Partial-freezing した長期貯蔵カット野菜の物理的、電氣的評価

志塚 淳, 田川彰男[§]

千葉大学大学院園芸学研究科

Evaluation by Measurements of Physical and Electrical Properties on Fresh-cut Vegetables Stored for a Long Term Using Partial-freezing Method

Jun Shizuka and Akio Tagawa[§]

Graduate School of Horticulture, Chiba University, 648 Matsudo, Matsudo, Chiba 271-8510

In order to investigate the applicability of partial-freezing to storage of fruit and vegetables, changes in the mechanical properties, color and mass of fruit and vegetables during partial-freezing, cold storage, and frozen storage were observed and the effects of these processes on the physical properties were evaluated. In addition, the soundness of the cell membrane was estimated by electrical impedance and suitable temperature and long-term storability in partial-freezing were examined. Consequently, these changes and the amount of drip loss were reduced by storing them at temperature ranging from -1 to -3°C . At -1°C , these changes were restrained until three weeks. Electrical properties which were obtained by measuring the impedance during freezing process were used as the index in the estimation of freezing point.

(Received Jan. 28, 2009 ; Accepted May 1, 2009)

Keywords : Partial-freezing, long-term storage, fresh-cut vegetable, mechanical properties, electrical impedance**キーワード :** Partial-freezing, 長期貯蔵, カット野菜, 力学物性, 電気インピーダンス

近年, Partial-freezing (以下, PF 法) あるいはチルド機能を備えた大型冷蔵庫の開発が進み, それらの機能は多様化しつつある. PF 法の定義は様々である¹⁾²⁾が, いずれにしても食品および食品素材を微凍結させた状態で貯蔵する方法である. PF 法における貯蔵は従来の凍結貯蔵法と比べ高い温度帯での微凍結貯蔵であるため, 解凍の手間がかからない, エネルギーコストが低いなどの利点を持つ. 野菜をはじめとする多くの食品素材は組織内に多量の水分を含んでいる. 従来より, 長期貯蔵を目的として凍結が行われてきたが, 食品素材中の水分は凍結により氷結晶化され, その際に体積が約 9% 膨張するため組織に損傷を与える. その点, PF 法は従来の凍結貯蔵法において問題となる氷結晶は生成されず, 細胞組織損傷への影響は小さいと考えられる. PF 法に関する研究は古くから行なわれ, 魚介類やその加工品の貯蔵に優れているとの報告³⁾⁴⁾がなされており, 各冷蔵庫メーカーにより水産物や畜産物に対して -1 ~ -3°C の範囲における貯蔵が推奨されている. しかし, その対象は水産物や畜産物に限られており, 野菜に関しては一部研究⁵⁾されているものの, 詳細が明らかになっていない現状にある. そのため, 野菜個々における氷結晶生成

の温度域を把握し, その温度域より高い温度において PF 法を行えば, 水産物や畜産物と同様の効果が期待でき, さらに, 長期貯蔵に適さないカット野菜の貯蔵の需要にも応えることができると考えられる.

そこで本研究では, 野菜に対する PF 法の有効性を明らかにするため, 貯蔵温度 $0 \sim 2^{\circ}\text{C}$ ⁶⁾ が適当とされている根菜類のダイコン, ニンジンおよび, 低温での貯蔵では低温障害が生じるとされ, $7 \sim 10^{\circ}\text{C}$ での貯蔵が適当とされるキュウリ, ナスを実験材料とし, 5°C 前後で野菜を貯蔵する冷蔵法および -20°C 以下で貯蔵する凍結貯蔵法との比較を行った. すなわち, 各野菜の貯蔵適温および長期貯蔵性を検討するため, 各貯蔵条件が試料の物理的性質に及ぼす影響として, 力学物性変化, 色彩変化, 水分減少量の測定および電気インピーダンスによる細胞膜の損傷あるいは劣化度の評価を行った. 力学物性は, 貯蔵中の軟化あるいは硬化による品質低下, および圧縮に対する抵抗力と損傷度合い把握のための基礎資料提供を目的として測定した. また, 品質低下の指標として, 異なる貯蔵条件における色彩変化および水分減少量の違いを測定した. さらに, 冷却温度に対する電気インピーダンスの挙動を調査することにより, 野菜の氷結点すなわち貯蔵適温の下限を推定して, PF 法における適性温度条件を検討したので報告する.

