

## 導電率による肉の解凍率の測定

田原迫昭爾・繆 冶煉\*・魏 長楽

(農業機械第二研究室)

昭和 62 年 8 月 7 日 受理

### Measurement of Thawing Rate by Electric Conductivity

Shōji TAHARAZAKO, MIAO Ye-lian\*, WEI Chang Le

(Laboratory of Agricultural Machinery II)

#### 緒 言

従来、食肉の凍結および解凍プロセスにおいて、熱移動のパターンは温度測定により解析されてきた<sup>1,7)</sup>。本研究は食肉の凍結、解凍プロセスの自動計測、自動制御を行うことを目的として、従来の温度測定の代りに対象物の導電率を測定することにより、熱移動パターン（凍結前線あるいは解凍前線）を判断できるかどうかを検討した。

肉類の導電率の測定による加工、貯蔵中の品質検査は主としてヨーロッパで研究されてきた。Sielaff, H. らは 20°C-60°C の温度範囲で熱処理する間に起る導電率の変化を確認し、熱効果によって生じた原料肉中の変化と導電率との関係を報告した<sup>6)</sup>。Sal, M. P. は食肉の生鮮度と導電率との関係について報告している<sup>5)</sup>。しかし低温帯における導電率の変化については不明な点が多い。

本研究は主として導電率と食肉の形状、品温や凍結率との関係について検討した。

#### 測 定 方 法

##### 1. 測定方法の検討

農産物の凍結中における導電率の測定は直流法と交流法があるが<sup>3)</sup>、いずれも検討の必要がある。すなわち、食肉のような電解液の電気抵抗を測定する場合、電源に直流を用いると電極における分極作用のため、逆起電力を生じたり、電極面に気泡やイオン層ができて、あたかも電気抵抗が大きいような現象になる<sup>9)</sup>。一方普通の商用周波数を用いた測定法では、試料にかける電圧がある程度増加すると、試料内部の発熱が多くなり、試料自身が柔らかくなって、電極との接触が不

良になるので、電気抵抗の正確な測定は困難になる。また交流電気抵抗値  $Z$  は  $Z=R+jX$  によるもので、リアクタンス  $X$  の大きさは電極の状態、試料などによって異なる。

このことは本研究の予備実験でも十分確認できた。従って以上 2 つの測定法は食肉の導電率測定には適用できないと判断した。

##### 2. 本研究における導電率の測定方法

###### (1) 食肉の導電率に影響する主な要因

溶液の導電率は、温度、含有イオン、塩濃度等によって変化する。温度の影響については 25°C の食塩水 (292.2mg/ℓ) の導電率は  $6.04 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  であるが、-10°C の氷は  $10^{-9} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  だけになる<sup>2,4)</sup>。また導電率測定用標準液として用いられる濃度 71.1352 (KCl/溶液 kg) の KCl 溶液における温度による導電率の変化を Table 1 に示す<sup>8)</sup>。

塩の濃度の影響については溶解塩の導電率 ( $-10^{-6} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ ) は  $0.65 \times$  溶解濃度 (mg/ℓ) として表わされ、溶解濃度に比例して大きくなる<sup>2)</sup>。また果物、肉類などの食品は一般的に含水率70%以上であり、その水分中に鉄、カルシウム、燐などの無機成分が含まれているので、その導電率を測定するには、内部水分を電解質として考える必要がある。

###### (2) 本研究における測定方法

前述のように導電率測定時における分極作用や気泡、イオン層を防止し、かつ、測定中における試料内部品温変化を少なくするため、電源には 1000Hz の発振器を、電極には白金板のかわりに銅板を代用した。

電気抵抗は Kohlrausch bridge 法でその回路は

Table 1. Electric conductivity of KCl aq.

Temperature (°C)	0	18	25
Electric conductivity ( $\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ )	6,517	9,783	11,134
	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$	$\times 10^{-2}$

本研究は農業機械学会62年年次大会で発表した。

\* 現在筑波大学農林工学系博士課程在学中 (Fac. of Agriculture, Tsukuba Univ.)

