

## 魚類の冷凍に対する交流電場の影響 The Effects of Alternating Electric Field on the Frozen Fish

吉本亮子\*, 岡久修己\*, 川西啓晴\*\*, 山西務\*\*, 豊栖佳代子\*\*,  
湯浅信夫\*\*, 三浦喬晴\*\*\*, 小濱京子\*\*\*, 鷲尾方一\*\*\*

Ryoko Yoshimoto, Naoki Okahisa, Hiroharu Kawanishi, Tsutomu Yamanishi, Kayoko Toyosu,  
Nobuo Yuasa, Takaharu Miura, Kyoko Obama and Masakazu Washio

### 抄 録

交流電場処理技術が水産練り製品の生原料として有用な県産魚類の冷凍に対してどのように影響するのか検討した。その結果、電場処理凍結をすることによって、解凍後の筋肉組織の細胞破壊の程度が低く抑えられる傾向が見られた。また、タチウオの Ca-ATPase 活性残存率及びかまぼこゼリー強度が対照試験区よりも高く推移し、タンパク変性抑制が示唆された。しかし、これらの効果は魚種により異なることがわかった。

### 1 はじめに

近年、漁業生産者においては魚価の低迷や漁業環境の変化による漁獲量の減少、水産加工業においては原料不足や価格の高騰など、地域の水産業が直面している経済的な課題への対策として、水産物を品質低下少なく長期保存できる冷凍技術開発が重要である。

冷凍技術開発は、急速凍結による氷結晶の成長抑制に努力が重ねられてきた。しかしながら、小さく制御された氷結晶も、その後の貯蔵時の温度変動により再結晶化し、食品の組織を傷つけ、凍結障害の原因となっている。一方、近年、氷結晶を極小化することにより高品質冷凍を可能にするとして電場技術を利用した冷凍庫が市販されるようになってきた。電場に水を置くと、極性分子である水分子は配向し分極を引き起こす。これらの冷凍庫は、この水の性質を利用し、いわゆる水のクラスターの細分化、ひいては食品冷凍における凍結障害の軽減化を期待するものである。

本報では、交流電場処理技術が水産練り製品生原料として有用な県産魚類の冷凍に対して、その品質にどのような影響を与えるのかを検討した結果について報告する。

### 2 実験方法

#### (1) 試料

試料として用いた鮮魚は、平成 22 年 9 月に徳島市津田漁港に水揚げされた、タチウオ (平均 250g/匹) およびアジ (170g/匹) を、漁協の冷蔵庫にて一晩氷蔵後、当センター1°Cの低温庫で更に 1 日氷蔵保管した後実験に供した。

#### (2) 試料の調製

ラウンド魚は、ビニール袋に簡易包装した。ミンチ状ブロックの作製は、25kg から落とし身を作製し、らいかい機等を用いて全体をよく混合して、その 1kg ずつをビニール袋に簡易包装した。

#### (3) 冷凍保存条件

山本鉄工所作製の電場ボックス (内寸 300mm×300mm×250mmH、22.5L) を、2 台の同じ型式の市販冷凍庫にそれぞれ設置し、一つを電場試験区用装置、もう一つを対照試験区用装置とした。電場試験区は、冷凍庫上段のボックスに電圧を印加した。下段にも同じボックスを設置し、上段の電場ボックスから誘引形成される電場を利用し低電場試験区用とした。対照試験区は、上段にボックスを設置し、電圧はかけなかった。冷凍庫設定温度は-15°C、デフロスト間隔は 6 時間とした。電場印加条件は表 1 の通りで、凍結開始より保存試験終了まで継続した。