〒271-8510 千葉県松戸市松戸 648

[§] 連絡先 (Corresponding author), tagawa@faculty.chiba-u.jp

実 験 方 法

1. 供試材料

実験に使用したダイコン、ニンジン、ナスおよびキュウリは近隣のスーパーマーケットで購入し、品種、生産地は特定していない。これらの試料はカット野菜を考慮して、 $20 \times 20 \times 50$ mm の直方体に成形し、測定用試料とした。

2. 実験方法

実験 1: PF 法における貯蔵の有効性を確認するため、PF 法、凍結貯蔵および冷蔵との貯蔵性の比較を行った。これらの方法で貯蔵する際、試料をラップフィルムで包んで供試した。

① PF 法: $\pm 0.5^\circ\text{C}$ と正確な温度制御が可能であるフリーザ (SC-DF25, ツインバード工業(株)) を用い、 -1 、 -3 、および -5°C の 3 段階の設定温度で PF 貯蔵試験を行った。

② 凍結貯蔵: 本研究では凍結法としてブライン浸漬法を採用した。 -40°C のフリーザ (MDF-435, 三洋電機メディカルシステム(株)) 内に静置してあるエタノールの入った容器に、試料を浸漬することにより急速凍結した。ラップで包んだ試料を密閉可能な袋 (Ziploc フリーザーバッグ, 旭化成ライフ & リビング(株)) に入れ、試料温度とフリーザ内温度が一致する (浸漬時間約 90 分間) まで浸漬した。その後、袋を容器から取り出し、フリーザ内にて貯蔵した。

③ 冷蔵: 庫内温度を 5°C に設定した定温恒温器 (DK 600, ヤマト科学(株)) にて貯蔵した。

貯蔵期間は 1 日, 3 日, 1 週間の 3 段階とし、各段階において物理的, 電気的性質の変化を測定した。これらの性質を測定するため、PF 法および凍結貯蔵法の試料においては、貯蔵後、庫内温度を 5°C に設定した恒温器で解凍した。

実験 2: PF 法における長期貯蔵性を検討するため 3 週間, 1 ケ月の貯蔵期間を設定した。

3. 測定項目および方法

(1) 力学物性変化

試料の力学物性を測定するため、クリープメータ (RHEONER RE2-3305S, (株)山電) を用いた。測定には直径 3 mm の円柱状プランジャ (ポリアセタール樹脂製) を用い、試料台の移動速度は 1 mm/sec とした。なお、試料とプランジャとの接触点 (トリガーポイント) は荷重 0.2 N を感知した位置とした。

(2) 色彩変化

貯蔵前後および解凍後における試料表面の色彩を色彩色差計 (CR-200b, ミノルタ(株)) を用いて $L^*a^*b^*$ 表色系により測定し、色差を以下の式 (1) から算出した。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L^*)^2 + (a_0 - a^*)^2 + (b_0 - b^*)^2} \quad (1)$$

ここで、 ΔE は色差、 L^* 、 a^* 、 b^* は貯蔵後 (PF 法および凍

結貯蔵では解凍後) の色彩、 L_0 、 a_0 、 b_0 は貯蔵前の色彩である。なお、測定部位は任意の 3 点とし、これらの点をそれぞれ 3 回測定し、その平均を色彩とした。

