

近赤外カメラを用いた携帯型牛肉脂質評価端末の開発 - 機能モデルの開発と評価 -

Development of a Beef Fat Evaluation System using NIR Camera - Development and its Evaluation of a Function Model -

田中 等幸† 丸山 新‡ 山田 俊郎†
Tomoyuki TANAKA Shin MARUYAMA Toshio YAMADA
江崎 雅康* 棚橋 英樹†
Masayasu ESAKI Hideki TANAHASHI

1. はじめに

牛肉に対する消費者の価値観は、霜降りなどの見た目の良さから、安全で健康的、さらには美味さなど、より品質重視の傾向に変化しつつある。牛枝肉肉質評価は、牛枝肉取引規格で定められた項目（霜降りの程度、肉の色沢、肉の締まり及びきめ、脂肪の光沢と質）に従い、格付職員の目視によって評価されている。肉質評価は鮮やかな肉色と細かい霜降りが広範に分布しているような見た目の良い牛肉が最も高く評価されている一方で、近年、健康や食感に良い影響を与える脂質の一種であるオレイン酸が注目されている。オレイン酸など不飽和脂肪酸は、脂肪を構成する脂肪酸であり、牛肉のやわらかさや香り（牛肉香）に影響を及ぼしていることが知られている[1]。このような背景から、従来の肉質評価に加えて脂質を評価することで、他銘柄牛との差別化や高付加価値化などブランド化に向けた新たな試みが各地で行われている。

しかしながら、脂質は肉眼での判断が困難であるため、肉質評価の対象となっていない。また、現在実施されている脂質評価は、ガスクロマトグラフなど理化学的測定装置を用いた破壊試験である。破壊試験は分析精度が高い反面、取引される枝肉の商品価値を損失し、分析に長時間必要とする課題があった。そのため、枝肉の肉質評価時に評価値を得ることは困難である。そこで我々は、これらの課題を解決するため、近赤外分光法の技術を用いた画像計測に応用し、非破壊かつ定量的に脂質を評価する可視化技術を確認し、評価結果と食味官能評価との関連性について検討してきた[2-3]。

本稿では、小型の近赤外カメラを用いた機能モデル（以下、試作機）の開発と、試作機によって撮影された分光画像から生成される脂質画像における脂質推定精度の評価を行ったので報告する。

2. 近赤外カメラを用いた脂質割合評価法

2.1 光学的手法によるオレイン酸値の推定

脂肪は構成される脂肪酸の組成によって物性が変化し、舌触りに影響を及ぼす。脂肪酸のうちオレイン酸などの不飽和脂肪酸は融点が低いため、これらの占める割合が多い牛肉ほど口の中で溶けやすく、香りに影響を及ぼす

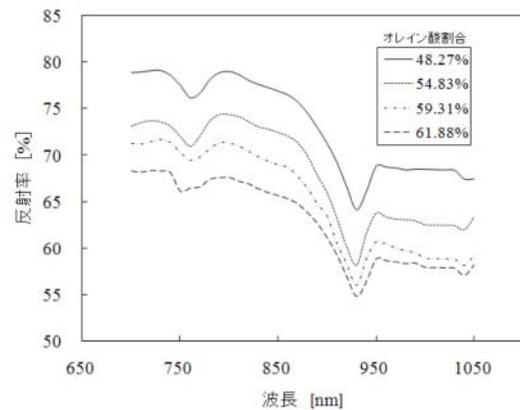


図1 牛脂の拡散反射スペクトル

ことが知られている。

近年、農産物の分野において、近赤外光が物質内部まで浸透する性質を利用し、物質による近赤外光の吸収の程度を測定し、成分値を算出する手法を用いた実用化例が存在する。図1は牛腎臓周囲脂肪（以下、牛脂）の拡散反射スペクトルである。横軸は波長、縦軸は拡散反射光の強度を示している。牛脂の近赤外帯域における拡散反射スペクトルの特徴として、760nm付近および、930nm付近にCH結合に由来する吸光帯があること、また、オレイン酸割合と拡散反射光の強度との間に負の相関を確認した。これらの牛脂の光学的特徴を利用して、成分値を推定するための定量的評価を行う。具体的には、統計的手法によって、目的変数をオレイン酸値C、従属変数を波長における拡散反射光の強度 R_{λ} とする脂質推定モデル（式1）を求め、拡散反射光の強度からオレイン酸値を推定する。

