

魚類の「鮮度（K 値）」の数理的予測モデルの開発に成功

～魚類の商品価値向上・寿命延長・フードロス低減・輸出促進への貢献に期待～

ポイント

- ・ 鮮度指標 K 値を ATP 関連化合物の分解挙動に基づき推定する数理的予測モデルを開発。
- ・ 本 K 値予測モデルの妥当性と汎用性をマアジ・マサバ（文献値）・ホッケ（実測値）で実証。
- ・ 本モデルは K 値のみならず旨味成分（IMP）量の時間変化も良好に再現・予測することが可能。

概要

北海道大学大学院工学研究院の坪内直人准教授と篠原祐治博士研究員の研究グループは、致死後の魚類に係るアデノシン三リン酸（ATP）関連化合物の分解挙動に基づき、（ATP+アデノシン二リン酸+アデノシン一リン酸）⇒イノシン酸（IMP）⇒（イノシン+ヒポキサンチン）の一次不可逆逐次反応を仮定し、速度定数に温度依存性を有する鮮度 K 値の数理的予測モデルを開発しました。また、北海道立工業技術センター（函館地域産業振興財団）の吉岡武也専門研究員と共同で、この K 値予測モデルの妥当性と汎用性をマアジ・マサバ（文献値）及びホッケ（実測値）で実証しました。なお、本モデルは旨味成分である IMP の濃度の時間変化も良好に再現・予測することができます。

これまで、液体クロマトグラフ法・光学法・電気泳動法・経験的推算法・デバイス法などの鮮度評価技術が検討されており、その中でも液体クロマトグラフ法は日本農林規格（JAS）による K 値試験法の基本となるものです。しかし、魚類の肉片をサンプリングし分析するため時間がかかり、また、サンプリング時に魚体を傷つけてしまいます。光学法は蛍光分析を使用する方法で、光学系の調整に時間を要します。そのため、鮮度を非接触で評価でき、さらに、流通経路において鮮度情報をリアルタイムで提供できる技術の開発が強く望まれていました。

開発した数理的予測モデルは、複数の魚種に対して高い精度で適用できることが実証されたので、今後は鮮度管理システムやセンサーデバイス等の理論的基盤となる技術に繋がります。

なお、本研究の成果は、2026 年 1 月 20 日（火）に、Journal of Food Engineering 誌にオンライン掲載されました。



魚類の鮮度と食べ頃の可視化ソフト「MIRASAL®」

【背景】

よく知られているように、魚類の鮮度は致死後ただちに低下し始めますが、鮮度劣化の時間的変化が十分に理解されていないため、流通の各段階において適切な判断ができておりません。そのため例えば、生産者に近い現場では今の状態で値決めする、小売水産センターでは取り敢えず早く出荷する、鮮魚店・スーパー・百貨店・回転寿司などではロスを恐れて少なめに発注する・早期に値引き販売すること等が常態化しています。従って、高品位な鮮魚を安定的に提供できる鮮度管理技術の導入及び高度化は、水産分野における重要な課題であります。特に、輸出や長距離流通の増加に伴い、消費者や取引業者が求める「客観的で再現性のある鮮度評価技術」の開発が急務となっています。

これまでも、液体クロマトグラフ法・光学法・電気泳動法・経験的推算法・デバイス法といった鮮度評価技術が検討されており、その中でも液体クロマトグラフ法は科学的指標として知名度の高いK値の試験方法の基本となるもので、令和4年に日本農林規格(JAS)に制定されました。しかし、この方法は、魚類の任意部位を採取して肉片を分析するため1検体あたりの評価に数時間を要し、また、肉採取時に魚体を大きく傷つけてしまいます。光学法は蛍光分析を用いる方法で、光学系の調整に時間を要します。加えて、いずれの手法も、流通過程における鮮度の劣化や保持の程度をリアルタイムで把握できません。そのため、鮮度を非接触で評価でき、さらに、流通経路において鮮度情報をリアルタイムで提供できる技術の開発が強く望まれていました。

【研究手法】

上述したように、K値は鮮度を表す科学的指標として知名度が高く、これは約65年前に北海道大学水産学部で開発された致死後の魚体内で進むアデノシン三リン酸(ATP)関連化合物の分解に着目した客観的鮮度指標です。魚類は致死後、筋肉中のATP(エネルギー源)が時間の増加に伴い、アデノシン二リン酸(ADP)、アデノシン一リン酸(AMP)、旨味成分であるイノシン酸(IMP)を経て劣化物質のイノシン(HxR)とヒポキサンチン(Hx)に変化しますが(図1)、K値は下式より算出されます。

$$K \text{ 値} (\%) = ((HxR \text{ 量} + Hx \text{ 量}) / (ATP \text{ 量} + ADP \text{ 量} + AMP \text{ 量} + IMP \text{ 量} + HxR \text{ 量} + Hx \text{ 量})) \times 100$$

本研究チームは、これまでATP、ADP、AMP、IMP、HxR、Hxの6成分を五つの速度定数を用いる一次不可逆逐次反応として記述して(図2上)、計算で文献値を再現できるのかの検討に取り組み、その結果、図1のように高い計算精度は得られましたが、本法では厳密解の取得が難しく、また、パラメータを決定するには総当たりで値を代入するしか方法が無く、大きな欠点が存在しました。

