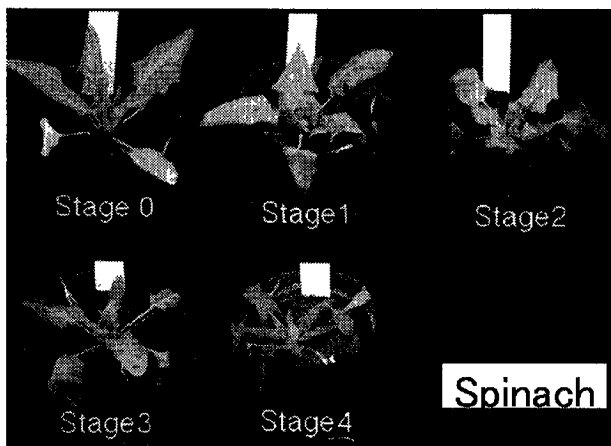
iv 磨砕した試料と-80℃で致死させた試料の比較

電気伝導度法で耐凍性を評価する場合、-80℃で凍結して完全に致死させた試料から漏出する電解質のECを求め、これを傷害率100%の値とする方法も広く採用されている。しかし、磨砕した試料のECが全電解質を反映すると思われるのに対し、-80℃で凍結した試料では、細胞膜は損傷を受けているものの、振とうにより全電解質が漏出するとは限らない。そこで、磨砕した試料と、-80℃のフリーザーに入れ完全に致死させた試料のECをコマツナとホウレンソウについて比較した。実験は3月18日および19日に実施し、両日とも各処理区の試験管を10本ずつ供試した。ECの測定は処理の翌朝に前述の方法で行った。

3) 結果

コマツナとホウレンソウの育成期間中の気温は、播種後1月17日までは平均、最高、最低気温が各5~8℃、15~20℃、1~4℃と低めに推移したため、生育が非常に緩慢であった。しかし、加温ハウスに移動した1月18日以降は、平均、最高、最低気温が各14~16℃、20~26℃、10~13℃で推移した(第11図A)。

なお、予備馴化中の気温はコマツナでは平均、最高、最低気温で各5~6℃、8~9℃、-2~-1℃、ま



第10図 ホウレンソウとコマツナの凍結融解後の個体レベルでの傷害程度

注: Stage 0: 凍結傷害なし。

Stage 1: 生育に影響のない軽微な傷害。

Stage 2: 生育に影響のある傷害(傷害率30%以下)。

Stage 3: 甚大な傷害。

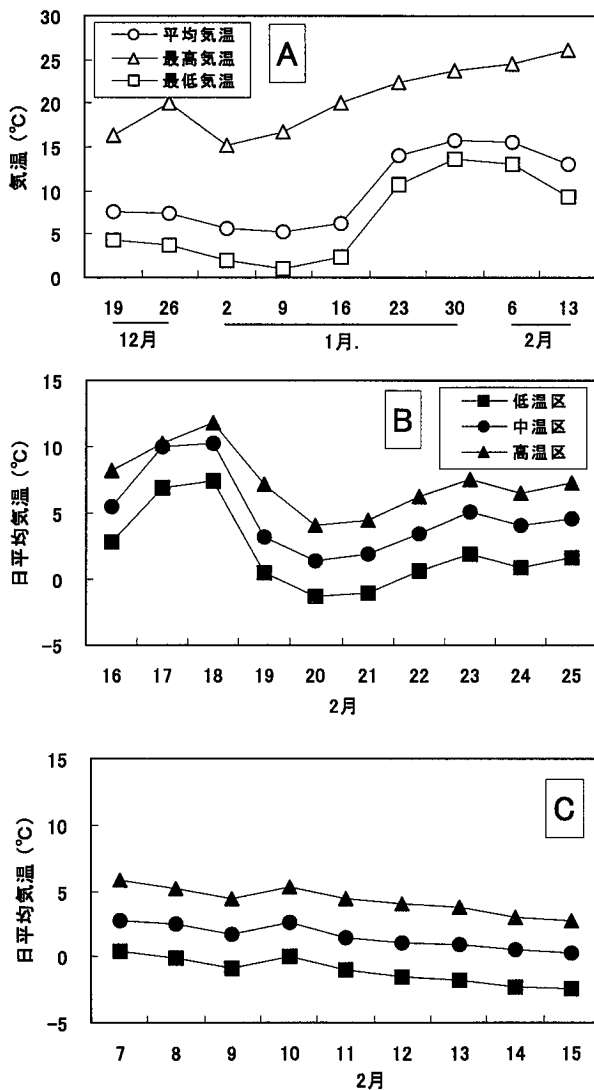
Stage 4: 致死。

第2表 低温馴化開始時のハウレンソウとコマツナの生育

	地上部				試験に供試した葉 ^y		
	草丈 (cm)	生体重 (g FW)	葉 齢 (齡)	葉身重 (g FW)	葉面積 (cm ²)	葉身重 (g FW)	葉面積 (cm ²)
ハウレンソウ	10.4±0.4 ^z	3.91±0.34	5.5±0.2	2.93±0.69	97.5±10.7	1.78±0.18	59.5±5.6
コマツナ	9.2±1.0	3.83±0.37	8.5±0.4	3.05±0.44	89.3±10.2	1.64±0.20	47.0±5.9

Z : 平均±SD

y : 3~5葉(コマツナ)、5~8葉(ハウレンソウ)



第11図 低温馴化前のハウレンソウとコマツナの育成期間中のハウス内気温 (A) [平均気温 (○)、最高気温 (△)、最低気温 (□)] および低温馴化中のハウレンソウ (B) とコマツナ (C) の気温 (■, 低温区; ●, 中温区; ▲, 高温区)

た、ハウレンソウでは各3~4℃、8~9℃、-2~1℃で経過した。

低温馴化開始前のコマツナの展開葉数は5.5枚、葉重は2.9gFW/個体、葉面積は98cm²/個体であった。また、EC測定に供試した葉位の葉重は1.8gFW/第3~5葉、葉面積は60cm²/3~5葉で、個体に占める割合は、葉重で62%、葉面積で61%であった。ハウレンソウの展開葉数は8.5枚、葉重は3.1 gFW/個体、葉面積は89cm²/個体であった。また、EC測定に供試した葉位の葉重は1.6 gFW/第5~8葉、葉面積は47cm²/第5~8葉で、個体に占めるEC測定に供試した部位の割合は、葉重で52%、葉面積で53%であった (第2表)。

コマツナの低温馴化期間中の日平均気温は低温、中温、高温区でそれぞれ-2.5~0℃、0~2.5℃、3~6℃で経過した。また、ハウレンソウでは日平均気温は低温、中温、高温区でそれぞれ-1~7℃、2~10℃、4~12℃で経過した。各区間の温度差は温度勾配ハウスの温度制御設定にしたがい、ほぼ2.5℃で推移した (第11図BC)。なお、コマツナの低温馴化中の最高、最低気温は低温区でそれぞれ1~5℃、-8~-2℃、中温区で5~8℃、-5~0℃、高温区で7~10℃、-3~3℃で推移した。また、ハウレンソウでは同様に低温区で3~12℃、-5~-2℃、中温区で6~16℃、-5~5℃、高温区で8~24℃、0~8℃で推移した。

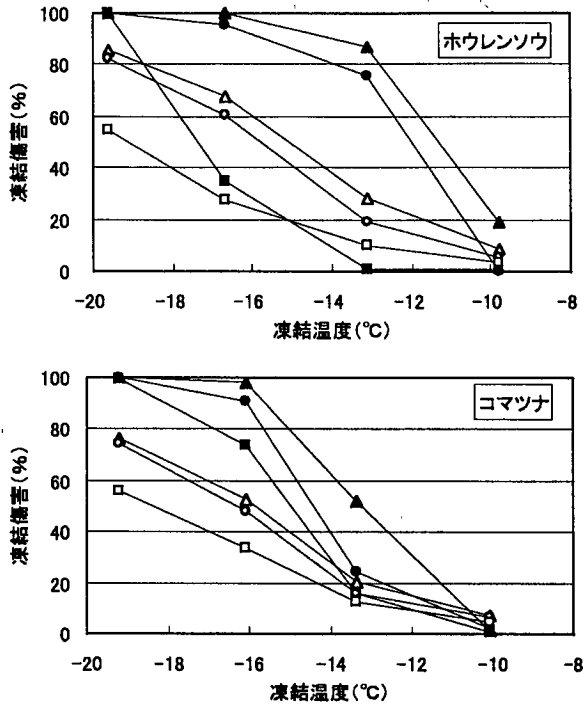
T_{EL50}はコマツナの低温、中温、高温区でそれぞれ-18.4℃、-16.3℃、-15.8℃、また、ハウレンソウではそれぞれ-19.1℃、-15.7℃、-15.0℃であった (第12図)。個葉の傷害率が50%となる温度はコマツナの低温、中温、高温区でそれぞれ-15.0℃、-14.5℃、-13.3℃、また、ハウレンソウでは同様に-17.4℃、-12.0℃、-11.3℃であった。

個体の凍結傷害程度と、磨砕試料のECを傷害率100

%として求めた電気伝導度法による傷害率との関係を第13図に示した。コマツナでは植物個体の傷害程度(0~4)に対応する電気伝導度法で求めた傷害率の平均値はそれぞれ7、14、34、43、74%、また、ハウレンソウでは同様に8、16、24、47、71%であった。

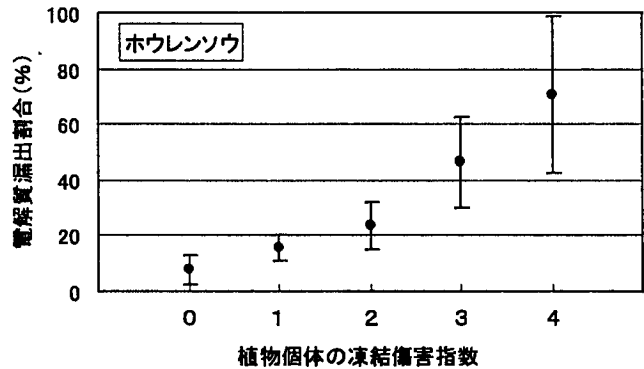
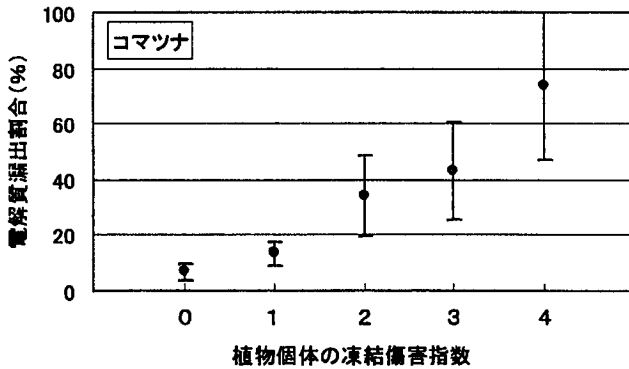
コマツナおよびハウレンソウの磨砕試料のECはそれぞれ1.5mS/cm、2.1mS/cm、また、-80℃で凍結した試料のECはそれぞれ1.3mS/cm、1.8mS/cmであり、コマツナ、ハウレンソウともに磨砕試料の約87%が-80℃で凍結させた試料から漏出した(第3表)。

第14図に-80℃で凍結させて完全に致死させたもののECを傷害率100%として算出した電解質漏出割合と植物個体の凍結傷害評価との関係を示した。植物個体の凍結傷害程度(0~4)に対応する電気伝導度法で求めた傷害率の平均値はコマツナではそれぞれ8、18、41、50、92%、また、ハウレンソウでは同様に9、19、28、55、83%であった。



第12図 コマツナとハウレンソウの電解質漏出割合と個葉の傷害面積割合の比較

注：電解質漏出割合(□, 低温区; ○, 中温区; △, 高温区)。個葉の傷害面積割合(■, 低温区; ●, 中温区; ▲, 高温区)。

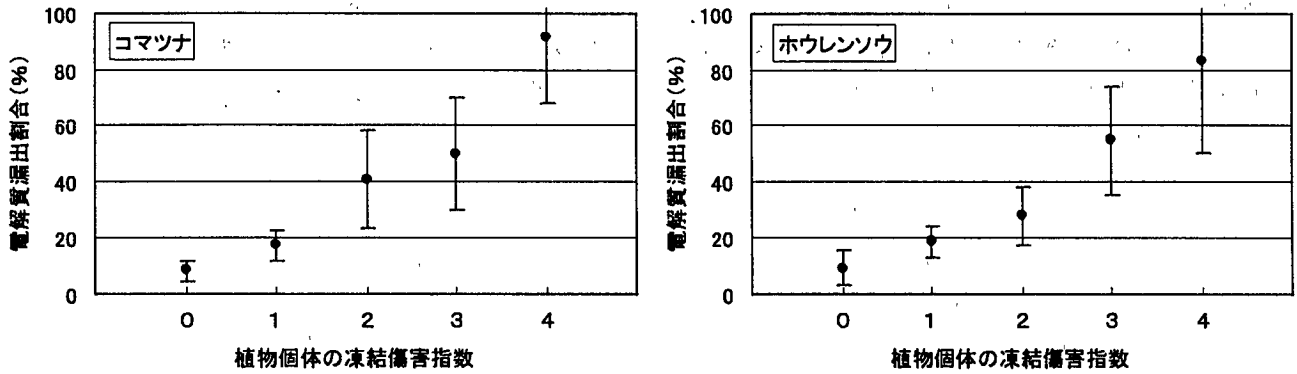


第13図 個体レベルでの凍結傷害指数と葉片組織からの電解質漏出割合との関係

注：傷害率100%の試料は、葉片組織を磨砕して作出した。

第3表 磨砕した試料と-80℃で凍結後に融解した試料の電気伝導度

	試験1(3月18日)			試験2(3月19日)			平均		
	磨砕試料 (A) (ms/cm)	凍結試料 (B) (ms/cm)	割合 (B/A) (%)	磨砕試料 (A) (ms/cm)	凍結試料 (B) (ms/cm)	割合 (B/A) (%)	磨砕試料 (A) (ms/cm)	凍結試料 (B) (ms/cm)	割合 (B/A) (%)
コマツナ	1.48±0.04	1.29±0.05	87.1	1.45±0.03	1.26±0.03	86.9	1.47±0.04	1.28±0.04	87.1
ハウレンソウ	1.92±0.01	1.69±0.03	88.0	2.30±0.01	1.97±0.04	85.7	2.11±0.01	1.83±0.04	86.7



第14図 個体レベルでの凍結傷害指数と葉組織からの電解質漏出割合との関係

注：傷害率100%の試料は、 -80°C で凍結/融解させて作出した。

4) 考察

電気伝導度法により耐凍性を評価する根拠は以下のとおりである。細胞内には多くの電解質が存在するが、通常、細胞膜の選択透過性により、細胞内外の電解質の濃度差が維持されている。しかし、組織や細胞が氷点下の気温にさらされると、まず、細胞外凍結が開始する。すると、細胞内外に水ポテンシャルの差が生じ、細胞の内から外へ水が移動する。その結果、細胞内は脱水状態になるとともに、細胞の体積は著しく減少し、また、細胞外で生長した氷晶により細胞が物理的に変形させられる⁵⁹⁾。凍結傷害機構は未だ明確に解明されていないが、細胞膜が凍結傷害の初発部位であることが知られている^{15)、16)、71)}。細胞膜が損傷を受けると、融解後に細胞内の電解質が外に漏出する。そこで、漏出した電解質の量をECで測定し、耐凍性を評価する。

T_{EL50} はクイモ組織切片において、細胞の半数が凍結傷害により致死する温度であることが確認されている(村井麻理, 未発表)。しかし、 T_{EL50} は耐凍性指標として用いられているが、必ずしも作物を個体レベルでみて栽培継続可能な程度の凍結傷害が引き起こされる範囲内の温度を示すものではない。

本試験において、 T_{EL50} と個葉の傷害率50%で示される温度は、コマツナ、ホウレンソウともに低温、中温、高温区の順に低く、各区の相対的な耐凍性程度の評価は T_{EL50} と個葉の50%傷害割合による評価法で一致した。しかし、 T_{EL50} と実際の個葉の傷害率が50%となる温度間には $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ ほどの差がみられ、 T_{EL50} の方が常に低い温度で表示された(第12図)。このことは、 T_{EL50} で示される温度は耐凍性を実際の個葉の傷害よりも過大に評価する可能性のあることを示唆している。

磨砕試料を障害率100%とした場合の T_{EL50} は、個体の凍結傷害程度と対比すると、コマツナおよびホウ

レンソウともに傷害程度3、すなわち、“致死していないものの、傷害が著しい”に相当した(第13図)。実際栽培においては、この傷害程度はその後の生育に著しい影響があり、栽培を継続することが困難な段階である。実際栽培を勘案した場合、傷害程度1、すなわち、“凍結傷害が葉先や葉辺に若干みられるものの、その後の生育に大きな影響がない”に相当する温度で耐凍性を表示する必要があると考えられる。このような観点からコマツナとホウレンソウの耐凍性を示す場合、磨砕した試料を傷害率100%として算出した時の電解質漏出割合は、15%で表示するのが適当と考えられる。

また、 -80°C で凍結させて完全に致死させた試料のECを障害率100%として算出した場合も、 T_{EL50} で示される温度は磨砕した場合と同様、実際栽培においては栽培を継続することが困難な傷害程度であった(第14図)。したがって、栽培を継続できる温度範囲内、すなわち、傷害程度1で耐凍性を表示するには、 -80°C で完全に致死させた試料のECを傷害率100%として算出した場合、電解質漏出割合は20%で表示するのが適当と考えられる。

5) 要約

葉菜類の実際栽培に適用しうる耐凍性の電気伝導度法による評価法を確立するため、異なった温度条件下で低温馴化されたコマツナとホウレンソウを用いて、個体レベルの凍結傷害と葉片組織から漏出する電解質量との関係を調査した。

コマツナ、ホウレンソウともに、葉片組織からの電解質漏出と個葉の凍結傷害葉面積で測定した耐凍性は、どちらの評価法においても異なる3段階の低温馴化温度(高温、中温、低温処理)の違いに対応していた。さらに、傷害温度の関係もどちらの評価法で測定して

も同様であった。しかし、いずれの低温馴化温度条件においても、凍結-融解された葉片組織から電解質が50%漏出する温度 (T_{EL50}) と個葉の葉面積の50%が傷害を受ける温度との間には、2~4°Cの差がみられ、 T_{EL50} の方が常に低く表示された。

T_{EL50} は、コマツナ、ハウレンソウともに個体レベルでみると“葉の大部分が著しく傷害され、栽培継続が困難な傷害を受ける温度”に相当した。実際の栽培における耐凍性は“凍結傷害が葉先や葉辺に若干みられるものの、その後の生育に大きな影響がない”程度で評価する必要がある。このような観点からコマツナおよびハウレンソウの耐凍性を評価する場合、 T_{EL15} (磨砕した葉片組織からの電解質漏出を100%とした場合) ないしは T_{EL20} (-80°Cでの凍結後の融解によって完全に致死させた葉片組織からの電解質漏出を100%とした場合) で表示するのが適当と考えられる。

3 低温遭遇がハウレンソウとコマツナの適合溶質の変化と耐凍性の増大に及ぼす影響

1) 目的

北東北地域において、無加温ハウスを利用してハウレンソウやコマツナを生産する場合、凍結傷害を回避することが重要である。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および両作物の耐凍性とハウス内気温との間の関係について、また、凍結傷害の危険の高まる晩秋から初冬にかけてと早春にかけてのハウス気温管理についてはI章6節でふれる。本節では、両作物の耐凍性に関する基礎知見を得るために、人工気象器を用いて実験を行ない、両作物が低温に遭遇した際に浸透濃度、糖、ベタイン、プロリン含量がどのように変化するか、そして、これらの物質が耐凍性とどのような因果関係にあるのかを明確にする。

2) 方法

(1) 供試材料の育成、低温馴化および試料の採取

ハウレンソウ‘ソロモン’を2001年11月1日に、コマツナ‘せいせん7号’を同日に縦50cm、横20cm、深さ20cmのプランターに播種した。播種密度は株間3cm、条間7cmとし(約45個体/プランター)、ハウレンソウは2個、コマツナは1個のプランターに播種した。播種後、20°C/15°C(明/暗)、12時間日長(光強度、256mmol/m²/sec)に設定した人工気象器で、ハウレンソウを32日間、コマツナを22日間育成した(ハウレンソウ、草丈16.2cm、生体重4.2g/個体、7.5葉; コマツナ、草丈16.3cm、生体重6.3g/個体、4葉)。その

後、12月3日に両作物を同時に昼夜5°C(12時間日長; 光強度、82mmol/m²/s)の人工気象器に移し、低温馴化を開始した。低温馴化期間中の気温は、最初の5週間は昼夜5°Cとし、次の5週間は昼夜2°Cとした。この間、1週間おきに耐凍性を測定するとともに、分析試料を採取して、-80°Cで凍結保存した。

(2) 耐凍性の評価

耐凍性は電解質漏出法で測定した。試料には下葉(ハウレンソウでは第1~2葉、コマツナでは第1葉)を除いた葉身部を供した。各試料を5mm角に刻み、0.2gを秤量して試験管(14mm×100mm)に入れ、蒸留水を0.1ml加えてパラフィルムで栓をした後、プログラムフリーザーに入庫し、植氷して凍結を誘発させた。植氷後、2時間放置し、凍結に伴って発生する潜熱が十分に逸散するのを確認してから、-2.5°C/hrの速度で温度を降下させた。植物体の温度が目的の温度に達した時点でプログラムフリーザーから試験管を取り出し、暗黒下4°Cで翌朝まで緩やかに融解させた。なお、反復数は2回とし、植物体の温度は葉柄に熱電対温度センサーを挿入して測定した。

翌朝、試験管に蒸留水を加えて振とうし、加えた水のEC測定した。耐凍性は T_{EL50} (50%の電解質漏出が引き起こされた温度)で示したが、その方法、算出方法はI章2節2.(3)で示した方法と同様である。

(3) 水分含量および浸透濃度の測定

耐凍性測定時にハウレンソウとコマツナの葉を採取し、新鮮重を測定した。その後、80°Cで48時間通風乾燥し、乾物重を測定した。そして、新鮮重と乾物重の差から水分含量を求めた。浸透濃度はあらかじめ凍結した試料をプラスチック製の乳棒を用いてマイクロチューブ内で破碎した後、13,000×gで遠心分離し、得られた上清を浸透圧計(WESCOR社製)を用いて測定した。

(4) 糖類の定量

試料1gに90%(v/v)メタノール10mlを加え、ホモジナイザーで破碎した後、80%(v/v)メタノール10mlを加え、80°Cで20分間煮沸して糖類を抽出した。抽出液を100mlに定容し、メンブレンフィルターで過後、HPLC(検出器、電気化学検出器; カラム、Carbopac PA-1; 溶離液、100mmol NaOH; 流速、1ml・min⁻¹)でグルコース、フルクトース、スクロースを分別定量した。

(5) ベタインの定量

マイクロチューブに入れた試料(200~250mgFW)

に1N H₂SO₄ 0.6mlを加え、プラスチック製の乳棒を用いて破碎した後、常温で一晩振とうした。翌日、4℃、13,000×gで遠心分離して得られた上清に、KI/I₂液 (KI: 20 g, I₂: 15.7 gを蒸留水100mlに溶解) 0.4 mlを加えて懸濁した後、2時間以上氷冷した。その後、4℃、13,000×gで15分間遠心分離し、上清を捨て、沈殿を60℃で30分間真空乾燥した。沈殿に重水0.4mlを加え、懸濁した後、2時間真空乾燥した (この操作を2回繰り返した)。その後、沈殿に重水0.597mlを加え、さらに内部標準として1% (v/v) ブチルアルコール0.03mlを加え、NMR (JEOL AL-400 FT-NMR) で測定・定量した。

(6) 遊離アミノ酸の定量

マイクロチューブに入れた試料 (200~250mgFW) に2% (w/v) サリチル硫酸1mlを加え、プラスチック製の乳棒を用いて破碎した後、4℃で20分間攪拌した。その後、13,000×gで遠心分離後の上清を0.4μmのメンブレンフィルターでろ過し、アミノ酸分析機 (JEOL, JLC-500/V, 日立製作所社製) で遊離アミノ酸を分別定量した。

3) 結果

(1) 耐凍性

低温遭遇前のハウレンソウとコマツナのT_{EL50}は、それぞれ-6.5℃、-5.6℃であったが、5℃の低温遭遇5週目にはそれぞれ-14.8℃、-16.4℃に低下した (第15図A)。その後の2℃遭遇2週目には、T_{EL50}はハウレンソウで約-17℃、コマツナで約-18℃に低下し、それ以降は変化しなかった。

(2) 水分含量

ハウレンソウ葉の水分含量は低温遭遇前は85 g/100gFWであり、5℃遭遇中はほとんど変化しなかったが、2℃遭遇5週目には約80g/100gFWとなった (第15図B)。コマツナ葉の水分含量は低温遭遇前は89 g/100gFWであったが、5℃遭遇5週目には84g/100gFWとなり、その後の2℃遭遇5週目には79g/100gFWまで減少した。両作物ともに5℃遭遇よりも2℃遭遇の方が水分含量の低下が大きかった。

(3) 浸透濃度

ハウレンソウとコマツナ葉の浸透濃度は低温遭遇前はそれぞれ375、338mmol/kgであったが、5℃遭遇により徐々に上昇し、遭遇5週目にはそれぞれ634、611 mmol/kgとなった (第15図C)。その後の2℃遭遇中にはハウレンソウ葉の浸透濃度は最初の1週間にやや上昇したが、その後は一定で推移し、約700mmol/kgで

ほぼ最大に達した。コマツナ葉は低温遭遇期間を通じて徐々に上昇し、2℃遭遇5週目には967mmol/kgとなった。

両作物の葉の浸透濃度とT_{EL50}との間は、ハウレンソウ、コマツナともに浸透濃度300~700mmol/kgの範囲内で、高い負の相関関係が認められた (第16図A)。また、700mmol/kg以上の領域では、両作物ともに浸透濃度が上昇してもT_{EL50}は低下しなかった。

(4) 糖含量

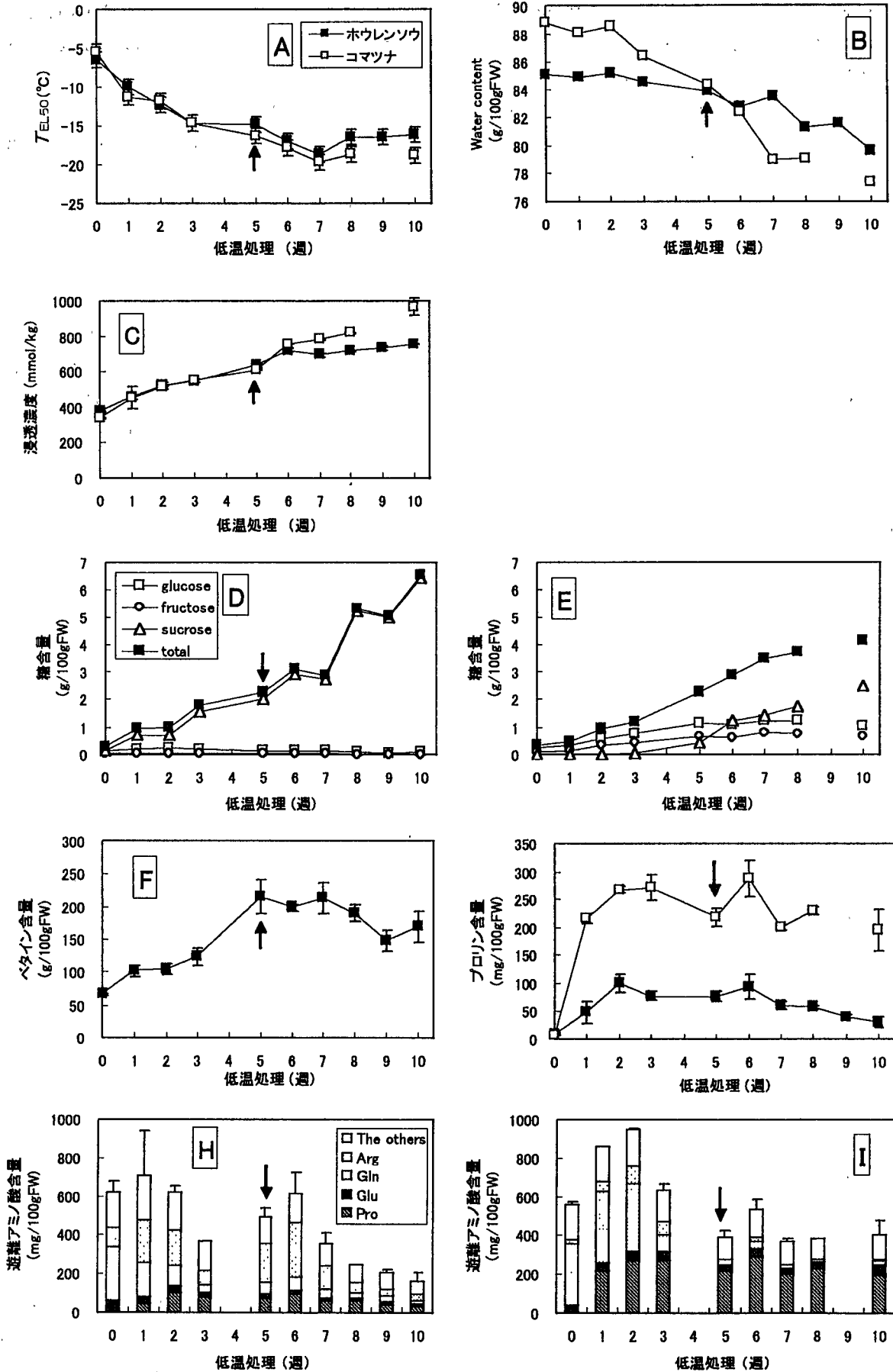
低温遭遇によりハウレンソウ、コマツナ葉ともに全糖含量 (グルコース、フルクトース、スクロース含量の合計値) が高まった (第15図D, E)。しかし、ハウレンソウとコマツナ葉では3種の糖の蓄積の時期と量が異なり、ハウレンソウ葉では、低温遭遇により、スクロース含量は高まったが、グルコースとフルクトース含量は変化しなかった。これに対して、コマツナ葉では、5℃遭遇中には、グルコースとフルクトース含量は高まったが、スクロース含量はほとんど高まらなかった。そして、2℃遭遇によりスクロース含量も高まった (第15図E)。一方、グルコースとフルクトース含量は気温を2℃遭遇中増加しなかった。

ハウレンソウでは0.3~3.0 g/100gFW、コマツナでは0.3~3.5g/100gFWの範囲内で、糖含量とT_{EL50}の間に高い負の相関関係が認められた (第16図B)。しかし、ハウレンソウ、コマツナともに、それ以上糖含量が高まってもT_{EL50}は低下しなかった。

(5) ベタイン含量

ハウレンソウではベタイン含量は低温遭遇1~5週目にかけて高まった。その後は気温を2℃に下げても変化せずに、約200mg/100gFWで推移した (第15図F)。70~150mg/100gFWの範囲内ではベタイン含量とT_{EL50}の間には高い負の相関関係が認められた。しかし、150mg/100gFW以上にベタイン含量が高まってもT_{EL50}は低下しなかった (第16図C)。

一方、コマツナではベタインは検出されなかった。このことがプランターを用いて、人工気象器内で育成・低温遭遇したための現象なのかどうかを確認するため、実際のハウス栽培の初冬と厳寒期にハウレンソウ (初冬, 2001年11月20日; 厳寒期, 2002年2月6日) とコマツナ (初冬, 2001年11月19日; 厳寒期, 2002年1月31日) についてベタイン含量を測定した結果、ハウレンソウでは初冬には約53mg/100gFW、厳寒期には約270mg/100gFWのベタインが検出され、人工気象器で育成したものとほぼ同じであったが、コマツナでは秋



第15図 10週間の低温処理に伴うホウレンソウ (■) とコマツナ (□) の T_{EL50} (A)、水分含量 (B)、浸透濃度 (C)、糖含量 (D, ホウレンソウ; E, コマツナ)、ベタイン含量 (F)、プロリン含量 (G)、遊離アミノ酸含量 (H, ホウレンソウ; I, コマツナ) の変化

注: B, C, G図の印はA図と同様。E図の印はD図と同様。I図の色分けはH図と同様。

期、冬期ともにベタインは検出されなかった。これらのことから、コマツナはベタインを合成しないと結論された。

(6) プロリンと遊離アミノ酸含量

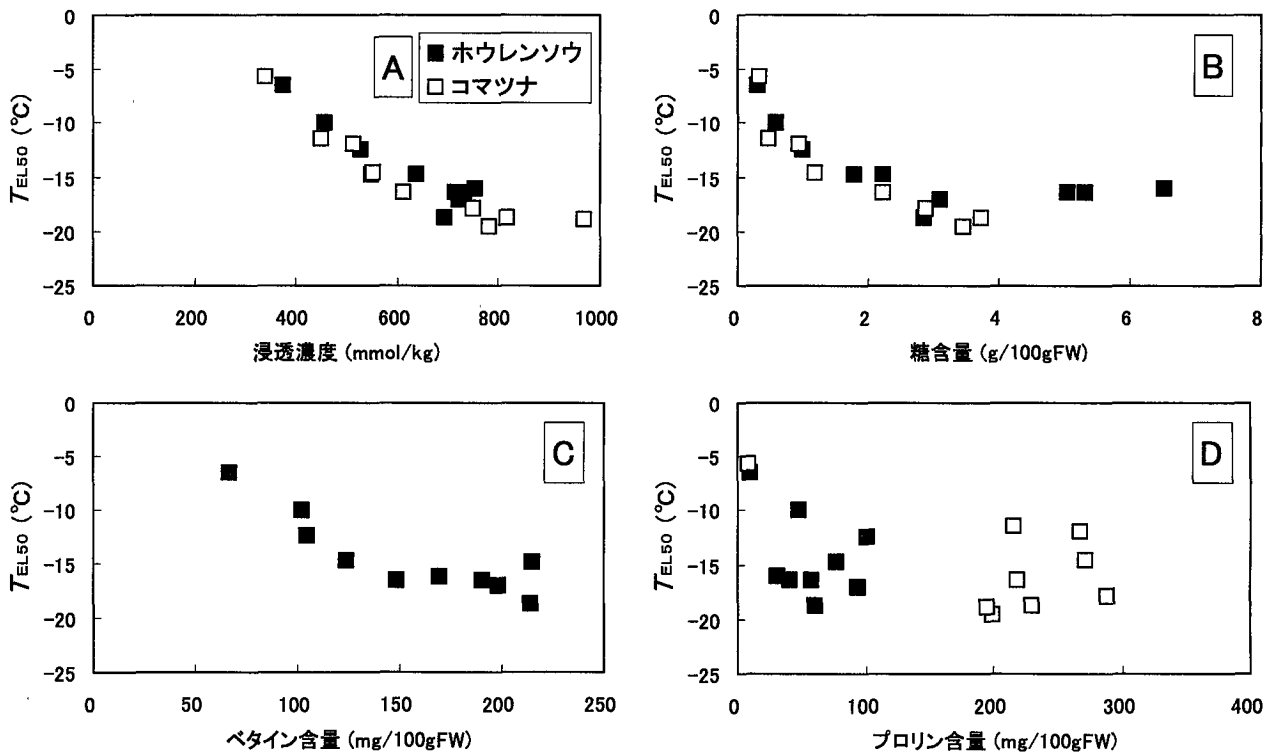
ホウレンソウの低温遭遇前の全遊離アミノ酸含量は約600mg/100gFWで、5℃遭遇1週目に若干高まり(約700mg/100gFW)、その後漸減し、遭遇5週目には500mg/100gFWとなった(第15図H)。2℃遭遇1週目には600mg/100gFWに高まり、その後漸減した。コマツナでは低温遭遇前の全遊離アミノ酸含量は550mg/100gFWで、5℃遭遇2週目には950mg/100gFWに高まった(第15図I)。その後低下し、5℃遭遇5週目には400mg/100gFWとなった。2℃遭遇1週目には530mg/100gFWに高まっが、その後、2℃遭遇2～5週目にかけては約400mg/100gFWで推移した。なお、ハウス栽培における厳寒期(2002年1月28日)の全遊離アミノ酸含量は、ホウレンソウ、コマツナがそれぞれ約342、約654mg/100gFWであった。

次に、プロリン含量についてみると、低温遭遇前はホウレンソウ、コマツナともに約10mg/100gFWであったが、低温遭遇により急速に高まった(第15図G)。

ホウレンソウでは5℃遭遇2週目に約100mg/100gFWに高まり、2℃遭遇1週目まで80～100mg/100gFWで推移し、2℃遭遇2週目以降は漸減した。コマツナでは5℃遭遇2週目に約270mg/100gFWに高まり、それ以降は200～300mg/100gFWで推移した。なお、ハウス栽培における厳寒期(2002年1月28日)のプロリン含量は、ホウレンソウ、コマツナがそれぞれ約59、約288mg/100gFWであった。

また、遊離アミノ酸含量中に占めるプロリン含量の割合は、低温遭遇前はホウレンソウ、コマツナともに約1%(重量比)であったが、5℃遭遇2週目にはホウレンソウ、コマツナでそれぞれ18、31%に高まった。ホウレンソウではその後、ほぼ同じ割合で推移したが、コマツナでは5℃遭遇5週目には55%となり、その後50%台の高い割合で推移した。なお、ハウス栽培における厳寒期(2002年1月28日)の遊離アミノ酸含量中に占めるプロリン含量の割合は、ホウレンソウ、コマツナがそれぞれ約17、約44%であった。

プロリン以外の遊離アミノ酸を種類ごとにみると、ホウレンソウでは低温遭遇前はグルタミン、アルギニン、グルタミン酸含量の順に高く、それぞれ280、100、



第16図 ホウレンソウとコマツナの10週間の低温処理に伴う浸透濃度 (A, ホウレンソウ; B, コマツナ)、糖含量 (C, ホウレンソウ; D, コマツナ)、ベタイン含量 (E, ホウレンソウ)、プロリン含量 (F, ホウレンソウ; G, コマツナ) と T_{EL50} との関係

注: B, C, D図の印はA図と同様。

50mg/100gFWであった。低温遭遇によりグルタミン含量は減少し、5℃遭遇3週目以降は60~20mg/100gFWで推移した。アルギニン含量は5℃遭遇1、2週目および5週目、2℃遭遇1週目には低温遭遇前より高まり、200~280mg/100gFWとなったが、時期により一定しなかった。グルタミン酸含量は低温遭遇による大きな変化はみられなかった。コマツナでは、低温遭遇前はグルタミン含量が300mg/100gFWで最も高く、5℃遭遇2週目まで350~370mg/100gFWで含量で推移した。しかし、5℃遭遇3週目以降は漸減した。アルギニン含量は低温遭遇前の20mg/100gFWから5℃遭遇1~3週目には60~90mg/100gFWに高まったが、それ以降は約20mg/100gFWに減少した。グルタミン酸含量は低温遭遇によって変化しなかった。

4) 考察

低温遭遇によりハウレンソウとコマツナの浸透濃度が高まり、約350~700mmol/kgの範囲内で浸透濃度と T_{EL50} との間には高い負の相関関係が認められた(第15図C, 第16図A)。浸透濃度が高まると一般に凝固点が降下する。しかし、溶液のモル凝固点降下は浸透濃度400mmol/kgで -0.7°C 、1,000mmol/kgで -1.9°C であり³⁹⁾、浸透濃度が2倍に高まっても凝固点は 1.2°C 降下するだけである。このことから、浸透濃度上昇に伴う凝固点降下の耐凍性増大に対する寄与は小さいと考えられる。一方、浸透濃度が高まると細胞外凍結時において細胞内の脱水量は減少する。細胞内を理想溶液系と仮定すると、細胞内溶液の浸透濃度が400mmol/kgから1,000mmol/kgに高まると、細胞外凍結により細胞内の水分の80%が脱水される温度は、 -3.5°C から -9.5°C へと低下する⁴⁰⁾。このことから、耐凍性の増大に対する浸透濃度上昇の寄与は、細胞外凍結時の脱水量を緩和させる点で大きいと考えられる。

細胞内の80%の水が脱水されると、凍結前の細胞内の各溶質濃度は5倍に濃縮されることになる。細胞内の塩濃度が過度に上昇すると、酵素の疎水部分が互いに結合して酵素活性を失う⁴⁰⁾。適合溶質である糖類、ベタインおよびプロリンは電荷が分子全体として中性であり、高濃度に蓄積しても生体高分子の構造を乱さず、その一方で、細胞質内において高濃度に濃縮された塩類から酵素を保護する機能があると考えられている⁴⁰⁾。

本研究において、低温遭遇によりハウレンソウでは糖、ベタイン、プロリンが蓄積され、コマツナでは糖とプロリンが蓄積された。しかし、これらの3種の適

合溶質は蓄積される時期がおおの異なる、また、蓄積された量も異なった。さらに、糖とベタインは T_{EL50} と高い負の相関関係が認められたが、プロリンは T_{EL50} との相関関係が認められなかった。

これらのことから、適合溶質である糖、ベタイン、プロリンの耐凍性増大に果たす役割は違いのあることが推測された。

一般に、氷点下の凍結に耐える能力を持つ植物は、低温に遭遇すると糖含量が高まる⁵⁵⁾。キャベツ⁶¹⁾やハウレンソウ、コマツナ(I章5節)は暗黒下で低温処理をしても耐凍性が增大しない。しかし、Uemura・Steponkus⁵⁸⁾はシロイヌナズナにおいて、暗黒下であってもスクロース添加培地で低温処理すると、耐凍性が光照射下で低温処理した場合と同程度まで増大することを確認し、耐凍性が增大するためには糖の存在が必要不可欠であることを立証した。

秋から冬にかけて耐凍性が増大する植物の多くは、低温遭遇により細胞内に糖を蓄積する。この蓄積された糖は、細胞内の浸透濃度を高め、細胞外凍結時における脱水量の緩和に寄与していると考えられる。また、糖の生体膜保護作用に関する考え方には、糖と生体膜との相互作用により、膜の安定性が保たれる⁷⁾という考え方と、糖が脂質2重層の接近を制限し、スペーサーとして働く³⁷⁾という考えの二つがある。しかし、両者とも、糖が細胞内が脱水された状態において膜間に残り、細胞膜と細胞内膜の異常接近を防止し、生体膜の保護作用を果たしているという考え方では一致している。

本研究でも、低温遭遇1~10週目にかけてハウレンソウとコマツナ葉の全糖含量(グルコース、フルクトース、スクロース)が高まった(第15図D, E)。そして、全糖含量と T_{EL50} との関係をみると、全糖含量がハウレンソウでは0.3~3g/100gFW、コマツナでは0.3~3.5g/100gFWの範囲内で全糖含量と T_{EL50} との間に高い負の相関関係が認められた(第16図B)。このことから、上述の範囲内の糖は、浸透濃度の上昇や、細胞膜と細胞内膜の異常接近の防止などの役割を果たし、両作物の耐凍性の増大に密接に関係していると考えられる。

一方、ハウレンソウ、コマツナともに0.3~約3g/100gFWの範囲内で全糖含量と T_{EL50} との間に密接な相関関係が認められたが、それ以上に糖含量が高まっても T_{EL50} は低下しなかった(第16図B)。糖類が細胞質に蓄積されるならば細胞膜と細胞内膜との異常接近による膜融合を防止する役割を果たすと考えられるが、

液胞に蓄積されるならば、その効果は期待できない。このことから、両作物において、上記の範囲以上に蓄積された糖類は、主に液胞に蓄積された可能性が考えられる。

本研究において、ハウレンソウの全糖含量は低温遭遇期間中の10週間、徐々に蓄積されたのに対し（第15図D）、ベタイン含量は、5℃遭遇1～5週目にかけて高まり、その後の2℃遭遇では高まらなかった（第15図F）。しかし、ベタインは糖よりも含まれる含量は少ないが、糖と同様にベタイン含量は70～150mg/100gFWの範囲内で T_{EL50} の間に高い負の相関関係が認められた（第16図C）。

ベタインは葉緑体で合成され、葉緑体内に高濃度に蓄積されている²⁰。そして、葉緑体に蓄積したベタインは細胞質にも輸送され、細胞質においても浸透圧調節に関与していると考えられている。また、ソマノハナアカザにおいて、ベタインは液胞中には局在しないことが明らかにされた⁴¹。ベタインは浸透圧調節機能のみではなく、塩、高温および低温ストレス下において、生体高分子化合物の高次構造を保持する作用があると考えられている²⁴。さらに、ベタインは耐凍性の向上に寄与することがシロイヌナズナで示された⁵⁶。ベタインは凍結下において生体膜の安定化に貢献していると考えられている⁵⁷。これらのことから、本研究において、ハウレンソウで低温遭遇により蓄積されたベタインは、葉緑体や細胞質内で浸透圧調節や生体高分子化合物の高次構造を保持する役割を果たし、また、生体膜の安定化などの役割を果たして、耐凍性増大に寄与していると推測される。

一方、ベタインはコマツナでは検出されなかった。環境ストレス下でベタインを合成する植物種と合成しない植物種のあることが知られており、ハウレンソウやコムギ、オオムギなどベタインを合成し、シロイヌナズナ、ナタネ、タバコ、イネなどはベタインを合成しない⁶¹。

シロイヌナズナにベタイン合成遺伝子導入すると、低温馴化しない条件下で、遺伝子導入シロイヌナズナが導入しないシロイヌナズナよりも T_{EL50} が約4℃低下し、また、シロイヌナズナに5～40mMのベタインを噴霧すると、噴霧しない場合よりも T_{EL50} が約4℃低下した。このことから、ベタインは耐凍性増大に寄与していることが示された⁵⁶。しかし、低温馴化後は遺伝子導入シロイヌナズナも導入しないシロイヌナズナも、ともに T_{EL50} が低下し、両者の T_{EL50} 間にはほとんど差が

なかった。この事実は、本来ベタインを合成しない植物は、ベタインの代替えをする機能を他に具備していることを示唆している。本研究において、ベタインを合成するハウレンソウと合成しないコマツナで低温馴化後の T_{EL50} にはほとんど差がなかったが、このことは、コマツナでベタインの代替えをする何らかの機能が働いたためと考えられる。

本研究では、プロリン含量はハウレンソウ、コマツナともに5℃遭遇1～2週目にかけて急激に高まった（第15図G）。ただし、最大に達したときの含量はハウレンソウとコマツナでは異なり、ハウレンソウが約100mg/100 gFW、コマツナが約250mg/100 gFWであった。しかし、両作物ともに、その後の5℃、2℃での低温遭遇では大きく変化せず、プロリン含量と T_{EL50} との間に相関関係は認められなかった。両作物の遊離アミノ酸含量に占めるプロリン含量の割合は、低温遭遇前は約1%であったが、5℃遭遇1～2週目にかけて急激に高まり、ハウレンソウでは約18%に、コマツナでは50%台まで高まった（第15図H, I）。

両作物においてプロリンは低温遭遇1～2週目の早い時期に蓄積されたことから、プロリンは20/15℃（明/暗）の生長に適した温度から急に昼夜5℃の低温にさらされた時の両作物の適応に、何らかの役割を果たしていると考えられる。

多くの植物は環境ストレスを受けると細胞内にプロリンを蓄積する³²。プロリンは浸透圧調節以外にもタンパク質の保護⁶⁵、活性酸素の除去⁶⁹などの機能を持つと考えられている。これらのことから、プロリンは浸透圧調節、タンパク質の保護、活性酸素の除去などの役割を果たし、両作物の耐凍性増大に寄与していると考えられる。また、Sivakumarら⁶⁰は高等植物（*Brassica juncea*, *Oryza sativa*, *Sesbania sesban*）では葉緑体に高濃度にプロリンが存在すると、ルビスコの活性を減少させることを報告している。そして、光合成活性を減少させることで、有害な酸化物の発生を抑制し、高等植物のストレス耐性を向上させると考えている。ハウレンソウ、コマツナは低温遭遇により草丈の伸長や生体重の増加が抑制される（第48図、第73図）。この低温遭遇による生長抑制の一因として、プロリンによる光合成活性の減少の可能性も考えられる。

多くの植物で低温誘導タンパク質が知られている⁸³、⁵⁸。コマツナにおいても低温により誘導される水溶性の熱安定性タンパク質が存在する（田村・村井、

未発表)。本研究において、ホウレンソウ、コマツナ
の全遊離アミノ酸含量は5℃および2℃遭遇直後に一
時的に増加する傾向がみられた。しかし、この増加が
低温誘導タンパク質を合成に必要な基質としてのアミ
ノ酸合成によるものか、低温にさらされたことにより、
常温状態で存在していたタンパク質の分解に起因する
のかは不明である。10週間の低温処理期間中、全体的
にみるとプロリン以外の遊離アミノ酸は漸減している。
このことが、低温によりアミノ酸合成系が制御された
ためなのか、低温により土壌からの窒素吸収が制限さ
れたためなのかは、本研究において明らかにはできな
かった。また、ホウレンソウにおいて、アルギニン含
量が5℃および2℃での低温処理直後に高まったが、
アルギニンが耐凍性増大に寄与しているかどうかは不
明である(第15図H)。低温馴化中における遊離アミ
ノ酸の挙動についての報告は少ないので、今後、詳細
な調査が必要と考えられる。

5) 要約

10週間の低温処理(最初の5週間は5℃, 後の5週
間は2℃で実施)がホウレンソウとコマツナの耐凍性
と浸透濃度、適合溶質含量(糖類, グリシンベタイン,
プロリン)に及ぼす影響を調査した。ホウレンソウと
コマツナの耐凍性は最初の6週間の低温処理で両作物
ともに約-6℃から-17℃ないしは-18℃に徐々に増
大し、その後の4週間は両作物ともに平衡状態で推移
した。浸透濃度はホウレンソウでは低温処理6週目ま
で、コマツナでは低温処理10週目まで徐々に高まった。
両作物ともに300~700mmol/kgの範囲内の浸透濃度と
耐凍性との間には密接な関係が認められた。両作物の
全糖含量は10週間の低温処理期間中、徐々に増加した。
ホウレンソウで0.3~3 g/100gFW、コマツナで0.3~
3.5g・100g/FWの範囲内の全糖含量と耐凍性との間
には密接な関係が認められた。グリシンベタイン含量
はホウレンソウでは最初の5週間の低温処理期間中に
70mg/100gFWから200mg/100gFWに高まり、後の5
週間は平衡状態で推移した。しかし、コマツナではグ
リシンベタインは検出されなかった。プロリン含量は
最初の2週間の低温処理でホウレンソウでは9 mg/
100gFWから100mg/100gFWに、コマツナでは8 mg/
100gFWから270mg/100gFWに高まった。これらの低
温処理期間中に蓄積された糖、グリシンベタインおよ
びプロリンはホウレンソウとコマツナの耐凍性と密接
な関係がみとめられることから、両作物の耐凍性増大
に寄与していると考えられる。

4 ホウレンソウとコマツナの異なる葉位における耐凍性の差異

1) 目的

低温馴化により、ホウレンソウとコマツナの耐凍性
が増大することを先に示した(I章-3節)。しかし、
同一個体において、低温処理前にすでに完全に展葉し
ている葉と、低温処理期間中に展葉ないしは出葉した
葉では耐凍性が異なることが考えられる。

冬期栽培における実際の圃場においても、10月上中
旬に播種し、ハウス内が暖かな10月中に展葉した葉と
ハウス内気温が低下してから(11月以降)出葉した葉
では、11月や12月の急激な寒波や厳寒期において凍結
傷害の程度が異なる。すなわち、強く凍結すると10月
中に展開した葉は葉辺が白化したり、致死するのに対
し、11月以降に出葉した葉は葉先に軽い褐変がみられ
るか、傷害を受けない場合が多い(第10図A, B)。

このことは、同一の個体が同一の条件で低温馴化さ
れても、各個葉の老化や生長程度により、低温に対す
る応答が異なることを示唆している。そこで、ホウレ
ンソウとコマツナを低温処理した時の、葉位ごとの耐
凍性の変化、適合溶質の蓄積状況を調査し、適合溶質
と耐凍性との関係を検討した。

2) 方法

ホウレンソウは‘ソロモン’, コマツナは‘せいせ
ん7号’を供試し、市販培養土(商品名:元気きくん
1号;窒素、リン酸、カリをそれぞれ0.2、3.75、0.15
g/リットル含む)を充填し、直径18cmの素焼鉢にホ
ウレンソウ、コマツナともに18粒播種した。播種後、
20/15℃(明/暗), 12hr日長(256mmol/m²/sec)に設
定した人工気象器を使用して育成した。ホウレンソウ
は本葉2葉時、コマツナは本葉1枚時に間引きを実施
し、ホウレンソウは9個体/鉢、コマツナは7個体/
鉢にした。播種後、ホウレンソウを32日間、コマツナ
を22日間、前述の人工気象器で育成した後、実験に供
試した。

低温処理は両作物を20/15℃に設定した人工気象器
から昼夜5℃, 12 hr日長(82mmol/m²/sec)に設定し
た人工気象器に移して実施した。

試料の採取は照明が点灯する直前に実施した。耐凍
性測定には各葉位ごとに(ホウレンソウは第1-2、
3-4、5-6、7-8葉、コマツナは1、2、3、
4葉)に葉身を約0.3g供試した。

水分含量、浸透濃度、糖含量、ベタイン含量の測定
はI章3節2.2)と同様の方法で測定した。

3) 結果

(1) 生育

ホウレンソウとコマツナの草丈は、処理前はそれぞれ17.1、16.5cmであったが、処理14日後にはそれぞれ1.7、4.3cm伸長した(第17図A)。両作物の個体重は、処理前はホウレンソウ、コマツナがそれぞれ4.3、7.0g/個体であったが、処理後にはそれぞれ0.6、1.5g/個体増加した(第17図B、C)。

ホウレンソウの各葉位ごとの重量は、処理前は第1-2、3-4、5-6、7-8葉がそれぞれ0.82、0.73、0.65、0.24g/個葉であったが、処理後にはそれぞれ-0.27、0.07、0.25、0.20g/個葉増減した(第17図D)。

コマツナの各葉位ごとの重量は、処理前は第1、2、3、4葉がそれぞれ1.04、1.71、1.26、0.54g/個葉であったが、処理後にはそれぞれ-0.47、-0.22、0.34、1.03g/個葉増減した(第17図E)。

(2) 耐凍性

ホウレンソウの各葉位ごとの T_{EL50} は、処理前は上位葉ほど低く、第1-2、3-4、5-6、7-8葉がそれぞれ-3.9、-4.2、-6.0、-6.9°Cであった。処理14日後の T_{EL50} は上位葉ほど低下し、それぞれ-7.1、-9.8、-12.8、-14.3°Cとなり、処理14日後の ΔT_{EL50} (処理前と処理14日後の差)は、それぞれ-3.2、-5.6、-6.9、-7.4°Cあった(第18図A)。コマツナの各葉位ごとの T_{EL50} は、処理前は第1、2、3、4葉がそれぞれ-5.3、-5.9、-5.5、-6.4°Cであったが、処理14日後にはそれぞれ-9.2、-9.8、-13.3、-14.2°Cとなり、 ΔT_{EL50} はそれぞれ-3.9、-3.9、-7.9、-7.8°Cであった(第18図B)。これらのことから、同一の条件で低温にさらされても、上位葉は耐凍性が大きく増大すること、下位葉は耐凍性が上位葉ほどは増大しないことが明らかになった。

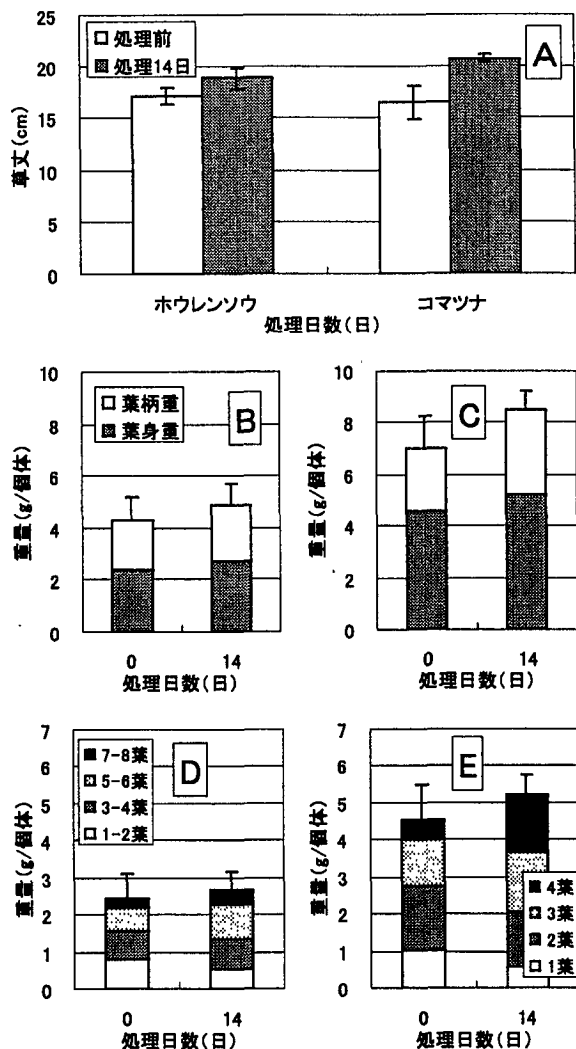
(3) 水分含量

ホウレンソウの各葉位ごとの水分含量は、処理前は第1-2、3-4、5-6、7-8葉がそれぞれ92、87、86、85g/100gFWであったが、処理14日後にはそれぞれ89、86、85、82g/100gFWとなった(第18図C)。コマツナの各葉位ごとの水分含量は、処理前は第1、2、3、4葉がそれぞれ93、92、91、89g/100gFWであったが、処理14日後にはそれぞれ91、88、86、84g/100gFWとなった(第18図D)。

(4) 浸透濃度

ホウレンソウの各葉位ごとの浸透濃度は、処理前は第1-2、3-4、5-6、7-8葉がそれぞれ273、321、357、382mmol/kgであったが、処理14日後にはそれぞれ399、488、503、539mmol/kgに上昇し、 Δ 浸透濃度はそれぞれ126、167、146、157mmol/kgであった(第18図E)。コマツナの各葉位ごとの浸透濃度は、処理前は第1、2、3、4葉がそれぞれ341、360、362、379mmol/kgであったが、処理14日後にはそれぞれ540、592、605、618mmol/kgに上昇し、 Δ 浸透濃度はそれぞれ199、232、242、239mmol/kgであった(第18図F)。

ホウレンソウ(第21図A)、コマツナ(第21図B)の浸透濃度と T_{EL50} との関係は、全体的には同様の関係が認められた。しかし、葉位ごとにみると、上位葉(ホウレンソウでは第3-4、5-6、7-8葉、コマツ



第17図 ホウレンソウとコマツナの低温処理に伴う草丈 (A)、葉身重と葉柄重 (B, ホウレンソウ; C, コマツナ)、葉位ごとの葉身重 (D, ホウレンソウ; E, コマツナ) の変化
注: C図の色分けはB図と同様。

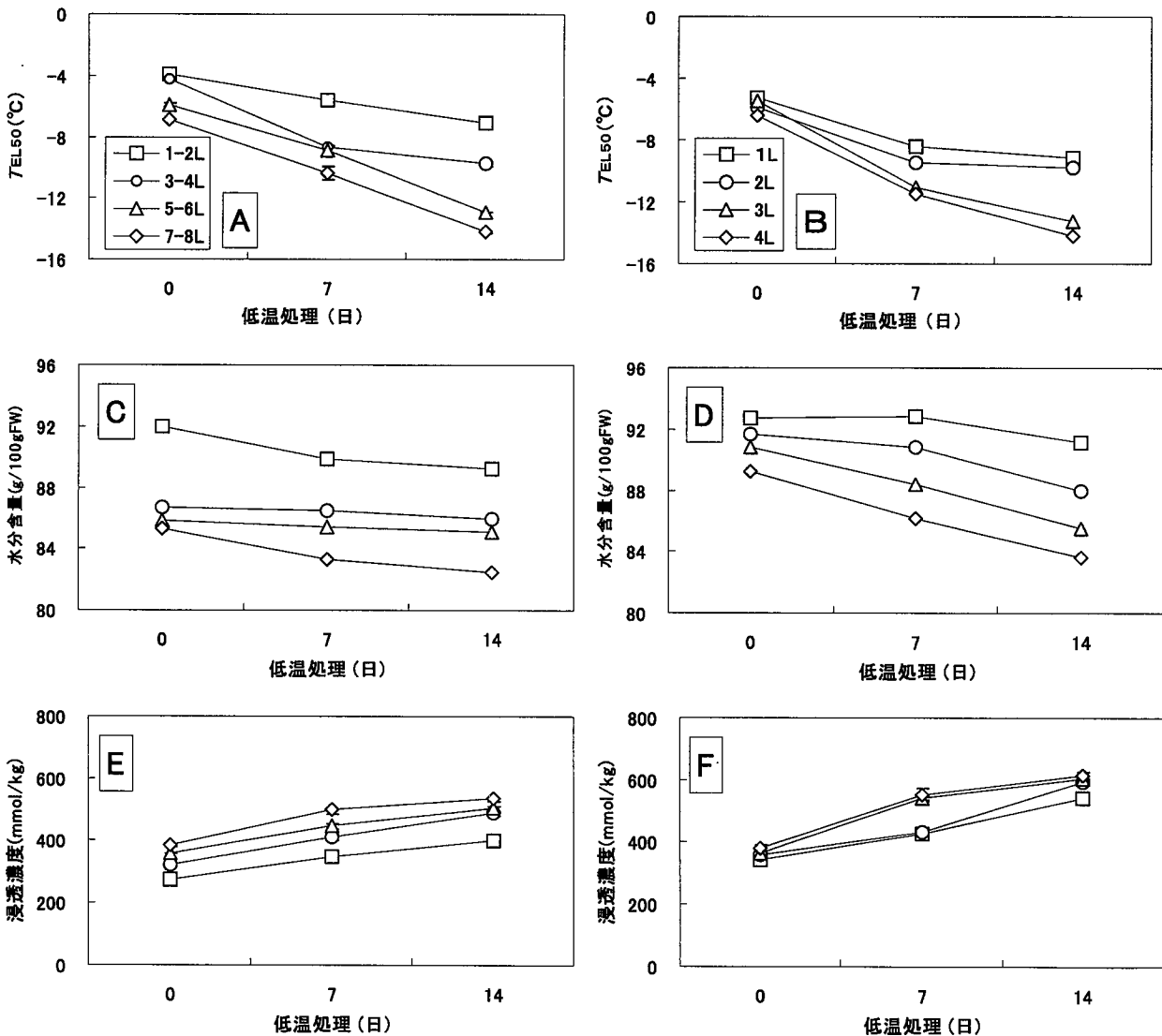
ナでは第3、4葉)は浸透濃度と T_{EL50} との間には高い負の相関関係が認められたが、下位葉(ホウレンソウでは第1-2葉、コマツナでは第1、2葉)は、浸透濃度が高まってもさほど T_{EL50} は低下せず、 T_{EL50} 低下に対する寄与は下位葉が上位葉よりも低い傾向が見られた。

(5) 糖含量

ホウレンソウの各葉位ごとの全糖含量は、処理前は第1-2、3-4、5-6、7-8葉がそれぞれ0.27、0.19、0.32、0.20 g/100gFWであったが、処理14日後にはそれぞれ1.65、2.82、2.66、2.15g/100gFWに高まり、 Δ 全糖含量はそれぞれ1.38、2.63、2.34、1.86 g/100gFWであった(第19図A)。コマツナの各葉位ごと

の全糖含量は、処理前は第1、2、3、4葉がそれぞれ0.20、0.17、0.34、0.67g/100gFWであったが、処理14日後にはそれぞれ1.68、2.46、2.54、2.34 g/100gFWとなり、 Δ 全糖含量はそれぞれ1.47、2.29、2.19、1.67g/100gFWであった(第19図B)。

本実験において、全体的にみると糖含量と T_{EL50} との間に高い負の相関関係が認められた。しかし、葉位ごとにみると、ホウレンソウの第5-6、7-8葉では、糖含量と T_{EL50} との間には高い負の相関関係が認められたが、第1-2、3-4葉では糖含量が高まってもさほど T_{EL50} は低下せず、 T_{EL50} 低下に対する寄与は下位葉が上位葉よりも低い傾向がみられた(第21図C)。コマツナでは第3、4葉では、糖含量と T_{EL50} との間には

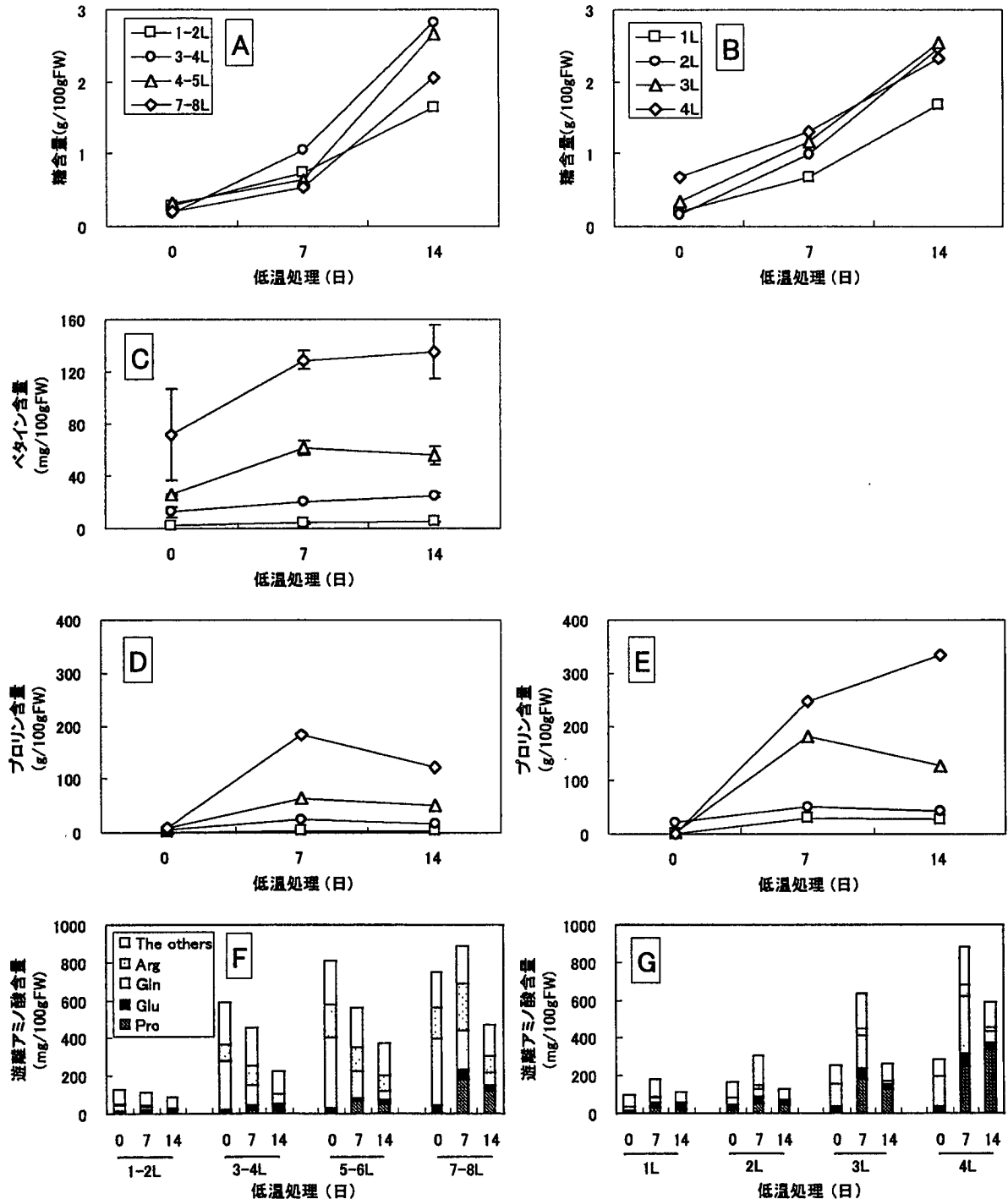


第18図 ホウレンソウとコマツナの低温処理に伴う T_{EL50} の(A, ホウレンソウ; B, コマツナ)、水分含量(C, ホウレンソウ; D, コマツナ)、浸透濃度(E, ホウレンソウ; F, コマツナ)の変化
注: C, E図の図中の印はA図と同様。D, F図の印はB図と同様。

高い負の相関関係が認められたが、第1、2葉では糖含量が高まってもさほど T_{EL50} は低下せず、 T_{EL50} 低下に対する寄与は下位葉が上位葉よりも低い傾向が見られた(第21図D)。