$$C = k_0 + k_1 R_{\lambda_1} + k_2 R_{\lambda_2} + k_3 R_{\lambda_3} + \dots \quad (1)$$

ここで、 k_0 および k_1, k_2, k_3, \dots は、それぞれの $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ における係数である。

2.2 オレイン酸推定画像の生成

霜降りは、脂肪の含量とその分布によって評価されている。そこで脂質評価においても同様に、測定ポイントの値評価ではなく、脂肪に含まれるオレイン酸含量を定量的かつ視覚的に表示し、平面的な分布を評価することが重要である。

分光画像を取得するためには、波長ごとに適正な露出値を設定する必要がある。これは、各波長における光源

† 岐阜県情報技術研究所

‡ 岐阜県畜産研究所

* (株)イーエスピー企画

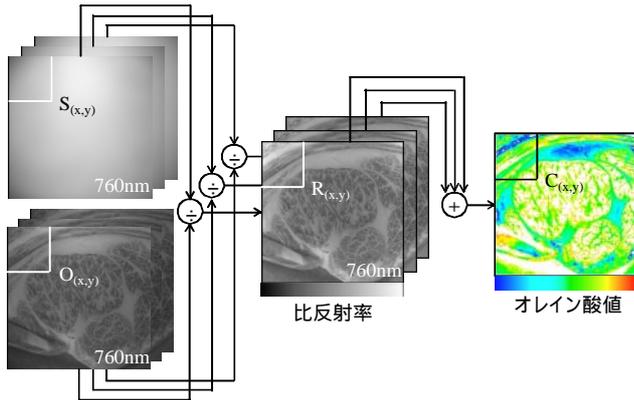


図2 分光画像からオレイン酸推定画像生成までのフロー

特性、カメラ感度特性および、フィルタの透過率が異なり、分光画像間の反射の強度を比較することが困難なためである。そこで、各波長において反射率が一定の標準反射板を利用して、分光画像間の輝度が同じになるように露出値を調整する。

図2は牛肉試料の分光画像からオレイン酸推定値を求め、可視化するまでのフローである。波長ごとに露出値の調整を行った後、標準反射板 $S_{\lambda(x,y)}$ および、牛肉試料 $O_{\lambda(x,y)}$ を撮影し、式(2)によって画素単位で標準反射に対する牛肉試料の拡散反射強度 $R_{\lambda(x,y)}$ （以下、比反射率）を求める。次に、予め実験的に求めておいた脂質推定モデルに反射強度 $R_{\lambda(x,y)}$ を代入することによって、オレイン酸推定値 $C_{(x,y)}$ を得る。

$$R_{\lambda(x,y)} = O_{\lambda(x,y)} / S_{\lambda(x,y)} \quad (2)$$

ここで、 $R_{\lambda(x,y)}$ は画像の座標 (x,y) における波長 λ の標準反射板に対する牛肉試料の反射率、 $O_{\lambda(x,y)}$ は画像座標 (x,y) における波長 λ の牛肉試料の輝度値、 $S_{\lambda(x,y)}$ は画像座標 (x,y) における波長 λ の標準反射板の輝度値を示している。オレイン酸推定値を256階調化し、オレイン酸値に応じてカラーマッピングすることで、牛肉試料に含まれるオレイン酸値を可視化する。

3. 携帯型牛肉脂質評価端末の開発

3.1 試作機の概要

岐阜県内において、1回の牛枝肉市場で上場される頭数は100~200頭である。現状、脂質は評価対象となっていないが、霜降りの程度などの性状については、数時間で全ての枝肉を数人の職員によって目視評価している。牛枝肉の脂質評価端末に対する要求事項は、以下があげられる。