表 1 電場条件

	空間電圧 [kV]	試料表面電圧 [kV]
上段ボックス	3.6	8
下段ボックス	1.0	2

\*食品技術課, \*\* (株) 山本鉄工所, \*\*\*早稲田大学

この電場ボックスに試料を入れ、冷凍保存試験を行った。サンプリング後は、ダミーの試料（同様の包装形態）を補充し、ボックス内のサンプル充填率を一定に保った。

#### （４）冷凍曲線の測定

電場冷凍時の温度変化の計測は、光ファイバー温度計（Neoptix 社あるいは安立計器株）を用い、対照試験区は、テフロン被覆サーミスタセンサーをつけた温度データロガー（株ティアンドディ）を用いた。データサンプリングは15秒間隔に設定した。

#### （５）電圧の測定

オシロスコープ（TDS2024B, Tektronix 社）と高電圧プローブ（P3000, 同社）を併用し、オシロスコープをオートレンジにセットし peak to peak の測定値を電圧値とした。

#### （６）品質評価

##### ①膨張率

凍結前および凍結保存後の同一魚体（5匹）の体高および体幅をノギスを用いて測定し、体高×体幅の数値を用いて、凍結前の値に対する増加率を膨張率とした。得られた5体の数値のうち、最高値と最低値を除き平均値を算出した。

##### ②組織構造の観察

凍結保存終了後 1°Cで一晩放置した魚体を用いて、体側筋の背側部より小片を採取し、OCT コンパウンド（サクラファインテックジャパン）に包埋して液体窒素中で凍結した。-25°Cに設定したミクロトームで、体側筋の横断面を 5 $\mu$ m で切り出し、フィルム（Cryofilm Type I, Leica Microsystems）を用いて切片を採取した。4%ホルムアルデヒドで固定後水洗し、ヘマトキシリンに次いでエオシンで染色、エンテランニューで封入して顕微鏡観察を行った。また、組織切片像の空隙の割合を、像の約 1/4 面積に相当する特定部分について、画像解析ソフトウェア（Win Roof ver5.7, 三谷商事株）により数値化した。

##### ③Ca-ATPase 活性残存率

解凍したそれぞれの試験区のミンチ状試料を約 5g 採取し、0.1M KCl, 20mM Tris-HCl 緩衝液（pH7.5）に対するアクトミオシン懸濁液とした。これを用いて、新井の方法<sup>1)</sup>により活性（1分間に 1mg のタンパク質が遊離するリンの mol 数）を

測定した。凍結前の試料の Ca-ATPase 活性を 100% として、それぞれの試験区の試料の活性値を未凍結試料に対する百分率で示した。

#### ④ゼリー強度

半解凍状態のミンチ状試料 1kg に、3%食塩および氷水 100g を加え、室温 7.5°C で最終品温 10°C 以下を維持しながら 10 分間らいかいした。得られた肉のりを口径 18mm のスタッパーを使用してフィルムチューブ約 20cm に詰め、両端を結さつ後、沸騰水中で 30 分間加熱した。流水で冷却し、冷蔵庫で 1 晩放置後、室温に戻し 25mm の輪切りにし 1 チューブにつき 6 個の物性測定用試験片を作製した。測定にはテクスチャーアナライザー（SMS 社製、TA-XT2i）、5mm 径のシリンダープローブを用いた。切断面の中心がプローブの真下に位置するように試料台にのせ、テストスピード 1.0mm/sec でプローブを貫入した。試験片が抵抗を失って破断した時の荷重値（g）および凹みの大きさ（cm）を測定し、ゼリー強度（g・cm）を求めた。1 試験区につき 24 試験片を測定し、その平均値を算出した。

