

MRI による魚肉・畜肉への塩分浸透過程に関する研究

松川 真吾, 高橋 希元

東京海洋大学学術研究院食品生産科学部門

概要

目的) 魚肉・畜肉への食塩による前処理は、臭みを取り、身をしめ、さらに構成しているアクチオシンを溶出させて肉を柔らかくし、分解酵素受容性を高め、うまみを引き出す。しかし、過剰な添加は塩味が強くなりすぎて、呈味を悪化させる。そのため、この塩加減の調整は感と経験によるところが大きく、食品産業における品質管理を難しくしている。

本研究では、魚肉・畜肉への食塩の浸透を MRI を用いて可視化し、浸透過程を詳細に検討することを目的とする。¹H 測定では、スピン密度画像、 T_2 強調画像から総水分量の分布とタンパク質との相互作用の強い水(結合水)の分布を撮像する。これらの MRI 測定により、食塩の拡散・浸透とタンパク質との相互作用などの空間的な進行過程を明らかにする。さらに、脂成分や骨、スジなどを含む魚肉や畜肉での食塩の浸透を予測するシミュレーションプログラムを作成し、塩分濃度が低くなる部位の発生を予測する。

方法)

1) MRI 測定

0.3 テスラーのコンパクト MRI (MR Technology, Inc) に口径 8 mm の 1Hrf コイルを装着して測定した。測定スライス厚は 5 ~ 10 mm とし、測定パルスシーケンスにはマルチスライススピンエコー法を用いてエコー時間を 5, 10, 15 ms とした。¹H T_2 分布は画像の各ピクセルのエコー時間に対する減衰挙動を単一指数関数にフィッティングがして求めた。

2) 塩分含量と ¹H T_2 緩和時間との関係の把握

アジの切り身を一定濃度の食塩水に 24 時間後に MRI 測定により ¹H T_2 分布を測定し、均一部分の平均値より浸漬した食塩濃度と魚肉の ¹H T_2 緩和時間の関係を求めた。

3) 魚体を用いた塩分浸透過程の MRI による撮像

アジの試料としては内臓を取り出さない丸ごとのものと内臓を取り出したものを用いた。食塩の浸透は魚体に直接、食塩を擦り込む方法と 20 重量濃度%の食塩水に浸漬する方法で行った。

結果と考察)

図 1 に十分に長時間食塩水に浸漬した切り身の ¹H T_2 緩和時間と浸漬食塩濃度の関係を示した。¹H T_2 は 10 重量%まではあまり差がなく、それ以上、高濃度になると直線的に減少した。低濃度での ¹H T_2 から濃度の決定のためには、¹H T_1 緩和時間や水の拡散係数などの他の NMR パラメータ測定との併用が必要であると思われる。

図 2 に各前処理を行った魚体の食塩擦り込みと食塩水に浸漬した場合の各エコー時間での MRI 画像とそれらから算出した ¹H T_2 マップを示した。長い ¹H T_2 成分はタンパク質と相互作用を持っていない水(自由水)の信号であるが、食塩が浸透して魚肉タンパク質が溶出すると水と相互作用を持つために、 T_2 緩和時間は短くなっていく。それぞれの試料において、時間経過とともに魚肉内部の緩和時間が短くなっているのがわかる。また、内臓を除去した試料では食塩の浸透が速くなっている。食塩を擦り込んだ試料と食塩水に浸漬した試料のあだにはあまり差がみられなかった。

まとめ) 塩分の浸透による魚体内の $^1\text{H}T_2$ の空間分布な時間変化を示すことで前処理法などによる違いを議論することが出来た。しかし、定量的な塩分濃度へと変換することは出来なかった。 $^1\text{H}T_2$ や水の拡散係数などの他の NMR 測定可能パラメータとの併用が必要である。