そこで本研究では、上記したような問題を改善するためランピングアナリシス技術を適用しました。具体的には、ATP+ADP+AMPを1成分、HxR+Hxを1成分として扱い、 $(ATP + ADP + AMP) \Rightarrow IMP \Rightarrow (HxR + Hx)$ の一次不可逆逐次反応を仮定して、速度定数に温度依存性を持たせた鮮度K値の数理的予測モデルを開発しました。各成分濃度の変化は図2下のような式で表されます。K₁とK₂は温度依存性を持つ速度定数で、この2変数のみ求めれば良いことになり、Arrhenius式で解を得ることができず。

【研究成果】

本研究では、最初にマサバ(*Scomber japonicus*)を対象とした三つの論文のデータを使用して速度定数を求め、次いで得られたK₁とK₂を代入したK値理論式を用いて文献K値との比較を行いました。その結果、非常に興味深いことに貯蔵条件や処理方法に関わらず、いずれの場合も高い予測精度(R² > 0.98)が確認され、良好な相関性が得られました。さらに、同一の速度定数を用いてマアジ(*Trachurus japonicus*)への適用を検討したところ、文献K値と推定K値の間に良好な一致(R² > 0.99)が見られ、

本数理的予測モデルが多くの魚種に対して汎用的に使用できる可能性が強く示唆されました。

そこで次に、本予測モデルがホッケ (*Pleurogrammus azonus*) にも適用できるかを検討しました。ただし、ここでは ATP や IMP 等の各種成分濃度を JAS 法で実測した上で K 値を求め、推定 K 値との比較を行いました。その結果、実測値と推定値は非常に良く一致し ($R^2 > 0.98$)、全測定点が $\pm 30\%$ 内の妥当な誤差範囲に収まることが明らかとなりました (図 3 左)。また、本モデルにより、K 値のみならず代謝物単位での濃度推移も良好に説明され、IMP (旨味成分) の時間変化も良く再現・予測することが可能でありました (図 3 右)。なお、本論文では、K 値予測モデルのパラメータ (K_1 と K_2) 導出法や K 値の理論計算法を詳細に議論するとともに、本手法と競合する技術についても解説しました。

【今後への期待】

開発した数理的 K 値予測モデルは、複数の魚種に対し高い精度で適用できることが実証されたので、今後は鮮度管理システムやセンサーデバイス等の理論的基盤となる技術に展開します。これは、魚類の商品価値向上・寿命延長・フードロス低減・輸出促進に大きく貢献できると期待されます。

【謝辞】

本研究の一部は、北海道大学ロバスト農林水産工学国際連携研究教育拠点構想コンソーシアム形成型ロバスト農林水産工学研究プログラムの支援を受けて実施されました。関係各位に感謝申し上げます。

論文情報

論文名	Predictive model for estimating fish freshness based on adenosine triphosphate degradation in marine fish: Application to Atka mackerel (<i>Pleurogrammus azonus</i>) (海水魚中のアデノシン三リン酸の分解挙動に基づく鮮度予測モデルの構築：ホッケへの適用)
著者名	篠原祐治 ¹ 、吉岡武也 ² 、坪内直人 ^{1,*} (¹ 北海道大学大学院工学研究院、 ² 北海道立工業技術センター、*責任著者)
雑誌名	Journal of Food Engineering (食品生産に関連する工学、科学、技術を扱う国際的専門誌)
DOI	10.1016/j.jfoodeng.2026.112987
公表日	2026年1月20日(火)(オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院工学研究院 准教授 坪内直人 (つぼうちなおと)

T E L 011-706-6850 F A X 011-726-0731 メール tsubon@eng.hokudai.ac.jp

U R L <https://chemeng-hokudai.jp/>

北海道立工業技術センター (函館地域産業振興財団) 専門研究員 吉岡武也 (よしおかたけや)

T E L 0138-34-2600 F A X 0138-34-2602 メール yoshioka@techakodate.or.jp

U R L <https://www.techakodate.or.jp/center/outline/engineer/yoshioka.html>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北8条西5丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

北海道立工業技術センター (函館地域産業振興財団) 総務企画部総務課 (〒041-0801 函館市桔梗町379番地)

