

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(第2報)

田中 等幸 山田 俊郎 大野 尚則 丸山 新* 江崎 雅康** 棚橋 英樹

Development of a Portable Evaluation System for Improving Value-added of Beef Quality (2nd report)

Tomoyuki TANAKA Toshio YAMADA Naonori ONO
Shin MARUYAMA* Masayasu ESAKI** Hideki TANAHASHI

あらまし 和牛肉の肉質は牛枝肉取引規格に従って格付員の目視によって評価されている。近年、オレイン酸などの脂質が口どけの良さや風味に影響することが知られ、和牛肉のおいしさに関する要因の一つとして、脂質を評価する試みが各地で行われている。しかし、枝肉市場に上場される枝肉に対して、客観的かつ定量的に評価するためには、非破壊、簡便かつ迅速に測定可能な小型・軽量の装置でなければならない。そこで我々は、これらの課題を解決するために近赤外カメラを用いた枝肉脂質撮影装置を開発した。本報では、枝肉脂質撮影装置の概要を示し、枝肉市場における実験結果について報告する。

キーワード 枝肉、近赤外マルチバンド画像、脂質評価

1. はじめに

牛枝肉質評価は、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）を判断基準として、格付員の目視によって評価されている^[1]。近年、和牛肉のおいしさには、オレイン酸など不飽和脂肪酸（以下、脂質）が関与しており、これらの脂質が占める割合が高いほど、口どけの良さや風味に影響を及ぼすことが知られている^[2]。このような背景から、従来の肉質評価に加えて、オレイン酸等の良質な脂質成分も評価しPRすることで、地域ブランド牛肉の付加価値化に向けた新たな取り組みが各地で行われている。しかしながら、目視によって脂質の成分的な差異を判別することは困難である。従来から脂質などの成分を測定し評価する方法は、ガスクロマトグラフ等の理化学的測定装置による破壊試験である。破壊試験は分析精度が高い半面、分析の際には枝肉の商品価値を損失し、手間と時間を必要とする課題がある。そのため、枝肉市場における評価方法としては適用できていない。最近では、近赤外分光法の技術を応用した光ファイバ方式の脂質推定装置が実用化されている。この装置は非破壊に測定できる利点を有しているが、スポット測定であるため枝肉

面全体に広がる脂質を評価することは困難である。

そこで我々は、近赤外分光法の技術をカメラによる画像測定に応用し、非破壊かつ客観的に枝肉ロース芯面の脂質を評価する可視化技術を開発した^[3]。平成22～23年度には総務省「戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)」の委託研究を受け、非破壊に枝肉に含まれる脂質を平面的に評価し、生産者等、畜産関係者にその情報をフィードバックするシステムを開発した^[4-7]。

本報告では、枝肉市場において利用可能な枝肉脂質撮影装置（以下、撮影装置）の解説と、本装置を用いた撮影実験結果について報告する。

2. 近赤外画像を用いた脂質成分の可視化

分光反射特性は物性の成分情報を表しており、特に近赤外帯域においては、農産物の成分に特徴的な反射特性を示すことが知られている^[8-9]。本研究では、牛肉に近赤外光を照射し、肉表面で反射される反射光と、肉内部に入り込んで出射する散乱光の反射強度をカメラによって観測する。したがって、拡散反射率に変化を及ぼす近赤外光吸収の原理をカメラ開発に応用することが本研究の目的である。

我々はこれまでの研究から、近赤外帯域における比反射率と不飽和脂肪酸割合との関係には負の相関があることを実験的に確認し^[10]、牛脂の近赤外帯域（750nm～

* 岐阜県畜産研究所

** 株式会社イーエスピー企画

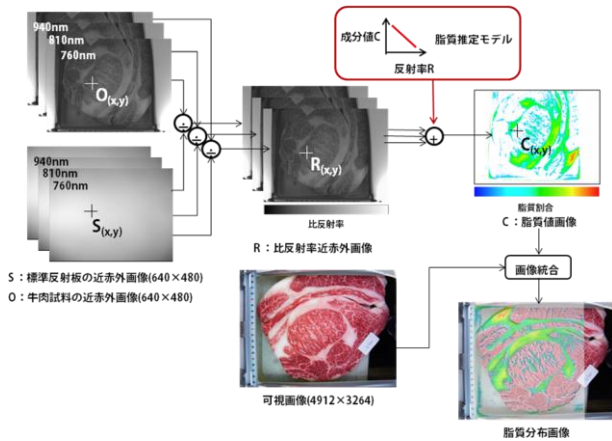


図1 オレイン酸割合分布画像作成フロー

1000nm) の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を確認した。さらに、中心波長760nm、800nmおよび、930nmから成る近赤外マルチバンド画像を用いて、(1)に示す脂質推定モデルを構築し、脂肪領域の比反射率（標準反射板の反射強度に対する脂肪領域の反射強度）から理化学的測定装置によって測定される脂質割合を推定する手法を開発した^[7]。

