

# パルス電界処理が魚肉の食塩浸透および食感に及ぼす影響

小南 友里<sup>1</sup>, Aberham Hailu Feyissa<sup>2</sup>, Lucas Sales Queiroz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> Technical University of Denmark

## 概要

パルス電界技術 (pulsed electric field: PEF) は、非加熱操作であることから、寿司や刺身などの生食用の魚肉の加工にも利用できる。本研究では、PEF の応用による魚肉の調味プロセスの制御および簡易化を目的として、PEF 処理が魚肉のテクスチャー、組織構造、および食塩浸透速度に及ぼす影響について検討した。海水養殖ニジマスを試料として用いた。パルス幅 10  $\mu$ s, 周波数 10 Hz, 両極性, グロスタイム 2.5 s/50 pulses を固定条件として、パルス強度 0.125~0.5 kV/mm でニジマス肉 PEF 処理の最適化を試みた。パルス強度 0.125~0.5 kV/mm でニジマス肉の PEF 処理を試行した結果、パルス強度 0.125 kV/mm 以下で閃光が観察されなかったことから、ニジマス肉の PEF 処理ではパルス強度~0.125 kV/mm が適当と示唆された。そこで、以降の実験ではパルス強度 0.125 kV/mm で PEF 処理を行なった。同条件下にて、パルス強度 0.125 kV/mm でパルス回数を 0~300 回で処理した結果、パルス回数に依存した一次関数的なニジマス肉の温度上昇が認められた。一方、パルス回数 0, 100, 200, 300 回で PEF 処理したニジマス肉のテクスチャーを比較した結果では、有意な差は認められなかった。さらに、PEF 処理をしたニジマス肉とパルス回数 300 で PEF 処理したものについて、組織観察を行なった結果では、顕著な差異は認められなかった。

したがって、本研究で設定した条件下では、PEF 処理がニジマス肉のテクスチャーおよび組織構造に及ぼす影響は極めて小さいといえる。ただし、パルス回数を大幅に増やした場合には、テクスチャーの軟化や組織構造の変化が観察される可能性も考えられる。PEF 処理がニジマス肉の NaCl 浸透速度に及ぼす影響について検討した結果、PEF 処理による NaCl 浸透促進が認められた。PEF 処理によって細胞膜に不可逆的に微細孔が生じると考えられている。既に、牛肉でマリネ前の PEF 処理による物質移動の促進が報告されており、本研究の結果からニジマス肉においても同様に物質移動が促進されることが確認された。以上のように本研究では、PEF 処理時のパラメータの最適化によって、生鮮魚肉のテクスチャーを損なうことなく、食塩などの調味物質の拡散速度を上げられる可能性が示された。

## 1. 研究目的

近年、世界的に水産物の需要が増加傾向にある。水産加工品のなかでも、西京漬けやへしこのように調味料に浸漬したものは、日本だけではなく欧米諸国においても(マリネなど)一般に消費されている。調味料への浸漬による魚肉の加工は、呈味性の高い製品を得られるという利点がある一方、加工時間が長く、高塩濃度になるという問題がある。これを解決する新たな食品加工技術として、パルス電界技術 (pulsed electric field, PEF) が挙

げられる。PEF は、細胞への遺伝子導入法として知られているエレクトロポレーションを食品加工へ応用したものである<sup>1)</sup>。非加熱操作であることから、寿司や刺身などの生食用の魚肉の加工にも利用できる。PEF では、電気パルスによって筋肉細胞に細孔を作り、細胞内外の物質移動を促すことによって調味料の浸透速度が上がると思われる。既に、牛肉を用いた既往研究においては、PEF 処理によって調味液浸漬時の食塩の浸透速度

が上がることを示されている<sup>2)</sup>。さらに、PEF を用いた減塩加工の可能性も報告されている<sup>2)</sup>。

ただし、PEF 処理による細胞膜および結合組織への物理的刺激が魚肉の食感に影響を及ぼす可能性が高い。さらに、食塩や糖類などが通常の拡散とは異なる様式で組織に浸透すると予想され、従来の単純浸漬における食感変容とは異なる挙動を示すと考えられる。そこで、PEF を用いた魚肉への調味液浸透促進と食感制御の両立を本研究の目的とし、PEF の条件(パルス波高値、パルス幅、印加エネルギー)と魚肉の食感変化の関係について詳細を明らかにする。特に、調味液成分のなかでも食塩が魚肉の食感の支配要因であることから、本研究では、PEF による魚肉への食塩の浸透に着目し、PEF 処理が①魚肉のテクスチャー、②魚肉の組織構造、および③魚肉の食塩浸透速度に及ぼす影響を検討した。

