

鮮度の数値化 ~酸化に伴う吸光度変化測定装置の開発~

奈良女子大学附属中等教育学校

熊谷 充弘

研究背景

本研究を始めるきっかけとなったのは、「眠気の数値化」の研究である。その研究では、眠気を血中酸素濃度などの測定によって監視し、制御したいと考えたが、ノイズ処理等の問題により、中断することとなった。この研究で学んだ、「2種類の波長の吸光度比を測定することで試料の酸化度合いを測定することができる技術」を何か他の分野に応用できないかを模索した。その結果、酸化と相関があると考えられる「食料品の鮮度」の数値化ができるのではないかと考え、本研究を開始した。

研究目標

食品鮮度についての調査を進める中で、「食品廃棄」と「食中毒」の問題を知った。この解決を目指し、自作する鮮度の数値化のための装置に3つの目標を立てた。

- 酸化度合いの数値化

鮮度の指標の1つである酸化度合いの数値化を目標とした。

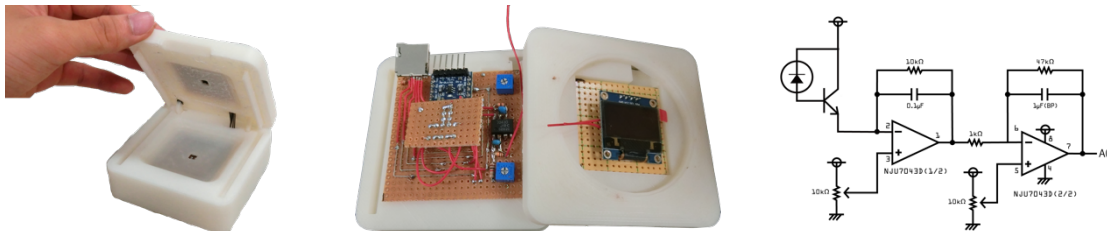
- 小型かつ安価な装置

食品廃棄の問題や食中毒の問題解決のためには、各家庭に1台の測定装置が設置される必要があるため、小型かつ安価な装置を目指した。

- 使いやすい装置

想定される使用者は専門知識を持たない大人や子供であるため、複雑な操作や「遠心分離」などの手順を省いても、固体試料での測定が可能である装置を目指した。

自作した鮮度測定装置「FRAN」(FReshness ANalyzer)



最終的な鮮度測定には至らなかったものの、試料の酸化度合いの測定ができる装置(FRANと命名)の開発ができた。FRANの特徴としては、小型かつ、オペアンプを用いた調節可能な増幅回路によって固体試料の測定ができる点である。また、操作も試料を置くだけであり、製作費用も2500円と安価である。(ケース、SDカード、人件費を除く)

測定方法

はじめにマグロの鮮度低下による色の変化のメカニズムを紹介する。

● マグロの鮮度低下による色の変化のメカニズム

マグロの赤身の中には赤色をした「ミオグロビン」(以下「Mb」)が存在する。Mb は還元された状態で暗赤色の deoxyMb(または「reducedMb」)が酸化するにつれて鮮紅色の oxyMb、暗褐色の metMb へと変わる。私たちはこの色の変化を感覚的に評価し、鮮度を評価している。

● 測定原理

前述したメカニズムより、全 Mb における metMb の割合(以下「メト化率」)を測定すれば鮮度が数値化できるのではないかと考えた。

文献調査によって得られた3種類の Mb の吸光スペクトル(図1)より、527nm では3種類の Mb の吸光度が交差し(濃度変化によってのみ吸光度が変化)、572nm では metMb だけが低い吸光度を示す(濃度変化とメト化率の変化によって吸光度が変化)ことがわかった。

すでに吸光度比を用いたメト化率の算出方法が確立されているため、本研究でもその方法を用いてメト化率を算出した。

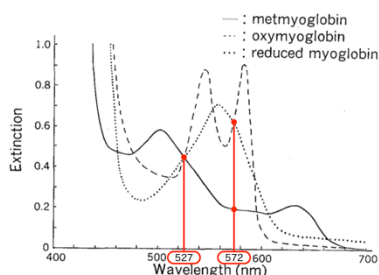


図1 Mb の吸光スペクトル

$$A_{\lambda} = \log_{10} \left(\frac{E_0}{E} \right) = \varepsilon \cdot c \cdot d$$

図2 ランバート・ベルの法則

E_0 : 入射光量 E : 透過光量 c : モル濃度 [mol/L]
 ε : モル吸光係数 [L/(mol·cm)] d : 試料の厚み [cm]

● 吸光度の測定方法

吸光度は上に示した「ランバート・ベルの法則」(図2)より、入射光と透過光の測定によって算出することができる。今回は、LED とフォトトランジスタとの間に試料がない時の光量を入射光とし、間に試料を入れた時の光量を透過光として増幅回路で増幅した後吸光度を算出し、メト化率を算出した。

検証実験

精度検証のために自作装置と分光光度計との測定値比較を3種類行なった。

● 検証1: 濃度変化による吸光度変化を捉えられるか

metMb 溶液を調製し、溶媒である生理食塩水を一定量加えながら溶液を希釈し、吸光度を測定した。結果のグラフ(図3、4)を見ると、吸光度の絶対値は異なるものの、分光光度計とグラフの変化の仕方が同じであることがわかったため、吸光度の変化が同じように測定できていることがわかった。