- ・高い脂質推定精度
- ・軽量かつ携帯可能
- ・簡便な操作性

図3は開発した脂質評価端末の外観である。試作機はカメラモジュール、露出調節基板および、カメラ制御記録基板から構成される。複数の分光画像を取得するために、カメラモジュール、露出調節のセットが4組み連結されて

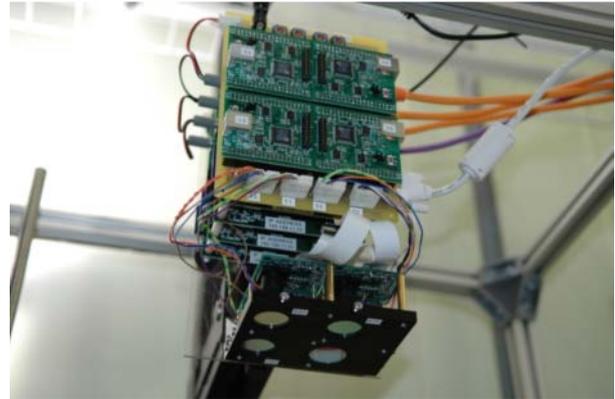


図3 脂質評価端末試作機の外観

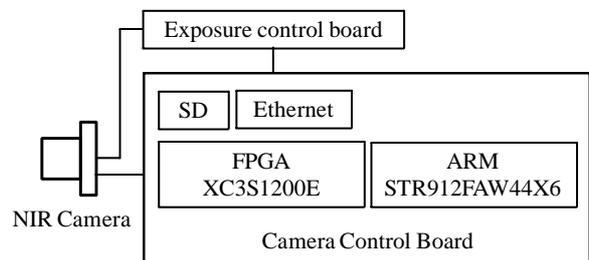


図4 システム構成

いる。それぞれのカメラのレンズ先端にはバンドパスフィルタ（ $760\text{nm} \pm 5\text{nm}$ 、 $810\text{nm} \pm 5\text{nm}$ 、 $930\text{nm} \pm 5\text{nm}$ ）とIRカットフィルタを装着した。これにより、1度のリクエストで同時に4種の分光画像（ $640 \times 480\text{pixel}$ ）が取得可能である。図4に試作機のシステム構成を示す。カメラモジュールは、 $750 \sim 1050\text{nm}$ 帯域で感度が高いチップセットを搭載した CCD センサである。カメラ制御記録基板は、カメラモジュールから出力される画像データをフレームメモリに蓄積し、記録媒体に記録することができる。カメラモジュールからの映像信号は制御記録基板を介してTCP/IPネットワークに転送される。

3.2 試作機の脂質推定精度の評価

現在実施されている肉質評価は、肋骨間切開面における胸最長筋（以下、ロース芯）を対象としている。図5は撮影実験に使用した牛肉試料であり、輪郭線で囲まれた部位がロース芯である。本研究では、岐阜県内の市場に上場された黒毛和種のリブロース（直径150mm程度、厚さ10mm程度）を用いた。撮影実験は冷暗室内にて行い、照明にはハロゲン光源を用いた。標準反射板を用いて、分光画像間の光量を調整した後、標準反射板と牛肉試料（表面温度 $0 \sim 4^\circ\text{C}$ ）を撮影した。2値化処理によって、分光画像におけるロース芯内の脂肪部位を抽出し、比反射率（平均値）を求めた。理化学的測定は高速液クロマトグラフ（島津製作所社製、LC-10）を使用し、ミリスチン酸、パルミチン酸、パルミトリン酸、ステアリン酸、オレイン酸、リノール酸および、リノレイン酸の脂質を測定した[4]。なお、オレイン酸値とは全ての脂肪酸に対するオレイン酸が占める割合を指す。