(3) 水分減少量

本研究では、ドリップおよび貯蔵中の乾燥を合わせて水分減少量と定義する。貯蔵 (解凍) した試料の表面に付着した余剰水分を吸水紙で除去し、質量 W (g) を秤量した。得られた値および貯蔵前の質量 W_0 (g) から以下の式 (2) を用いて水分減少量 ΔW (g/100 g) を算出した。

$$\Delta W = \frac{W_0 - W}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

(4) 電気インピーダンスによる細胞膜健全性評価

貯蔵前後および解凍後における試料の電気インピーダンスの測定には 4 端子法によるインピーダンスメータ (3532-50, 日置電機(株)) を用いた。インピーダンスメータに接続したステンレス製の $\phi 0.5 \text{ mm}$ 針状電極を 10 mm の間隔で試料に対して深さ 6 mm まで挿入し、複素インピーダンスの大きさ $|Z|$ と位相角 θ を計測した。試料に印加される測定用交流電圧は 1 V とし、 $50 \text{ Hz} \sim 5 \text{ MHz}$ の範囲における 50 点の周波数で掃引測定を行った。計測された $|Z|$ と θ からレジスタンス R およびリアクタンス X を算出した。

$$R = |Z| \cos \theta \quad (3)$$

$$X = |Z| \sin \theta \quad (4)$$

インピーダンスのベクトル軌跡 (横軸に R 、縦軸に $-X$ をとり、測定周波数に応じてプロットしたもの) は Cole-Cole⁷⁾ プロットと呼ばれる。

なお、電極部および測定ケーブルの残留インピーダンスは計測値に影響を及ぼすため、ショートとオープンとの 2 つの状態においてインピーダンスを測定し、実測値を補正した。

(5) 電気インピーダンスによる氷結点の推定

温度測定用試料およびインピーダンス測定用試料を -40°C に制御したフリーザ内に静置し、インピーダンス測定と同時に温度測定用試料中心部の温度変化を T 型熱電対により測定した。インピーダンスは Cole-Cole の円弧から得られた極値 3 点における周波数で測定した。

実験結果および考察

1. PF 法と冷蔵貯蔵、凍結貯蔵との比較

(1) 力学物性変化

図 1 に生ダイコンにおける荷重 [N] と圧縮率 (ひずみ) の関係を示す。荷重は圧縮率 5% 前後まで直線的に増加し、弾性的な変化をしている。その後、圧縮率約 10% の P で荷重はピークを示し、P は生物降伏点 (バイオイールドポイント) と呼ばれる⁸⁾。硬さを示す指標として、はじめの直線部分の勾配で表す場合もあるが、本研究では生物降

伏点すなわち圧縮率 P における荷重, および P から圧縮率 80% までの荷重の平均値をそれぞれ貫入抵抗 [N] および硬さ [N] と定義する。

図 2 に各貯蔵条件下で貯蔵 (解凍) したときの試料ごとの貫入抵抗変化を示す。ダイコンおよびキュウリにおいて, -40°C で貯蔵した試料では貫入抵抗の増加がみられた。これは凍結により試料の細胞膜が破壊され⁹⁾, 試料が固化し, 試料の表面あるいは全体に弾力が生じたためと推察される。 -40°C 以外では, ダイコンおよびキュウリともに貫入抵抗は貯蔵日数の経過につれて低下する傾向はあるものの, -1°C および -3°C では比較的軟化が抑制される様子がうかがえた。これらの傾向はニンジンおよびナスにおいても確認された。ニンジンを -5°C および -40°C で貯蔵したときの貫入抵抗は大きく低下し, ナスでは生物降伏

点が確認できないほど顕著な軟化が見られ, 貫入抵抗は小さくなった。また, ニンジンを -3°C で 1 週間貯蔵した際には, 貫入抵抗は低下するが, これは -3°C で貯蔵すると, 貯蔵期間の経過とともに試料表面から徐々に凍結が進行するためと考えられる。よって, 長期間貯蔵する場合には凍結が進行する温度域より高い温度での貯蔵が望ましいといえる。

図 3 に硬さの変化を示す。ダイコン, ニンジンおよびキュウリにおいて, -5°C および -40°C で貯蔵した試料の硬さは大きく低下したのに対し, -1°C , -3°C および 5°C で貯蔵した試料では大きな変化は確認されなかった。特に, 硬さの変化が小さい貯蔵温度がそれぞれの野菜において確認され, ダイコンでは -3°C , ニンジンおよびキュウリでは -1°C であった。一方, ナスにおいて, 5°C で貯蔵した試料では硬さが維持されたのに対し, 氷点下で貯蔵した試料では大部分が貯蔵日数の経過につれて低下した結果となった。よって, ナスにおいては氷点下での貯蔵は不适当である可能性が示唆された。