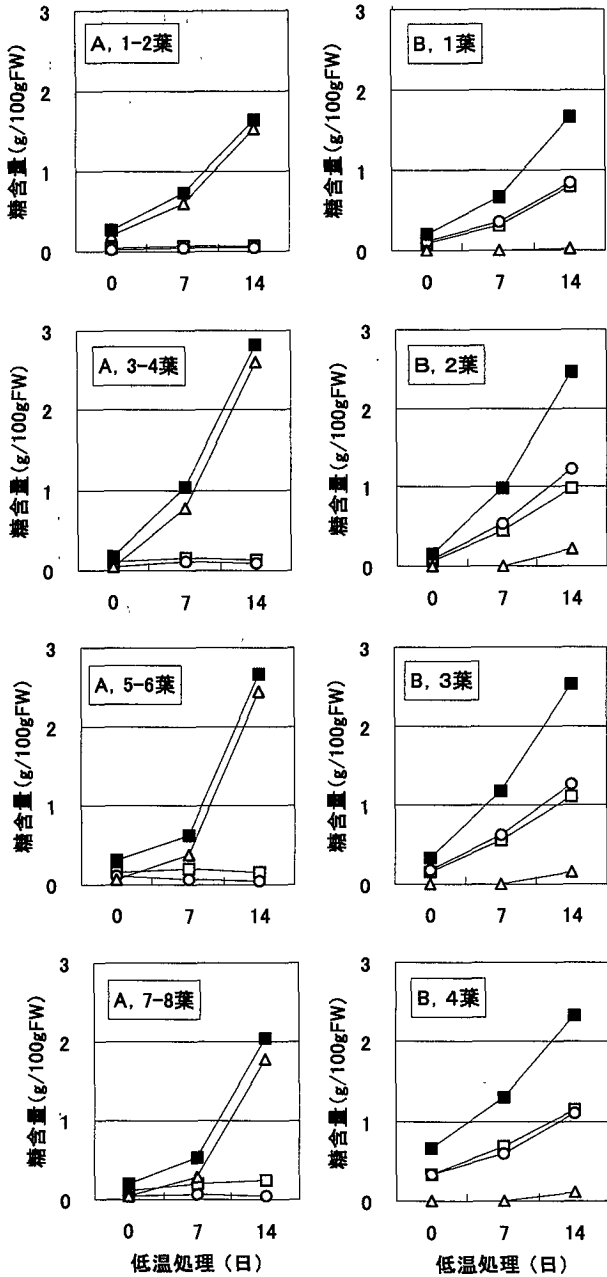
ホウレンソウの葉位ごとの種類の糖含量は、いずれの葉位においても、スクロース含量が大幅に増加し、

グルコースとフルクトース含量の増加量は、わずかであった(第20図)。一方、コマツナではいずれの葉位においても、グルコースとフルクトース含量が大幅に増加し、スクロース含量は第2、3、4葉においてわずかに増加した。



第19図 ホウレンソウとコマツナの低温処理に伴う糖含量 (A, ホウレンソウ; B, コマツナ)、ベタイン含量 (C, ホウレンソウ)、プロリン含量 (D, ホウレンソウ; E, コマツナ)、遊離アミノ酸含量 (F, ホウレンソウ; G, コマツナ) の変化。

注: C, E図の図中の印はA図と同様。D, E図の印はB図と同様。G図の色分けはF図と同様。



第20図 ホウレンソウとコマツナの葉位ごとの糖含量の変化

A, ホウレンソウ B, コマツナ

□, glucose ○, fructose △, sucrose ■, total

(6) ベタイン含量

ホウレンソウのベタイン含量は処理前は、第1-2、3-4、5-6、7-8葉においてそれぞれ2、12、26、72mg/100gFWであり、上位葉ほど含量が高かった。処理14日後には、それぞれ5、25、56、135mg/100gFWとなり、△ベタイン含量はそれぞれ3、13、30、63mg/100gFWであった(第19図C)。

10週間の低温処理(I章-3節)で、ホウレンソウのベタイン含量は低温処理により徐々に高まり、約70

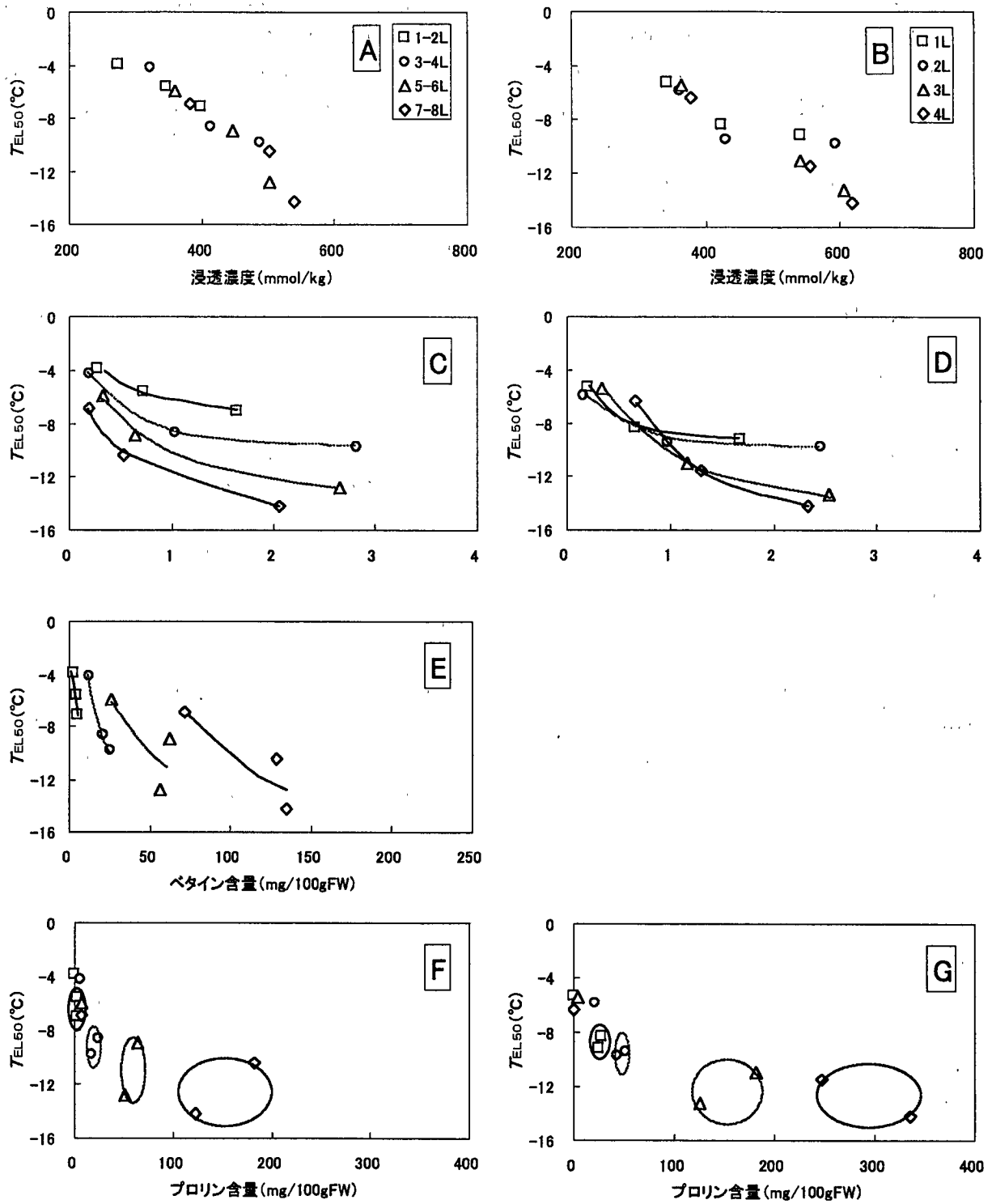
~150mg/100gFWの範囲内ではベタイン含量と T_{EL50} との間に負の相関関係が認められることを述べた。この傾向は本実験においても全体的にみると認められた。しかし、葉位によってベタイン含量と T_{EL50} との間の関係は明確に異なっていた。すなわち、第1-2、3-4葉ではベタイン含量がごくわずかしこ増加していないのに、 T_{EL50} はそれぞれ約4℃、約6℃と大幅に低下した。一方、第7-8葉においては、ベタイン含量が約60mg/100gFWと大幅に増加し、それに伴って T_{EL50} は約8℃低下した。第5-6葉は第1-2、3-4葉と第7-8葉の中間的な関係に位置していた(第21図E)。

(7) プロリン含量と遊離アミノ酸含量

ホウレンソウの低温遭遇前の全遊離アミノ酸含量は、第1-2、3-4、5-6、7-8葉においてそれぞれ127、587、804、744mg/100gFWであった。5℃遭遇1週目には7-8葉を除いて全遊離アミノ酸含量は低下した。さらに、2週目にはそれぞれ89、226、374、467mg/100gFWとなった(第19図F)。コマツナでは低温遭遇前の全遊離アミノ酸含量は、第1、2、3、4葉がそれぞれ93、162、250、285mg/100gFWであった。すべての葉位における葉において、5℃遭遇1週目には全アミノ酸含量が増加したが、2週目には低下し、それぞれ109、130、262、586mg/100gFWとなった(第19図G)。

プロリン含量に関しては、低温遭遇前はホウレンソウ、コマツナともにすべての葉位において0~20mg/100gFWと少なかった(第19図D、E)。低温遭遇1週目に両作物ともに上位葉ほどプロリン含量が高まり、低温遭遇2週目にはホウレンソウでは第1-2、3-4、5-6、7-8葉でそれぞれ3、17、51、121mg/100gFW、コマツナでは第1、2、3、4葉でそれぞれ25、43、125、335mg/100gFWに増加した。

ホウレンソウとコマツナともにプロリン含量と T_{EL50} の関係を見たところ、その両者の間には直線的な相関関係は認められなかった。しかし、葉位ごとグルーピングすると(第21図F、Eの丸印)、プロリン含量と T_{EL50} の間には負の2次関数的な関係が認められた。すなわち、ホウレンソウの第1-2葉、コマツナの第1葉においては、プロリン含量が高まらなくとも T_{EL50} とが低下した。しかし、その低下はわずかであった。また、両作物ともに上位葉になるにつれてプロリン含量が高まり、それとともに T_{EL50} が低下する傾向がみられた。



第20図 ホウレンソウとコマツナの葉位ごとの浸透濃度 (A, ホウレンソウ; B, コマツナ)、糖含量 (C, ホウレンソウ; D, コマツナ)、ベタイン含量 (E, ホウレンソウ)、プロリン含量 (F, ホウレンソウ; G, コマツナ) と T_{EL50} との関係

注: C, E, F図の印はA図と同様。D, G図の印はB図と同様。

4) 考察

Takagiら⁷⁹⁾はシロイヌナズナの低温処理1、3、7日後の葉位ごと(1-2葉, 3-4葉, 8葉以上の若い葉)の T_{EL50} 、浸透濃度、糖およびプロリン含量を精査した。その結果、すべての葉位において、低温処理に伴い耐凍性が向上し、また、浸透濃度、糖およびプロリン含量が高まったことから、糖とプロリンの蓄積が耐凍性向上に寄与していることを示した。しかし、葉位ごとに T_{EL50} と糖およびプロリンの蓄積量との関係が異なり、耐凍性向上に糖やプロリン以外の要因も考慮しなければならないとしている。さらに、糖の蓄積がプロリンの蓄積よりも先行して行われることを報告している。

本研究において、低温処理前のハウレンソウの T_{EL50} は上位葉ほど低く、ハウレンソウで第1-2葉と第7-8葉の差は3℃であった(第18図A)。ハウレンソウにおいて、処理前の浸透濃度は上位葉ほど高く(第18図E)、糖含量は葉位間に大差はみられず(第19図A)、ベタイン含量は上位葉ほど高かった(第19図C)。処理前の葉位間の T_{EL50} 差がみられたのは、葉位間の浸透濃度、ベタイン含量差に起因すると考えられる。低温処理前のコマツナの T_{EL50} は上位葉と下位葉で大きな差はみられず(第18図B)、葉位間の浸透濃度(第18図F)、糖含量(第19図B)にも大きな差がみられなかった。

低温処理に伴い、ハウレンソウ、コマツナともに上位葉は耐凍性が大きく増大すること、下位葉は耐凍性が上位葉ほどは増大しないことが明らかになった(第18図A, B)。しかし、浸透濃度は両作物ともに上位葉、下位葉ともに低温処理より上昇し、 Δ 浸透濃度は両作物ともに上位葉と下位葉にそれほど大きな差はなかった(第18図E, F)。また、糖含量、 Δ 糖含量は最上位葉よりも中位葉がともに高かった(第19図A, B)。

10週間の低温処理(I章-3節)で、浸透濃度が約350~700 mmol/kgの範囲内では両作物の浸透濃度と T_{EL50} の間には高い相関関係が認められた。本実験において、ハウレンソウ、コマツナでは浸透濃度が高まるほど T_{EL50} が低下し、浸透濃度と T_{EL50} の間には非常に高い相関関係が認められた(第21図A, B)。しかし、葉位ごとにみると、ハウレンソウ、コマツナともに上位葉は浸透濃度と T_{EL50} の間には高い負の相関関係が認められたが、下位葉は、浸透濃度が高まってもさほど T_{EL50} は低下せず、 T_{EL50} 低下に対する寄与は下位葉が上位葉よりも低い傾向が見られた。

糖含量と T_{EL50} の間には、ハウレンソウ、コマツナ

ともに基本的には負の相関関係が認められた(第21図C, D)。しかし、葉位ごとにみると、両作物ともに下位葉ほど糖含量の増加の T_{EL50} の低下に対する寄与が低い傾向が認められた。つまり、ハウレンソウにおいて、第1-2、3-4葉、コマツナにおいて、第1、2葉は糖含量が増加しても上位葉ほどには T_{EL50} が高まらなかった。この傾向はTakagiら⁷⁹⁾の研究と同様の傾向であった。

これらのことは、耐凍性が浸透濃度、糖含量の多少や増加量のみで決定されるものではないことを示唆している。処理14日目の葉位ごとの重量の変化をみると、ハウレンソウでは第1-2葉、コマツナでは第1、2葉が処理前に比べ、処理後の重量が減少し、ハウレンソウにおいて第3~8葉、コマツナにおいて第3、4葉は重量が増加した(第17図D, E)。このことから、処理期間中に、ハウレンソウの第1-2葉、コマツナの第1、2葉は老化の方向に進み、それ以上の葉位は発育の方向に進んだと考えられる。

低温にさらされる前に完全に展開した葉は、細胞膜や様々な細胞内膜が暖かい環境下で形成されている。このような環境下で形成された生体膜の脂質構成と低温馴化中に出葉した葉の脂質構成などに違いがあることが考えられる。このことが、ハウレンソウ、コマツナの浸透濃度と糖含量の挙動と T_{EL50} とが上位葉と下位葉において一致しない原因である可能性がある。

ハウレンソウにおいて、ベタイン含量は低温処理により上位葉は増加したが、第1-2葉ではほとんど変化しなかった(第19図C)。これは、ベタインは窒素化合物なので、下位葉では窒素供給が十分でないか、ないしは、ベタインが上位葉へ転流したためことによると考えられる。ベタイン含量はハウレンソウの第1-2、3-4葉ではほとんど増加しないのに、 T_{EL50} は低下した。ハウレンソウの下位葉の T_{EL50} 低下は、浸透濃度や糖含量の増加などに起因すると考えられる。

ハウレンソウ、コマツナともに、プロリン含量はすべての葉位の葉において、低温遭遇前は少なかったが、低温遭遇により高まり、上位葉ほどその傾向は強かった(第19図D, E)。上位葉ほどプロリン含量が高まる傾向は、Takagiら⁷⁹⁾がシロイヌナズナを用いて報告しており、その結果と同様である。プロリンがハウレンソウとコマツナの耐凍性に果たす役割を本研究のみから判断することはできないが、葉位ごとにグルーピングした場合、プロリン含量が高まると T_{EL50} が低下する傾向が認められることから(第21図F, G)、プロリ

ンが何らかの機作で両作物の耐凍性に寄与していることが示唆される。

5) 要約

低温処理前のハウレンソウの T_{EL50} は上位葉ほど低く、ハウレンソウで第1-2葉と第7-8葉の差は3°Cであった。処理前の葉位間の T_{EL50} 差がみられたのは、浸透濃度、ベタイン含量差に起因すると考えられる。低温処理前のコマツナの T_{EL50} は上位葉と下位葉で大きな差はみられなかった。

ハウレンソウ、コマツナともに、同一の条件下で低温にさらされても、上位葉は耐凍性が大きく増大すること、下位葉は耐凍性があまり増大しないことが明らかになった。

両作物ともに全体的にみると浸透濃度、糖含量と T_{EL50} の間には負の相関関係が認められた。しかし、葉位ごとにみると、両作物ともに上位葉では浸透濃度、糖含量と T_{EL50} の間には高い負の相関関係が認められたが、下位葉では T_{EL50} 低下に対する浸透濃度と糖含量の寄与は上位葉よりも低い傾向が見られた。

処理期間中に、ハウレンソウの第1-2葉、コマツナの第1、2葉は老化の方向に進み、それよりも上位葉は発育の方向に進んだと考えられる。低温にさらされる前に完全に展葉した葉は、細胞膜や様々な細胞内膜が暖かい環境下で形成されている。このような環境下で形成された生体膜の脂質構成と低温馴化中に出葉した葉の脂質構成などに違いがあることが考えられる。このことが、ハウレンソウ、コマツナの浸透濃度と糖含量の挙動と T_{EL50} とが上位葉と下位葉において一致しない原因である可能性がある。

ハウレンソウにおいて、ベタイン含量は低温処理により上位葉は増加したが、第1-2葉ではほとんど変化しなかった。これは、ベタインは窒素化合物なので、下位葉では窒素供給が十分でないか、ないしは、ベタインが上位葉へ転流したためことによると考えられる。ハウレンソウとコマツナのプロリン含量は低温遭遇に伴い、上位葉ほど高まった。そして、葉位ごとにグルーピングすると、プロリン含量が高まるにつれて T_{EL50} が低下する傾向が認められ、プロリンが両作物の耐凍性に寄与していることが示唆された。

5 様々な環境要因がハウレンソウとコマツナの耐凍性に及ぼす影響

1) 目的

冬期にハウレンソウやコマツナ栽培に取り組む実際の場面を考慮した場合、保水力の高い圃場や乾燥しや

すい圃場、土壌養分が豊富な圃場や少ない圃場、ハウスを被覆するフィルムが新しく光線透過が良いハウスや、フィルムが劣化して光線透過率の悪いハウスなど、圃場ごとに環境要因が異なることが考えられる。両作物の耐凍性には気温が最も大きな影響を及ぼすと考えられるが、気温の他にも地温、光量、土壌水分や土壌養分量など様々な環境要因が関与すると予想される。そこで、ハウレンソウとコマツナの耐凍性に対する、低温下における気温、地温、光、土壌水分、土壌養分といった環境要因の影響を調査した。また、低温遭遇に伴って、浸透濃度、糖、ベタイン、プロリン、遊離アミノ酸含量がどのように変化するかを明らかにし、耐凍性との関係を考察した。そして、様々な環境要因と耐凍性との関係を把握し、実際の栽培場面に応用するための基礎知見を得ることを目的に、本項における実験を実施した。

2) 方法

(1) 実験の内容

本節では、ハウレンソウとコマツナの耐凍性に及ぼす次の環境要因の影響について調査した。

(1)気温、(2)脱馴化、(3)地温、(4)光条件、(5)土壌水分、(6)土壌養分

(2) 実験に供試する試料の育成

I章4節2.と同様の方法で育成した。

(3) 耐凍性の測定、分析試料の採取、水分、浸透濃度、糖、ベタイン、遊離アミノ酸の測定

I章3節2.2)と同様の方法で実施した。

(4) 各実験における試験区の構成と処理内容

i 気温と耐凍性

i) 実験1 昼夜一定の気温が耐凍性に及ぼす影響
12hr日長(82mmol/m²/sec)に設定した人工気象器を用いて、昼夜一定気温に保ち、気温が耐凍性および糖含量に及ぼす影響を検討した。気温は15°C、10°C、6°C、2°Cを設定した。

ii) 実験2 明期および暗期の気温が耐凍性、浸透濃度、糖含量およびベタイン含量に及ぼす影響

同上の人工気象器を用いて、15/5°C、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C(明/暗)の低温処理を実施した。15°C/5°C、5°C/5°C処理は育成用の人工気象器(20/15°C)から低温処理用の人工気象器に直接移動し、21日間低温処理を実施した。5/-2°C、5/-5°C処理は、20/15°Cで育成した作物体を直ちに両処理に供すると両作物に傷害が生じるので、最初の7日間は5/5°C処理を行い、その後5/-2°C、5/

-5℃処理を14日間実施した。なお、気温を氷点下にすると、鉢土が凍結するので、気温 5/-2℃、5/-5℃の実験では、鉢加温器（第22図）を用いて加温し、鉢土が凍結しないようにした。

ii 脱馴化と耐凍性

同上の人工気象器を用いて、5/5℃（明/暗）の低温処理を2週間実施した。低温処理2週間目の耐凍性を測定した後、12hr日長（250mmol/m²/sec）に設定した育成用人工気象器を用いて、20/15℃（明/暗）の脱馴化を実施した。

iii 地温と耐凍性

同上の人工気象器を用いて、5/5℃（明/暗）の低温処理を2週間実施した。地温が両作物の耐凍性に及ぼす影響を検討するため、鉢加温器（第22図）を用い、地温を2段階設定して試験を実施し、加温1区、加温2区とした。また、無加温区を加え、併せて3実験区を設定した。地温は、鉢の中央の深さ5cmの地点に直径0.3mmの銅・コンスタンタン熱電対センサーをセットして測定した。

iv 光条件

同上の人工気象器を用いて、5/5℃（明/暗）の低温処理を2週間実施した。光の有無および光の強度が両作物の耐凍性に及ぼす影響を検討するため、暗黒、光1、光2、光3の4実験区を設定した。各区の光量は下記のとおりである。

処理区ごとの光強度

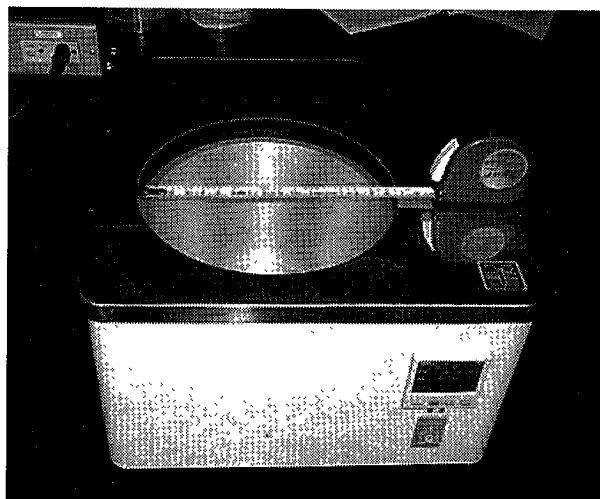
区	光量 μmol/m ² /sec	比率 %
光3	159	100
光2	82	52
光1	54	34
暗黒	0	0

ランプ：陽光ランプ（東芝ライテック社；D250型）

v 土壌水分

土壌の水分条件が両作物の耐凍性に及ぼす影響を検討するため、少灌水（D）および多灌水（W）の2実験区を設定した。D区は、両作物の下位葉（ホレンソウで第1～2葉、コマツナで第1葉）が萎れ始めた時点で1鉢に200ml灌水し、W区は毎日鉢の下から水が少々流出する程度灌水した。

ホレンソウ、コマツナを20/15℃（明/暗）で育



第22図 鉢土の凍結防止に使用した鉢加温器

成途中で、ホレンソウが播種後25日目、コマツナが播種後15日目から両作物ともに7日間、DおよびW処理を実施した。その後、5/5℃（明/暗）の低温処理を2週間実施し、引き続きDおよびW処理を実施した。

土壌水分含量の測定：ホレンソウを9個体/鉢、コマツナを7個体/鉢植栽した土壌水分測定用の鉢を2鉢ずつ、合計4鉢準備し、土壌水分測定用の鉢とした。土壌水分測定用の鉢に、内径5mmのガラス管を10cmの深さに挿入して土壌を採取し、FWを測定した後、80℃、48時間乾燥し、DWを測定した。そして、FWとDWとの差から、土壌水分含量を求めた。

vi 土壌養分

5/5℃（明/暗）の低温処理を2週間実施した。土壌養分が両作物の耐凍性に及ぼす影響を検討するため、一連の実験に通常用いている培養土（元気くん1号）を標準養分区（1区）とし、他に1/2、2、4倍量の3つの肥料水準を設け、それぞれ1/2、2、4区とした。

実験に用いた鉢には、培養土が1.6リットル入る。1/2区は、培養土0.8リットルに無肥料の黒ボク0.8リットルを加えて作出した。2、4区の施肥水準は培養土に窒素、リン酸、カリとしてそれぞれ硫酸アンモニウム、過磷酸石灰、塩化カリを加えて作出した。1/2区作出に用いた無肥料の黒ボクはpH5.4である。実験に用いる土壌のpHを調整するため、苦土石灰を1/2、2、4区について、1鉢当たり25.4g、1処理に6.4g加えた。その結果、1/2、1、2、4区のpHはそれぞれ6.7、7.2、6.8、6.4となった。

処理区ごとの3要素量 [1鉢 (1.6リットル) 当たり]

施肥量	窒素 g/鉢	リン酸 g/鉢	カリ g/鉢
1/2	0.16	3.00	0.12
1	0.32	6.00	0.24
2	0.64	12.00	0.48
4	1.28	24.00	0.96

3) 結果

(1) 気温と耐凍性

i 実験1

i) 耐凍性

両作物の T_{EL50} は、低温処理時の気温が低いほど低下した(第23図A)。すなわち、低温処理前(20/15°C)の T_{EL50} はホウレンソウ、コマツナでそれぞれ-6.2、-5.4°Cであったが、15、10、6、2°C区における低温処理14日後の T_{EL50} は、ホウレンソウでそれぞれ-7.5、-8.7、-14.1、-16.1°C、コマツナでそれぞれ-8.7、-9.6、-12.0、-15.8°Cとなり、低温処理14日後の ΔT_{EL50} は、ホウレンソウでそれぞれ-1.3、

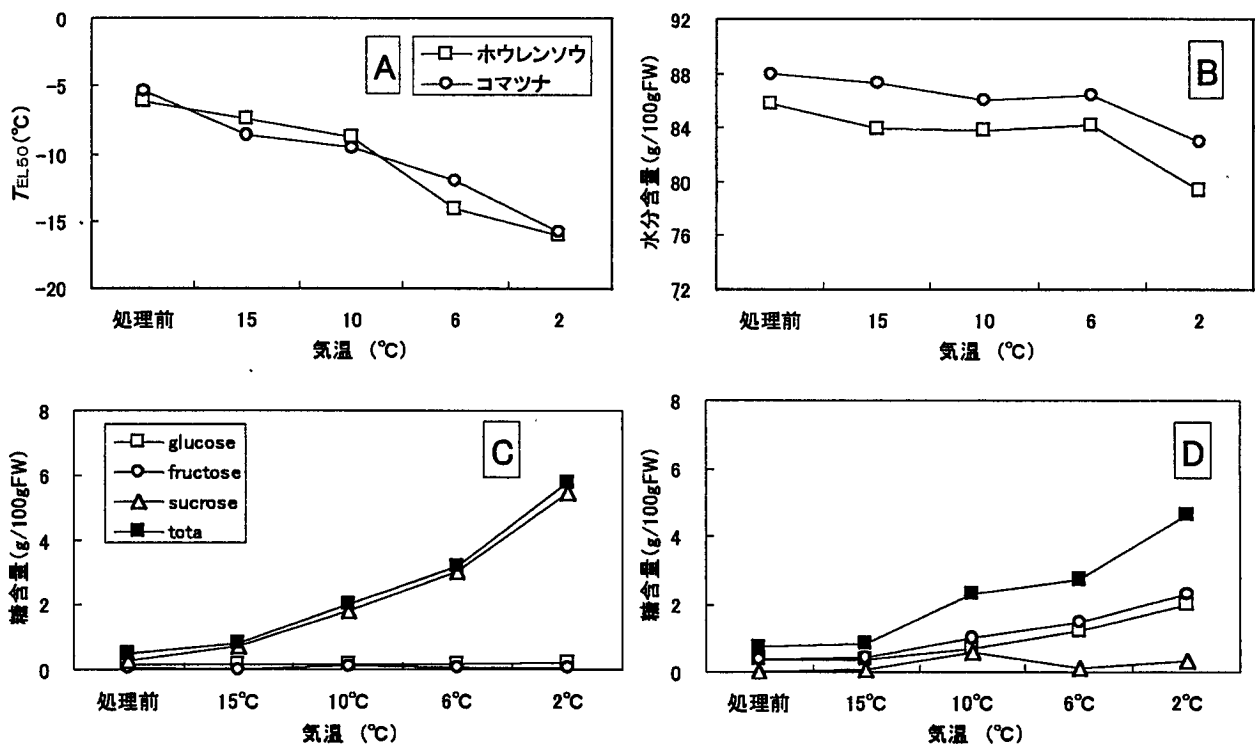
-2.5、-7.9、-9.9°C、コマツナでそれぞれ-3.2、-4.2、-6.6、-10.4°Cであった。

ii) 水分含量

両作物の水分含量は、15~6°Cの範囲では処理前に比較してさほど減少せず、2°Cで低温処理すると大きく低下した(第23図B)。すなわち、ホウレンソウ、コマツナの低温処理前の水分含量はそれぞれ85.8、88.0g/100gFWであったが、15、10、6、2°C区における低温処理14日後の水分含量は、ホウレンソウでそれぞれ83.9、83.8、84.2、79.4 g/100gFW、コマツナでそれぞれ87.3、86.0、86.4、83.0g/100gFWとなり、低温処理14日後の Δ 水分含量はホウレンソウでそれぞれ-1.9、-2.0、-1.6、-6.4 g/100gFW、コマツナでそれぞれ-0.7、-2.0、-1.6、-5.0g/100gFWであった。

iii) 糖含量

両作物ともに、低温処理時の気温が低いほど全糖含量が増加した(第23図C, D)。すなわち、ホウレンソウの処理前の全糖含量は0.5 g/100gFWであったが、15、10、6、2°C区における低温処理14日後の全糖含量はそれぞれ0.8、2.0、3.2、5.8g/100gFWとなり、 Δ 全糖含量はそれぞれ0.3、1.5、2.7、5.3g/100gFWであっ



第23図 気温と T_{EL50} (A)、水分含量 (B)、糖含量 (C, ホウレンソウ; D, コマツナ) の変化および糖含量と T_{EL50} との関係 (E)

注: B図中の印はA図と同様。D図中の印はC図と同様。

た。コマツナの処理前の全糖含量は0.7 g/100gFWであったが、15、10、6、2℃区における低温処理14日後の全糖含量はそれぞれ0.8、2.3、2.7、4.6 g/100gFWとなり、△全糖含量はそれぞれ0.1、1.6、2.0、3.9 g/100gFWであった。

ii 実験 2

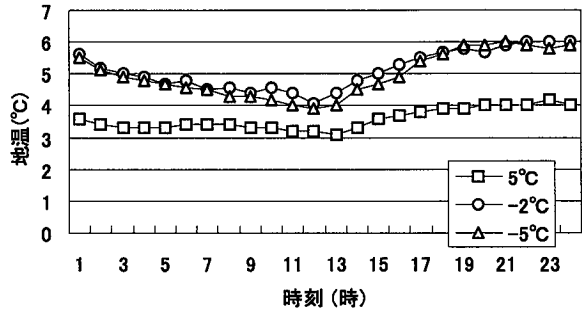
i) 地温

5/5℃、5/-2℃、5/-5℃区における暗期の地温はそれぞれ3.2~3.6℃、4.1~5.6℃、4~5.5℃で推移し、明期における地温はそれぞれ3.2~4.2℃、4.4~6℃、4~6℃で推移した(第24図)。

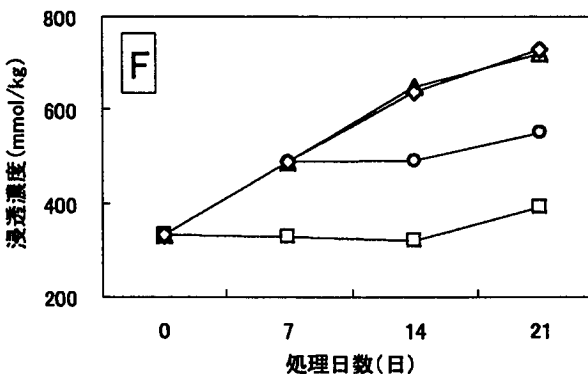
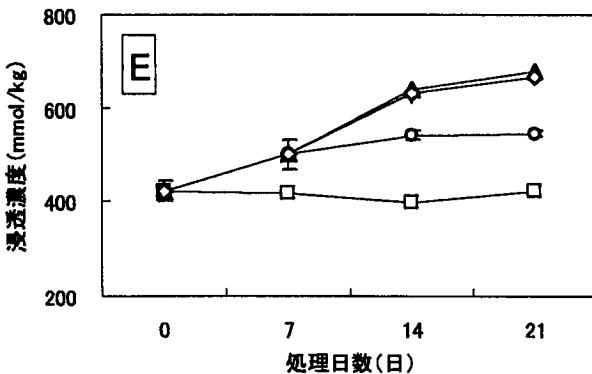
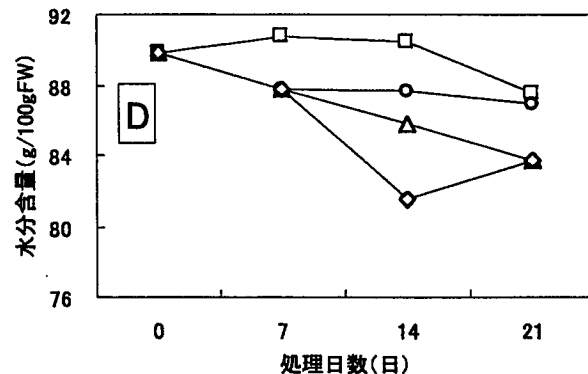
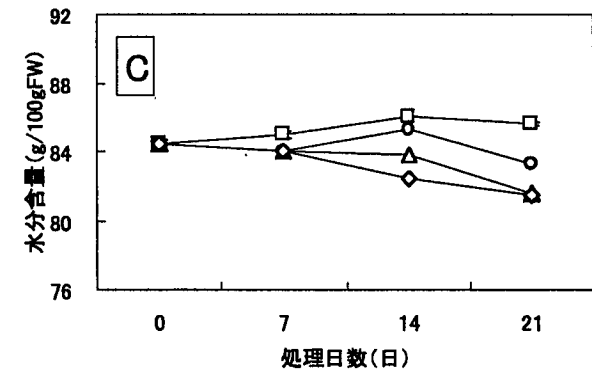
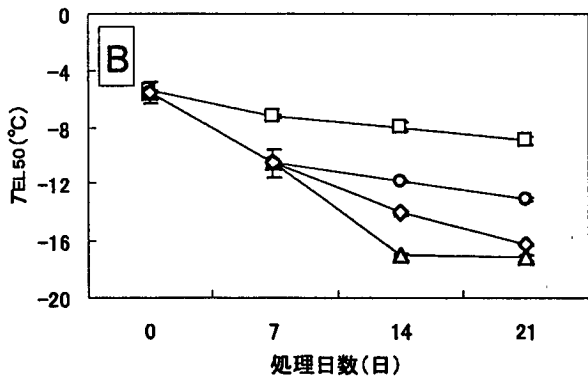
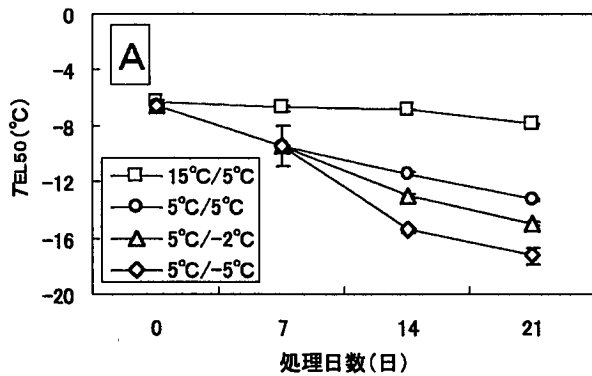
ii) 耐凍性

ホウレンソウは低温処理時の気温が低いほど T_{EL50} が

低下した(第25図A)。ホウレンソウの低温処理前の T_{EL50} は-6.5℃であったが、低温処理21日後の T_{EL50} は、15/5℃、5/5℃、5/-2℃、5/-5℃区がそれ



第24図 5/5℃、5/-2℃および5/-5℃処理時の地温の推移



第25図 ホウレンソウとコマツナの異なる気温での低温処理に伴う T_{EL50} (A, ホウレンソウ; B, コマツナ)、水分含量 (C, ホウレンソウ; D, コマツナ)、浸透濃度 (E, ホウレンソウ; F, コマツナ) の変化

注: B, C, D, E, F図中の印はA図と同様。

ぞれ-8.0、-13.4、-15.0、-17.3°Cとなり、各区の ΔT_{EL50} はそれぞれ-1.7、-6.8、-8.5、-10.8°Cであった。

コマツナは低温処理時の気温が低いほど T_{EL50} が低下する傾向がみられたが、5/-2°C区の T_{EL50} が5/-5°C区よりも低下した(第25図B)。コマツナの低温処理前の T_{EL50} は-5.5°Cであったが、低温処理21日後の T_{EL50} は、15/5°C、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区がそれぞれ-9.0、-13.1、-17.2、-16.3°Cとなり、各区の ΔT_{EL50} はそれぞれ-3.5、-7.5、-11.6、-10.7°Cであった。

iii) 水分含量

ハウレンソウ、コマツナの低温処理前の水分含量はそれぞれ84.5、89.8g/100gFWであったが、15/5°C、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区における低温処理14日後の水分含量は、ハウレンソウでそれぞれ85.6、83.2、81.6、81.4g/100gFW、コマツナでそれぞれ87.5、86.9、83.7、83.6 g/100gFWとなった(第25図C, D)。

iv) 浸透濃度

両作物ともに低温処理後の浸透濃度は5/-2°C、5/-5°C区が同程度で最も高まり、次いで5/5°C区が高まった。一方、15/5°C区は浸透濃度が上昇しなかった(第25図E, F)。すなわち、ハウレンソウの低温処理前の浸透濃度は423mmol/kgであったが、低温処理21日後の浸透濃度は、15/5°C、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区でそれぞれ421、545、676、667mmol/kgとなり、各区の Δ 浸透濃度はそれぞれ-2、123、254、244mmol/kgであった。コマツナの低温処理前の浸透濃度は329mmol/kgであったが、低温処理21日後の浸透濃度は、15/5°C、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区でそれぞれ391、549、722、728mmol/kgとなり、各区の Δ 浸透濃度はそれぞれ62、220、392、399mmol/kgであった。

v) 糖含量

両作物ともに低温処理21日後の全糖含量は5/-2°C区が最も高く、次いで5/-5°C、5/5°C区の順に高まり、15/5°C区が最も増加量が少なかった(第26図A, B)。すなわち、ハウレンソウの全糖含量は、処理前は0.4 g/100gFWであったが、処理21日後の糖含量は15/5°C、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区でそれぞれ0.8、2.6、5.4、3.6 g/100gFWとなり、各区の Δ 全糖含量はそれぞれ0.4、2.2、5.0、3.2g/100gFWであった。コマツナの全糖含量は、処理前は0.7g/100gFWであったが、処理21日後の全糖含量は15/5

°C、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区でそれぞれ1.9、2.3、4.3、3.9g/100gFWとなり、各区の Δ 全糖含量はそれぞれ1.2、1.6、3.6、3.2g/100gFWであった。

vi) ベタイン含量

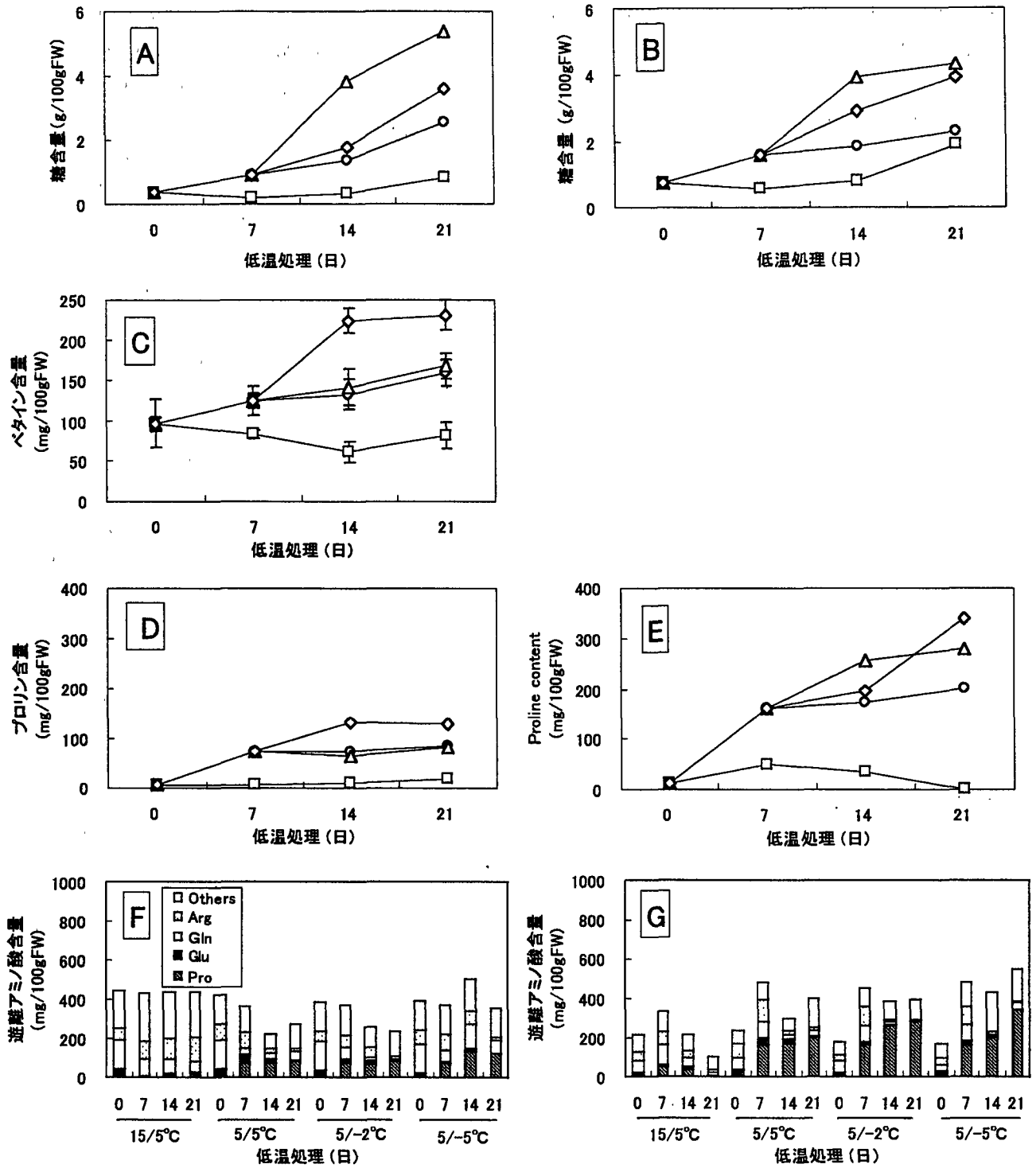
ハウレンソウのベタイン含量は5/-5°C区で最も高まり、次いで5/-2°C、5/5°C区の順に高まり、15/5°C区ではほとんど変化がみられなかった(第26図C)。すなわち、ハウレンソウのベタイン含量は処理前では97mg/100gFWであったが、処理21日後には15/5°C、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区でそれぞれ82、160、168、231mg/100gFWとなり、各区における Δ ベタイン含量はそれぞれ-15、63、71、134mg/100gFWとなった。

vii) プロリン含量と遊離アミノ酸含量

ハウレンソウの低温処理前の全遊離アミノ酸含量は、約400mg/100gFWであった(第26図F)。低温処理21日目の全遊離アミノ酸含量は15/5°C区では処理前とほぼ同様の436mg/100gFWであったが、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区では低下し、それぞれ235、237、373mg/100gFWとなった。コマツナでは、低温処理前の全遊離アミノ酸含量は、約200mg/100gFWであった(第26図G)。低温処理21日目の全遊離アミノ酸含量は15/5°C区では処理前よりも低下し、101mg/100gFWとなったが、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区では高まり、それぞれ401、391、550mg/100gFWとなった。

プロリン含量は、低温処理前はハウレンソウ、コマツナともに5~10mg/100gFWと少なかった(第26図D, E)。15/5°C区においては両作物ともにプロリン含量は大きな変化がみられなかったが、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区では両作物ともにプロリン含量が高まり、低温処理21日目にはハウレンソウではそれぞれ85、81、121mg/100gFW、コマツナではそれぞれ201、279、340mg/100gFWとなった。

全遊離アミノ酸含量に占めるプロリン含量の割合は、ハウレンソウ、コマツナともに15/5°C区では大きな変化がみられなかったが、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区ではプロリン含量の割合が高まった(第26図F, G)。すなわち、低温処理前の全遊離アミノ酸含量に占めるプロリン含量割合はハウレンソウが約1%、コマツナが約5%であったが、15/5°C、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C処理21日目におけるプロリン含量の割合はハウレンソウではそれぞれ4、31、34、34%、コマツナでは16、50、71、62%となった。



第26図 ホウレンソウとコマツナの異なる気温での低温処理に伴う糖含量 (A, ホウレンソウ; B, コマツナ)、ベタイン含量 (C, ホウレンソウ)、プロリン含量 (D, ホウレンソウ; E, コマツナ)、遊離アミノ酸含量 (F, ホウレンソウ; G, コマツナ) の変化

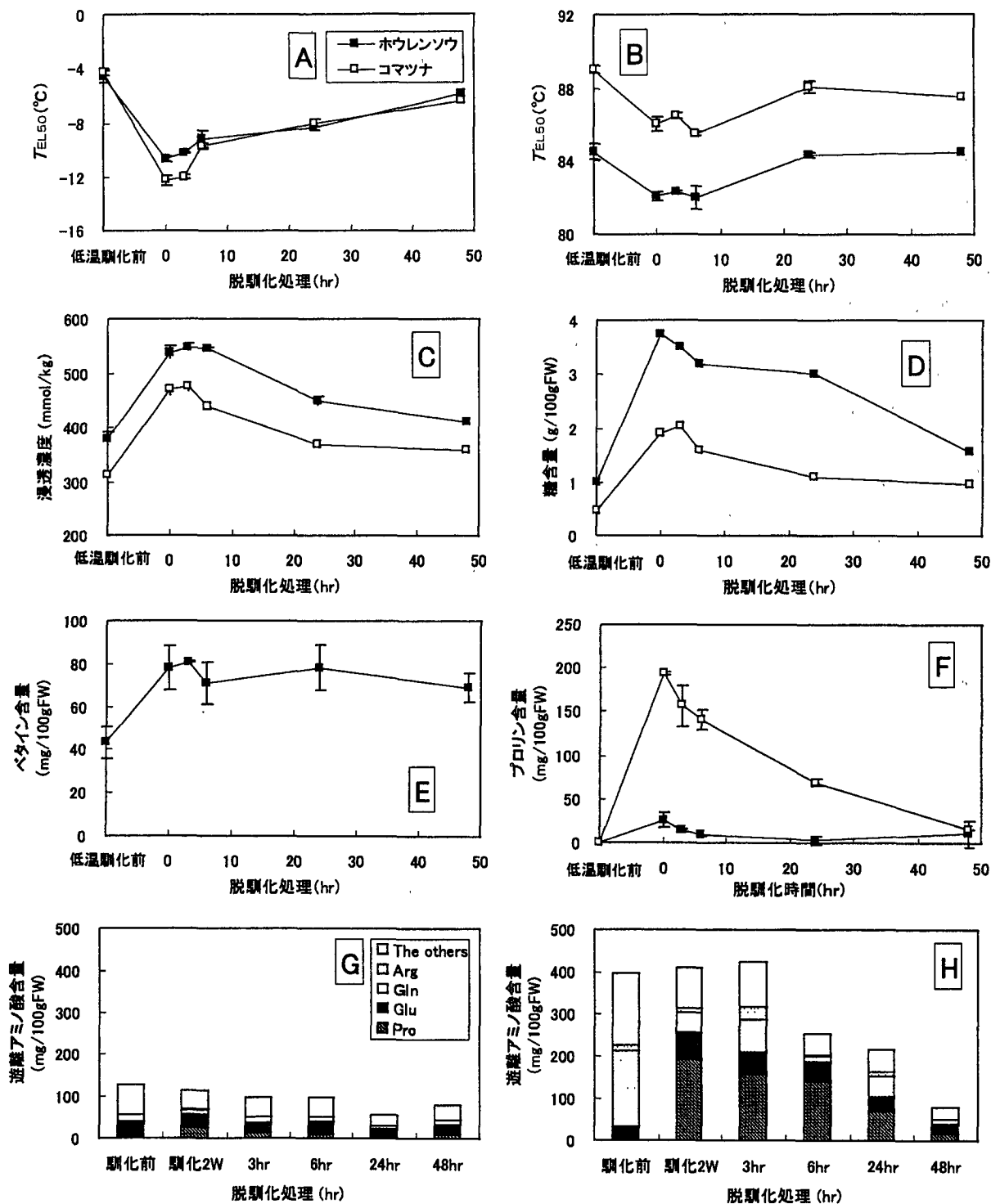
注: A, B, C, D, E図中の印は第25図Aと同様。G図の色分けはF図と同様。

(2) 脱馴化

i 耐凍性

脱馴化前のハウレンソウとコマツナの T_{EL50} はそれぞれ -10.7°C 、 -12.3°C であった。脱馴化3時間後には、脱馴化前よりもハウレンソウ、コマツナの T_{EL50} はそれ

ぞれ 0.5°C 、 0.3°C 上昇し、脱馴化6時間後にはそれぞれ 1.5°C 、 2.5°C 上昇した(第27図A; B)。脱馴化24時間後にはハウレンソウとコマツナの T_{EL50} はそれぞれ 2.3°C 、 4.3°C 、脱馴化48時間後にはそれぞれ 4.8°C 、 5.9°C 上昇した。



第27図 脱馴化処理に伴う T_{EL50} (A)、水分含量 (B)、浸透濃度 (C)、糖含量 (D)、ベタイン含量 (E)、プロリン含量 (F)、遊離アミノ酸含量 (G, ホウレンソウ; H, コマツナ) の変化
 注: B, C, D, E, F図中の印はA図と同様。H図中の色分けはG図と同様。

ii 水分含量

ホウレンソウ、コマツナの脱馴化前の水分含量はそれぞれ82.1、86.0 g/100gFWであった。脱馴化3～6時間では大きな変化がみられなかったが、脱馴化24時間後には水分含量が高まった。すなわち、脱馴化3、6、24、48時間後のホウレンソウの水分含量はそれぞれ82.3、82.0、84.3、84.5g/100gFW、コマツナではそれぞれ86.5、85.5、88.0、87.5g/100gFWとなった(第27図B)。

iii 浸透濃度

脱馴化前のホウレンソウとコマツナの浸透濃度はそれぞれ540、470mmol/kgであった(第27図C)。脱馴化3時間後では、両作物の浸透濃度には大きな変化がみられなかった。6時間後にはホウレンソウでは脱馴化前と大きな差がみられなかったが、コマツナはやや浸透濃度が低下する傾向がみられた。脱馴化24時間後にはホウレンソウ、コマツナともに浸透濃度が低下し、それぞれ450、370mmol/kgとなり、48時間後にはさらに低下して410、360mmol/kgとなった。

iv 糖含量

脱馴化前のホウレンソウとコマツナの糖含量はそれぞれ3.7、1.9 g/100gFWであった(第27図D)。脱馴化3時間後には、コマツナは変化がなかったが、ホウレンソウではやや低下した。脱馴化6時間後にはホウレンソウ、コマツナともに糖含量がやや低下し、それぞれ3.2、1.6 g/100gFWとなった。脱馴化24時間後にはホウレンソウ、コマツナともに糖含量が低下し、それぞれ3.0、1.1 g/100gFWとなり、48時間後にはさらに低下して1.6、1.0 g/100gFWとなった。

v ベタイン含量

脱馴化前のホウレンソウのベタイン含量は80mg/100gFWであった(第27図E)。脱馴化3～48時間後のベタイン含量は約70mg/100gFWで推移し、脱馴化処理によって大きな変化はみられなかった。

vi プロリン含量と遊離アミノ酸含量

全遊離アミノ酸含量はホウレンソウでは脱馴化3～6時間では大きな変化がみられず、24時間以降減少した。一方、コマツナでは脱馴化3時間では大きな変化がみられず、6時間以降減少した(第27図G、H)。すなわち、脱馴化0、3、6、24、48時間後の全遊離アミノ酸含量は、ホウレンソウではそれぞれ114、97、97、58、81mg/100gFW、コマツナではそれぞれ408、423、253、215、81mg/100gFWとなった。

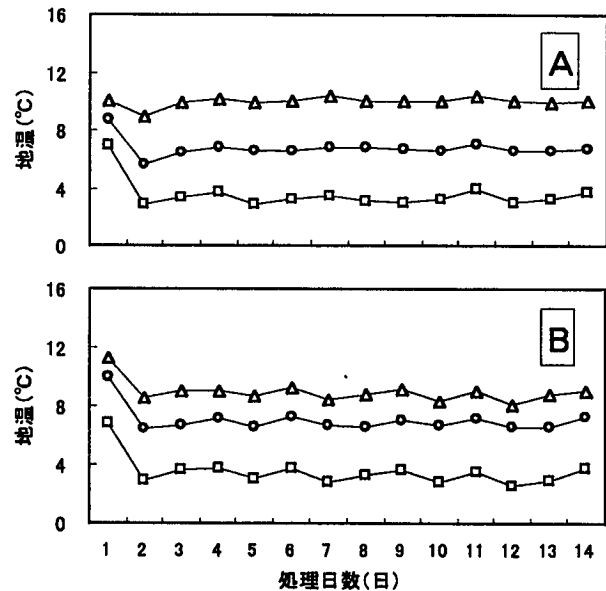
プロリン含量は脱馴化によりホウレンソウ、コマツ

ナともに速やかに低下し、脱馴化0、3、6、24、48時間後のプロリン含量はホウレンソウではそれぞれ26、15、9、3、10mg/100gFW、コマツナではそれぞれ194、157、141、69、16mg/100gFWとなった(第27図F)。

(3) 地温

i 地温

無加温、加温1、2区の平均地温はホウレンソウではそれぞれ3.3、6.7、10.1°C、コマツナではそれぞれ3.3、6.9、8.8°Cで推移し、無加温区に比べ加温1、2区はホウレンソウでそれぞれ3.4、6.8°C、コマツナでそれぞれ3.6°C、5.5°C高く推移した(第28図)。

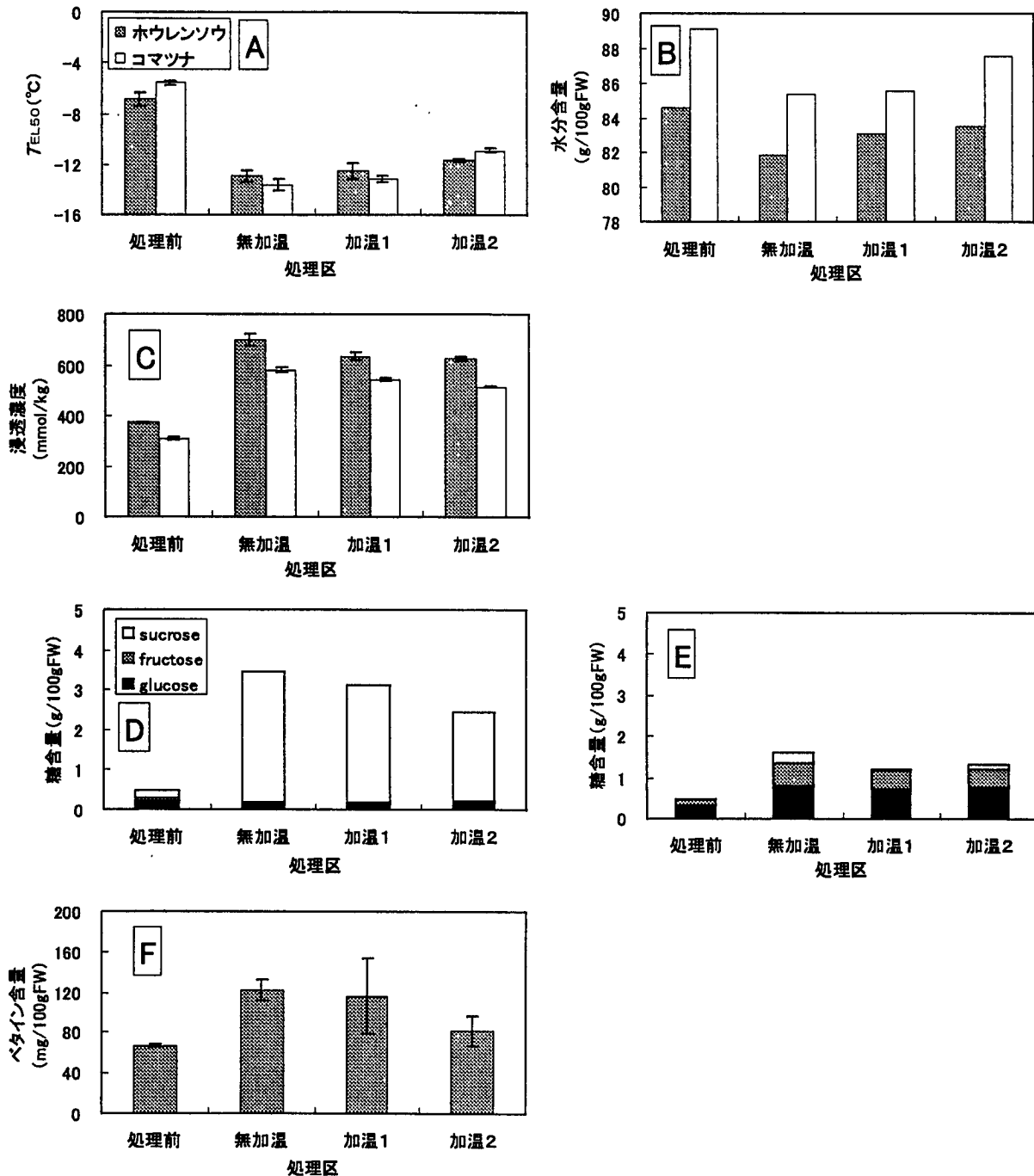


第28図 ホウレンソウ (A) とコマツナ (B) の試験期間中の日平均地温の推移

□, 無加温; ○, 加温1; △, 加温2

ii 耐凍性

ホウレンソウとコマツナの低温処理14日後の T_{EL50} は、無加温区が最も低下し、次いで加温1区、加温2区の順であった(第29図A)。すなわち、低温処理前のホウレンソウ、コマツナの T_{EL50} はそれぞれ-6.9、-5.6°Cであったが、処理14日後の T_{EL50} は無加温、加温1、2区がホウレンソウではそれぞれ-12.9、-12.5、-11.7°C、コマツナではそれぞれ-13.6、-13.1、-10.9°Cとなった。 ΔT_{EL50} はホウレンソウではそれぞれ-6.0、-5.6、-4.8°C、コマツナではそれぞれ-8.0、-7.6、-5.4°Cであった。



第29図 地温がホウレンソウとコマツナの T_{EL50} (A) 水分含量 (B)、浸透濃度 (C)、糖含量 (D, ホウレンソウ; E, コマツナ)、ベタイン含量 (F) に及ぼす影響

注: B, C図中の色分けはA図と同様。E図中の色分けはD図と同様。

iii 水分含量

ホウレンソウとコマツナの低温処理14日後の水分含量は、無加温区が最も少なく、保温をすると無加温よりも水分含量が多くなった (第29図B)。すなわち、低温処理前のホウレンソウ、コマツナの水分含量はそれぞれ84.5、89.1 g/100gFWであったが、処理14日後の水分含量は無加温、加温1、2区がホウレンソウではそれぞれ81.9、83.1、83.5 g/100gFW、コマツナではそれぞれ85.4、85.5、87.6 g/100gFWとなった。

iv 浸透濃度

ホウレンソウとコマツナの低温処理14日後の浸透濃度は、各区ともに高まったが、区間を比較すると、浸透濃度は無加温区が最も高く、加温をすると若干低下する傾向がみられた (第29図C)。すなわち、処理前のホウレンソウ、コマツナの浸透濃度はそれぞれ375、310mmol/kgであったが、処理14日後の水分含量は無加温、加温1、2区がホウレンソウではそれぞれ699、636、626mmol/kg、コマツナではそれぞれ581、545、

515mmol/kgとなり、 Δ 浸透濃度はハウレンソウではそれぞれ324、260、251mmol/kg、コマツナではそれぞれ272、235、206mmol/kgであった。

v 糖含量

ハウレンソウとコマツナの低温処理14日後の全糖含量は、両作物ともに無加温区が最も高く、次いで加温1区、加温2区の順で、加温をすると無加温よりも糖含量が減少する傾向がみられた(第29図D, E)。すなわち、処理前のハウレンソウ、コマツナの全糖含量はそれぞれ0.47、0.49 g/100gFWであったが、処理14日後の全糖含量は無加温、加温1、2区がハウレンソウではそれぞれ3.45、3.10、2.43g/100gFW、コマツナではそれぞれ1.62、1.20、1.30g/100gFWとなり、 Δ 全糖含量はハウレンソウではそれぞれ2.98、2.63、1.96g/100gFW、コマツナではそれぞれ1.12、0.70、0.81g/100gFWであった。

vi ベタイン含量

ハウレンソウの低温処理14日後のベタイン含量は、各区ともに高まったが、処理間を比較すると、無加温区の増加量が最も多く、次いで加温1、加温2区の順となった(第29図F)。すなわち、処理前のベタイン含量は67mg/100gFWであったが、処理14日後のベタイン含量は無加温、加温1、2区がそれぞれ122、116、81mg/100gFWとなり、 Δ ベタイン含量はそれぞれ56、49、15mg/100gFWであった。

(4) 光条件

i 耐凍性

ハウレンソウとコマツナの低温処理14日後の T_{EL50} は、暗黒区では低温処理前とほとんど変化がなかったが、光を伴った区では大きく低下した(第30図A)。すなわち、処理前のハウレンソウ、コマツナの T_{EL50} はそれぞれ -7.0°C 、 -5.9°C であったが、処理14日後の T_{EL50} は暗黒、光1、2、3区がハウレンソウではそれぞれ -7.0 、 -10.9 、 -11.5 、 -11.9°C 、コマツナではそれぞれ -6.0 、 -11.7 、 -11.9 、 -13.3°C となり、 ΔT_{EL50} はハウレンソウではそれぞれ0、 -3.9 、 -4.5 、 -4.9°C 、コマツナではそれぞれ -0.1 、 -5.8 、 -6.8 、 -7.4°C であった。

ii 水分含量

ハウレンソウとコマツナの低温処理14日後の水分含量は、暗黒区ではやや増加し、光を伴った区では光量が多いほど低下した(第30図B)。すなわち、処理前のハウレンソウ、コマツナの水分含量はそれぞれ85.4、88.6g/100gFWであったが、処理14日後の水分含量は

暗黒、光1、2、3区がハウレンソウではそれぞれ85.9、84.5、83.7、82.4 g/100gFW、コマツナではそれぞれ89.5、88.0、87.7、84.2 g/100gFWとなった。

iii 浸透濃度

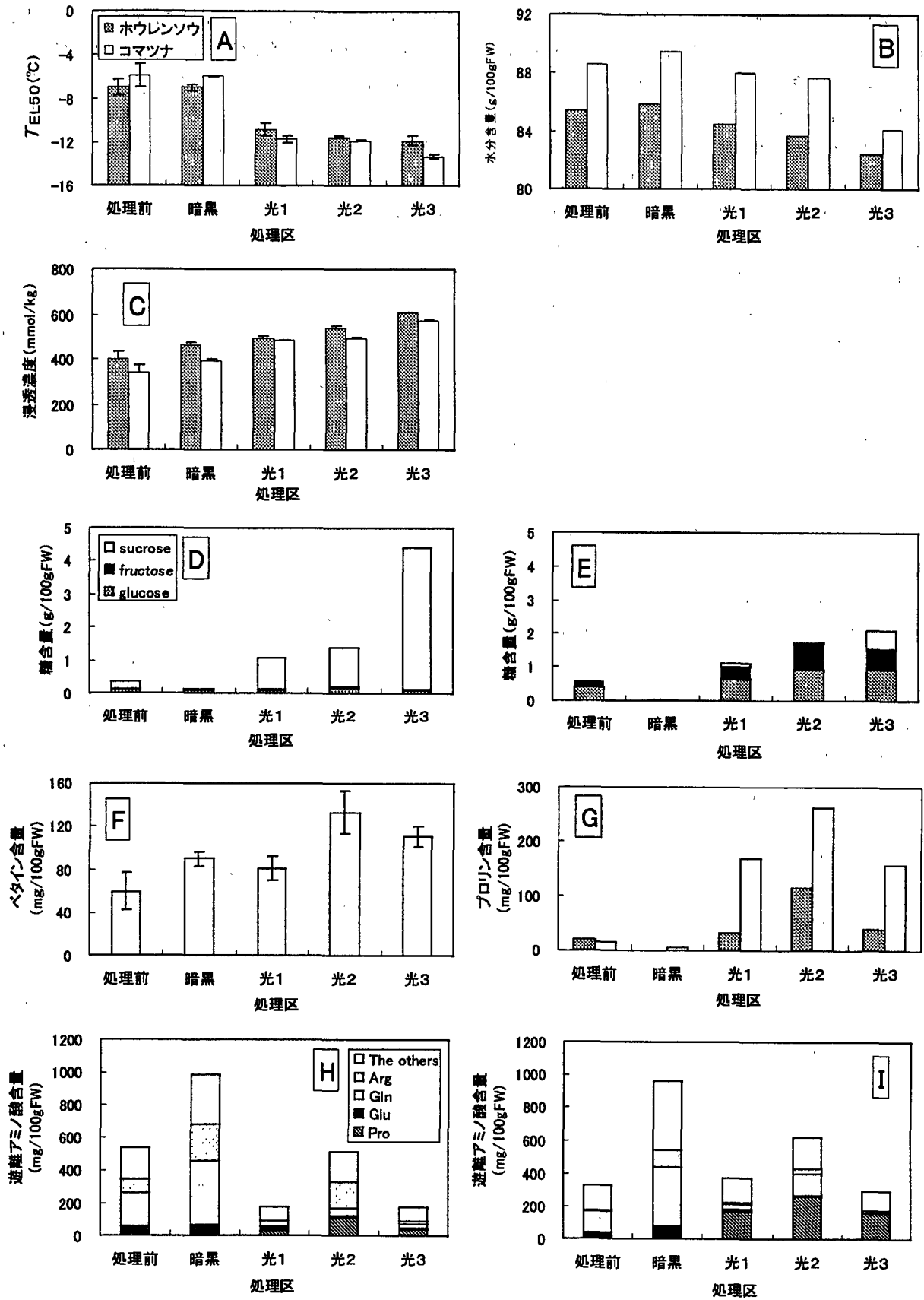
ハウレンソウとコマツナの低温処理14日後の浸透濃度は、各区ともに高まった(第30図C)。区間を比較すると、暗黒区よりも光を伴った区が高く、また、光を伴った区間では光量が多いほど高まった。すなわち、処理前のハウレンソウ、コマツナの浸透濃度はそれぞれ398、340mmol/kgであったが、処理14日後の浸透濃度は暗黒、光1、2、3区がハウレンソウではそれぞれ463、492、541、610mmol/kg、コマツナではそれぞれ392、485、490、576mmol/kgとなり、 Δ 浸透濃度はハウレンソウではそれぞれ65、95、144、212mmol/kg、コマツナではそれぞれ52、145、150、236mmol/kgであった。

iv 糖含量

ハウレンソウとコマツナの低温処理14日後の全糖含量は、暗黒区では処理前よりも低下し、光を伴った区ではともに処理前よりも高まった(第30図D, E)。光を伴った区間を比較すると、光量が多いほど高まり、特にハウレンソウの光3区では大きく高まった。すなわち、ハウレンソウの処理前の全糖含量は0.4g/100gFWであったが、処理14日後の糖含量は暗黒、光1、2、3区がハウレンソウではそれぞれ0.1、1.1、1.4、4.4g/100gFW、 Δ 全糖含量はそれぞれ -0.3 、0.7、1.0、4.0g/100gFWとなった。また、コマツナの処理前の全糖含量は0.6g/100gFWであったが、処理14日後の糖含量は暗黒、光1、2、3区がそれぞれ0.1、1.1、1.8、2.1g/100gFW、 Δ 全糖含量はそれぞれ -0.5 、0.5、1.2、1.5g/100gFWとなった。

v ベタイン含量

ハウレンソウの低温処理14日後のベタイン含量は、各区ともに高まった(第30図F)。区間を比較すると、暗黒区と光1区が同程度であり、光の有無による明瞭な差異は認められなかった。光1区よりも光量の多い光2、3区でベタイン含量が高まったが、光2区が光3区よりもベタイン含量が高い傾向があり、光量とベタイン含量との間には一定の傾向は認められなかった。すなわち、処理前のベタイン含量は60mg/100gFWであったが、処理14日後のベタイン含量は暗黒、光1、2、3区がそれぞれ90、81、133、111mg/100gFW、 Δ ベタイン含量はそれぞれ30、22、73、51mg/100gFWであった。



第30図 光条件がホウレンソウとコマツナの T_{EL50} (A) 水分含量 (B)、浸透濃度 (C)、糖含量 (D, ホウレンソウ; E, コマツナ)、ベタイン含量 (F)、プロリン含量 (G)、遊離アミノ酸含量 (H, ホウレンソウ; I, コマツナ)、に及ぼす影響

注：B, C, G図中の色分けはA図と同様。E図中の色分けはD図と同様。I図中の色分けはH図と同様。

vi プロリン含量と遊離アミノ酸含量

ホウレンソウとコマツナの暗黒区における処理14日後の全遊離アミノ酸含量は大きく増加した(第30図H, I)。光を伴う低温処理では、ホウレンソウにおいて、光2区は処理前と同程度であったが、光1、3区では大きく減少し、コマツナにおいて光2区は増加し、光1、3区では処理前と同程度であった。すなわち、ホウレンソウとコマツナの処理前の全遊離アミノ酸含量はそれぞれ532、325mg/100gFWであったが、処理14日後の全遊離アミノ酸含量は暗黒、光1、2、3区がホウレンソウではそれぞれ982、176、511、177mg/100gFW、コマツナではそれぞれ960、372、623、296mg/100gFWで、 Δ 全遊離アミノ酸含量はホウレンソウではそれぞれ450、-357、-22、-356mg/100gFW、コマツナではそれぞれ636、47、298、-29mg/100gFWであった。