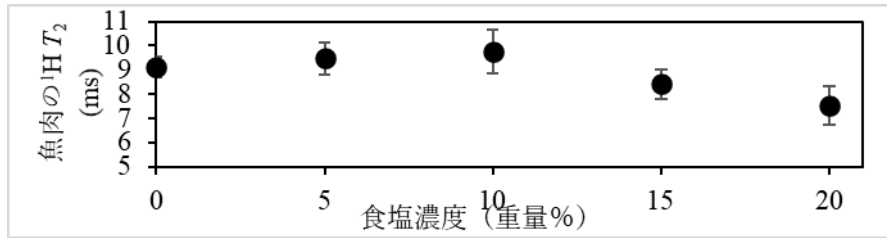


図 1 魚肉の $^1\text{H}T_2$ 緩和時間と浸漬食塩濃度との関係

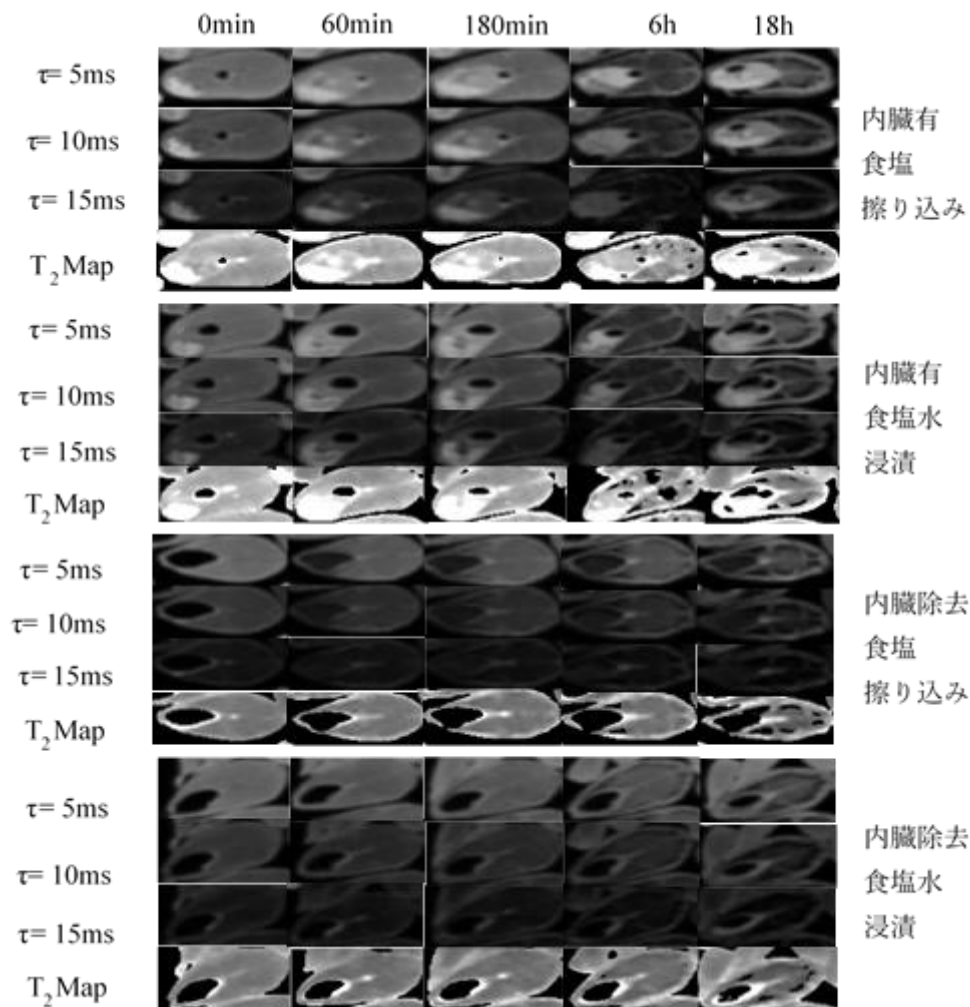


図 2 魚肉への食塩浸透過程の MRI。左が腹側である。

1. 研究目的

魚肉・畜肉への食塩による前処理は、臭みを取り、身をしめ、さらに構成しているアクチオシンを溶出させて肉を柔らかくし、分解酵素受容性を高め、うまみを引き出す。しかし、過剰な添加は塩味が強くなりすぎて、呈味を悪化させる。そのため、この塩加減の調整は感と経験によるところが大きく、食品産業における品質管理を難しくしている。例えば、サーモンフィレの製造では、塩水に浸漬後に真水で洗って塩分を調整する、などの方法がとられるが、洗いすぎはうまみ成分の流出にもつながり、これを防ぎながらフィレ内の塩分濃度を一定に管理するのは極めて難しい。また、生ハムの製造においては、塩分濃度のばらつきは細菌の増殖を誘発する食品衛生上の大きな問題であり、その管理は最重要課題のひとつである。