Fig. 1 に示す。

また Kohlrausch bridge の式は式 (1) で表わすことができる。

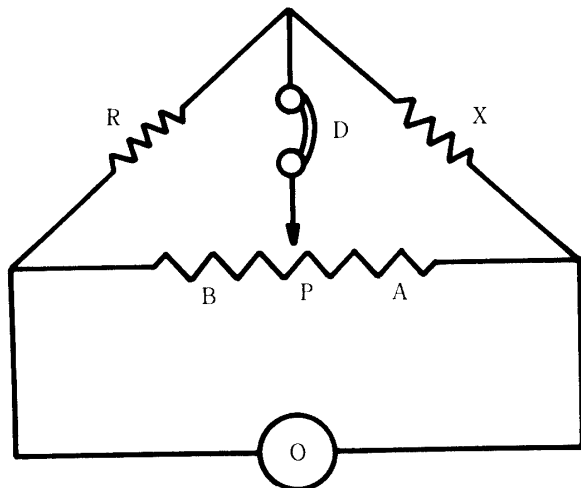
$$XB=RA \text{ or } X=R \cdot \frac{A}{B} \dots\dots\dots (1)$$

ここで X は被測抵抗, A, B は均一な抵抗線で, これに長さ按比例した抵抗値が目盛っているため, 摺動子の接触点 P の位置から抵抗値を直読することができる。R は内蔵の標準抵抗で, これを変えることにより, 測定範囲を変えることができる。電源は可聴周波数発振器 (1000Hz) で, 検電器には受話器を用いた。

**実験装置および実験方法**

**1. 品温一定の食肉における導電率測定装置**

上記条件における測定装置は Fig. 2 に示す。①のホルダは厚さ 10mm のアクリル板で作られ, ねじで



- X, Measured electric resistance
- O, Oscillator (10V/1000Hz/0.03W)
- R, Standard electric resistance
- D, A.C. Ditector

Fig. 1. Kohlrausch bridge.

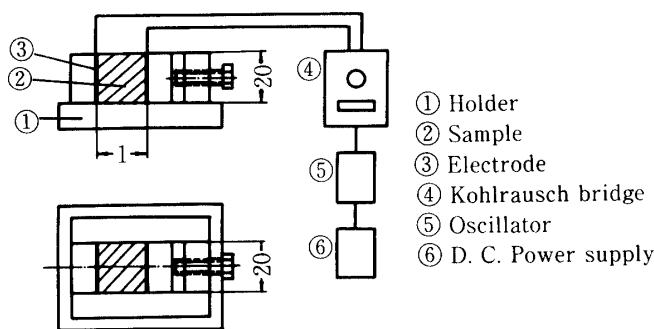


Fig. 2. Experimental apparatus for electric resistance measurement.

長さ l を調節した。②は試料で, ③の電極板は白金の代りに 0.5mm の銅板を代用した。④は Kohlrausch bridge (島津製作所製) で, ⑤は音叉発信器 (横河電気製作所製) で⑥は直流電源 (高砂電気製作所製) である。受話器で検流するとき, 発生音が大きいところから小さくなり最後になくなった際の電気抵抗値を読みとった。すべてのデータは 2 回以上繰返して確認した。

**2. 凍結および解凍中の食肉の導電率測定装置**

上記条件における測定装置の概略は Fig. 3 に示す。①は熱源, ②はホルダ, ③供試した試料, ④電気抵抗測定装置, ⑤品温測定装置, ⑥サーモカップルから構成されている。熱源は凍結においてはドライアイス+エチルアルコール寒剤を用い, 解凍においては常温附近の定温空気を熱源とした。測定時は伝熱板としての床板は取り除き, 定温空気に試料の断面を露出させたまま解凍した。ホルダおよび電気抵抗測定装置は上述したものと同じものを使用し, 厚さ 0.5mm の銅板電極は, 面積 20×20mm<sup>2</sup>, 間隔 10mm で試料に並行に挿入した。品温測定は 0.1mmφ の C-C 熱電対を用い, 電極間の中心部の温度を平均品温とみなした。