ホウレンソウとコマツナの低温処理14日後のプロリン含量は、暗黒区では低下し、光を伴った各区ともに増加した(第30図G)。光を伴った区間を比較すると、プロリン含量は両作物ともに光2区が最も増加し、光1、3区は同程度であり、光量において一定の傾向は認められなかった。すなわち、ホウレンソウとコマツナの処理前のプロリン含量はそれぞれ19、14mg/100gFWであったが、処理14日後のプロリン含量は暗黒、光1、2、3区がホウレンソウではそれぞれ0、32、113、38mg/100gFW、コマツナではそれぞれ5、170、262、158mg/100gFWで、 Δ プロリン含量はホウレンソウではそれぞれ-19、13、94、19mg/100gFW、コマツナではそれぞれ-9、156、248、144mg/100gFWであった。

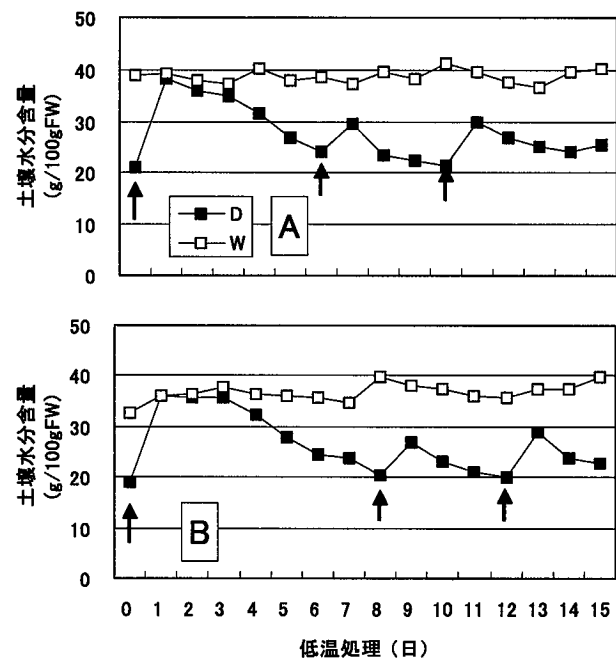
全遊離アミノ酸含量に占めるプロリン含量の割合は、暗黒区ではホウレンソウ、コマツナともに減少したが、光を伴う区では両作物ともに大きく高まった。すなわち、ホウレンソウとコマツナの処理前の全遊離アミノ酸含量に占めるプロリン含量の割合は双方ともに4%であったが、処理14日後のそれは、暗黒、光1、2、3区がホウレンソウではそれぞれ0、18、22、21%、コマツナではそれぞれ0.5、46、42、53%となった。

(5) 土壌水分

i 土壌水分の推移

低温処理前の土壌水分含量は、ホウレンソウ、コマツナともにD区が約20g/100gFW、W区が約40g/100g

FWであった(第31図)。低温処理開始時に両処理ともに十分に灌水し、灌水後は両区ともに土壌水分含量が約40g/100gFWとなった。D区において、その後、土壌水分は漸減した。ホウレンソウは土壌水分が約22g/100gFWとなった時点(低温処理後6、10日目)、コマツナは約20g/100gFWとなった時点(低温処理後8、12日目)で灌水した。灌水直後の土壌水分は約30g/100gFWとなり、再び漸減した。W区の土壌水分は実験期間中、両作物ともに約40g/100gFWで推移した。

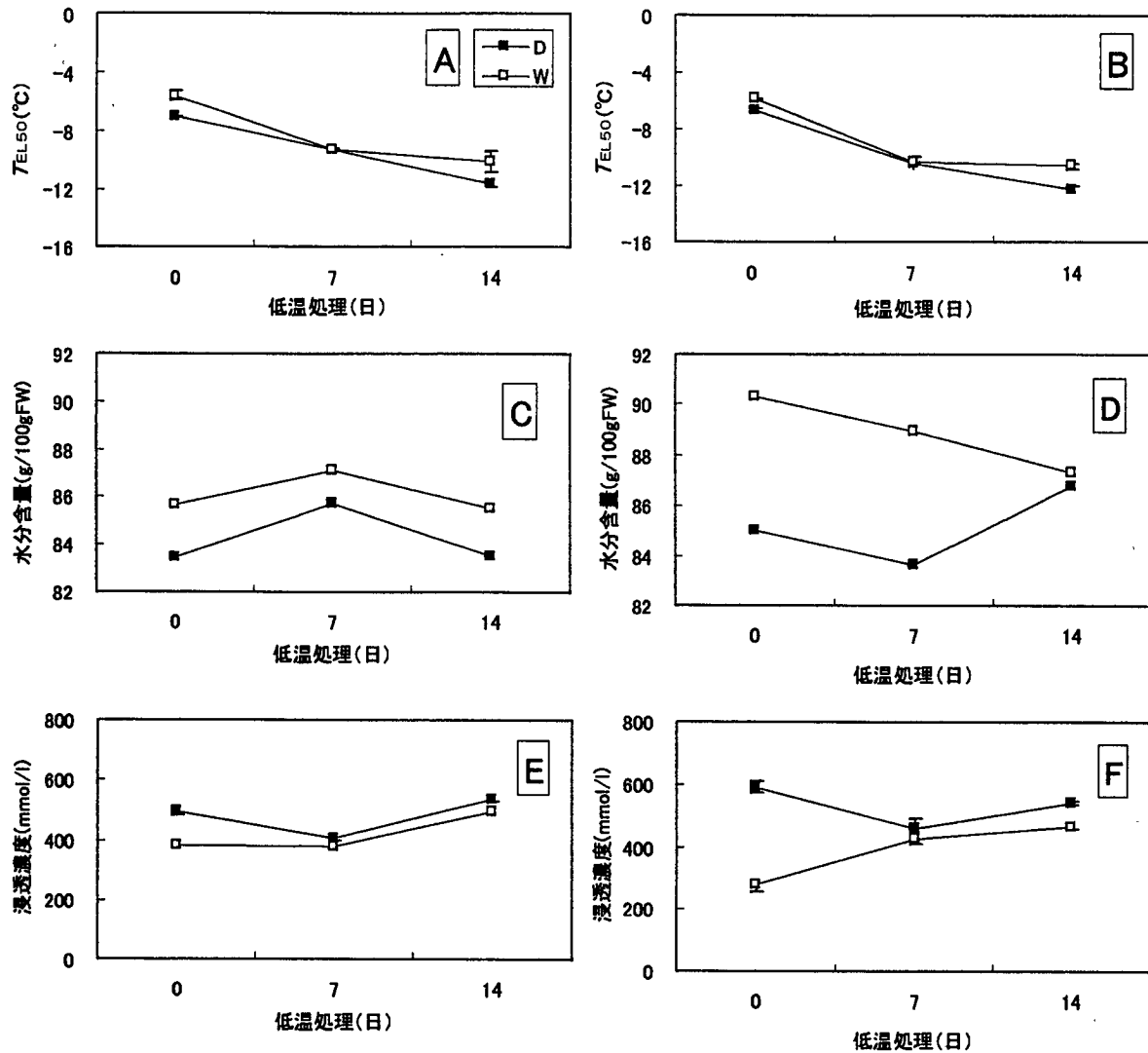


第31図 ホウレンソウ(A)とコマツナ(B)の試験期間における土壌水分含量の推移

注：図中の矢印は少灌水(D)区の灌水時期。B図中の印はA図と同様。

ii 耐凍性

低温処理前のD、W区の T_{EL50} は、ホウレンソウがそれぞれ-7.0、-5.6°C、コマツナがそれぞれ-6.7、-5.9°Cで、両作物ともにD区がW区よりも若干低かった(第32図A, B)。低温処理7日目には両作物のD、W区ともに T_{EL50} が低下したが、低温処理7日から14日にかけてはD区がW区よりも T_{EL50} が低下し、D、W区の T_{EL50} はホウレンソウではそれぞれ-11.7、-10.2°C、コマツナではそれぞれ-12.2、-10.6°Cとなり、D、W区の ΔT_{EL50} はホウレンソウではそれぞれ-4.7、-4.5°C、コマツナではそれぞれ-5.6、-4.8°Cであった。



第32図 土壌水分がホウレンソウとコマツナのT_{EL50} (A) 水分含量 (B)、浸透濃度 (C) に及ぼす影響
注：B, C, D, E, F図中の印はA図と同様。

iii 水分含量

低温処理前のD、W区の水分含量は、ホウレンソウがそれぞれ83.4、85.6g/100gFW、コマツナがそれぞれ85.0、90.3g/100gFWであった（第32図C、D）。低温処理期間中、もD区がW区よりもホウレンソウでは約2g/100gFW、コマツナでは約5g/100gFW低く推移した。コマツナの低温処理14日目はD、W区間の水分含量差が小さかったが、これは、低温処理12日目にD区で灌水したため、14日でも水分含量が高かったと考えられる。

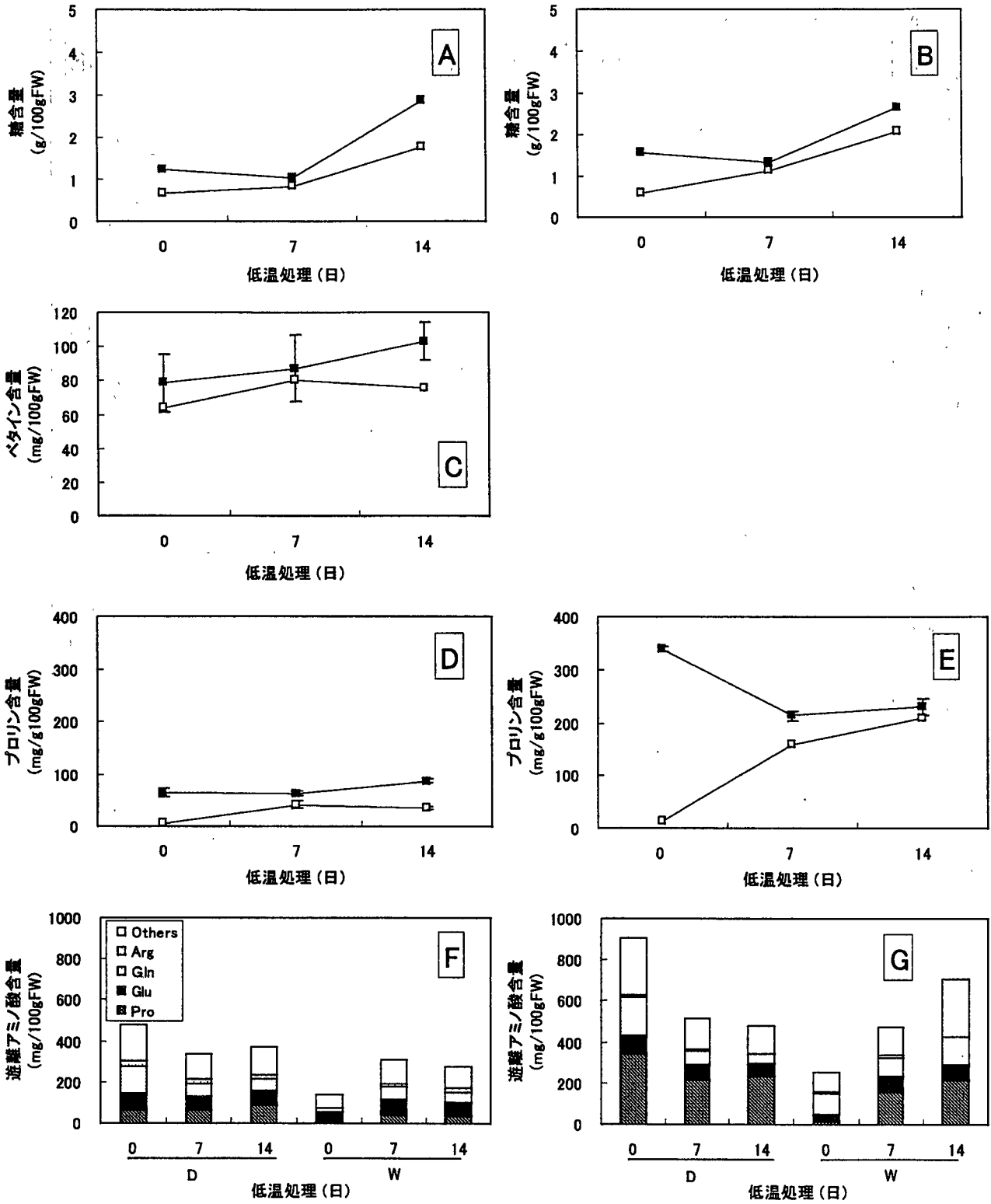
iv 浸透濃度

低温処理前のD、W区の浸透濃度は、ホウレンソウではそれぞれ495、381mmol/kg、コマツナではそれぞれ590、276mmol/kgで、D区がW区よりもホウレンソウでは114mmol/kg、コマツナでは314mmol/kg高かった

た（第32図E、F）。低温処理14日後のD、W区の浸透濃度はホウレンソウではそれぞれ531、493mmol/kg、コマツナではそれぞれ539、465mmol/kgで、D区がW区よりもホウレンソウでは33mmol/kg、コマツナでは74mmol/kg高かった。

v 糖含量

低温処理前の糖含量はD区がW区よりも高かった（第33図A、B）。すなわち、低温処理前のD、W区の糖含量はホウレンソウではそれぞれ1.2、0.7g/100gFW、コマツナではそれぞれ1.6、0.6g/100gFWであった。低温処理後の糖含量はD区がW区よりも高かった。すなわち、低温処理14日後のD、W区の糖含量はホウレンソウではそれぞれ2.9、1.8g/100gFW、コマツナではそれぞれ2.7、2.1g/100gFWであった。



第33図 土壌水分がホウレンソウとコマツナの糖含量 (A, ホウレンソウ; B, コマツナ)、ベタイン含量 (C)、プロリン含量 (D, ホウレンソウ; E, コマツナ)、遊離アミノ酸含量 (F, ホウレンソウ; G, コマツナ) に及ぼす影響

注: A, B, C, D, E図中の印は第32図Aと同様。G図の色分けはF図と同様。

vi ベタイン含量

低温処理前のベタイン含量はD区がW区よりも高かった(第33図C)。すなわち、低温処理前のD、W区のベタイン含量はそれぞれ78、64mg/100gFWであった。低温処理後のベタイン含量はD処理がW処理よりも高まった。すなわち、低温処理14日後のD、W区のベタイン含量はそれぞれ103、75mg/100gFWであった。

vii プロリン含量と遊離アミノ酸含量

低温処理前の全遊離アミノ酸含量はハウレンソウ、コマツナともにD区がW区よりも高く、ハウレンソウではそれぞれ482、137mg/100gFW、コマツナではそれぞれ902、252mg/100gFWであった(第33図F、G)。低温処理7、14日後の全遊離アミノ酸含量はハウレンソウのD区では約340mg/100gFW、W区では約300mg/100gFWであった。コマツナの低温処理7、14日後の全遊離アミノ酸含量はD区では処理前よりも低下し、約500mg/100gFWとなり、W区では次第に増加し、低温処理14日後には700mg/100gFWとなった。

低温処理前のプロリン含量はハウレンソウ、コマツナともにD区がW区よりも高く、ハウレンソウではそれぞれ64、5mg/100gFW、コマツナではそれぞれ339、12mg/100gFWであった(第33図D、E)。低温処理後のプロリン含量はハウレンソウにおいてはD区がW区よりも高まり、低温処理14日後にはD、W区のプロリン含量はそれぞれ86、34mg/100gFWとなった。コマツナでは低温処理後、D区では処理前よりも減少し、210~230mg/100gFWとなったが、W区では低温処理により高まり、処理14日後にはD区とほぼ同様の210mg/100gFWとなった。

(6) 土壌養分

i 施肥量と生育(予備試験)

本実験の土壌養分の水準を設定する前に、土壌養分量がハウレンソウとコマツナの生育に及ぼす影響を調査した。その結果、無施肥区、1/4区は両作物ともに葉齢の増加に関しては他の区と大差はなかったが、草丈と個体重は両区ともに他の区よりも低かった(第34図A、B)。また、6区の草丈と個体重はコマツナでは1、2、4区より低下することはなかったが、ハウレンソウでは低下した。そこで、本実験では、試験区を1/2、1、2、4区に決定した。

ii 生育

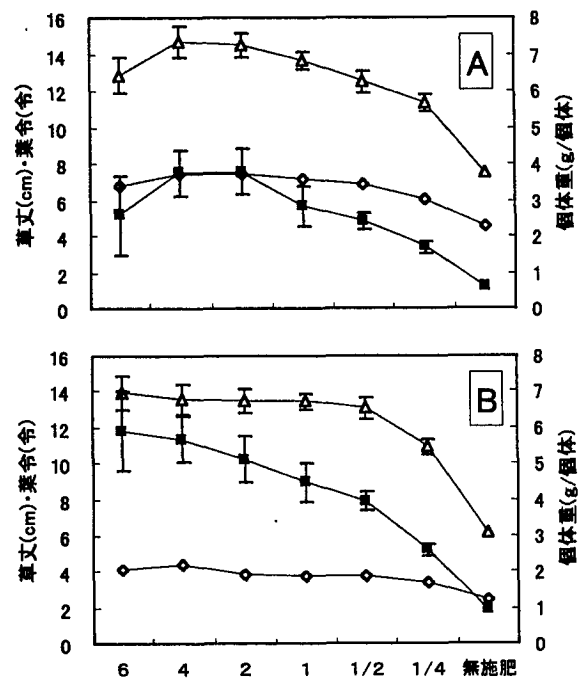
ハウレンソウの低温処理前の草丈は1/2、1、2、4区がそれぞれ15.9、18.6、19.6、19.1cmであった(第35図A)。低温処理14日後の草丈は1/2、1、2、

4区がそれぞれ16.4、19.3、20.8、21.1cmで、処理後の伸長率(処理後の伸長量を処理前の草丈で除して算出)はそれぞれ3.1、3.9、6.0、10.6%であった。コマツナの低温処理前の草丈は1/2、1、2、4区がそれぞれ16.0、17.4、19.1、17.1cmであった(第35図B)。低温処理14日後の草丈は1/2、1、2、4区がそれぞれ17.3、18.8、21.0、19.1cmで、処理後の伸長率はそれぞれ8.3、7.8、10.0、11.8%であった。

ハウレンソウの個体重は処理前では1/2、1、2、4区がそれぞれ3.6、5.4、5.3、5.6g/個体であったが、低温処理後にはそれぞれ-0.1、0.1、1.3、1.1g/個体増加し、増加率はそれぞれ-1.0、2.2、24.0、20.4%であった(第35図C)。コマツナの個体重は処理前では1/2、1、2、4処理区がそれぞれ5.3、6.9、9.6、8.2g/個体であったが、処理後にはそれぞれ-0.4、0.7、1.9、0.5g/個体増加し、増加率はそれぞれ-7.7、10.5、19.7、6.3%であった(第35図D)。

iii 無機成分含量

低温処理前の窒素濃度(乾物重当たり)は、両作物ともに土壌養分量が多いと高くなる傾向がみられた(第4表)。リン濃度はハウレンソウでは1/2区<1区<2、4区の順に高まったが、コマツナでは各区が同程度であった。カリ濃度はハウレンソウでは土壌養分量が多いほど高まり、コマツナでは1/2区が低く、他の区は同程度であった。カルシウム濃度はハウレン

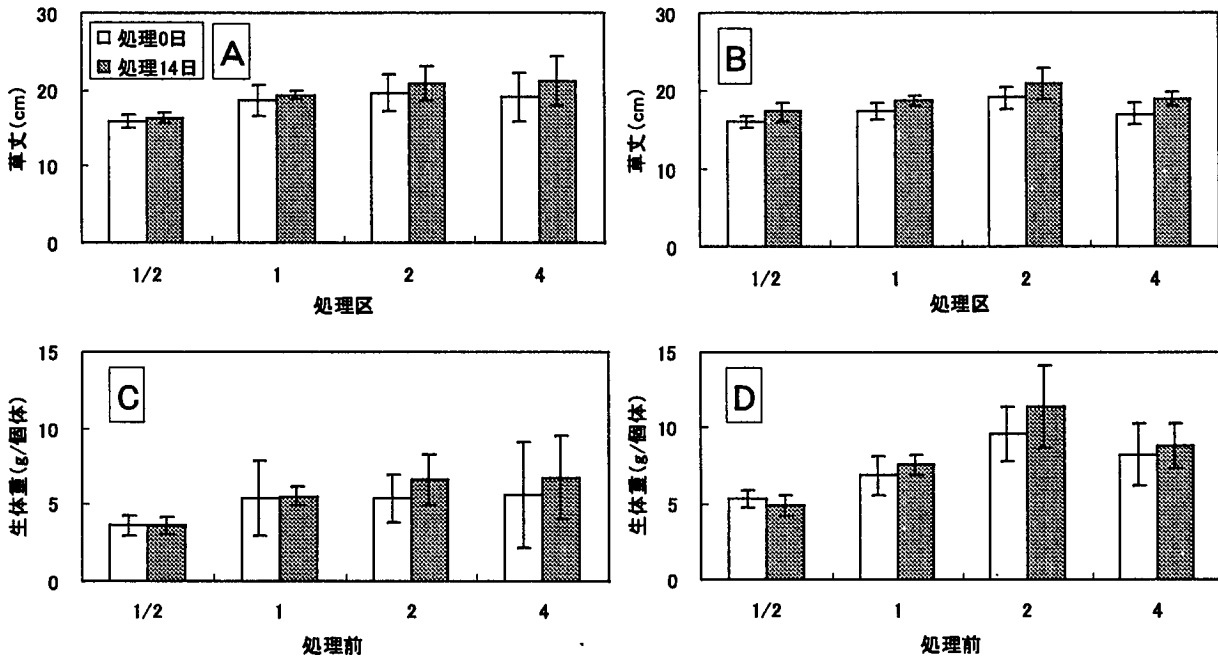


第34図 施肥量が生育に及ぼす影響
草丈, △; 葉齢, ◇; 個体重, ■; 葉重, ●

ソウでは1/2区が高く、他の区は同程度であり、コマツナでは土壤養分量に関わりなく、ほぼ同程度であった。マグネシウム濃度はハウレンソウでは1/2処理区が高く、他の処理区は同程度であり、コマツナでは土壤養分量に関わりなく、ほぼ同程度であった。

低温処理14日後の窒素濃度はハウレンソウでは処理

前と同程度であり、コマツナでは各処理ともに低下した。リン、カリ濃度は両作物ともに低温処理前と各処理ともに同程度であった。カルシウム、マグネシウム濃度はハウレンソウでは1、2、4区に大きな変化はみられなかったが、1/2区で大きく減少した。コマツナは低温処理前と同程度であった。



第35図 土壤養分と草丈 (A, ハウレンソウ; B, コマツナ) および生体重 (C, ハウレンソウ; D, コマツナ)
注: B, C, D図中の色分けはA図と同様。

第4表 ハウレンソウとコマツナの無機成分 (%//乾物)

ハウレンソウ	低温処理前					処理14日後					
	処理区	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
1/2		3.7	0.6	14.3	21.4	17.0	3.1	0.8	13.4	9.3	12.7
1		6.4	1.1	25.0	7.8	8.4	6.7	0.8	29.2	6.1	8.3
2		7.7	1.7	29.7	5.5	6.6	6.6	2.1	28.6	4.5	6.0
4		7.0	1.7	43.7	4.8	8.7	7.3	2.3	37.7	4.0	6.1

コマツナ	低温処理前					処理14日後					
	処理区	N	P	K	Ca	Mg	N	P	K	Ca	Mg
1/2		3.4	0.8	29.4	15.4	4.0	2.8	0.7	37.0	13.1	3.7
1		4.8	1.0	40.9	14.2	2.7	3.1	0.8	36.1	14.9	2.6
2		6.7	0.9	37.7	20.6	4.3	4.9	0.7	38.3	23.5	5.1
4		7.0	0.9	47.5	13.9	4.3	6.2	0.9	51.0	12.8	4.2

iv 耐凍性

低温処理前の T_{EL50} は、ハウレンソウの1/2、1、2区間を比較すると土壤養分量が少ないほど低かったが、4区が -6.7°C と最も低く、一定の傾向がみられなかった。コマツナでは各区間にほとんど差がなかった(第36図A, B)。

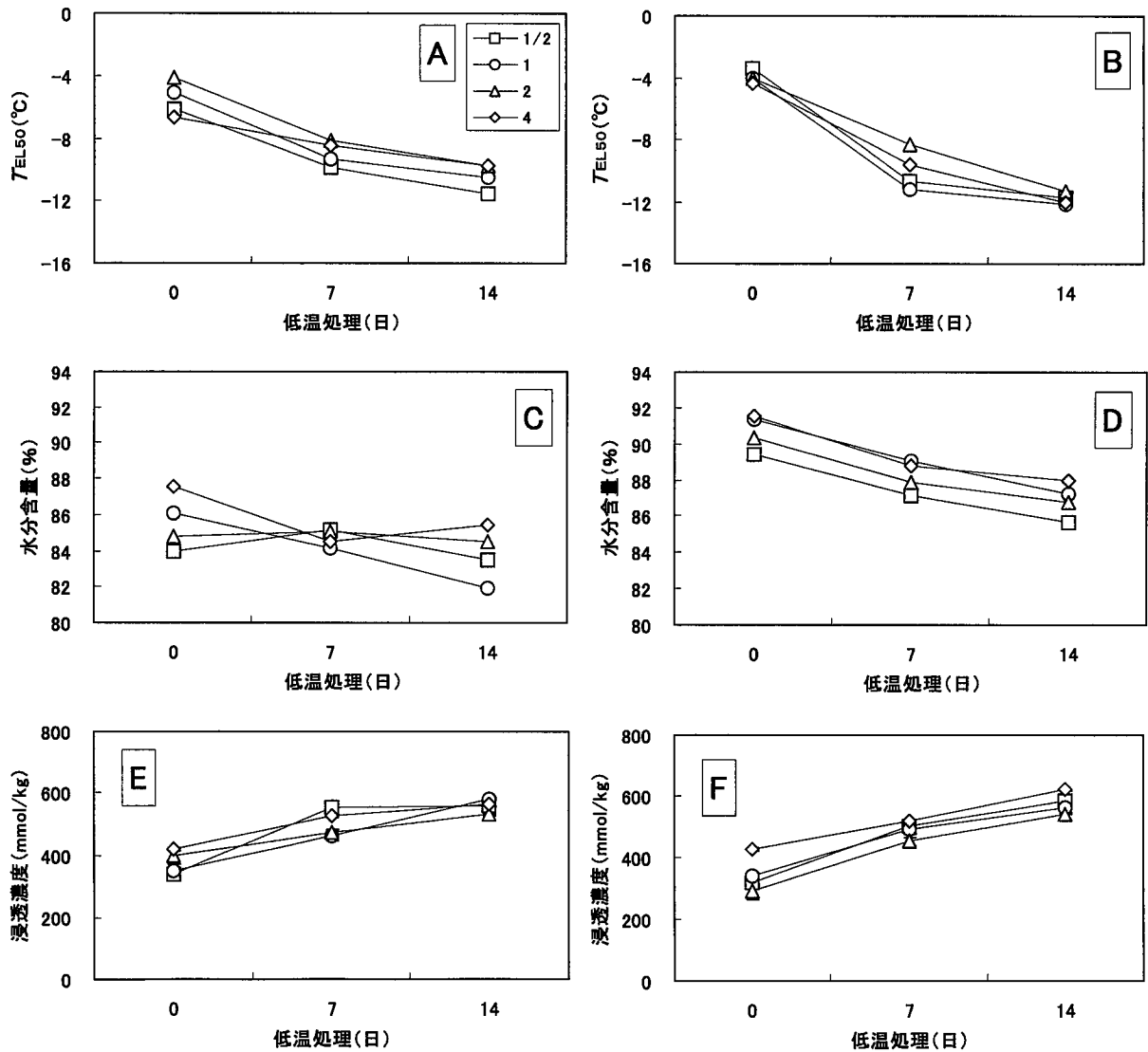
低温処理後の T_{EL50} は、ハウレンソウでは7日後、14日後ともに1/2、1区の順に低下し、土壤養分量が多いと T_{EL50} は低下しない傾向がみられた。すなわち、処理14日後の T_{EL50} は1/2、1、2、4区がそれぞれ -11.6 、 -10.5 、 -9.7 、 -9.8°C であった。コマツナでは低温処理7日後には1、1/2区の T_{EL50} に比べ、2、4区の T_{EL50} は高く、土壤養分量を多くすると低下が少ない傾向がみられたが、低温処理14日後の T_{EL50} は処理区間でほとんど差がみられなかった。

v 水分含量

低温処理前の1/2、1、2、4区的水分含量はハウレンソウがそれぞれ83.9、86.1、84.8、87.5 g/100g FW、コマツナがそれぞれ89.4、91.3、90.3、91.5 g/100gFWで、区間に一定の傾向はみられなかった(第36図C, D)。処理14日後的水分含量はハウレンソウ、コマツナともに土壤養分量が少ないと低下する傾向がみられた。

vi 浸透濃度

低温処理前の浸透濃度は、ハウレンソウは約400mmol/kgで区間に大きな差がなかったが、コマツナでは4区が約430mmol/kgで高く、他の区は約300mmol/kgで同程度であった(第36図E, F)。低温処理後の両作物の浸透濃度は各区とも増加し、区間に大きな差はなかった。

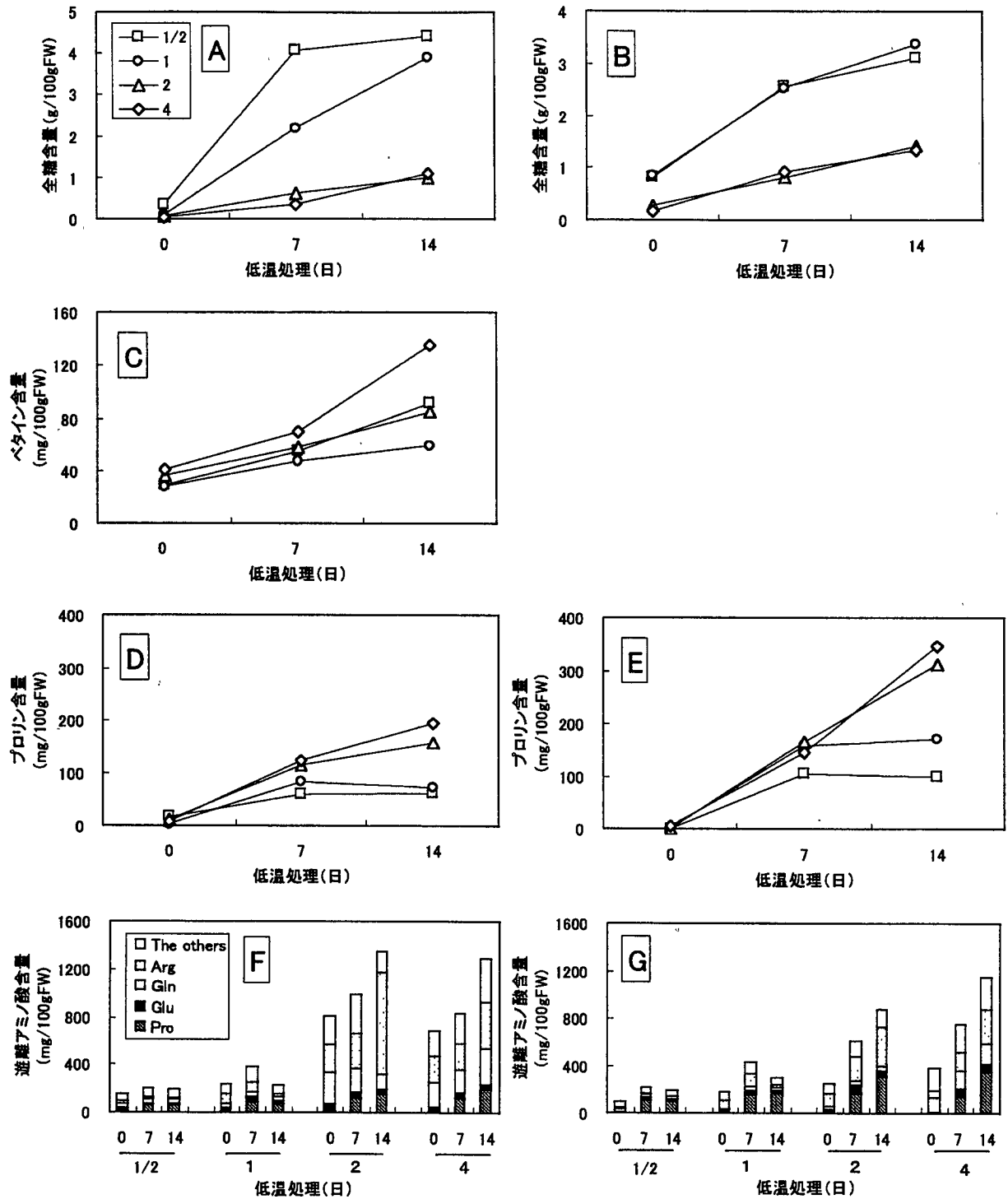


第36図 土壤養分がハウレンソウとコマツナの T_{EL50} (A, ハウレンソウ; Bコマツナ)、水分含量 (C, ハウレンソウ; Dコマツナ)、浸透濃度 (E, ハウレンソウ; Fコマツナ) に及ぼす影響
 注: B, C, D, E, F図中の印はA図と同様。

vii 糖含量

ホウレンソウの全糖含量は、低温処理により1/2区では7日後に急激に高まり、1区も14日目まで急激に高まった(第37図A)。しかし、2、4区では低温

処理による全糖含量の増加は1/2、1区に比べ少なかった。コマツナ的全糖含量もホウレンソウと同様に1/2、1区では大幅に増加したが、2、4区では増加が少なかった(第37図B)。



第37図 土壌養分がホウレンソウとコマツナの糖含量 (A, ホウレンソウ; Bコマツナ)、ベタイン含量 (C, ホウレンソウ)、プロリン含量 (D, ホウレンソウ; E, コマツナ)、遊離アミノ酸含量 (F, ホウレンソウ; Gコマツナ) に及ぼす影響

注: B, C, D, E図中の印はA図と同様。G図中の色分けはF図と同様。

viii ベタイン含量

ハウレンソウの低温処理前のベタイン含量は1/2、1、2、4区それぞれ29、28、36、41mg/100gFWであった(第37図C)。低温処理により、ベタイン含量は4区が最も高まり、次いで1/2区と2区で、1区は他の区に比べ増加量が少なかった。すなわち、低温処理14日後のベタイン含量は1/2、1、2、4区それぞれ92、59、85、135mg/100gFWとなった。

ix プロリン含量と遊離アミノ酸含量

低温処理前の全遊離アミノ酸含量はハウレンソウ、コマツナともに土壤養分量が多いと高まる傾向がみられ、1/2、1、2、4区的全遊離アミノ酸含量はハウレンソウではそれぞれ156、234、805、684mg/100gFW、コマツナではそれぞれ95、183、247、382mg/100gFWであった(第37図F、G)。低温処理後の全遊離アミノ酸含量も土壤養分量が多いと高まる傾向がみられ、低温処理14日後の1/2、1、2、4区的全遊離アミノ酸含量はハウレンソウではそれぞれ190、254、1355、1288mg/100gFW、コマツナではそれぞれ192、296、873、1150mg/100gFWであった。2、4区においては、ハウレンソウ、コマツナともに低温処理後には特にアルギニン含量が高まった。

低温処理前の両作物のプロリン含量は土壤養分の多少にかかわらず各区ともに低かった(第37図D、E)。プロリン含量は低温処理により両作物ともに各区で高まったが、土壤養分量が多い方がプロリン含量の増加量が多い傾向がみられた。すなわち、1/2、1、2、4区の低温処理14日後のプロリン含量はハウレンソウではそれぞれ60、71、158、193mg/100gFW、コマツナではそれぞれ98、171、311、346mg/100gFWであっ

た。

(7) 浸透濃度、糖含量、ベタイン含量、プロリン含量と T_{EL50} との関係i 浸透濃度と T_{EL50} との関係

本実験において全体(気温、脱馴化、地温、光量、土壤養分量)をとおして浸透濃度と T_{EL50} との関係をみると、ハウレンソウ、コマツナともに浸透濃度が約300~700mmol/kgの範囲内で、 T_{EL50} の間には高い負の相関関係が認められた(第38図A、B)。

ii 糖含量と T_{EL50} との関係

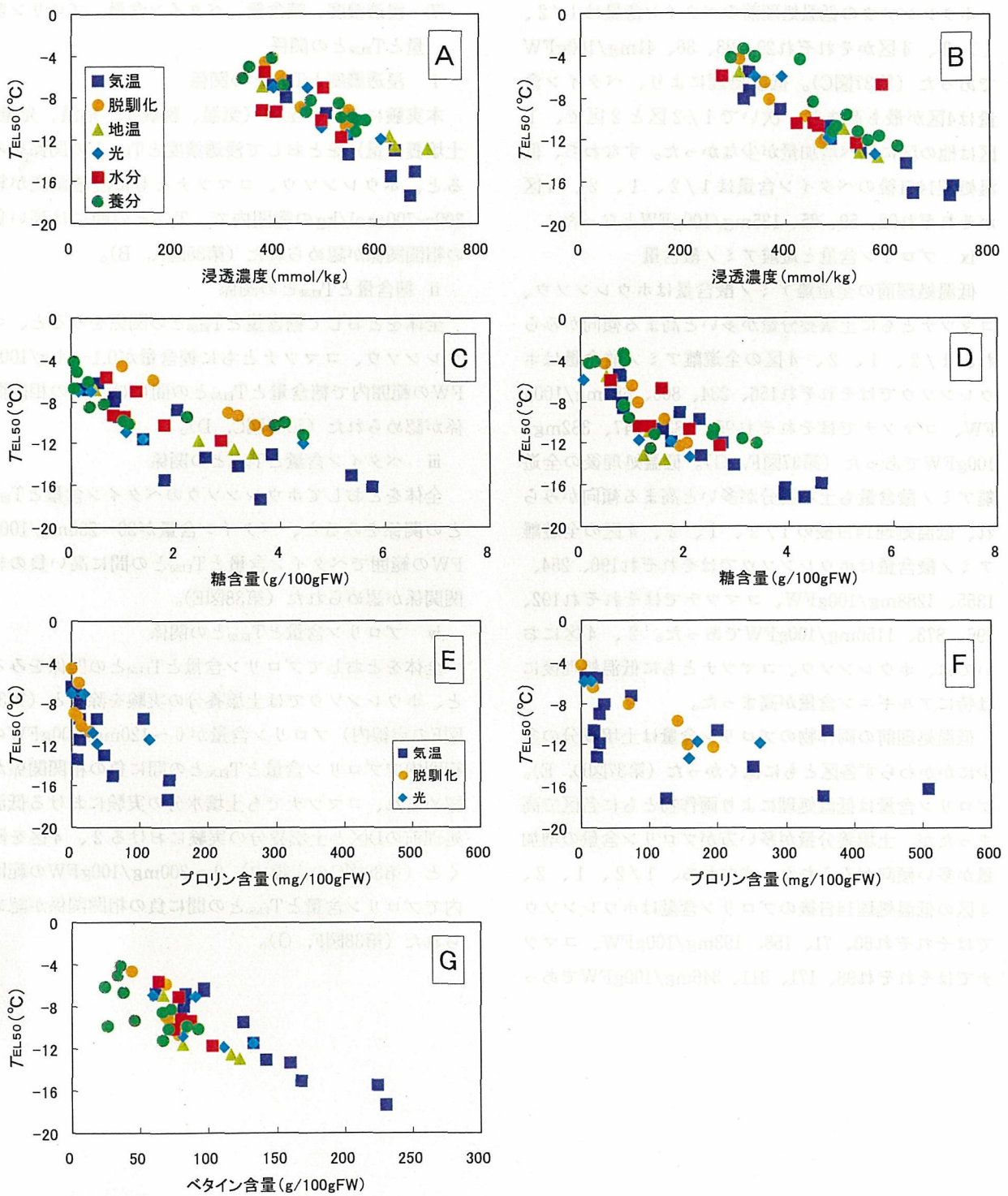
全体をとおして糖含量と T_{EL50} との関係をみると、ハウレンソウ、コマツナともに糖含量が0.1~4g/100gFWの範囲内で糖含量と T_{EL50} の間には、負の相関関係が認められた(第38図C、D)。

iii ベタイン含量と T_{EL50} との関係

全体をとおしてハウレンソウのベタイン含量と T_{EL50} との関係をみると、ベタイン含量が20~230mg/100gFWの範囲でベタイン含量と T_{EL50} の間に高い負の相関関係が認められた(第38図E)。

iv プロリン含量と T_{EL50} との関係

全体をとおしてプロリン含量と T_{EL50} との関係をみると、ハウレンソウでは土壤養分の実験を除くと(第38図Fの点線内)プロリン含量が0~120mg/100gFWの範囲内でプロリン含量と T_{EL50} の間に負の相関関係が認められ、コマツナでも土壤水分の実験における低温処理前のD区と土壤養分の実験における2、4区を除くと(第38図Gの点線内)0~300mg/100gFWの範囲内でプロリン含量と T_{EL50} の間に負の相関関係が認められた(第38図F、G)。



第38図 ホウレンソウとコマツナの浸透濃度 (A, ホウレンソウ; Bコマツナ)、糖含量 (C, ホウレンソウ; Dコマツナ)、プロリン含量 (E, ホウレンソウ; F コマツナ)、ベタイン含量 (G, ホウレンソウ) とTEL50との関係

注: B, C, D, E, F, G, H図中の印と色分けはA図と同様。

4) 考察

(1) 環境要因と T_{EL50} i 低温馴化時の気温と T_{EL50}

Fuller・Eagles¹⁷⁾は*Lolium perenne*において、昼夜15°C、2°Cと15/2°C(明期/暗期)を比較し、昼夜15°Cでは耐凍性が増大しないが、15/2°Cでは耐凍性が昼夜2°Cと同レベルに増大することを示し、暗期の気温が耐凍性の程度に影響すると報告している。ハウレンソウとコマツナの T_{EL50} は昼夜一定の条件で2~15°Cの範囲では気温が低いほど低下した(第23図A)。暗期の気温を5°C一定とし、明期の気温を15°C、5°Cに変えた場合、ハウレンソウ、コマツナともに明期の気温5°Cの方が15°Cよりも T_{EL50} が低下した(第25図A, B)。逆に、明期の気温を5°C一定とし、暗期の気温を5、-2、-5°Cに変えた場合、 T_{EL50} はハウレンソウでは暗期の気温が-5°C、-2°C、5°Cの順に、コマツナでは-2°C、-5°C、5°Cの順に T_{EL50} が低下した。このことから、ハウレンソウとコマツナにおいては、明期、暗期の双方の気温が耐凍性の増大に影響すること、さらに、ハウレンソウでは-5~15°Cの範囲で、コマツナでは-2~15°Cの範囲で気温が低いほど耐凍性が増大することが明らかになった。

ii 脱馴化

ハウレンソウとコマツナは低温に遭遇することで T_{EL50} が低下し、昼夜5°C、14日で T_{EL50} がハウレンソウ、コマツナともに約8°C低下した(第27図A)。このことから、単純に計算すると0.6°C/日ほど T_{EL50} が低下したことになる。しかし、20°Cで脱馴化処理すると、3時間後には、両作物の T_{EL50} は上昇する傾向がみられ、6時間後にはハウレンソウ、コマツナがそれぞれ1.5°C、2.5°C、24時間後にはそれぞれ2.3°C、4.3°Cほど処理前よりも T_{EL50} が上昇した(第27図A)。このことから、両作物の脱馴化は低温馴化よりも非常に短時間で進行することが明らかになった。

3時間の高温処理により耐凍性が減少することがキャベツ⁶²⁾で報告されている。ハウレンソウとコマツナにおいても3~6時間といった短時間の高温遭遇(20°C)で耐凍性が減少することが明らかになった。このことから、晴天日の日中のハウス内気温の上昇により(第63図B, 第72図D)、両作物の脱馴化が進行することが考えられる。11月から12月にかけて徐々に両作物の耐凍性が増大しても、日中にハウス内を高温にすると短時間に耐凍性が減少する危険性がある。日本海側においては、12月から2月上旬にかけては晴天日にな

ることは希であるが、2月中旬以降は晴天日が増えてくる。したがって、特に2月中旬以降は、日中のハウス内気温を高めないことが凍結傷害を回避する上で重要と考えられる。

iii 地温と T_{EL50}

Fennellら⁹⁾はハウレンソウを20/20°C(地上部/地下部)、20/5°C、5/20°C、5/5°C処理した結果、処理7日後のハウレンソウの T_{EL50} は5/20°C、5/5°C、20/20°C、20/5°Cでそれぞれ-13°C、-14°C、-7°C、-8°Cで、耐凍性が5/20°C、5/5°Cで増大し、20/20°C、20/5°Cでは増大しなかったことを見だし、このことから、ハウレンソウでは根温は葉の耐凍性に対して影響が少ない報告している。しかし、Kacperska・Szaniawski²⁸⁾はナタネを20/20°C(地上部/地下部)、20/3°C、3/20°C、3/3°C処理したところ、3/3°C>20/3°C=3/20°C>20/20°Cの順に耐凍性が増大したことを報告している。このことから、彼らは、ナタネにおいては根温も耐凍性増大に大きな影響を及ぼすと結論している。

本研究において、5°Cでの低温処理14日後の T_{EL50} は、ハウレンソウ、コマツナともに無加温(地温、約3°C)、加温1(地温、約7°C)、加温2(地温、9~10°C)の順に低下し、無加温に比べ加温2の T_{EL50} はハウレンソウ、コマツナでそれぞれ1.2°C、2.7°C高かった(第29図A)。このことから、両作物ともに同様の気温で低温処理を実施しても、地温が耐凍性に影響を及ぼし、地温が高いと T_{EL50} 低下が少なくなることが示された。しかし、地温約3°Cと地温約7°C間の T_{EL50} 差は、ハウレンソウ、コマツナともに小さく(0.4~0.5°C)、地温が9~10°Cだと地温約3°Cとの T_{EL50} 差は大きくなった(ハウレンソウ、1.2°C;コマツナ2.7°C)。また、コマツナがハウレンソウに比べると地温の影響を大きく受けることが明らかになった。

寡日射下の日本海側においては11~1月にかけて、ビニルトンネル内の深さ5cmの地温は、ハウス内地温よりも2~3°C高まる程度である(第64図)。ポリマルチにおいても地温上昇効果はほぼ同様と考えられる。このことから、マルチ栽培はそれほど耐凍性増大に弊害とはならないと考えられる。

iv 光条件と T_{EL50}

暗黒下で低温に遭遇しても耐凍性が増大しないことがキャベツで報告されている⁶¹⁾。本研究において、ハウレンソウとコマツナの低温処理後の T_{EL50} は、暗黒下では低下せず、光1、2、3区で低下した(第30図A)。

このことから、両作物では、耐凍性が増大するためには、光を伴う低温処理が必要になったことが明らかになった。Uemura・Steponkus⁶⁰⁾により、シロイヌナズナの耐凍性増大には糖の存在が不可欠であることが示されている。本研究において、暗黒下の低温処理で両作物の T_{EL50} が低下しなかったのは、暗黒下で耐凍性増大に必要な糖が生産されなかったためと考えられる。

光1、2、3区を比較すると、光量が多いほど T_{EL50} は低下したが、光1区と3区の差はハウレンソウで1.0°C、コマツナで1.6°Cと比較的小さかった。12~1月にかけて、日本海側の秋田市、太平洋側の盛岡市、宮古市の日射量はそれぞれ3.9~4.7、5.5~7.1、6.9~8.1 MJ/m²/day³⁰⁾であり、日本海側の日射量は太平洋側よりも少ない。光1、2、3区の光量はそれぞれ54、82、159mmol/m²/secであり、これは全天日射量のそれぞれ0.7、1.3、3.7 MJ/m²/dayに相当する(筆者実測)。本研究において、耐凍性が増大するためには、両作物ともに光を受けることが必要であることが示されたが、光量は日本海側のように少なくとも、耐凍性の増大にとって大きな影響がないと考えられた。

v 土壤水分と T_{EL50}

Sasakiら⁶⁰⁾はキャベツにおいて、乾燥ストレスを加えることにより耐凍性が増大することを報告している。本研究においても、低温処理前のD区はW区よりも T_{EL50} がハウレンソウで1.4°C、コマツナで0.8°C低下した(第32図A, B)。また、低温処理14日後にはD区はW区よりも T_{EL50} がハウレンソウ、コマツナともに約1.5°C低下した。したがって、ハウレンソウ、コマツナともにキャベツで観察されたように感想ストレスが耐凍性を増大させることが明らかになった。このことから、ハウス栽培において多灌水で管理すると、また、ハウス内に雪解け水などが浸透し、土壤が過湿になり、その結果、耐凍性が増大しにくいことが示された。

vi 土壤養分と T_{EL50}

本研究において、低温処理前のハウレンソウ、コマツナの T_{EL50} は、土壤養分量の違いによる明瞭な差はみられなかった(第36図A, B)。低温処理14日後の T_{EL50} は、ハウレンソウでは土壤養分量が多いと低下しない傾向がみられ、コマツナでは土壤養分量の違いによる差はみられなかった。

土壤養分が植物の耐凍性に及ぼす影響に関する報告は少ないが、本結果からは、ハウレンソウでは多肥栽培すると耐凍性が増大しにくいことが示唆された。したがって、ハウレンソウを作付けするにあたっては、

土壤の残存養分量を把握してから、施肥することが耐凍性向上の観点から必要と考えられる。コマツナの耐凍性は、土壤養分量の影響が少ないと考えられた。

(2) 環境要因と浸透濃度

15/5°C区では浸透濃度が高まらなかったが、5/5°C、5/-2°C、5/-5°C区では処理前に比べ、処理21日後に浸透濃度がハウレンソウではそれぞれ1.3、1.6、1.6倍に、コマツナではそれぞれ1.7、2.2、2.2倍に高まった(第25図E, F)。また、脱馴化処理で両作物の浸透濃度は速やかに減少した(第27図C, D)。地温、光、土壤水分条件は低温処理時における両作物の浸透濃度増加に影響を及ぼし、地温が低いほど(第29図C)、光量が多いほど(第30図C)、土壤水分量が少ないほど(第32図E, F)浸透濃度が高まった。暗黒下においても低温処理により処理前よりも浸透濃度がハウレンソウ、コマツナともに1.2倍に高まったが、これは、遊離アミノ酸の増加が関与していることが明らかになった(第30図C, H, I)。土壤養分量の違いは両作物の浸透濃度に大きな影響は及ぼさなかった(第36図E, F)。

低温馴化時の気温、脱馴化、低温馴化時の地温、光条件、土壤水分、土壤養分の実験について全体をとおしてみると、ハウレンソウ、コマツナともに浸透濃度と T_{EL50} の間には、高い負の相関関係が認められ、浸透濃度と耐凍性とは密接に関係しており、浸透濃度が高まると耐凍性が増大することが示された(第38図A, B)。浸透濃度の上昇は、細胞外凍結時における細胞内から細胞外への脱水量の緩和に寄与していると考えられる。

(3) 環境要因が糖、ベタイン、プロリン含量に及ぼす影響およびこれら成分と T_{EL50} との関係

i 低温馴化時の気温

ハウレンソウとコマツナの T_{EL50} は昼夜一定条件で2~15°Cの範囲では気温が低いほど低下した(第23図A)。糖含量は上記の範囲では両作物ともに気温が低いほど全糖含量が増加し(第23図C, D)、糖の蓄積と T_{EL50} の低下とは良く一致し、糖の蓄積が T_{EL50} の低下に寄与していることが示された。

明/暗期の気温を変えた場合、糖含量はハウレンソウ、コマツナともに5/-2°C、5/-5°C、5/5°C、15/5°C区の順に高まった(第26図A, B)。ハウレンソウのベタイン含量は5/-5°C区で最も高まり、次いで5/-2°C、5/5°C区で高まった(第26図C)。プロリン含量は両作物ともに5/-5°Cで最も高まり、

次いでハウレンソウでは5/−2℃と5/5℃区が高まり、コマツナでは5/−2℃、5/5℃区の順に高まった(第26図D, E)。そして、15/5℃区ではベタイン、プロリンともに高まらなかった。以上のことから、糖含量は5/−2℃、5/−5℃、5/5℃、15/5℃の順に高まり、ベタインとプロリン含量は設定した範囲内で気温が低いほど多く蓄積されることが明らかになった。

ii 脱馴化

脱馴化により、ハウレンソウとコマツナの T_{EL50} は速やかに高まり、糖とプロリン含量は脱馴化3~6時間以降減少し(第27図A, D, F)、糖とプロリン含量の変化は耐凍性が失われていく経過とよく一致していた。

一方、ハウレンソウのベタイン含量は3~48時間の脱馴化处理によっても減少しなかった(第27図E)。耐凍性が増大する際にはベタイン含量も増大し、ベタイン含量の変化は耐凍性と関連づけてとらえることができるが、脱馴化時において、ベタインが単独で高濃度に蓄積していても耐凍性が低下したことから、ベタインは糖やプロリンと一緒に存在することで耐凍性増大に寄与する可能性があると考えられる。

iii 地温

低温処理時の地温が低い場合、ハウレンソウの糖とベタイン含量、コマツナの糖含量が高まり、また、 T_{EL50} は両作物ともに地温が低い場合に低下した(第29図A, D, E, F)。このことから、本実験において、糖、ベタイン含量の変化と T_{EL50} の低下とは一致し、糖とベタインが耐凍性の増大に寄与していることが示唆された。

iv 光条件

暗黒条件で低温処理してもハウレンソウとコマツナの T_{EL50} は低下しなかった(第30図A)。暗黒条件で耐凍性が高まらないことはキャベツ⁶¹⁾でも報告されている。しかし、シロイヌナズナにおいて、暗黒条件でもスクロース添加培地で低温処理すると耐凍性が増大する⁶²⁾。このことから、本実験の暗黒条件でハウレンソウとコマツナの耐凍性が増大しなかったのは、糖含量が高まらなかったことが一つの理由であると考えられる。光を伴った低温処理により両作物の糖含量が処理前よりも高まり、また、両作物の T_{EL50} は光1、2、3区ともに低下した。しかし、34~159mmol/m²/secの範囲内では光量の違いによる T_{EL50} 低下の差はわずかであった。

暗黒条件での低温処理によりハウレンソウのベタイ

ン含量は高まったが T_{EL50} は低下せず、光を伴った低温処理により糖とプロリン含量と一緒にベタイン含量が高まった時に T_{EL50} が低下した(第30図D~G)。このことから、脱馴化の実験と同様に、ベタイン含量のみ単独に高まっても T_{EL50} は低下しないことから、ベタインは糖、プロリンと一緒に存在することで耐凍性増大に寄与する可能性があると考えられる。

コマツナの糖とプロリン含量は暗黒条件での低温処理では高まらず、光を伴った低温処理で高まり、 T_{EL50} は糖とプロリン含量が高まると低下した。このことから、糖とプロリンが耐凍性の増大に寄与していることが示された。

v 土壌水分

乾燥や塩などの環境ストレスにより糖⁶³⁾、ベタイン⁶⁴⁾、プロリン⁶⁵⁾が蓄積されることが知られている。本実験において、低温処理前のハウレンソウの糖、ベタイン、プロリン含量はともにD区がW区よりも高く、コマツナの糖とプロリン含量もD区がW区よりも高かった(第33図A~E)。また、低温処理前の T_{EL50} は、D区がW区よりもハウレンソウで1.4℃、コマツナで0.8℃低かった(第32図A, B)。このことから、土壌の乾燥条件により蓄積された糖、ベタイン、プロリン含量は、乾燥条件での両作物の恒常性維持に寄与していると考えられるが、耐凍性の向上にも寄与していることが示された。

低温処理14日後のハウレンソウの糖、ベタイン、プロリン含量はD区がW区よりも高く、それに対応して T_{EL50} はD区がW区よりも低下し、糖、ベタイン、プロリンが耐凍性増大し寄与していることが示唆された。低温処理14日後のコマツナの糖含量はD区がW区よりも高く、それに対応して T_{EL50} はD区がW区よりも低下し、糖が耐凍性増大し寄与していることが示唆された。D区プロリン含量は処理前の339mg/100gFWから処理14日後には231mg/100gFWに低下し、W区とはほぼ同程度になった。

以上の結果からは、両作物ともに糖含量の変化と T_{EL50} の変化とはよく対応していると考えられた。また、ハウレンソウのベタイン含量と T_{EL50} の変化ともよく対応していると考えられた。すなわち、糖とベタイン含量が高まるのに伴って T_{EL50} が低下した。プロリンはW区において、低温処理により両作物ともに高まり、 T_{EL50} の変化とはよく対応していると考えられた。

vi 土壌養分

低温処理14日後の糖含量は、ハウレンソウ、コマツ

ナともに土壤養分量が多い2、4区では高まらず、逆に、ベタイン（ホウレンソウの4区）とプロリン含量（両作物ともに2、4区）は土壤養分量の多い区で高まった（第37図A～E）。一方、両作物の T_{EL50} はすべての区において低温処理により低下し、低温処理14日後の T_{EL50} は各区に大差はみられなかった（第36図A, B）。このことから、糖含量の少ない2、4区において、ベタインとプロリンは糖の不足分を補う役割を果たし、 T_{EL50} の低下に貢献している可能性があることが示された。

5) 要約

低温馴化時の明/暗期の気温は双方ともにホウレンソウとコマツナの耐凍性に影響を及ぼし、本実験で設定した範囲内では、ホウレンソウは5/−5℃区が、コマツナは5/−2℃区の耐凍性が最も増大した。20℃での3時間の脱馴化処理によりホウレンソウ、コマツナともに耐凍性が減少することが明らかになった。低温処理時の地温を5/3℃（気温/地温）、5/7℃、5/9～10℃間で比較すると、両作物ともに5/3℃が最も耐凍性が低下したが、5/3℃と5/7℃間の T_{EL50} 差は0.4～0.5℃と小さく、5/3℃と5/9～10℃では T_{EL50} 差が1.2～2.7℃と大きくなった。暗黒下の低温処理では両作物ともに耐凍性が増大せず、光を伴った低温処理で耐凍性が増大した。54～159mmol/m²/secの範囲内では光強度の差は両作物の耐凍性に大きな差をもたらさなかった。低温処理時の土壤水分が少ない方が耐凍性が増大した。ホウレンソウでは土壤養分量が少ない方が耐凍性が増大し、コマツナの耐凍性は土壤養分量の影響が少なかった。

低温処理時の環境要因（気温、光条件、土壤水分、土壤養分）の実験について全体をとおしてみると両作物ともに浸透濃度と T_{EL50} の間には負の相関関係が認められ、浸透濃度が高まると耐凍性が増大することが示された。

低温処理時の環境要因の実験について全体をとおしてみると、両作物の糖含量と T_{EL50} の間には負の相関関係が認められ、糖が耐凍性の増大に寄与していることが示された。ホウレンソウのベタイン含量、両作物のプロリン含量と T_{EL50} の間には負の相関関係が認められ、ベタイン、プロリンが耐凍性の増大に寄与していることが示された。しかし、ベタイン含量は暗黒下の低温処理で増加したが、 T_{EL50} が低下せず、また、脱馴化処理において T_{EL50} が高まったがベタイン含量は高い状態が継続するなど、ベタインが単独に高濃度に蓄

積しても耐凍性増大への寄与がみられない現象も示された。土壤養分量が多いと低温処理後も両作物の糖含量は高まらなかった。しかし、土壤養分量が多い場合には、ホウレンソウではベタイン、プロリン含量が高まり、コマツナではプロリン含量が高まり、 T_{EL50} の低下に対して糖が少ない分を補う役割を果たしていると考えられた。

6 栽培期間中の気温がホウレンソウとコマツナの耐凍性に及ぼす影響

本節は筆者の園芸学会雑誌への発表論文⁷⁾を基に、編集・加筆したものである。

1) 目的

北東北日本海側の冬期の最低気温は、沿岸部で−8℃、内陸部で−15℃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⁸⁾。しかし、草本作物の耐凍性の季節変化に関しては、コムギ¹⁾や牧草⁹⁾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、本節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。

2) 方法

(1) 供試材料の育成

ホウレンソウ品種‘ソロモン’、コマツナ品種‘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（ホウレンソウ、コマツナともに草丈が20～30cm）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。

ホ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、苦土石灰、ようりん、稲ワラ堆肥をそれぞれ10、4、200

kg/a、ハウスの全面に施用した。1回当たりの播種面積は15㎡程度とし、条間は20cm、株間は2～3cmで手播きした。間引きは本葉2～4枚時に行い、株間を約5cm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0.3mmの銅・コンスタンタン熱電対を直径5cmの通風型塩ビ管内にセットし、ハウス内中央部で地上1mの地点を測定した。

(2) 試料の採取と耐凍性の評価

キャベツでは3～6時間程度の脱馴化処理(15℃、20℃、25℃/暗処理)で耐凍性が低下することが知られている⁶²⁾。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。

耐凍性の測定はI章3節2.2)と同様の方法で行った。

(3) 分析試料の採取、葉身の水分および糖含量の測定

i 試料の採取

葉菜類の成分含量には日変動がおこることが知られているので⁴²⁾、本実験では午前9時から9時30分の間に試料を採取した。これらを直ちに葉身と葉柄に分けて5mm角に刻み、各3g秤量して試験管に入れ、分析に供するまで-20℃で保存した。

ii 水分含量

I章3節2.3)と同様の方法で行った。

iii 糖含量

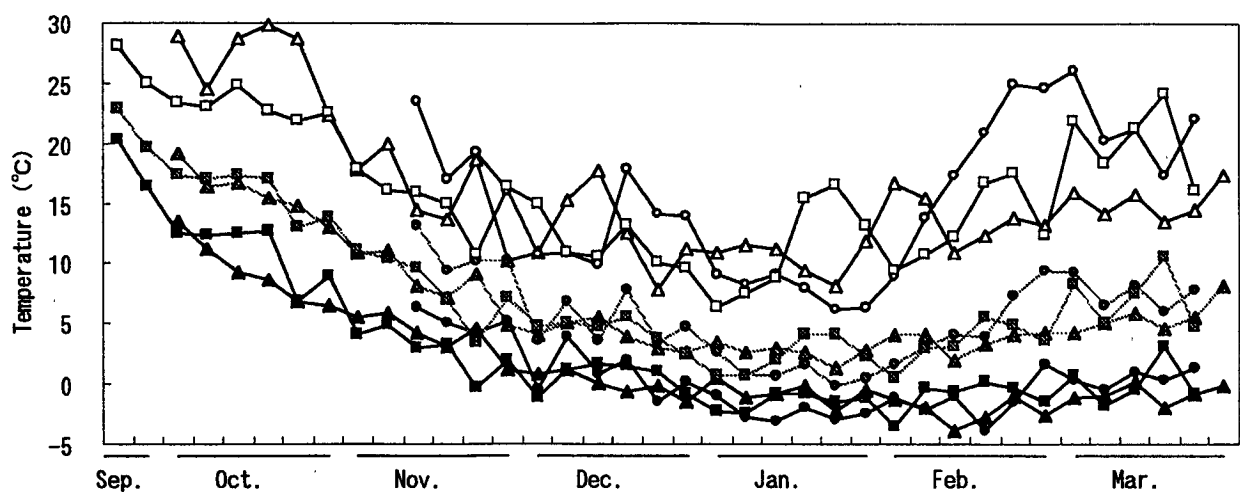
凍結試料3gに0.1Nの過塩素酸を5ml加え、乳鉢で

磨砕、抽出し、14mlに定容した。この後、15,000rpmで遠心分離し(トミー精工社, MRX-150型)、上清を300倍に希釈して検液とした。測定はアンスロン硫酸法により行なった。比色計はUVIDEC-4型(日本分光工業)を用いた。

2) 結果

第39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℃程度と大きかった。10月には23～30℃で推移し、その後次第に低下して、1月上旬は最低の6～12℃となった。そして2月上旬以降は上昇に転じ、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40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、3.7MJ/m²/day、1月22、23、24日のそれはそれぞれ9.9、6.2、11.8MJ/m²/day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℃を超える時間帯は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。

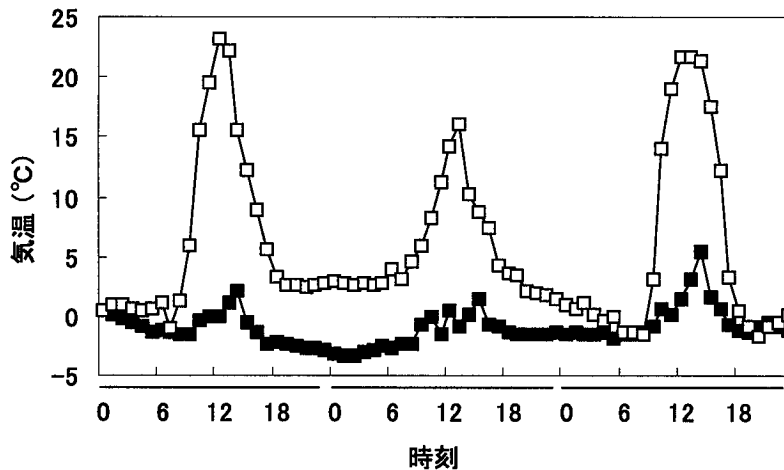


第39図 1996/97年、1997/98年および1998/99年の半月別気温の推移

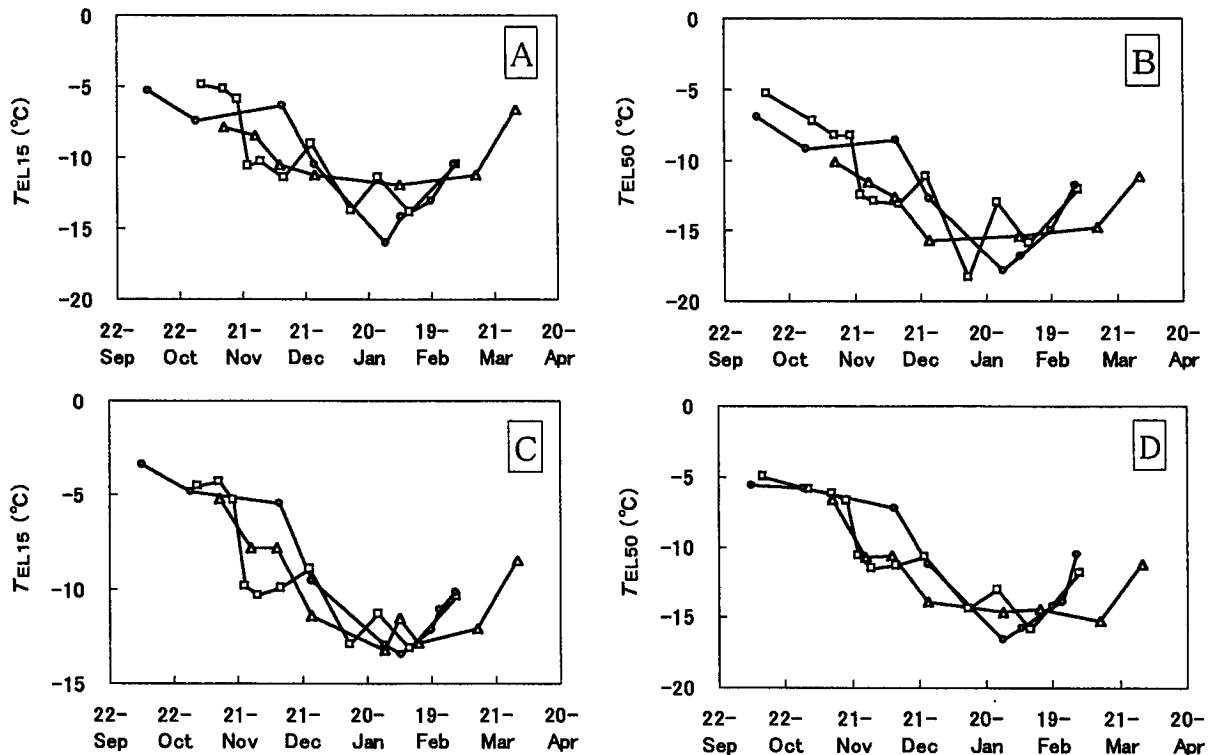
注：△，1996/97年；○，1997/98年；□，1998/99年。

第41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、10~11月上旬には約 -5°C で、その後12月下旬にかけて次第に低下し、1~2月上旬には $-12\sim-16^{\circ}\text{C}$ となった。そして、2月中旬以降は次第に高まり、3月には $-6\sim-11^{\circ}\text{C}$ 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 $-13\sim-18^{\circ}\text{C}$ 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°C で、その後

次第に低下し、1~2月上旬には $-11\sim-14^{\circ}\text{C}$ となった。そして、2月中旬以降は次第に高まり、3月には $-8\sim-12^{\circ}\text{C}$ 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 $-13\sim-16^{\circ}\text{C}$ となった。なお、1998年10月12日の耐凍性測定時においては、細胞外凍結を誘発するために -3.3°C で植水し、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。



第40図 曇天日と晴天日におけるハウス内気温の日変化
注：□，晴天日(1999/1/22~24)；■，曇天日(1999/1/8~10)。



第41図 ハウレンソウ (T_{EL15} , A ; T_{EL50} , B)とコマツナ (T_{EL15} , C ; T_{EL50} , D)の耐凍性の季節変化
注：△, ▲；1996/97年：○, ●；1997/98年：□, ■；1998/99年。

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} との間の関係を解析し、2次回帰式により求めた決定係数 (R^2) を第5表に示す。ハウレンソウ、コマツナともに最低気温と T_{EL15} と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} と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