## 2. 研究方法

### 2.1 試料

試料として海水養殖ニジマス *Oncorhynchus mykiss* を用いた。背側肉から皮を取り除き、皮側および脊椎側が平面となるように円柱状(φ30 mm、高さ 20 mm)に切り出した。試料はプラスチックフィルムで密封し、使用時まで氷上で冷却した。

### 2.2 PEF 処理

PEF 処理には OmniPEF-LAB(VITAVE)を使用した。電極は使用直前まで氷上で冷却した。PEF 条件は、パルス幅 10 μs、周波数 10 Hz、両極性、グロスタイム 2.5 s/50 pulsesとした。パルス強度は0.125~0.5 kV/mm で試行し、ニジマス肉の PEF 処理における最適強度を検討した。また、パルス回数のみが異なる条件下でニジマス肉を PEF 処理し、試料中心温度を測定した。パルス処理を行わない試料(パルス回数 0)については、電極にセットして 30 sec 静置した際の温度を測定した(パルス回数 300 ではグロスタイム 15 sec)。

### 2.3 Textural Profile Analysis (TPA)

TPA は、レオメータ(NRM-2010-CW, レオテック)を用いて、円板プランジャー(φ70 mm)で 1 mm/sec 定速の連続 2 回圧縮を行い、応力推移をデータロガー(NR-HA08, KEYENCE)にて記録した。TPA パラメータとして、硬さ [gf]および弾力性[%]を算出した<sup>3)</sup>

## 2.4 組織観察

PEF 処理を行っていないニジマス肉およびパルス回数 300 で PEF 処理したニジマス肉の普通筋をそれぞれ 4% パラホルムアルデヒドで固定し、エタノール系列で脱水した後、パラフィン包埋した。8 μm の切片を作製し、ヘマトキシリン・エオジン染色を行った

## 2.5 NaCl 浸透試験

ニジマス背側肉を円柱状(φ30 mm、高さ 20 mm)に切り出し、PEF 処理を行わない区(PEF(-)区)、およびパルス回数 300 で PEF 処理する区(PEF(+))区とした。それぞれを 10% NaCl 溶液に浸漬し、氷上で震盪した。浸漬開始前および浸漬開始後 30、60、90、120、180 min の試料の中心部を採取し、ナトリウムイオンメーター(Na-11, 堀場製作所)を用いて Na<sup>+</sup>濃度[mg/g tissue]を測定した。

## 3. 結果

### 3.1 PEF 処理パラメータの最適化

パルス強度 0.125~0.5 kV/mm でニジマス肉の PEF 処理を試行した結果、パルス強度 0.15 kV/mm 以上で閃光の発生が観察された。本研究の結果では、パルス強度 0.125 kV/mm で閃光が観察されなかったことから、以降の実験ではパルス強度 0.125 kV/mm で PEF 処理を行なった。異なるパルス強度・パルス回数で PEF 処理をしたニジマス肉の外観を Fig. 1 に示す。PEF 処理を行っていないニジマス肉(Fig. 1 左下)と比較して、種々の条件で PEF 処理を行なったニジマス肉の色調に顕著な変化は認められなかった。



Fig. 1 PEF 処理後のニジマス肉の外観

Fig. 2 に、パルス回数(0~300)と試料中心部の温度上昇の関係を示す。試料中心部の温度上昇は、印加したパルス回数に対して線形の関係にあった。

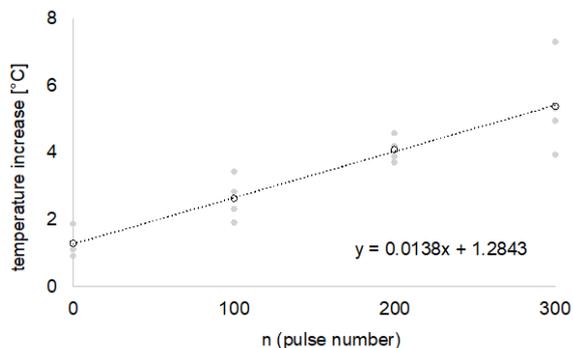


Fig. 2 パルス回数とニジマス肉の温度上昇の関係

### 3. 2 PEF 処理がテクスチャーに及ぼす影響

Fig. 3 に、ニジマス肉の PEF 処理におけるパルス回数と硬さ(A)および弾力性(B)を示す。パルス回数 100, 200, もしくは 300 で PEF 処理したニジマス肉では、硬さおよび弾力性いずれも、パルス処理を行っていないものと比較して統計的に有意な差は認められなかった。