試作モデルの脂質推定精度は、34試料の理化学的測定値と脂肪部位の比反射率（平均値）から、式(1)に示した脂質推定モデルを求め、未知の10試料に対する理化学的



図5 牛肉試料

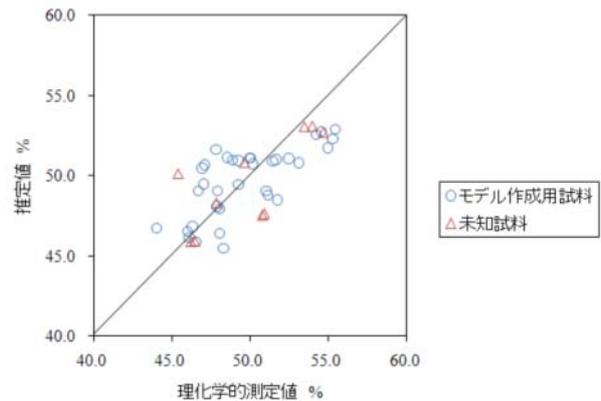


図6 理化学的測定値と推定値との関係

表1 脂質推定精度比較

	ミリスチン酸	パルミチン酸	パルミトレイン酸	ステアリン酸	オレイン酸	リノール酸	リノレン酸
相関係数	0.275	0.136	0.441	0.410	0.736	0.062	0.047
平均二乗誤差 %	0.428	4.200	0.130	1.591	5.010	0.265	0.012

測定値と推定値との相関係数および、それらの平均二乗誤差によって評価した。表1は未知試料に対する相関係数および平均二乗誤差を脂質ごとに示した。この結果、試作機から取得した分光画像によって作成された脂質推定精度は、他の脂質と比べてオレイン酸との相関0.736が最も高く、その平均二乗誤差は5.010%であった。図6は理化学的測定によるオレイン酸測定値と脂質推定モデルから算出された推定値の散布図である。脂質推定モデルはCH結合に由来する波長を含めた構成としているが、試作機から得られるいずれの分光画像も理化学的測定によるオレイン酸測定値と負の相関が確認され(760nm, 930nm: $p < 0.05$)、試作機の脂質推定性能は良好であると考えられる。また、理化学的測定装置と同程度に高い脂質精度とは言い難いが、官能評価試験結果によると3.0%程度の差があれば、その差を識別できるため、食感的な差を識別する程度の精度であると言える。

図7はオレイン酸値が異なる2つの牛肉試料の分光比反射率画像とオレイン酸推定画像(ロース芯)との比較である。分光比反射率画像は比反射率0~100%の範囲でグレースケールマッピング表示し、オレイン酸推定画像はオレイン酸割合40~60%の範囲でカラーマッピング表示している。分光比反射率画像は黒色から白色へと明るくなるにつれて比反射率が高くなり、オレイン酸推定画像は青色から赤色になるにつれて、オレイン酸割合が高くなることを示している。なお、オレイン酸推定画像の白画素は、筋肉部位や範囲外の比反射率を示している。オレイン酸割合が高い牛肉試料は、分光画像がやや暗い傾向にあり、その結果オレイン酸推定画像のカラーマッピングによってその差を可視的に確認できた。

4. まとめ

本研究では、牛枝肉市場で利用可能な携帯型の脂質測定端末の実現を目標とし、小型近赤外カメラを用いた試作機の開発と、脂質推定精度評価を行った。

試作機は近赤外カメラモジュール、露出調節基板および、制御基板によって構成され、レンズ先端にバンドパ

スフィルタを装着することによって複数の分光画像の取得を可能とした。試作機によって撮影された分光画像から作成した脂質推定モデルはオレイン酸測定値との相関が最も高く、また画像反射率とオレイン酸測定値との間に負の相関があることを確認した。さらに、オレイン酸推定画像を生成した結果、脂質推定画像の比較が可能であり、試作機は脂質推定精度の観点から有効であることを確認した。