### 3. 結果及び考察

#### 3・1 水に対する影響について

電場ボックスの中央に置いた容器中の水の量を徐々に増やし、水にかかる電圧を測定した。その結果、図 1 に示すように、水の量が増えるとともに電

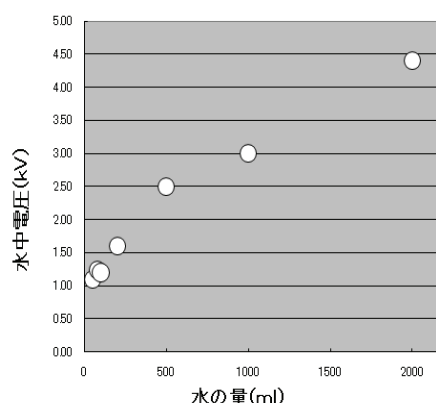


図 1 電場に置いた水の量と水にかかる電圧の関係

圧値も高くなった。これは、前述の水の分極によるものと考えられ、水の量が増えることによって分極による電荷量が増大したものと考えられる。

このように、交流電場は水に作用すると考えられ

る。そこで、水の基本的な性質である過冷却現象に対する影響を観察した。プラスチック容器に蒸留水 150ml と光ファイバー温度計を入れて、繰り返し 7 回の凍結実験を行った。電場処理試験区と対照試験区の設定は、1 台の冷凍庫を使用して、電場の ON/OFF により行った。その凍結曲線を図 2 に示した。過冷却の解消点における平均温度は、電場で  $-2.01^{\circ}\text{C}$  (標準偏差 1.14), 対照は  $-3.21^{\circ}\text{C}$  (標準偏差 2.26) となり、電場処理することで、過冷却解消点のばらつきが小さくなり、また温度は高くなる傾向が見られたが、検定による有意差は認められなかった。

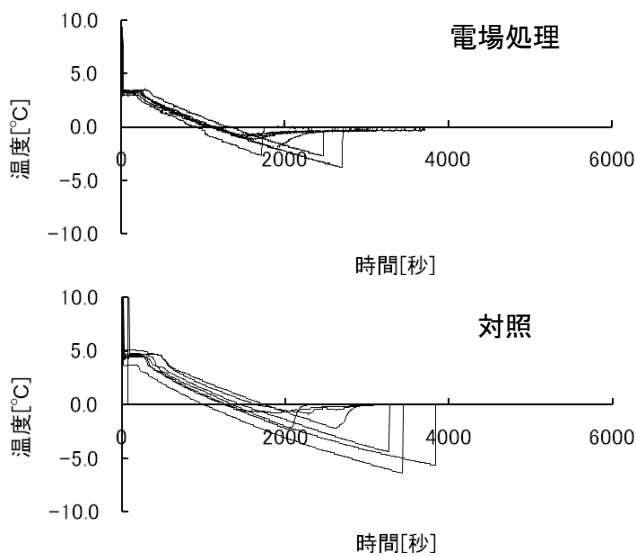


図 2 蒸留水の凍結曲線

### 3・2 魚類への影響

図 3 に、アジの凍結曲線を示した。図に示すよう

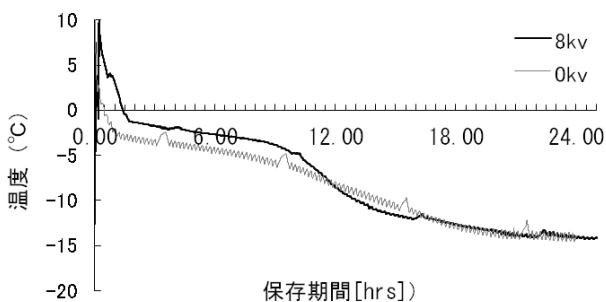


図 3 アジの凍結曲線

に今回の実験は緩慢冷凍で実施した。また過冷却は観察されなかった。電場処理と対照試験区で、相変化時の温度が  $2^{\circ}\text{C}$  程度違うが、魚肉内へのセンサー設置位置の違いにより庫内温度の影響を受けた可能性もあるが、原因は不明である。

つぎに、アジ及びタチウオの冷凍による膨張率の

変化を図 4 に示した。アジについては、7 日および 30 日保存後において上段ボックスに入れた試料 (以下 8kV 試験区) および下段ボックスに入れた試料 (以下 2kV 試験区) で対照試験区 (以下 0kV 試験区) よりも膨張率が低くなった。タチウオでは、2kV 試験区では、0kV 試験区よりも膨張率が高くなったが、8kV 試験区では低く推移した。しかしながら、膨張率は個体差によるばらつきが大きく有意差は認められなかった。