**3. 供試材料および実験方法**

供試材料として, 市販の豚もも肉を供試した。それは屠殺して 0°C で 1 日保蔵したもので, 試料 5g を 125°C の定温器で 3 時間乾燥して測定した含水率は 69.12% (w.b.) であった。試料は整形して組織繊維が測定方向と並行になるようにホルダにセットした。

品温一定の場合の電気抵抗測定の場合は, 常温附近の試料を用い電極面積 S 一定 (20mm×20mm) にし

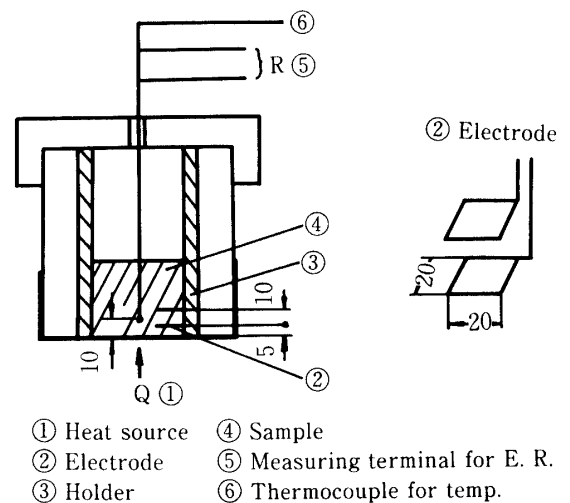


Fig. 3. Schematic diagram of measuring apparatus.

て、その間隔  $L$  を 5, 10, 15, 20mm に変えた場合および間隔  $L$  を一定 (10mm) にして、電極面積  $S$  を  $15 \times 15$ ,  $10 \times 10$ ,  $8 \times 8$  ( $\text{mm}^2$ ) に変えた場合について測定した。

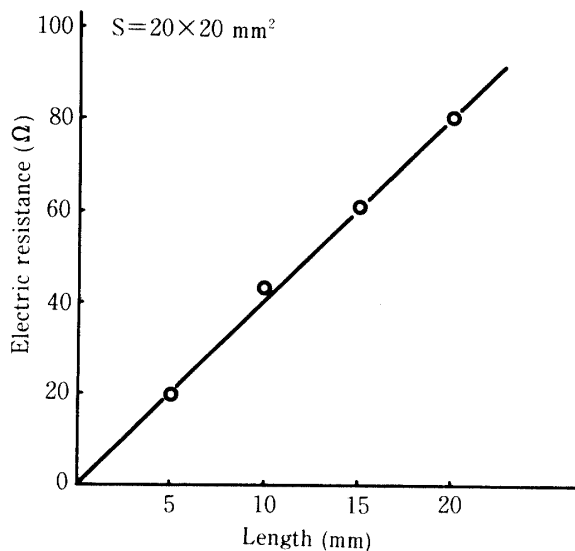


Fig. 4. Relationship between electric resistance and length.