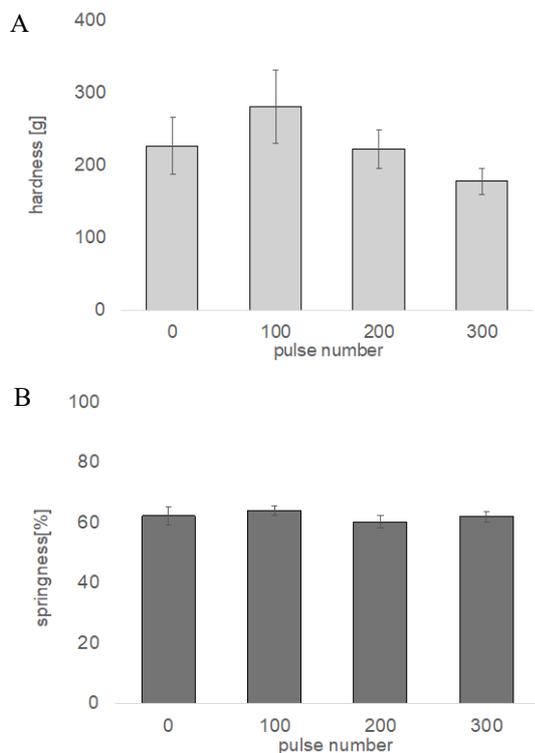


Fig. 3 PEF 処理がニジマス肉のテクスチャーに及ぼす影響 (A)硬さ, (B)弾力性

### 3. 3 PEF 処理が組織構造に及ぼす影響

Fig. 4 に、PEF 処理を行っていないニジマス肉(左), およびパルス回数 300 で PEF 処理したニジマス肉の組織観察像を示す。光学顕微鏡による観察では、顕著な組織構造の差は認められなかった。

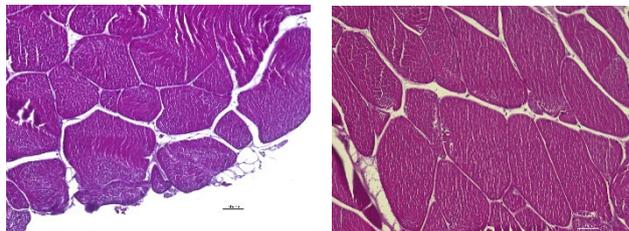


Fig. 4 PEF 処理がニジマス肉の組織構造に及ぼす影響 PEF 処理無し(左)および PEF 処理後(右)

### 3. 4 PEF 処理が NaCl の浸透に及ぼす影響

Fig. 5 に、ニジマス肉の NaCl 浸透試験の結果を示す。10% NaCl 溶液浸漬開始から 90 min 後までは、PEF(-) および PEF(+ )区いずれも中心部の Na<sup>+</sup>濃度推移は同様だった。浸漬開始後 120 min 以降では、PEF(+ )区で PEF(-)区よりも Na<sup>+</sup>濃度上昇が速かった。

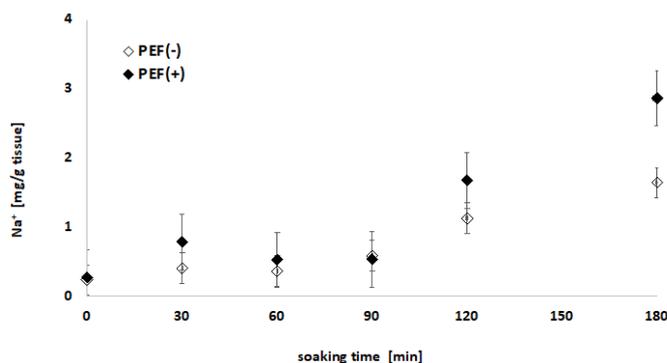


Fig. 5 PEF 処理がニジマス肉の NaCl 拡散に及ぼす影響

## 4. 考察

本研究では、生鮮魚肉の PEF 処理について、テクスチャー、組織構造、および食塩の浸透促進に着目した。まず、ニジマス肉の PEF 処理に適したパラメータを検討した。その結果、ニジマス肉の PEF 処理ではパルス強度 ~0.125 kV/mm が適当と示唆された。パルス強度 0.15 kV/mm 以上でのニジマス肉の PEF 処理では閃光

が観察され、これはニジマス肉中に元来含まれる電解質濃度に関係すると考えられる。また、パルス強度 0.125 kV/mm で処理した際に、パルス回数に依存した一次関数的なニジマス肉の温度上昇があった (Fig. 2)。この結果から、印加エネルギーに対する温度上昇が一次関数によって記述できることが確認された。PEF 処理による温度上昇は抵抗によるものと考えられる (ただし、電極と試料の境界面では熱伝達がある)。魚肉の温度上昇を最小限にするには、電極を冷却しながら PEF 処理を行う必要がある。