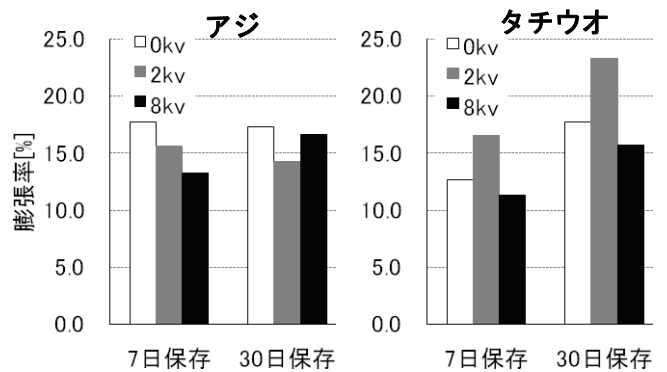


図 4 魚体の膨張率の推移

つぎに、アジ及びタチウオの 40 日凍結保存後の組織観察を行った結果、図 5 に示すような像が得られた。アジの普通筋については、冷凍すると鮮魚と比べ筋細胞間の間隔が広がった。これは、電場の有無に関わらず観察された。アジ血合い筋については、電場処理の有無に関わらず凍結保存した試験区は鮮魚に比べ筋周膜部が広がった。更に、0kV 試験区では、筋細胞内に氷結晶の生成によるものと思われる空洞が多数観察され、細胞破壊が進んでいたのに対し、2 及び 8kV 試験区ではそのような空洞はほとんど観察されず、解冻後の細胞の復水状態は 0kV よりも良好であった。図 5 のアジ (血合い筋) 鮮魚の像に例示したように、空隙部分に画像処理を施し、得られた空隙の面積率を表 2 に示した。これによると、8kV 試験区の数値が最も低く、0kV が最も高かった。解冻後の筋肉細胞の復元にはタンパク質の変性

表 2 アジ (血合い筋) の空隙部の面積率

試験区	面積率 [%]
生鮮	14.8
0kV	28.5
2kV	27.5
8kV	21.0

が関与すると言われている<sup>3)</sup>。このことから、アジ血合い筋において、電場処理試験区は0kV試験区よりもタンパク変性が少ないため細胞の復元が向上したとも考えられる。一方、タチウオについては、凍結切片の作製が難しく、鮮明な像が得られなかったため正確な比較はできないが、0kVに比較すると電場処理試験区で空隙が減少しているように観察された。

つぎに、タンパク変性について検討を行った。図6に示すように、タチウオの-15℃保存時に電圧印加により、魚肉タンパク質の凍結変性の指標であるCa-ATPase活性残存率が0kVに比べ15%程度高く推移し、タンパク質の凍結変性を抑制する可能性が示唆された。アジについては0kV試験区と同じかあるいは低く推移した。