$$c = k_0 + k_1 R_{\lambda 760\text{nm}} + k_2 R_{\lambda 800\text{nm}} + k_3 R_{\lambda 930\text{nm}} \quad (1)$$

ここで、 c は脂質推定値[%]、 R は波長 λ における標準反射板に対する反射率、 k は波長 λ における係数である。なお、脂肪はオレイン酸、リノール酸など多くの脂質から構成されるが、脂質推定値 c とは、各脂肪酸が総脂肪酸に占める割合を意味する。本報告では脂質のうちオレイン酸を対象とし（以下、オレイン酸割合）、この値が大きいほどロドケや風味が良いとされる。

図1に近赤外マルチバンド画像からオレイン酸割合を可視化する画像（以下、オレイン酸分布画像）の作成フローを示す。オレイン酸分布画像の作成には枝肉試料と標準反射板それぞれの近赤外マルチバンド画像を使用する。標準反射板は、全波長光に対して同一の反射強度を返す特性をもっている。その特性を利用し、波長間におけるカメラ感度や、レンズの透過特性の違いを一定とする。また、照明ムラを解消するフラット補正としても使用する。枝肉の画像 $O(x, y)$ と標準反射板の画像 $S(x, y)$ を入力とし、同一波長の近赤外マルチバンド画像ごとに対応する座標値 (x, y) 間で除算し、比反射率画像 $R(x, y)$ を作成する。次に、理化学的測定装置によって測定したオレイン酸割合実測値と、比反射率画像における脂肪領域の平均反射率との関係式（脂質推定モデル(1)）によってオレイン酸割合推定値画像 $C(x, y)$ を作成し、値に応じて疑似カラーをマッピングする。オレイン酸割合推定画像の各画素にはオレイン酸割合の推定値（非整数値）が数値

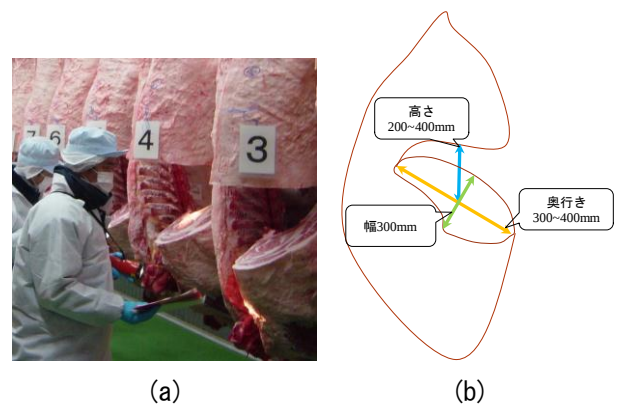


図2 枝肉評価の様子 (a) と牛枝肉のサイズ (b)