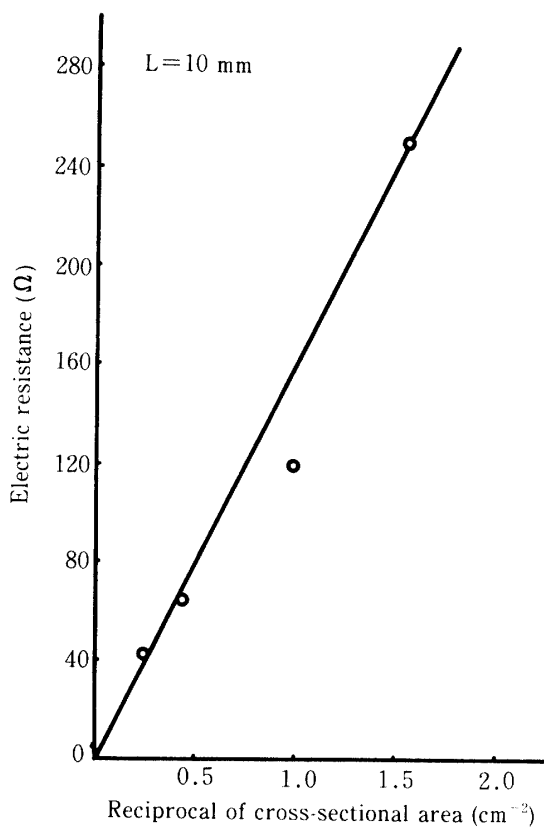


Fig. 5. Relationship between electric resistance and reciprocal of cross-sectional area.

凍結および解凍中の試料の電気抵抗測定の場合は、試料を寒剤で一定の温度に凍結して、一時保蔵したものを供試したが、実験中、品温を連続的に記録しながら、それと対応する電気抵抗を測定した。

実験結果および考察

1. 品温一定の場合の食肉の導電率

供試食肉において、電気抵抗と厚さとの関係は Fig. 4 に、電気抵抗と面積の関係は Fig. 5 に示す。

図からわかるように電気抵抗は厚さに比例し、断面積に反比例しており、この関係は金属材料における電気抵抗値  $R = \rho L/S$  と同一の傾向を示した。(L: 材料長さ, S: 断面積,  $\rho$ : 抵抗率)

供試した食肉の特性値として、品温  $19^\circ\text{C}$ 、含水率 69% (w.b.) の場合、導電率は  $6.25 \times 10^{-3} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  であった。

2. 食肉の凍結率および解凍率と導電率

品温  $19^\circ\text{C}$  の食肉を  $-48.0^\circ\text{C} \pm 1.0^\circ\text{C}$  および  $-71.0^\circ\text{C} \pm 1.0^\circ\text{C}$  の寒剤で急速凍結した場合の品温、凍結

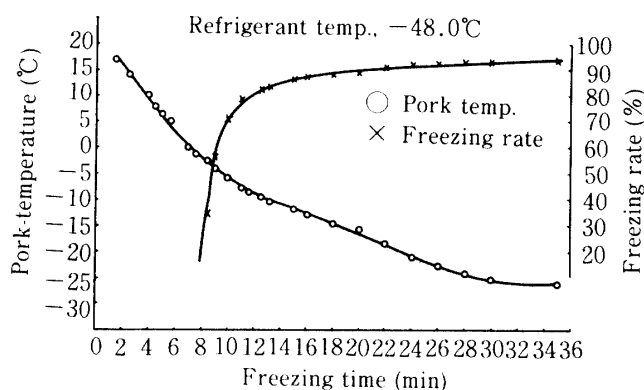


Fig. 6. Relationship among freezing time, pork-temperature and freezing rate at the freezing process. (refrigerant temp. is  $-48^\circ\text{C}$ )

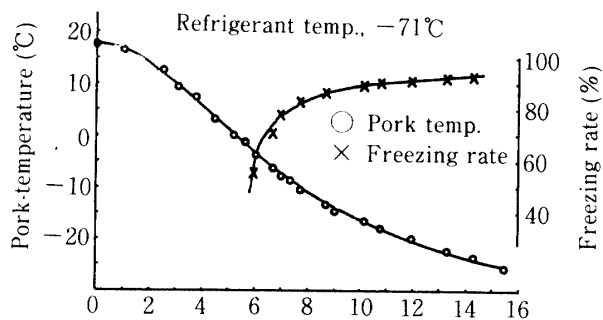


Fig. 7. Relationship among freezing time, pork-temperature and freezing rate at the freezing process. (refrigerant temp. is  $-71^\circ\text{C}$ )