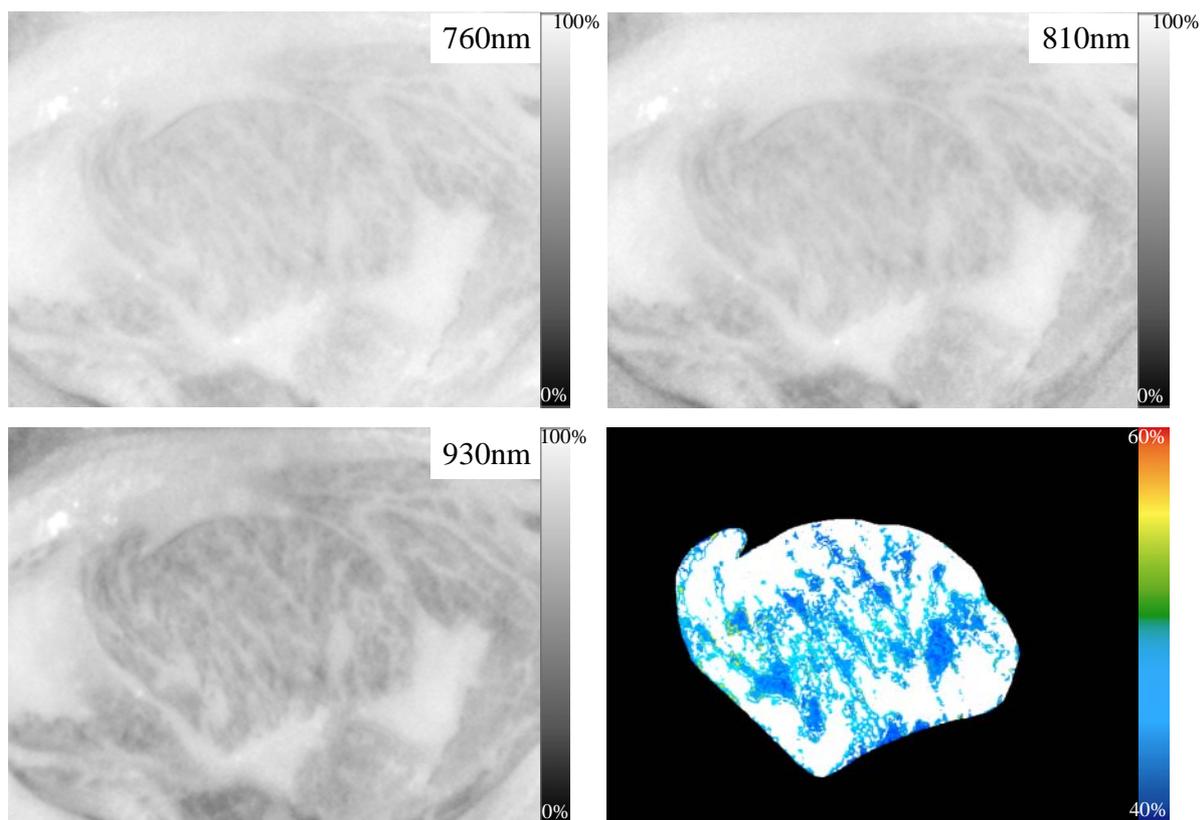
今後は、更に試料数を増やし脂質推定精度の向上を図るとともに、市場で利用可能な形態に試作機を改良したいと考えている。