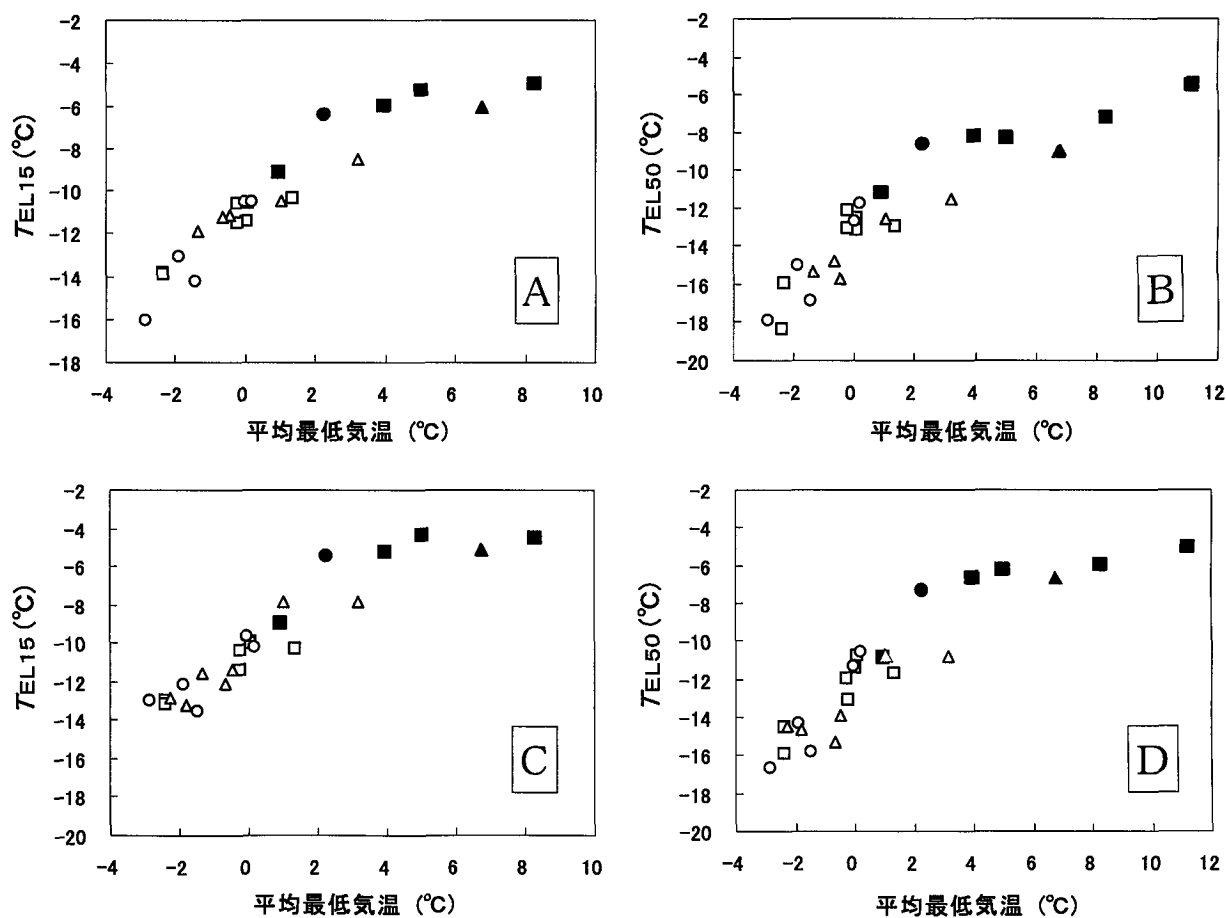
高い相関関係が認められた。

第42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℃程度に低下するにつれて、緩やかに低下し、

第5表 ハウス内の最高、最低および平均気温とハウレンソウとコマツナの T_{EL15} との間の2次回帰式から求めた決定係数 (R^2)

気 温	ハウレンソウ			コマツナ		
	3日 ^Z	7日	10日	3日	7日	10日
平均最高気温	0.367	0.516	0.618	0.261	0.371	0.469
平均最低気温	0.852	0.904	0.907	0.862	0.899	0.897
平均 気 温	0.826	0.866	0.897	0.781	0.815	0.853

Z : T_{EL15} と測定前の日数



第42図 耐凍性測定前7日間の平均最低気温とハウレンソウ (T_{EL15} , A ; T_{EL50} , B) とコマツナ (T_{EL15} , C ; T_{EL50} , D) の耐凍性との関係

注：白抜き印 (Δ , \circ , \square) は耐凍性測定前7日間において0℃以下の気温に遭遇したこと、黒塗りの印 (\blacktriangle , \bullet , \blacksquare) は0℃以下の気温に遭遇しなかったことを表す。

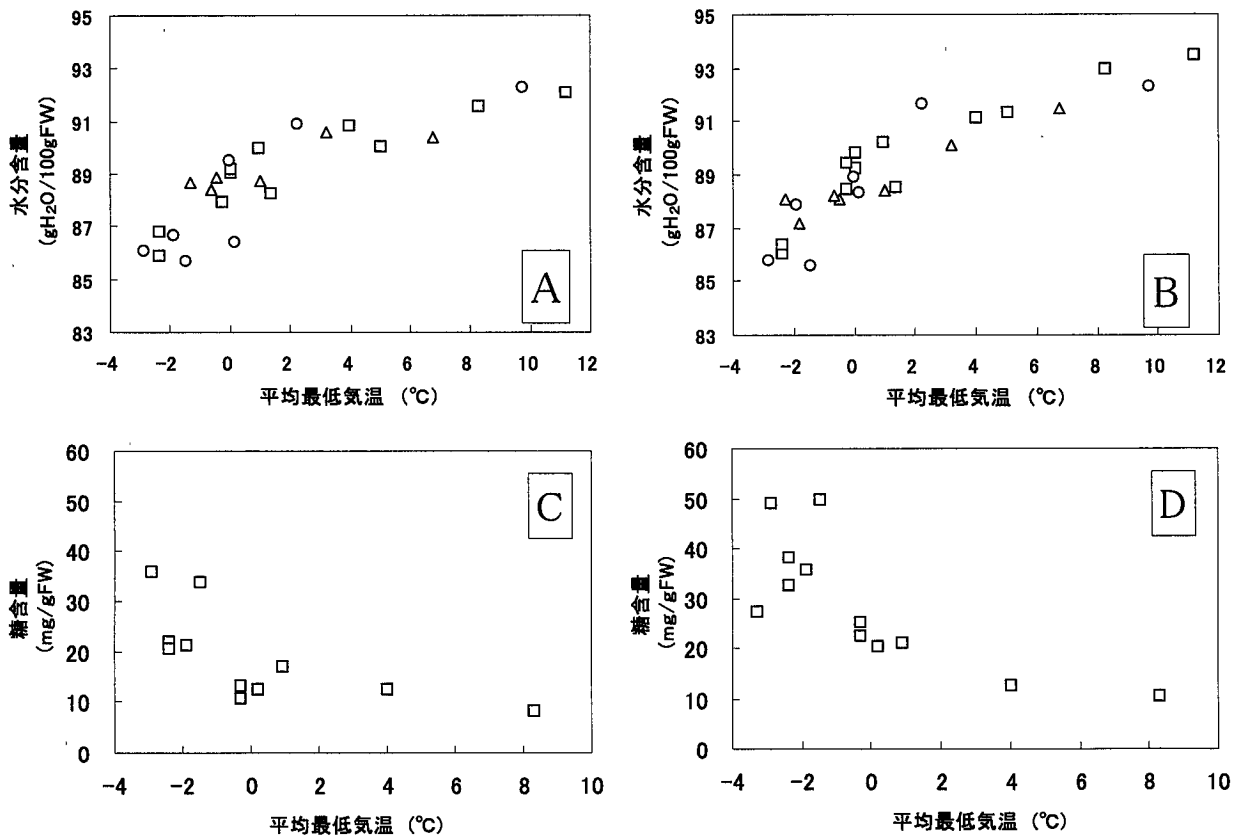
2℃以下になると急激に低下した。コマツナの T_{EL15} は平均最低気温が8℃から2℃程度に低下するにつれて、-4℃から-6℃程度まで緩やかに低下し、平均最低気温が2℃以下になると、急激に低下した。 T_{EL50} も T_{EL15} と同様に最低気温が10℃から2℃程度に低下するにつれて、緩やかに低下し、2℃以下になると急激に低下した。なお、平均最低気温が2℃付近における耐凍性測定前7日間の日最低気温は-3.8~7.8℃の範囲にあったが、ハウレンソウ、コマツナともに0℃以下の最低気温に遭遇すると耐凍性が急激に増大する傾向がみられた。

第43図A, B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℃から2℃程度に低下するにつれて、約92g H₂O/100gFWから91g H₂O/100gFWに緩やかに減少したが、2℃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℃から2℃程度に低下するにつれて、約93gH₂O/100gFWから91gH₂O/100gFWに緩やかに減少したが、2℃以下になると急激に減少した。

第43図C, D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

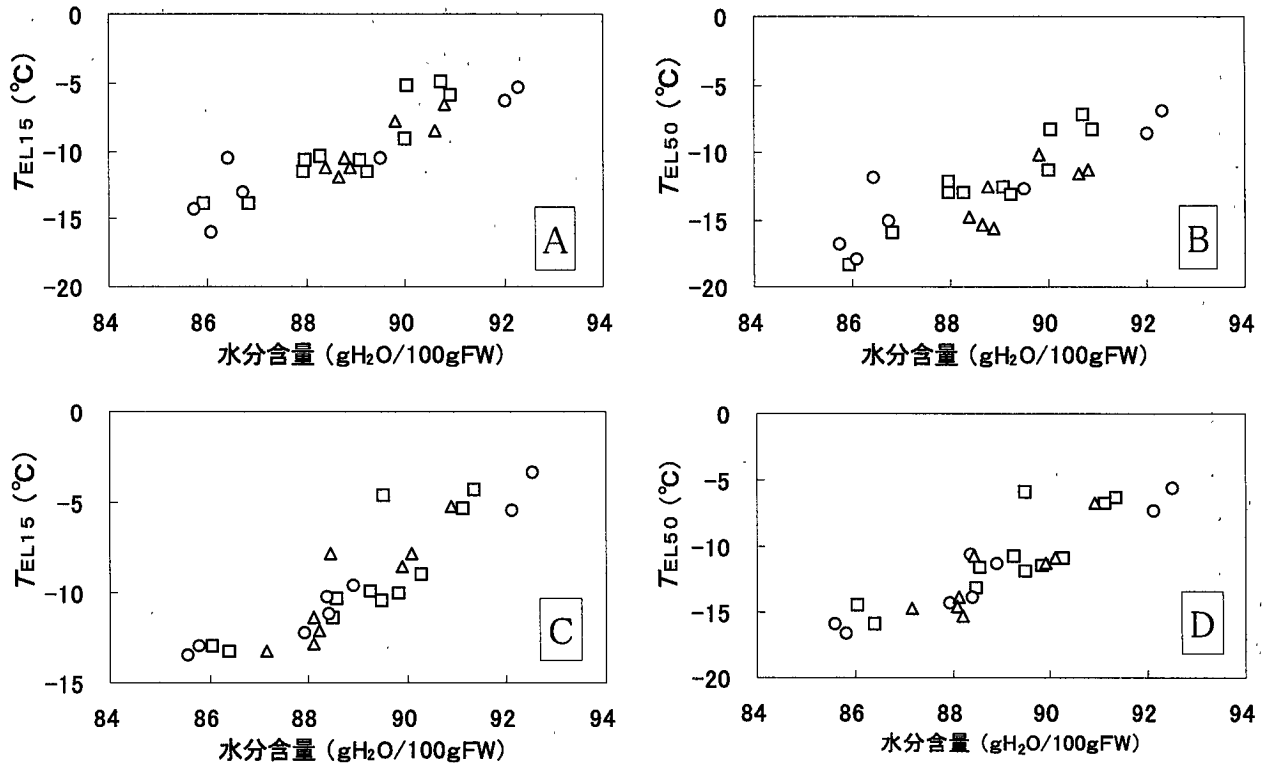
す。両作物ともに平均最低気温が8~4℃程度に低下するにつれて、糖含量は10mg/gFWから12mg/gFWに緩やかに増加した。しかし、平均最低気温が0℃を下回ると糖含量は急激に高まった。

第44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} 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45図にハ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。ハウレンソウでは糖含量が10mg/gFWから20mg/gFW程度に高まるのに伴って T_{EL15} 、 T_{EL50} が低下した。しかし、糖含量が20mg/gFW以上に高まっても T_{EL15} 、 T_{EL50} は変化しなかった、コマツナでは糖含量が10mg/gFWから35mg/gFW程度に高まるのに伴って T_{EL15} 、 T_{EL50} が低下した。しかし、糖含量が35mg/gFW以上に高まっても T_{EL15} 、 T_{EL50} は変化しなかった。第46図にハ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91g H₂O/100gFWから86gH₂O/100gFWに減少するに伴って糖含量が増加した。しかし、水分含量が86g H₂O/100gFW付近では水分含量の減少を伴わずに糖含量が増加した。

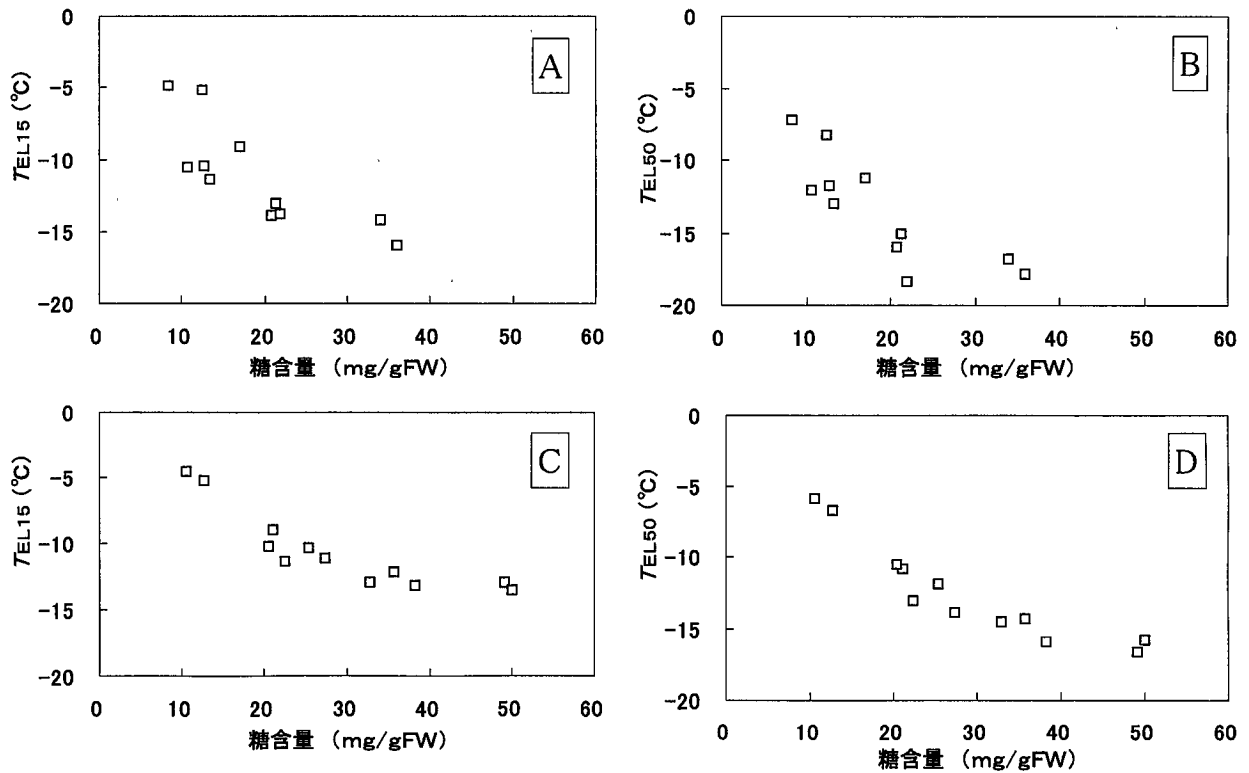


第43図 耐凍性測定前7日間の平均最低気温と水分含量 (A, ハウレンソウ; B, コマツナ)、糖含量 (C, ハウレンソウ; D, コマツナ) との関係

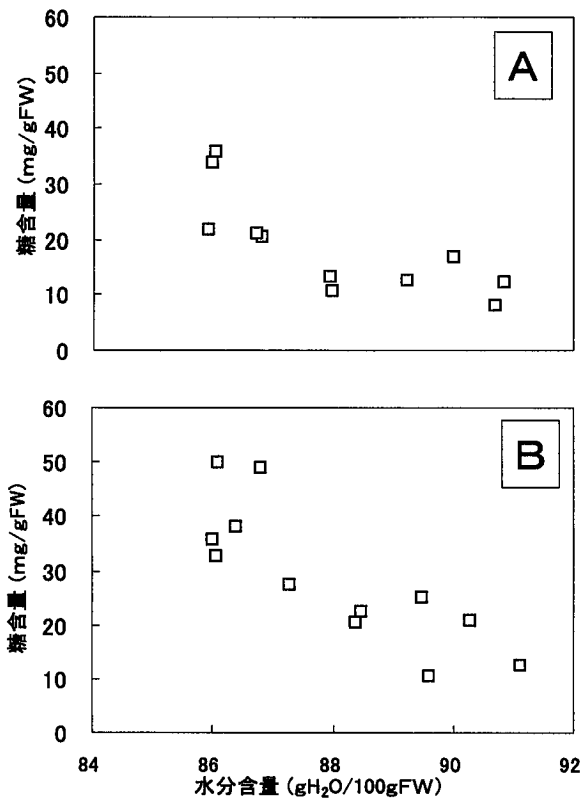
注: △, 1996/97; ○, 1997/98; □, 1998/99。



第44図 ホウレンソウ (A, T_{EL15}; B, T_{EL50})とコマツナ (C, T_{EL15}; D, T_{EL50})の水分量と耐凍性との関係
 注: △, 1996/97; ○, 1997/98; □, 1998/99。



第45図 耐凍性測定前7日間の平均最低気温と水分含量 (A, ホウレンソウ; B, コマツナ)、糖含量 (C, ホウレンソウ; D, コマツナ)との関係
 注: △, 1996/97; ○, 1997/98; □, 1998/99。



第46図 ホウレンソウ (A) とコマツナ (B) の水分量と糖含量との関係

3) 考察

コムギ¹⁾ や牧草⁴⁾ の耐凍性 (LT_{50} , 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²⁾ 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、ホ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、厳寒期にホウレンソウでは T_{EL15} , T_{EL50} 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 $-11 \sim -14^{\circ}\text{C}$ 、 $-13 \sim -16^{\circ}\text{C}$ 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41図)。

Fuller・Eagles¹⁷⁾ 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。ホ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5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40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⁷⁾。また、夜間には葉

温は気温とほぼ同程度に推移する⁶⁾。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⁶²⁾ 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。本研究においても、ホウレンソウとコマツナの耐凍性は3時間の脱馴化処理で減少傾向になった(1章5節)。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 を超えることがある(第40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5表)。このことから、冬期において、ホ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40図)が関係していると考えられる。

アルファルファ⁸⁾ やオーチャードグラス、ペレニアルライグラス、チモシー⁴⁾ 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。ホウレンソウとコマツナにおいては、平均最低気温が約 11°C (1998年10月12日)では T_{EL15} 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_{EL15} が約 -4°C に低下した(第42図)。このことから、ホ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⁸⁾ やコムギ¹⁾ においては平均最低気温が $10 \sim -5^{\circ}\text{C}$ まで、キャベツ²⁾ 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、ホ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℃以下になると急激に増大した(第42図)。Kacperska²⁰⁾ 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℃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℃の範囲内にあったが、0℃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42図)。このことから、平均最低気温が2℃付近まで低下し、かつ0℃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42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43図A, B)とよく一致した。また、両作物ともに水分含量と T_{EL15} 、 T_{EL50} の間には正の相関関係が認められた(第44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。ハウレンソウ、コマツナの糖含量は、平均最低気温が8℃から4℃程度に低下するにつれて10mg/gFWから12mg/gFWに緩やかに増加し、平均最低気温が0℃以下になると急激に増加した(第43図C, D)。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42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20mg/gFW、コマツナでは35mg/gFW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45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46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℃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月上旬以降で(第39図)、 T_{EL15} はハウレンソウ、コマツナともに12月下旬には-10℃以下になった(第41図)。したがって、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。したがって、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~-2℃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。

4) 要約

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ヵ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~-16℃、-13~-18℃、コマツナではそれぞれ-11~-14℃、-13~-16℃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℃から2℃にかけては緩やかに、平均最低気温が2℃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10~20mg/gFW、コマツナでは約10~35mg/gFW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。

Ⅲ ホウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量

はじめに

日本海側における冬期間の気象の大きな特徴は、低温に加え、降雪、曇天日が続き日射量が著しく低下することにある。このような環境下では、単位面積当たりの生産量は、関東や西南地域に比べ不利である。また、冬期に葉菜類栽培を実施する場合、農家は厳しい寒さの中での収穫作業や除雪作業が伴う。したがって、農家の冬期葉菜類栽培に取り組む気持ちを喚起するためには、凍結傷害を回避して葉菜類栽培が可能であることを示すのみでは必ずしも十分ではなく、さらに、冬期の低温条件が葉菜類の品質を高めるための利点であることを示す必要がある。

もし、この地域の低温条件を活かして、糖とビタミンC含量の高い、高付加価値の葉菜類を生産することができれば農家収入の増加が期待できる。そこで、コマツナの糖とビタミンC含量に及ぼす冬期寡日射下での低温の影響を調査した。また、両作物の糖とビタミンC含量を高めるためのハウス内気温管理に関する知見を得ることを目的に、栽培期間中の気温とホウレンソウとコマツナの糖、ビタミンC含量との関係を解析した。

1 低温処理がコマツナの糖とビタミンC含量に及ぼす影響

本節は筆者の園芸学会雑誌への発表論文⁷⁵⁾を基に、編集・加筆したものである。

1) 目的

日本海側の秋田市、北上盆地の盛岡市および三陸海岸の宮古市は共に北緯40°に位置しているが、冬期の日射量は大きく異なる。日本気候表(気象庁)によると、最寒月の1月の日射量は秋田市が4.7MJ/m²/day、盛岡市が7.1MJ/m²/day、宮古市が8.1MJ/m²/dayであり、また、東京は8.5MJ/m²/日である。このことから、北東北日本海側における冬期間の気象の大きな特徴は、低温に加え、降雪、曇天日が続き日射量が著しく低下することにある。このような環境下では、葉菜類の量的な生産は温暖で日射量の豊富な地域よりも劣ることは否めない。しかし、この地域の低温条件を活かして、高品質で付加価値の高い葉菜類を生産することにより、農家収入の増加が期待できる。

気温および日射条件は明確ではないが、Shinoharaら⁶⁵⁾は11月の曇天日にレタスを収穫した場合には、

糖とビタミンC含量が、晴天日の収穫物よりも低下することを示している。また、亀野ら⁸⁰⁾は5月にホウレンソウを40%遮光をすると、糖含量が無遮光区の20~60%に低下することを報告している。一方、加藤ら^{31)、32)}は冬期の日射量が豊富な太平洋側において、ホウレンソウ栽培のハウス内に、平均気温で2~3℃の冬の冷たい外気を導入すると、糖および各種ビタミン類の含量が、密閉ハウスよりも高まることを見出した。また、渡邊ら⁹⁰⁾は夏秋期の日射量の豊富な条件下で、夏期栽培(8月播種, 9~10月収穫)より秋期栽培(10月播種, 11月~12月収穫)でホウレンソウの糖とビタミンC含量は高まることを報告している。

以上の報告は、ホウレンソウなどの葉菜類において、一般に生育適温とされる15~20℃よりも、より低温条件で生育させた方が糖やビタミンC含量が高まること、逆に、寡日射条件はこれら成分を低下させることを示唆している。上述のように、加藤ら^{31)、32)}は太平洋側の豊富な日射下での低温条件で、糖とビタミンC含量は増加することを示したが、寡日射下においても低温条件がこれら成分の含量を高めるかどうかは明らかではない。そこで、糖とビタミンC含量に及ぼす冬期の寡日射下での低温の影響を調査した。

2) 方法

(1) 試験方法

試験は農試内(秋田市)のパイプハウスで実施した。ハウス内の地表面に、縦40cm、横60cm、深さ30cmのコンテナを6個設置した。コンテナには1m²当たりの基肥として窒素、リン酸、カリを各10g、また、ようりん、苦土石灰およびイナワラ堆肥を各60、100および2000g施用した土壌を充填した。これらのコンテナに、1996年11月1日にコマツナ品種‘せいせん7号’を条間20cmで播種し、本葉2枚時に間引きして株間を5cmとした。

当地域は11月以降は日射量が少ないため、ハウスを密閉してもハウス内の日中の気温が上がらない。そこで、播種後、ハウス内気温を15℃程度に保つように加温した。1個体の生体重が約13g、草丈が約20cmになった12月25日に、4個のコンテナを無加温パイプハウス内に移動して低温処理区とした。この際、地温が極端に低下するのを避けるため、コンテナはパイプハウスの土壌中に埋め込んだ。糖とビタミンC含量に及ぼす

低温処理後の高温の影響を明らかにするため、低温処理を47日間実施した後、再び4個のコンテナを加温ハウスに移して低温/加温処理区とし、4日間実施した。また、対照として低温処理を実施せずに、加温ハウスに残した2個のコンテナを加温処理区とした。

なお、実験期間中の気温は地表面からの高さ20cm、地温は深さ5cmの地点を測定した。また、日射量はハウス中央部の地表面からの高さ20cmの地点をL810型(ユニバルス社)を用いて測定した。

(2) 生育調査および試料の採取

地上部生体重および草丈は10個体の平均値で示した。試料の採取はI章6節2. 3) (1)と同様の方法で行った。

(3) 分析方法

i 糖：糖含量の測定はI章6節2. 2) (3)と同様の方法で行った。

ii ビタミンC：凍結試料3gに5%メタリン酸を5ml加え、乳鉢で磨砕、抽出し、葉身は100ml、葉柄は50mlに定容した後、ろ過して検液とした。測定はヒドラジン比色法により行なった。比色計は糖含量測定時と同機種を用いた。

3) 結果

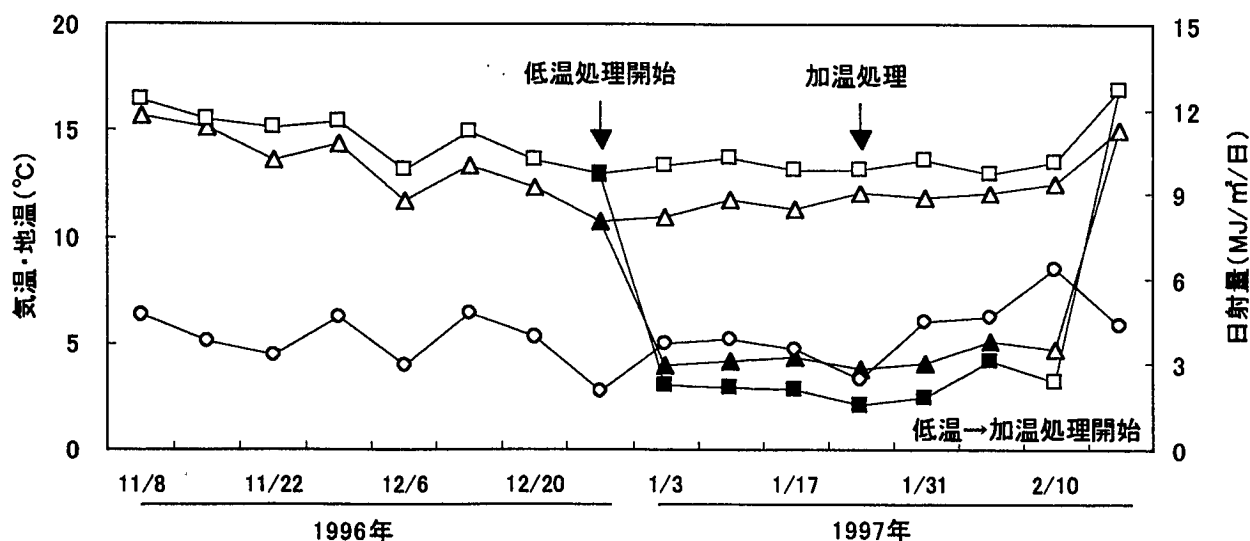
第47図に処理期間内の日平均気温、日平均地温および日射量を示した。日平均気温は加温処理区、低温/加温処理区で13~15℃、低温処理区では2~3℃で経過した。日平均地温は加温処理区、低温/加温処理区で11~15℃、低温処理区では4~5℃で経過した。また、この間の日射量は2~4 MJ/m²/日であった。

なお、図中には示さなかったものの、加温処理区、低温/加温処理区の日最高気温は16~20℃、日最低気温は11~16℃、低温処理区の日最高気温は5~13℃、日最低気温は-1~-3℃で経過した。

前述の渡邊ら⁹⁰⁾の実験期間内の日射量は、夏期栽培で12MJ/m²/day、秋期栽培で8 MJ/m²/day、また、加藤ら⁹²⁾の外気低温処理の実験では4~8 MJ/m²/dayと示されている。このことから、本実験は両者に比べ、寡日射条件下で行なわれたといえる。

草丈の推移を第48図Aに、生体重の推移を第48図Bに示した。低温処理区の草丈の伸長、生体重の増加は加温処理区に比べ、著しく抑制された。加温処理区では、12月25日から2月10日までの47日間に草丈が16cm伸長し、生体重の増加量は71g/個体であったが、低温処理区では同期間内の草丈の伸長は5.5cm、生体重の増加量は34g/個体であった。低温処理後に加温を実施すると(低温/加温処理区)、草丈、生体重が急激に増加した。

第49図A、Bに低温処理区と加温処理区、低温/加温処理区の糖含量の変化を示した。低温処理区の糖含量は、葉身、葉柄ともに急激に高まり、葉身では処理前の0.5g/100gFWから処理47日目には4.9g/100gFWに、葉柄では処理前の1.1g/100gFWから処理47日目には4.5g/100gFWとなった。一方、加温処理区の糖含量は葉身、葉柄ともに大きな変化はなかった。また、低温/加温処理区では、葉身、葉柄ともに糖含量が急激に低下した。



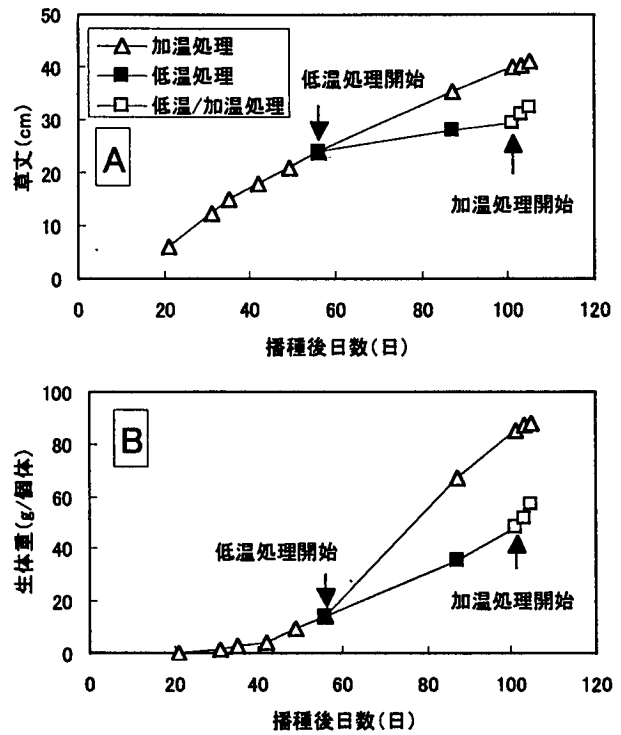
第47図 実験期間内の平均気温、地温および日射量

注：加温処理 (□, 平均気温; △, 地温)、低温処理区 (■, 平均気温; ▲, 地温)、○, 日射量

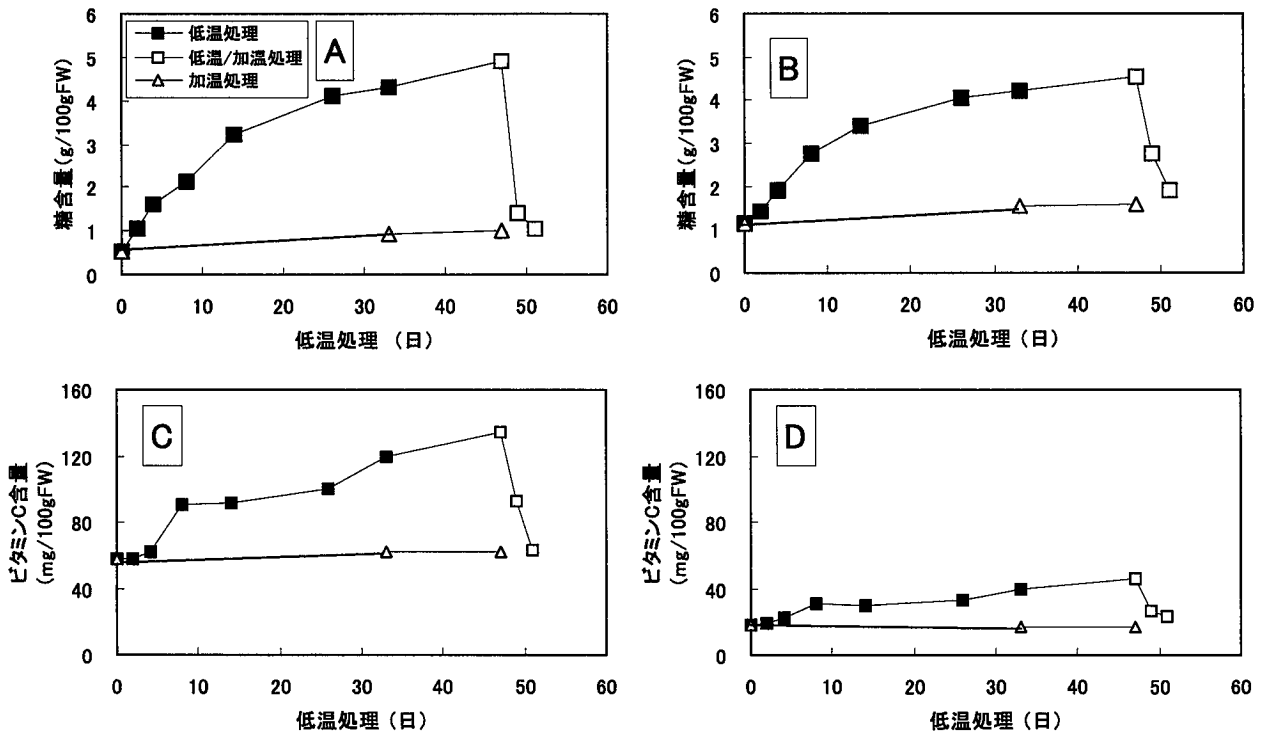
第49図C, Dに低温処理区と加温処理区、低温/加温処理区のビタミンC含量の変化を示した。低温処理区のビタミンC含量は、葉身では急激に高まり、処理47日目には処理前の57mg/100gFWから135mg/100gFWとなり、葉柄では徐々に高まり、処理前の19mg/100gFWから46mg/100gFWとなった。一方、加温処理区のビタミンC含量は、葉身、葉柄ともに大きな変化がなかった。また、低温/加温処理区では、葉身、葉柄ともにビタミンC含量が急激に低下した。

低温処理開始0、33、47日後の1㎡当たりの地上部生体重、地上部生体重に対する葉身重の割合、糖とビタミンC含量を第6表に示した。地上部生体重に対する葉身重の割合は、低温処理区で著しく高まったが、加温処理区では大きな変化はなかった。すなわち、低温処理区では葉身重の比率は処理前の51%から処理47日目には61%に増加したが、加温処理区では50%であった。

1㎡当たりの糖含量は生体重の増加に伴って両処理区ともに高まったが、その増加量は低温処理区の方が大きく、47日間で加温処理区の約2倍となった。ビタミンC含量も糖と同様に増加量は低温処理区の方が大きく、47日間で加温処理区の約1.5倍となった(第6表)。



第48図 加温処理、低温処理および低温/加温処理区の草丈 (A) および生体重 (B) の推移



第49図 加温継続、低温処理および低温/加温処理区の糖含量 (A, ホウレンソウ; B, コマツナ) およびビタミンC含量 (C, ホウレンソウ; D, コマツナ) の推移

第6表 単位面積当たりの地上部生体重、糖およびビタミンC含量の生産量

処 理	処理期間 日	地上部生体重 kg/m ²	葉身率 %	糖含量 g/m ²	ビタミンC含量 g/m ²
低温処理	0	1.4±0.1	51	12±0	0.3±0.0
	33	3.6±0.3	58	153±3	3.1±0.1
	47	4.8±0.2	61	299±1	4.8±0.2
加温処理	0	1.4±0.1	51	12±0	0.3±0.0
	33	6.7±0.3	50	82±2	2.7±0.1
	47	8.5±0.6	50	111±3	3.3±0.1

4) 考 察

本実験では低温処理区で生体重の増加が抑制された半面、葉身、葉柄の糖含量は大きく高まり、日射量の豊富な太平洋側の冬期低温処理の値³²⁾ とほぼ同程度の約5g/100gFWとなった。なお、加温処理区では糖含量には大きな変化はみられなかった(第48図, 第49図A, B)。低温処理区での糖含量の増加は、生長と呼吸が抑制されたことにより、光合成生産物の消費が減少し、体内に糖が徐々に蓄積したことに起因すると考えられる。

ビタミンC含量は低温処理区の葉身で急激に高まり、日射量の豊富な太平洋側での実験結果^{30), 32)} とほぼ同程度の135mg/100gFWとなった。また、加温処理区では葉身、葉柄ともにビタミンC含量に大きな変化はみられなかった(第49図C, D)。

篠原⁶⁾ は、糖含量とビタミンC含量に正の相関関係がみられることを報告している。本実験においても、低温処理区、加温処理区ともに、葉身および葉柄の糖含量とビタミンC含量は同じ傾向で推移し、それらの決定係数は、葉身で $R^2=0.8531$ 、葉柄で $R^2=0.9111$ と高かった。

本実験において、コマツナの糖とビタミンC含量は、低温処理により高まったが、その後に加温処理を実施すると、急激に低下した。このことから、実際のハウス栽培において、低温条件を活かして糖とビタミンC含量の高いコマツナを育成しても、その後にハウス内の気温が高まると、両成分含量が低下することが示された。このことから、糖とビタミンC含量の高いコマツナを育成し、出荷するためには、コマツナの栽培時の温度を継続して低く保つことが必要であると考えられる。

さて、本実験においては、単位面積当たりの糖とビタミンC含量は低温処理区が加温処理区を大きく上回っ

た(第6表)。これは、低温処理区で生育は抑制されたものの、新鮮重当たりの上記成分含量が著しく増加した結果と考えられる。

以上のことから、従来は北東北日本海側の冬期の気象条件は、野菜生産に不利とされてきたが、この地域の寡日射下においても、冬期の自然の低温条件がコマツナの新鮮重当たりの糖およびビタミンC含量と単位面積当たりの上記成分の含量を高めるのに有効なことが明らかとなった。このことから、この地域においても冬期に高品質の葉菜類の生産が可能と考えられる。

5) 要 約

寡日射条件下におけるコマツナの糖およびビタミンC含量に及ぼす低温処理の影響を調査した。

本実験期間内の日平均気温は低温処理区で2~3℃、加温処理区で13~15℃、日射量は2~4 MJ/m²/dayで経過した。

新鮮重当たりの糖含量は、低温処理によって葉身、葉柄とも経時的に高まった。また、葉身のビタミンC含量は、低温処理区で急激に、葉柄では徐々に高まった。一方、加温処理区では新鮮重当たりの糖とビタミンC含量は葉身、葉柄ともに変化がなかった。

単位面積当たりの糖とビタミンC含量は低温処理区が加温処理区を大きく上回った。

以上のことから、北東北日本海側の寡日射下において、冬期の低温条件により、コマツナの新鮮重当たりの糖およびビタミンC含量、また、単位面積当たりの上記成分含量も向上することが明らかになった。

ただし、低温処理後に加温処理を実施すると、糖とビタミンC含量が急激に低下したことから、糖とビタミンC含量の高いコマツナを育成し、出荷するためには、コマツナの栽培時の温度を継続して低く保つことが必要であると考えられる。

2 ハウス内気温がホウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量に及ぼす影響

本節は筆者の園芸学研究への発表論文⁷⁹⁾を基に、編集・加筆したものである。

1) 目的

ホウレンソウやコマツナの糖およびビタミンC含量には気温や土壌養分⁸¹⁾、光条件⁸²⁾、水ストレス⁸³⁾など様々な環境要因が影響を及ぼす。一般に両作物の上記成分含量は冬期に高く、夏期に低いことが知られている。例えば、宮崎⁴³⁾は市販ホウレンソウにおいて、冬期のものが夏秋期のものよりもビタミンC含量が多いことを、また、渡邊ら⁸⁰⁾は夏期よりも秋冬期に栽培したホウレンソウのビタミンCおよび還元糖含量の方が高いと報告している。これらのことは、栽培期間中の気温が上記成分含量に多大の影響を及ぼすことを示している。しかし、これまでに栽培期間中の気温と上記成分含量との間の定量的な解析に関する報告はない。そこで、両作物の栽培期間中の気温と上記成分含量との関係を検討し、両者間の定量的な解析を試みた。

2) 方法

(1) 供試材料の育成

試験は1997/98、1998/99、1999/2000年の3カ年にわたり、農試内(秋田市)の100㎡のパイプハウスで実施した。各年の播種期と収穫期を第1表に示す。耕種概要はI章6節2. 1)と同様の方法で行った。

(2) 試料の採取

試料の採取はI章6節2. 3) (1)と同様の方法で行った。

(3) 分析方法

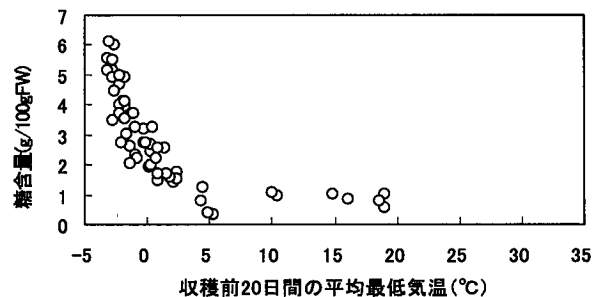
糖含量はI章6節2. 2) (3)、ビタミンC含量はII章1節2. 3) (2)と同様の方法で測定した。

3) 結果

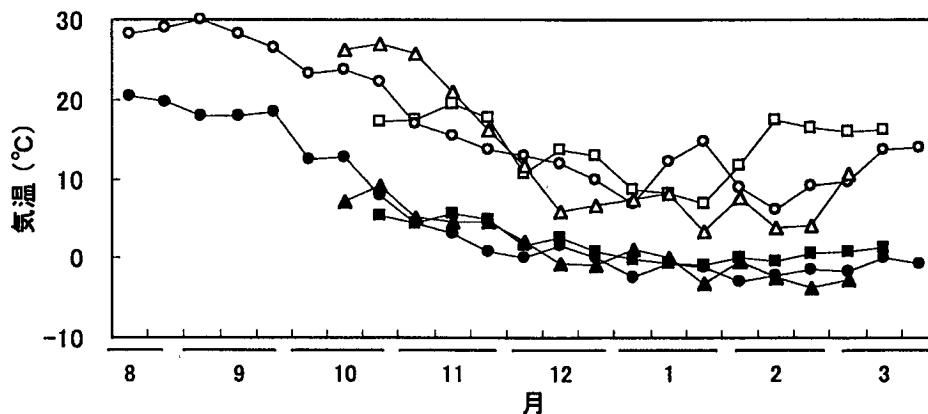
ハウス内気温は10月から12月中旬にかけて次第に低下し、厳寒期(12月下旬～2月上旬)には最高、最低および平均気温(平均気温はデータ略)はそれぞれ3～15℃、-3～1℃、-1～5℃となった(第50図)。年次変動は最高気温が2～14℃で最も大きく、次いで平均気温が1～7℃、最低気温は最も小さく1～4℃であった。

第51図に収穫前20日間の最低気温とコマツナ葉身の糖含量との関係を示す。コマツナ葉身の新鮮重当たりの糖含量は最低気温が5～20℃の範囲では約1g/100gFWであったが、5℃以下では急激に高まる傾向がみられた。この傾向はコマツナ葉身のビタミンC含量、ホウレンソウ葉身の糖およびビタミンC含量にも同様にみられた。

そこで、ハウス内気温とホウレンソウ、コマツナの糖およびビタミンC含量との関係を把握するため、両作物の糖およびビタミンC含量が急激に高まる気温の範囲、すなわち最高気温が20℃以下、最低気温が5℃以下、平均気温が10℃以下の範囲の収穫前日から20日前にかけての最高、最低および平均気温と両成分含量との関係を1次回帰式で解析した。



第51図 収穫前20日間のハウス内気温とコマツナ葉身の糖含量との関係



第50図 1997年、1998年および1999年度のハウス内の旬別最高気温と最低気温

注：1997/98年(□, 最高；■最低)、1998/99年(○, 最高；●最低)、1999/2000年(△, 最高；▲最低)。

最高、最低および平均気温とハウレンソウ葉身の糖含量との関係から得られた1次回帰式の決定係数は、平均気温で最も高い数値が得られ、最低気温が次いで高かった(第7表)。コマツナ葉身の糖含量は最低気温で最も高い数値が得られ、平均気温が次いで高かった。また、最低および平均気温における決定係数は両作物ともに収穫前日から10日まで徐々に高まり、10日以降は同程度であった。このことから、収穫前10日間の最低および平均気温から両作物葉身の糖含量を推定できると考えられた。なお、両作物の葉柄の糖含量も葉身と同様の傾向がみられた。

最高、最低および平均気温とハウレンソウ葉身のビタミンC含量との関係から得られた1次回帰式の決定係数は、最低気温で最も高い数値が得られた(第8表)。また、最低気温における決定係数は両作物ともに収穫前日から10日まで徐々に高まり、10日以降は同程度であった。このことから、収穫前10日間の最低気温から

両作物葉身のビタミンC含量を推定できると考えられた。なお、両作物の葉柄のビタミンC含量も葉身と同様の傾向がみられた。

両作物葉身の糖含量は、収穫前10日間の平均最低気温が5~20℃の範囲、平均気温が10~25℃の範囲では1g/100gFW以下で一定であったが、これに対して平均最低気温が5℃以下、平均気温が10℃以下の範囲では直線的に高まった(第52図)。すなわち、平均最低気温が5℃、平均気温が10℃で両作物の糖含量は約1g/100gFWであったが、平均最低気温が-5℃、平均気温が0℃に低下すると両作物の糖含量は約5g/100gFWに高まった。一方、平均最高気温と両作物の糖含量との間には平均最低気温、平均気温のような明瞭な関係はみられなかった。なお、両作物の葉柄の糖含量も葉身と同様の傾向がみられた。

両作物葉身のビタミンC含量は、収穫前10日間の平均最低気温が5~20℃の範囲、平均気温が10~25℃

第7表 収穫前日から20日間の最高、最低および平均気温とハウレンソウ、コマツナ葉身の糖含量との関係から得られた1次回帰式の決定係数

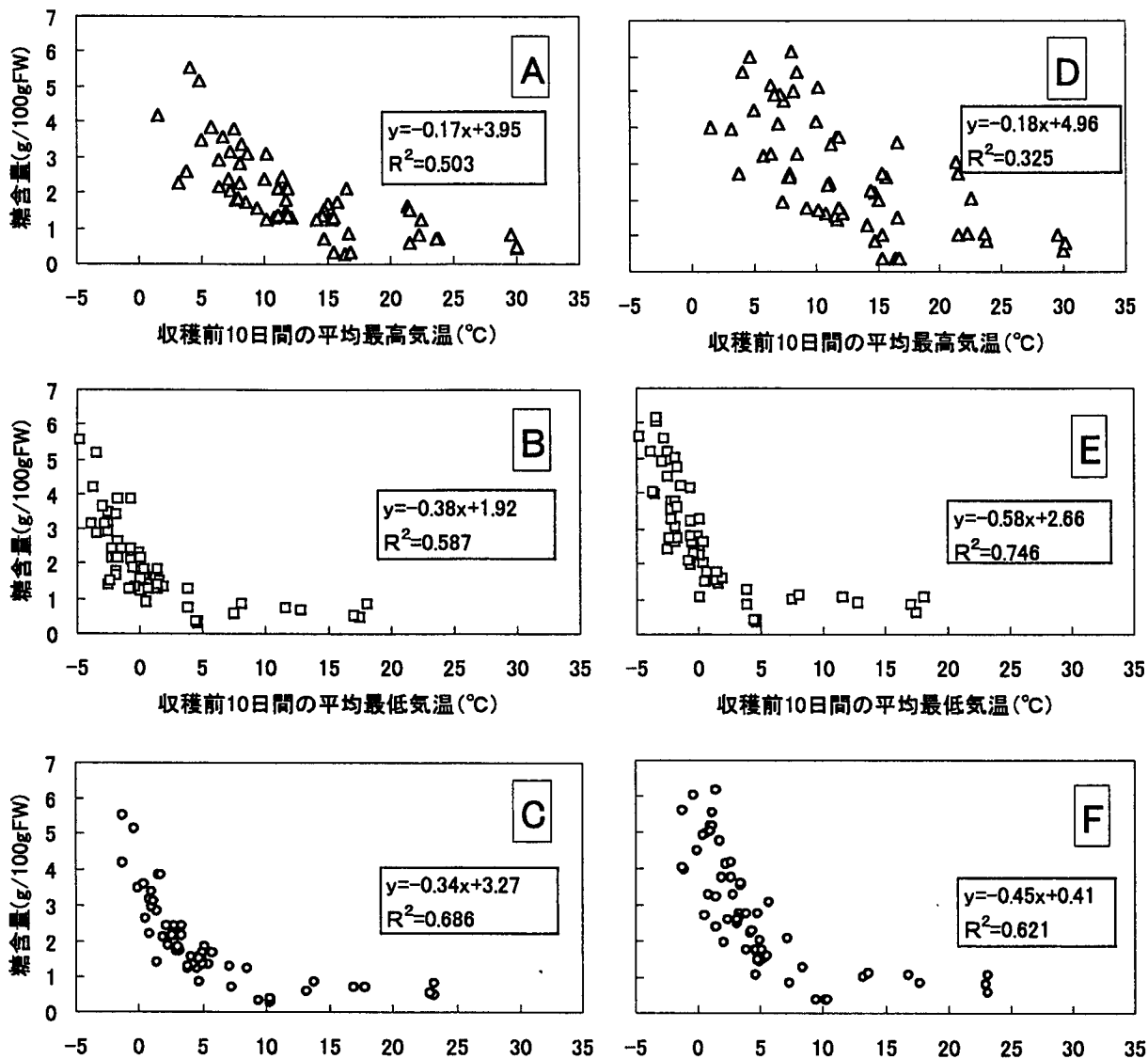
収穫前 日数	ハウレンソウ			コマツナ		
	最高気温	最低気温	平均気温	最高気温	最低気温	平均気温
1	0.178	0.314	0.368	0.080	0.444	0.277
3	0.300	0.452	0.483	0.135	0.598	0.420
7	0.469	0.576	0.635	0.282	0.694	0.575
10	0.503	0.587	0.686	0.325	0.746	0.671
15	0.565	0.603	0.701	0.445	0.736	0.726
20	0.522	0.628	0.633	0.540	0.738	0.739

第8表 収穫前日から20日間の最高、最低および平均気温とハウレンソウ、コマツナ葉身のビタミンC含量との関係から得られた1次回帰式の決定係数

収穫前 日数	ハウレンソウ			コマツナ		
	最高気温	最低気温	平均気温	最高気温	最低気温	平均気温
1	0.017	0.461	0.207	0.064	0.455	0.240
3	0.055	0.689	0.386	0.097	0.654	0.388
7	0.148	0.770	0.555	0.197	0.667	0.527
10	0.193	0.817	0.661	0.252	0.714	0.621
15	0.295	0.820	0.749	0.352	0.703	0.682
20	0.410	0.830	0.795	0.471	0.697	0.718

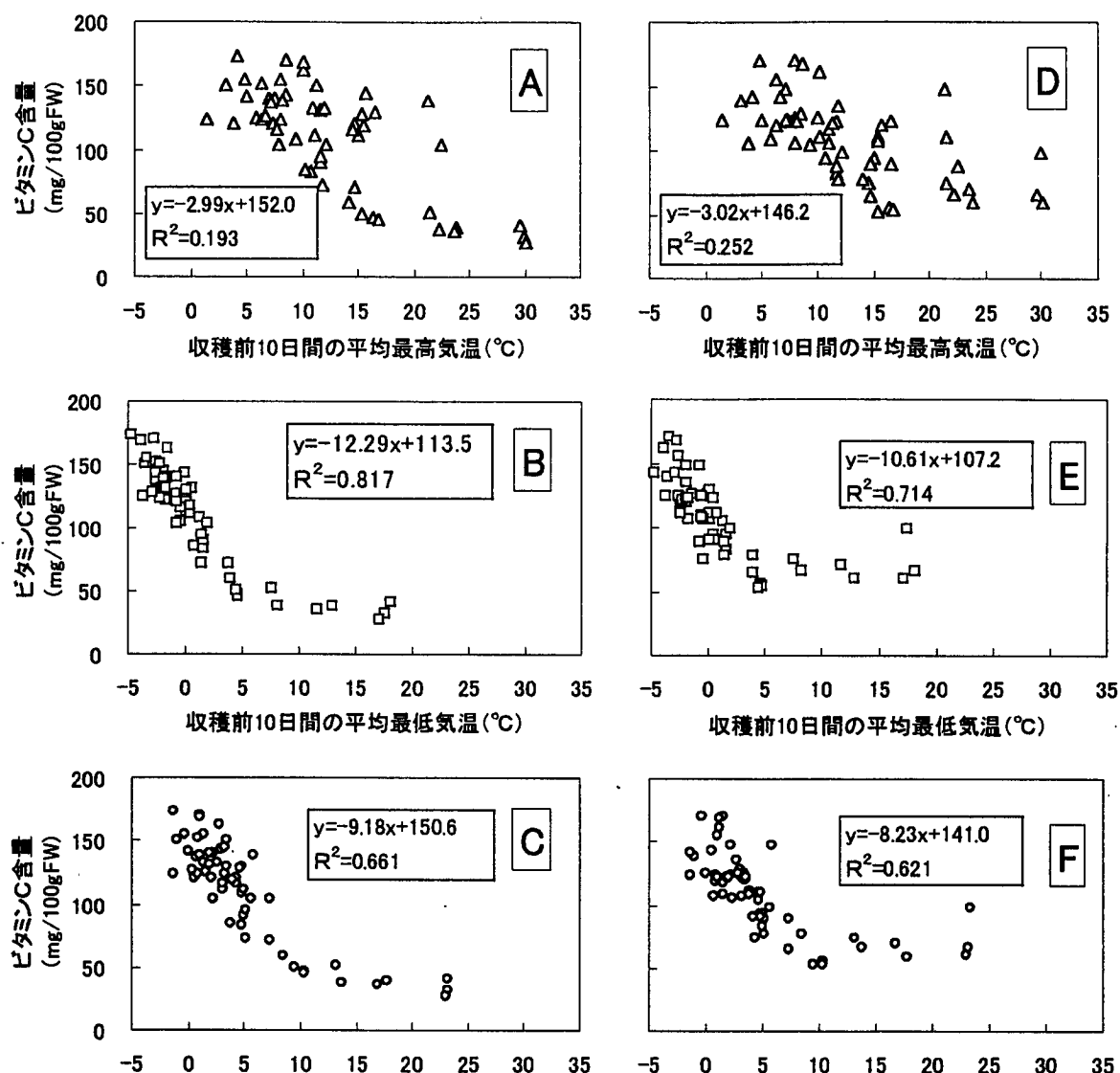
の範囲ではともに、ハウレンソウで約50mg/100gFW、コマツナで約75mg/100gFWで一定であったが、これに対して平均最低気温が5℃以下、平均気温が10℃以下の範囲では両作物のビタミンC含量は直線的に高まった(第53図)。すなわち、平均最低気温が5℃、平均気温が10℃で両作物のビタミンC含量は約50~70mg/100gFWであったが、平均最低気温が-5℃、平均気

温が0℃に低下すると両作物のビタミンC含量は約175mg/100gFWに高まった。一方、平均最高気温と両作物のビタミンC含量との間には平均最低気温、平均気温のような明瞭な関係はみられなかった。なお、両作物の葉柄のビタミンC含量は葉身よりも含量が少ないものの、気温との関係に関しては同様の傾向がみられた。



第52図 収穫前10日間のハウス内気温とハウレンソウおよびコマツナ葉身の糖含量との関係

注：ハウレンソウ (A, 平均最高気温；B, 平均最低気温；C, 平均気温)。コマツナ (D, 平均最高気温；E, 平均最低気温；F, 平均気温)。



第53図 収穫前10日間のハウス内気温とホウレンソウおよびコマツナ葉身のビタミンC含量との関係
注：ホウレンソウ (A, 平均最高気温；B, 平均最低気温；C, 平均気温)。コマツナ (D, 平均最高気温；E, 平均最低気温；F, 平均気温)。

4) 考察

ホウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量とハウス内気温との関係を明らかにするため、両成分の収穫前日から20日前にかけての最高、最低および平均気温と両成分含量との関係を解析した。その結果、コマツナ葉身の糖含量、両作物葉身のビタミンC含量は最低気温と最も高い相関関係が認められ、ホウレンソウ葉身の糖含量は平均気温、最低気温の順に高い相関関係が認められた。さらに、両成分の収穫前日から20日前にかけての最低気温、平均気温と両成分含量との関係から得られた1次回帰式の決定係数は、収穫前日から10日まで徐々に高まり、10日以降は同程度となった(第7表, 第8表)。このことから、収穫前10日間

の最低ないしは平均気温が両作物の糖およびビタミンC含量に大きく影響すると考えられた。すなわち、収穫前10日間の平均最低気温が5~20°Cの範囲、平均気温が10~25°Cの範囲では両成分は低い含量で一定であったが、これに対して平均最低気温が5°C以下、平均気温が10°C以下の範囲では直線的に高まった(第52図, 第53図)。

北東北日本海側は冬期に降雪、曇天日が多く、寡日射条件となる。したがって、ハウス内気温は18時頃から翌朝9時頃まで、最低気温域の時間帯が長く続くので、平均気温は最高気温よりも最低気温に近似し、また、両作物は最低気温域に長時間さらされる(第40図)。このことが、最低ないしは平均気温と両成分含量との

間の相関関係が高くなった一因と考えられる。

ところで、農家が両作物を栽培しているハウス内の気温を把握する場合、安価でかつ簡単なのは、棒状最高最低温度計をハウス内に設置し、ハウス内の記録ノートに記入する方法である。このことを勘案すると、第52図、第53図に示した収穫前10日間の最低気温と糖およびビタミンC含量の関係から得られた回帰式により両成分含量を推定するのがよいと考えられる。

加藤ら³²⁾は冬期に日射量の豊富な太平洋側において、気温を低く保って栽培することによりハウレンソウの各種ビタミン含量が高まることを報告した。筆者は寡日射条件においても、低温処理によりハウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量が高まることを確認した(II章1節)。このことから、北東北地域の冬期の寒冷気象を活かして、糖とビタミンC含量の高いハウレンソウ、コマツナを生産し、消費者に提供することが可能である。すなわち、寡日射条件となる日本海側においては、収穫前10日間の最低気温を -5°C 程度で管理すると糖とビタミンC含量の高いハウレンソウとコマツナを生産することができる。

5) 要約

冬期寡日射条件下において、ハウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量と栽培期間中の最高、最低および平均気温との間の相関関係を解析した結果、両作物の上記成分含量は収穫前10日間の最低ないしは平均気温の影響を大きく受けることが明らかになった。

両作物ともに収穫前10日間の平均最低気温が $5\sim 20^{\circ}\text{C}$ の範囲では糖含量が $1\text{g}/100\text{gFW}$ 以下、ビタミンC含量が $50\sim 70\text{mg}/100\text{gFW}$ 以下で低いが、これに対して 5°C 以下の範囲では両作物の上記成分含量が直線的に上昇した。例えば、平均最低気温が 5°C から -5°C に低下すると、両作物葉身の糖含量は約 $1\text{g}/100\text{gFW}$ から約 $5\text{g}/100\text{gFW}$ に直線的に上昇した。また、平均最低気温が 5°C から -5°C に低下すると、両作物葉身のビタミンC含量は $50\sim 70\text{mg}/100\text{gFW}$ から約 $175\text{mg}/100\text{gFW}$ に直線的に上昇した。このことから、冬期に寡日射条件となる地域においては収穫前10日間の最低気温を -5°C 程度で管理すると、糖とビタミンC含量の高いハウレンソウとコマツナを生産することができると考えられた。

IV 凍結傷害を回避した糖とビタミンC含量の高いハウレンソウとコマツナの生産技術

これまでに、ハウレンソウとコマツナの耐凍性(I章)、糖とビタミンC含量(II章)について検討した。

本章では、凍結傷害を回避し、かつ、積雪寒冷地域における冬期の低温条件を活かして、糖とビタミンC含量の高いハウレンソウとコマツナを生産するための播種期、品種、栽培方法などを検討した。

さらに、産地において品質をチェックし、品質の高いものを出荷することは、流通業者や消費者との信頼関係を築く上で重要である。この観点から、生産現場において簡易にハウレンソウとコマツナの糖とビタミンC含量をチェックするための方法を検討した。

1 播種期と生育および収穫時期

1) 目的

II章で収穫前10日間のハウス内の最低気温ないしは平均気温がハウレンソウとコマツナの糖とビタミンC含量に大きな影響を及ぼし、収穫前10日間の平均最低気温が 5°C 以下になると両作物の糖とビタミンCが直線的に増加し、 -5°C 程度になると両成分が極めて高くなることを示した。秋田市における気温は、1月上旬から2月中旬にかけて最も低下する。このことから、

当地域において、冬期の低温を活かして糖とビタミンC含量の高いハウレンソウとコマツナを出荷するための適期は、1月上旬から2月中旬と考えられる。

1月上旬から出荷を開始するためには、出荷の10日前には収穫できる草姿(草丈 25cm)に両作物を生育させ、その後、10日間程度、十分に低温に遭遇させる必要がある。このことから、12月下旬までに両作物を収穫できる草姿に育成する必要がある。

本節では、ハウレンソウとコマツナを12月下旬までに収穫可能な草姿まで育成するための播種適期と、播種後から12月下旬までの草丈伸長の目標値を検討する。

2) 方法

試験は1996年～1999年にかけて、農試内(秋田市)の 100 m^2 のパイプハウスで実施した。各年の播種期および収穫期を第9表に示す。耕種概要はI章6節2.