T E L 0138-34-2600 F A X 0138-34-2601 メール info@techakodate.or.jp

【参考図】

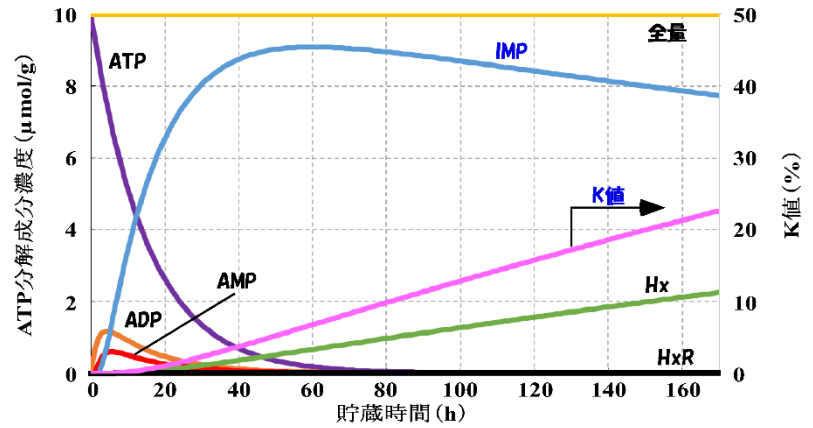
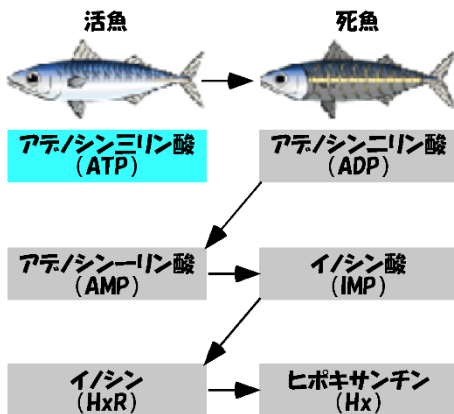
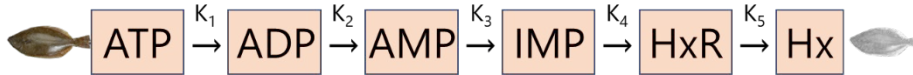


図1. ATP 関連化合物の分解過程（左）及びヒラメを 0°C で貯蔵したときの K 値と ATP 分解成分濃度の時間変化（右）

○本研究開始時の計算方法



各速度定数を貯蔵温度 (t) の関数で数式化することで、貯蔵温度が変化しても ATP 分解化合物の各濃度を求めることが可能（特許取得済み）

$$K_1 = 0.0018 \times t + 0.0647$$

$$K_2 = -0.0192 \times t^2 + 0.1788 \times t + 0.4279$$

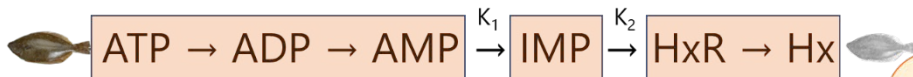
$$K_3 = -0.0123 \times t^2 + 0.0643 \times t + 0.8286, K_4 = 0.0001 \times t^2 - 0.0002 \times t + 0.0017$$

$$K_5 = 0.002 \times t + 1.2874$$

パラメータの決定が非常に難しいんだ

○本研究で開発した計算方法

ランピングアナリシス



- ・ ATP+ADP+AMPを1成分、HxR+Hxを1成分として表現（特許取得済み）
- ・ 3成分の逐次分解反応として扱うことにより、積分計算式の直接利用が可能
- ・ K_1 及び K_2 の算出が容易
- ・ 従来の貯蔵温度変化に伴う鮮度予測も可能

パラメータの算出も鮮度評価も簡単だよ

図2. 本研究グループが提案する一次不可逆逐次反応を仮定した K 値の数理的予測モデル（下）

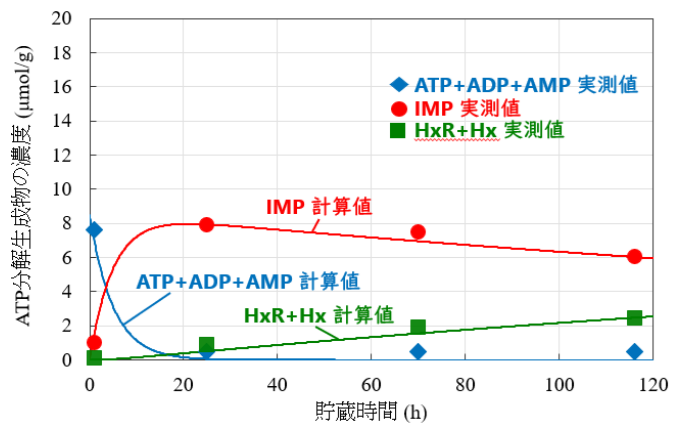
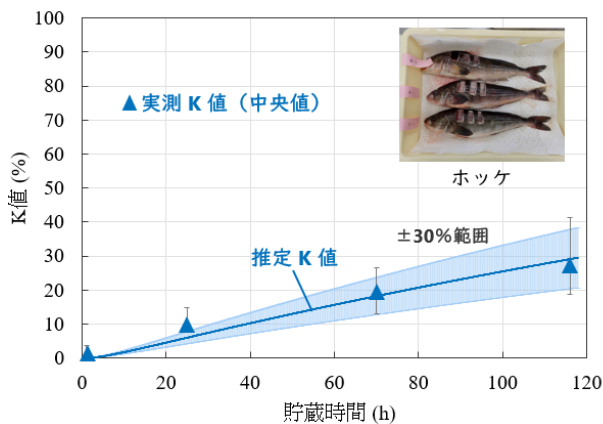


図3. ホッケを 0°C で貯蔵したときの K 値（左）と ATP 分解成分濃度（右）の時間変化の実測値と計算値の比較