(2) 色彩変化, 水分減少量

図 4 に各貯蔵条件下で貯蔵 (解凍) したときの試料ごとの色彩変化を示す。いずれの野菜においても, 色彩変化は -5°C および -40°C で貯蔵した試料において極端に大きい値となり, -40°C で貯蔵した試料よりも -5°C で貯蔵した試料の方がより色彩変化が大きい結果となった。これは, -5°C での凍結が緩慢凍結に相当し, -40°C での急速凍結と比較して野菜の品質に及ぼす影響が大きいためと考えられる。一方, -1°C , -3°C および 5°C で貯蔵した試料においては, 貯蔵日数の経過につれて色彩変化は増加する傾向

図 1 生ダイコンにおける圧縮率と荷重の関係

図 2 各貯蔵条件における貫入抵抗変化

□, -1°C ; ◇, -3°C ; △, -5°C ; ×, -40°C ; *, 5°C .

図 3 各貯蔵条件における硬さ変化

□, -1°C; ◇, -3°C; △, -5°C; ×, -40°C; *, 5°C.

図 4 各貯蔵条件における色彩変化

□, 1日間; ■, 3日間; ■, 7日間.

はあるものの、その変化は抑制される結果となった。

水分減少量においても色彩変化とその傾向は同様(図5)で、-1°C、-3°Cおよび5°Cで貯蔵した試料においては水分減少量が微量であった。これに対し、-5°Cおよび-40°Cで貯蔵した試料において水分減少量は極端に多く、特に-40°Cよりも-5°Cで貯蔵した試料の方がより水分減少量が多い結果となった。以上の結果から、色彩変化と水分減少量は同様の傾向であることがうかがえるため、双方の相関性に

ついて調査した。図6に色彩変化と水分減少量の関係を示す。また、色彩の要因(L^* , a^* , b^*)と水分減少量の関係を同様に求め、その際得られた R^2 値を表1に示す。水分減少量の増加に伴い色彩変化は増大する結果となり、いずれの野菜においても強い相関関係が認められた。また、水分減少量の増加に伴う色彩変化の増大には、 L^* 値の変化が関係し、 a^* 値および b^* 値の変化の寄与は比較的小さいことが確認された。これらの結果は、ダイコン、ナスのように白

図 5 各貯蔵条件における水分減少量

□, 1 日間; ■, 3 日間; ■, 7 日間.

図 6 色彩変化と水分減少量の関係

表 1 色彩の要因 (L^* , a^* , b^*) と水分減少量の関係における R^2 値

青果物	R^2 値		
	L^*	a^*	b^*
ダイコン	0.96	0.66	0.87
ニンジン	0.87	0.17	0.15
ナス	0.96	0.95	0.01
キュウリ	0.91	0.04	0.56

色に近い野菜よりも、ニンジンやキュウリのような有色の青果物において顕著に表れた。以上の結果から、野菜貯蔵における水分減少は色彩変化、特に明度変化に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。よって、ドリップや貯蔵中の乾燥を防ぐことは極めて重要であり、これらを防止する条件で貯蔵することにより色彩の変化を抑制することができる。

(3) 電気インピーダンス

細胞レベルにおける青果物の内部品質を評価する方法の

図 7 1 週間貯蔵後における Cole-Cole プロット

□, -1°C; ◇, -3°C; △, -5°C; ×, -40°C; *, 5°C; ○, 未処理.