本研究では、魚肉・畜肉への食塩の浸透のコントロール手法の確立を念頭に、MRI を用いて魚肉・畜肉内での塩分濃度変化を可視化し、浸透過程を詳細に検討することにより、浸透のメカニズムを明らかにすることを目的とした。¹H 測定では、スピン密度画像、 T_2 強調画像から総水分量の分布とタンパク質との相互作用の強い水（結合水）の分布を撮像することができる。これらの MRI 測定により、食塩の拡散・浸透とタンパク質との相互作用などの空間的な進行過程を明らかにする。さらに、脂成分や骨、スジなどを含む魚肉や畜肉での食塩の浸透を予測するシミュレーションプログラムを作成し、塩分濃度が低くなる部位の発生を予測する。さらに、得られた研究成果をもとに、短時間でより均一な塩分分布をえる効果的な食塩による前処理方法を検討するための方針を示すことを目的とする。

2. 研究方法

2.1 食塩浸透過程のシミュレーション

食塩の浸透過程のシミュレーションは Mathematica10 (Illinois) によって作成したプログラムを用いて、魚体の断面を模した空洞ありの楕円に対して行った。初期条件では魚体内の食塩濃度は0とした。境界条件としては魚体の外側のみについて食塩濃度を一定とする条件と空洞内の食塩濃度を一定とする条件について行った。前者は魚体外側からのみの浸透を想定しており、後者は内臓を取り除いた腹腔からの食塩の浸透を想定している。さらに、一定時間、食塩を浸透させたのちに、外側の流水中での洗い

を想定して、外側の濃度を0とした場合と、食塩を洗い流して空気中に放置した場合の魚体内での食塩濃度の変化をシミュレーションした。

2.2 MRI 測定

0.3 テスラーのコンパクト MRI (MRTechnology.Inc) に口径 8 mm の¹Hrfコイルを装着して測定した。測定スライス厚は 5 ~ 10 mm とし、測定パルスシーケンスにはマルチスライススピネコー法を用いてエコー時間を 5, 10, 15 ms とした。¹HT₂ 分布は画像の各ピクセルのエコー時間に対する減衰挙動を単一指数関数にフィッティングして求めた。

2.3 塩分含量と¹HT₂緩和時間との関係の把握

アジの切り身を一定濃度の食塩水に 24 時間後に MRI 測定により¹HT₂ 分布を測定し、均一部分の平均値より浸漬した食塩濃度と魚肉の¹HT₂緩和時間の関係を求めた。

2.4 魚体を用いた塩分浸透過程の MRI による撮像

アジの試料としては内臓を取り出さない丸ごとのものと内臓を取り出したものを用いた。食塩の浸透は魚体に直接、食塩を擦り込む方法と 20 重量濃度%の食塩水に浸漬する方法で行った。

3. 研究結果

3.1 食塩浸透シミュレーション

MRI による食塩の浸透挙動を予測するために、空洞のある楕円体への食塩浸透過程のシミュレーションを行った。**Fig. 1** は魚体に食塩の浸透過程のシミュレーション結果である。浸透開始からの相対時間 τ は任意の時間単位である。上段(A)が食塩を魚体の外側からのみ浸透させた場合の結果であり、下段(B)が外側と腹腔の両方から浸透させた場合の結果である。背側のライン a) と中央部のライン b) におけるプロファイルをそれぞれの図の下に示してある。**Fig. 1(A)** では、外側から食塩濃度が上昇して、やがて魚体内の濃度が一定になっていくのがわかる。**Fig. 1(B)** では、早期にハラモ部位(腹腔に接した部分)の食塩濃度が高くなり、徐々に内部の濃度が上がっている。背側のライン a) では **Fig. 1(A)** のライン a) と顕著な差が見られないが、中央部のライン b) では腹腔からの食塩の浸透の影響のために、早期に魚体内の食塩濃度が上昇している。特に腹腔からの食塩の浸透が中心部の濃度を上げるために均