1)と同様の方法で行った。

ハウレンソウとコマツナの出荷規格は草丈が $22\sim 30\text{cm}$ とされているが³⁾、本研究では、各播種期間で生育日数や生育期間内の気温などを比較するため、草丈が 25cm に到達した日を収穫日と定義した。収穫日は、

各播種期における生育調査をもとに、草丈の伸長状況をグラフ化し、草丈が25cmに到達した日を求め、決定した。

3) 結果

播種期から収穫日までの平均気温と積算気温（以後、平均気温、積算気温）との関係を第54図A, Bに示す。ハウレンソウの積算気温の平均値は627時間（第9表）であったが、平均気温が5℃～25℃の範囲内で、積算気温は400～800時間と幅が広く、しかも、平均気温が28℃では積算気温が1400℃と大幅に高くなった。一

方、コマツナの積算気温の平均値は486℃で、ハウレンソウよりも低かった。また、平均気温が5℃～26℃の範囲内で、積算気温は400～600℃であり、ハウレンソウよりも積算気温の変動が少なかった。

播種日と収穫日の結果をもとに、ハウレンソウとコマツナの栽培期間中の平均気温と収穫日までの日数との関係を第54図C, Dに示す。平均気温が15～23℃では播種日から収穫日までの日数（以後、生育日数）は、ハウレンソウ、コマツナが20～30日であるが、両作物の生育日数は平均気温が15℃を下回ると長くなり、平

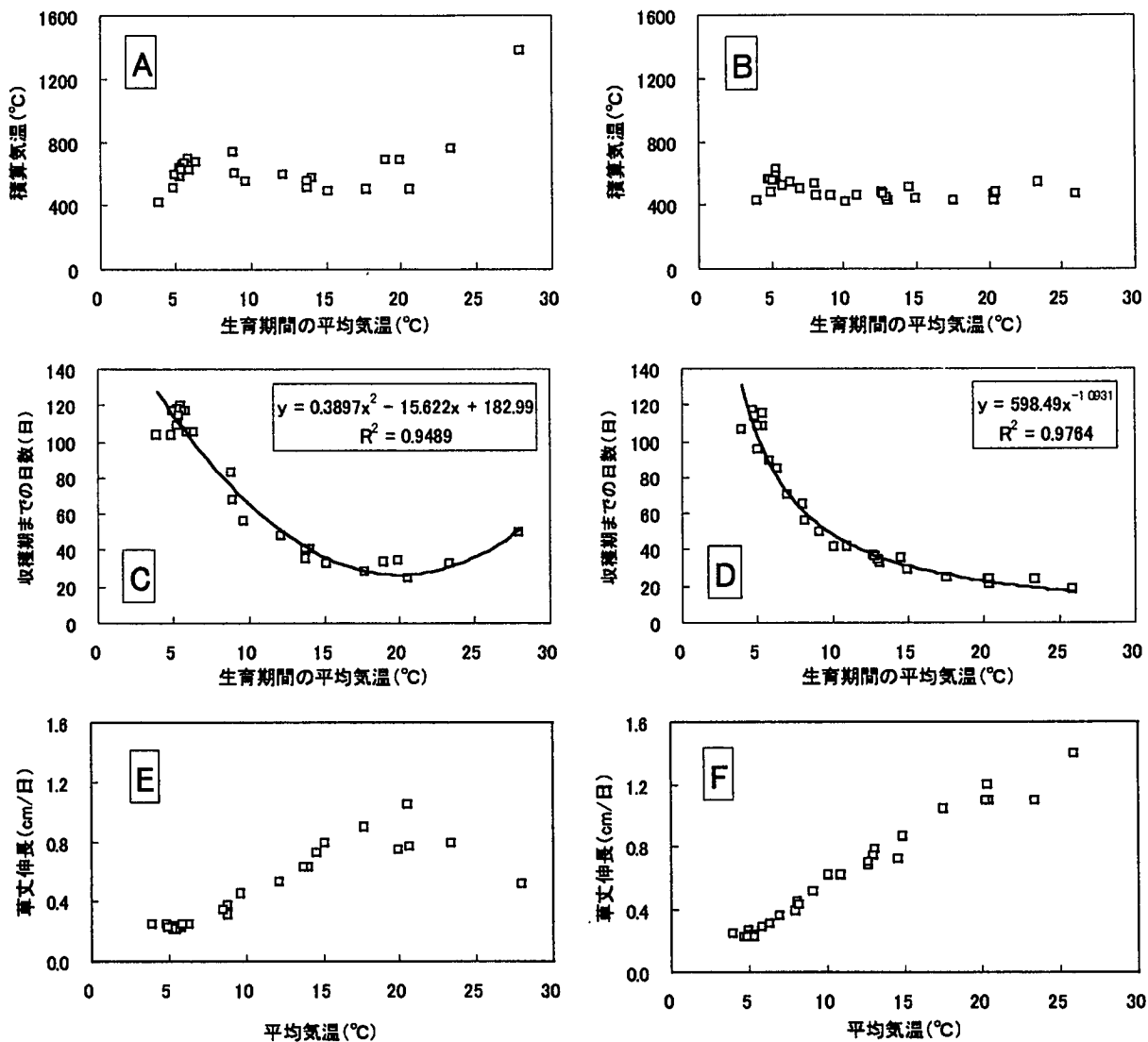
第9表 ハウレンソウとコマツナの播種日と収穫日、生育日数、生育期間内の平均気温および積算気温

ハウレンソウ		生育期間内の			コマツナ		生育期間内の		
播種日	収穫日	生育日数	平均気温	積算気温	播種日	収穫日	生育日数	平均気温	積算気温
年月日	年月	日	℃	℃	年月日	年月	日	℃	℃
1996/11/ 1	2/12	103	4.9	505	1996/10/18	11/28	41	11.0	450
11/15	2/26	103	4.0	410	11/ 1	2/ 4	95	5.0	478
1997/10/27	2/21	117	5.9	690	11/15	3/ 1	106	4.0	424
11/ 4	3/ 1	117	5.7	665	1997/10/27	12/31	65	8.1	523
11/12	3/ 6	114	5.4	619	11/ 4	2/ 1	89	5.8	517
1998/ 4/ 8	5/10	32	15.1	485	11/12	2/28	108	5.3	577
5/12	6/ 9	28	17.7	496	11/17	3/ 5	108	5.1	552
6/12	7/ 6	24	20.6	494	1998/ 4/ 8	5/ 7	29	15.0	435
8/10	9/11	32	23.4	749	5/12	6/ 5	24	17.6	423
9/10	10/14	34	19.9	678	6/12	7/ 3	21	20.4	428
10/ 5	11/14	40	14.1	563	8/17	9/ 9	23	23.4	538
10/ 5	11/14	40	13.8	551	9/14	10/ 7	23	20.4	470
10/15	12/21	67	8.9	598	10/13	11/19	37	12.7	470
10/23	1/ 9	78	7.5	580	10/15	11/16	32	13.1	420
11/ 2	2/28	118	5.3	629	10/23	12/18	56	8.2	459
11/ 9	3/ 6	117	5.0	591	/10/23	1/15	84	6.4	534
1999/ 4/20	5/25	35	14.6	511	11/ 2	2/27	117	4.7	555
5/31	7/ 3	33	20.7	682	11/ 2	2/25	115	5.4	616
7/ 6	8/24	49	28.0	1,373	11/ 9	3/ 2	113	4.9	554
10/14	12/ 1	48	12.2	586	1999/ 4/20	5/25	35	14.6	511
10/14	1/ 5	83	9.7	737	5/31	6/23	23	20.3	468
10/21	12/16	56	8.9	543	7/ 6	7/24	18	25.9	467
10/28	2/10	105	6.4	669	10/21	11/24	34	13.0	443
11/ 1	2/14	105	5.9	623	10/21	11/26	36	12.8	461
					10/28	12/ 8	41	10.1	416
					10/28	12/16	49	9.2	451
					11/ 1	1/10	70	7.0	491
全播種期の平均		73	11.5	627			92	11.5	486
S D		37	6.9	177			35	6.4	54
10～11月播種の平均		92	7.5	601			73	8.0	494
S D		30	3.2	77			32	3.2	58

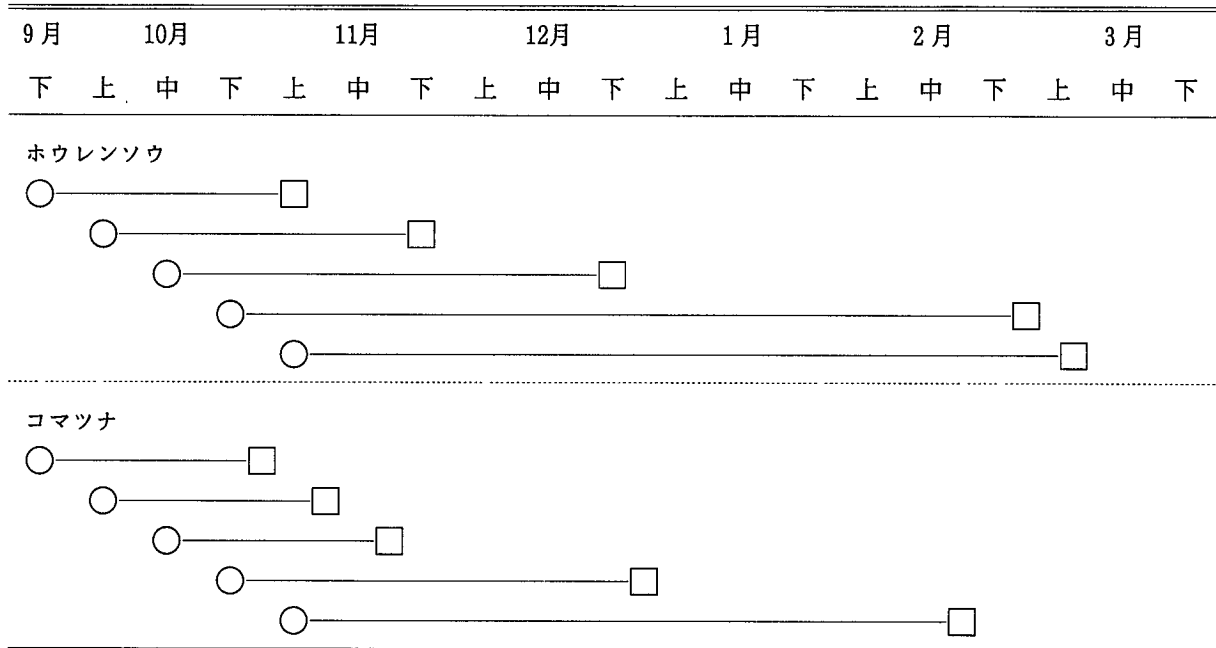
均気温が10℃ではハウレンソウは約60日、コマツナは約50日となり、5℃では両作物ともに100~120日となった。一方、平均気温が25℃を越えてもコマツナは生育日数が約20日であるが、ハウレンソウは平均気温が25℃を越えると生育日数が長くなり、平均気温が約28℃では、生育日数が約50日となった。

平均気温と草丈伸長との関係を第54図E, Fに示す。ハウレンソウの草丈伸長は、平均気温が15~20℃では0.8~1.1cm/日であるが、15℃以下になると次第に低下し、6~7℃以下では約0.3cm/日と極めて低下した。また、28℃では0.5cm/日となった。コマツナの草丈伸長は平均気温が26℃よりも低くなるにしたがって徐々に低下し、5℃でハウレンソウと同様に約0.3cm/日となった。

ハウレンソウとコマツナの播種日と収穫日の模式図を第55図に示す。ハウレンソウは、9月下旬から10月上旬に播種すると、40日~50日後の11月上旬ないしは11月下旬に収穫日となる。10月中旬に播種すると約70日後の12月下旬に収穫日となる。10月下旬に播種すると約110日後の2月中旬となる。コマツナは、9月下旬から10月中旬に播種するとそれぞれ30日~40日後の10月下旬、11月上旬に収穫期となる。10月下旬に播種すると約60日後の12月下旬に収穫期となる。11月上旬に播種すると100日後の2月中旬に収穫期となる。このことから、12月下旬に収穫期に到達させるための秋田市における播種適期は、概ねハウレンソウが10月中旬、コマツナが10月下旬であると考えられる。



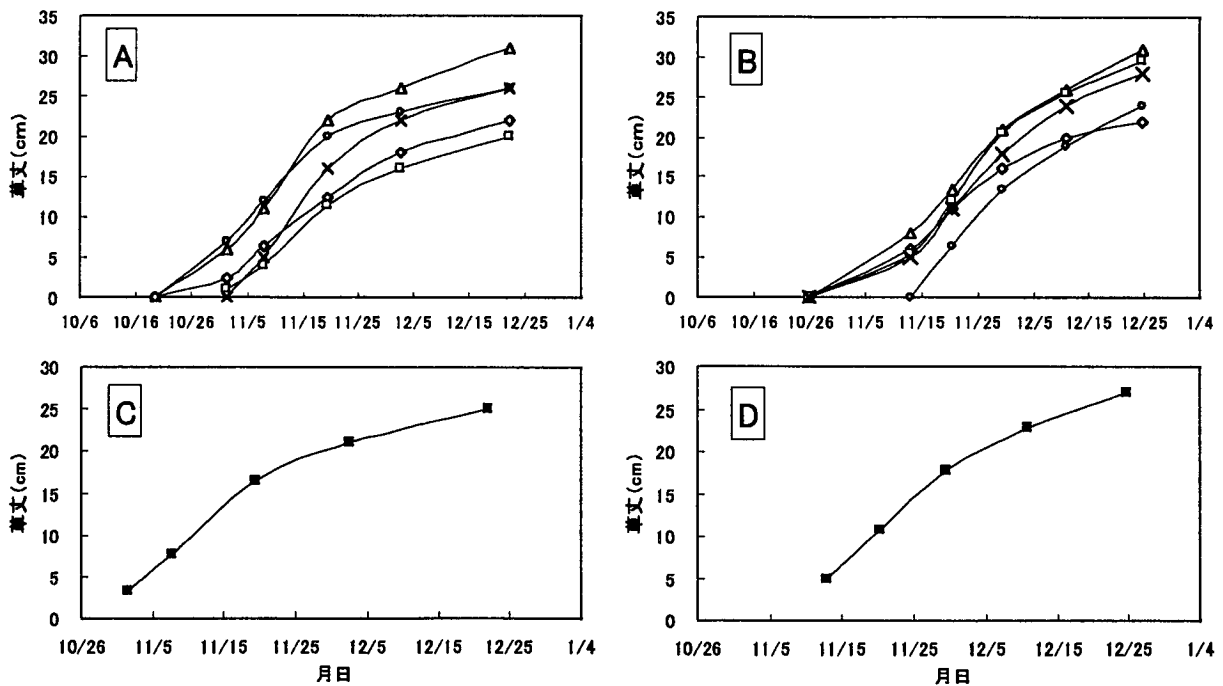
第54図 生育期間のハウス内気温と収穫期までの積算気温 (A, ハウレンソウ; B, コマツナ)、収穫期 (草丈25cm) までの日数 (C, ハウレンソウ; D, コマツナ)、草丈の伸長 (E, ハウレンソウ; F, コマツナ) との関係



第55図 秋田市におけるホウレンソウとコマツナの播種日と収穫日
注：○，播種日；□，収穫日。

第56図A, Bにホウレンソウとコマツナの草丈の伸長状況を示した。ホウレンソウの1998年10月15日播種では12月21日に収穫期となったが、播種期をわずか8日遅くした10月23日播種では収穫期が12月21日播種よりも19日遅い1月9日となった。また、1999年10月21

日播種で12月16日に収穫期となった。さらに、1999年10月14日にA, Bの異なるハウスに播種したが、A棟は12月1日、B棟は1月5日に収穫期となった。このように、ホウレンソウは年度の違いや、ハウスの違いによって草丈の伸長に差異がみられた。



第56図 播種日とホウレンソウとコマツナの草丈の伸長 (A, ホウレンソウ; B, コマツナ) および12月下旬にホウレンソウとコマツナの草丈が25cmに到達するための草丈伸長のモデル (C, ホウレンソウ, D, コマツナ)
注：ホウレンソウ (A) の播種日 [○, 1998/10/15; △, 1999/10/14 (A棟); ◇, 1999/10/14 (B棟); □, 1998/10/23; ×, 1999/10/21]。コマツナ (B) の播種日 [○, 1997/10/27; △, 1998/10/23 (A棟); ◇, 1998/10/23 (B棟); □, 1999/10/28 (A棟); ×, 1999/10/28 (B棟)]。
ホウレンソウ (C) とコマツナ (D) の草丈伸長のモデルの播種日 (ホウレンソウ, 10月15日; コマツナ, 10月26日)。

コマツナを1998年10月23日にA、Bの2棟に播種したが、A、B両棟において、収穫期に約1ヶ月の差が生じ、また、1999年10月28日に2棟のハウスに播種した場合も、収穫期が8日程異なった。

このように、ハウレンソウを10月中旬、コマツナを10月下旬に播種しても、ハウス内気温の年次変動や、ハウスの開閉管理の違い等により、ハウス内気温に差が生じるため、必ずしも12月下旬に出荷できる草姿に伸長するとは限らない。このため、草丈の伸長状況に応じてハウス内気温を加減するための管理指標を設ける必要がある。そこで、第6図に示したハウレンソウとコマツナの草丈の伸長データの平均値を求め、草丈伸長目標値を作成し、ハウス内気温の推移と併せて第56図C、Dに示す。

秋田市において、ハウレンソウを10月15日に播種した場合、11月5日、11月25日、12月15日において草丈がそれぞれ約5cm、約18cm、約24cmを目標としてハウス内気温を管理すると、12月下旬に収穫期に合わせることが可能である。秋田市において、コマツナは10月26日に播種した場合、11月5日、11月25日、12月15日において草丈がそれぞれ約3cm、約15cm、約23cmを目標としてハウス内気温を管理すると、12月下旬に収穫期に合わせることが可能である。

4) 考 察

冬期の寒冷気象を活かして、糖とビタミンC含量に富んだ品質の高いハウレンソウとコマツナを出荷するのに適した時期は、最も気温が低下する1月から2月中下旬(第1図)と考えられる。そのためには、12月下旬には出荷できる草姿(草丈で25cm程度)にハウレンソウとコマツナを育成する必要がある。このための秋田市における播種適期は、1996/97年～1999/00年の4カ年に栽培した結果(第9表)から、ハウレンソウが10月中旬、コマツナが10月下旬と考えられる(第55図)。

秋田市のハウス内の平均気温は、10月中下旬は約15℃で、11月上旬から下旬にかけては約12℃から6℃に低下し、12月上旬から下旬にかけては、5℃程度になる(第39図)。栽培期間内の平均気温がハウレンソウは20℃～15℃付近、コマツナが20℃～12℃付近では両作物ともに生育日数が20～40日であるが、平均気温がそれ以下に低下すると、生育日数が著しく長期化する(第54図C、D)。例えば、ハウレンソウでは平均気温が10℃、5℃では生育期間がそれぞれ約60日、約120日となり、コマツナでは平均気温が7.5℃、5℃

では生育期間がそれぞれ約70日、約120日となる。平均気温と草丈伸長との関係では、ハウレンソウは、15℃以下になると草丈の伸長が次第に低下し、6℃以下では約0.3cm/日と極めて低下する。また、コマツナは、平均気温が26℃以下で草丈の伸長は次第に低下し、5℃に低下すると0.3cm/日と極めて小さな値になる(第54図E、F)。このことから、ハウレンソウを10月中旬に、コマツナを10月下旬に播種し、12月下旬までの70日ないしは60日間で収穫期に到達させるためには、平均気温が5℃程度まで低下する頃には、最も短い出荷規格(22cm)程度まで育成することが必要と考えられる。すなわち、ハウレンソウでは15℃～8℃程度、コマツナでは15℃～6℃程度の平均気温が確保できる時期に草丈を伸長させ、5℃程度になる12月上旬には、草丈で約22cm程度まで育成することが必要と考えられる。

10月中下旬から12月にかけてのハウス内気温は、平均気温が15℃～5℃の範囲にあり、両作物の草丈が伸長したり、伸長が停止したりするかどうか、極めてセンシティブな温度帯にあるといえる。加えて、10月～12月のハウス内気温は年次変動が大きく(第39図)、両作物の草丈の伸長には年次の違いや、ハウスの開閉管理の違いにより、差異が生じる。12月下旬に出荷できる草姿(草丈で25cm程度)にハウレンソウとコマツナを育成するための秋田市における播種適期は、ハウレンソウが10月中旬、コマツナが10月下旬であるが(第55図)、上述の理由により、この時期に播種しても、必ずしも毎年12月下旬に出荷できる草姿に育成できるとは限らない(第56図A、B)。このため、12月下旬までに、出荷できる草姿に両作物を育成するためには、ハウス内気温管理を、両作物の草丈伸長に合わせて、慎重に加減する必要がある。そのためには、どの時期に、どの位の草丈であるべきかといった、目標値が必要であると考えられる。そこで、秋田市におけるハウレンソウとコマツナの草丈伸長目標値を作成した(第56図C、D)。すなわち、11月15日、同25日、12月5日頃に、ハウレンソウは草丈をそれぞれ13、18、21cm程度に、コマツナは草丈をそれぞれ7、15、21cm程度に育成することが適切であると考えられる。そして、それぞれの時期に、目標値に達していない場合は、換気を控え、ハウス内の気温を高かく保って、草丈の伸長を促し、目標値よりも草丈が伸びている場合は換気を多くして草丈の伸長を抑制する必要がある。

なお、県内の内陸部においては、沿岸部の秋田市よ

りも10月から12月にかけてのハウス内の気温が低い。したがって、内陸部においては、秋田市よりも両作物の播種期を早める必要がある。また、10月から12月にかけての草丈伸長の目標値も、秋田市よりも高く設定する必要があり、栽培地域にみあった目標値を作成する必要があると考えられる。

5) 要 約

ハウレンソウとコマツナを12月下旬までに収穫可能な草姿まで育成するための播種適期と、草丈伸長の目標値を検討した。

1996/97年～1999/2000年の4年にハウレンソウを、コマツナを栽培した結果から、12月下旬に出荷できる草姿(草丈で25cm程度)に両作物を育成するための秋田市における播種適期は、ハウレンソウが10月中旬、コマツナが10月下旬と考えられた。ハウレンソウを10月中旬に、コマツナを10月下旬に播種し、12月下旬までの70日ないしは60日間で収穫期に到達させるためには、平均気温がハウレンソウでは15℃～8℃程度、コマツナでは15℃～6℃程度確保できる期間に草丈を伸長させ、5℃程度に低下する12月上旬には、草丈で約22cm程度まで育成することが必要と考えられた。

そのためには、どの時期に、どの位の草丈に伸長させるべきかといった指針が必要である。そこで、秋田市における草丈伸長目標値を作成した。その結果、11月15日、同25日、12月5日頃に、ハウレンソウは草丈をそれぞれ13、18、21cm程度に、コマツナは草丈をそれぞれ7、15、21cm程度に育成することが適切であると考えられた。そして、それぞれの時期に、目標値に達していない場合は、換気を控え、ハウス内の気温を高く保って、草丈の伸長を促し、目標値よりも草丈が伸びている場合は換気を多くして草丈の伸長を抑制する必要があると考えられた。

2 移植栽培における生育、耐凍性および糖とビタミンC含量

1) 目 的

ハウレンソウとコマツナを1月上旬から出荷するための秋田市における播種適期は、ハウレンソウが10月中旬、コマツナが10月下旬である。夏期にハウレンソウなどの葉菜類やメロンなど、10月上旬以前に収穫期を終えることができる作物の後作には、ハウレンソウとコマツナを適期に播種できるが、トマトやキュウリなど、10月下旬頃まで収穫期が延長する作物の後作には、両作物を適期に播種することができない。両作物をチェーンポットに播種し、育苗した後に、ハウスに

移植する方法(移植栽培)を採用するならば、育苗期間の分だけトマトやキュウリなどの収穫期間を延長することが可能になると考えられる。そこで、果菜類の後作としてハウレンソウとコマツナを作付けすることを念頭におき、両作物の移植栽培における生育、耐凍性および糖とビタミンC含量を直播栽培と比較検討した。

2) 方 法

(1) 試験方法

試験は2001/02年に雄和町の農試内のパイプハウス内で実施した。試験区は移植区として2001年10月10日チェーンポット播種-10月31日移植(以後、10月31日移植)、10月17日チェーンポット播種-11月6日移植(以後、11月6日移植)の2区を設定し、対照として直播区(10月10日、17日、24日播種)を設定した。

移植区は、市販育苗培土「げんきくん1号」を充填したチェーンポットに、ハウレンソウ「ソロモン」、コマツナ「せいせん7号」を播種し、双方ともに21日間育苗して、上述の時期に移植した。移植は移植用農具の「ひっぱり君」を用いて実施した。播種、移植密度は条間20cm、株間5cm(100個体/㎡)とした。施肥は、播種、移植前に窒素、リン酸、カリをそれぞれ1kg/a、苦土石灰、ようりん、厩肥・モミガラ堆肥をそれぞれ10、4、200kg/a施用した。

播種後、10月24日まではハウスサイドを開放して換気をはかったが、10月25日～2月上旬までハウスを密閉して管理した。

(2) 耐凍性、糖含量、ビタミンC含量の測定

i 耐凍性、糖含量の測定

耐凍性はI章3節2. 2)、糖はI章3節2. 4)と同様の方法で行った。

ii ビタミンC含量の測定

ビタミンC含量は、試料1gに5%メタリン酸を10ml加え、ホモジナイザーで破碎した後、50mlに定容した。その後、ろ紙でろ過し、抽出液とした。抽出液5mlに30%Na₂HPO₄を8ml加え、抽出液を中和した後に、1%DTTを100ml加えた。その後、メンブレンフィルターでろ過し、HPLC[検出器、UV検出器(島津製作所製); カラム、ODS STR II(信和化工製); 溶離液、10mmolリン酸バッファー(pH 6.8); 流速、1ml/min.]で定量した。

3) 結果

(1) 気温

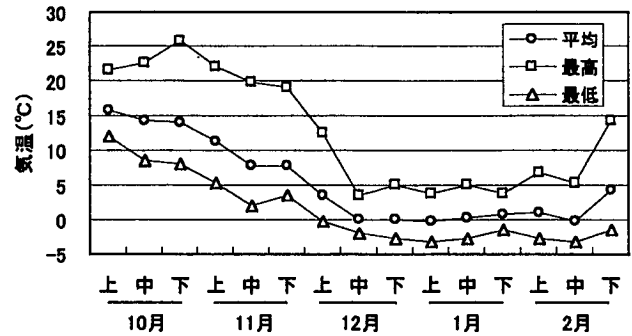
ハウス内の平均気温は、10月中下旬は14~15℃、11月上、中、下旬はそれぞれ11.4、7.8、7.7℃で推移した。12月上旬から平均気温が5℃を下回り3.4℃となり、12月中旬~2月中旬まではほぼ0℃で推移した(第57図)。

(2) 生育

第58図A、Bにホウレンソウとコマツナの直播と移植区の草丈伸長の推移を示す。ホウレンソウの10月10日直播が出荷できる草姿(草丈25cm)になった時期は11月20日であった。10月10日直播以外の区は12月上旬以降、ハウス内気温が急激に低下したため草丈の伸長が抑制され、12月下旬までに草丈25cmに到達しなかった。しかし、10月17直播区、10月31日移植区は12月12日頃には草丈が24cmとなり、出荷できる草姿となった。それ以外の区(10月24日直播区、11月6日移植区)は、冬期間中に出荷できる草丈に至らなかった。

直播区と移植区を比較すると、10月31日移植区は10月17日直播の草丈伸長とほぼ同程度に、11月6日移植は10月24日直播の草丈伸長とほぼ同程度に推移した。

コマツナが草丈25cmになった時期は、10月10日直播区、10月17直播区、10月24日直播区、10月31日移植区、11月6日移植区がそれぞれ11月10日、11月24日、1月

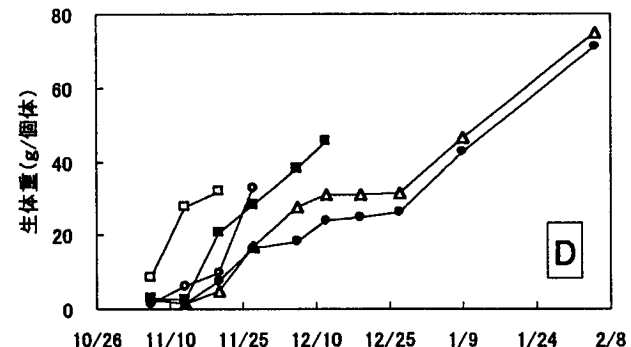
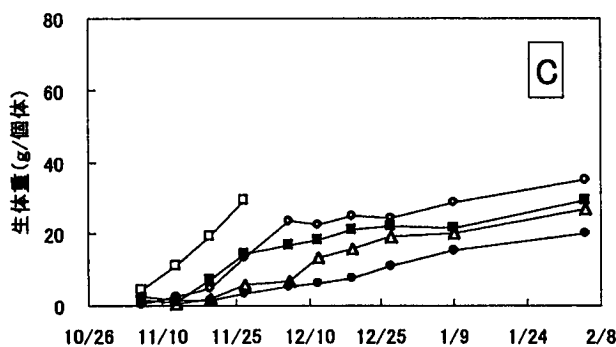
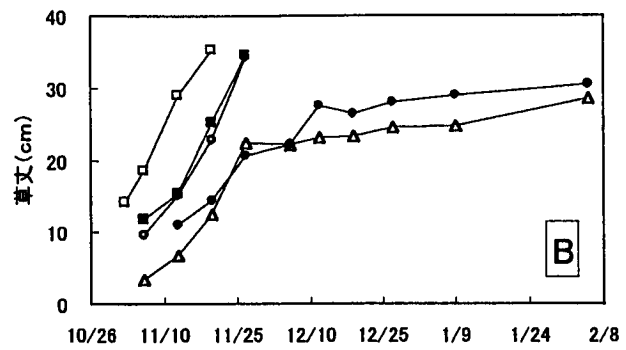
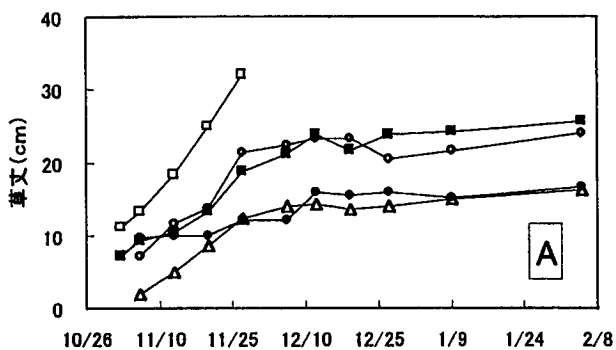


第57図 2001/2002年のハウス内気温の推移

13日、11月20日、12月9日であった。

直播区と移植区を比較すると、10月31日移植区は10月17日直播区の草丈伸長とほぼ同程度に、11月6日移植区は10月24日直播区の草丈伸長とほぼ同程度に推移した。

第58図C、Dにホウレンソウとコマツナの直播区と移植区の生体重の推移を示す。ホウレンソウの10月10日直播が収穫期に達した11月20日の生体重は約20g/個体、10月17直播区、10月31日移植区がほぼ収穫期に達した12月12日(草丈が約24cm)の生体重は、それぞれ約22g/個体、18g/個体であった。コマツナが収穫期に達した時期の生体重は、10月10日直播区、10月17直播区、10月24日直播区、10月31日移植区、11月6日移植区がそれぞれ20g/個体(11月10日)、25g/個体



第58図 直播と移植栽培における草丈(A, ホウレンソウ; B, コマツナ)と生体重(C, ホウレンソウ; D, コマツナ)の推移

注: 直播: □, 10月10日播種; ○, 10月17日播種; △, 10月24日播種。移植: ■, 10月10日播種-10月31日移植; ●, 10月17日播種-11月6日移植。

(11月24日)、50g/個体(1月13日)、20g/個体(11月20日)、22g/個体(12月9日)であった。平均気温が約0℃になった12月中旬から2月上旬にかけて、直播、移植各区の草丈は、ハウレンソウではほぼ伸長が停止し、コマツナでは伸長はわずかであったが、この期間の生体重は、ハウレンソウ、コマツナともに緩やかに増加した。

第10表にハウレンソウとコマツナの直播区と移植期の葉身率(個体重に占める葉身重の割合)を示す。葉身率は、ハウレンソウの11月、12月の調査時点では移植、直播区ともに約65%、1月の調査時点では移植、直播区ともに約73%で移植区と直播区に大きな差はみられなかった。コマツナの葉身率は、11月の調査時点では移植、直播区ともに約60%、1月の調査時点ではやや直播区が移植区よりも高かったが、全体としてみると、移植区と直播区に大きな差はみられなかった。

(3) 耐凍性

第11表に直播と移植栽培におけるハウレンソウとコ

マツナの耐凍性を示す。移植区と直播区の T_{EL20} 、 T_{EL50} は、ともに初冬の12月18日よりも厳寒期の1月28日が低下した。

移植区と直播区を比較すると、 T_{EL20} は、12月18日にはハウレンソウの移植区が -12.8°C で、直播区よりも約 1°C 低かったが、コマツナは移植区と直播区に差はなく、ともに -11.2°C であった。1月28日の T_{EL20} は、ハウレンソウは移植区と直播区に差はなく、ともに -13.6°C であった。コマツナの移植区と直播区はそれぞれ -13.8°C 、 -13.1°C で大きな差はなかった(第11表)。

T_{EL50} は、12月18日のハウレンソウの移植区が -15.1°C で、直播区よりも 1.3°C 低く、コマツナの移植区は -14.1°C で直播区よりも 1.3°C 低かった。1月28日の T_{EL50} は、ハウレンソウは移植区が -16.4°C 、直播区が -16.0°C で大きな差はみられなかった。コマツナの移植区、直播区はともに約 -16°C であった。

第10表 直播と移植栽培におけるハウレンソウとコマツナの葉身率

	ハウレンソウ		コマツナ	
	葉身率(%)	調査日	葉身率(%)	調査日
10月10日直播	65.0	01/11/20	59.2	01/11/13
10月17日直播	64.0	01/12/19	59.5	01/11/20
10月24日直播	72.2	02/ 1/ 9	66.5	02/ 1/ 9
10月31日移植	66.0	01/12/19	60.1	01/11/20
11月 6 日移植	73.6	02/ 1/ 9	60.5	02/ 1/ 9

第11表 直播と移植栽培におけるハウレンソウとコマツナの耐凍性

		T_{EL20}				T_{EL50}			
		2001/12/18		2002/1/28		2001/12/18		2002/1/28	
		℃	S D	℃	S D	℃	S D	℃	S D
ハウレンソウ	直播	-11.6	0.6	-13.6	0.1	-13.8	0.4	-16.0	0.6
	移植	-12.8	0.4	-13.6	0.2	-15.1	0.2	-16.4	0.1
コマツナ	直播	-11.2	0.1	-13.8	1.0	-12.8	0.1	-16.1	0.9
	移植	-11.2	0.4	-13.1	0.3	-14.1	0.2	-16.0	0.1

(4) 糖含量

第59図A、Bに直播区と移植区のホウレンソウとコマツナの糖含量を示す。個体当たりの糖含量（可食部全体の糖含量）は、両作物の直播、移植区ともに12月18日より1月28日が高まった。すなわち、ホウレンソウの12月18日の糖含量は、直播区、移植区がそれぞれ1.2、1.5g/100gFWであったのに対し、1月28日では両作物ともに約2g/100gFWとなった。コマツナの12月18日の糖含量は、移植区、直播区がそれぞれ1.3、1.1g/100gFWであったのに対し、1月28日ではそれぞれ3.0、2.6g/100gFWとなった。

移植区と直播区を比較すると、ホウレンソウの糖含量は、12月18日、1月28日ともに葉身、葉柄部ともに大きな差はなかった。コマツナでは、葉身部で12月18日、1月28日ともに直播区が移植区よりも高かったが、葉柄部では両区に差はみられず、個体当たりの糖含量は両区に大きな差がみられなかった（第59図A、B）。

(5) ビタミンC含量

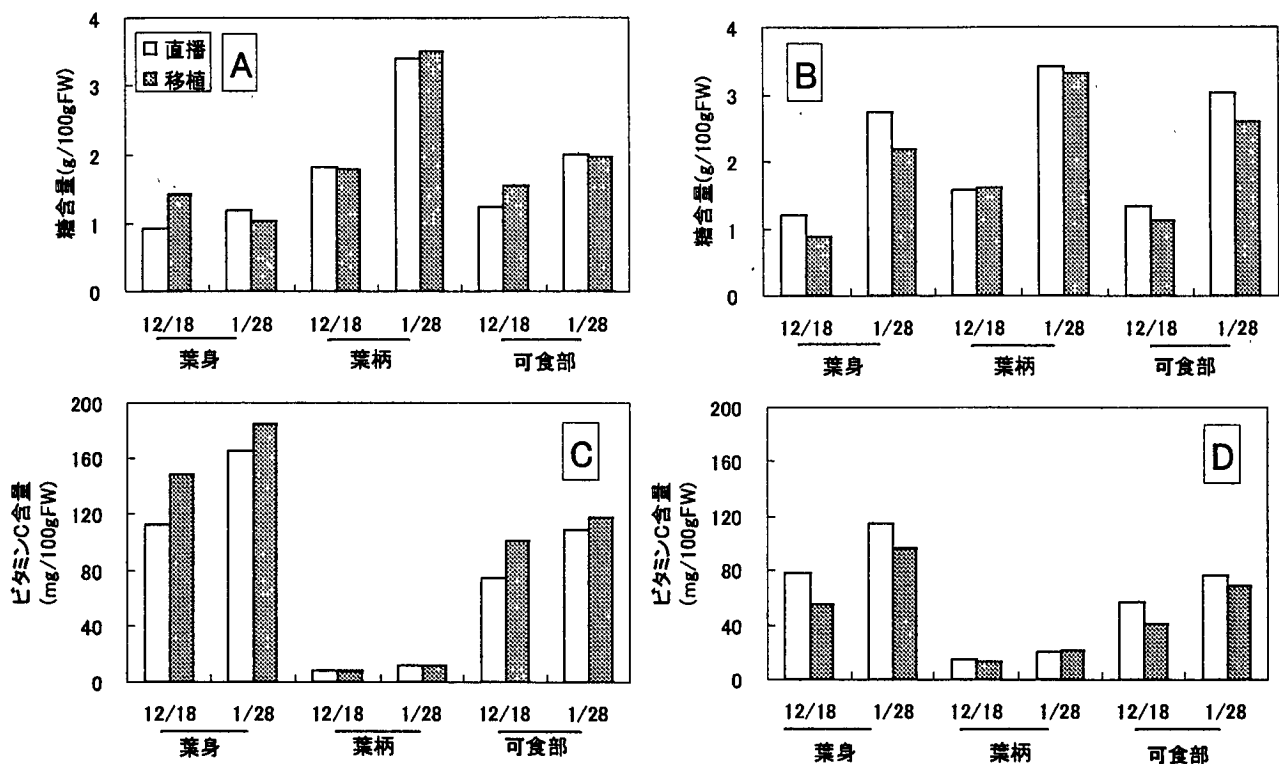
第59図C、Dに直播と移植栽培におけるホウレンソウとコマツナのビタミンC含量を示す。ビタミンC含量は、移植、直播のいかにかわらず、ホウレンソウ

ウ、コマツナともに葉身部で高く、葉柄部では低かった。個体当たりのビタミンC含量は、両作物の移植区、直播区ともに12月18日より1月28日がビタミンC含量が高まった。すなわち、ホウレンソウの12月18日のビタミンC含量は、直播区、移植区がそれぞれ74、100mg/100gFWであったのに対し、1月28日ではそれぞれ109、118mg/100gFWに高まった。コマツナの12月18日のビタミンC含量は、移植区、直播区がそれぞれ57、41mg/100gFWであったのに対し、1月28日ではそれぞれ77、69mg/100gFWになった。

移植区と直播区を比較すると、ホウレンソウの個体当たりのビタミンC含量は、12月18日、1月28日ともに移植区が直播区に大きな差がなかった。コマツナの個体当たりのビタミンC含量は、移植区と直播区に大きな差がなかった（第59図C、D）。

4) 考 察

移植と直播区を比較すると、ホウレンソウ、コマツナともに10月17日直播区と10月31日移植区が、ほぼ同様に草丈が伸長した（第58図A、B）。また、両作物ともに10月24日直播区と11月6日移植が、ほぼ同様に草丈が伸長した。このことから、移植栽培では、直播裁



第59図 直播と移植栽培におけるホウレンソウとコマツナの糖含量 (A, ホウレンソウ; B, コマツナ) とビタミンC含量 (C, ホウレンソウ; D, コマツナ)

注: B, C, D図中の色分けはA図と同様。

培の播種適期の7日前にチェーンポットに播種し、3週間育苗して移植すると、直播栽培の適期に播種した場合と同様に草丈が伸長すると考えられた。

ハウレンソウでは、10月17日直播区と10月31日移植区が12月下旬にほぼ収穫期に達した(第58図A)。したがって、ハウレンソウでは、移植栽培を導入することにより、ハウスでの栽培開始時期を約2週間程度遅らせることが可能であると考えられた。このことから、移植栽培を導入することにより、トマトやキュウリなどの収穫を10月下旬まで延長しても、後作に1月から出荷を開始するハウレンソウ栽培が可能であると考えられた。

コマツナでは10月24日直播区と11月6日移植区が12月下旬にほぼ収穫期に達した(第58図B)。したがって、コマツナ栽培において、移植栽培を導入することにより、ハウレンソウと同様に、ハウスでの栽培開始時期を約2週間程度遅らせることが可能であると考えられた。このことから、移植栽培を導入することにより、トマトやキュウリなどの収穫を11月初旬まで延長しても、後作に1月から出荷するコマツナ栽培が可能であると考えられた。

ハウレンソウの草丈の伸長は、直播、移植区ともに平均気温が5℃を下回った12月上旬から著しく抑制され、コマツナの草丈の伸長は、直播、移植区ともに平均気温が5℃を下回った12月上旬に緩慢になり、0℃程度になった12月中旬から著しく抑制された(第58図A, B)。両作物ともに約5℃を下回ると草丈の伸長が抑制される傾向は、秋田市における草丈伸長の傾向と良く一致した。このことから、両作物ともに、移植栽培においても、直播栽培と同様に、ハウス内の平均気温が5℃程度になる時期には、ほぼ出荷できる草姿まで育成することが必要であると考えられる。

移植栽培の場合、移植後、早期に活着し、円滑に生育が進むかどうか重要である。県内内陸部、特に県北内陸部においては、農試(雄和町)のハウスよりも10月から12月にかけてのハウス内気温が低下するので、本試験よりも早期に栽培を開始する必要があると地域にみあった播種、移植時期を検討する必要があると考えられる。

ハウレンソウ、コマツナの葉身率は、移植区と直播区に大きな差はなかった(第10表)。ハウレンソウとコマツナは、軟弱徒長に生育すると葉柄が長くなり、

その結果、葉身率が低下する。移植区と直播区の葉身率は大きな差はなかったことから、移植栽培において、条間20cm、株間5cm(栽植密度100個体/m²)でも徒長することはないと考えられた。

T_{EL20}は、ハウレンソウ、コマツナともに12月18日、1月28日の両時点で、直播区と移植区に大きな差はなかった(第11表)。T_{EL50}は、12月18日では両作物ともに移植区が直播区よりも約1℃ほど低かったが、1月28日では、両作物ともに移植区と直播区に大きな差はなかった。このことから、耐凍性は移植と直播栽培は同程度と判断された。

移植栽培におけるハウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量は、12月18日、1月28日ともに直播区と移植区に大きな差はなかった(第59図)。このことから、糖およびビタミンC含量は移植と直播栽培は同程度と判断された。

5) 要約

10月上旬以前に収穫期を終えることができる作物の後作には、ハウレンソウとコマツナを適期(10月中下旬)に播種できるが、10月下旬まで収穫期が延長する作物の後作には両作物を適期に播種できない。そこで、10月下旬まで収穫期が延長される作物の後作に、両作物の移植栽培が有効かどうかを検討した。

ハウレンソウとコマツナの移植栽培では、直播栽培における播種適期の7日前にチェーンポットに播種し、3週間育苗して移植すると、直播栽培の適期に播種した場合と同様に草丈が伸長すると考えられた。すなわち、12月下旬までに出荷できる草姿に育成するためには、直播栽培ではハウレンソウは10月中旬、コマツナは10月下旬に播種する必要があるが、移植栽培では、ハウレンソウを10月10日にチェーンポットに播種し、10月31日に、コマツナでは10月17日にチェーンポットに播種し、11月6日にハウスに移植をすると12月下旬に収穫期に到達させることが可能であった。これらのことから、移植栽培を導入することにより、夏作物をハウレンソウでは10月下旬まで、コマツナでは11月初旬まで延長しても、後作に1月から出荷を開始するハウレンソウ、コマツナ栽培が可能であると考えられた。

両作物の耐凍性は、移植栽培と直播栽培は同程度と判断された。また、糖とビタミンC含量は、移植栽培と直播栽培に大きな差異は認められなかった。

3 ホウレンソウとコマツナの品種と生育、耐凍性および糖・ビタミンC含量

1) 目的

ホウレンソウの品種は、作期による利用上から、春まき(3~5月まき)、夏まき(6~8月まき)、秋まき(9~11月まき)の品種に大別され¹⁾、一般に、春まきでは晩抽性、夏まきでは極晩抽性と耐暑性のある品種が用いられ、秋まきでは一般に耐寒性に優れた品種が適しているとされる。コマツナは一般に耐暑性、耐寒性が強いとされ、通年用いられる品種が多い。ホウレンソウとコマツナにおいて、これまでに生育や糖、ビタミンC含量の品種間を比較した報告は多い⁴⁹⁾。しかし、積雪寒冷地域における秋まき栽培においては、両作物の品種間を比較した報告は少ない。また、耐凍性に関して、両作物の品種間を比較した報告は国内にはほとんどない。そこで、ホウレンソウの春、夏、秋まき用の生産現場で用いられている主な品種、コマツナでは通年をとおして生産現場で用いられている品種の10月播種における生育、耐凍性および糖とビタミンC含量を調査した。そして、両作物の冬期栽培における適品種の選定を試みた。

2) 方法

(1) 試験方法

試験は2001/02年に農試(雄和町)のパイプハウス内で実施した。供試品種はホウレンソウは‘ソロモン’(秋まき)、『アトランタ’(秋まき)、『ミストラル’(秋まき)、『アクティブ’(夏まき)、『エスパー’(春まき)の5品種、コマツナは‘せいせん7号’、『笑点’、『極楽天’、『よかった菜’の4品種(4品種ともに春~秋まき)とした。

両作物ともに2001年10月10日、同17日、同24日に播種した。耕種概要はI章6節2.1)と同様の方法で行った。

耐凍性の測定、糖とビタミンC分析用試料の採取は、ホウレンソウを2001年11月20日(10月10日播種)と2002年2月6日(‘エスパー’は10月10日播種、他の4品種は10月17日播種)に、コマツナを2001年11月19日(10月10日播種)と2002年1月31日(10月24日播種)に行った。

(2) 耐凍性、糖、ビタミンC含量の測定

耐凍性はI章3節2.2)、糖含量の測定はI章3節2.4)、ビタミンC含量の測定はIII章2節2.2)(2)と同様の方法で行った。

3) 結果

(1) ハウス内気温

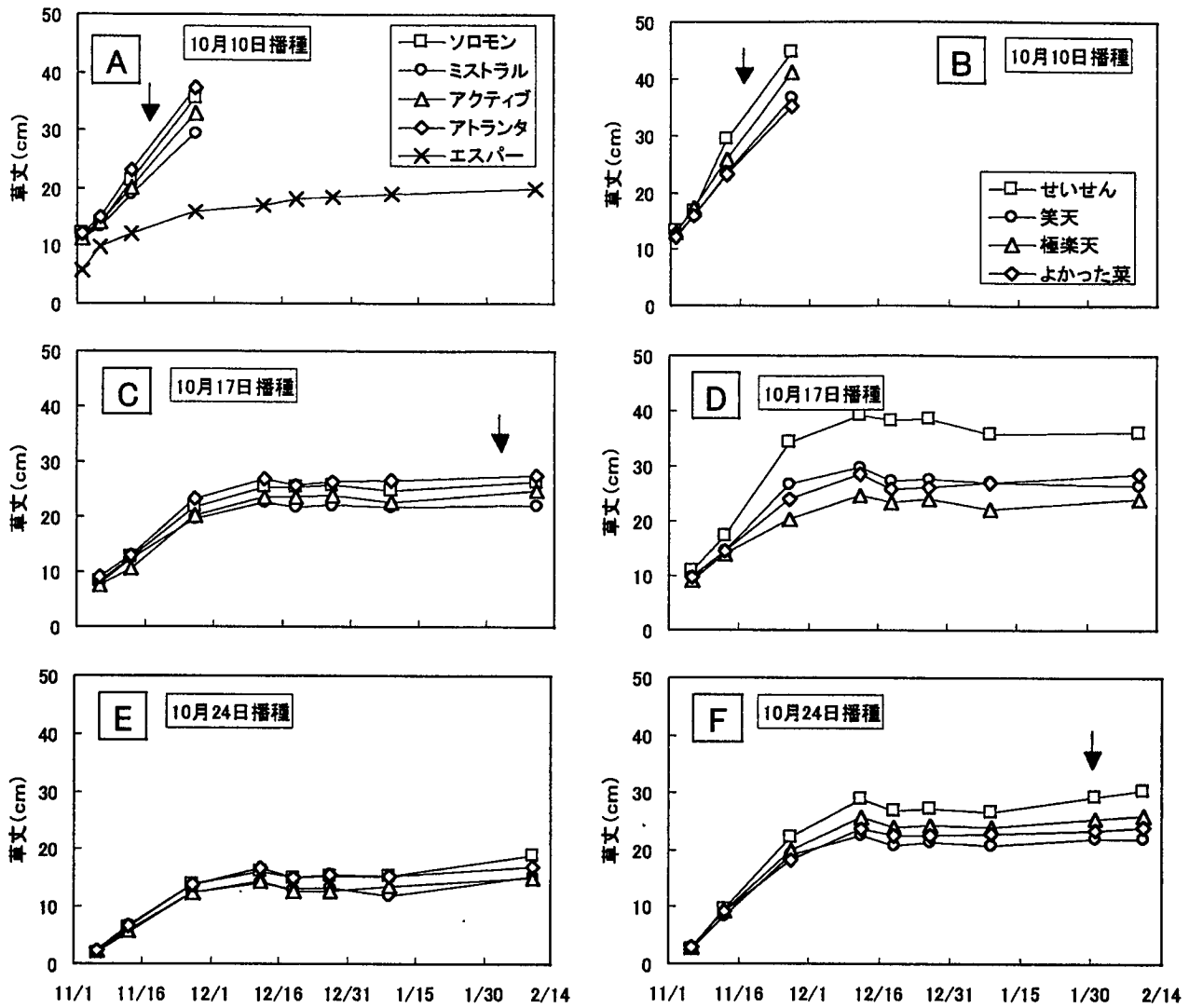
ハウス内気温は10月から12月中旬にかけて次第に低下した(第57図)。12月中旬から2月中旬にかけては平均気温が約0℃、最高気温が約5℃、最低気温が-3~-4℃で推移した。なお、試験期間内の最低気温の極値は-9.4℃(2002年1月20日、外気温-10.2℃)であった。

(2) 生育と収量

ホウレンソウの草丈の推移を第60図A, C, Eに示す。10月10日播種では‘ソロモン’、『ミストラル’、『アトランタ’、『アクティブ’の4品種は11月中旬に草丈が20cm以上に伸長したが、『エスパー’の草丈の伸長は極めて遅かった。10月17日播種では‘ソロモン’、『ミストラル’、『アトランタ’、『アクティブ’の4品種ともに12月上旬に草丈が20cmに達した。10月24日播種では、『ソロモン’、『ミストラル’、『アトランタ’、『アクティブ’の4品種ともに2月上旬においても草丈が20cm以下で、冬期間中に収穫期に到達しなかった。3回の播種期の生育から判断すると、草丈の伸長は、『ソロモン’、『アトランタ’が同程度で、次いで『アクティブ’、『ミストラル’が早くいと考えられた。

コマツナの草丈の推移を第60図B, D, Fに示す。10月10日播種では4品種ともに11月中旬に草丈が20cmに到達した。10月17日播種では、草丈の伸長は‘せいせん7号’が最も早く、次いで、『笑点’、『よかった菜’が早く、『極楽天’が最も遅かった。10月24日播種では12月上旬に4品種ともに草丈が20cmに到達し、品種間を比較すると、草丈の伸長は‘せいせん7号’が最も早く、『極楽天’、『よかった菜’、『笑点’は同程度であった。3回の播種期の生育から判断すると、草丈伸長は‘せいせん7号’が最も早く、他の3品種は同程度と考えられた。

ホウレンソウとコマツナの収量を第12表に示す。ホウレンソウの収量は11月20日では『アトランタ’、『アクティブ’、『ソロモン’、『ミストラル’の順に高かった。2月6日の収量は、『アトランタ’、『ソロモン’がそれぞれ2.3、2.2kg/m²で、『ミストラル’、『アクティブ’よりも高かった。コマツナの収量は、11月19日、1月31日ともに‘せいせん7号’が最も高くそれぞれ2.5、3.1kg/m²であった。11月19日の収量は、『せいせん7号’に次いで『よかった菜’が高く、『極楽天’、『笑点’は低かった。1月31日の収量は、『せいせん7号’を除く他の品種は2.3~2.7kg/m²でほぼ同程度であった。



第60図 各播種期におけるハウレンソウ (A, C, E) とコマツナ (B, D, E) の草丈の推移
 注：C, E図中の印はA図と同様。D, F図中の印はB図と同様。

第12表 ホウレンソウとコマツナの収量 (kg/m²)

ハウレンソウ	2001年11月20日	2002年2月6日
ソロモン	1.37	2.19
ミストラル	1.27	1.76
アトランタ	1.50	2.31
アクティブ	1.48	1.68
エスパー	—	—
コマツナ	2001年11月19日	2002年1月31日
せいせん7号	2.51	3.10
極楽天	1.58	2.32
笑天	1.46	2.22
よかった菜	1.88	2.67

(3) 耐凍性

ハウレンソウ、コマツナの耐凍性の測定結果を第13表に示す。ハウレンソウの11月20日の耐凍性は、5品種間でほとんど差みられず、 T_{EL20} 、 T_{EL50} はそれぞれ $-8 \sim -7^{\circ}\text{C}$ 、約 -9°C であった。2月6日では‘ソロモン’、‘アトランタ’の T_{EL20} 、 T_{EL50} はそれぞれ $-16^{\circ}\text{C} \sim -17^{\circ}\text{C}$ 、約 -19°C 、‘アクティブ’の T_{EL20} 、 T_{EL50} はそれぞれ -15.4°C 、 -17.2°C 、また、‘エスパー’は T_{EL20} 、 T_{EL50} がそれぞれ -15.7°C 、 -17.4°C まで低下した。しかし、‘ミストラル’は5品種の中では最も T_{EL20} と T_{EL50} が低下せず、それぞれ -13.9°C 、 -16.5°C であった。

コマツナの11月19日の T_{EL20} 、 T_{EL50} は‘せいせん7号’ではそれぞれ -7.1°C 、 -8.8°C で、他の3品種よりも約 1°C 低かった(第2表)。1月31日の T_{EL20} は低い順

に‘せいせん7号’(-15.6℃)、『よかった菜’(-14.3℃)、『極楽天’(-13.3℃)、『笑点’(-13.1)であった。また、 T_{EL50} も T_{EL20} と同様の傾向がみられ、

低い順に、‘せいせん7号’(-17.1℃)、『よかった菜’(-16.0℃)、『笑点’(-15.6)、『極楽天’(-15.4℃)であった。

第13表 ホウレンソウとコマツナの品種別の耐凍性

ホウレンソウ	2001年11月20日				2002年2月6日			
	T_{EL20} ℃	SD ℃	T_{EL50} ℃	SD ℃	T_{EL20} ℃	SD ℃	T_{EL50} ℃	SD ℃
ソロモン	-8.1	0.1	-9.2	0.1	-17.2	1.3	-18.8	0.6
ミストラル	-8.3	0.1	-9.4	0.1	-13.9	0.6	-16.5	0.1
アトランタ	-8.1	0.3	-9.3	0.1	-16.5	0.4	-18.7	0.1
アクティブ	-7.4	0.1	-9.3	0.2	-15.4	0.7	-17.2	0.3
エスパー	-7.2	1.3	-9.8	0.8	-15.7	0.1	-17.4	0.4

コマツナ	2001年11月19日				2002年1月31日			
	T_{EL20} ℃	SD ℃	T_{EL50} ℃	SD ℃	T_{EL20} ℃	SD ℃	T_{EL50} ℃	SD ℃
せいせん7号	-7.1	0.4	-8.8	0.2	-15.6	0.4	-17.1	0.2
極楽天	-6.0	0.1	-7.0	0.1	-13.3	0.4	-15.4	0.7
笑天	-6.1	0.1	-7.3	0.1	-13.1	0.1	-15.6	1.1
よかった菜	-6.1	0.1	-7.5	0.4	-14.3	0.6	-16.0	1.1

(4) 糖含量

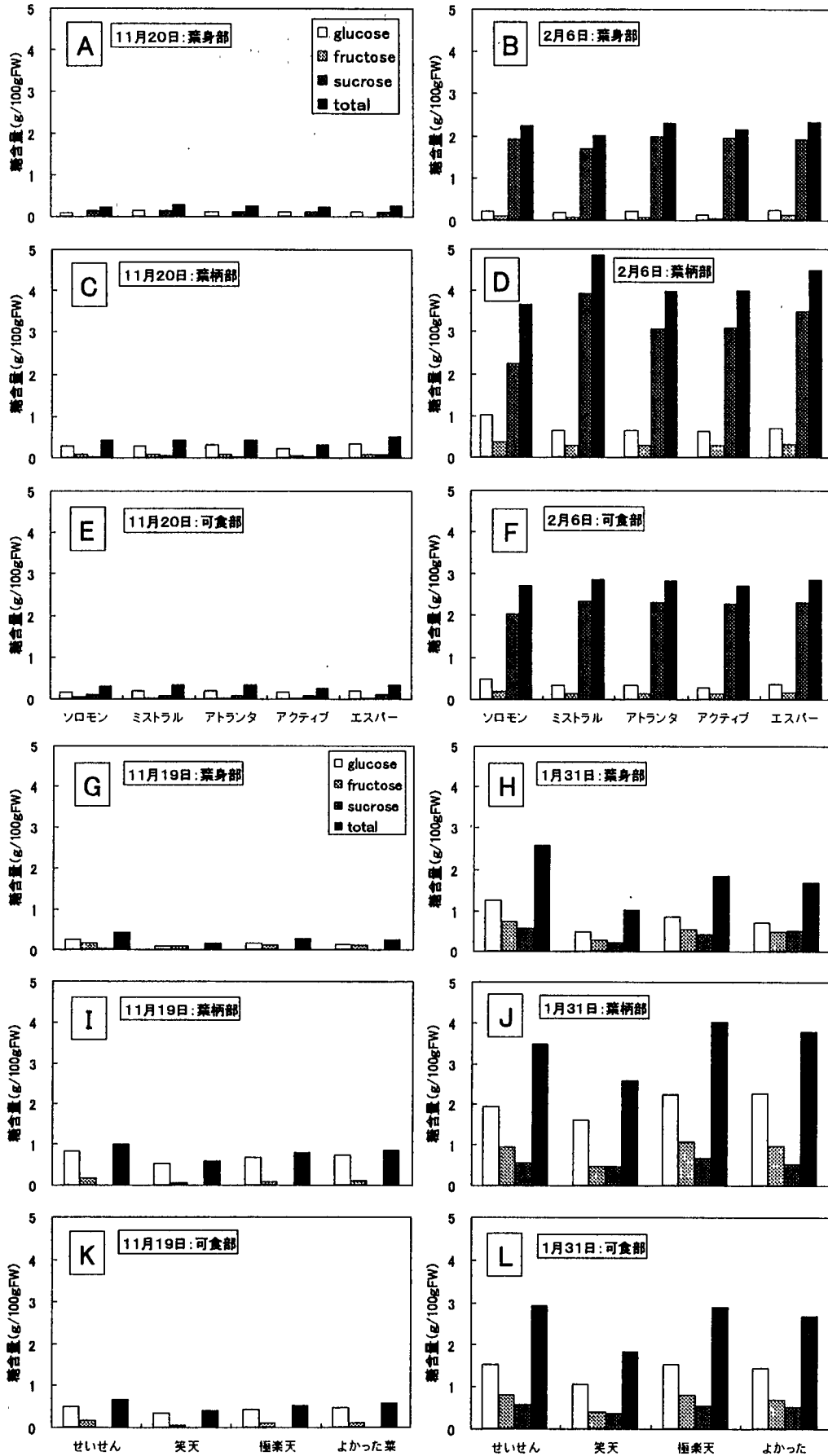
ホウレンソウの糖含量を第61図A~Fに示す。ホウレンソウの11月20日の糖含量は、いずれの品種も可食部の全糖含量が約0.3g/100gFWと低く、品種間に大きな差はなかった。2月6日の糖含量は、葉身、葉柄部ともにいずれの品種もスクロース含量が大幅に高まった。可食部の全糖含量は、いずれの品種も約2.7g/100gFWで、品種間に大きな差はみられなかった。

コマツナの糖含量を第61図G~Lに示す。コマツナの11月19日の糖含量は、いずれの品種も可食部の全糖含量が約0.5g/100gFWで、品種間に大きな差はなかった。1月31日の糖含量は、4品種ともに11月19日より高まったが、品種により差がみられ、葉身部では、‘せいせん7号’が約2.6g/100gFWで最も高く、次いで‘極楽天’、『よかった菜’が約1.8g/100gFWで、‘笑点’は約1g/100gFWで最も低かった。可食部の全糖含量は、‘せいせん7号’、『極楽天’、『よかった菜’が2.7~2.9g/100gFWで高く、‘笑点’は約1.8g/100gFWで低かった。

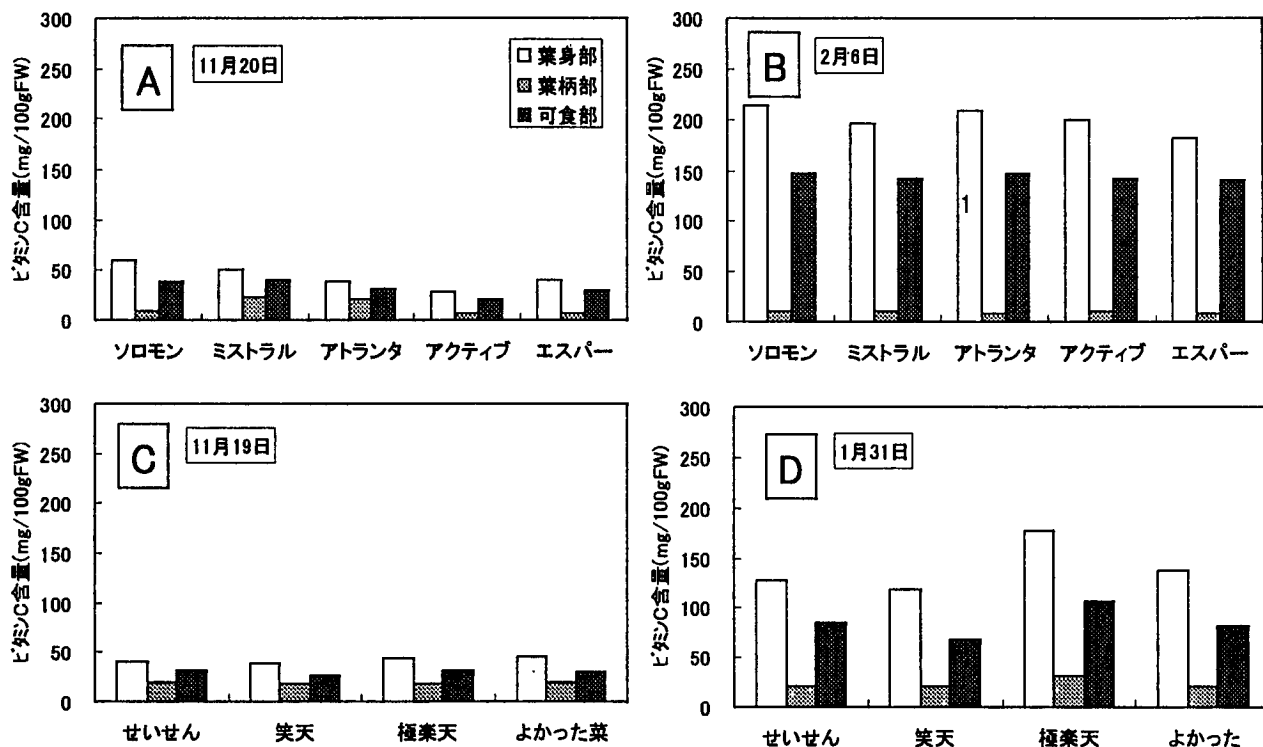
(5) ビタミンC含量

ホウレンソウのビタミンC含量を第62図A, Bに示す。ホウレンソウの11月20日の可食部のビタミンC含量は、いずれの品種も30~40mg/100gFWと低く、品種間に大きな差はなかった。2月6日のビタミンC含量は、葉身部においていずれの品種も大幅に高まった。可食部のビタミンC含量は、いずれの品種も140~150mg/100gFWで、品種間に大きな差はなかった。

コマツナのビタミンC含量を第62図C, Dに示す。コマツナの11月19日のビタミンC含量は、いずれの品種も可食部で約30mg/100gFWで、品種間に大きな差はなかった。1月31日のビタミンC含量は、いずれの品種も11月19日より大幅に高まったが、品種間を比較すると、可食部のビタミンC含量は、‘極楽天’が106mg/100gFWで最も高く、次いで‘せいせん7号’、『よかった菜’が約85mg/100gFW、『笑点’は約70mg/100gFWで最も低かった。



第61図 ホウレンソウ品種 (11月20日, 2月6日) とコマツナ品種 (11月19日, 1月31日) の部位別糖含量
 注: A, B, C, D, E, F図はホウレンソウ。G, H, I, J, K, L図はコマツナ。
 B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L図中の色分けはA図と同様。



第62図 におけるホウレンソウ品種 (A, 11月20日; B, 2月6日) とコマツナ品種 (C, 11月19日; D, 1月31日) の部位別ビタミンC含量

注: B, C, D図中の色分けはA図と同様。

4) 考察

ホウレンソウ‘エスパー’は、草丈の伸長が他の4品種に比較して著しく遅く、10月播種には適さないと考えられた(第60図A, C, E)。他の4品種の草丈の伸長を比較すると、‘ソロモン’、‘アトランタ’が‘アクティブ’、‘ミストラル’よりも早かった。草丈伸長の面から5品種を比較すると、‘ソロモン’、‘アトランタ’が冬期栽培に適すると考えられた。

コマツナの草丈伸長は‘せいせん7号’が最も早く、他の3品種は同程度と考えられた(第60図B, D, F)。このことから、せいせん7号’が冬期栽培に適すると考えられた。

ホウレンソウの収量は、11月20日においては高い順に‘アトランタ’、‘アクティブ’、‘ソロモン’、‘ミストラル’であり、2月6日においては、‘アトランタ’、‘ソロモン’が‘アクティブ’、‘ミストラル’よりも高かった(第12表)。このことから、収量の面からは、冬期栽培に‘アトランタ’、‘ソロモン’が適すると考えられた。コマツナの収量は、11月19日、1月31日ともに‘せいせん7号’が他の品種よりも高かった。このことから、収量の面からは、冬期栽培に‘せいせん7号’が適すると考えられた。

ホウレンソウの11月20日時点の耐凍性は、5品種間でほとんど差みられずに増大していなかったが、2月6日には5品種ともに耐凍性が増大した(第13表)。ホウレンソウは本来秋まき、冬どりの作物であるが、周年栽培化を目指して、晩抽性を主眼に行われ、春～夏まき品種が育成されてきた。春～夏まき用品種は、育種過程で抽だい性は大幅に改善されたが、夏まき品種の‘アクティブ’、春まき品種の‘エスパー’も厳寒期には耐凍性が増大することから、耐凍性に関しては、本来持っている性質を失わずに保たれていると考えられた。

2月6日の T_{EL20} を品種間で比較すると、‘ソロモン’の T_{EL20} は‘ミストラル’よりも約3℃低下した(第13表)。県内の内陸部では例年最低気温が-15℃程度まで低下する。このことから、栽培品種の選定にあたっては、生育(草丈の伸長)や収量のみならず、耐凍性の面からの選定も重要であると考えられた(I章1節3.3)参照)。本試験結果からは、‘ソロモン’と‘アトランタ’が耐凍性の面からは、冬期栽培に適すると考えられた。

コマツナの11月19日時点における耐凍性はいずれの品種も大きな差がなく増大していなかったが、1月31

日にはいずれの品種も耐凍性が増大した(第13表)。コマツナの T_{EL20} 、 T_{EL50} は品種間の差はハウレンソウよりも約 1°C 低かったが、1月31日の T_{EL20} を品種間で比較すると、 T_{EL20} が4品種の中では最も低下した‘せいせん7号’と最も低下しなかった‘笑天’の差は約 2°C であった。このことから、コマツナにおいて、栽培品種の選定にあたっては、生育(草丈の伸長)や収量のみならず、耐凍性の面からの選定も重要であると考えられた(1章1節3.3参照)。本試験結果からは、‘せいせん7号’と‘よかった菜’が耐凍性の面からは、冬期栽培に適すると考えられた。

ハウレンソウの可食部の全糖含量は、11月20日では5品種ともに約 $0.3\text{g}/100\text{gFW}$ で低かったが、2月6日にはいずれの品種も約 $2.7\sim 2.8\text{g}/100\text{gFW}$ に高まり、品種間に大きな差異はみられなかった(第61図E, F)。また、いずれの品種もスクロース含量が高まり、糖の種類には大きな差がなかった。これらのことから、供試した5品種間では全糖含量は大きな差がないと考えられた。

コマツナの可食部の全糖含量は、11月19日では4品種ともに約 $0.4\sim 0.7\text{g}/100\text{gFW}$ で低かったが、1月31日には‘せいせん7号’、‘よかった菜’、‘極楽天’が約 $3\text{g}/100\text{gFW}$ に高まり、‘笑点’(約 $2\text{g}/100\text{gFW}$)よりも勝った(第61図K, L)。また、糖種では、ハウレンソウとは異なり、グルコースが最も高まり、次いでフルクトース、スクロースの順であった。これらのことから、全糖含量からみると、本試験結果からは、‘せいせん7号’、‘よかった菜’、‘極楽天’が冬期栽培に適すると考えられた。

ハウレンソウの可食部のビタミンC含量は、11月20日では5品種ともに $20\sim 40\text{mg}/100\text{gFW}$ で低かったが、2月6日にはいずれの品種も約 $150\text{mg}/100\text{gFW}$ に高まり、品種間に大きな差異はみられなかった(第62図A, B)。このことから、ハウレンソウは供試した5品種ともに、低温に遭遇することにより、ビタミンC含量が高まると考えられた。

コマツナの可食部のビタミンC含量は、11月19日では4品種ともに $40\sim 60\text{mg}/100\text{gFW}$ で低かったが、1月31日にはいずれの品種も高まった(第62図C, D)。しかし、ビタミンC含量は品種間で差がみられ‘極楽天’、‘せいせん7号’、‘よかった菜’、‘笑点’

の順に高まった。このことから、各品種ともに、低温に遭遇することにより、ビタミンC含量が高まるが、蓄積されるビタミンC含量には品種間差がみられ、ビタミンC含量からみると、本試験結果からは、‘極楽天’、‘せいせん7号’、‘よかった菜’が冬期栽培に適すると考えられた。

5) 要 約

低温伸長性の面からは、ハウレンソウでは‘ソロモン’と‘アトランタ’が、コマツナでは‘せいせん7号’が冬期栽培に適すると考えられた。

ハウレンソウ、コマツナともにいずれの品種も11月よりも厳寒期に耐凍性が増大した。しかし、厳寒期の耐凍性には品種間差異がみられ、ハウレンソウの2月6日の T_{EL20} は‘ソロモン’が‘ミストラル’よりも約 3°C 低下し、コマツナの1月31日の T_{EL20} は‘せいせん7号’が‘笑天’よりも約 2°C 低下した。これらのことから、冬期の栽培品種の選定にあたっては、生育(草丈の伸長)や収量のみならず、耐凍性の面からの選定も重要であると考えられ、本試験結果からは、ハウレンソウでは‘ソロモン’と‘アトランタ’が、コマツナでは‘せいせん7号’と‘よかった菜’が耐凍性の面からは、冬期栽培に適すると考えられた。

ハウレンソウの可食部の全糖含量は、供試した5品種ともに、低温に遭遇することにより、全糖含量が高まり、冬期栽培に適していると考えられた。コマツナの可食部の全糖含量は、1月31日において‘せいせん7号’、‘よかった菜’、‘極楽天’が高まり、本試験結果からは、上記3品種が冬期栽培に適すると考えられた。

ハウレンソウの可食部のビタミンC含量は、供試した5品種ともに、低温に遭遇することにより、ビタミンC含量が高まり、冬期栽培に適していると考えられた。コマツナの可食部のビタミンC含量は、1月31日において‘極楽天’、‘せいせん7号’、‘よかった菜’が高まり、本試験結果からは、上記3品種が冬期栽培に適すると考えられた。

以上のことから、低温伸長性、耐凍性、糖およびビタミンC含量の観点から総合的に判断すると、ハウレンソウでは‘ソロモン’と‘アトランタ’が、コマツナでは‘せいせん7号’、次いで‘よかった菜’が冬期栽培に適すると考えられた。

4 ハウス内での保温資材の使用がコマツナの耐凍性および糖とビタミンC含量に及ぼす影響

1) 目的

北東北日本海側では冬期に最低気温が沿岸部、県南内陸部、県北内陸部でそれぞれ-8、-15、-18℃程度になる。このため、冬期における無加温ハウスを利用した葉菜類生産を推進しようとする場合、農家の不安材料、すなわち、葉菜類が凍結することによって被害を受ける(凍結傷害)ことに対する不安を除去する必要がある。

冬期に日射量の多い太平洋側の葉菜類栽培において、溝底に播種し、不織布をべたがけすることで保温をすることにより、地温の著しい低下を防ぎ、生育促進効果が非常に大きいことが報告されている⁵⁾。日本海側においても農家は、生育促進効果や凍結傷害を防止することをねらいとして、不織布やビニルでのトンネルなどで保温を実施している事例が多い。しかし、凍結傷害防止を目的の一つにして保温を実施しているにもかかわらず、凍害が散見される(I章1節3.参照)。しかし、寡日射下においては、保温による生育促進効果を検証した詳細な報告が少ない。また、農家圃場において、保温を実施していても凍結傷害を受けている事例が散見される。そこで、ハウス内保温がコマツナの生育、耐凍性、糖およびビタミンC含量に及ぼす影響を検討した。

2) 試験方法

(1) 試験区の構成

試験は1996/97年、1997/98年に秋田農試内(秋田市)の100㎡パイプハウス内で実施した。

両年ともにポリエステル系不織布(1996/97年;商品名,サーモセレクト;1997/98年;商品名,パオパオ90)のべたがけ区、トンネル区およびポリ塩化ビニルトンネル(厚さ,0.075mm;以後ビニルトンネル)区を設定し、対照として無保温区を設けた。

試験規模は1996/97年は1区16㎡、1997/98年は23㎡の単区制で実施した。

播種は1996/97年11月1日、1997/98年11月4日に行い、保温は播種直後から試験終了時(1996/97年,11月1日~2月14日;1997/98年,11月4日~2月24日)まで実施した。また、保温の除去がコマツナの耐凍性、糖およびビタミンC含量に及ぼす影響を調査するため、両年ともに1月28日に各区の半分の面積の保温資材を除去した。

なお、1997/98年には、保温による草丈伸長促進効

果を評価するために、11月4日播種の不織布による保温と同日播種、10月27日播種の無保温を比較した。

(2) 耕種概要

耕種概要はI章6節2.1)と同様の方法で実施した。

(3) 測定方法

i 気温、地温および相対湿度

ハウス内気温は直径0.3mmの銅・コンスタンタン熱電対を直径5cmの通風型塩ビ管内にセットし、ハウス内中央部の地上1mの地点を測定した。不織布およびビニルトンネル内部の気温は前述の通風型塩ビ管をトンネル(高さ約60cm)内の地上30cmに設置して測定した。不織布べたがけ内部の気温は通風型塩ビ管をべたがけ内の地上5cmに設置して測定を試みたが、べたがけ外部の空気が通風型塩ビ管内に入り込み、べたがけ内部の気温を反映していないのが確認されたので、本報では示すことができなかった。