化されている。さらに、可視画像とオレイン酸割合推定画像を幾何変換によって統合することで、可視画像における平面的な脂質割合分布の把握が容易となる。

3. 枝肉脂質撮影装置

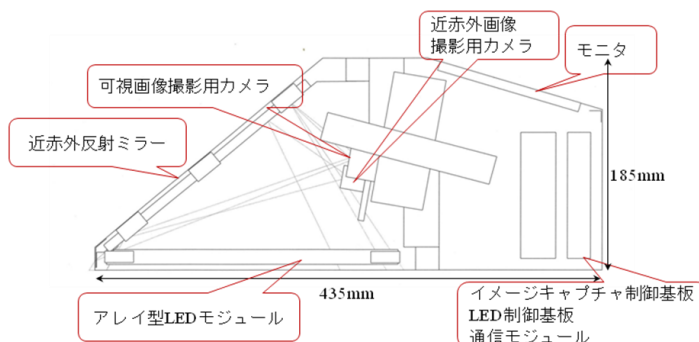
3. 1 撮影装置の設計

これまでの実験に用いた撮影装置は、据え置き型の近赤外カメラと液晶チューナブルフィルタで構成しており、冷暗室内でハロゲン光を牛肉試料に照射しながらバンドパスフィルタの切り換えによって近赤外マルチバンド画像を取得していた。つまり、撮影装置の運搬は困難であること、また外乱光の影響を受けない暗室環境で撮影する必要があることから、この構成を枝肉市場に持ち込んで利用することはできない。そこで、同等の画像を撮影する機能を持つ可搬式の装置を開発するため、持ち運びが可能な小型近赤外カメラを使用し、液晶フィルタとハロゲン光の代わりに中心波長の異なる複数のLED照明を連続的に切り換えて撮影が可能な小型暗室環境型の撮影装置を設計する。

図2に岐阜県内に在る枝肉市場の様子と、枝肉のサイズを示す。枝肉市場内は、4℃程度、湿度70%程度の恒温環境で衛生的に管理されている。枝肉の取り扱いは、破壊はもちろん接触、発熱によって損傷してはならない。また、枝肉は300~400mm間隔に密に吊り下げられており、1回の市場に上場される枝肉は100~200頭である。このため、撮影には迅速性が求められること、また格付員や衛生職員などの作業を妨害してはならないことが挙げられる。このような状況から、撮影時の効率性、操作性および、操作者の作業負荷軽減を図るために、撮影装置は持ち運び可能な小型・軽量な形態である必要がある。また、枝肉1個体の撮影に許容される時間は30秒以内と試算した。枝肉は胸椎が完全に切断されており、開口面幅300mm、開口奥行き300~400mmおよび、開口高200~400mmである。したがって、撮影装置は開口部に挿入可



(a) 装置外観



(b) 装置構成

図3 枝肉脂質撮影装置

能であり、枝肉断面の中心領域200mm×200mmを撮像する画角が必要である。以上に挙げた課題の解決を検討した撮影装置について次節で述べる。

3. 2 撮影装置の試作

図3に試作した枝肉脂質撮影装置の外観と装置構成を示す。撮影装置は、近赤外画像撮影用カメラ、可視画像撮影用カメラ、イメージキャプチャ制御基板、LED制御基板、通信モジュール、アレイ型LED照明、ディスプレイモニタおよび、近赤外反射ミラーによって構成される。撮影時の照明環境を一定とするため、カメラ等撮影関係部品はアルミケースで覆った。これにより、筐体内は暗室環境となり、単一波長光を投光することで、任意波長の近赤外マルチバンド画像が取得できる。

撮影の際、枝肉の切開部の開口高が狭いため、カメラ光軸を鉛直下向き方向にしてロース芯領域を包含する画角を確保することは困難である。そのため、ミラーを用いた間接撮影方式を採用し、撮影装置の形状は、筐体の高さを出来るだけ低く、なお且つ開口部に挿入可能なくさび型形状とした。この結果、装置サイズは230×435mm、高さ185mm、総重量は約4kg（バッテリーを除く）となった。

次に、装置部品について述べる。可視画像撮影用カメラは高解像度の撮像素子（4912×3264）を使用した。近赤外画像撮影用カメラは700～1000nmの近赤外帯域に高感度の撮像素子（640×480）を使用した。可視画像撮影用カメラと近赤外画像撮影用カメラによって撮影されるロース芯の領域が、画像の中心付近となるようにカメラの画角を調整した。照明は小型、低消費電力で発熱による枝肉への影響が少ないLEDを使用した。装置筐体底面の両脇にアレイ型のLEDモジュール2式を配置し、モジュール内には白色LEDと3波長（760nm、810nmおよび940nm）の近赤外LEDを交互に配列した。また、筐体内部は拡散板を取り付け、LEDモジュールは、照明ムラが