謝辞

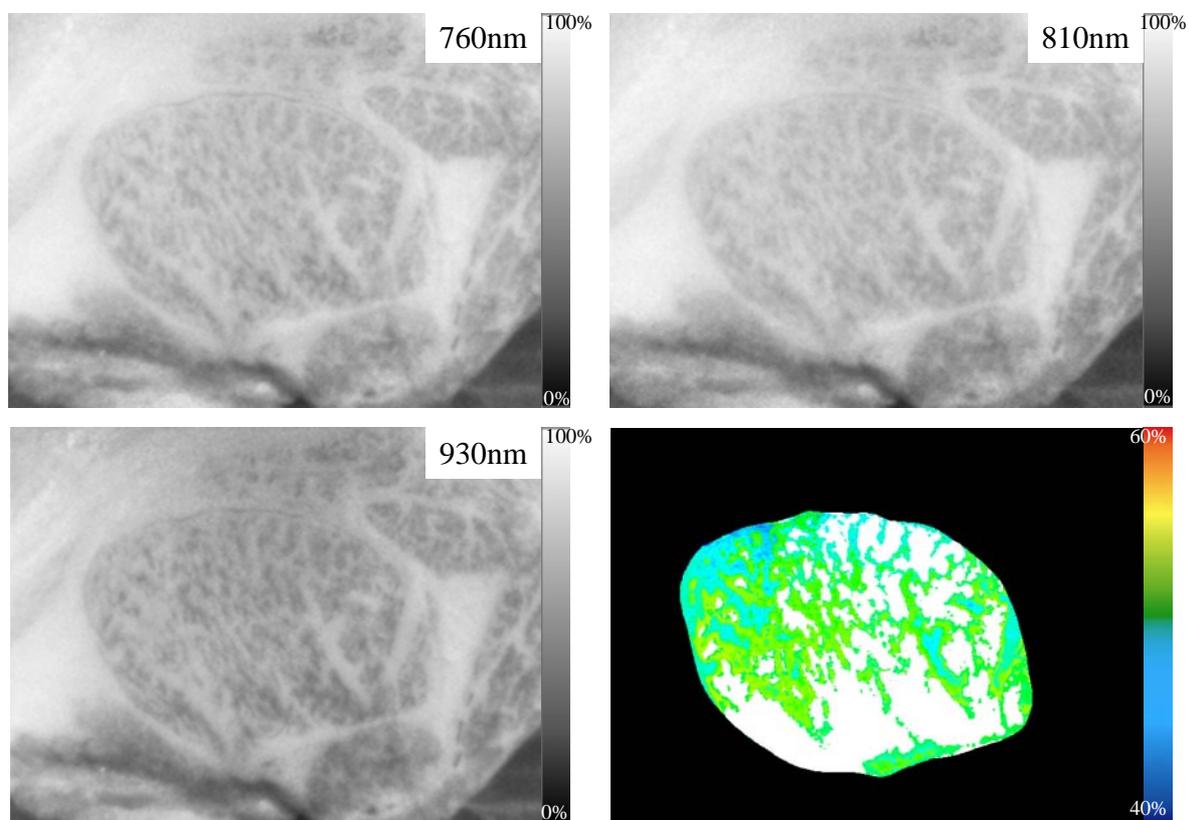
本研究の一部は総務省戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE) 地域 ICT 振興型研究開発「県産ブランド牛肉付加価値向上のための携帯型牛肉おいしさ測定端末の研究開発」により実施している。ここに感謝の意を示す。

文献

- [1] Westerling DB, Hedrick HB: "Fatty acid composition of bovine lipids as influenced by diet, sex and anatomical location and relationship to sensory characteristics", Journal of Animal Science, Vol.48, pp.1343-1348, 1979.
- [2] 田中等幸, 山田俊郎, 丸山新, 江崎雅康, 棚橋英樹: "県産ブランド牛肉付加価値向上のための携帯型牛肉おいしさ測定端末の研究開発", 岐阜県情報技術研究所報告, Vol.12, pp.19-22, 2011.
- [3] 田中等幸, 丸山新, 棚橋英樹: "近赤外分光画像を用いた和牛肉のロース芯内オレイン酸分布測定法", 肉用牛研究会報, Vol.91, pp.2-7, 2011.
- [4] Borch RF: "Separation of long chain fatty acids as phenacyl esters by high pressure liquid chromatography", Analytical Chemistry, Vol.47, No.14, pp.2437-2439, 1975.



(a) オレイン酸値が低い牛肉試料



(b) オレイン酸値が高い牛肉試料

図7 2試料の比較(分光比反射率画像, オレイン酸推定画像)