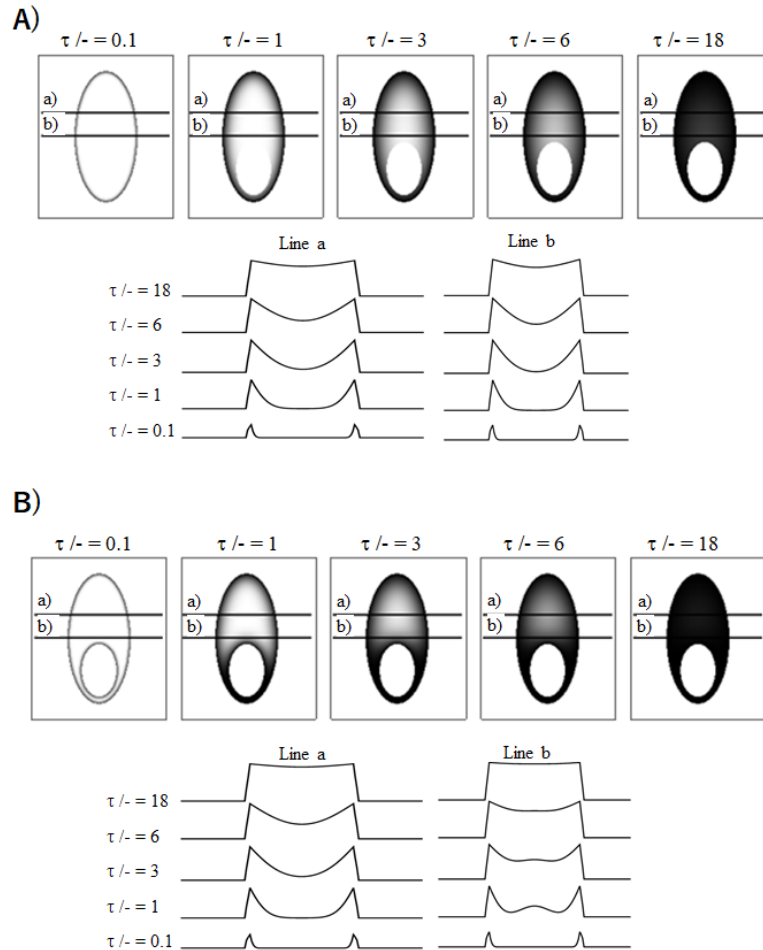


Fig. 1. Simulation result of salt distribution in fish body
 A) Salt permeation from body surface B) Salt permeation from body surface and abdominal cavity. Cross sectional profiles at lines in the distribution are indicated below.

一な食塩濃度の上昇に寄与しているのがわかる。食塩による魚肉の処理においてよく用いられる塩抜きとあんじょう（空气中で放置して魚体内の塩分濃度を均一にする過程）による魚体内での食塩濃度の変化のシミュレーションを行った。Fig. 2はFig. 1(B)と同様の食塩浸透を $\tau = 3$ まで行った後に、外部からの浸透を止めて、外側の食塩濃度を0とした場合（真水での塩抜きに相当）と魚体内に食塩をとどめる場合（空气中でのあんじょうに相当）を行った場合の食塩の浸透過程のシミュレーション結果である。塩抜き過程ではハラモ部位の食塩が急速に減少する一方で、背側及び中央部の a)と b)ラインでは、外側の濃度が低下後に内側の濃度が徐々に低下しているのがわかる。空气中でのあんじょうでは、外側の濃度が低下するとともに、内部の濃度が上昇し、全体が均一な濃度分布へと近づいている。

但し、はらも部位の食塩濃度はほとんど変化せずに高濃度のままである。

3. 2 食塩浸透に伴う MRI 画像の変化

食塩の浸透過程の MRI による観測は、魚体を20%の食塩水に浸漬する方法と食塩を直接擦り込む方法を行ったが、両者に差はなかったため、以下、食塩を直接擦り込む方法で得られた結果を示す。Fig. 3には、内臓付きの魚体に表面から食塩を擦り込んだ場合 (Fig. 3(A))と内臓を取り除いて魚体表面と腹腔から食塩を擦り込んだ場合 (Fig. 3(B))の各エコー時間での MRI 画像とそれらから算出した $^1\text{H}\text{T}_2$ マップを示した。長い $^1\text{H}\text{T}_2$ 成分はタンパク質と相互作用を持っていない水（自由水）の信号であるが、食塩が浸透して魚肉タンパク質が溶出すると水と相互作用