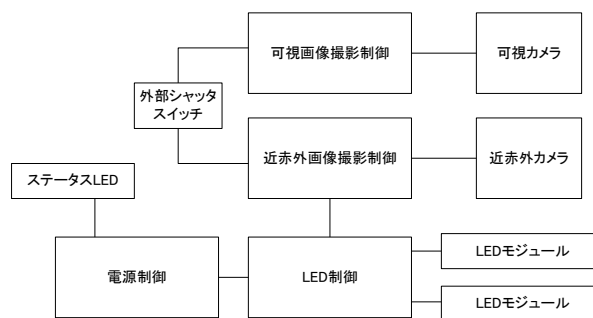


図4 制御ブロック図

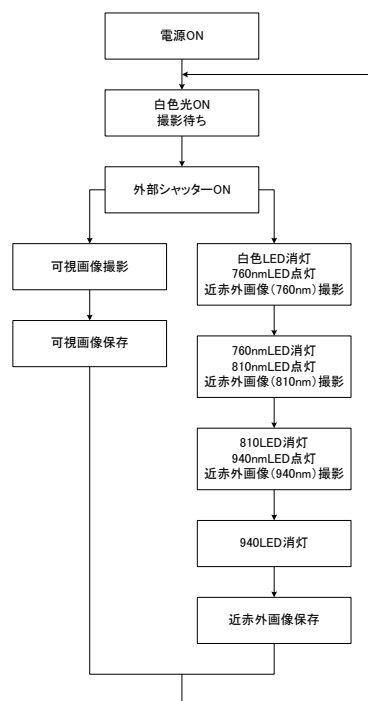


図5 撮影制御シーケンス



図6 撮影実験の様子

できるだけ小さくなるように放射方向を調整した。この結果、ロース芯全体に間接光が照射される拡散反射環境を構築した。

その他、撮影装置はバッテリー駆動とし、撮影した画像は無線送信できる機能をもたせた。また、衛生面の配慮から枝肉との接触部分をできるだけ最小限とするため、着脱可能な接触バーを底面に取り付け、撮影終了後は接触バーの洗浄を可能とした。

図4に制御ブロック、図5に撮影制御シーケンスを示す。撮影制御シーケンスは、撮影装置の電源をONすると、白色LEDが点灯し撮影待ち状態となる。外部シャッタースイッチを押下すると、シャッター信号が可視、近赤外の各画像撮影制御に送信され、可視画像と近赤外マルチバンド画像が記録される。この時、LED制御と近赤外マルチバンド画像制御は連動し、白色光、760nmのLED、810nmのLED、940nmのLEDの順にシーケンシャルに点灯・消灯が繰り返され、最終的に可視画像1枚と3chの近赤外マルチバンド画像1枚が保存される。

4. 枝肉脂質撮影装置の評価

4. 1 枝肉市場における撮影装置の動作検証

冷温・高湿度環境下での撮影装置の動作を検証するため、枝肉市場にて撮影実験を実施した。撮影実験の様子を図6に示す。作業者は白色LEDが点灯した状態でディスプレイを見ながら、ロース芯の中心に撮影位置を合わせた後、ハンドル脇のシャッタースイッチを押下することで、可視画像および近赤外マルチバンド画像を記録する。撮影および記録の状態はステータスLEDにて確認できる。牛1個体あたりに要する時間は、撮影に約2秒、画像記録に18秒、トータル20秒であった。撮影時間は当初の想定30秒を満足したが、更なる時間短縮が必要である。