地温は気温測定と同様の熱電対センサーを酸化防止のために絶縁テープでシールドし、各区中央部の5cm深の地点に設置して測定した。

相対湿度は抵抗変化型湿度センサー(ログ電子社製)を気温測定と同様の通風型塩ビ管内にセットし、気温と同様の地点を測定した。なお、不織布べたがけ内部の湿度は気温と同様の理由により示すことができなかった。

ii 耐凍性、糖、ビタミンC含量の測定

耐凍性はI章3節2.2)、糖含量の測定はI章6節2.2)(3)、ビタミンC含量の測定はII章1節2.3)(2)と同様の方法で行った。

3) 結果

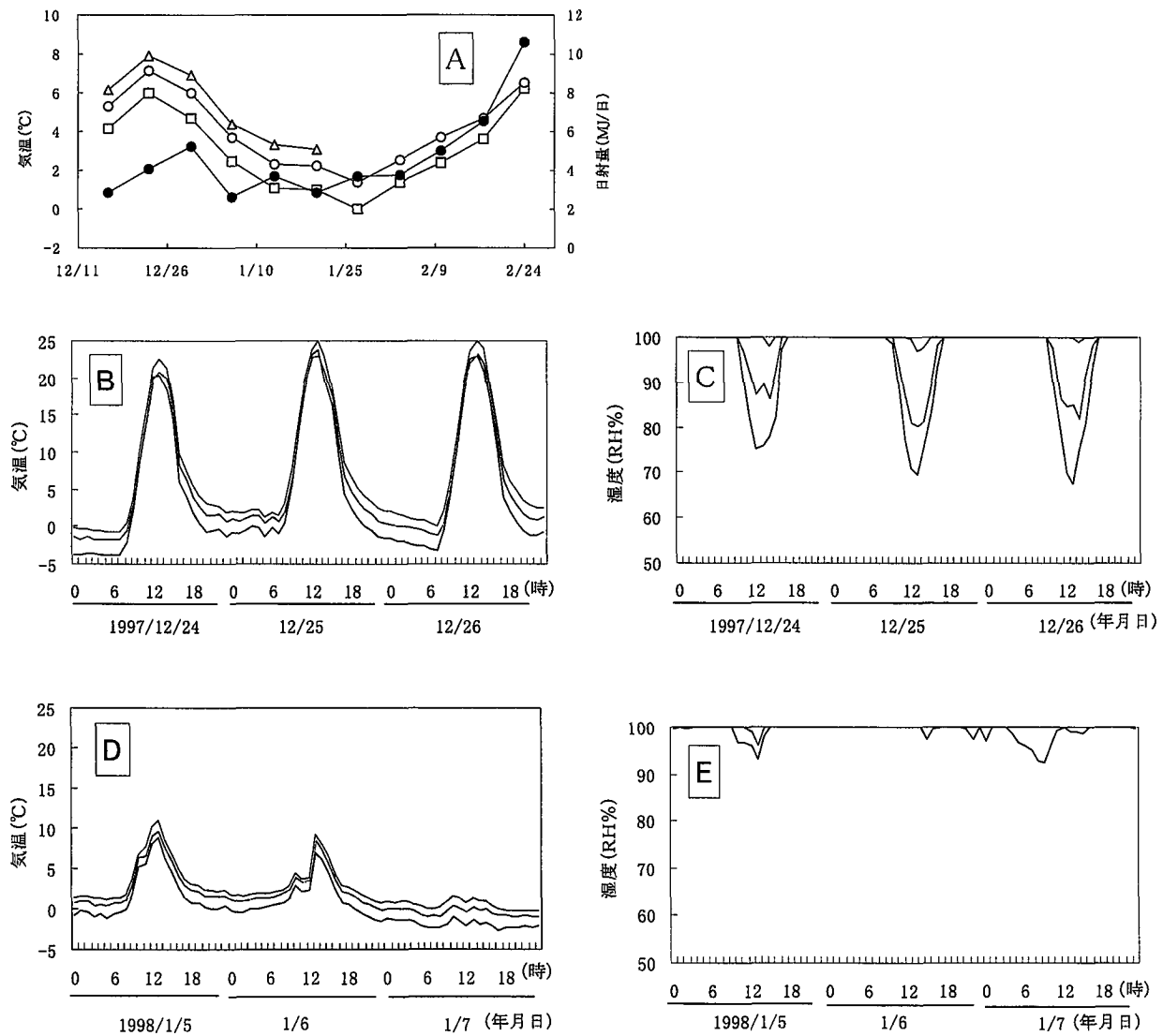
(1) 保温内部の気温、地温および湿度

第63図Aに各区の平均気温の推移を示す。ハウス内の平均気温(無保温区)は12月中下旬にかけては4~6℃、1月~2月上旬にかけては0~2℃で推移した。2月中旬以降は平均気温が上昇し、2月下旬には約6℃程度になった。不織布トンネルおよびビニルトンネル区の平均気温は無保温区よりもそれぞれ約1℃、約2℃高めに推移した。

第63図B, Dに晴天日における各区の気温および相対湿度を示す。無保温区は9時頃から急激に上昇し14時頃にピークに達して、その後急激に低下し、20時から翌朝8時頃まで最低気温域の温度で長時間経過した。不織布トンネル区の気温は9時から16時頃までは無保温区とほぼ同様に経過したが、17時から翌朝8時頃ま

では無保温区よりも1.3~2.2℃高めに経過した。ビニルトンネル区の気温は9時から16時頃までは無保温区よりも約2℃、17時から翌朝8時頃までは無保温区よりも2.5~3.5℃高めに経過した。無保温区の相対湿度は日中の気温上昇に伴って低下し、14時頃には70~75%になった。不織布トンネル区の相対湿度は14時頃には80~85%になった。しかし、ビニルトンネル区の相対湿度は昼夜100%付近で経過した。なお、1997年12月24日、25日、26日の日射量はそれぞれ9.7、10.1、10.4 MJ/day、最高気温はそれぞれ5.6、8.0、8.6℃、最低気温はそれぞれ-3.9、-0.9、-2.3℃であった(アメダスデータ、秋田市)。

第63図C, Eに曇天日における各区の気温および相対湿度を示す。無保温区の日中の気温上昇は晴天日に比べて少なかった。夜間の不織布トンネルおよびビニルトンネル区の気温は、無保温区よりもそれぞれ1~1.5℃、1.5~2.5℃高めに経過したが、晴天日に比べると無保温区との差は小さかった。無保温区の相対湿度は日中も低下せず90%以上であったが、不織布トンネルおよびビニルトンネル区の相対湿度は昼夜をとおして100%で経過した(第3図)。なお、1998年1月5日、6日、7日の日射量はそれぞれ4.5、3.0、2.0 MJ/m²/day、最高気温はそれぞれ0.1、1、-0.9℃、最低気温はそれぞれ-2.6、-2.5、-5.3℃であった(アメ

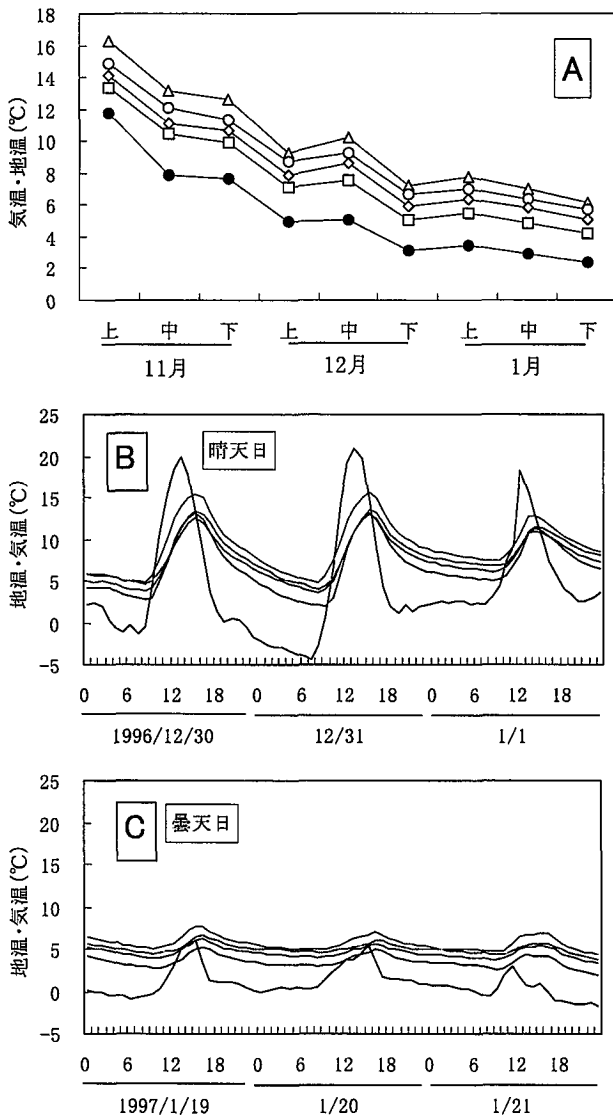


第63図 保温内部の平均気温の推移(1997年度)(A)、晴天日におけるハウス内と保温内部の気温(B)、相対湿度(C)および曇天日におけるハウス内と保温内部の気温(D)および相対湿度(E)

注:A図 [O, 不織布トンネル; Δ, ビニルトンネル; □, ハウス内(無保温); ●, 日射量(アメダス)].
 B, C図: —, 不織布トンネル; - - -, ビニルトンネル; — — —, ハウス内。D, E図: 図中の線色はB, Cと同様。

ダスデータ, 秋田市)。

第64図Aに各区の5 cm深の地温および無保温区の気温の推移を示す。無保温区の地温は11月上旬には約14℃であったが、その後次第に低下し、12月上旬には約7℃になり、12月下旬から1月下旬にかけては4~5℃で推移した。不織布のべたがけおよびトンネル区の地温は無保温区の地温よりも1~1.5℃、ビニルトンネル区の地温は無保温区の地温よりも約2℃高めに推移した。



第64図 5 cm深地温およびハウス内の気温の推移 (A) および晴天日と曇天日における5 cm深地温とハウス内気温 (B, 晴天日; C, 曇天日)

注: A図 (□, 不織布Aべたがけ; ○, 不織布Aトンネル; △, ポルトンネル; ■, 無保温; ●, ハウス内気温)。B, C図 (—, 不織布Aべたがけ地温; —, 不織布Aトンネル地温; —, ポルトンネル地温; —, 無保温地温; —, ハウス内気温)。

第64図B, Cに晴天日と曇天日における各区の5 cm深の地温を示す。晴天日の無保温区の地温は10時頃から上昇し、15時頃にピークの12~13℃になり、その後、翌朝9時頃まで徐々に低下した。不織布のべたがけとトンネル区の日中(12時~18時)の地温は無保温区の地温と同程度であったが、19時から翌日の11時頃までの地温は無保温区よりも1~1.5℃高まった。ビニルトンネル区の地温は無保温区よりも終日2~2.5℃高まった。曇天日の無保温区の地温は晴天日に比べ、日中の温度上昇は極めて小さく、最低地温と最高地温との差は、わずか1.5~2℃であった。無保温区の地温に比べ、不織布のべたがけとトンネル区の地温は終日1~1.5℃、ビニルトンネル区の地温は終日2~2.5℃高かった。

(2) 生育

第65図A, Bに1996/97年、1997/98年の草丈の推移を示す。両年ともに各保温区は無保温区に比べて草丈の伸長が速かった。コマツナの出荷規格は草丈で22~30cmとされており³⁾、草丈が22cmに達した日は1996/97年は不織布トンネル区が約25日、不織布べたがけおよびビニルトンネル区が約15日、無保温区よりも早まり、また、1997/98年は各保温区が無保温区よりも約20日早まった。しかし、1997年10月27日播種(無保温)と11月4日播種(無保温)を比較すると、10月27日播種が11月4日播種よりも草丈が22cmに到達した日が約30日早まった。このことから、各保温区の生育促進効果は播種期を4~5日早めるのと同程度と考えられる。

第65図C, Dに1996/97年、1997/98年における生体重の推移を示す。1996/97年は生体重の増加は不織布のべたがけ区とトンネル区が無保温区よりも大きく、ビニルトンネル区は無保温区と同程度であった。無保温区の1997年1月24日時点(草丈が22cmに到達した日)の生体重は約17g/個体であったが、同日の不織布のべたがけ区とトンネル区およびビニルトンネル区の生体重はそれぞれ約24、約26、約18g/個体であった。1997/98年は生体重の増加は不織布のべたがけ区とトンネル区が無保温区よりも大きかったが、ビニルトンネル区は無保温区よりも小さかった。無保温区の1998年1月30日時点(草丈が22cmに到達した日)の生体重は約21g/個体であったが、不織布のべたがけ区とトンネル区およびビニルトンネル区の生体重はそれぞれ約25、約27、約19g/個体であった。

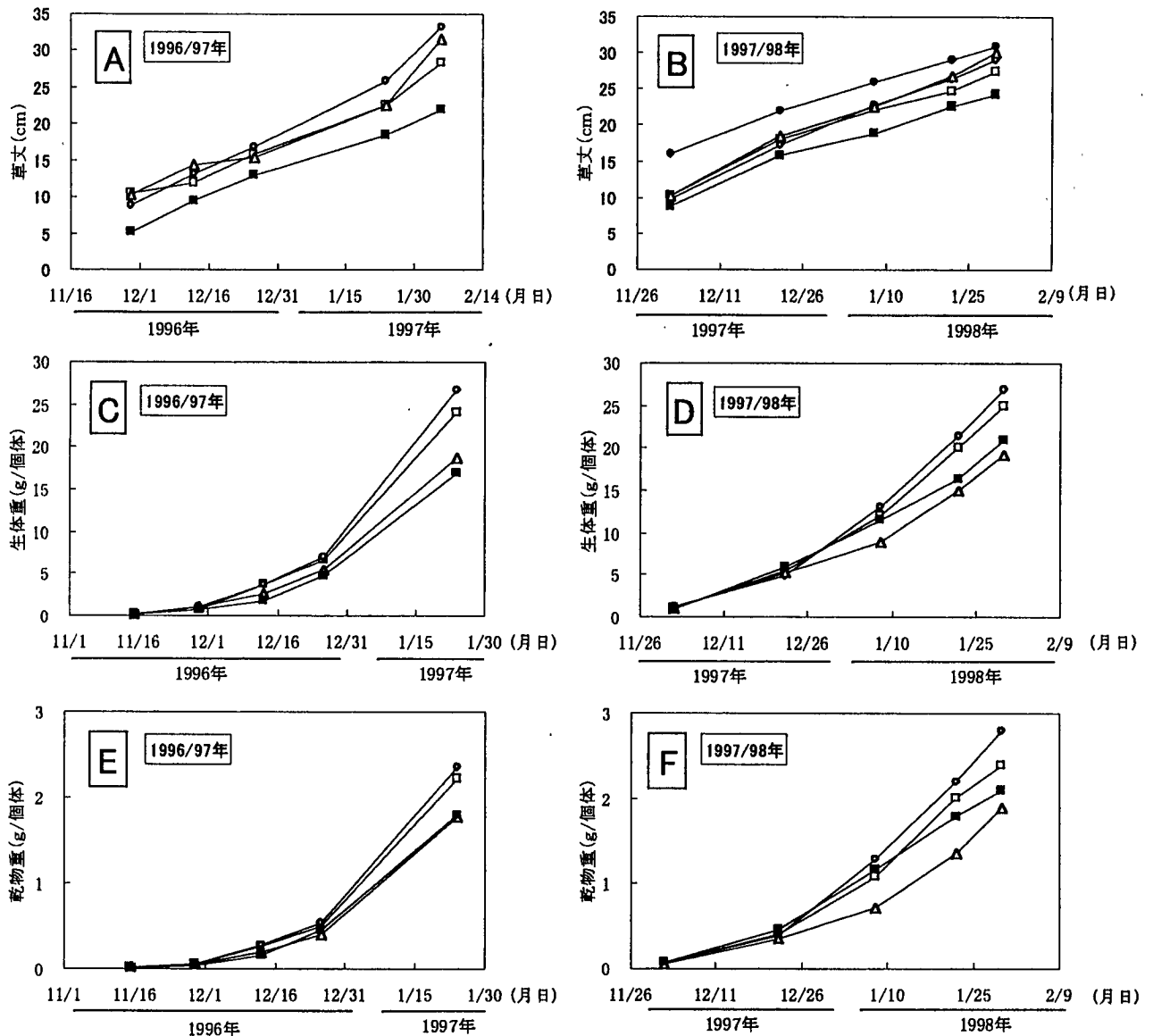
第65図E, Fに1996/97年、1997/98年における乾物重の推移を示す。乾物重は両年ともに不織布のべたが

け区とトンネル区では無保温区よりも増加が大きかったが、ビニルトンネル区では無保温と増加が同程度(1996/97年)ないしは小さかった(1997/98年)。

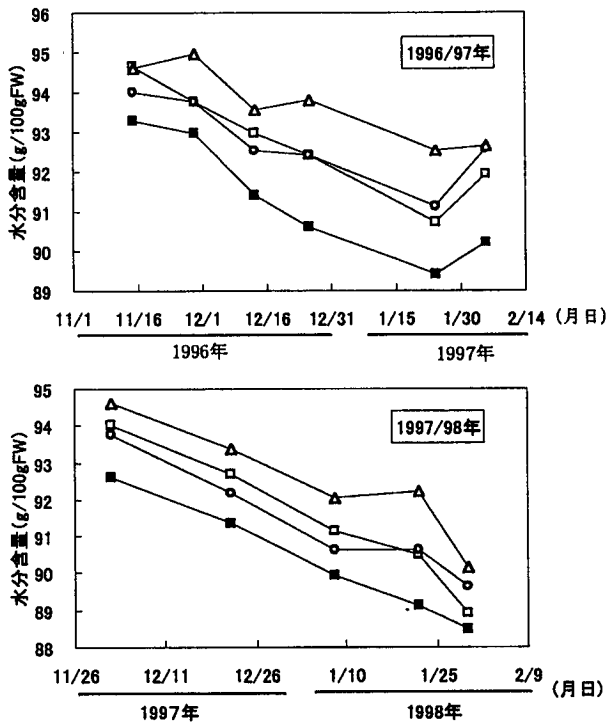
第66図に1996/97年、1997/98年における作物体内含水率の推移を示す。両年ともに含水率は11月から1月下旬にかけて各区ともに漸減した。区間で比較すると、含水率は無保温区が最も低く、次いで不織布のべたがけ区とトンネル区が低く、ビニルトンネル区が最も高

く推移した。

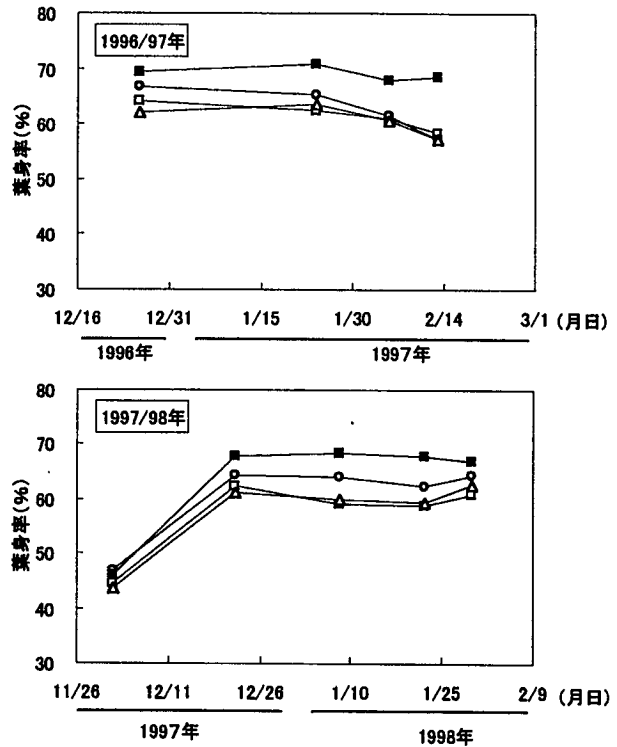
第67図に1996/97年、1997/98年における葉身率(個体重に占める葉身重の割合で表現)の推移を示す。両年ともに葉身率は無保温区が最も高かった。各保温区間の差は小さいが、両年ともに、不織布トンネル区が不織布べたがけ区とビニルトンネル区よりもやや高い傾向がみられた。



第65図 草丈の伸長 (A, B)、生体重 (C, D)、乾物重の増加 (E, F) に及ぼす保温と播種期の影響
 注: A (1996/97年; □, 不織布Aべたがけ; ○, 不織布Aトンネル; △, ビニルトンネル; ■, 無保温)。B [1997/98年; □, 不織布Cべたがけ; ○, 不織布Cトンネル; △, ビニルトンネル; ■, 無保温(11月4日播種); ●無保温(10月27日播種)]。C, 1996/97年; D, 1997/98年。C図中の印はAと同様、D図中の印はBと同様。E, 1996/97年; F, 1997/98年。E図中の印はAと同様、F図中の印はBと同様。



第66図 水分含量に及ぼす保温の影響
注：図中の印は第65図Aと同様



第67図 葉身率に及ぼす保温の影響
注：図中の印は第65図Aと同様。葉身率は個体重に占める葉身中の割合で表示。

(3) 耐凍性

第14表に1997年1月28日と1998年1月28日における T_{EL15} および T_{EL50} を示す。 T_{EL15} は両年ともに各保温区は無保温区ほどには低下しなかった。1997年1月28日における不織布のべたがけ区とトンネル区およびビニルトンネル区と無保温区との T_{EL15} の差は、それぞれ2.3、2.4、2.0℃で、また、1998年1月28日におけるそれは、それぞれ2.0、1.2、2.6℃であった。 T_{EL50} も両年ともに各保温区では無保温区ほどには低下せず、1997年1月28日における不織布のべたがけ区とトンネル区およびビニルトンネル区と無保温区との T_{EL50} の差は、それぞれ1.7、1.5、2.5℃で、また、1998年1月28日においてはそれぞれ4.3、1.7、4.6℃であった。

第15表に保温資材の除去が T_{EL15} および T_{EL50} に及ぼす影響を示す。保温資材を除去すると各区ともに T_{EL15} および T_{EL50} が低下し、2月13日(除去16日後)における各保温除去区と無保温区との差は T_{EL15} で0.3~0.5℃と大きく縮まった。また、 T_{EL50} では各保温除去区と無保温区との間には差が認められなかった。一方、保温を継続した場合は、各保温区と無保温区との差は大きく、その差は T_{EL15} 、 T_{EL50} ともに2~3℃であった。

第14表 保温資材の使用が耐凍性に及ぼす影響

1997年1月28日調査		T_{EL15} ℃	T_{EL50} ℃
保温	不織布Aべたがけ	-10.9	-13.0
	不織布Aトンネル	-10.8	-13.2
	ビニルトンネル	-10.6	-12.2
無保温		-13.2	-14.7
1998年1月28日調査		T_{EL15} ℃	T_{EL50} ℃
保温	不織布Aべたがけ	-10.8	-12.3
	不織布Aトンネル	-11.6	-14.9
	ビニルトンネル	-10.2	-12.0
無保温		-12.8	-16.6

第15表 保温資材の使用および撤去が耐凍性に及ぼす影響

			1月28日	2月13日	2月12日
			℃	保温撤去 ℃	保温継続 ℃
T _{EL15}	保温	不織布Aべたがけ	-10.9	-12.4	-10.7
		不織布Aトンネル	-10.8	-12.5	-9.7
		ビニルトンネル	-10.6	-12.3	-10.4
		無保温	-13.2	-12.8	
T _{EL50}	保温	不織布Aべたがけ	-13.0	-14.2	-11.9
		不織布Aトンネル	-13.2	-13.9	-11.4
		ビニルトンネル	-12.2	-13.9	-11.2
		無保温	-14.7	-14.5	

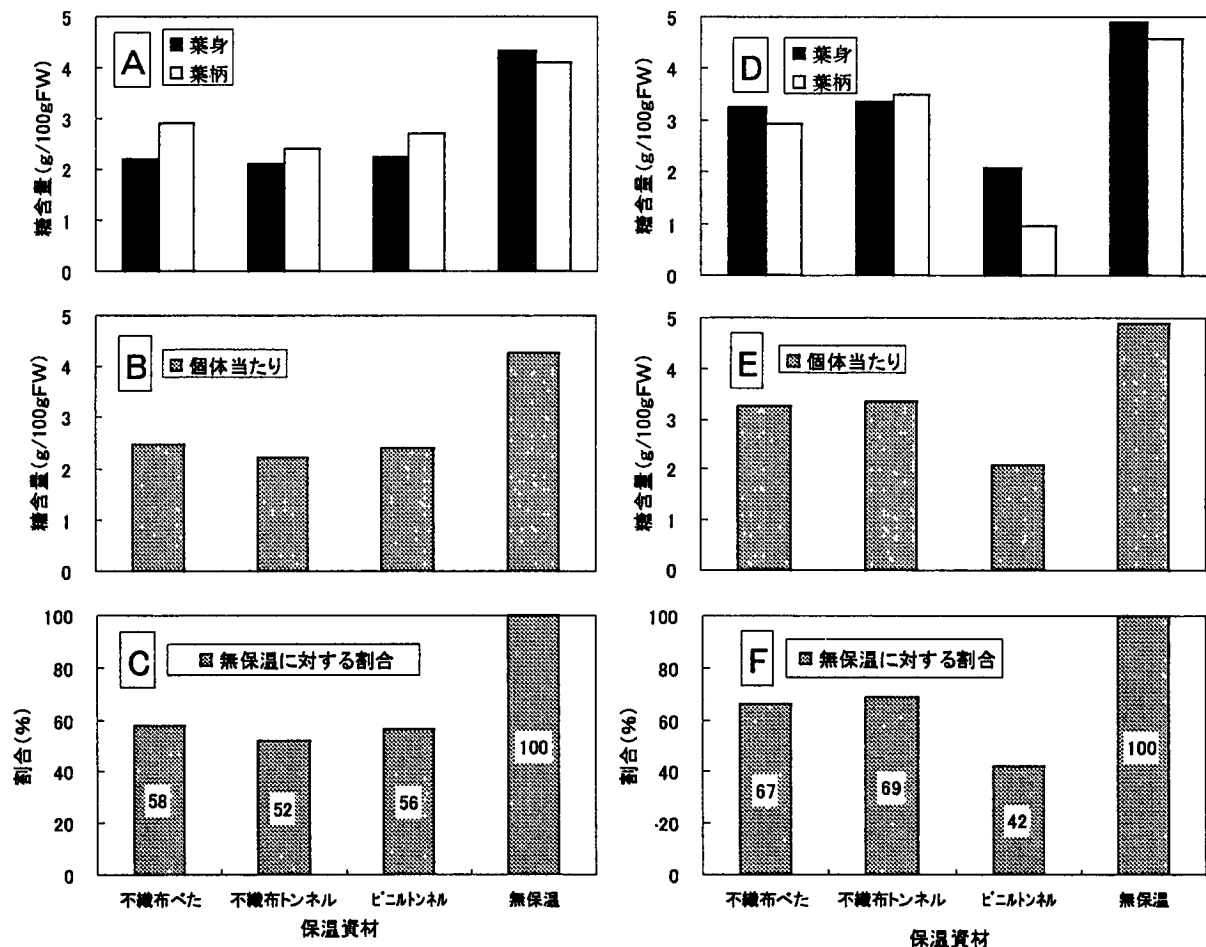
注：播種後（1996年11月1日）保温を開始した。1997年1月28日に一部保温を撤去し、他は保温を継続した。

(4) 糖およびビタミンC含量

i 糖含量

第68図に1997年1月28日と1998年1月28日における糖含量を示す。不織布のべたがけ区とトンネル区およびビニルトンネル区の葉身と葉柄の糖含量は、両年と

もに無保温区に比べて低かった。すなわち、無保温区に対する各保温区の糖含量割合は、1996/97年においては不織布のべたがけ区とトンネル区およびビニルトンネル区がそれぞれ58、52、56%、1997/98年におけるそれは、それぞれ67、69、42%であった。

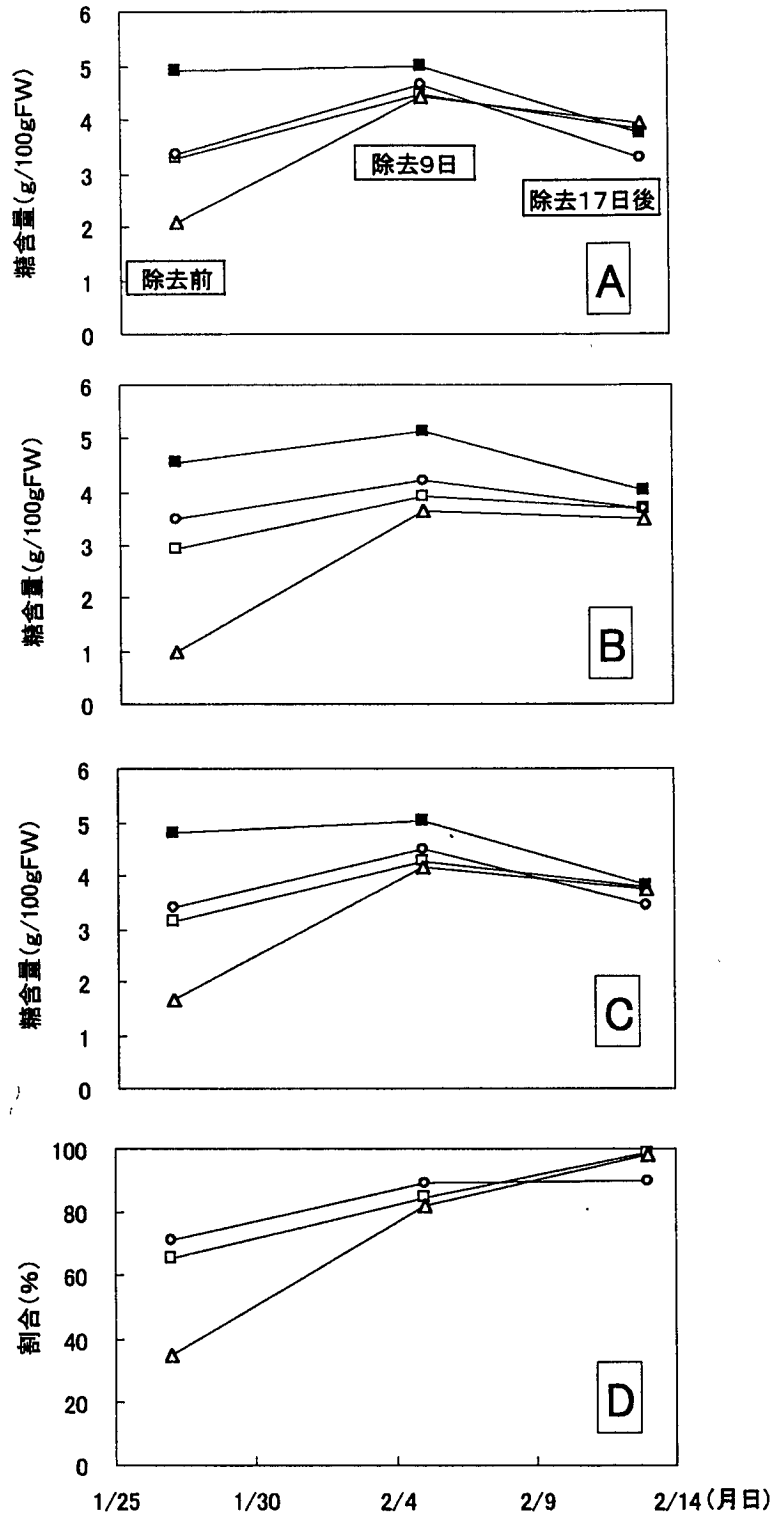


第68図 保温資材の使用が糖含量に及ぼす影響

注：A, B, C； 1997年1月28日調査。D, E, F； 1998年1月28日調査。

第69図に保温除去後の糖含量の経時変化を示す。葉身、葉柄ともに保温除去9日目には速やかに糖含量が増加し、除去17日目にはほぼ無保温区と同程度になった。

保温を除去すると各区の糖含量は除去9日目には無保温区の80~90%になり、除去17日後には無保温区の90%以上になった。



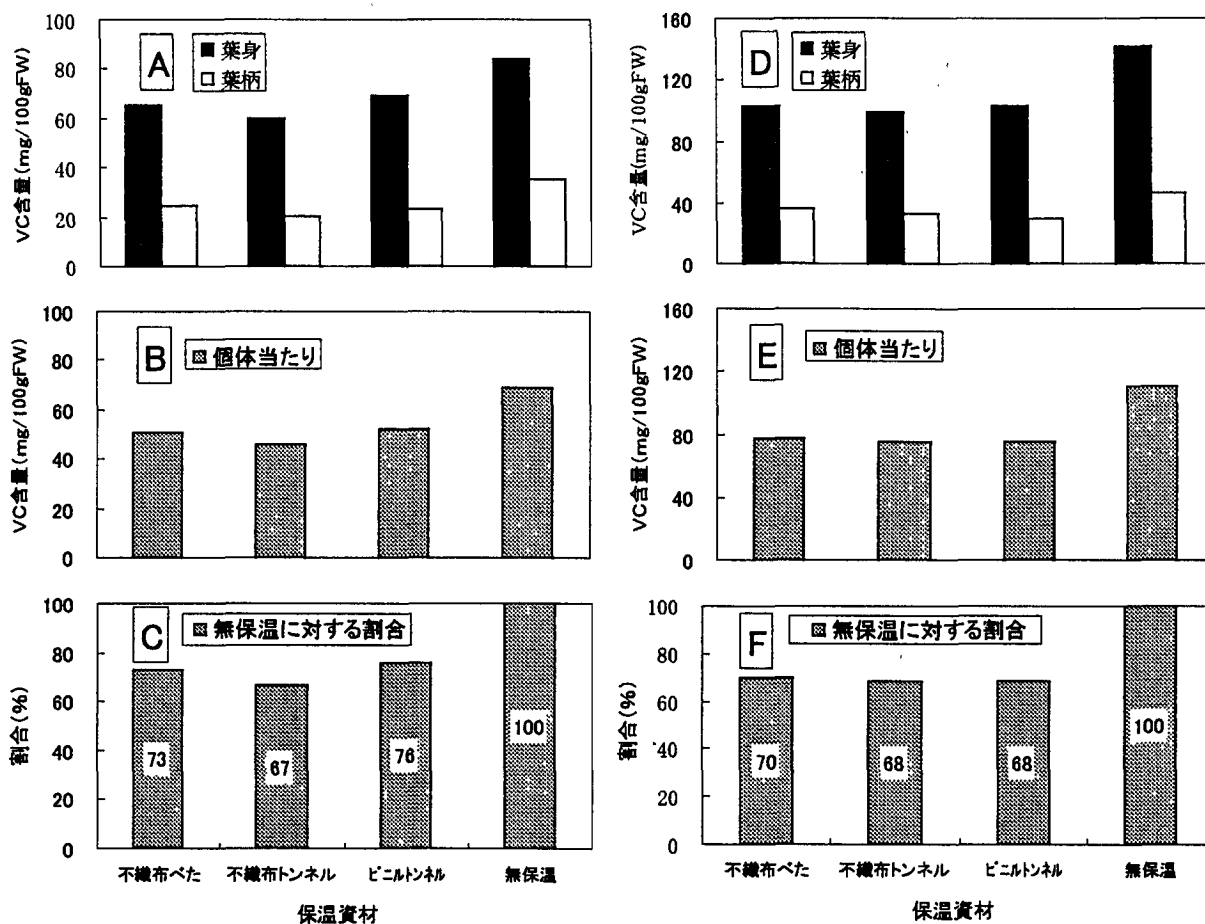
第69図 保温資材の除去が糖含量に及ぼす影響 (1997年度)

注：A, 葉身部；B, 葉柄部；C, 可食部当たり；D, 無保温に対する保温各区の糖含量割合。□, 不織布Cべたがけ；○, 不織布Cトンネル；△, ビニルトンネル；■, 無保温。播種後(1997年11月1日)保温を開始し、1月28日に一部、保温を撤去し、他の一部は保温を継続した。

ii ビタミンC含量

第70図に1997年1月28日と1998年1月28日におけるビタミンC含量を示す。ビタミンC含量は保温の有無にかかわらず、葉身において高く、葉柄において低かった。不織布のべたがけ区とトンネル区およびビニルトンネル区の葉身と葉柄のビタミンC含量は、両年とも

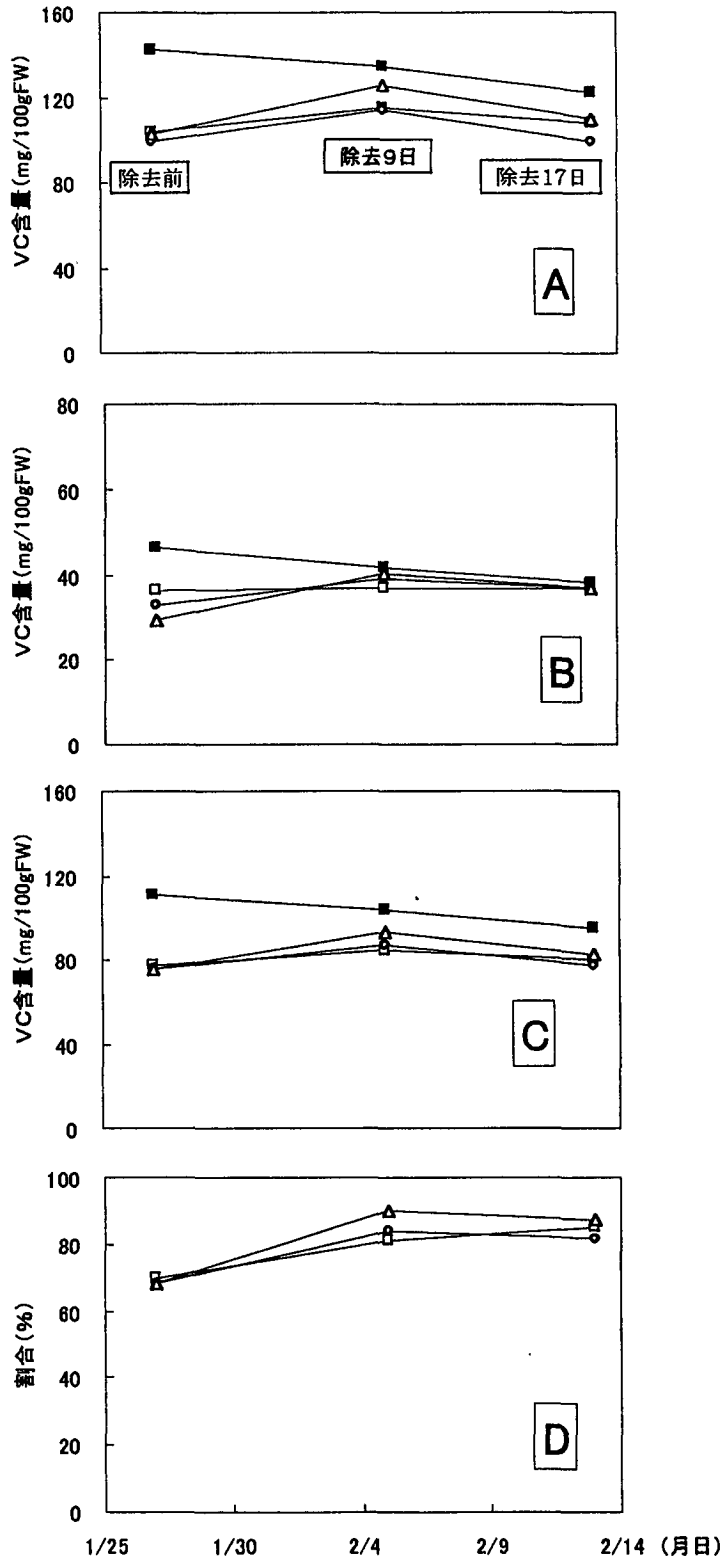
に無保温区に比べて低かった。すなわち、各保温区の無保温区に対するビタミンC含量割合は、1996/97年においては不織布のべたがけ区とトンネル区、ビニルトンネル区がそれぞれ73、67、76%、1997/98年におけるそれは、それぞれ70、68、68%であった。



第70図 保温資材の使用がビタミンC含量に及ぼす影響
 注：A, B, C； 1997年1月28日調査。D, E, F； 1998年1月28日調査。

第71図に保温除去後のビタミンC含量の経時変化を示す。葉身においてビタミンC含量は保温の除去9日目には若干増加し、除去17日目には無保温区のビタミンC含量の低下と同様に若干減少した。葉柄において

は除去9日目以降は無保温区と同程度になった。無保温区に対する保温除去後のビタミンC含量割合は、各区において保温の除去9日目以降は無保温区の80~90%まで増加した。



第71図 保温資材の除去がVC含量に及ぼす影響 (1997年度)

注：□, 不織布Cべたがけ；○, 不織布Cトンネル；△, ビニルトンネル；■, 無保温。播種後(1997年11月1日)保温を開始し、1月28日に一部、保温を撤去し、他の一部は保温を継続した。A, 葉身部；B, 葉柄部；C, 可食部当たり；D, 無保温に対する保温各区の糖含量割合。

4) 考察

コマツナの草丈の伸長は気温の影響を大きく受ける。播種期から草丈が22cm程度になるまでの無保温区の積算気温は、1996/97年が497°C、1997/98年が469°Cであった。不織布トンネル、ビニルトンネル内部の平均気温はハウス内気温よりもそれぞれ約1°C、約2°C高めに推移した(第63図A)。このため、いずれの保温区も無保温区よりも草丈が22cmに達する日が約20日ほど早まった(第65図A, B)。一方、1997/98年の播種期は11月4日であるが、播種期を7日早めると(10月27日播種)、無保温でも草丈が22cmに達する日は12月20日頃で、11月4日播種よりも約30日早まった。このことから、各保温区の草丈伸長効果は播種期を4~5日早めると同程度の効果であると考えることができる。

生体重、乾物重の増加は不織布のトンネル区およびべたがけ区は無保温区よりも大きかった。しかし、ビニルトンネル区の生体重と乾物重は無保温区と同程度ないしは無保温区よりも少なかった(第65図C~F)。保温内部の気温はビニルトンネル区が最も高いにもかかわらず、生体重、乾物重の増加に対する効果はほとんど認められなかった。これは、保温内部の相対湿度が無保温区よりも著しく高いことが影響していると考えられる。ビニルトンネル区では相対湿度が常時高く、葉が日中も濡れている状態で推移した。このため、気孔開度が小さく、CO₂交換が不十分であったと推測される。

水分含量はビニルトンネル>不織布トンネル、べたがけ>無保温区の順に高かった(第66図)。また、観察では、葉色は各保温区よりも無保温区が濃緑であり、葉身の「照り」も各保温区は無保温に比べ劣った。このことから、各保温区は無保温区に比べ、軟弱に生育し、外観的に商品性が劣ると考えられた。これは、冬期に寡日射条件になる本県の気象下において、保温資材を使用することにより、光線透過率(不織布は約80%、ビニルは約90%)が低下し、葉への直達日射量が減少したこと、また、保温内部の相対湿度が無保温区よりも高く推移したためと考えられる。

葉身率は無保温区が最も高く、各保温区では低下した(第67図)。一般に、ハウレンソウやコマツナなどの葉菜類を密植した場合には、個体間で受光量の競合がおき、徒長するが、その場合、葉柄が長くなるとともに、葉身の厚さは薄くなり、葉身率が減少する。このような形態のハウレンソウやコマツナは商品性が劣る。このことから、寡日射下で保温を継続すると、形態的にも好ましいコマツナが生産できない。さらに、

糖含量は葉身と葉柄で大差がないが、ビタミンC含量は葉身で多く、葉柄で少ない(後述)。そのため、葉身率が低いと、個体当たりのビタミンC含量が低下することになる。このことから、保温を継続すると、葉身率が無保温よりも低下し、ビタミンC含量が低下する一因になる。

以上のことをまとめると、各保温区では収穫期初期(草丈で約22cm)が無保温区よりも約20日早まるが、これは播種期を4~5日早めるのと同程度の効果とであること、また、各保温区では無保温区に比べ、水分含量が高く、葉色が淡く、軟弱に生育し、葉身率も低くなり、商品性が低下する可能性のあることが明らかになった。

冬期に保温を図る目的は、先に述べた生育促進に加え、凍結傷害防止にある。保温をすることにより、夜間の気温は1~3°Cほどハウス内気温よりも高く保たれる。しかし、耐凍性を測定した結果、各保温区は無保温区よりも耐凍性が2~4°Cほど劣ることが明らかとなった(第14表)。植物の耐凍性の誘導には気温が大きく影響する(酒井, 1982)。各保温区では気温が無保温区よりもやや高めに推移したため、耐凍性が無保温区に比べ劣ったと考えられる。このことから、保温をして生育させると、コマツナの耐凍性が高まらず、かえって、凍結傷害を受ける危険性が高まるといえる。

保温をして、作物体の周囲の温度を高く保って生育させると、耐凍性は高まらない。しかし、保温を撤去すると、コマツナの耐凍性は無保温並に高まる(第15表)。ハウレンソウとコマツナの耐凍性と耐凍性測定前7日間の最低気温との間に高い相関関係が認められ、過去7日間の最低気温を積算することで、その時点の耐凍性を推定できる(I章6節)。この知見を活用し、栽培ハウス内の最低気温を測定して、栽培しているコマツナの耐凍性を推定し、もし、耐凍性を上回る寒波が予想される時は、不織布のトンネルやべたがけで保温をし、緊急避難的に作物を保護することが耐凍性を高めながら凍結傷害を回避できる手段と考えられる。

葉身と葉柄の糖含量を比べると、両部位において糖含量は大差がない(第68図)。各区間を比べると、無保温区に比べ、各保温区では糖含量が低下した。ビタミンC含量は保温のいかんにかかわらず、葉身が高く、葉柄で少ない。各区間を比べると、無保温区に比べ、各保温区ではビタミンC含量が低下した(第70図)。

寡日射下においても低温条件でコマツナの糖とビタミンC含量が高まる(II章1節)。また、ハウス栽培のハウレンソウ、コマツナの糖とビタミンC含量はハ

ウス内気温と密接な関係にあり、収穫前10日間のハウス内の平均最低気温が0～-5℃程度になると糖とビタミンC含量が高まる(Ⅱ章2節)。このことは、本県の冬期の低温条件を有効に利用すると、ハウレンソウとコマツナの糖とビタミンC含量を高めることが可能であることを示している。しかし、保温を継続して生育させると、低温を活用できず、糖とビタミンC含量を高めることができないことが明らかとなった。

保温を継続するとコマツナの糖とビタミンC含量は高まらないが、保温を除去すると糖とビタミンC含量は無保温並に高まる(第69図、第71図)。先に、作物の耐凍性を上回る寒波の到来が予想される場合には、不織布トンネルやべたがけで保温することが有効であることを記述したが、保温を除去するとコマツナの糖とビタミンC含量は無保温並に回復するので、緊急避難的な不織布の使用は糖とビタミンC含量の観点からは、さほど影響しないと考えられる。

5) 要約

不織布トンネル、ビニルトンネル内の平均気温はハウス内気温(無保温)よりもそれぞれ約1℃、約2℃高まる。このため、播種期から保温を継続することにより、無保温よりも出荷期(草丈で22cm)が約20日程早まった。しかし、これは播種日を4～5日早くするのと同程度の効果で、それほど大きな効果ということではない。

保温を継続するとコマツナは軟弱に生育し、葉色が淡く、また、葉身率も低下し、商品性が低下する。

保温により夜間の気温は1～3℃高く保たれる。しかし、耐凍性は保温を継続すると無保温よりも2～4℃劣る。このことから、保温を継続することにより、かえって凍結傷害を受ける可能性が高まるといえる。寡日射下の本県においては、不織布のべたがけやトンネルはコマツナの耐凍性を上回る寒波の到来時に緊急避難的に使用することが望ましい。

寡日射下においても低温条件により葉菜類の糖およびビタミン含量が高まる(Ⅱ章1節)。しかし、保温を継続すると糖およびビタミンC含量は無保温よりも低下する。このことから、保温を継続すると、本県の冬期の低温を活用した糖およびビタミンC含量の高い葉菜類生産ができないことが明らかとなった。ただし、作物の耐凍性を上回る寒波の到来が予想される場合の緊急避難的な不織布トンネルやべたがけでの保温は有効である。

5 ハウス内への外気導入がハウレンソウとコマツナの耐凍性および糖とビタミンC含量に及ぼす影響

1) 目的

冬期に無加温ハウス内で葉菜類を生産する場合、厳しい寒さの中での収穫や除雪作業が伴う。したがって、農家の冬期葉菜類栽培に取り組む意欲を喚起するためには、葉菜類栽培が可能であることを示すのみでは必ずしも十分ではなく、冬期の低温条件が葉菜類の品質を高めるための利点であることを示す必要がある。加藤ら³²⁾は日射量の豊富な太平洋側において、外気を導入した低温処理により、ハウレンソウの糖やビタミン含量が高まることを見出した。また、寡日射下においても低温処理によりコマツナの糖やビタミンC含量が高まる(Ⅱ章1節)。

そこで、ハウスのサイド開放による冷気のハウス内への積極的導入がハウレンソウとコマツナの生育、耐凍性、糖およびビタミンC含量に及ぼす影響を検討した。

2) 試験方法

(1) 試験区の構成

試験は1998/99年、1999/2000年(秋田市)および2000/01年(雄和町)の3カ年に農試内の100㎡パイプハウス内で実施した。各年ともに2棟のパイプハウス(ともに100㎡)にハウレンソウとコマツナを播種し、両作物の草丈が約20cmになった時点で、一方のパイプハウスのサイドを開放して、ハウス内へ冷たい外気を導入した(以後、開放ハウス)。各年のハウスの開放時期は、1998年12月25日、1999年12月8日、2000年1月12日である。また、他方のパイプハウスは対照として密閉して管理した(以後、密閉ハウス)。

開放ハウスの様子を第79図に示す。本県は冬期に北西の風が強く、吹雪の日には風速が20m/s程度になる。ハウス内に強風が入り込むと作物が傷むので、ハウスを開放する際、防風ネットをハウスのサイドに張った(第79図A、B)。防風ネットはビニル製の目合い1mmのものを使用した(商品名:サンサンネット)。しかし、防風ネットのみでは吹雪の日にはハウス内に雪が入り込むので(第79図C)、ハウス内にビニルフェンスを設置した(第79図D)。

(2) 耕種概要

1998/99年、1999/2000年、2000/01年の3カ年におけるハウレンソウの播種日はそれぞれ1998年10月15日、1999年10月21日、2000年10月17日、コマツナの播種日は1998年10月23日、1999年10月28日、2000年10月24日

である。また、ハウスの開放日は、1998年12月25日、1999年12月8日、2001年1月12日である。

耕種概要はI章6節2. 1)と同様の方法で実施した。

(3) 測定方法

i 気温

気温の測定はII章と同様の方法で行った。外気の測定は、ハウスの外側に直径0.3mmの銅・コンスタント熱電対を直径5cmの通風型塩ビ管内にセットして測定した。

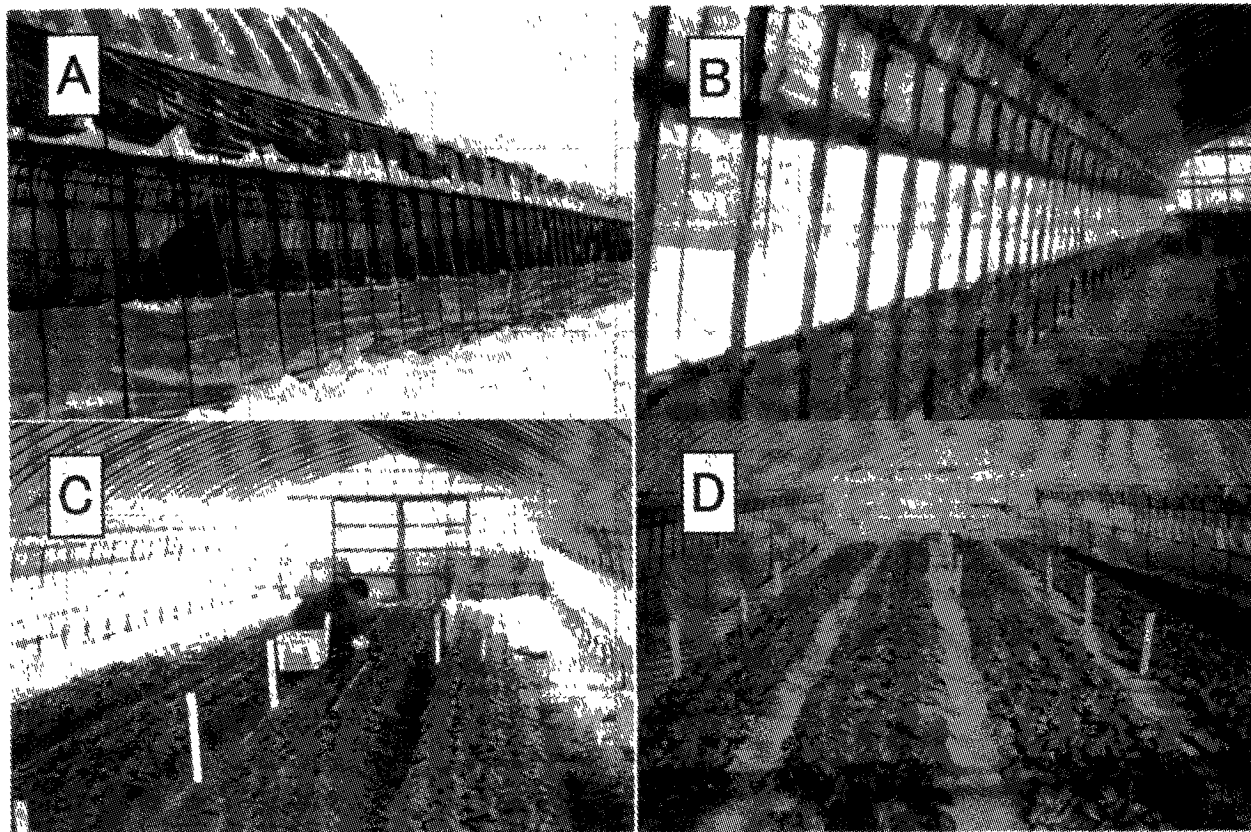
ii 耐凍性

耐凍性はI章3節2. 2)と同様の方法で行った。1998/99年、1999/2000年は磨砕した葉片組織からの電

解質漏出を傷害率100%として算出したので、耐凍性は T_{EL15} と、広く耐凍性の指標に用いられている T_{EL50} と併記して示した。2000/01年は -80°C での凍結後の融解によって完全に致死させた葉片組織からの電解質漏出を傷害率100%として算出したので、耐凍性は T_{EL20} と T_{EL50} と併記して示した(I章2節参照)。

iii 糖およびビタミンC含量

1998/99年、1999/2000年の糖含量の測定はI章6節2. 2) (3)、ビタミンC含量の測定はII章1節2. 3) (2)と同様の方法で行った。2000/01年は糖含量の測定はI章3節2. 4)、ビタミンC含量の測定はIII章2節2. 2) (2)と同様の方法で行った。



第79図 ハウスを開放している様子

注：写真A, 防風ネットを張り、サイドを開放したハウス。

写真B, ハウスの内側にハウスパッカーで防風ネットをとめている様子。

写真C, 防風ネットのみでは吹雪の日にはハウス内に雪が入り込む。

写真D, 開放したハウス内の様子 (ハウスの両側にビニルフェンスを設置している)。

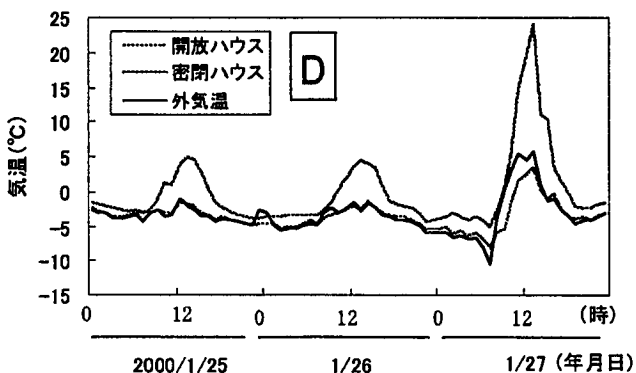
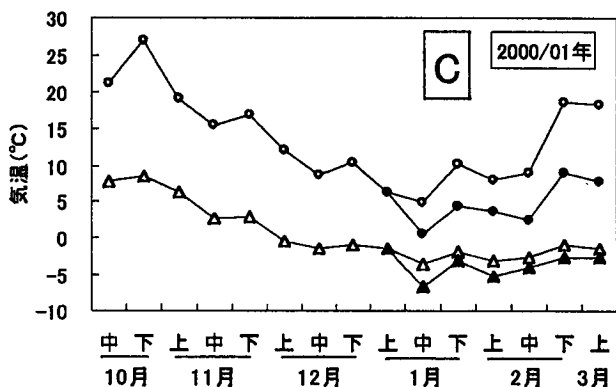
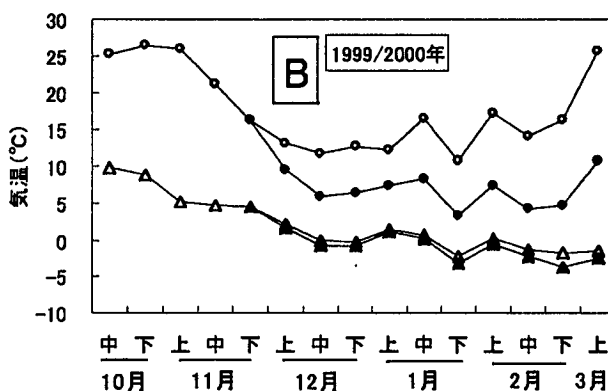
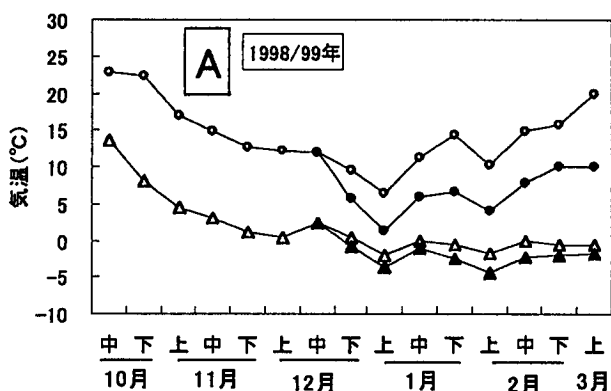
3) 結果

(1) 気温

第72図A、B、Cに各年の密閉ハウスと開放ハウス内の最高および最低気温の推移を示す。1998/99年、1999/2000年(秋田市)の密閉ハウスの厳寒期の12月下旬から2月上旬にかけての最高気温は6~15°Cで推移し、最低気温は-2~1°Cで推移した。開放ハウスの厳寒期の12月下旬から2月上旬にかけての最高気温は2~8°Cで推移し、最低気温は-4~0°Cで推移した。2000/01年(雄和町)の密閉ハウスの厳寒期の12月下旬から2月上旬にかけての最高気温は5~10°Cで推移し、最低気温は-4~-1°Cで推移した。開放ハウスの厳寒期の12月下旬から2月上旬にかけての最高気温は0~5°Cで推移し、最低気温は-6~-3°Cで推移した。このことから、12月下旬から2月上旬にかけての開放ハウスの最高気温は、密閉ハウスに比べ3カ年ともに5~10°C低めに推移した。また、開放ハウ

スの最低気温は密閉ハウスに比べ、3カ年ともに共通して1~2°C低めに推移したといえる。

第72図Dに2000年1月25日~1月27日にかけての外気温、密閉および開放ハウス内気温を示す。日中の密閉ハウス内の気温は、1月25、26日(曇天日)は9時頃から上昇し、14時頃には外気温よりも6~7°C高まった。そして、16時頃からは急激に低下し、翌日の8時頃まで外気温よりも1~2°Cほど高めに経過した。1月27日(晴天日)は密閉ハウス内の気温は9時頃から急激に高まり、14時頃は約25°Cとなった。開放ハウス内の気温は、曇天日には日中も上昇せず、終日はほぼ外気温並に推移した。1月27日の外気温は8時頃から上昇し、13時には5.8°Cになったが、開放ハウス内の気温は上昇せず、13時においても3.5°Cであった。なお、1月25、26、27日の日照時間はそれぞれ0.6、1.4、6.2時間であった。



第72図 試験期間内のハウス内気温の推移 (A, B, C) と晴天日と曇天日のハウス内気温 (D)

注: A, B, C: 最高気温 (○, 密閉); (●, 開放)、最低気温 (△, 密閉); (▲, 開放)

D: 日照時間 1/25, 0.6hr; 1/26, 1.4hr; 1/27, 6.2hr.