一つにインピーダンススペクトロスコピー法¹⁰⁾¹¹⁾がある。本研究では、貯蔵後における野菜細胞の状態、特に細胞膜の閉鎖性を評価した。図 7 に各貯蔵条件下で 1 週間貯蔵（解凍）した試料の Cole-Cole プロットを示す。-1°C、-3°C および 5°C で貯蔵した試料は貯蔵前と同様にはっきりとした Cole-Cole の円弧が確認されたのに対し、-5°C および -40°C で貯蔵した試料では円弧が消失した。これは細胞膜が破壊され、その閉鎖性が維持されていないことを示している⁹⁾¹²⁾。したがってこれらの温度では、細胞膜が破壊されることで上述のような硬さの低下¹³⁾¹⁴⁾、色彩変化およびドリップの流出が引き起こされたと推察される。一方、-1°C、-3°C および 5°C で貯蔵した試料ではインピーダンスの値が極端に大きくなる傾向となった。青果物は細胞レベルにおいて、抵抗の大きな薄い細胞膜およびイオン電導性を持つ抵抗の小さい細胞液から構成される¹⁵⁾。よって、細胞膜の脂質組成あるいは細胞液の化学組成に変化が生じた可能性が考えられ、これらの測定が必要であるものの、細胞膜の破壊あるいは劣化はなく閉鎖性を維持していると考えられる。以上の結果から、野菜を -1~-3°C 程度で 1 週間貯蔵しても細胞膜は閉鎖性を維持できることが明らかになった。

さらなる長期貯蔵を可能とする PF 法の確立を目指すならば、各野菜における氷結晶生成が始める温度域の把握が必要である。そこで、本研究では氷結点および最大氷結晶生成帯を簡易的に把握する方法として、凍結過程におけるインピーダンス挙動による方法を試みた。図 8 に冷却温度に対するダイコンにおけるインピーダンス Z (500 Hz) の応答を示す。インピーダンスが急激に増加する温度域 (t_1 -

図 8 冷却温度に対するインピーダンス Z の応答

(ダイコン, 周波数 500 Hz)

t_2 間) が確認された。 t_1 - t_2 間では、温度変化が小さいのに対しインピーダンスの変化が極端に大きいことから、この温度域で相変化、すなわち、凍結が始まると考えられ、 t_1 および t_2 がそれぞれ氷結点および相変化の終了点に相当すると推察される。この傾向はいずれの測定周波数においても同様（表 2）であった。このように、3 つの周波数のいずれにおいても氷結点の推定は可能であることが確認されたことから、いずれか 1 点の周波数での測定により氷結点を推定することができ、インピーダンス法は氷結点推定に簡便且つ有用である。なお、周波数 f_1 および周波数 f_3 はいずれの試料においても 500 Hz および 5 MHz であり、周波数 f_2 はダイコン：3 kHz、ニンジン：12 kHz、ナス：6 kHz、キュウリ：5 kHz で、いずれも Cole-Cole の円弧における極値を取る周波数である。

表 2 各測定周波数における t_1 , t_2 [°C]

青果物	測定周波数	t_1 [°C]	t_2 [°C]
ダイコン	0.5 kHz	-1.77 ± 0.13	-2.96 ± 0.22
	3.0 kHz	-1.87 ± 0.10	-3.06 ± 0.06
	5.0 MHz	-1.86 ± 0.08	-3.04 ± 0.07
ニンジン	0.5 kHz	-2.05 ± 0.15	-3.44 ± 0.36
	12.0 kHz	-2.12 ± 0.24	-3.57 ± 0.16
	5.0 MHz	-2.03 ± 0.14	-3.51 ± 0.20
ナス	0.5 kHz	-2.11 ± 0.13	-3.82 ± 0.14
	6.0 kHz	-2.03 ± 0.13	-3.71 ± 0.17
	5.0 MHz	-2.03 ± 0.15	-3.92 ± 0.15
キュウリ	0.5 kHz	-2.24 ± 0.14	-3.33 ± 0.16
	5.0 kHz	-2.33 ± 0.11	-3.45 ± 0.25
	5.0 MHz	-2.36 ± 0.13	-3.29 ± 0.19

図 9 凍結割合の経日変化

●, -1°C ; ○, -3°C .

図 10 力学物性の経日変化

◆, 貫入抵抗; ◇, 硬さ.