4. 2 撮影装置の脂質推定結果の検討

本撮影実験では枝肉33個体を撮影した。撮影実験と並行してロース芯表面の脂を採取し、高速液体クロマトグラフ（島津製作所社製、LC-10）によって理化学的測定

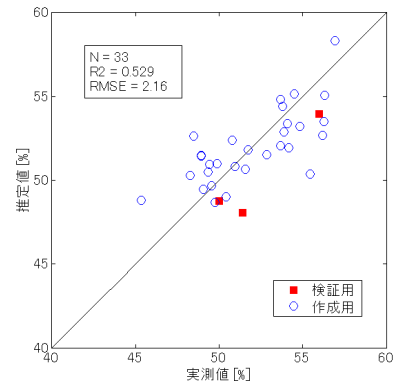


図7 理化学測定値と脂質推定値の散布図

を行った^[11]。採取した脂0.5 g を15 ml の試験管に秤量し、25%水酸化カリウム-エタノール溶液5mlを加え、90℃で2時間加熱し鹸化した。試験管に水6mlを加えた後、n-ヘキサン15mlで脂質を除去した。水層を塩酸にて酸性にし、n-ヘキサン10mlを加え、1分間振とう抽出した。ヘキサン層を採取し、窒素ガス気流下40℃で乾固後、0.05mol/Lフェナシルプロマイド100 μl、トリエチルアミン100 μl、エタノールを加えて2mlとした。60℃で2時間加熱しフェナシルエステル化し、高速液体クロマトグラフ用試料とした。高速液体クロマトグラフはカラム（Shim-pack FC-ODS 75mmL.×4.6mmI.D.）、移動相にpH2.6の0.01mol/L リン酸塩緩衝液/アセトニトリル（20:80, v/v）を用いて測定波長254nmで脂肪酸組成を分析した。同定した脂質はミリスチン酸、ミリストレイン酸、パルミチン酸、パルミトレイン酸、ステアリン酸、オレイン酸および、リノール酸であり、総脂肪酸に占めるオレイン酸をオレイン酸割合とした。

脂質推定精度の検討および、撮影装置によって取得した近赤外マルチバンド画像からオレイン酸分布画像が適正に作成されるかを確認した。脂質推定モデルの作成は、統計解析ソフトウェア（Addinsoft, XLSTAT）を用いて、目的変数を理化学的測定値（オレイン酸割合）、説明変数をロース芯表面の脂肪領域における比平均反射率とする重回帰分析によって推定式を求めた。脂質推定モデルは30個体を用いて推定式を作成し、未知の3個体によって検証した。脂質推定モデルは式(2)となった。760nm、940nmの係数がともに負であること、また940nmの係数が他の係数に比べて大きいことから、CH結合に対する吸光係数の知見と合致し、脂質推定モデルは適当であると考えられる。

$$c[\%] = 113.8 - 49.6 \times R_{\lambda 760\text{nm}} + 109.7 \times R_{\lambda 810\text{nm}} - 152.9 \times R_{\lambda 940\text{nm}} \quad (2)$$