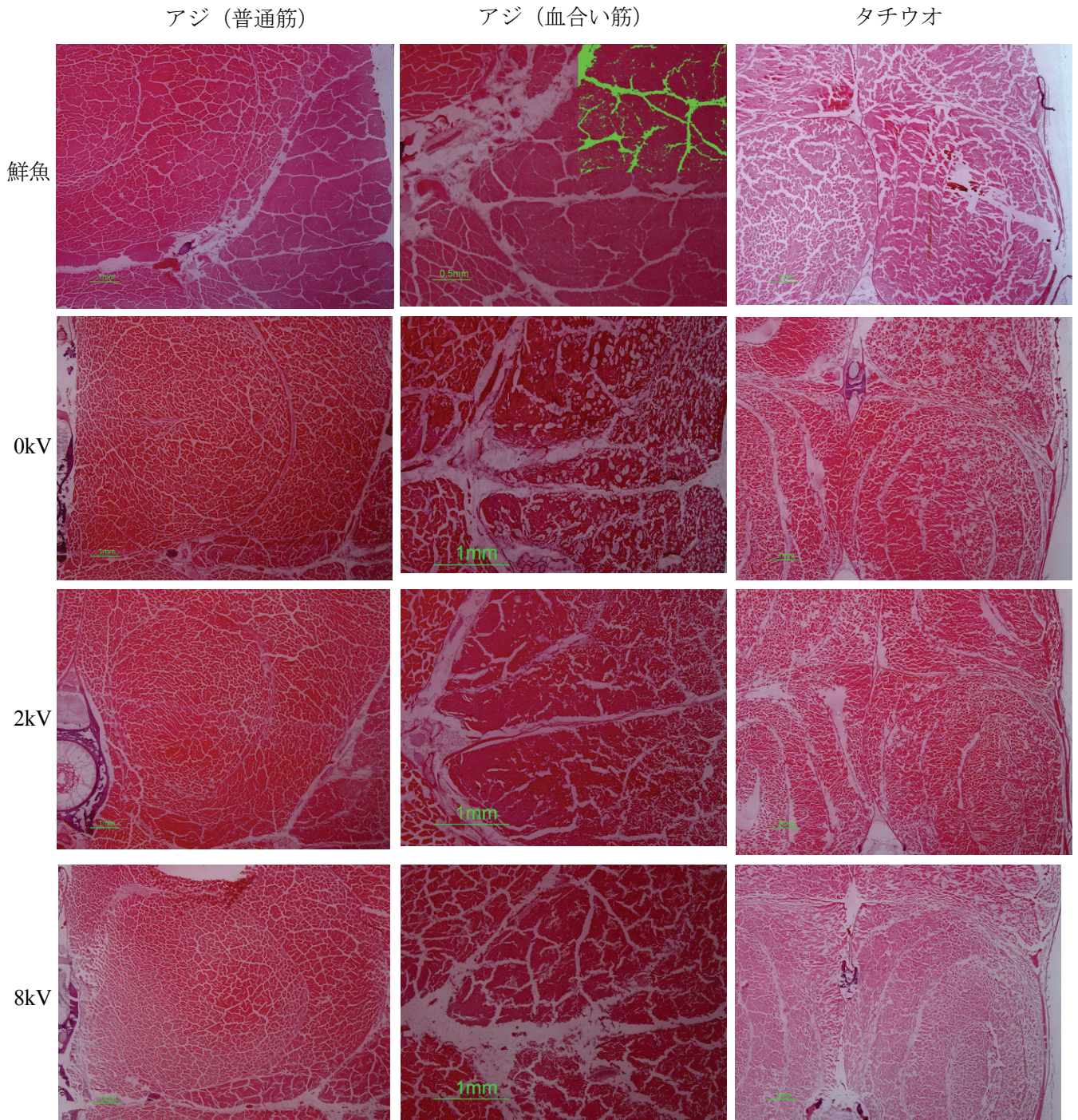


図5 鮮魚及び保存40日後の組織構造

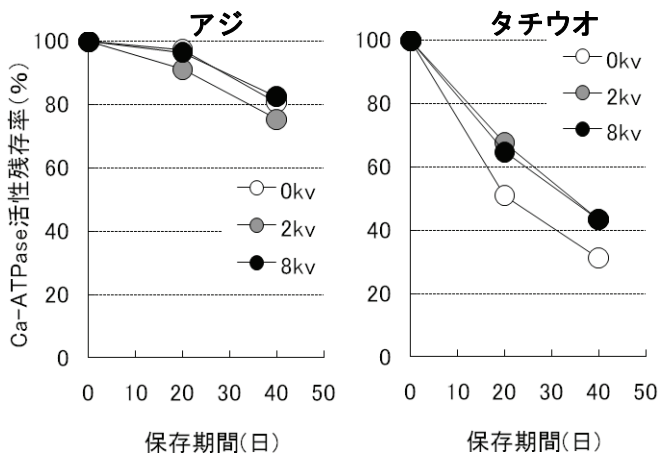


図6 Ca-ATPase 活性残存率の推移

また、図7には、保存した落とし身ブロックより作製したかまぼこのゼリー強度の推移を示した。保存期間が長くなるとともにゼリー強度は低下し、アジは3試験区に差は見られなかったが、タチウオについては、電場試験区が0kV試験区よりも高い値で推移した。検定の結果、40日保存においてのみ、2kVと0kVの値には5%水準で、8kVと0kVには1%水準で有意差があった。ゼリー強度はかまぼこの弾力性などに相関し、鮮度劣化が進みタンパク質が変性した魚肉から作ったかまぼこのゼリー強度は低下する。図6及び図7から、電場は、魚肉タンパク質の凍結変性を抑制する可能性があり、魚種によってその程度は異なると考えられる。

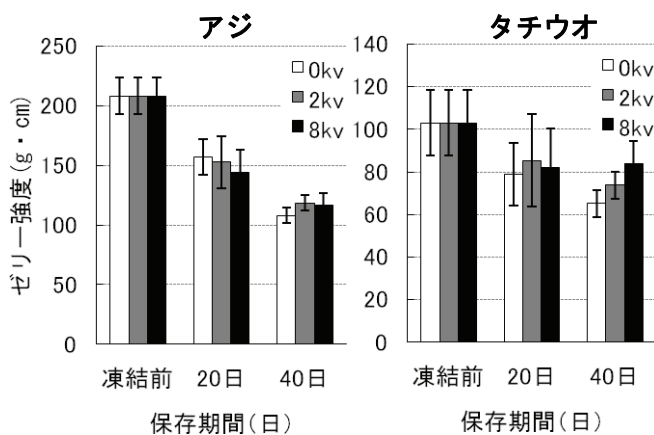


図7 ゼリー強度の推移

魚肉タンパク質の凍結変性のメカニズムについて、整理された文献<sup>2)</sup>によると、その原因の一つに氷結晶とタンパク質の水和層との相互作用が上げられている。また、不凍タンパク質の研究では、氷結晶表面に不凍タンパク質が吸着することによって氷結晶

の生長が抑制される<sup>3)</sup>とされている。このようにタンパク質分子の立体構造の維持にはその結合水が深く関与する。電場が水分子にどのように影響を与えたか、また、それにより水の物性はどのように変わるのか、これらについては残念ながら知見を得られていない。しかしながら、食品冷凍への応用に向けては、これら水への影響を明らかにすることが、不可欠であるものと思われる。