本研究で設定した PEF パラメータ下においては、パルス回数 100~300 で PEF 処理したニジマス肉と PEF 処理を行っていないものを比較した結果、PEF 処理による顕著なテクスチャーの変化は認められなかった (Fig. 3)。魚肉では、加熱によってテクスチャーが変化することが報告されている<sup>4)</sup>。本研究では、パルス回数 300 での PEF 処理後のニジマス肉中心部の温度上昇が平均~6°Cだったことから、温度上昇によるテクスチャーの変化は無かったといえる。また、PEF 処理によるテクスチャーの変化も極めて小さかった。また、組織構造についても、パルス回数 300 での PEF 処理による顕著な変化は認められなかった (Fig. 4)。したがって、本研究で設定した PEF パラメータにおいて、パルス回数 100~300 での PEF 処理がニジマス肉のテクスチャーおよび組織構造に及ぼす影響は極めて小さいといえる。ただし、パルス回数を大幅に増やした場合には、テクスチャーの軟化や組織構造の変化が観察される可能性も考えられる。また、PEF 処理による組織構造変化については、電子顕微鏡による高倍率での観察も必要である。

PEF 処理がニジマス肉の NaCl 浸透速度に及ぼす影響について検討した結果、PEF 処理による NaCl 浸透促進が認められた (Fig. 5)。PEF 処理によって細胞膜に不可逆的に微細孔が生じると考えられている。既に、牛肉でマリネ前の PEF 処理による物質移動の促進が報告されており、本研究の結果からニジマス肉においても同様に物質移動が促進されることが確認された。

以上のように本研究では、PEF 処理時のパラメータの最適化によって、生鮮魚肉のテクスチャーを損なうことなく、調味物質の拡散速度を上げられる可能性が示された。

## 5. 今後の課題

本研究では、小売店で購入したニジマス肉を用いた。魚肉の死後変化では、肉の軟化や自由水の増大などが進行する。これらの変化は、魚肉の導電率に影響を及ぼすと考えられ、魚肉の鮮度と PEF 処理による効果の関係についても検討する必要がある。

## 6. 文献

1. Gómez, Belen, et al. "Application of pulsed electric fields in meat and fish processing industries: An overview." *Food research international* 123 (2019): 95-105.
2. Zhang, Ying, et al. "Effects of pulsed electric field pretreatment on mass transfer and quality of beef during marination process." *Innovative Food Science & Emerging Technologies* 80 (2022): 103061.
3. Bourne, Malcolm. *Food texture and viscosity: concept and measurement*. Elsevier, 2002.
4. Sakuyama, Miyu, Yuri Kominami, and Hideki Ushio. "Peptidomic Analysis Reveals Temperature-Dependent Proteolysis in Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) Meat During Sous-Vide Cooking." *Proteomes* 12.4 (2024): 36.

# Effects of Pulsed Electric Field Pretreatment on Salt Diffusion and Textural Properties of Fish Meat

Yuri Kominami<sup>1</sup>, Aberham Hailu Feyissa<sup>2</sup>, Lucas Sales Queiroz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The University of Tokyo, <sup>2</sup>Technical University of Denmark

## Summary

Pulsed electric field (PEF) technology, a non-thermal processing method, is potentially applicable to raw fish products such as sushi and sashimi. In this study, we investigated the effects of PEF treatment on the texture, microscopic tissue structure, and salt diffusion rate of fish meat, with the aim of controlling and simplifying the seasoning process. Seawater-farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) was used as the test material.

To optimize PEF treatment conditions, rainbow trout meat was treated with bipolar pulses (pulse width: 10  $\mu$ s; frequency: 10 Hz; gross time: 2.5 s/50 pulses) at pulse strengths ranging from 0.125 to 0.5 kV/mm. Among these conditions, no visible sparking was observed at or below 0.125 kV/mm, suggesting that this pulse intensity is appropriate for treating rainbow trout meat. Accordingly, a pulse strength of 0.125 kV/mm was adopted for subsequent experiments.

When the number of pulses was varied from 0 to 300 at this fixed intensity, a linear, pulse-dependent increase in meat temperature was observed. However, texture analysis of samples treated with 0, 100, 200, and 300 pulses showed no significant differences. Similarly, histological examination revealed no obvious structural changes between untreated and 300-pulse-treated samples. These results indicate that, under the present conditions, PEF treatment has minimal impact on the texture and tissue integrity of rainbow trout meat. Nonetheless, higher pulse counts may result in texture softening or structural alterations.

Investigation of salt diffusion revealed that PEF treatment significantly enhanced NaCl penetration into the fish meat. This is presumably due to the formation of irreversible micropores in the cell membranes. Similar findings have been reported in beef, where PEF pretreatment before marination improved mass transfer. Our results confirm that PEF also facilitates substance diffusion in rainbow trout meat.

In conclusion, this study demonstrates that optimizing PEF parameters allows for enhanced diffusion of seasoning agents such as salt without compromising the texture of raw fish meat, suggesting its potential utility in the processing of high-quality, fresh seafood products.