2. 長期貯蔵性の検討

実験 1 の結果から、凍結点 t_1 以下での貯蔵では凍結が進行してしまう可能性が示唆された。そのため、試料を凍結させることなく、長期間貯蔵するためには t_1 以上の貯蔵が必要であると考えられる。そこで、氷結点前後の温度における凍結割合を算出した。本研究では全試料数に対する測定時まで凍結した試料数の割合を凍結割合と定義する。すなわち、全試料数 100 個を氷結点前後の温度に制御されたフリーザに静置し、24 h おきに凍結された試料数を測定して凍結割合を算出した。ダイコンの氷結点 t_1 は表 2 から $-1.7 \sim -1.9^{\circ}\text{C}$ であり、氷結点前後の実験条件の温度である -1°C および -3°C の温度下でのダイコンにおける凍結割合を図 9 に示す。 -1°C では 6 週間後においても凍

結割合が 0% であったのに対し、 -3°C では貯蔵期間の経過に伴い凍結割合が増加した結果となった。この温度条件下で試料の凍結が生じた場合、緩慢凍結に相当するため、品質の低下は免れないと考えられる。

野菜の PF 法を確立するためには、氷結点より高い温度域において貯蔵する必要がある。そこで、実験の都合上、 -1.5°C を氷結点と見なし、 -1°C における試料の長期貯蔵性の検討を行った。これは実験 1 と同様に貯蔵中の物理的性質の変化、すなわち、力学物性、色彩、水分減少量および Cole-Cole プロットにより行った。その結果を図 10-13 に示す。ナスにおいては 3 週間～1 ヶ月の間に腐敗あるいは低温障害が発生し、測定が困難な状態となったため 3 週間後までの結果のみを示した。ダイコンおよびニンジンで

図 11 色彩の経日変化

図 12 水分減少量の経日変化

は、Cole-Cole プロットで1週間と1ヶ月の間に変化が見られるものの、生鮮物のそれに比べても円弧は大きい。また、力学物性、色彩、水分減少量においては1ヶ月貯蔵後も1週間後と変わらなかった。したがって、ダイコンおよびニンジンでは長期間貯蔵しても大きな変化は生じず、品質を維持したまま貯蔵できる可能性が示唆された。-1℃での貯蔵は、従来提唱されているダイコンおよびニンジンの推奨温度の0~2℃⁶⁾に近いので、従来の推奨温度を裏付ける結果となった。一方、ナスにおいては、3週間で色彩変化および水分減少が生じ、さらに1ヶ月では腐敗あるいは

低温障害が発生したことから、低温下での貯蔵は不適当であるといえる。しかし、同じく低温障害が発生しやすいキュウリの貫入抵抗は1ヶ月において若干低下した程度であった。また、水分減少量は3週間以降増加したが、その減少量は2g程度と小さく、また、Cole-Cole プロットからも明らかに細胞膜の閉鎖性は保たれていることから、貯蔵中の乾燥によるものと推察される。そのため、貯蔵中の乾燥を防止する手段を講じることにより、3週間は物理的な品質を維持したまま貯蔵できると考えられる。

キュウリを冷蔵したところ10日~2週間程度で低温障

図 13 Cole-Cole プロットの経日変化

○, 7 日間; ◇, 21 日間; △, 30 日間.

害が観察された。このことから、低温障害が発生しやすいキュウリにおいても、PF 法の方が冷蔵より明らかに長期間貯蔵できる可能性が示唆された。このように、この温度域での貯蔵は物理的な性質からはナスを除くカット野菜の貯蔵において有効であることが明らかとなった。しかし、PF 法確立のためには、食品としての安全性について化学的、あるいは生物学的な面からさらに検討する必要がある。

以上の結果から、野菜の Partial-freezing において、野菜ごとに適不適はあるものの、物理的な品質の変化を抑制し、且つ 3 週間程度貯蔵できることが明らかとなった。今後、貯蔵技術を確認するためには、これらの結果を踏まえ、他の野菜における測定、1 個体での測定、さらには安全性の評価など総合的に検討する必要がある。