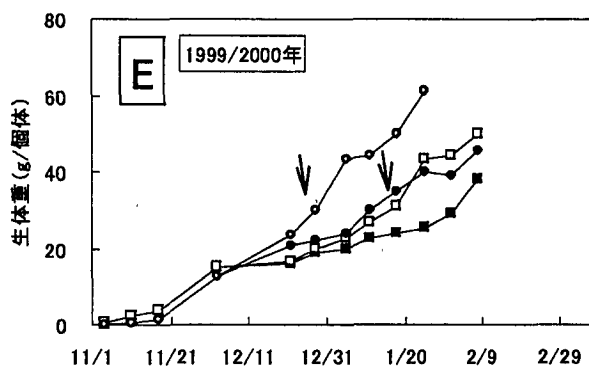
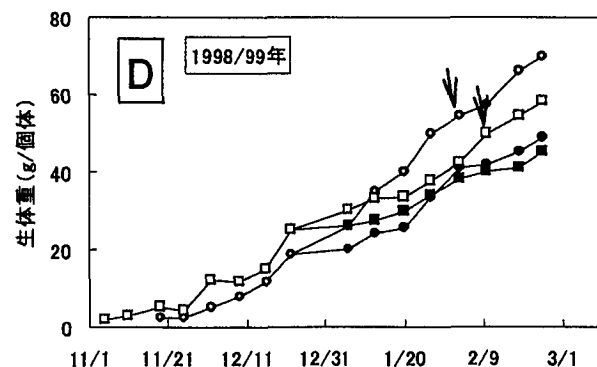
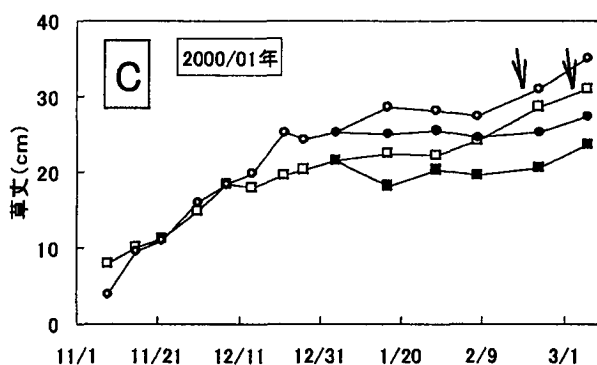
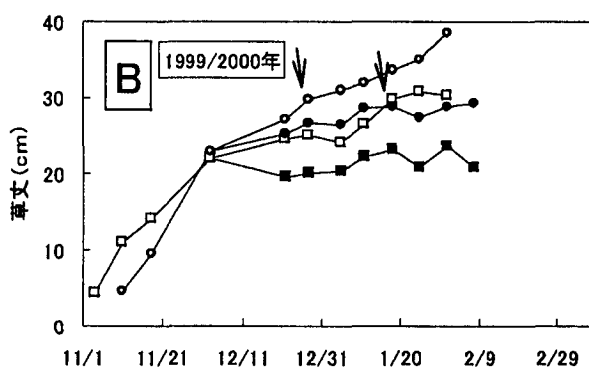
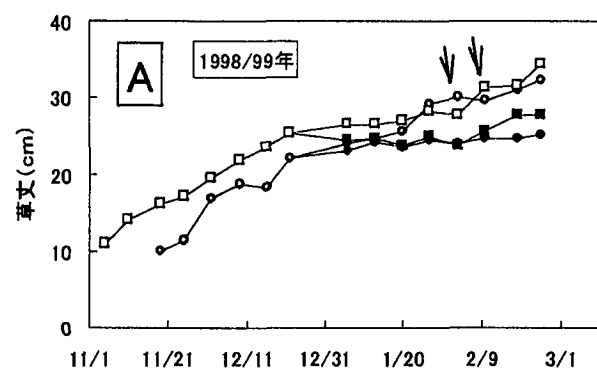
(2) 生・育

第73図A、B、Cに各年の草丈の推移を示す。1998/99年、1999/2000年および2000/01年のハウス開放時点の草丈はホウレンソウがそれぞれ25 (12月25日)、22 (12月8日)、22cm (1月12日)、コマツナがそれぞれ22、23、27cmであった。密閉ハウスにおいては、両作物の草丈は徐々に伸長し、出荷規格上限の30cmを越えた時期は、1998/99年、1999/2000年および2000/01年において、ホウレンソウがそれぞれ2月10日頃、1月15日頃、3月5日頃、コマツナがそれぞれ2月5日頃、12月30日頃、2月20日頃であった。このことから、ハウスの開放を始めた時期を収穫開始期とすると、1998/99年、1999/2000年および2000/01年の密閉ハウスにおける収穫期間は、ホウレンソウではそれぞれ約45、40、

55日間、コマツナではそれぞれ約40、20、40日間であった。

一方、開放ハウスにおいては両作物ともに草丈の伸長が著しく抑制され、3カ年ともに調査終了時点においても出荷規格内の草丈であった。このことから、密閉ハウスに比べ開放ハウスでは両作物ともに出荷期間が大幅に延長されたといえる。

第73図D、Eに1998/99年、1999/2000年の生体重の推移を示す。両年度のハウス開放時点の生体重はホウレンソウがそれぞれ25、15g/個体で、コマツナがそれぞれ19、13g/個体であった。密閉ハウスにおいては先に記したように、1998/99年、1999/2000年において、ホウレンソウがそれぞれ2月10日頃、1月15日頃、コマツナがそれぞれ2月5日頃、12月30日頃、出荷規

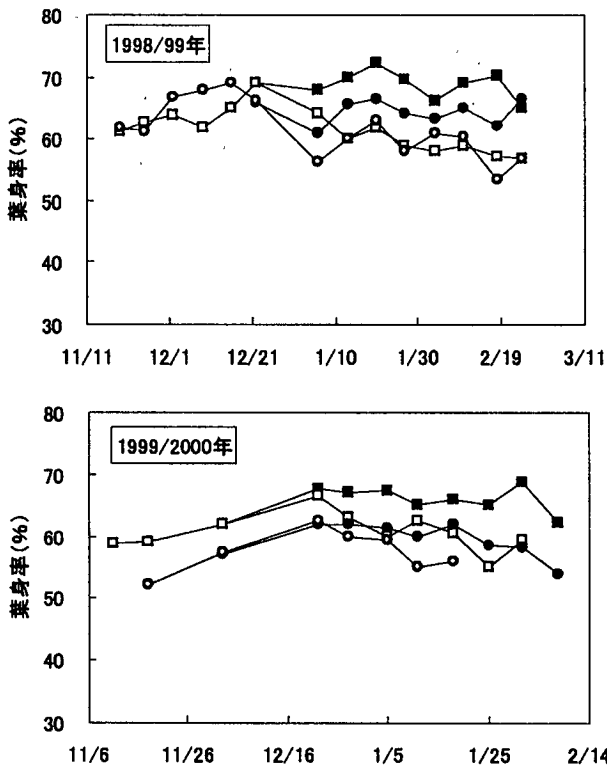


第73図 98/99年 (A)、1999/2000年 (B)、2000/01年 (C) における草丈の推移および1998/99年 (D)、1999/2000年 (E) における生体重の推移

注：ホウレンソウ (■, 開放；□, 密閉)、コマツナ (●, 開放；○, 密閉)。図中の矢印は、密閉ハウスにおけるホウレンソウとコマツナの出荷規格を越えた時期を示す。

格を越えた。両年度の出荷規格を越えた時点の生体重は、ホウレンソウがそれぞれ50、31g/個体、コマツナがそれぞれ54、30g/個体であった。一方、開放ハウスにおいてはホウレンソウ、コマツナともに草丈の伸長が著しく抑制され、密閉ハウスに比べ出荷期間が大きく延長されたが、両年度の調査終了時点（出荷規格内）の生体重はホウレンソウがそれぞれ45、38g/個体、コマツナがそれぞれ49、45g/個体であった。

第74図に1998/99年、1999/2000年の葉身率の推移を示す。両年度のハウス開放時点の葉身率はホウレンソウがそれぞれ69、67%で、コマツナがそれぞれ66、62%であった。密閉ハウスにおいては両作物ともに徐々に葉身率が低下したが、開放ハウスでは密閉ハウスに比べ、葉身率が高く推移した。



第74図 98/99年、1999/2000年における葉身率の推移
注：ホウレンソウ（■，開放；□，密閉）、
コマツナ（●，開放；○，密閉）。

(3) 耐凍性

第75図に1999/2000年、2000/01年の開放および密閉ハウスのホウレンソウとコマツナの耐凍性の変化を示す。1999/2000年は12月8日にハウスを開放した。開放開始時点のホウレンソウの T_{EL15} 、 T_{EL50} はそれぞれ約 -10°C 、約 -12°C であった。開放ハウスにおける12月中旬から1月下旬にかけてのホウレンソウの T_{EL15} 、 T_{EL50} はそれぞれ -14°C 、 -18°C で推移した。

一方、密閉ハウスにおいては同期間でそれぞれ -13°C 、 -10°C 、 -14°C 、 -11°C で推移した。このことから、ホウレンソウの T_{EL15} 、 T_{EL50} は開放ハウスが密閉ハウスよりもそれぞれ $1\sim 2^{\circ}\text{C}$ 、 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ほど低下したといえる。

同期間の開放ハウスでのコマツナの T_{EL15} 、 T_{EL50} はそれぞれ -14°C 、 -16°C 、 -14°C で推移した。一方、密閉ハウスにおいてはそれぞれ -12°C 、 -8°C 、 -13°C 、 -10°C で推移した。このことから、コマツナの T_{EL15} 、 T_{EL50} は開放ハウスが密閉ハウスよりもそれぞれ $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 、 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ ほど低下したといえる。

2000/01年のハウスの開放開始日は厳寒期の1月12日であった。このため、開放開始時点のホウレンソウの T_{EL20} 、 T_{EL50} はそれぞれ約 -17°C 、約 -19°C と低かった。その後、開放ハウスでは1月下旬～3月初旬にかけて T_{EL20} 、 T_{EL50} がそれぞれ -18°C 、 -15°C 、 -20°C 、 -16°C で推移した。一方、密閉ハウスにおいてはそれぞれ -15°C 、 -13°C 、 -16°C 、 -15°C で推移した。このことから、ホウレンソウの T_{EL20} 、 T_{EL50} は開放ハウスが密閉ハウスよりもそれぞれ $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ 、 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ ほど低下したといえる。

同期間のコマツナの開放ハウスでの T_{EL20} 、 T_{EL50} はそれぞれ -16°C 、 -12°C 、 -20°C 、 -16°C で推移し、密閉ハウスでのそれはそれぞれ -14°C 、 -11°C 、 -15°C 、 -13°C で推移した。このことから、コマツナの T_{EL20} 、 T_{EL50} は開放ハウスが密閉ハウスよりもそれぞれ $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 、 $2\sim 5^{\circ}\text{C}$ ほど低下したといえる。

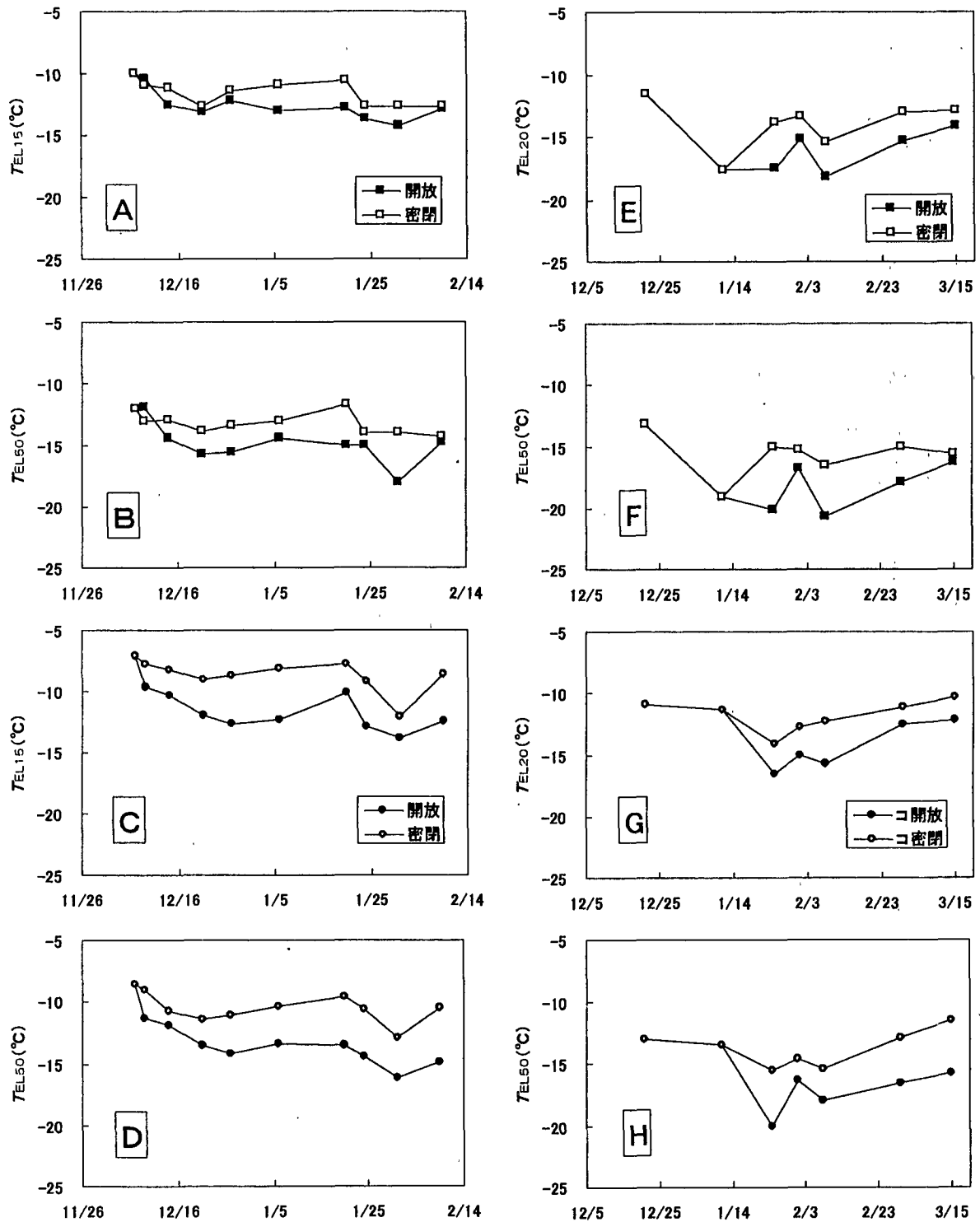
(4) 糖およびビタミンC含量

第76図に1998/99年、1999/2000年の糖含量の推移を示す。1998/99年のホウレンソウの糖含量は1月中旬～2月上旬にかけて、開放ハウスが密閉ハウスよりも葉身で $2\sim 4\text{g}/100\text{gFW}$ 、葉柄で $1\sim 3\text{g}/100\text{gFW}$ 高まった。同期間の葉身と葉柄を合わせた可食部100gFW当たり（以後、可食部当たり）の糖含量は、開放ハウスが密閉ハウスよりも $2\sim 3\text{g}/100\text{gFW}$ ほど高まった。

コマツナの糖含量は、ハウス開放後、1月中旬までは葉身、葉柄ともに開放ハウスと密閉ハウスで大きな差はみられなかった。しかし、1月下旬～2月上旬にかけては、開放ハウスが密閉ハウスよりも葉身で約 $2\text{g}/100\text{gFW}$ 、葉柄で約 $1\text{g}/100\text{gFW}$ 高まった。可食部当たりの糖含量は、1月下旬～2月上旬にかけて、開放ハウスが密閉ハウスよりも約 $2\text{g}/100\text{gFW}$ ほど高まった。

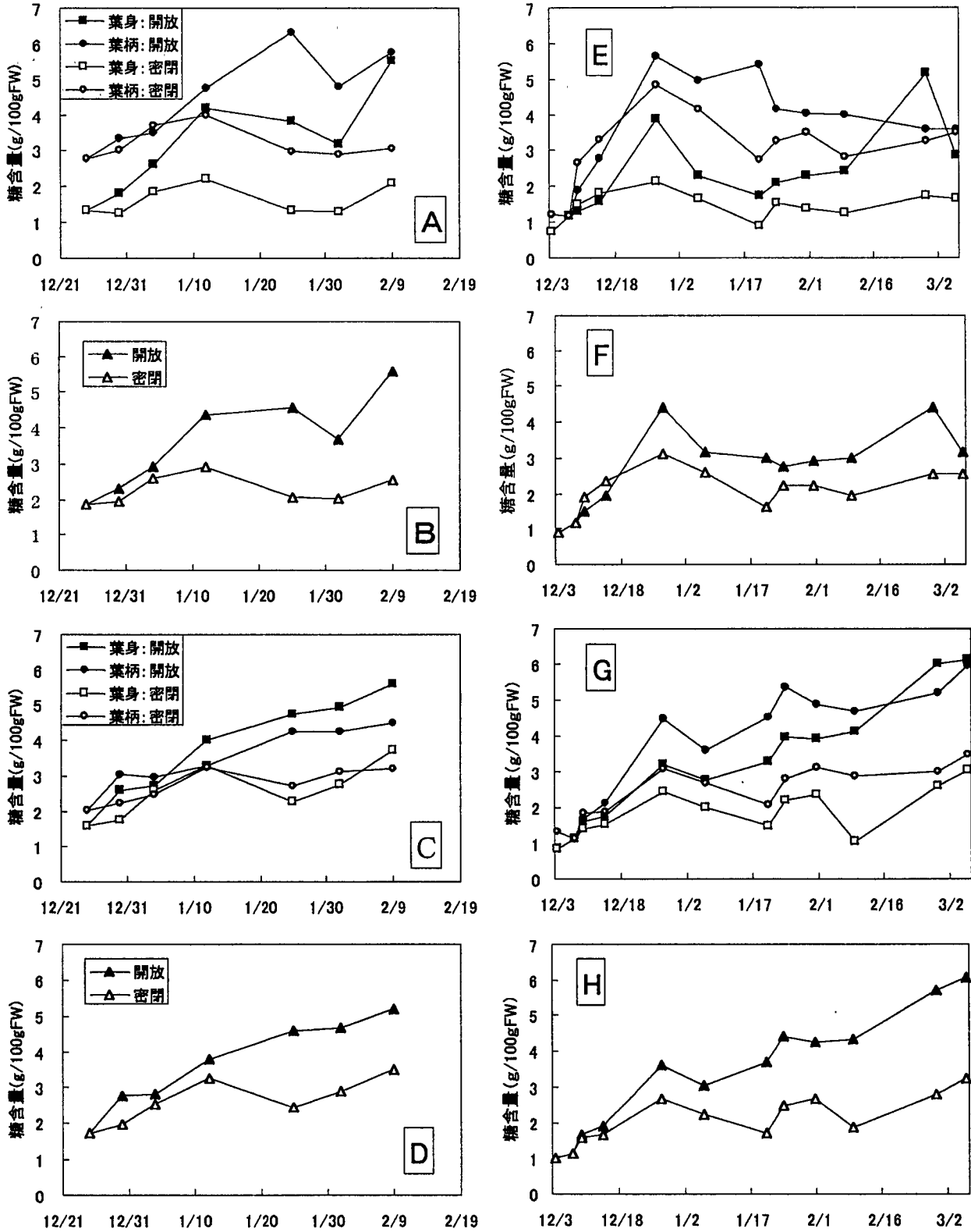
1999/2000年のホウレンソウの糖含量は、12月下旬～3月上旬にかけて、開放ハウスが密閉ハウスよりも葉身で1～3g/100gFW、葉柄で1～2g/100gFW高まった。可食部当たりの糖含量は、12月下旬～3月上旬にかけて、開放ハウスが密閉ハウスよりも約1g/100gFW高まった。

コマツナの糖含量は、12月下旬～3月上旬にかけて、開放ハウスが密閉ハウスよりも葉身で1～3g/100gFW、葉柄で1～2g/100gFW高まった。同期間内の可食部当たりの糖含量は、開放ハウスが密閉ハウスよりも1～3g/100gFW高まった。



第75図 1999/2000年、2000/01年におけるホウレンソウとコマツナの耐凍性の変化

注：1999/2000年 (A; TEL_{EL15}, ホウレンソウ; B; TEL_{EL50}, ホウレンソウ; C; TEL_{EL15}, コマツナ; D; TEL_{EL50}, コマツナ)。2000/01年 (E; TEL_{EL15}, ホウレンソウ; F; TEL_{EL50}, ホウレンソウ; G; TEL_{EL15}, コマツナ; H; TEL_{EL50}, コマツナ)。B, F図中の印はA図と同様。D, H図中の印はC図と同様。

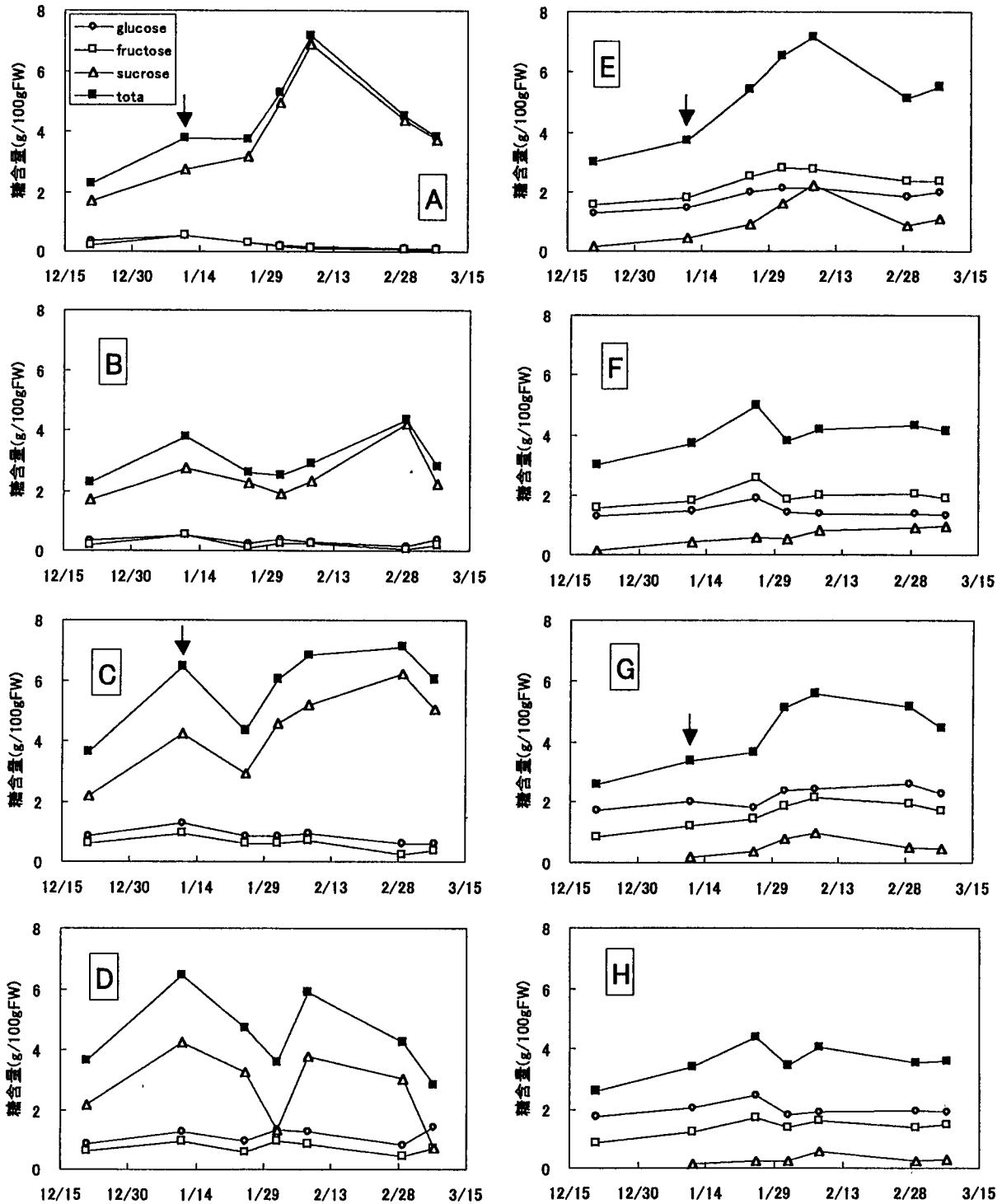


第76図 1998/99年、1999/2000年の開放および密閉ハウスにおける糖含量の変化

注：1998/99年（A，ホウレンソウ部位別；B，ホウレンソウ可食部当たり；C，コマツナ部位別；D，コマツナ可食部当たり）。1999/2000年（E，ホウレンソウ部位別；F，ホウレンソウ可食部 当たり；G，コマツナ部位別；H，コマツナ可食部当たり）。E，G図中の印はA図と同様。F，H図中の印はB図と同様。

第77図に2000/01年におけるハウレンソウとコマツナの糖含量の推移を示した。両作物の糖含量は1998/99年、1999/2000年と同様に開放ハウスが密閉ハウスよりも高まった。しかし、ハウスの開放により蓄積される糖の種類がハウレンソウとコマツナでは異なった。すなわち、ハウレンソウでは葉身、葉柄ともにスクロースが多く蓄積され、グルコース、フルクトース含量は

少なかった。一方、コマツナでは葉身、葉柄ともに全般にグルコースとフルクトース含量が高かった。スクロース含量は、1月下旬～2月上旬にかけての厳寒期に、葉身においては1～2 g/100gFWに、葉柄においては0.4～1 g/100gFWに増加した。しかし、それ以外の時期には葉身、葉柄ともにスクロース含量は少なかった。



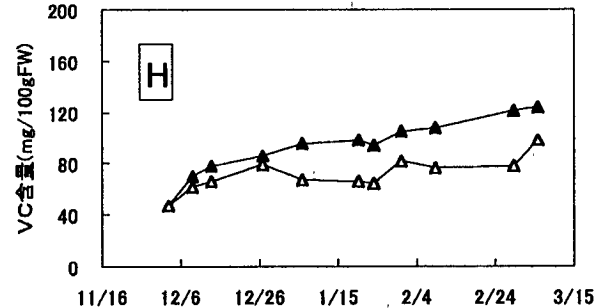
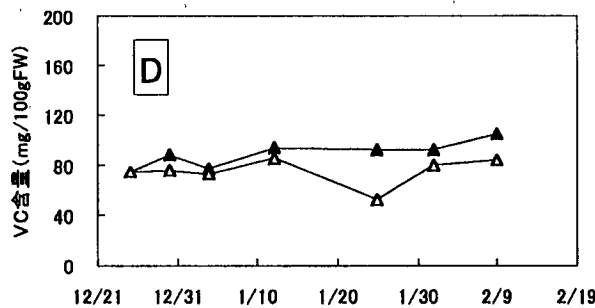
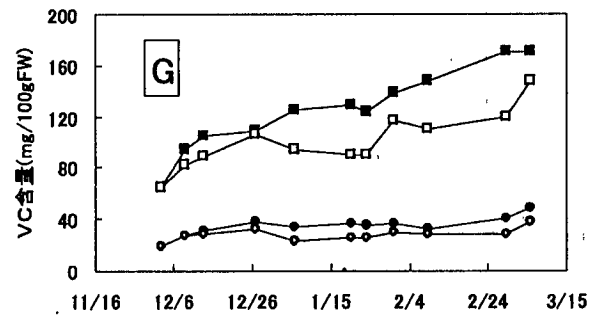
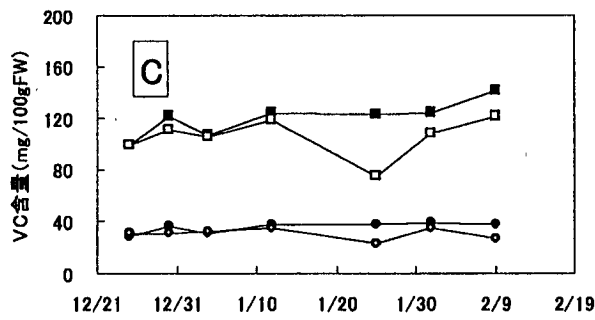
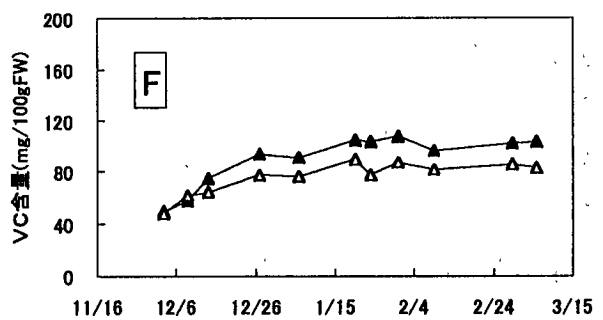
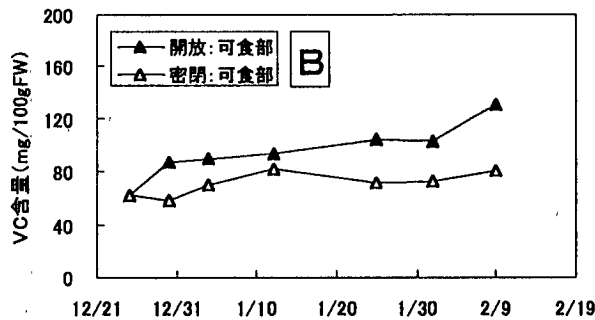
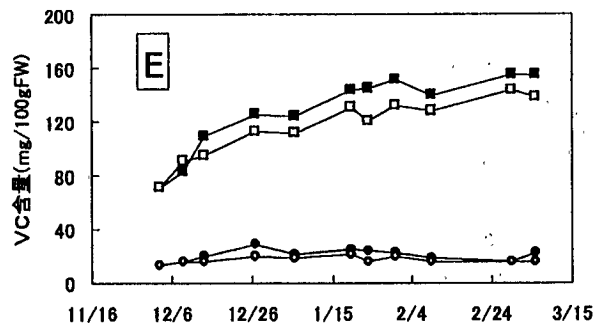
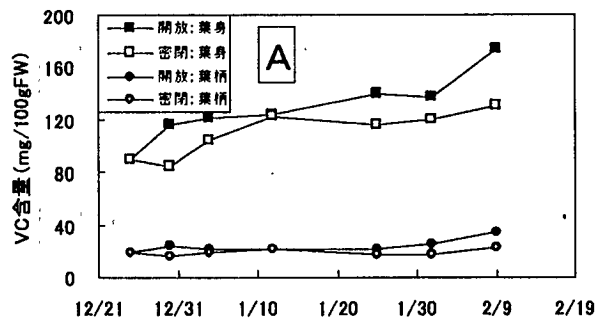
第77図 2000/01年のハウレンソウとコマツナの開放および密閉ハウスにおける糖含量の変化
 注：ハウレンソウ（A：開放，葉身： B，密閉，葉身： C，開放，葉柄： D，密閉，葉柄）。コマツナ（E：開放，葉身： F，密閉，葉身： G，開放，葉柄： H，密閉，葉柄）。矢印は開放開始日。B, C, D, E, F, G, H 図中の印はA図と同様。

第78図に1998/99年、1999/2000年におけるホウレンソウとコマツナのビタミンC含量の推移を示す。ホウレンソウ、コマツナともに、開放、密閉処理のいかにかわからず、ビタミンC含量は葉身において高く、葉柄において少なかった。

開放ハウスにおけるホウレンソウの可食部当たりのビタミンC含量は1998/99年、1999/2000年ともにハウスを開放後、徐々に高まり、1998/99年は90~130mg/

100gFWで推移し、密閉ハウスよりも30~50mg/100gFW高まった。1999/2000年は95~105mg/100gFWで推移し、密閉ハウスよりも約20mg/100gFW高まった。

開放ハウスにおけるコマツナの可食部当たりのビタミンC含量は1998/99年は1月下旬以降約100mg/100gFWで推移し、密閉ハウスよりも20~40mg/100gFW高まった。1999/2000年は80~120mg/100gFWで推移し、密閉ハウスよりも20~40mg/100gFW高まった。



第78図 1998/99年、1999/2000年の開放および密閉ハウスにおけるホウレンソウとコマツナのビタミンC (VC含量) の変化
 注: 1998/99年 (A, ホウレンソウ部位別: B, ホウレンソウ可食部当たり: C, コマツナ部位別: D, コマツナ可食部当たり)。1999/2000年 (E, ホウレンソウ部位別: F, ホウレンソウ可食部当たり: G, コマツナ部位別: H, コマツナ可食部当たり)。C, E, G図中の印はA図と同様。D, F, H図中の印はB図と同様。

4) 考 察

秋田市においてはハウレンソウを10月中旬、コマツナを10月下旬に播種すると両作物ともに12月下旬頃に収穫期となる(Ⅲ章1節)。収穫期になってからハウスを密閉して管理すると、収穫期間はハウレンソウで40~50日、コマツナで20~40日程度である(第73図A, B, C)。しかし、ハウスを開放すると、両作物の草丈の伸長が著しく抑制されるので、長期間にわたって出荷を継続することが可能となる。長期間にわたり、出荷することは流通業者や消費者との信頼関係を築くために非常に重要な要素である。このことから、ハウスを開放し、長期にわたって出荷が可能になることは、市場や、スーパーなどの小売量販店、消費者との信頼関係を構築しやすくし、有利販売に結びつけるために有効である。しかし、ハウスを開放すると草丈の伸長が著しく抑制されるので、ハウスの開放時期は草丈が25cm程度になり、出荷できる草姿になってから行うことが肝要である。

ハウレンソウやコマツナを10月に播種した場合、11~12月中旬は両作物の草丈の伸長をはかる時期なので、ハウスを密閉して管理しており、両作物は未だ十分に低温馴化していない。この時期に急激な寒波が到来すると、凍結傷害を受ける危険性がある。両作物の耐凍性は、ハウス内気温の影響を大きく受ける。ハウス内気温と耐凍性との関係を詳細に検討した結果、両作物の耐凍性にハウス内の気温が大きく影響しており、ハウス内の過去7日間の平均最低気温から両作物の耐凍性を推定できることが明らかとなった(Ⅰ章6節)。晩秋から初冬にかけて、耐凍性の推定値を下回る寒波の到来が予想されるときには、緊急避難的に不織布などで保温することが有効である。

冬期(12月下旬~3月上旬)にハウスを密閉して管理すると、最高気温、最低気温が沿岸部の秋田市ではそれぞれ5~15℃、-2~1℃、海岸から約12km内陸に位置する雄和町それぞれ5~10℃、-4~-1℃で推移する。この時期にハウスを開放すると、秋田市、雄和町ともに、密閉しているよりも最高気温で5~10℃、最低気温で1~2℃低下する(第72図A, B, C)。

植物の凍結傷害は、氷点下に気温が低下し、細胞内が限度を超えて凍結脱水された後に融解するとひきおこされる。したがって、一般的には、ハウレンソウとコマツナが凍結傷害を受ける危険性が最も高まるのは、気温の低下する夜間であると考えられる。最低気温はハウスを開放しても密閉している時よりも1

~2℃低下するのみであり、最低気温の開放、密閉ハウス間の差は小さい(第72図A~D)。開放および密閉ハウスにおける両作物の耐凍性を経時的に調査した結果、開放ハウスにおける両作物の T_{EL15} 、 T_{EL50} は密閉ハウスよりも2~5℃低下した(第75図)。このことから、開放ハウスにおいて凍結傷害を受ける可能性は密閉ハウスよりも低いことが明らかとなった。

キャベツにおいては、3~6時間の短時間の脱馴化処理(20℃)により、耐凍性が減少することが知られている⁶²⁾。ハウレンソウとコマツナにおいても3時間程度の脱馴化処理(20℃)により耐凍性が減少しはじめる(Ⅰ章5節)。積雪寒冷地域において、12月から2月上旬の厳寒期に晴天日になることは少ないとはいえ、密閉ハウスにおいて、晴天日にはハウス内気温は急激に上昇するので(第72図D)、両作物の耐凍性が減少する可能性がある。このため、ハウスを密閉していると、開放しているときよりも凍結傷害を受ける可能性が高まることが考えられる。

2月中旬以降は北東北日本海側においても日射量が増加する。しかし、2月中旬から3月上旬にかけての最低気温の極値は例年-5℃程度(秋田市)になる³⁰⁾。このため、この時期にハウスを密閉して管理すると、日中に両作物の耐凍性が減少し、凍結傷害を受ける危険性が高まるが、開放ハウスにおいては晴天日もハウス内気温はさほど高まらないので(第72図D)、両作物の脱馴化を防止できると考えられる。

糖含量はハウスを開放することによりハウレンソウ、コマツナ双方で葉身、葉柄ともに密閉して管理するよりも高まり、可食部当たりの両作物の糖含量は、開放ハウスが密閉ハウスよりも1~3g/100gFW高まった(第76図, 第77図)。

両作物の糖含量はハウス内気温と密接な関係が認められ、ハウス内の平均気温が5℃、最低気温が0℃以下になると糖含量が増加する(Ⅱ章2節)。北東北日本海側の12~1月にかけての日射量は3.9~4.7 MJ/m²/dayであり、太平洋側の盛岡市(5.5~7.1 MJ/m²/day)よりも大幅に少ない(国立天文台, 2001)。しかし、寡日射下においても光合成によりグルコースやスクロースが合成され、低温処理により糖が蓄積される(Ⅱ章1節)。ハウス内気温を低く保つことにより、呼吸や生長が抑制され、光合成により生産された糖の消費が減少し、徐々に蓄積されると考えられる。

ハウスを密閉していてもハウス内気温が低ければ糖含量は高まる。しかし、ハウレンソウ、コマツナ(Ⅱ

章2節)、キャベツ⁶²⁾などは短時間(3~6時間)の高温処理で糖含量が速やかに減少する。密閉していると、晴天日にはハウス内気温が高まり、速やかに糖含量が減少する。消費者の信頼を確保するためには、安定して糖含量の高いハウレンソウやコマツナを出荷することが重要である。この観点からもハウスを開放してハウス内気温を常に低く保ち、糖含量の低下を防止することが重要である。

寡日射下においてもコマツナを低温処理することによりビタミンC含量が高まる(II章1節)。また、ハウレンソウとコマツナのビタミンC含量とハウス内気温との関係を検討したところ、両作物ともに収穫前10日間の平均最低気温ないしは平均気温とビタミンC含量との相関関係が高いこと、さらに、収穫前10日間の平均最低気温が5℃以下になるとビタミンC含量が急激に高まる(II章2節)。このことから、ハウスを開放し、ハウス内の気温を低く保つことにより、ビタミンC含量の高いハウレンソウとコマツナを生産することが可能である(第78図)。また、糖含量と同様に、ビタミンC含量も気温が高まると速やかに減少する(II章1節)。このことから、ハウスを開放し、ハウス内の気温を安定して低く維持することで(第72図)、ハウレンソウとコマツナのビタミンC含量を高い状態で維持することが可能になると考えられる。

5) 要約

収穫期に達してから(12月下旬以降)ハウスを開放し、冷たい外気をハウス内に導入すると、草丈の伸長が抑制されるので、ハウレンソウとコマツナの出荷期の長期化がはかられる。

冬期に(12月下旬~3月上旬)にハウスを開放すると、ハウスを密閉しているときよりも最低気温は1~2℃ほど低下する。しかし、耐凍性はハウスを開放すると密閉しているよりも2~5℃ほど高まる。このことから、ハウスを開放している方がハウスを密閉しているよりも凍結傷害を受ける危険性は低い。また、ハウレンソウとコマツナは短時間の高温で脱馴化する。ハウスを密閉していると、晴天日にはハウス内の気温が上昇し、両作物の耐凍性が減少し、凍結傷害を受ける危険性が高まる。この点からもハウスを開放し、気温を低く保って脱馴化を防止することが重要である。

収穫期に達してからハウスを開放すると、密閉しているよりもハウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量が高まる。ハウスを開放し、常にハウス内気温を低く保つことで、ハウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量を高く維持することが可能となる。

6 ハウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量の簡易推定法

1) 目的

これまでに糖とビタミンC含量が高いハウレンソウとコマツナの生産方法について述べた。産地において品質をチェックしてから、品質の良いものを出荷することは、流通業者や消費者との信頼関係を築く上で重要である。この観点から、生産現場においてハウレンソウとコマツナの糖とビタミンC含量をチェックし、ある一定の糖、ビタミンC含量を出荷目標値と定め、生産されたハウレンソウとコマツナが出荷目標値以上に糖とビタミンC含量の高いことをチェックしてから出荷することが望ましい。しかし、糖やビタミンC含量の測定は、やや煩雑であるため、生産現場において多量の試料を測定することは困難である。このため、簡易に上記成分を推定することができれば、便利であると考えられる。

Brix示度は、農協や農業改良普及センターで簡易に測定でき、その測定した結果は、すでにメロン、スイカ、トマトなどでは品質チェック指標として用いられている。そこで、Brix示度とハウレンソウ、コマツナの糖およびビタミンC含量との関係を調査し、Brix示度が、糖およびビタミンC含量の高いハウレンソウ、コマツナを判断する指標として使用できるかどうか検討した。

2) 方法

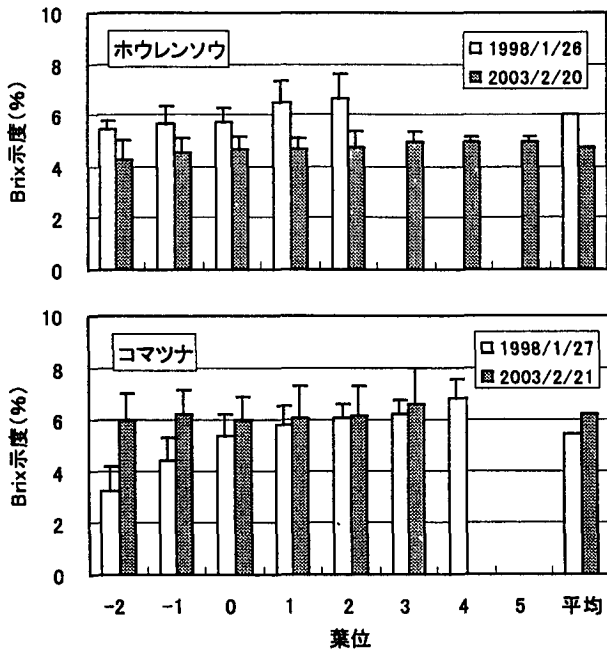
1997/98年、1998/99年(秋田市)および2002/03年(雄和町)に農試内のハウス内で栽培したハウレンソウ‘ソロモン’とコマツナ‘せいせん7号’のBrix示度と糖およびビタミンC含量を調査した。葉身から汁液を搾り取るのは力を要し、困難なので、Brix示度は葉柄の汁液を測定した。

ハウレンソウとコマツナの各葉位の葉柄のBrix示度は、葉柄の中央部を折り、爪で柔組織を少量採取し、屈折糖度計のプリズムの部分のせてから、カバーで押しつぶして得られた汁液を測定した。両作物の葉柄全体のBrix示度は、最大葉と次葉の葉柄のBrix示度を測定した後、他の各葉位の葉柄と併せ、約5mm程度に細断し、乳鉢で磨碎して汁液を採取して測定した。

糖含量の測定はI章6節2.2)(3)、ビタミンC含量の測定はII章1節2.3)(2)と同様の方法で行った。

3) 結果

第80図にハウレンソウとコマツナの葉位ごとの葉柄のBrix示度を示した。ハウレンソウの1998年1月26日の草丈と個体重はそれぞれ約15cm、約11g/個体、2003年2月20日はのそれは、それぞれ約24cm、約29g/個体、コマツナの1998年1月27日の草丈と個体重はそれぞれ約26cm、約29g/個体、2003年2月21日のそれは、それぞれ約28cm、約32g/個体であった。1998年1月26日、同27日の調査ではハウレンソウ、コマツナ葉柄のBrix示度は、ともに外側から内側になるほど高くなった。2003年2月20日、同21日の調査においても、両作物葉柄のBrix示度は、1998年の調査ほど明瞭ではなかったものの、わずかに外側から内側になるほど高くなる傾向がみられた。ハウレンソウにおける各葉位の葉柄のBrix示度の平均値は、1998年1月26日調査で6.0%、2003年2月20日調査で4.7%であった。その値に、最大葉と最大葉の1葉内側（以後、次葉）の葉柄のBrix示度の平均値が近似した。コマツナにおける各葉位の葉柄のBrix示度の平均値は、1998年1月27日調査で5.4%、2003年2月21日調査で6.2%であった。その値に、最大葉と次葉の葉柄のBrix示度の平均値が近似した。

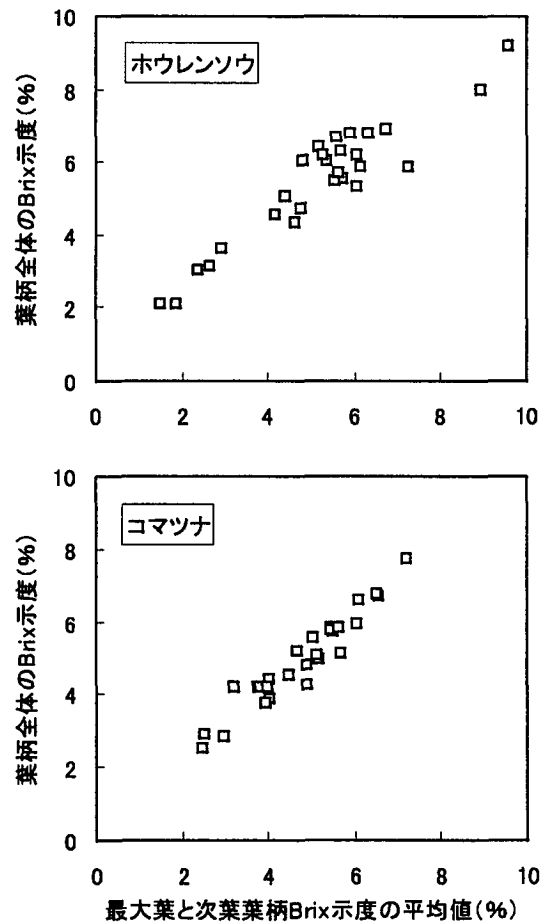


第80図 ハウレンソウとコマツナの葉位ごとのBrix示度
注：Brix示度は各葉位ともに葉柄の中央部をの値を示した。

1998年1月26日および1月27日の調査：n=8
2003年2月20日および2月21日の調査：n=10
葉位は最大葉を葉位0とし、+は最大葉よりも内葉、-は外葉で表示した。葉柄の基部は地際部、先端部は葉身に近い部位、中央部は基部と先端部の中央のBrix示度を測定した。

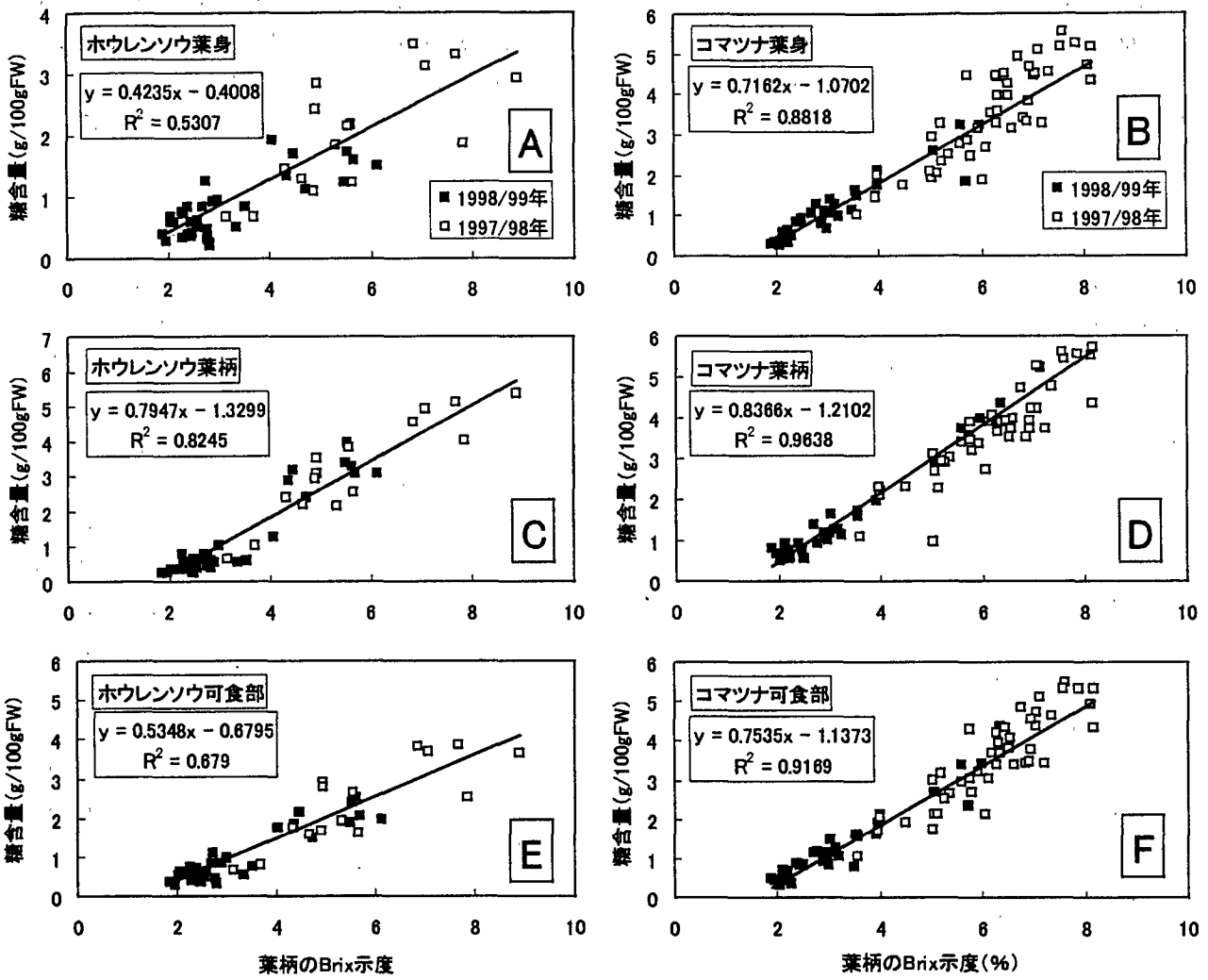
第81図に最大葉と次葉の葉柄のBrix示度の平均値と葉柄全体のBrix示度との関係を示した。最大葉と次葉の葉柄のBrix示度の平均値は、ハウレンソウ、コマツナともに葉柄全体のBrix示度に良く対応した。

ハウレンソウ、コマツナの最大葉と次葉の葉柄のBrix示度の平均値（以後、単に葉柄のBrix示度）と両作物の葉身、葉柄および可食部の糖含量、ビタミンC含量との間には、高い正の相関関係が認められた（第82図、第83図）。このことから、両作物の葉柄のBrix示度を測定することにより、大まかに糖含量、ビタミンC含量を推定することが可能と考えられた。回帰式からは、ハウレンソウ葉柄Brix示度が5、6、7%で可食部の糖含量は約2、2.5、3g/100gFW程度（第82図E）、ビタミンC含量は約70、85、100mg/100gFW程度と推定された（第83図E）。コマツナ葉柄Brix示度が5、6、7%で可食部の糖含量は約2.5、3.3、4g/100gFW程度（第82図F）、ビタミンC含量は約75、85、95mg/100gFW程度と推定された（第83図F）。



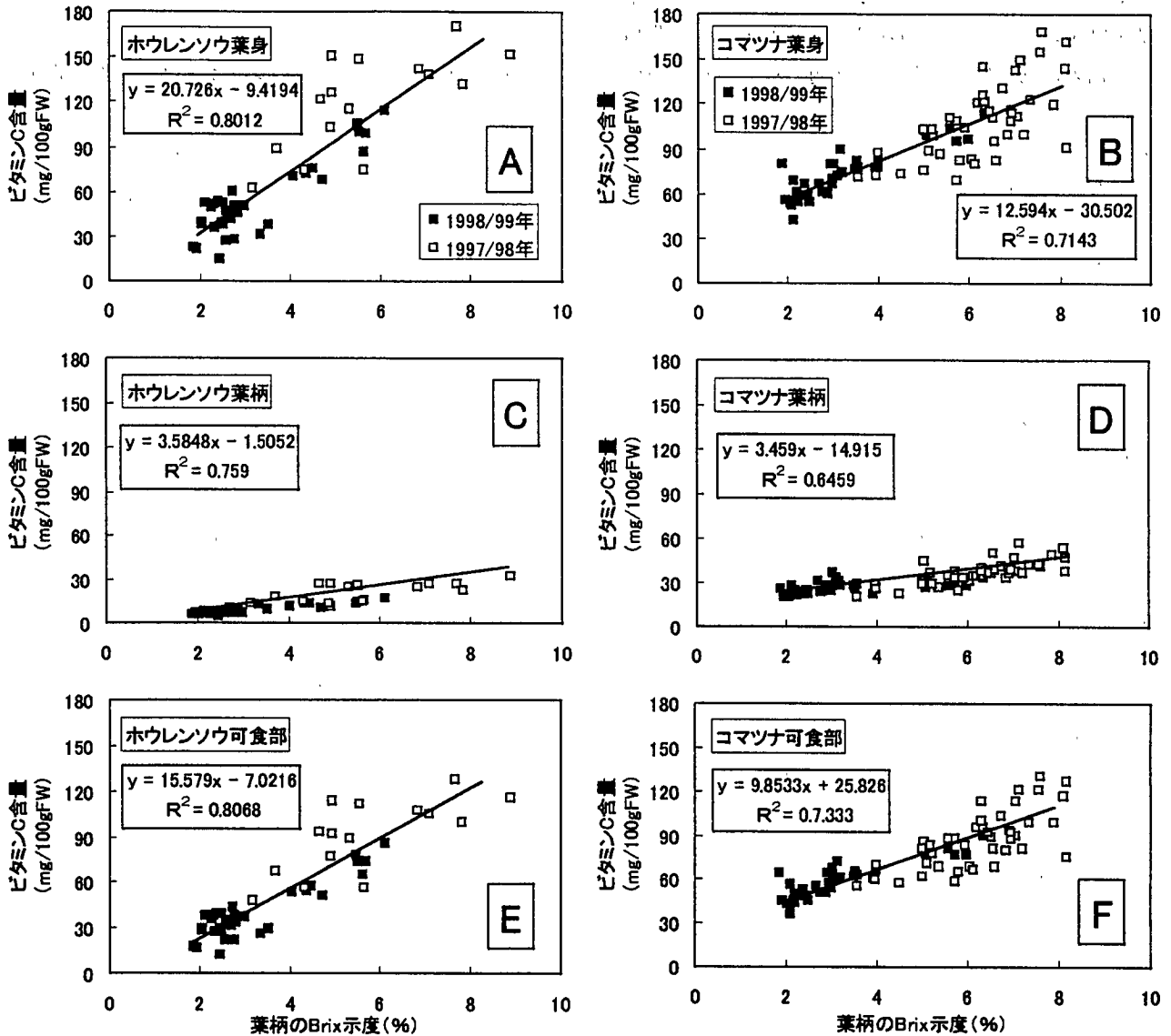
第81図 ハウレンソウとコマツナの最大葉・次葉の葉柄のBrix示度の平均値と葉柄全体のBrix示度との関係

注：葉柄全体のBrix示度は、最大葉と次葉葉柄のBrix示度を測定した後、可食部葉柄をに加えて、全体を約5mmに裁断し、乳鉢で磨碎し、汁液を測定した。



第82図 ホウレンソウとコマツナ葉柄のBrix示度と糖含量との関係

注：ホウレンソウ (A, C, E)、コマツナ (B, D, F)。C, D, E, F図中の印はA図と同様。



第83図 ホウレンソウとコマツナ葉柄のBrix示度とビタミンC含量との関係

注：ホウレンソウ (A, C, E)、コマツナ (B, D, F)。C, D, E, F図中の印はA図と同様。

4) 考 察

ホウレンソウとコマツナの糖とビタミンCをBrix示度でチェックする時には、農家の生産している圃場において、農家が立ち会いのもとで、直ちにチェックできれば最も都合が良い。ホウレンソウとコマツナのBrix示度を測定する場合、市販のミキサーやスライサーを使用し、両作物を個体ごと磨砕・細断して汁液を採取し、Brix示度を測定することもできる。しかし、この方法は、ハウス付近に電源が必要となり圃場における測定には不便であり、また、ミキサーやスライサーをハウス付近で測定のたびごとに洗浄するのも

面倒である。また、個体ごと乳鉢などで磨砕して汁液を採取することも困難である。

両作物の一部分を採取して、糖度計に擦りつけ、Brix示度を測定する方法は、非常に簡単であり、現場向きである。ホウレンソウとコマツナは、葉身部と葉柄部に分けることができる。葉身部を例えばナイロンメッシュやガーゼなどで包み、搾汁するには、かなりの握力が必要である。一方、葉柄部を搾汁するのは比較的容易である。そこで、葉柄部のBrix示度を測定することで、ホウレンソウとコマツナの可食部全体の糖とビタミンC含量を推定できないか、検討した。

ハウレンソウとコマツナは、葉位によってBrix示度が異なるのかどうかを調査した。その結果、両作物の葉柄のBrix示度は、個体の外側の葉柄から内側の葉柄になるほど高くなる傾向がみられ(第80図)、最大葉とその1枚内側(次葉)の葉柄のBrix示度の平均値が、各葉位の葉柄のBrix示度の平均値に近似していた。

そこで、最大葉と次葉の葉柄のBrix示度の平均値が、可食部の葉柄全体のBrix示度を反映しているかどうかを調査した。その結果、最大葉と次葉の葉柄のBrix示度の平均値は、可食部の葉柄全体を磨砕して得られたBrix示度と良く一致しており(第81図)、最大葉と次葉の葉柄のBrix示度を測定することで、可食部葉柄のBrix示度を把握できると考えられた。

ハウレンソウとコマツナの最大葉と次葉の葉柄のBrix示度の平均値(以後単に葉柄のBrix示度と表現する)と葉身、葉柄および可食部の糖含量との間には、正の相関関係が認められた(第82図)。加藤ら(1995)は市販ハウレンソウの冬期における糖含量は2~3g/100gFWであることを報告している。これをもとに、3g/100gFW以上を、ハウレンソウの糖含量の出荷目標値とするならば、ハウレンソウのBrix示度の出荷目標値は、7%以上とすることが適切と考えられる。コマツナの糖含量の出荷目標値もハウレンソウと同様に3g/100gFWとするならば、Brix示度の出荷目標値は、6%以上とすることが適切と考えられる。

ハウレンソウとコマツナの葉柄のBrix示度と葉身、葉柄および可食部のビタミンC含量との間には、正の相関関係が認められた(第83図)。加藤ら(1995)は市販ハウレンソウの冬期におけるビタミンC含量が60~80mg/100gFWであることを報告している。日本食品標準成分表(科学技術庁, 2000)において、冬期のハウレンソウのビタミンC含量は60mg/100gFWとされる。この成分含量よりも高い90mg/100gFW以上を、ハウレンソウのビタミンC含量の出荷目標値とするならば、Brix示度の出荷目標値は、7%以上とすることが適切と考えられる。コマツナのビタミンC含量の出荷目標値ハウレンソウと同様に90mg/100gFWとす

るならば、Brix示度の出荷目標値は、7%以上とすることが必要と考えられる。

これらのことから、ハウレンソウとコマツナの糖含量の出荷時の目標値を3g/100gFW以上、ビタミンC含量の出荷時の目標値を90mg/100gFW以上とするならば、ハウレンソウ、コマツナともに、葉柄のBrix示度の出荷目標値は、7%以上とすることが適切と考えられる。

ただし、ビタミンC含量は、葉身部に多く含まれ、葉柄部で少ないので、栽植密度が高かったり、軟弱徒長に生育させ、葉身率が低くなると、葉柄のBrix示度が高く測定されても、可食部のビタミンC含量は高くはないので、注意を要する。

5) 要約

生産現場においてハウレンソウとコマツナの糖とビタミンC含量をチェックしてから出荷することは、流通業者や消費者との信頼関係を築く上で重要である。そこで、生産現場においても簡単に測定できるBrix示度により、両作物の糖とビタミンC含量を推定することが可能かどうか検討した。

両作物の葉柄のBrix示度は、個体の外側の葉柄から内側の葉柄になるほど高くなる傾向がみられ、最大葉とその1枚内側(次葉)の葉柄のBrix示度の平均値が、各葉位の葉柄のBrix示度の平均値に近似しており、最大葉と次葉の葉柄のBrix示度(以後、葉柄のBrix示度)を測定することで、可食部葉柄のBrix示度を把握できると考えられた。

ハウレンソウとコマツナの葉柄のBrix示度と葉身、葉柄および可食部の糖とビタミンC含量との間には、正の相関関係が認められた。冬期のハウレンソウの糖含量はとビタミンC含量はそれぞれ2~3g/100gFW³²⁾、60~80mg/100gFW³²⁾と報告されている。そこで、ハウレンソウとコマツナの出荷目標成分含量を3g/100gFW以上とするならば、Brix示度の出荷目標値は、ハウレンソウでは7%以上、コマツナでは6%以上、ビタミンCの出荷目標値を90mg/100gFWとするならば、Brix示度の出荷目標値は、両作物ともに7%以上とすることが適切と考えられる。

V 総 合 考 察

1 耐凍性

ハウレンソウとコマツナ自身も持っている耐凍性を越えた寒さにさらされ、凍結した場合、両作物は凍結傷害を受ける⁵⁵⁾。凍結傷害を受けると葉身が白化したり、新葉が壊死したりする(1章1節)。凍結傷害は栽培ハウス全面に発生することが多く、収穫間近のハウレンソウやコマツナの商品性が著しく低下したり、収穫が皆無になる場合もある。また、生育途中で凍結傷害を受けると、栽培継続を断念せざるを得ない場合もある。

北東北日本海側の冬期の最低気温は、内陸部において、通常年で -16°C 、厳しい寒波の時で -22°C となる(第1表)。このような気象条件において、冬期に無加温ハウスでハウレンソウやコマツナを栽培する場合は、凍結傷害を受ける危険性をはらんでいる。しかし、両作物の耐凍性がどのような条件で、どの程度まで増大するのかなどの知見が得られ、それを栽培面にしっかりと応用できるならば、凍結傷害は回避することが可能であると考えられる。

植物の凍結傷害機構に関しては様々な考え方が提唱されてきたが、現在は細胞膜が凍結傷害の初発部位であることが確認され、細胞外凍結による凍結傷害は、細胞膜と細胞内膜が異常接近することにより、細胞膜と細胞内膜が非生理的な膜融合を起こし、膜全体が不安定化する結果もたらされるという考え方が提案されている¹⁰⁾。

この考え方の上に立ち、これを防御する機構を考えるならば、防御①：細胞外凍結時において細胞内の脱水量を減らすこと、防御②：細胞膜と他の内膜との異常接近を防止すること、防御③：膜脂質組成を水和度の高い分子種へ変換し、脱水条件下で安定した膜構造を構築すること、の3点が考えられる。

そこで、近年、国内外で精力的に行われている耐凍性に関する研究から得られている知見を踏まえ、ハウレンソウとコマツナの耐凍性に関する知見を深めることを目的に、本研究から議論できる防御①および防御②の観点から、両作物の耐凍性増大と浸透濃度、適合溶質との関係を調べた。適合溶質に関して、本研究では近年注目されている糖、グリシンベタイン、プロリン⁶⁾の変化と耐凍性との関係について考察する。

1) 低温遭遇および葉位とハウレンソウとコマツナの耐凍性、浸透濃度、糖、ベタイン、プロリン含量との関係

(1) 防御①：細胞外凍結時において細胞内の脱水量を減らす機構

細胞外凍結が誘発されると細胞内外に水ポテンシャル差が生じ、細胞内から細胞外に水が移動し、細胞内は脱水される。脱水量を緩和する一つの方法は(防御①)、浸透濃度を上昇させることである。10週間の低温遭遇により T_{EL50} はハウレンソウ(-6.5°C から -18.7°C)とコマツナ(-5.6°C から -19.6°C)両者で大きく低下した(第15図A)。また、同時に、ハウレンソウの浸透濃度は低温遭遇前の約2倍(375から754mmol/kg)、コマツナのそれは約3倍(338から967mmol/kg)に高まった(第15図C)。そして、ハウレンソウでは375~750mmol/kg、コマツナでは338~800mmol/kgの範囲内で浸透濃度と T_{EL50} の間には高い負の相関関係が認められた(第16図A)。

細胞内を理想溶液系と仮定すると、ある凍結温度で細胞内から脱水される量(q)は次式で算出される。

$$q = 1 - (1.86 \times \text{Osm}) / T \quad \dots\dots\dots 1 \text{式}$$

ただし、Osmは浸透濃度、 T は凍結温度。

1式から、ある温度でのハウレンソウ細胞からの脱水量を計算してみる。754mmol/kg(低温馴化後)の細胞が -18.7°C (低温馴化後の T_{EL50})で凍結すると、細胞内の水の92.5%が脱水されることになる。仮に低温遭遇前の375mmol/kgのまま -18.7°C で凍結したと仮定すると、脱水量は96.3%と算出される。したがって、低温遭遇に応答し、浸透濃度が375から754mmol/kgに上昇したことにより、ハウレンソウの細胞内の脱水量は4%ほど緩和される計算になる。コマツナの脱水量を同様に計算すると、967mmol/kg(低温馴化後)の細胞が -19.6°C (低温馴化後の T_{EL50})で凍結すると細胞内の水の90.8%脱水されることになる。仮に低温遭遇前の浸透濃度(338mmol/kg)のまま -19.6°C で凍結したとすると脱水量は96.8%と算出される。したがって、コマツナにおいても低温遭遇に応答し、浸透濃度が338から967mmol/kgに上昇したことにより、細胞内の脱水量は6%ほど緩和されることになる。これらのことから、低温遭遇に伴い浸透濃度が上昇することにより、細胞外凍結時において、ハウレンソウとコマツ

ナの細胞内の脱水量が緩和されると推測される。葉位ごとにみても浸透濃度は、両作物ともに、上位葉、下位葉ともに低温処理により上昇した(第18図E, F)。以上のことから、低温遭遇に伴う浸透濃度の上昇は、両作物が耐凍性を増大させるための適応と考えることができる。

ところで、浸透濃度を上昇させるには、無機イオンや糖、遊離アミノ酸、適合溶質などの低分子化合物の溶質濃度が高まる必要がある。しかし、電荷を持つ物質の濃度が高くなりすぎると、生体内の酵素活性が阻害される可能性がある⁴⁶⁾。そこで、電荷が分子全体として中性であり、高濃度に蓄積しても生体高分子の構造を乱すことがない物質を蓄積する必要がある。適合溶質はそのような目的にあった物質として知られており、低温馴化過程における浸透濃度の上昇には、適合溶質濃度の上昇が有効であると考えられている。

(2) 防御②：細胞膜と他の内膜との異常接近を防止する機構

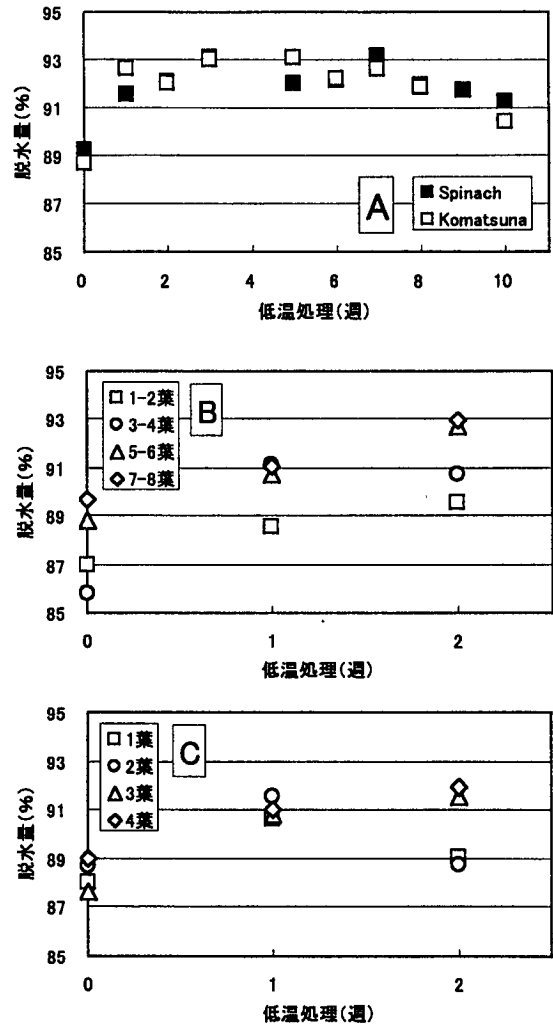
第84図Aに10週間の低温処理に伴うホウレンソウとコマツナの T_{EL50} での脱水量(1式により算出)を示す。低温遭遇前の浸透濃度375mmol/kgのホウレンソウが -6.5°C (低温遭遇前)で凍結すると脱水量は89.3%と算出される。ホウレンソウが十分に低温馴化したときの T_{EL50} の脱水量(低温遭遇2~8週)は92~93%と算出される。このことから、低温馴化に伴い、単に浸透濃度の上昇により、細胞内の脱水量が緩和されただけでなく、ホウレンソウの細胞が強い脱水に耐えられるように変化したと考えられる。同様に、低温遭遇前の浸透濃度338mmol/kgのコマツナが -6.5°C (低温遭遇前)で凍結すると脱水量は88.8%と算出される。コマツナが十分に低温馴化したときの T_{EL50} 時の脱水量(2~8週)が92~93%と算出されることから、コマツナにおいても低温馴化に伴い、細胞が強い脱水に耐えられるように変化したと考えられる。

凍結傷害は細胞外凍結により、細胞内が過度に脱水され、細胞膜と細胞内膜が異常接近することにより、細胞膜と細胞内膜が不安定化した結果、非生理的な膜融合を起こすことによりもたらされると考えられている⁴⁶⁾。糖はその親水性と水素結合を形成しやすい性質のため、脱水により水が取り去られた状態でも膜間に残り、生体膜と水素結合することで保護作用をすると同時に、膜と膜との異常接近を防止すると考えられている^{7), 37)}。

本研究で低温遭遇1~10週目にかけてホウレンソウ

とコマツナの全糖含量が高まることが明らかになった(第15図D, E)。そして、全糖含量と T_{EL50} との関係を見ると、全糖含量がホウレンソウでは0.3~3g/100gFW、コマツナでは0.3~3.5g/100gFWの範囲内で、全糖含量と T_{EL50} との間に高い負の相関関係が認められた(第16図B)。Koster・Lynch³⁶⁾は低温馴化中に増加する糖は液胞外に蓄積すると報告している。このことから、上述の範囲内の糖は、浸透濃度を上昇させて、脱水量の緩和させるとともに、細胞膜と細胞内膜との間に存在して、両者の異常接近を防止し、両作物の耐凍性の増大に寄与していると考えられる。

一方、ホウレンソウ、コマツナともに0.3~約3g/100gFWの範囲内で全糖含量と T_{EL50} との間に密接な相関関係が認められたが、それ以上に糖含量が高まって



第84図 10週間の低温処理に伴うホウレンソウとコマツナの T_{EL50} 時における脱水量(A)と2週間の低温処理に伴う各葉位(B, ホウレンソウ; C, コマツナ)の T_{EL50} 時における脱水量の比較

も T_{EL50} は低下しなかった(第16図B)。糖類が細胞質に蓄積されるならば細胞膜と細胞内膜との異常接近による膜融合を防止する役割を果たすと考えられるが、液胞に蓄積されるならば、その効果は期待できない。このことから、両作物において、上記の範囲以上に蓄積された糖類は、主に液胞に蓄積される可能性が考えられる。あるいは、細胞質における蓄積量がほぼ飽和したため、それ以上に蓄積しても T_{EL50} には影響を及ぼさなかった可能性もある。

第84図B、Cに葉位ごとのハウレンソウとコマツナにおける2週間の低温遭遇に伴う脱水量の算出結果を示す。ハウレンソウの細胞は、低温遭遇により、すべての葉位において徐々に強い脱水に耐えられるように変化したと考えられる。さらに、葉位ごとに比較すると、上位葉ほど強い脱水に耐えられるように変化している。コマツナにおいても、低温遭遇により、上位葉は強い脱水に耐えられるように変化したと考えられるが、下位葉は低温遭遇1週目には強い脱水に耐えられるように変化した、2週目には浸透濃度と糖含量が高まったにもかかわらず、脱水抵抗性が低下したように見える。脱水抵抗性が低下した理由として、下位葉の老化(1章4節)が考えられる。

各葉位の糖含量と T_{EL50} の間には、ハウレンソウ、コマツナともに基本的には負の相関関係が認められた(第21図C、D)。しかし、葉位ごとにみると、両作物ともに下位葉ほど糖含量の増加の T_{EL50} の低下に対する寄与が低い傾向が認められた。この傾向はTakagiら⁷⁰⁾の報告も同様の傾向である。

これらのことは、耐凍性が浸透濃度、糖含量の多少や増加量のみで決定されるものではないことを示唆している。低温処理期間中の葉位ごとの重量の変化から、処理期間中にハウレンソウの第1-2葉、コマツナの第1-2葉は老化の方向に進み、それ以上の葉位は発育の方向に進んだと考えられる(1章4節)。低温にさらされる前に完全に展開した葉は、細胞膜や様々な細胞内膜が暖かい環境下で形成されている。このような環境下で形成された生体膜の脂質構成と低温馴化中に出葉した葉の脂質構成などに違いがあることが考えられる。このことにより、ハウレンソウ、コマツナの浸透濃度および糖含量の挙動と T_{EL50} との関連が、上位葉と下位葉において一致しない原因となっている可能性が考えられる。

(3) 低温遭遇とベタイン

ベタインは葉緑体で合成され、葉緑体内に高濃度に

蓄積されている²⁰⁾。そして、葉緑体に蓄積したベタインは細胞質にも輸送され、細胞質においても浸透圧調節に関与していると考えられている。ベタインは浸透圧調節機能のみではなく、塩、高温および低温ストレス下において、生体高分子化合物の高次構造を保持する作用があると考えられており²⁰⁾、また、凍結下において生体膜の安定化に貢献していると示唆されている⁵⁷⁾。さらに、ベタインを合成しないシロイヌナズナにベタイン合成酵素をコードする遺伝子を導入した形質転換体において、蓄積したベタインが耐凍性の向上に寄与していることが示された⁵⁹⁾。

本研究では、ハウレンソウにおいてベタイン含量が低温遭遇1~5週目にかけて高まり、ベタイン含量が70~150mg/100gFWの範囲内で T_{EL50} との間に高い負の相関関係が認められた(第15図F、第16図C)。葉位ごとにみると、ベタイン含量は低温処理により上位、中位葉に多く蓄積し、下位葉ではほとんど増加せず、糖はハウレンソウでは中位、上位、下位葉の順に、コマツナでは中・上位、下位葉の順に多く蓄積した(第19図A~E)。一方、 T_{EL50} は両作物ともに、明らかに上位、中位、下位葉の順に低下した(第18図A)。このことから、ハウレンソウでは、低温遭遇により蓄積されたベタインは葉緑体や細胞質内で浸透圧調節や生体高分子化合物の高次構造を保持する役割を果たし、また、生体膜の安定化などの役割を果たして、糖の不足分を補う役割を担って、耐凍性増大に寄与していると推測される。

一方、コマツナではベタインは検出されなかった(1章3節)。環境ストレス下でベタインを合成する植物種と合成しない植物種が存在することが知られている。例えば、ハウレンソウやコムギ、オオムギなどはベタインを合成するが、シロイヌナズナ、タバコ、イネなどではベタインは合成されない(Chen・Murata, 2002)。本研究において、ベタインを合成するハウレンソウと合成しないコマツナで低温馴化後の T_{EL50} にはほとんど差がなかったが、このことは、コマツナでベタインの代替えをする何らかの機能が働いているためと考えられる。

(4) 低温遭遇とプロリン

多くの植物は環境ストレスを受けるとプロリンを蓄積する²⁰⁾。本研究において、十分に灌水して育てたハウレンソウとコマツナの低温処理前のプロリン含量がそれぞれ5、12mg/100gFWであったのに対し、灌水を控え、土壌水分が少ない状態で育てたハウレンソウ

とコマツナの低温処理前のプロリン含量はそれぞれ64、399mg/100gFWと高まった(第33図D, E)。プロリンはタンパク質の保護⁶⁵⁾、活性酸素の除去⁶⁶⁾、凍結ストレスや塩ストレス耐性の増加⁴⁶⁾に寄与することが報告されている。本研究において、乾燥条件で高まったプロリンは、ハウレンソウとコマツナの乾燥条件下における恒常性の維持に寄与していると考えられる。

10週間の低温処理を実施したところ、ハウレンソウとコマツナのプロリン含量は処理前はともに10mg/100gFWであったが、低温処理2週目にはハウレンソウが約100mg/100gFW、コマツナが約270mg/100gFWに高まった(第15図G)。

低温処理によりハウレンソウとコマツナにおいてプロリンが蓄積するが、葉位ごとにみると、プロリンは下位葉ではほとんど増えず、上位、中位葉の順に多く蓄積し、糖はハウレンソウでは中位、上位、下位葉の順に、コマツナでは中・上位、下位葉の順に多く蓄積した(第19図A~E)。一方、 T_{EL50} は両作物ともに、明らかに上位、中位、下位葉の順に低下した(第18図A, B)。さらに、土壤養分量が多いとハウレンソウ、コマツナともに低温処理後も糖含量が高まらないが、プロリン含量は土壤養分量が多い条件で両作物ともに高まった(第37図A~E)。一方、 T_{EL50} は両作物ともに、土壤養分量の多少にかかわらず低温処理により低下した(第18図A, B)。これらの結果から判断すると、プロリンは糖が比較的少ない条件(1~2 g/100gFW; 第19図A, B; 第37図A, Bより)下で多量に存在することで、タンパク質の保護⁶⁵⁾や活性酸素の除去⁶⁶⁾、さらには凍結脱水時において膜間のスペーサーとしての役割を果たしながら糖の不足分を補い、 T_{EL50} 低下に寄与しているのではないかと考えられる。

2) 環境要因が耐凍性に及ぼす影響

低温馴化時の明/暗期の気温は双方ともにハウレンソウとコマツナの耐凍性に影響を及ぼし、本実験で設定した範囲内では、ハウレンソウは5/-5℃区が、コマツナは5/-2℃区の耐凍性が最も増大した(第25図A, B)。また、20℃での3時間の脱馴化処理によりハウレンソウ、コマツナともに耐凍性が減少することが明らかになった(第27図A, B)。このことから、ハウス栽培において、日中の気温を高めないことがハウレンソウとコマツナの耐凍性の増大、脱馴化の防止に重要と考えられる。気温が5℃の条件下で地温、約3℃、約7℃、9~10℃間を比較すると、両作物ともに3℃が最も耐凍性が低下したが、3℃と7℃間の