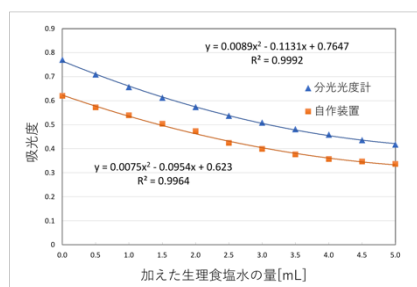


図3 527nm での変化

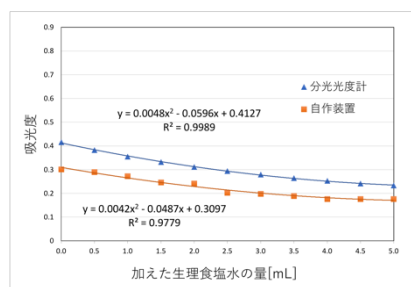


図4 572nm での変化

● 検証2：酸化による吸光度変化を捉えられるか

metMb 溶液に還元剤として $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ を添加し、deoxyMb 溶液を調製した。この溶液を 20 秒ずつ攪拌し、酸化させるごとに吸光度を測定した。結果のグラフ(図5、6)より、527 nm は変化せず、572 nm は分光光度計と同様の変化が確認された。

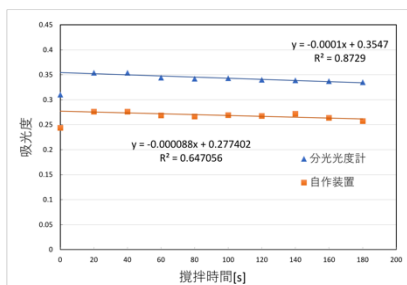


図5 527nm での変化

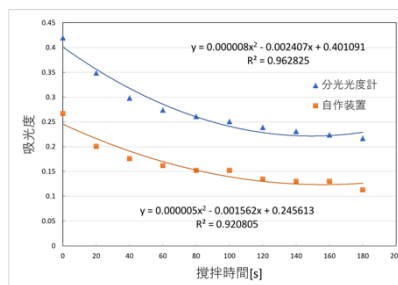


図6 572nm での変化

● 検証3：メト化率を正しく捉えられるのか

検証2での結果から「メト化率」の算出式を決定し、メト化率の変化を分光光度計と比較した。結果のグラフ(図7)を見ると、分光光度計と自作装置の変化がほぼ一致していることがわかった。一致した理由としてはメト化率の算出には吸光度比を用いているため、吸光度のズレの影響を受けることなく測定することができたからであると考えている。

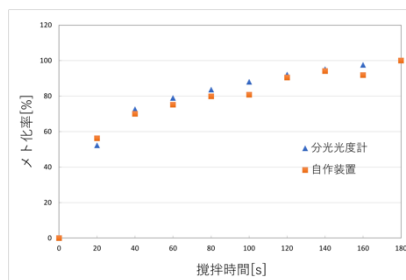


図7 検証実験②でのメト化率の変化

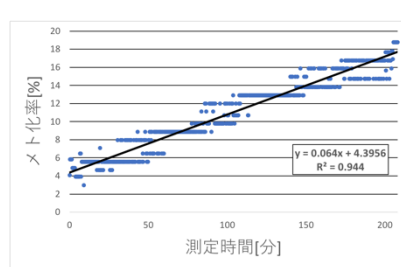


図8 キハダマグロのメト化率変化

実証実験

検証実験より自作装置の精度が確認されたため、固体試料であるキハダマグロを 1cm 角に切り、FRAN の中で 3 時間測定を行なった。結果のグラフ(図8)より時間経過とともにメト化率の上昇が確認されたため、FRAN において鮮度の数値化ができる可能性が見出された。

工夫点とオリジナリティ

FRAN を製作するにあたり、以下の工夫をした。

- **Arduino のメモリ不足問題の解決**
Arduino のメモリが不足したため、2 台の Arduino を I2C 通信させて解決した。
- **小型化を目的としたチップ型 LED、フォトトランジスタの使用**
装置の小型化を追求し、527nm と 572nm のチップ型 LED と 2 種類の波長に感度のピークをもつフォトトランジスタを探し、使用した。
- **ケースの設計及び印刷**
ケースを、3DCAD ソフトを用いて設計し、3D プリンターで印刷した。
- **吸光度比を用いたことによる高い精度の実現**
回折格子やレンズを用いていないため、吸光度自体の測定誤差が生じてしまったが、吸光度の比を使用することで高い精度でメト化率の測定ができた。

想定される応用方法

FRAN を各家庭に 1 台設置することで、廃棄期限を各自で評価できると考えている。これにより、通常の食品廃棄率の低減や、災害時など食料の確保が優先される事態においてのみ販売期限や賞味期限を超えて販売ができるようになるのではないかと考えている。

今後の課題と展望

- **廃棄期限の決定**
自作装置で測定したメト化率と腐敗度合いの指標である「K 値」を測定できる機器との比較を行い、廃棄期限を決定できるようにしたいと考えている。
- **使いやすさの向上**
反射光と吸光度の相関を調べ、反射光を用いたバーコードリーダー型の装置開発と、吸光度の増幅率の調整を自動化するプログラムも実装したいと考えている。

参考文献

- 帯広畜産大学学術研究報告,vol11(3)「ミオグロビンの自動酸化速度の測定法について」三浦弘之・泉本勝利・塩見雅志(1979 年)
- 日本水産学会誌,vol81(3)「魚類筋肉ミオグロビンのメト化率測定法の検討」井ノ原康太・尾上由季乃・木村郁夫(2015 年)
- 「電子回路入門-オペアンプ、コンパレーター」[https://www.renesas.com/ja-
jp/support/technical-resources/engineer-school/electronic-circuits-03-op-amps-comparator-circuit.html](https://www.renesas.com/ja-
jp/support/technical-resources/engineer-school/electronic-circuits-03-op-amps-comparator-circuit.html)