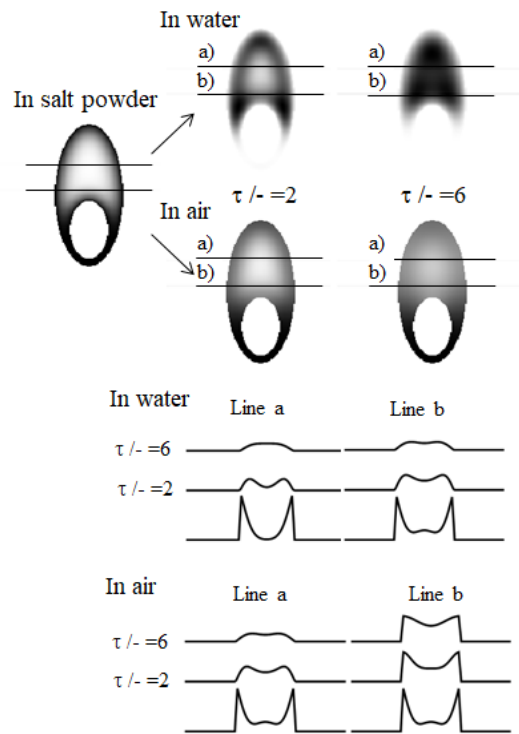


Fig. 2. Simulation result of salt distribution in fish body after salt permeation from body surface and abdominal cavity for $\tau = 3$ (same with the distribution) in water and in air. Cross sectional profiles at lines in the distribution are indicated below.

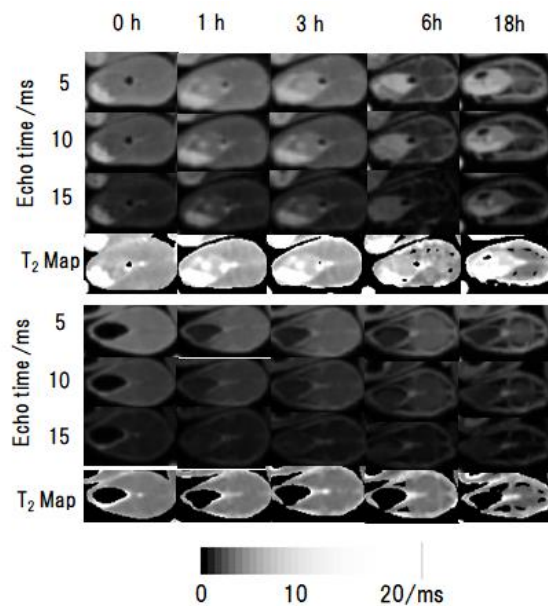


Fig. 3. T2 enhanced MRI with different echo time and T2 map. Salt was rubbed from (A) body surface and (B) body surface and abdominal cavity.

を持つために、 ^1H T_2 緩和時間は短くなっていく。それぞれの試料において、時間経過とともに魚肉内部の緩和時間が短くなっているのがわかる。また、内臓を除去した試料では短い ^1H T_2 の領域が早く魚体内部まで広がっており、食塩の浸透が速くなっていることを示している。