率の時間的変化を Fig. 6, Fig. 7 に示す。また品温  $-22.0^{\circ}\text{C}$  および  $-28.0^{\circ}\text{C}$  の食肉をそれぞれ  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $18^{\circ}\text{C}$  の温度で解凍するときの品温, 解凍率の時間的変化を Fig. 8, Fig. 9 に示す。なお凍結率 ( $\lambda$ ) は次式で求めた<sup>1)</sup>。

$$\lambda = (1 - \frac{T_f}{T})$$

ここで,  $T_f$ : 食品内溶液の凍結点温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T$ : 食品の冷却温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

この凍結の場合, 全冷却時間に対する平均品温の冷却速度は,  $-48^{\circ}\text{C}$  の寒剤で凍結する場合は  $-1.47 (^{\circ}\text{C}/\text{min})$ ,  $-71^{\circ}\text{C}$  の寒剤で凍結する場合は  $-2.75 (^{\circ}\text{C}/$

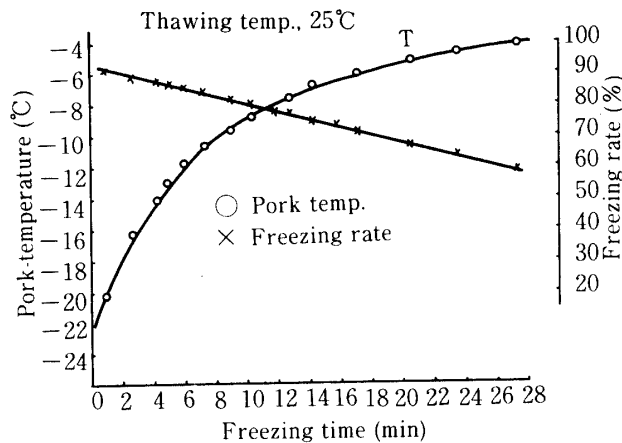


Fig. 8. Relationship among thawing time, pork-temperature and freezing rate at the thawing process. (thawing temp. is  $25^{\circ}\text{C}$ )

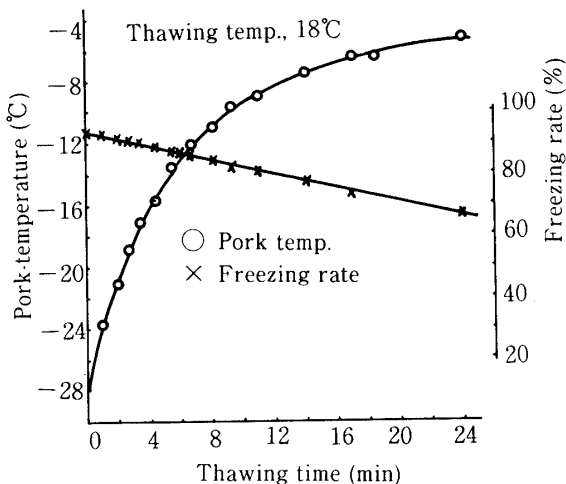


Fig. 9. Relationship among thawing time, pork-temperature and freezing rate at the thawing process. (thawing temp. is  $18^{\circ}\text{C}$ )

$\text{min})$  で, 80%まで凍結した場合の平均凍結速度はそれぞれ  $-6.96\%/ \text{min}$ ,  $-10.67\%/ \text{min}$  の急速凍結だったので, 最大氷結晶生成帯は認知できなかった。凍結中に凍結率が70%以上になれば, 凍結率変化は遅くなり, 90%を越えるとほとんど変化しない。

常温帯で解凍中の凍結率と解凍時間との関係は, 本実験の測定範囲内では直線的に変化し, その解凍速度は  $18^{\circ}\text{C}$  の場合  $1.15\%/ \text{min}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  の場合  $1.30\%/ \text{min}$  であり, 凍結曲線とかなり異なった。