T_{EL50} 差は0.4~0.5℃と小さく、3℃と9~10℃では T_{EL50} 差が1.2~2.7℃と大きくなった(第29図A)。北東北日本海側における冬期のマルチ栽培による地温上昇効果2~3℃(第64図)と考えられる。このことから、ハウス内でのマルチ栽培は耐凍性増大の弊害にはならないと考えられる。暗黒下の低温処理では両作物ともに耐凍性が増大せず、光を伴った低温処理で耐凍性が増大した(第30図A)。54、82、159mmol/m²/sec(0.7、1.3、3.7 MJ/m²/day)の範囲内では光強度の差は両作物の耐凍性に大きな差をもたらさなかった。北東北日本海側の12~1月にかけての日射量は3.9~4.7 MJ/m²/day³⁴⁾である。このことから、当地域の寡日射条件は耐凍性増大の弊害とはならないと考えられる。低温処理時の土壤水分が少ない方が耐凍性が増大した(第32図A, B)。このことから、多灌水を控えること、また、ハウス内への雪解け水の入水を回避することが耐凍性増大させるのに重要と考えられる。ハウレンソウでは土壤養分量が少ない方が耐凍性が増大し、コマツナの耐凍性は土壤養分量の影響が少なかった(第36図A, B)。このことから、ハウレンソウを作付けする前に、土壤の残存養分量を把握してから施肥し、多肥栽培を避けることが重要と考えられる。

3) ハウス栽培圃場における両作物の耐凍性

実際の圃場における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、コマツナの T_{EL15} がそれぞれ-12~-16℃、-11~-14℃となった(第41図)。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。ハウス内の気温と耐凍性の関係を解析した結果、ハウレンソウとコマツナにおいて、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42図)。すなわち、両作物の耐凍性は、平均最低気温が8℃から2℃にかけては緩やかに、平均最低気温が2℃以下になると急激に増大した。このことから、栽培ハウスの最低気温を記録し、過去7日間の最低気温を把握することで、その時点の耐凍性を推定することができると考えられる。この推定した値は、寒波到来時に栽培中のハウレンソウとコマツナに保温をはかる必要があるかどうかに関する判断材料(Ⅲ章4節)として、また、両作物の糖とビタミンC含量を高めるための外気導入時(Ⅲ章5節)において凍結傷害を回避する気温管理方法の判断材料として応用できると考えられる。

2 ホウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量

日本海側における冬期間の気象の大きな特徴は、低温に加え、降雪、曇天日が続き日射量が著しく低下することにある。このような環境下では、単位面積当たりの生産量は、関東や西南地域に比べ大きく減少する。また、冬期に葉菜類栽培を実施する場合、農家は厳しい寒さの中での収穫作業や除雪作業を行わなければならない。したがって、農家の冬期葉菜類栽培に取り組む気持ちを喚起するためには、凍結傷害を回避して葉菜類栽培が可能であることを示すのみでは必ずしも十分ではなく、さらに、冬期の低温条件が葉菜類の品質を高めるための利点であることを示す必要がある。

もし、この地域の低温条件を活かして、糖とビタミンC含量の高い、高付加価値の葉菜類を生産することができれば、農家収入の増加が期待できる。そこで、コマツナの糖とビタミンC含量に及ぼす冬期寡日射下での低温の影響と、栽培期間中の気温がホウレンソウとコマツナの糖とビタミンC含量に及ぼす影響について調査した。

1) 寡日射下の低温条件がコマツナの糖とビタミンC含量に及ぼす影響

コマツナをコンテナに播種し、加温をして日平均気温を13~15℃に保ったハウス内で育成した後、日平均気温で2~3℃のハウスへ移動して低温処理を実施したところ、低温処理区で生体重の増加が抑制された半面、糖含量は葉身、葉柄双方で大きく高まり、さらに、ビタミンC含量は葉身で大きく高まった(第48図、第49図)。一方、加温処理区では糖含量には大きな変化はみられなかった。

低温処理により、コマツナの糖とビタミンC含量は高まったが、低温処理の後に加温処理を実施すると、急激に低下した(第49図)。このことは、ハウス栽培において、低温条件を活かして糖とビタミンC含量の高いコマツナを育成しても、その後にはハウス内の気温が高まると、両成分含量が低下することを示している。このことから、安定して糖とビタミンC含量の高いコマツナを生産するためには、コマツナの栽培時の温度を継続して低く保つことが必要であると考えられる。

本研究において、単位面積当たりの糖とビタミンC含量は低温処理区が加温処理区を大きく上回った(第6表)。これは、低温処理区で生育は抑制されたものの、新鮮重当たりの上記成分含量が著しく増加した結果と考えられる。以上のことから、従来は北東北日本海側の冬期の気象条件は、野菜生産に不利とされてき

たが、この地域の寡日射下においても、冬期の自然の低温条件がコマツナの新鮮重当たりの糖およびビタミンC含量と単位面積当たりの上記成分の含量を高めるのに有効なことが明らかとなった。したがって、この地域においても冬期に高品質の葉菜類の生産が可能であると考えられる。

低温処理による糖含量の増加は、生長と呼吸が抑制されたことにより、光合成産物の消費が減少し、植物体内に糖が徐々に蓄積されたことが一因として考えられる。しかし、低温による糖の蓄積が、単なる合成と消費の関係からのみ成立しているのではないであろう。実際、ホウレンソウ¹⁹⁾やキャベツ⁶³⁾では低温処理によりインベルターゼ活性が低下し、スクロースリン酸シンターゼ活性が高まる。このことは、スクロースからグルコースやフルクトースへの変換、さらには、スクロース合成などにかかわる酵素活性の調節を含む広範な糖代謝が、低温馴化時の糖の蓄積に重要な役割を果たしていることを示唆している。

ビタミンC(アスコルビン酸)は光合成産物であるグルコースを前駆物質としてつくられる⁶⁴⁾。そして、日射量の増加が光合成を活発にし、糖の生産を増やす結果、アスコルビン酸含量も上昇するものと考えられている⁶⁵⁾。確かに基質の増加はアスコルビン酸の合成に有利に働くと考えられる。しかし、本実験では低温処理区において、糖含量は葉身、葉柄ともに同様のパターンで急激に増加しているが、アスコルビン酸含量は葉身における増加が急激におこり、葉柄では徐々に増加している。この事実は、基質の増加だけでは説明できず、葉身の光合成能に着目する必要があると考えられる。

光合成において、葉に吸収された光エネルギーにより H_2O は O_2 、 H^+ 、 e^- にまで分解されるが、電子伝達系末端から生ずる e^- をすべて受容するだけの CO_2 が炭酸固定部位にまで達しない場合、活性酸素が生じる²⁵⁾。アスコルビン酸はこの活性酸素を消去する働きがあり、葉緑体に多く存在することが報告されている¹⁰⁾。本実験においても、総アスコルビン酸含量は葉柄に比べ、葉緑体の多い葉身で高かった。

光合成における光化学系は温度依存性が低く、低温条件でも反応が進む。しかし、低温条件は炭酸固定反応活性を低下させるため、活性酸素が生じやすい。この活性酸素は生体にとって有害であり、葉緑体膜などに損傷を与える²⁶⁾。しかし、実際の冬期のハウス葉菜類栽培ではこの損傷による葉身の白化などの障害は、

あまりみられない。加藤³²⁾は、低温条件では光合成により発生する活性酸素の消去にかかわっているβ-カロチン、アスコルビン酸が増加すると考えている。本実験の低温処理区における葉身のアスコルビン酸の増加は、光合成で発生する活性酸素の消去を効率的に行うために、積極的に合成機構が誘導された結果であると推測される。

2) ハウス内気温がホウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量に及ぼす影響

次に、両作物の糖とビタミンC含量を高めるためのハウス内気温管理に関する知見を得ることを目的に、栽培期間中の気温とホウレンソウとコマツナの糖、ビタミンC含量との関係を解析した。

ホウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量と栽培期間中の最高、最低および平均気温との間の関係を解析した結果、両作物の上記成分は収穫前10日間の最低ないしは平均気温の影響を大きく受けることが明らかになった(第7表, 第8表)。すなわち、両作物ともに収穫前10日間の平均最低気温が20~5℃の領域では糖とビタミンC含量がそれぞれ1g/100gFW以下、50~75mg/100gFW以下であるが、5℃以下の領域では両作物の上記成分が直線的に上昇した(第52図, 第53図)。例えば、平均最低気温が5℃から-5℃に低下すると、両作物葉身の糖含量は約1g/100gFWから約5g/100gFWに直線的に高まり、両作物葉身のビタミンC含量は50~70mg/100gFWから約175mg/100gFWに直線的に高まった。このことから、冬期に寡日射条件となる地域においては、ハウス内の最低気温を把握することで糖とビタミンC含量を大まかに推定でき、収穫前10日間の平均最低気温を-5℃程度で管理すると、糖とビタミンC含量が非常に高いホウレンソウとコマツナを生産することが可能と考えられた。

3 積雪寒冷地域における冬期葉菜類の産地化に向けて

1) 冬期に利用するハウス面積の目標値

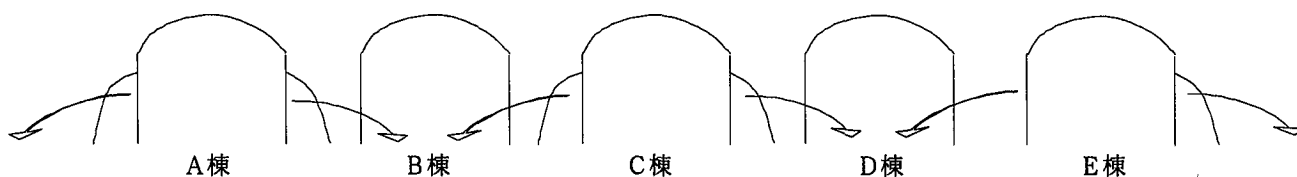
秋田県のハウス面積は約500ha(1999年)であり、その中で、約80haのハウスが冬期に農業生産に利用されている(第1図C)。現在も県内のハウス面積は

徐々に増加している。現在の利用されているハウスの大半が鉄骨パイプハウスであり、また、増加しているハウスのほとんども鉄骨パイプハウスである。

鉄骨パイプハウスには直径19mm、22mm、25mm、32mmなど様々な太さの鉄パイプが使用されている。直径19mmのパイプハウスは水稻の育苗ハウス専用のものがほとんどであり、夏期だけしか使用できない。しかし、現在、秋田県や市町村、農協の助成を受けて建設されるパイプハウスは、周年使用することを前提にしているので、耐雪型のパイプハウスが大半である。第1図Cで集計されたハウスはこの耐雪型のもので、水稻育苗専用のハウスは対象になっていない。

北東北日本海側の積雪深は、沿岸部が約30cm、内陸平野部が約1m、奥羽山脈付近は2m以上のところが多い。耐雪型のパイプハウスでも、ハウスの肩付近まで雪がたまると、屋根に積もった雪が滑らなくなる。そして、鉄骨が雪の重さに耐えられなくなると、ついに倒壊する。倒壊を防ぐには、屋根に積もった雪が滑り落ちるように、パイプハウスのサイドの雪を除雪する必要がある。パイプハウスを建てるときの間隔は、建設するパイプハウス面積と、それに充当される敷地面積により決定されるが、通常は、パイプハウスとパイプハウスの間は、機械除草できる程度の間隔(1.8~2m程度)が確保されている場合が多い。このような間隔でパイプハウスが建てられている場合、除雪を考慮するならば、冬期間は、第85図で示されているように、1棟おきにビニールをかけたり、はずしたりして使用するのがよい。そして、ビニールをはずしたハウスのところを除雪スペースに利用すると都合がよい。

このように、保有するパイプハウスの半数棟を冬期の野菜栽培に利用し、半数棟は除雪スペース利用する。冬期にはこのようにするのが最も都合がよいと考えられる。このことを考慮するならば、現存する耐雪型のパイプハウスの50%、1999年で計算するならば、250haを冬期利用ハウスの目標値と設定するのが良いと考えられる。



第85図 ハウスの除雪

注：A、C、E棟に冬期作付する。B、D棟はビニールを除去して、休作し、除雪スペースに利用する。

2) 品種選定

ハウレンソウとコマツナの10月播種における生育、耐凍性および糖とビタミンC含量を調査し、両作物の冬期栽培における適品種の選定を試みた。

低温伸長性の面からは、ハウレンソウでは‘ソロモン’と‘アトランタ’が、コマツナでは‘せいせん7号’が冬期栽培に適すると考えられた(第60図)。

ハウレンソウ、コマツナの厳寒期の耐凍性には品種間差異がみられ、ハウレンソウの T_{MLD} は‘ソロモン’が‘ミストラル’よりも約3℃低く、コマツナの‘せいせん7号’が‘笑天’よりも約2℃低かった(第12表)。このことから、冬期の栽培品種の選定にあたっては、低温伸長性や収量のみならず、耐凍性の面からの選定も重要であると考えられ、本試験結果からは、ハウレンソウでは‘ソロモン’と‘アトランタ’が、コマツナでは‘せいせん7号’と‘よかった菜’が耐凍性の面からは、冬期栽培に適すると考えられた。

ハウレンソウの可食部の全糖含量とビタミンC含量は、供試した5品種ともに、厳寒期に全糖含量、ビタミンC含量が高まり、冬期栽培に適していると考えられた。また、コマツナの可食部の全糖含量、ビタミンC含量は、‘せいせん7号’、‘よかった菜’、‘極楽天’が厳寒期に高く、冬期栽培に適していると考えられた(第61図, 第62図)。

以上のことから、低温伸長性、耐凍性、糖およびビタミンC含量の観点から総合的に判断すると、ハウレンソウでは‘ソロモン’と‘アトランタ’が、コマツナでは‘せいせん7号’、次いで‘よかった菜’が冬期栽培に適すると考えられた。

ハウレンソウとコマツナの品種は、毎年のように新品种が発表されている。したがって、3~5年に1回程度、産地、JA、農業改良普及センター、農試が連携して品種比較試験を実施し、適品種の発掘に勤めることが望ましいと考えられる。

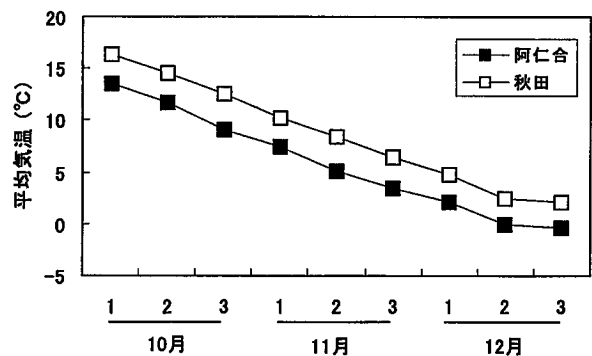
3) 地域のハウス内気温に適した生育コントロール

1月上旬から出荷を開始するためには、12月下旬に出荷可能な草姿にまで生育させ、その後に、10日間程度十分な低温に遭遇させ、糖とビタミンC含量を高めることが重要である(II章2節)。そのためには、10月に播種し、12月下旬まで草丈で25cm程度まで伸長させる必要がある(III章1節)。

ハウレンソウとコマツナは、15℃以下になると草丈の伸長が次第に低下し、5~7℃では草丈伸長が著しく抑制される(第54図E, F)。したがって、ハウレン

ソウは15℃~8℃程度、コマツナは15℃~6℃程度の平均気温が確保できる時期に草丈を伸長させ、5℃に低下する頃までに(秋田市では12月上旬)草丈を出荷できる草姿にまで育成させることが必要である。そのためには、どの時期に、どの位の草丈に伸長させるべきかといった草丈伸長目標指針を作成することが必要であると考えられ、秋田市における目標指針をIII章1節で示した(第56図C, D)。

筆者は2000/01年~2003/04年にかけて秋田県北内陸部のJA北央管内(合川町、森吉町、阿仁町、上小阿仁村の4町村が管内)において冬期葉菜類栽培に関する現地試験を実施している。日本海側において、沿岸部と内陸部では10月から12月にかけての気温が大きく異なる。第86図に沿岸部の秋田市と内陸部の阿仁合(JA北央管内)の10月から12月にかけての平均気温の推移を示す(アメダスデータ)。同時期で比較すると、外気温は内陸部のJA北央管内は沿岸部の秋田市よりも約3℃平均気温が低く、外気温が10℃、5℃になる時期はJA北央管内の方が秋田市よりも15日ほど早まる。秋田市とJA北央管内の同年のハウス内気温を比較したデータはないが、外気温の比較から、JA北央管内の方が秋田市よりもハウス内気温が早い時期に低下すると推定される。



第86図 秋田市と阿仁合の気温比較 (アメダスデータ)

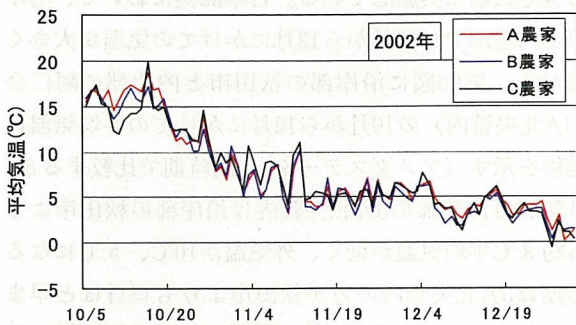
JA北央管内の3農家の2002/03年におけるハウス内気温の比較を第87図に示す。3農家のハウス間の平均気温には大きな差がみられない。しかし、ハウス内の平均気温を2000年、01年、02年の3カ年で比較(A農家)すると、年次差が非常に大きい(第88図A)。例えば、ハウレンソウやコマツナの草丈の伸長にとって、非常に重要な時期である10月下旬から11月下旬にかけて、02年は2000年、01年に比べ、約5℃低めに推移している。このようなハウス内平均気温の年次差が、ホ

ウレンソウの草丈の伸長にも大きく影響し、2000年、01年に比べ、2002年の草丈の伸長が大きく遅延した(第88図B)。

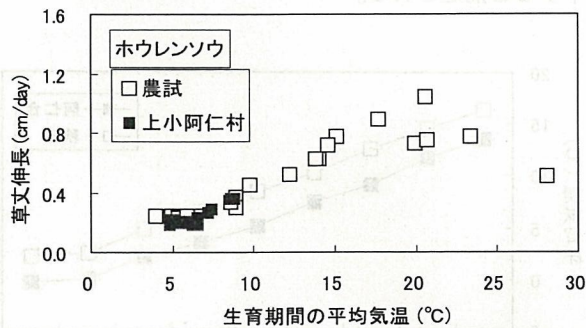
秋田市(Ⅲ章1節)とJA北央管内におけるハウス内気温とハウレンソウの草丈伸長との関係を第89図に示す。ハウレンソウの草丈はJA北央管内においても秋田市と同様に、平均気温が7℃以下では草丈伸長が約0.3cm/日と著しく低下した。

この現地試験で得られたJA北央管内のハウス内気温とハウレンソウの草丈伸長の結果から、JA北央管内に適した草丈伸長管理指針を作成

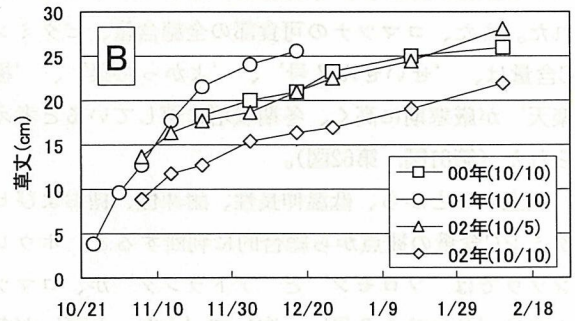
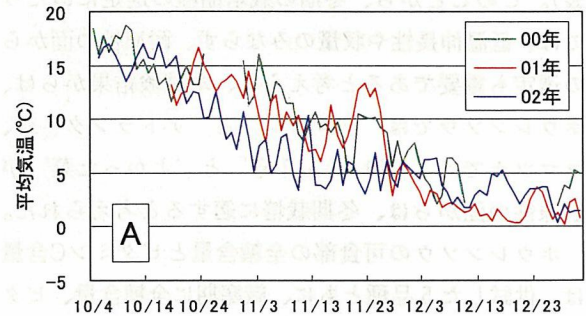
し、第90図に示す。JA北央管内では、秋田市よりも播種期を早め、10月1～5日頃に播種する必要がある。また、11月下旬頃にはハウス内の平均気温が5℃に低下するので、この時期までにハウレンソウを出荷できる草姿に育成する必要がある。このように、栽培する地域のハウス内気温にあわせた草丈伸長管理指針を作成する必要がある。なお、2003年8月に、農業試験場、北秋田農業改良普及センター、JA北央が協力し、冬期ハウレンソウの栽培暦を作成したので、132ページに添付する(第92図)。



第87図 JA北央管内3農家の2002年10月～12月にかけてのハウス内気温の推移

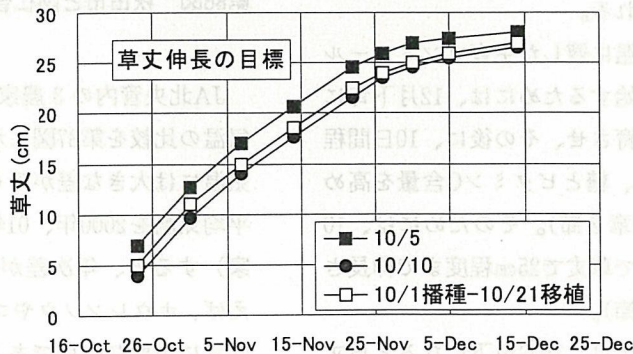


第89図 秋田市とJA北央管内におけるハウス内気温と草丈伸長との関係



第88図 2000年、01年、02年におけるA農家のハウス内気温の年次変動(A)と3カ年のハウレンソウの草丈伸長の比較(B)

注：□，2000年10月10日播種；○，2001年10月10日播種；△，2002年10月5日播種；◇，2002年10月10日播種。



第90図 JA北央管内におけるハウレンソウの草丈伸長目標

4) ホウレンソウとコマツナの移植栽培

秋田県の系統野菜販売額の上位を占めているのは、スイカ、キュウリ、トマト、アスパラガス、ネギ、エダマメ、ホウレンソウ、メロンなどであり、トマトとホウレンソウはほとんどがハウスで生産され、キュウリやメロンは約半分がハウスで生産されている⁵⁾。メロンの多くは出荷時期が7~8月であり、また、ホウレンソウは計画的に作付けることで、適期(Ⅲ章1節)に冬期栽培のホウレンソウやコマツナを播種することができる。しかし、トマトやキュウリは10月下旬頃まで収穫期が延長されるので、後作に両作物を適期に播種することができない。

12月下旬までに出荷できる草姿に育成するためには、直播栽培ではホウレンソウは10月中旬、コマツナは10月下旬にハウスに播種する必要があるが、移植栽培では、ホウレンソウを10月10日にチェーンポットに播種し、10月31日にハウスに移植をすると、コマツナでは10月17日にチェーンポットに播種し、11月6日にハウスに移植をすると、12月下旬に収穫期に到達させることが可能であった(第58図A, B)。これらのことから、移植栽培を導入することにより、夏作物をホウレンソウでは10月下旬まで、コマツナでは11月上旬まで延長しても、後作に1月から出荷を開始するホウレンソウ、コマツナ栽培が可能であると考えられた。また、両作物の耐凍性は、移植栽培と直播栽培は同程度と判断され(第11表)、糖とビタミンC含量は、移植栽培と直播栽培に大きな差異は認められず、同等と判断された(第59図)。

農家は草丈の伸長効果ねらいに、保温を実施している。しかし、寡日射下においては、不織布のべたがけやトンネルの保温による草丈伸長効果は、播種期を4~5日程度早めるのと同じ程度でしかない(Ⅲ章4節)。移植栽培を実施することにより、両作物のハウス内へ導入する時期を14日程度遅らせ、栽培開始時期をホウレンソウは10月下旬、コマツナは11月上旬に遅らせることができる。その分、夏作物の収穫期を延ばすことができるので、適期に直播できない場合には、移植栽培を実施するのが有効と考えられる。

5) 糖とビタミンC含量の高いホウレンソウとコマツナの生産

(1) 保温

農家は、生育促進効果をねらいとして、不織布やビニルのトンネルなどで保温を実施している事例が多い。そこで、ハウス内保温がコマツナの生育、糖およびビ

タミンC含量に及ぼす影響を検討した。

不織布トンネル、ビニルトンネル内の平均気温は、ハウス内気温(無保温)よりもそれぞれ約1℃、約2℃高かった(第63図)。このため、播種期から保温を継続することにより、無保温よりも出荷期が約20日程早まる。しかし、これは播種日を4~5日早くするのと同程度の効果で、それほど大きな効果であるとはいえない(Ⅲ章4節)。また、保温を継続すると、コマツナは軟弱に生育し、葉色が淡く、また、葉身率も低下し、商品性が低下した。さらに、保温を継続すると、糖およびビタミンC含量は無保温よりも低下した(第68図、第70図)。このことから、保温を継続すると、本県の冬期の低温を活用した糖およびビタミンC含量の高い葉菜類生産ができないことが明らかとなった。

以上のことから、寡日射下の本県においては、不織布のべたがけやビニルトンネルはコマツナの耐凍性を上回る寒波の到来時のみ、緊急避難的に使用することが望ましく、長期間にわたって実施するのは避けた方がよいと考えられる。

(2) 外気導入

寡日射下においても低温処理によりコマツナの糖やビタミンC含量が高まり(Ⅱ章1節)、また、収穫前10日間の平均最低気温を低く管理すると糖とビタミンC含量が高まることが明らかになった(Ⅱ章2節)。そこで、ホウレンソウとコマツナを保温して栽培するのではなく、逆に、ハウスのサイドを開放し、冬の冷気をハウス内への積極的に導入し、ハウス内気温を低く保って栽培することが、両作物の生育、糖およびビタミンC含量にどのような影響を及ぼすのかを検討した。

収穫期になってからハウスを密閉して管理すると、収穫期間はホウレンソウで40~50日、コマツナで20~40日程度である(第73図)。しかし、ハウスを開放すると、両作物の草丈の伸長が著しく抑制されるので、長期間にわたって出荷を継続することが可能となる。長期にわたって出荷が可能になることは、市場や、スーパーなどの小売量販店、消費者との信頼関係を構築しやすくし、有利販売に結びつけるために有効である。

ホウレンソウ、コマツナ双方の糖とビタミンC含量は、ハウスを開放し外気を導入することにより、ハウスを密閉して管理するよりも高まった(第76~78図)。このことから、冬期の低温を活用することにより、糖とビタミンC含量の高いホウレンソウとコマツナを生産できることが明らかになった。

2℃程度の低温処理により糖とビタミンC含量の増

加したコマツナを、13～15℃で栽培すると、急激に糖とビタミンC含量が低下した(Ⅱ章1節)。密閉していると、晴天日にはハウス内気温が高まり(第72図D)、一端増加した糖とビタミンC含量が減少する危険性がある。消費者の信頼を確保するためには、安定して糖とビタミンC含量の高いハウレンソウやコマツナを出荷することが重要である。この観点からもハウスを開放してハウス内気温を常に低く保ち、両成分含量の低下を防止することが重要である。

6) 凍結傷害の回避

(1) 初冬と早春期における凍結傷害回避

ハウス内の気温と耐凍性の関係を解析した結果、ハウレンソウとコマツナにおいて、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、両作物の耐凍性は、平均最低気温が8℃から2℃にかけては緩やかに、平均最低気温が2℃以下になると急激に増大した(第42図)。このことは、栽培ハウスの最低気温を記録し、過去7日間の最低気温を把握することで、その時点の耐凍性を推定することができることを示している。北東北沿岸部において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月上中旬以降であるが(第39図)、 T_{EL15} は両作物ともに12月下旬には-10℃以下になった(第41図)。したがって、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月中旬の初冬にかけて、両作物が未だ十分に低温馴化していない時期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。

これらの凍結傷害を回避するためには、初冬において、ハウレンソウやコマツナの草丈が出荷できる程度に確保されている場合には、11月中旬～12月中旬の最低気温が0～-2℃程度になる時点で、夜間にハウスを開放して耐凍性を増大させることが有効である。また、草丈が出荷できる程度に確保できておらず、草丈を伸長させる必要がある場合には、両作物の耐凍性がどの程度であるかを推定し(Ⅰ章6節)、その耐凍性を上回る寒波の到来が予想されるときは不織布などで緊急避難的に保温をはかる必要がある。また、2月中旬以降においてはハウス内気温の上昇による両作物の脱馴化を防止するため、ハウスを開放することが有効であると考えられる。

(2) 保温と耐凍性

農家は、生育促進効果や凍結傷害防止をねらいとして、不織布やビニルでのトンネルなどで保温を実施している事例が多い。しかし、凍結傷害防止を目的の一つにして保温を実施しているにもかかわらず、凍結傷害が散見される。そこで、ハウス内保温がコマツナの耐凍性に及ぼす影響を検討した。

夜間の気温は、保温により無保温の場合に比べ1～3℃高く保たれる(第63図)。しかし、耐凍性は保温を継続すると無保温よりも2～4℃劣った(第14表)。このことから、保温を継続することにより、逆に凍結傷害を受ける危険性が高まることが明らかになった。したがって、冬期に寡日射条件になる北東北日本海側においては、不織布のべたがけやトンネルは葉菜類の耐凍性を上回る寒波の到来時に緊急避難的に使用することが望ましいと考えられる。

(3) 外気導入と耐凍性

i 外気導入の方法

糖とビタミンC含量の豊富なハウレンソウとコマツナを生産するために、北東北の寒冷な気象を有効に利用すると、非常に大きな力を発揮する。つまり、両作物を出荷できる草姿に育てた後に、ハウスのサイドを開け放ち、冬の冷たい外気をハウス内に導入し、両作物を低温にさらすことにより、両作物の糖とビタミンC含量を高めることができる(Ⅲ章5節)。しかし、実際にハウスを開放する際に、農家が大きな不安を感じることは事実である。まず、吹雪の日、強風のためにハウスを覆っているビニールがはがされないかどうかの不安がある。次に、寒波の到来時、作物が凍結傷害を受けないかどうかの不安がある。

まず、ビニールがはがされないかどうかであるが、ハウスの一方だけ開放すると、入り込んだ風によりビニールが持ち上げられ、はがされる危険性がある。しかし、サイドの両方を開放することにより、一方から入り込んだ風は反対側から抜けていくので、ビニールが破がされる危険性はない。また、ハウスのサイドに目合い1mm程度の防風ネットを張ることにより、作物が強風で傷むのを避けることができる。ハウス開放の様子を第79図に示す。

ただし、ハウレンソウとコマツナが十分に低温馴化していない状態でハウスを開放する際は、次の点に注意する必要がある。①ハウスの開放開始日は、強い寒波の到来時を避ける。②ハウスサイドを開放する時、一挙に開放せず、始めはサイドを10～15cm程度開放し、

3～5日ほど経過してから、サイドを40cm程度開放する。

ii 外気導入と凍結傷害

冬期（12月下旬～3月上旬）にハウスを密閉して管理すると、最高気温、最低気温が沿岸部の秋田市ではそれぞれ5～15℃、-2～1℃、海岸から約12km内陸に位置する雄和町ではそれぞれ5～10℃、-4～-1℃で推移する。この時期にハウスを開放すると、秋田市、雄和町ともに、密閉しているよりも最高気温は5～10℃低下する（第72図）。しかし、最低気温はハウスを開放しても密閉している時よりも1～2℃低下するのみであり、最低気温における開放、密閉ハウス間の差は小さい。一方、開放ハウスにおける両作物の T_{EL15} 、 T_{EL50} は密閉ハウスよりも2～5℃低下した（第75図）。このことから、開放ハウスにおいて凍結傷害を受ける可能性は密閉ハウスよりも低いことが明らかとなった。

キャベツにおいては、3～6時間の短時間の脱馴化処理（20℃）により、耐凍性が減少することが知られている⁶²⁾。ハウレンソウとコマツナにおいても3時間程度の脱馴化処理（20℃）により耐凍性が減少しはじめる（I章5節）。積雪寒冷地域において、12月から2月上旬の厳寒期に晴天日になることは少ないが、2月中旬以降は晴天日も増加する。密閉ハウスにおいて、晴天日にはハウス内気温は急激に上昇するので（第72図D）、両作物が脱馴化する可能性がある。このため、ハウスを密閉管理すると凍結傷害の危険性が高まることが考えられる。しかし、ハウスを開放管理するとハウス内気温が上昇しないので、脱馴化が防止され凍結傷害を受ける可能性が低下する。

7) 生産者と消費者との信頼関係の構築

(1) 出荷前にハウスで糖度をチェックする。

産地において品質をチェックし、品質の良いものを出荷することは、流通業者や消費者との信頼関係を築く上で重要である。この観点から、栽培ハウスにおいて、農家が立ち会いの元で、ハウレンソウとコマツナの糖とビタミンC含量をチェックし、出荷目標値以上のものを出荷することが望ましい。このため、簡易に上記成分を推定することができれば、便利であると考えられるので、生産現場で容易に測定可能なBrix示度が、糖およびビタミンC含量の高いハウレンソウ、コマツナを判断する指標として使用できるかどうか検討した。

その結果、ハウレンソウとコマツナの糖とビタミン

C含量の出荷目標値をそれぞれ3g/100gFW以上、90mg/100gFW以上とするならば、Brix示度の出荷目標値は、両作物ともに7%以上とすることが適切と考えられた（第82図、第83図）。

(2) 産地形成および産地と流通側・消費者間の連携
産地を形成するためには、①しっかりしたものを作り、②それを上手に売り、③きっちりと農家所得を得る、ことが必要である。

i 糖とビタミンC含量の高いハウレンソウ、コマツナの生産

糖とビタミンC含量の高いハウレンソウとコマツナを生産する基本的な技術についてIII章で詳細に記述した。このことを実現するには、先頭に立つ意欲的な農家の育成が必要であり、そのために、農協、地域普及センター、農試が連携しあえば効率的である。

農試では2000/01年～2003/04年にかけて、秋田県北部のJA北央管内で現地試験を行っている。2000/01年に上小阿仁村の実験農場で初めて冬期ハウレンソウ、コマツナの現地試験を実施し、この現地試験ハウスをJA北央管内の農家にみてもらった。農試では、栽培の実証試験をすると同時に、秋田市中央卸売り市場の集荷業者（丸果）とハウレンソウの契約栽培（契約期間1月4日～3月中旬）をする段取りをつけた。JAが栽培希望者を募り、2001/02年に3名の農家が販売目的の冬の寒さを活かしたハウレンソウ栽培を開始した。2002/03年は10月下旬～11月下旬にかけて2000/01年、2001/02年よりも気温が5℃ほど低く経過し、出荷開始が2月にずれ込み、契約どおりの出荷ができなかった。このことに対する反省から、2003年6月から8月に北秋田農業改良普及センターと農試が協力して栽培暦原稿を作成し、JA北央が印刷費を出し、「寒じめハウレンソウ栽培暦」（図表の最終ページに添付）を作成した。2003/04年は栽培者が10名に増え、栽培面積も増加している。JA北央管内における現地試験の結果は、産地化を図るために、農試の技術開発・現地実証、農業改良普及センターの農家ハウスの土壌調査や栽培指導、JAの栽培農家の発掘・勧誘にたいする積極的な取り組み、が連携しながら行われると非常に効率の良いことを実証したと考えることができる。

ii 産地と流通業者との契約栽培による農家所得向上および消費者との信頼関係の構築

秋田県南部内陸部の大森町では1996/97年からスーパーと契約して冬期ハウレンソウ栽培を行っている。第91図に市場単価と契約単価を示す。市場単価は1月

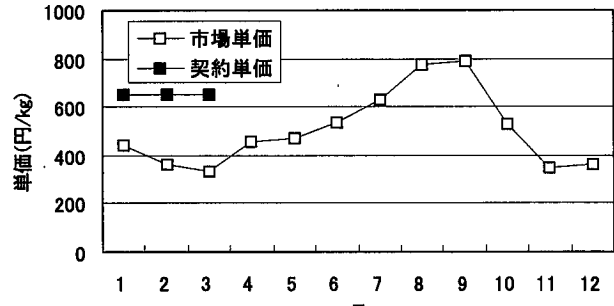
～3月にかけて442～336円で推移している。一方、契約栽培の単価は650円と高い。大森町の農家調査によると収量は1,742kg/10aで、単価は650円/kg、粗収益は1,132千円/10aとなっている³⁹⁾。また、契約栽培により流通経費が削減され、所得も向上している。

スーパーが契約単価を高めに設定しているのは、スーパーの地産地消を推進しようとする方針に依拠している。そして、この高単価は生産側が糖とビタミンC含量が高く、美味しく、栄養価が高いハウレンソウを提供することを前提にして成立している。このことから、流通業者、消費者との信頼関係を増していくことが農家所得の向上に重要である。

生産者と消費者との信頼関係の構築は、単に農家所得向上にとどまらず、日本農業の継続という面からも最重要課題であると考えられる。日本の農産物の最大の顧客は日本の消費者である。日本の消費者、地域の消費者と確固とした信頼関係を築くことで、安価な輸

入農産物と対抗していくことが重要と考える。

消費者との信頼関係を築くためには、しっかりとした、品質の高い農産物を生産すること、また、消費者の要望にできる範囲内で最大限応えていき、また、消費者が知りたい内容を提供していくことであると考え



第91図 ホウレンソウの市場単価と契約栽培単価 (1996, 1997年)

VI 摘 要

1 ホウレンソウとコマツナの耐凍性

1) 低温遭遇に伴うハウレンソウ、コマツナの浸透濃度、糖、ベタイン、プロリンおよび耐凍性の変化

10週間の低温遭遇により T_{EL50} はハウレンソウでは -6.5°C から約 -17°C へ、コマツナでは -5.6°C から約 -18°C へともに大きく低下した。同時期に、浸透濃度はハウレンソウ、コマツナともに高まった。そして、ハウレンソウでは $375\sim 750\text{mmol/kg}$ 、コマツナでは $338\sim 800\text{mmol/kg}$ の範囲内で浸透濃度と T_{EL50} との間に高い負の相関関係が認められた。さらに、ハウレンソウとコマツナ的全糖含量が高まった。そして、全糖含量がハウレンソウでは $0.3\sim 3\text{g}/100\text{gFW}$ 、コマツナでは $0.3\sim 3.5\text{g}/100\text{gFW}$ の範囲内で全糖含量と T_{EL50} との間に高い負の相関関係が認められた。一方、両作物ともに、上述の範囲以上に糖含量が高まっても T_{EL50} は低下しなかった。

ベタインはハウレンソウでは低温遭遇により増加したが、コマツナでは検出されなかった。ハウレンソウのベタイン含量は低温遭遇1～5週目にかけて高まり、ベタイン含量が $70\sim 150\text{mg}/100\text{gFW}$ の範囲内で T_{EL50} との間に高い負の相関関係が認められた。葉位ごとに見ると、ベタイン含量は低温処理により上位葉は増加したが、下位葉ではほとんど変化しなかった。

ハウレンソウとコマツナ的全遊離アミノ酸含量は低温処理1～2週目には高まったが、3～10週目にかけては漸減した。その中において、プロリン含量は2週目までは増加し、その後はほとんど変化しなかった。しかし、全遊離アミノ酸含量に対するプロリンが占める割合は、低温処理期間中を通じて上昇した。以上の結果は、低温遭遇中に増加した浸透濃度、糖、ベタイン、プロリンはハウレンソウとコマツナの両作物の耐凍性の増大に寄与していると考えられる。

2) ハウス栽培圃場におけるハウレンソウとコマツナの耐凍性

ハウス栽培圃場における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、コマツナの T_{EL15} はそれぞれ $-12\sim -16^{\circ}\text{C}$ 、 $-11\sim -14^{\circ}\text{C}$ となった。そして、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。ハウス内の気温と両作物の耐凍性との関係を解析した結果、耐凍性測定前7日間の平均最低気温と両作物の耐凍性との間に極めて高い相関関係が認められた。このことから、栽培ハウスの最低気温を記録し、過去7日間の平均最低気温を把握することで、その時点の耐凍性を推定することができると考えられる。この推定した値は、実際のハウス栽培において、凍結傷害を回避する気温管

理方法の判断材料に応用できると考えられる。

2 ハウス栽培におけるハウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量

コマツナを日平均気温で13~15°Cに保ったハウス内で育成した後、日平均気温で2~3°Cのハウスへ移動して低温処理を実施したところ、糖、ビタミンC含量が大きく高まった。一方、13~15°Cを継続すると両成分含量に変化がみられなかった。このことから、寡日射下においても、冬期の自然の低温条件がコマツナの糖およびビタミンC含量を高めるのに有効であることが明らかとなった。

ハウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量と栽培期間中の最高、最低および平均気温との間の関係を解析した結果、両作物の上記成分は収穫前10日間の平均最低気温ないしは平均気温と密接な関係にあることが明らかになった。このことから、冬期に寡日射条件となる地域においては、ハウス内の平均最低気温を把握することで糖とビタミンC含量を大まかに推定できると考えられた。そして、収穫前10日間の平均最低気温を-5°C程度で管理すると、糖とビタミンC含量の非常に高いハウレンソウとコマツナを生産することが可能であると考えられた。

3 凍結傷害を回避した糖とビタミンC含量の高いハウレンソウとコマツナの生産技術

1) ハウレンソウとコマツナの凍結傷害の回避

厳寒期にはハウレンソウとコマツナ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、未だ十分に低温馴化していない初冬や、日中のハウス内気温が高まる早春に凍結傷害が引き起こされる危険性がある。

初冬において凍結傷害を回避するためには、ハウレンソウやコマツナの草丈が25cm（出荷可能）程度の時は、11月中旬~12月中旬の最低気温が0~-2°C程度の時、夜間にハウスを開放して耐凍性を増大させることが有効である。草丈が25cm以下の時は、両作物の耐凍性がどの程度であるかを推定し、その耐凍性を上回る寒波の到来が予想されるときに、緊急避難的に不織布などで保温をはかる必要がある。

2月中旬以降、ハウスを密閉していると、晴天日にはハウス内気温は急激に上昇するので、両作物が脱馴化し、凍結傷害の危険性が高まる。しかし、ハウスを開放管理すると、ハウス内気温が上昇しないので、脱馴化が防止され、凍結傷害を受ける危険性が低下する。

不織布などで保温をはかることにより、夜間の気温

は1~3°C高く保たれる。しかし、保温を継続していると耐凍性は無保温の場合に比べて2~4°C劣った。このことから、保温を継続していると、凍結傷害を受ける危険性が高まると考えられる。

冬期にハウスを開放すると密閉しているよりも最高気温は5~10°C低下するが、最低気温は1~2°Cしか低下しない。一方、開放ハウスにおける両作物の T_{EL15} 、 T_{EL50} は密閉ハウスよりも2~5°C低下した。このことから、開放ハウスにおいて凍結傷害を受ける可能性は密閉ハウスよりも低いことが明らかとなった。

2) 糖とビタミンC含量の高いハウレンソウとコマツナの生産技術

ハウレンソウとコマツナを1月上旬から出荷するためには、ハウス内気温が地域により異なるので、地域に適した播種期を決定する必要がある。さらに、地域に適した草丈伸長管理指針を作成し、それに基づいて両作物の草丈伸長をコントロールし、ハウス内気温が5°Cに低下する頃までに草丈を出荷できる草姿にまで育てる必要がある。トマトなどの夏作物の栽培が10月下旬まで継続する場合には、ハウレンソウとコマツナをハウスに播種する時期が遅れる。このような場合は、移植栽培を行うと良い。

冬期に寡日射下になる日本海側においては、長期間にわたって不織布のべたかけやトンネルで保温を実施すると、コマツナの糖とビタミンC含量が高まらない。したがって、長期間の保温は避け、すでに述べたように、栽培作物の耐凍性を上回る寒波の到来時のみ、緊急避難的に使用することが望ましい。

ハウレンソウ、コマツナの糖とビタミンC含量はハウスを開放し、ハウス内に外気を導入することにより、密閉して管理した場合よりも高まる。このことから、冬期の低温を活用することにより、糖とビタミンC含量の高いハウレンソウとコマツナを生産できることが明らかになった。

消費者との信頼関係を築くためには、糖とビタミンC含量の高いハウレンソウ、コマツナを出荷することが重要である。そのためには、ハウレンソウとコマツナのBrix示度が7%以上のものを出荷することが適切と考えられた。

以上のことから、収穫期に達してからハウレンソウとコマツナを低温環境にさらすことで、両作物の栄養価が向上し、商品価値が高まり、また、市場や大型小売店の要求にも応えることが可能となり、冬期間の農家所得の向上につながると考えられる。

Summary

1 Freezing tolerance of spinach (*Spinacia oleracea* L.) and komatsuna (*Brassica rapa* L.)

1) Changes in osmotic concentration, sugar content, betaine content, proline content and T_{EL50} of spinach and komatsuna exposed to low temperature treatments.

T_{EL50} decreased from approximately -6.5 to -17°C in spinach and from approximately -5.6 to -18°C in komatsuna when exposed to low temperatures for 10 weeks (at 5°C in the first 5 weeks and at 2°C in the subsequent 5 weeks) with corresponding increase in osmotic concentrations. There was a high correlation between the T_{EL50} and osmotic concentration over the range of 375 and 750mmol/kg in spinach and 338 and 800mmol/kg in komatsuna. In addition, there was a high correlation between the T_{EL50} and sugar content over the range of 0.3 and 3 g/100gFW and 0.3 and 3.5g/100gFW in spinach and komatsuna, respectively. On the other hand, when the sugar content increased above the ranges, indicated the T_{EL50} did not change anymore in both crops.

In spinach, glycinebetaine content increased from 70 to 200mg/100gFW during the first 5-week low temperature treatment and there was a high correlation between the T_{EL50} and glycinebetaine content over the range of 70 and 150mg/100gFW. Glycinebetaine content increased in upper leaves but not in lower leaves. On the other hand, glycinebetaine was not detected at any stage of low temperature treatment in komatsuna.

Free amino acid content increased during the first 2-week low temperature treatment both in spinach and komatsuna, but then decreased gradually during the last 3 to 10 weeks. Specifically in proline, the content increased during the first 2-week low temperature treatment both in spinach and komatsuna from 9 to 100 and 8 to 270mg/100gFW, respectively, and did not change thereafter. These results demonstrate that there are apparent correlations among freezing tolerance and osmotic concentration, sugar content, glycinebetaine content and proline content in spinach and komatsuna.

2) Freezing tolerance of spinach and komatsuna cultivated in the greenhouse.

Freezing tolerance of spinach and komatsuna increased gradually from October to the coldest season (i.e., late January or early February). T_{EL15} decreased from -12 to -16°C and -11 to -14°C in spinach and komatsuna, respectively. T_{EL15} reversely increased in both crops while temperature increased. There was a high correlation between the freezing tolerance and the mean minimum air temperature for 7 days before the determination of freezing tolerance was conducted. Therefore, it is possible to estimate the freezing tolerance at the time by taking the mean minimum air temperature for 7 days before the measurement of freezing tolerance. This estimated value of freezing tolerance would be applicable to the management of air temperature in the greenhouse in order to avoid the freezing injury of the crops.

2 Sugar and vitamin C contents of spinach and komatsuna in the greenhouse.

When komatsuna was grown to about 20cm in height in the greenhouse at the mean air temperature of 13 to 15°C and then transferred to the greenhouse at 2 to 3°C, the sugar and vitamin C contents increased after the transfer. On the other hand, the sugar and vitamin C contents in komatsuna did not change when grown continuously in the greenhouse at 13 to 15°C. These results indicate that cold treatment could improve the nutritional qualities of komatsuna even under limited solar radiations in winter.

The relationship between the contents of sugar and vitamin C in spinach and komatsuna and the maximum, minimum and mean air temperatures during cultivation period was analyzed under conditions of limited solar radiations in winter. The results indicated that the mean minimum and mean air temperatures in 10 days before the harvest greatly affected the contents of sugar and vitamin C in both crops. Therefore, it is possible to estimate the sugar and vitamin C contents with the observation of the mean minimum air temperatures for 10 days before the harvest. If the temperature in a greenhouse is managed at -5°C, the high qualities of spinach and komatsuna which contained high sugar and vitamin C contents could be obtained.

3 Cultivation techniques of spinach and komatsuna with the high sugar and vitamin C contents without freezing injury.

1) Avoiding freezing injury in spinach and komatsuna.

There are no or little possibilities of freezing injury at the coldest season because spinach and komatsuna plants were highly acclimated. To the contrary, there are quite high possibilities of freezing injury in early winter or early spring when the plants were not acclimated enough or were deacclimated.

To avoid the freezing injury in early winter, it is effective to increase the freezing tolerance by exposure of spinach and komatsuna to cold environments after the suitable size for shipment (greater than 25cm in height) was reached. When plants were smaller than 25cm, insulation should be used only if there is a possibility that plants suffer freezing injury due to a sudden hit of cold wave.

Freezing tolerance of plants that had grown with heat insulation was lower (by approximately 2 to 4°C) than that of plants that had grown without heat insulation. Therefore, the usage of heat insulation greatly increases the possibility of freezing injury in plants.

Introduction of cold air into the greenhouse by opening doors/windows during the period of mid-winter (from end of December to early March) at which plants reached the harvesting stage increased freezing tolerance of both spinach and komatsuna plants by 2 to 5°C compared to plants grown in the closed greenhouse. In addition, opening greenhouse resulted in a decrease in the possibility of deacclimation of plants occurring when air

temperature considerably increased during daytime in unclouded days. These results indicate that the exposure of plants to cold air may reduce the possibility of freezing injury.

2) Production technique of spinach and komatsuna containing the high sugar and vitamin C contents.

In order to ship spinach and komatsuna in January, it is necessary to determine the planting date suitable for each area. Furthermore, the management manual of plant growth must be created. So that plant growth must be controlled to obtain suitable plant size before the air temperature in the greenhouse drops to 5 °C or below. Since the greenhouses and equipments are usually occupied with cultivation of summer crops (tomato and others), spinach or komatsuna plants cannot be planted at the best time in the greenhouse directly. Thus, it is good to perform transplant cultivation.

Cultivation of komatsuna plants with heat insulation resulted in several undesirable characteristics compared to unheated cultivation. Those include that plants grow too soft, leaf blades become less greenish, and resultant plants have less commercial values. In addition, freezing tolerance of plants that had grown with heat insulation was lower than that of plants that had grown without heat insulation. Furthermore, the sugar and vitamin C contents in komatsuna plants were lower when growing with heat insulation than without heat insulation. Therefore, it was concluded that insulation of plants continuously from planting to harvest time was not a good choice for agricultural production. The insulation should be used only if there is a possibility that plants may suffer freezing injury due to a sudden hit of cold wave.

Introduction of cold air into a greenhouse by opening doors/windows during the period of mid-winter at which plants reached the harvesting stage increased the contents of sugars and vitamin C compared to plants growing in a closed greenhouse.

In order to build a confidential relationship with a consumer, it is important for crop producers to ship spinach or komatsuna in the high sugar and vitamin C contents reliably. For that purpose, it is good to use the Brix value of spinach or komatsuna with 7 % or greater when deciding whether to ship or not.

Taken together with these results in the present study, exposure of plants to cold environments at the harvesting stage results in additional values to the producers commercially, such as increasing in nutritional values, matching demands of market and mass marketers as well as increasing income of producers during winter.

謝

岩手大学農学部附属寒冷バイオシステム研究センター教授・上村松生先生からは、本研究を遂行するにあたり、懇切丁寧なご指導を賜るとともに、論文のとりまとめに多大のご指導を頂きました。岩手大学農学部教授・遠藤元庸先生、山形大学農学部教授・西沢 隆先生、弘前大学農学生命科学部教授・荒川 修先生には本論文の作成に対してご指導を頂くとともに、審査をして頂きました。

本研究を遂行するにあたっての基本的な考え方は、1994年5月から10月にかけて北海道大学低温科学研究所に内地留学させて頂いた際に培われました。その際、北海道大学名誉教授・吉田静夫先生からは植物の耐凍性に関する基礎知見、基礎的な考え方に関してご指導を頂きました。また、同研究所の荒川圭太先生には実験のご指導を頂きました。

本研究において、JA北央管内で2000~2003年にかけて現地試験を実施しましたが、その際、北秋田地域振興局農林部普及課主任・佐々木貴博氏をはじめ、課員の皆様からは多大のご協力を頂きました。

浸透濃度、グリシンベタイン分析を実施するにあたり、岩手大学大学院農学研究科院生・鎌田崇氏から多

辞

大のご指導を頂きました。HPLCを使用した糖とビタミンC分析を実施するに当たり、秋田県農業試験場研究員・篠田光江氏から多大のご指導を頂きました。遊離アミノ酸分析を実施するに当たり、秋田県総合食品研究所主任研究員・大能俊久氏から多大のご指導を頂きました。東北農業研究センター研究員・村井麻理氏からは貴重なご助言を頂きました。

元秋田県農業試験場次長・阿部健一郎博士、秋田県立大学・金田吉弘博士からは貴重なご助言を頂きました。前秋田県農業試験場長・鳥越洋一博士からは本論文を作成するにあたり、貴重なご助言を頂きました。秋田県農業試験場長・藤田佳克博士からは貴重な助言を頂くとともに、励ましの言葉を頂きました。同野菜・花き部長・加賀屋博行氏からは本論文をまとめるにあたり、ご助言、ご協力を頂きました。同主任専門研究員・田口多喜子氏からは日頃諸々のご助言、ご協力を頂きました。元同企画管理部・伊藤吉雄氏をはじめ、同企画管理部の方々からは圃場管理に絶大なご協力を頂きました。同農業試験場の先輩、同僚の皆様からは様々なご助言、ご指導を頂きました。

以上の皆様に対し、心より感謝申し上げます。

引用文献

- 1) 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.
- 2) 阿部二郎・吉田みどり・森山真久・下坂悦生. 1995. コムギの耐凍性に及ぼす生育条件の影響. 北農試研報. 160: 65-73.
- 3) 秋田県・秋田県経済連. 1999. 秋田県青果物標準出荷規格.
- 4) 秋田県農政部. 農産園芸の概要. 2001. p. 64-71.
- 5) 秋田県農業協同組合中央会・全国農業協同組合連合会秋田県本部. 2003. 平成15年度秋田県JA青果物販売計画書. 7-9.
- 6) Chen T. H. H. and N. Murata. 2002. Enhancement of tolerance of abiotic stress by metabolic engineering of betaines and compatible solutes. *Curr. Opin. Plant Biol.* 5: 250-257.
- 7) Crowe J. H., L. M. Crowe, J. F. Carpenter and C. A. Wistrom. 1987. Stabilization of dry phospholipid bilayers and proteins by sugars. *Biochem. J.* 242: 1-10.
- 8) Dexter S. T., W. E. Tottingham and L. F. Gragerra. 1932. Investigations of the hardiness of plants by measurement of electrical conductivity. *Plant Physiol.* 2: 63-78.
- 9) Fennell A., P. H. Li and A. H. Markhart III. 1990. Influence of air and soil temperature on water relations and freezing tolerance of spinach (*Spinacia oleracea*). *Physiol. Plant.* 78: 51-56.
- 10) Foyer C., J. Rowell and D. Walker. 1983. Measurement of the ascorbate content of spinach leaf protoplasts and chloroplasts during illumination. *Planta* 157:239-244.

- 11) 藤井健雄編著. 1976. 葉菜類. 蔬菜の栽培技術. 誠文堂新光社. 東京. 392-525.
- 12) Fujikawa S. 1981. The effect of various cooling rates on the membrane ultrastructure of frozen human erythrocytes and its relation to the extent of haemolysis after thawing. *J. Cell Sci.* 49: 369-382.
- 13) Fujikawa S. and K. Miura. 1986. Plasma membrane ultrastructural changes caused by mechanical stress in the formation of extracellular ice as a primary cause of slow freezing injury in fruit - bodies of Basidiomycetes (*Lyophyllum ulmarium* (Fr.) Kuhner). *Cryobiology* 23: 371-382.
- 14) Fujikawa S. 1987. Mechanical force by growth of extracellular ice crystals is widespread cause for slow freezing injury in tertiary hyphae of mushrooms. *Cryo-Letters* 8: 156-161.
- 15) Fujikawa S. and P. L. Steponkus. 1990. Freeze-induced alterations in the ultrastructure of the plasma membrane of rye protoplasts isolated from cold-acclimated leaves. *Cryobiology* 27: 665-666.
- 16) Fujikawa S. 1995. A freeze-fracture study designed to clarify the mechanisms of freezing injury due to the freezing-induced close apposition of membranes in cortical parenchyma cells of mulberry. *Cryobiology* 32: 444-454.
- 17) 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.
- 18) Gordon-Kamm W. J. and P. L. Steponkus. 1984. Lamellar-to-hexagonal II phase transitions in the plasma membrane of isolated protoplasts after freeze-induced dehydration. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 81: 6373-6377.
- 19) Guy C. L., J. L. A. Huber and S. C. Huber. 1992. Sucrose phosphate synthase and sucrose accumulation at low temperature. *Plant Physiol.* 100: 502-508.
- 20) Hanson A. D., A. M. May, R. Grumet, J. Bode, G. C. Jamieson and D. Rhodes. 1985. Betaine synthesis in chenopods: localization in chloroplasts. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 82: 3678-3682.
- 21) Harrigan P. R., T. D. Madden and P. R. Cullis. 1990. Protection of liposomes during dehydration or freezing. *Chem. Phys. Lipids* 52: 139-149.
- 22) Hayashi H., Alia, L. Mustardy, P. Deshniem, M. Ida and N. Murata. 1997. Transformation of *Arabidopsis thaliana* with the *codA* gene for choline oxidase: accumulation of glycinebetaine and enhanced tolerance to salt and cold stress. *Plant J.* 12: 133-142.
- 23) 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.
- 24) Incharoensakdi, A., T. Takebe and T. Akazawa. 1986. Effect of betaine on enzyme activity and subunit interaction of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase from *Aphanothece halophytica*. *Plant Physiol.* 81: 1044-1049.
- 25) 石井龍一. 1992. 各種要因による光合成の制御. 宮地重遠編集. 現代植物生理学: 光合成. 朝倉書店. 東京. p. 78-79.
- 26) 井内聖・小林正智・篠崎和子・篠崎一雄. 1999. 乾燥ストレスへの分子応答機構. 植物の環境適応. (渡邊昭・篠崎一雄・寺島一郎監修). 秀潤社. 東京. p64-75.
- 27) Kacperska A. 1978. Mechanism of cold acclimation in herbaceous plants. In: *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. (P. H. Li and A. Sakai, eds.) Academic Press, New York, San Francisco and London. p. 139-152.
- 28) Kacperska A and R. K. Szaniawski. 1993. Frost resistance and water status of winter rape leaves as affected by differential shoot/root temperature. *Physiol. Plant.* 89: 775-782.
- 29) 鎌田崇. 2001. コムギの低温馴化過程における適合溶質の変動. 岩手大学大学院農学研究科修士論文.
- 30) 亀野 貞・木下隆雄・楠原 操・野口正樹. 1990. ホウレンソウの栽培条件及び品種と品質関連成分の変動. 中国農研報. 6: 157-178.

- 31) 加藤忠司・小沢 聖・青木和彦・山西弘恭. 1994. 冬期ハウス栽培野菜の低温処理による各種ビタミン含有量の向上. 東北農研. 47: 317-318.
- 32) 加藤忠司・青木和彦・山西弘恭. 1995. 冬期ハウス栽培ホウレンソウのビタミンC, β -カロテン, α -トコフェロールおよびシュウ酸含有量に対する外気低温の影響. 土肥誌. 66: 563-565.
- 33) 加藤忠司. 2003. ストレス耐性・品質と作物栄養. 農業技術体系(2). 農文協. 東京. p. 72.
- 34) 気象庁. 1991. 日本気候表.
- 35) 国立天文台編. 理科年表. 2001. p. 263.
- 36) Koster K. L. and D. V. Lynch. 1992. Solute accumulation and compartmentation during the cold acclimation of Puma Rye. *Plant Physiol.* 98: 108-113.
- 37) Koster K. L. 2001. Effects of sugars on phospholipid phase transitions - relevance to dehydration tolerance. *Cryobiol. Cryotechnol.* 47: 26-32.
- 38) 久保亮五・長倉三郎・井口洋夫・江沢洋. 1991. 理化学事典, 第四版, 岩波, 東京. p. 1295.
- 39) 工藤芳千・渋谷 功・佐藤 功. 2001. 冬期野菜作導入による施設の有効利用と収益性の向上. 秋田農試研究時報. 40: 19-23.
- 40) 桑原達雄・阿部二朗・森山真久・入来則雄. 1993. コムギの耐冬性関連形質の品種間変異及び検定方法の検討. 育雑. 43(別2): 236.
- 41) Matoh T., J. Watanabe and E. Takahashi. 1987. Sodium, potassium, chloride, and betaine concentrations in isolated vacuoles from salt-grown *Atriplex gmelini* leaves. *Plant Physiol.* 84: 173-177.
- 42) Miyajima D. 1994. Effect of concentration of nutrient solution, plant size at harvest, and light condition before harvest on the ascorbic acid and sugar concentrations in leaves of hydroponically grown komatsuna (*Brassica campestris* L. rapifera group). *J. Japan Soc. Hort. Sci.* 63: 567-574.
- 43) 宮崎由子. 1985. 市販野菜中の還元型ビタミンC量の季節変動の統計解析. 家政学雑誌. 36: 833-839.
- 44) Moriyama M., J. Abe, M. Yoshida and Y. Tsurumi. 1995. Seasonal changes in freezing tolerance, moisture content and dry weight of three temperate grasses. *Grassland Sci.* 41: 21-25.
- 45) 村井麻理. 1997. 植物の凍結傷害機構に関する細胞生理学的研究. 北海道大学大学院地球環境科学研究科学位論文.
- 46) 中村敏英, 高倍鉄子. 1999a. 耐塩性と適合溶質の機能. 蛋白質 核酸 酵素. 44(15): 2214-2220.
- 47) 中村敏英・高倍鉄子. 1999b. 植物のグリシンベタイン. 植物の環境適応 (渡邊昭・篠崎一雄・寺島一郎監修). 秀潤社. 東京. p. 86-90.
- 48) Nanjo T., M. Kobayashi, Y. Yoshiba, Y. Kakubari, K. Yamaguchi-Shinozaki and K. Shinozaki. 1999. Antisense suppression of proline degradation improves tolerance to freezing and salinity in *Arabidopsis thaliana*. *FEBS Lett.* 461: 205-210.
- 49) 小口 裕・W. A. P. Weerakkody・田中昭夫・中澤征三郎・安藤忠男. 1996. ホウレンソウの品質関連成分の品種間、部位間、栽培地間差異. 広島農技研報. 64: 1-9.
- 50) 大塚宏二. 1972. クワ皮層細胞の春における耐凍性変動と細胞内微細構造の変化. 低温科学. 生物篇. 30: 33-44.
- 51) Ozawa K. and M. Okada. 1996. Furrow bottom seeding under row cover to accelerate vegetable growth in a cold season: plant production in closed ecosystems. *Acta Hort.* 440: 87-92.
- 52) Pomeroy M. K. and D. B. Fowler. 1973. Use of lethal dose temperature estimates as indices of frost tolerance for wheat cold acclimation under natural and controlled environments. *Can. J. Plant Sci.* 489-494.
- 53) Rudolph A. S. and J. H. Crowe. 1985. Membrane stabilization during freezing: the role of two natural cryoprotectants, trehalose and proline. *Criobiology* 22: 367-377.
- 54) Rudolph A. S., J. H. Crowe and L. M. Crowe. 1986. Effect of three stabilization agents - proline, betaine and trehalose - on membrane phospholipids. *Arch Biochem. Biophys.* 245: 134-143.
- 55) 酒井 昭. 1982. 植物の耐凍性と寒冷適応. 学会

- 出版センター、東京。
- 56) Sakamoto A., R. Valverde, Alia, T. H. H. Chen and N. Murata. 2000. Transformation of *Arabidopsis* with the *codA* gene for choline oxidase enhances freezing tolerance of plants. *Plant J.* 22: 449-453.
- 57) Sakamoto A. and N. Murata. 2002. The role of glycine betaine in the protection of plant from stress: clues from transgenic plant. *Plant Cell Environ.* 25: 163-171.
- 58) 佐々木英和, 市村一雄, 辻顕光, 小田雅行. 1992. キャベツ幼植物の低温処理・脱馴化による糖とデンプン含量, タンパク質組成の変化. *園学雑.* 62 (別2): 330-331.
- 59) 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.
- 60) 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. *Sci. Hortic.* 76: 161-169.
- 61) Sasaki H., K. Ichimura, M. Oda and S. Imada. 2000. Effect of light during low temperature treatment and water stress on freezing tolerance and sugar contents in cabbage seedlings. *Japan Agri. Res. Quart.* 34: 261-264.
- 62) Sasaki H., K. Ichimura, S. Imada and M. Oda. 2001a. Loss of freezing tolerance associated with decrease in sugar concentrations by short-term deacclimation in cabbage seedlings. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 70: 294-298.
- 63) Sasaki H., K. Ichimura, S. Imada and S. Yamaki. 2001b. Sucrose synthase and sucrose phosphate synthase, but not acid invertase, are regulated by cold acclimation and deacclimation in cabbage seedlings. *J. Plant Physiol.* 158: 847-852.
- 64) 佐藤 庚・岩波悠紀. 1968. 気温, 地温がポット植え水稲各部の温度に及ぼす影響. *日作紀.* 38: 241-246.
- 65) Schobert B. and H. Tschesche. 1978. Unusual solution properties of proline and its interaction with proteins. *Biochim. Biophys. Acta* 541: 270-277.
- 66) Sinohara Y. and Y. Suzuki. 1981. Effect of light and nutritional condition on the ascorbic acid content of lettuce. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 50: 239-246.
- 67) 篠原 温. 1987. 野菜の栽培条件と品質. *筑波大農林学研.* 3: 110-148.
- 68) Sivakumar P., P. Sharmila and P. Saradhi. 1998. Proline suppresses rubisco activity in higher plants. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 252: 428-432.
- 69) Smirnoff N. and Q. J. Cumbes. 1989. Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes. *Phytochemistry* 28: 1057-1060.
- 70) Steponkus P. L. 1984. Role of the plasma membrane in freezing injury and cold acclimation. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 35: 543-584.
- 71) Steponkus P. L., M. Uemura and M. S. Webb. 1993. A contrast of the cryostability of the plasma membrane of winter rye and spring oat. In *Advances in Low-Temperature Biology.* (P. L. Steponkus, Ed). JAI Press, London, Vol. 2. p. 211-312.
- 72) Steponkus P. L., M. Uemura, R. A. Joseph, S. J. Gilmour and M. F. Thomashow. 1998. Mode of action of the *COR15a* gene on the freezing tolerance of *Arabidopsis thaliana*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 95: 14570-14575.
- 73) Takagi T., M. Nakamura, H. Hayashi, R. Inatsugi, R. Yano and I. Nishida. 2003. The leaf-order-dependent enhancement of freezing tolerance in cold-acclimated *Arabidopsis* rosettes is not correlated with the transcript levels of the cold-inducible transcription factors of *CBF/DREB1*. *Plant Cell Physiol.* 44: 922-931.
- 74) 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.
- 75) 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.

- 76) 田村 晃. 2000. コマツナとホ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.
- 77) 田村 晃. 2002. 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. 園学雑. 71: 74-81.
- 78) 田村 晃. 2003. 冬期寡日射地域におけるハウス内での保温とハウス内への外気導入がホウレンソウとコマツナの生育、耐凍性および糖とビタミンC含量に及ぼす影響. 秋田農試研報. 43: 19-44.
- 79) 田村 晃. 2004. 栽培期間中の気温がホウレンソウとコマツナの糖およびビタミンC含量に及ぼす影響. 園学研究. 3: 187-190.
- 80) 田中明. 1981. 光合成能とsource-sink関係. 植物生理学. 光合成II(宮地重遠編). 朝倉書店. 東京. p. 121-147.
- 81) 建部雅子・石原俊幸・石井かおる・米山忠克. 1995. 培地の窒素形態およびCa:K比がホウレンソウとコマツナの硝酸, アスコルビン酸, シュウ酸含有率に与える影響. 土肥誌. 66: 535-543.
- 82) 建部雅子. 2003. 窒素施肥, 日射量とビタミンC. 農業技術体系(2). 農文協. 東京. p. 120.
- 83) Tomashow M. F.. 1993. Genes induced during cold acclimation in higher plant. In Advances in Low - Temperature Biology (P. L. Steponkus, Ed), JAI Press, London, Vol 2. p. 186-210.
- 84) 内山和宏. 1998. ハードニング誘導機構の解明. マメ科作物. 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. p. 14-21.
- 85) 上平恒・逢坂昭. 1989. 生体系の水. 講談社. 東京. p105-166.
- 86) Uemura M. and P. L. Steponkus. 1994. A contrast of the plasma membrane lipid composition of oat and rye leaves in relation to freezing tolerance. Plant Physiol. 104: 479-496.
- 87) 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.
- 88) Uemura M. and P. L. Steponkus. 2003. Modification of the intracellular sugar content alters the incidence of freeze-induced membrane lesions of protoplasts isolated from *Arabidopsis thaliana* leaves. Plant Cell Environ. 26: 1083-1096.
- 89) 渡邊幸雄・米山昌美・嶋田典司. 1987. ホウレンソウの糖, ビタミンCおよびシュウ酸含量に及ぼす水ストレス処理の影響. 土肥誌. 58: 427-432.
- 90) 渡邊容子・内山総子・吉田企世子. 1994. 夏期および秋期栽培ホウレンソウの生育過程における部位別成分について. 園学雑. 62: 889-895.
- 91) 米山忠克・建部雅子. 1992. アスコルビン酸(ビタミンC)・シュウ酸の代謝と相互関係. 農及園. 67: 1055-1062.
- 92) Yoshiba Y., T. Kiyosue, K. Nakashima, K. Yamaguchi-Shinozaki and K. Shinozaki. 1997. Regulation of levels of proline as an osmolyte in plants under water stress. Plant Cell Physiol. 38: 1095-1102.
- 93) 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.
- 94) 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.
- 95) Yoshida S. 1974. Studies on lipid changes associated with frost hardness in cortex in woody plant. Contr. Inst. Low Temp. Sci. B. 18: 1-43.
- 96) 吉田静夫. 1999. 極限温度に対する生理応答. 植物の環境適応. 渡邊昭, 篠崎一雄, 寺島一郎監修. 秀潤社. 東京. p24-35.