要 約

PF 法の野菜におよぼす影響、具体的には、色彩変化、硬度変化、水分減少量の調査および電気インピーダンスによる細胞膜の健全性評価を行い、さらに、電気インピーダンスと凍結温度の関係より、貯蔵適温の下限を推定して、PF 法の適性を検討したところ、以下の知見が得られた。

(1) $-1 \sim -3^{\circ}\text{C}$ 付近で貯蔵することにより物理的性質の変化が抑制されたことから、野菜における PF 法の有効性が示唆された。

(2) 野菜の PF 法における貯蔵温度の下限は冷却温度に対するインピーダンスの応答により推定できる可能性が得られた。

(3) -1°C における長期貯蔵性の検討を行った結果、3 週間程度は十分な状態で貯蔵することが可能であった。

(4) 低温障害が発生しやすいキュウリにおいても PF 法を用いることにより、長期間貯蔵できる可能性が示唆された。

文 献

- 1) 内山 均, パーシャルフリージング—その背景研究と応用—, 日調科誌, **18**, 147-154 (1985).
- 2) 田中武夫, 低温と食品の品質保持, 「冷凍空調便覧 応用編」, 新版第 4 版, (日本冷凍協会, 東京), pp. 792-793 (1981).
- 3) 内山 均, 江平重男, 内山つね子, 増沢 一, Partial freezing によるニジマスの鮮度保持, 東海区水産研究所研究報告, **95**, 1-14 (1978).
- 4) 角田聖斎, 江平重男, 内山 均, Partial freezing による魚類の鮮度保持, 東海区水産研究所研究報告, **113**, 43-65 (1984).
- 5) 東健一郎, 安川香苗, 三島睦夫, 山根昭彦, 山根昭美, 氷温処理によるカットキャベツの高品質化, 氷温科学, **2**, 24-29 (1999).
- 6) 宮崎丈史, 鮮度保持の温湿度条件, 「園芸農産物の選別・鮮度保持ハンドブック」, (日本施設園芸協会, 東京), p. 126 (2007).
- 7) Cole, K.S., Electric Phase Angle of Cell Membranes, *J. Gen. Physiol.*, **15**, 641-649 (1932).
- 8) Mohsenin, N.N., Some Basic Concept of Rheology, In "Physical Properties of plant and Animal Materials," (Gordon and Breach Science Publishers, New York), pp. 95 (1970).
- 9) 志塚 淳, 小川幸春, 田川彰男, 脱水ダイコンの物理的、電気的性質に及ぼす凍結および解凍操作の影響, 食科工, **55**, 158-163 (2008).
- 10) 加藤宏郎, 坂口守彦, 大井康之, 丸尾 信, 豊田 薫, インピーダンス特性による魚肉の鮮度判定 (第 1 報) —魚肉の電気特性と高周波域の実用的鮮度指標の導出—, 農業機械学会誌, **62** (3), 76-83 (2000).

-
- 11) Toyoda, K. and Tswnkova, R., Measurement of Freezing Process of Agricultural Products by Impedance Spectroscopy, IFAC Control Applications in Post-Harvest and Processing Technology, pp. 89-94, Budapest, Hungary (1998).
 - 12) 大西茂彦, 宮脇長人, 浸透圧脱水凍結法による野菜の組織軟化抑制, 低温生物工学会誌, **51**, 69-73 (2005).
 - 13) 大西茂彦, 藤井智幸, 宮脇長人, 物理的・化学的处理に伴う植物細胞の組織内変化, 低温生物工学会誌, **47**, 131-133 (2001).
 - 14) 大西茂彦, 藤井智幸, 宮脇長人, 浸透圧脱水による農産物の凍結障害抑制効果, 低温生物工学会誌, **49**, 165-169 (2003).
 - 15) 加藤宏郎, 高周波インピーダンスによる農産物の非破壊鮮度判定(第1報), 農業機械学会誌, **50** (6), 99-107 (1988).
(平成 21 年 1 月 28 日受付, 平成 21 年 5 月 1 日受理)
-