この実験における凍結率 ( $\lambda$ ) と導電率 ( $\frac{1}{\rho}$ ) との関係を図. 10 に示す。その結果, 凍結中においては (①, ③曲線) 凍結率と導電率は逆比例の関係になり, 凍結率が高くなるにつれて導電率は減少した。また導電率と凍結速度の関係は比例関係で, 凍結速度が速ければ同一凍結率でも導電率は高くなった。

一方解凍中の (②, ④曲線) 凍結率と導電率とは凍結中と同じく逆比例の関係であったが, その変化割合は高く, 同一凍結率でも解凍中の導電率の方が凍結中に比べ高くあらわれた。この原因については, 凍結率の定義そのものに由来するのか, 他の要因によるのか今後検討したい。

### 3. 食肉の品温変化と導電率

上記の凍結および解凍条件において, その品温と導電率の関係をそれぞれ Fig. 11, Fig. 12 に示す。図か

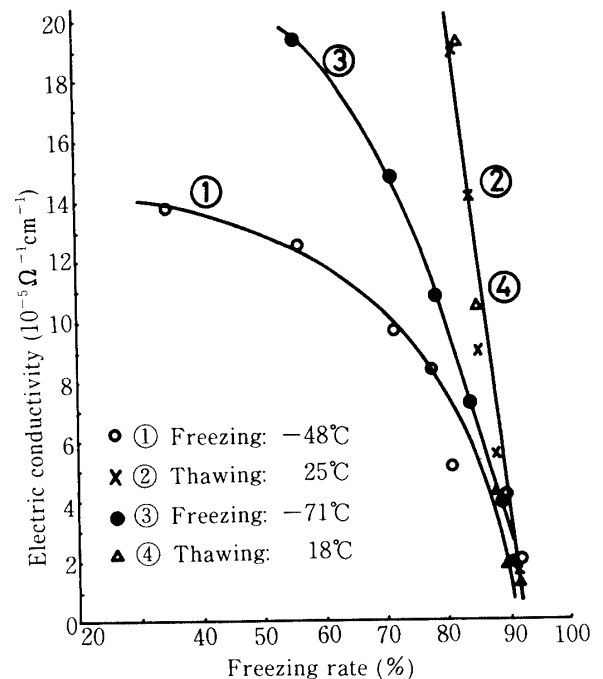


Fig. 10. Relationship among electric conductivity, freezing rate and variation velocity of pork-temperature.

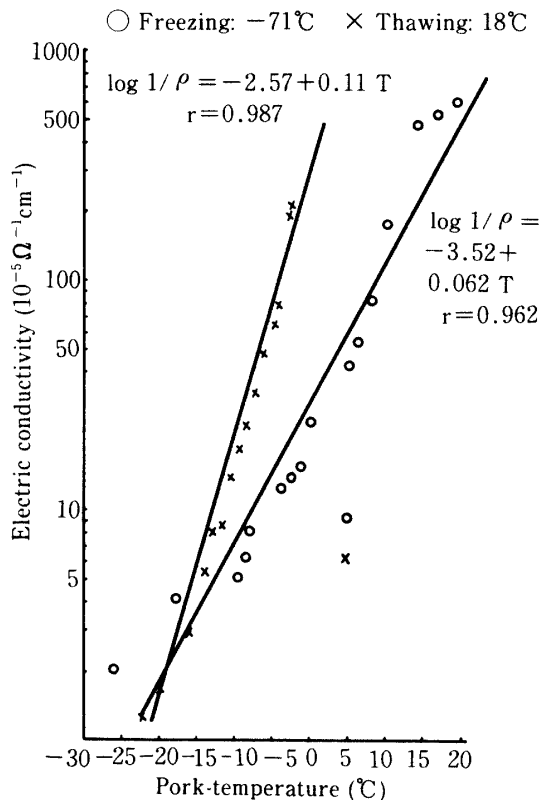


Fig. 11. Relationship between electric conductivity and pork-temperature.