3.3 魚肉内の ^1H T_2 緩和時間と食塩濃度の関係と魚肉内の食塩濃度分布

MRIによって得られる ^1H T_2 マップを食塩濃度分布に変換するために、0, 5, 10, 15, 20%の濃度の食塩水に十分に長い時間魚肉を浸漬した後にエコー時間を変えてMRI画像を取得し、そこから ^1H T_2 緩和時間を算出した。Fig. 4にその ^1H T_2 緩和時間と浸漬食塩濃度の関係を示した。NaCl水溶液のNMR緩和時間の濃度依存性についての報告はいくつかあるが⁽¹⁾、Fig. 4の結果はそれらの結果とは傾向が異なっている。魚肉にはタンパク質、血液、塩類などがあり、 ^1H T_2 緩和時間に影響すると考えられる。ここでは食塩への浸漬に伴い変化した食塩濃度による ^1H T_2 変化を考慮する。 ^1H T_2 は10重量%まではあまり差がなく、それ以上の高濃度になると直線的に減少した。また、繰り返し測定によるばらつきが大きいかった。この関係を滑らかな単調減数関数として4次式を用いてデータにフィッティングを行い、さらに実際にMRIによって得られた ^1H T_2 マップ中の魚肉中の最小値6 msと最大値9.5 msを食塩濃度0%と20%に対応するように補正して ^1H T_2 マップを食塩濃度の分布へと変換した。Fig. 5には、このようにして得られた食塩濃度分布を示した。信号強度が低いために十分な精度が得られていない部分は黒としてある。内臓が残っている試料(A)では腹腔の水が白く見えている。また、体表近くの脂は緩和時間が長いために白くなっている。(A)、(B)の両方の試料において、時間経過とともに食塩が魚体の内部に向かって浸透しているのがわかるが、内臓を除去して食塩を擦り込んでいる(B)の方が食塩の浸透が早く、また、均一になっている。これはFig. 1に見られたシミュレーション結果と傾向が同じである。腹腔近くと背側での食塩濃度の変化は、(A)の試料ではあまり差が無いが、(B)の試料では腹腔からの食塩の浸透による影響が大きいため、まず、腹腔近くの食塩濃度が増加してその後、背側の濃度が上昇していき、この時、背側の外側近くと内部での濃度差が少なくなっているのがわかる。

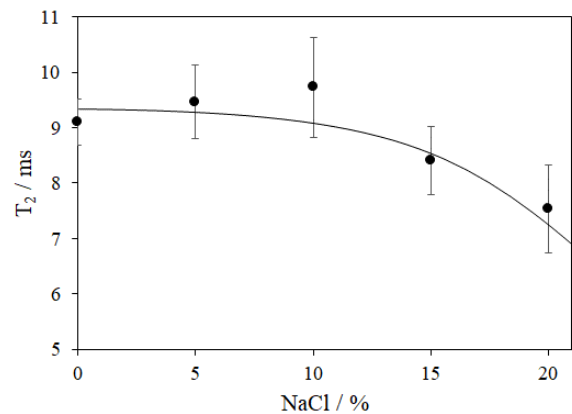


Fig. 4. Plot of T_2 against NaCl concentration. The solid line was obtained by fitting the data point.

4. 考察

食塩浸透のシミュレーションでは、複雑な構造を持つ魚体への浸透過程を計算することが出来たが、実際の魚体への食塩の浸透過程は不規則な濃度変化も多く、食塩の擦り込み方法や表面の皮や脂の層、骨、内臓膜などが影響していると考えられる。しかし、内臓を除去した場合と残したまま外側から食塩を擦り込んだ場合では大きな差がみられ、シミュレーション結果と一致した。また、 ^1H T_2 緩和時間と食塩濃度の関係は食塩水溶液において報告されている濃度依存性とは大きく異なり、魚肉タンパクなどの存在の影響を大きく受けていると考えられる。特に、低い食塩濃度領域での ^1H T_2 の濃度依存性が小さく、 ^1H T_2 マップを食塩濃度分布へと換算した場合の誤差が大きいことが懸念される。 ^1H T_1 緩和時間も併用して食塩濃度への換算を行うことで食塩濃度の換算精度が向上されることが期待される。

5. まとめ

塩分の浸透による魚体内の ^1H T_2 の空間分布の時間変化を測定し、それを食塩濃度に変換することで前処理法などによる食塩浸透挙動の違いを議論することが出来た。しかし、定量的な塩分濃度への変換の精度を高くすることが出来なかった。 ^1H T_2 以外に、 ^1H T_1 や水の拡散係数などの他のNMR測定可能パラメータとの併用が必要であると考えられる。