#### 4. まとめ

(1) 水に対する交流電場の影響を調べた結果、電場印加条件下では、水の量の増加に比例して電圧値も高くなった。

(2) 凍結による魚体の膨張率を調べた結果、アジについては、電場試験区で0kV試験区よりも膨張率が低くなり、タチウオでは、8kV試験区のみ低くなったが、有意差は得られなかった。

(3) 組織観察の結果、アジの凍結保存については、普通筋では電場の有無による差はなかったが、血合い筋では、対照試験区で細胞破壊が見られたのに対して、電場試験区では見られなかった。

(4) 凍結保存中のタンパク変性を検討した結果、タチウオ Ca-ATPase 活性残存率は、電場試験区で対照試験区よりも高く推移したが、アジは対照試験区と同等以下であった。かまぼこゼリー強度についても同様の傾向が見られた。

#### 謝辞

本研究は、平成 21, 22 年度農林水産省新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業により実施しました。研究に際しご助言をいただいた、東京海洋大学の白石真人博士、独立行政法人水産大学校の福田裕博士および関係各位に心より感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 新井健一：「水産生物化学・食品学実験書」, (株)恒星社厚生閣, pp189-194 (1974)
- 2) 土屋隆英：「魚肉タンパク質の凍結変性機構」, 日本冷凍協会論文集. Vol. 6, No. 1, pp1-13 (1989)
- 3) 近藤英昌・津田栄：「不凍タンパク質の種類と凍結抑制効果」. 冷凍. 第 86 巻, 第 1005 号. pp15-19 (2011)