ら明らかのように導電率 ( $\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ ) と品温  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) との関係は次式の指数関係であらわされた。

$$\frac{1}{\rho} = 10^{(a+bT)} \dots\dots\dots (2)$$

すなわち品温が低下すれば導電率も低下し、電気は通りにくくなり、品温が上がれば、導電率も上昇する。この現象は温度が低下すれば導電率が高くなる金属等とは逆の傾向で、型としては半導体的であり、食肉の導電率は電解質溶液の特性をもっている。また同じ品温でも凍結中と解凍中ではその導電率は異なり、この実験ではいずれも解凍中の方が導電率が大きい値を示した。

なお実験結果より (2) 式における係数  $a$ ,  $b$  の値を Table 2 に示す。

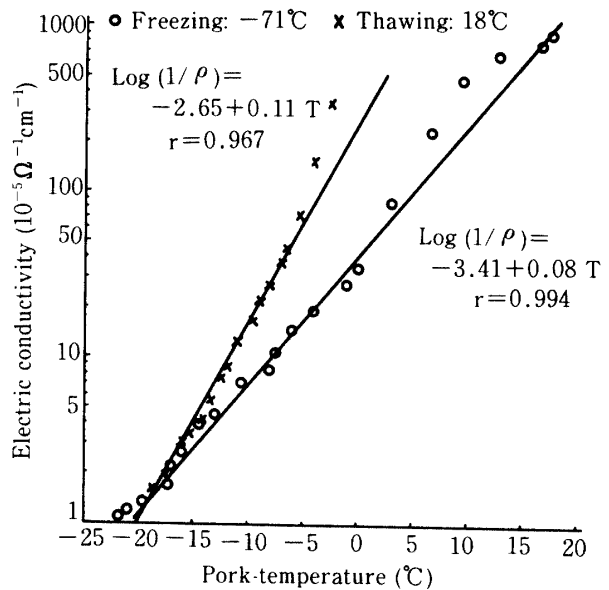


Fig. 12. Relationship between electric conductivity and pork-temperature.

以上の結果から、食肉凍結および解凍過程において、その導電率の大きさは、品温、凍結率だけでなく、凍結あるいは解凍速度にも大きく影響されると思われる、式 (2) における係数  $a$ ,  $b$  は試料の種類、品温の変化によって決まるものと考えられる。

要 約

この研究は食肉の凍結および解凍プロセスの自動計測、自動制御を行うことを目的として、従来の温度測定に代りに導電率を測定することにより熱移動パターンを判断できないかを検討したものである。その結果を要約すると次のようである。

(1) 電気抵抗 ( $R$ ) と形状との関係は食肉の面積 ( $S$ ), 厚さ ( $L$ ), 抵抗率 ( $\rho$ ) とすれば  $R = \rho L/S$  の関係があり、常温下における豚もも肉の導電率 ( $\frac{1}{\rho}$ ) は  $6.25 \times 10^{-3} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  であった (Fig. 4, Fig. 5)。

(2) 凍結および解凍中、導電率 ( $\frac{1}{\rho}$ ) は品温 ( $T$ ) により指数関数的に変化し、 $\frac{1}{\rho} = 10^{(a+bT)}$  の実験式を得た (Fig. 11, Fig. 12)。すなわち金属物質とは逆に、

Table 2. Value of coefficient (a) and (b)

	Temp. of freezing and thawing ( $^{\circ}\text{C}$ )	Rate of temp. variation in pork ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	Coefficient value		Correlation coefficient
			a	b	
Freezing 1	-48.0	-1.91	-3.52	+0.062	0.962
" 2	-71.0	-2.69	-3.41	+0.080	0.994
Thawing 1	+25.0	+1.00	-2.57	+0.110	0.987
" 2	+18.0	+1.34	-2.65	+0.110	0.967