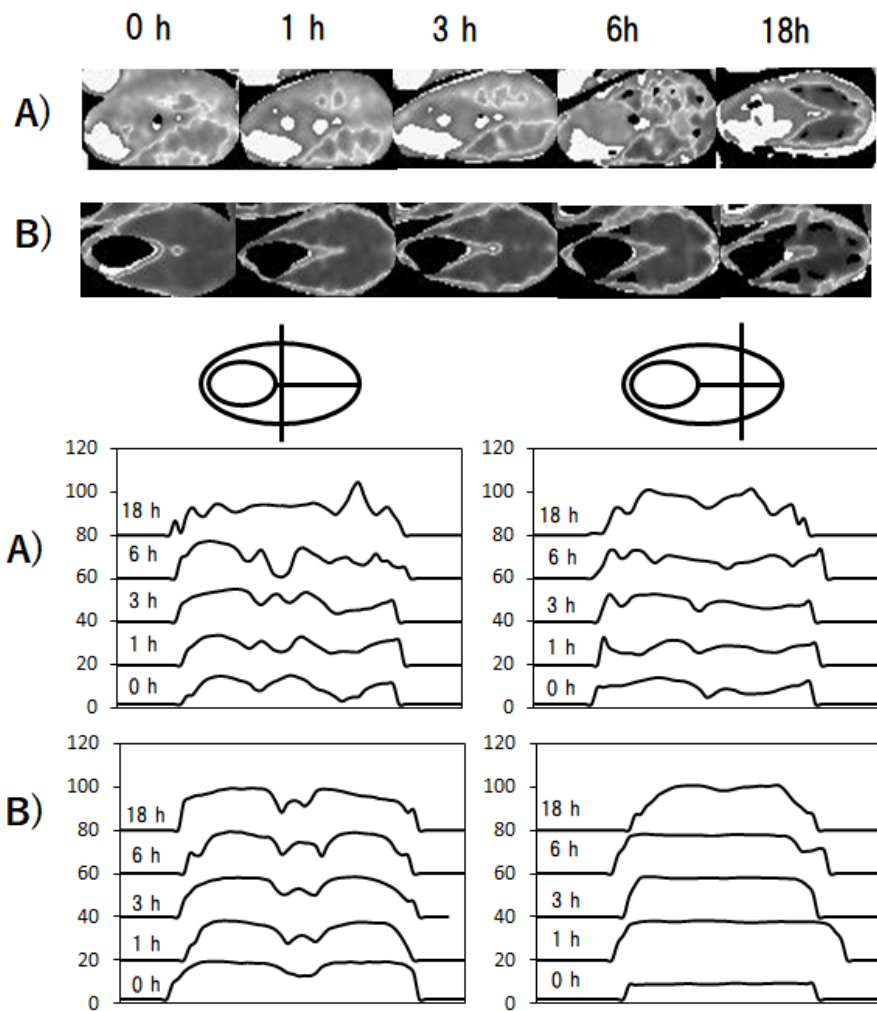


Fig. 5. NaCl concentration map. Salt was rubbed from (A) body surface and (B) body surface and abdominal cavity. Cross sectional profiles at red lines are indicated below.

6. 文献

- 1) R Damadian, K Zaner, D Hor, T DiMaio, L Minkoff, M Goldsmith "Nuclear Magnetic Resonance as a new tool

in cancer research: Human tumors by NMR" Annals New York Academy of Sciences, 222, 1048-1076(1973).

Study on Permeating Process of Salt into Fish Meat and Animal Meat by MRI

Shingo Matsukawa, Kigen Takahashi

Tokyo University of Marine Science and Technology

Summary

An evaluation method on permeation process of salt into fish meat and animal meat by MRI measurement was studied. MRI measurements were carried out for the fish body rubbed with salt powder with various echo times to calculate $^1\text{H } T_2$ NMR relaxation time to construct $^1\text{H } T_2$ map of the fish body. A relationship between $^1\text{H } T_2$ and salt concentration in the fish body were obtained by the measurements on the fish meat with various salt concentrations, which was used to convert the $^1\text{H } T_2$ map to the salt distribution in the fish body. The results showed that the salt concentration of the whole fish body became more uniform earlier by the method of taking out the internal organs and rubbing the salt into the fish body from the abdominal cavity than the rubbing only from the outside of body. Simulations of the salt permeation into the fish body were carried out to give supporting data for the salt distribution obtained by MRI method..