品温が低下すれば導電率も低下することが明らかとなった。

(3) 前記式の定数  $a$ ,  $b$  は試料の種類や品温変化に伴って定まるもので豚もも肉の場合, 凍結中は  $a$  は  $-3.41 \sim -3.52$ ,  $b$  は  $0.062 \sim 0.080$ , 解凍中は  $a$  は  $-2.57 \sim -2.65$ ,  $b$  は  $0.110$  であった. (Table 2)

(4) 食肉の導電率は凍結中と解凍中では同一の凍結率でも異なり, 解凍中の方が高かった. この原因について, 温度の変化速度の差異によるものか, その他の理由によるものか今回の実験では追求できなかった. 今後検討したい.

**謝辞** 本研究にあたり, 御指導を頂いた本学農学部宮里満教授, 加香芳孝教授, 田中俊一郎助教授, 水産学部御木英昌助教授および実験, データの整理に協力頂いた町田俊子技官に心から感謝致します.

## 参 考 文 献

- 1) 源生一太郎: 解凍所要時間の算定. *Refrigeration*, Vol. **45**, No. 508, 8-15 (1970)
- 2) 合田 健: 水質工学基礎編. 丸善, 東京, p.143 (1975)
- 3) 黒田雅明: 農産物の凍結に関する研究. 鹿大農修論, (1976)
- 4) 前野紀一: 氷の科学. 北大図書発刊会, p.132 (1981)
- 5) Sal, M. P.: 電気伝導度の測定による冷凍肉の検査. *Rev. Gen. Froid*, Vol. **65**, No.4, 343-348 (1979)
- 6) Sielaffh, H.: 工程管理のための物質的パラメータとしての肉の電気伝導度. *Nahrung*, Vol. **23**, No.4, 409-416 (1979)
- 7) Talmon, Y. and Davis, H. T.: Analysis of Propagation of Freezing and Thawing Fronts. *Jour. of Food Science*, Vol. **46**, 1478-1483 (1981)
- 8) 東京天文台: 理科年表. 丸善, 東京, p.527 (1986)
- 9) 山内二郎監修: 新版電気計測便覧. オーム社, 東京, p.395 (1980).

## Summary

In this study, in freezing and thawing processes, without using the traditional way of measuring the temperature, a possibility to make proper judgement on to the heat transfer-pattern of meat by measuring its electric conductivity, has been investigated, with the following results, obtained.

(1) It was ascertained that it was possible to express the electric resistance of meat by the equation:  $R = \rho L/S$ . Here,  $S$  is the area,  $L$  is the thickness and  $\rho$  is the resistivity. It was also ascertained that the electric conductivity ( $1/\rho$ ) of the pork used in this experiment was  $6.25 \times 10^{-3} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  at the atmospheric temperature (Fig. 4, Fig. 5).

(2) During freezing and thawing processes, an exponential function of the electric conductivity ( $1/\rho$ ) and the temperature was experimentally fixed to be  $1/\rho = 10^{(a+bT)}$  (Fig. 10, Fig. 11). From these results, it was ascertained that, the electric conductivity of meat, owing to its being opposite to that of metal decreases with the decreasing of temperature.

(3) The constant ( $a$ ) and ( $b$ ) in the above mentioned equation must be determined in accordance with the test-material and the temperature-changing-rate. In case of the pork used in the experiment,  $a = -3.41 \sim -3.52$ ,  $b = 0.062 \sim 0.080$  in the freezing process, while  $a = -2.57 \sim -2.65$ ,  $b = 0.110$  in the thawing process (Table 2).

(4) The electric conductivity of meat was different in freezing and thawing processes even if it was kept at the same freezing rate. The electric conductivity in the thawing process showed a higher value. Whether this was due to the difference in the temperature-changing-rate or not could not be ascertained in this experiment. A further research is to be carried out in future.