撮影装置によって取得した画像の脂質推定精度を評価するには、ロース芯面の画素単位で理化学的測定を行い、

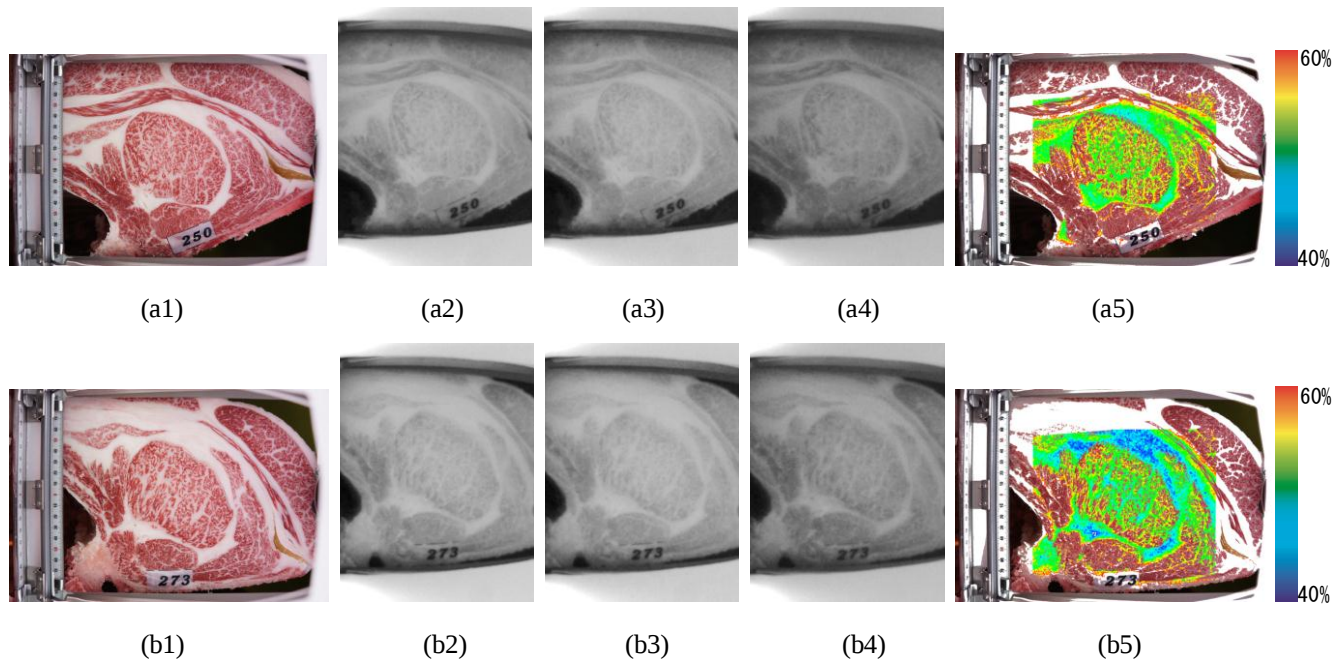


図8 枝肉脂質撮影装置による撮影画像と脂質分布画像

(a1, b1) 可視画像

(a2, b2) 近赤外画像 760nm, (a3, b3) 近赤外画像810nm, (a4, b4) 近赤外画像940nm

(a5, b5) オレイン酸分布画像

推定値との差によって評価する必要がある。しかし、画素単位で理化学的測定を行うことは物理的に困難である。そこで、ロース芯面の理化学的測定値と画像の脂肪領域の平均比反射率との関係から精度を検証する。脂質推定精度は決定係数 R^2 および、平均誤差RMSEによって評価した。図7は撮影に成功した33個体の理化学測定値（オレイン酸）と推定値の散布図である。決定係数 $R^2=0.529$ 、推定誤差RMSE=2.16の結果が得られた。シーケンシャルに近赤外マルチバンド画像を取得する今回の撮影方式は、時間的なズレが発生するため、枝肉の表面温度変化や近赤外マルチバンド画像間の位置誤差によっては、脂質推定結果に著しい影響を及ぼすことが予想された。しかしながら、従来の脂質推定精度^[6-7]とほぼ同等の結果が得られたことから、温度変化や近赤外マルチバンド画像間の位置誤差による影響はほとんどなかったと考えられる。

図8は、2つの試料について、撮影装置によって取得した可視画像 (a1, b1)、近赤外マルチバンド画像 (a2~a4, b2~b4) とオレイン酸分布画像 (a5, b5) の例である。オレイン酸分布画像は可視画像とオレイン酸推定画像との幾何変換による統合結果であり、可視画像の脂肪領域に位置するオレイン酸割合を可視的に表現したものである。オレイン酸割合40%を青色、60%を赤色に割り当て、青色から赤色に変化するに従って、オレイン酸割合が段階的に高くなることを示している。なお、キャリブレーションパターンを用いたコーナ20点の平均統合誤差は

3.68pixelであった。

図8(a), 図8(b)に示した試料の理化学的測定値はそれぞれ、55.5%, 45.4%であり、理化学的測定値とオレイン酸分布との関係が相対的に一致した。特に、筋間脂肪の領域において著しい差が確認できる。

5. まとめ

本研究では、生産者や畜産関係者に脂質情報を提供し、育種改良および飼養技術の改善に導く新たな脂質評価システムの実現を目指している。本報告では、枝肉市場で利用可能な枝肉脂質撮影装置について、設計方針と試作した撮影装置の構成および撮影制御シーケンスを述べた。枝肉市場において、試作した撮影装置による撮影実験を実施し、基本的動作の確認と理化学的測定値の異なる個体を用いた画像比較によって差異を示した。

理化学的測定装置による脂質評価は、破壊試験であるため、枝肉市場において適用することは困難である。本撮影装置は、非破壊かつ迅速に評価が可能であることが最大の特徴であるとともに、枝肉ロース芯面全体としての評価が可能となる。また、成分の吸光現象に基づく適切な波長光を選択することで、他の食品成分の評価にも応用が可能である。

今後、枝肉市場における実験データを蓄積し、精度評価を行うとともに、枝肉切開面における脂質分布の解明

が課題である。生産者などに対して、客観的かつ定量的な情報をフィードバックすることによって、地域ブランド牛肉の付加価値化に向けた取り組みに拍車がかかることが期待される。

謝 辞

本研究は、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」で実施しました。ここに感謝の意を示します。

文 献

- [1] 社団法人日本食肉格付協会 <http://www.jmga.or.jp/>
- [2] David B. Westerling and H. B. Hedrick: 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.
- [3] 田中等幸, 丸山新, 棚橋英樹: “近赤外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] 田中等幸, 山田俊郎, 大野尚則, 江崎雅康, 丸山新, 棚橋英樹: “枝肉脂質撮影装置の開発”, 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.2139-2142, 2011.
- [5] 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研究報告, Vol.12, pp.19-22, 2010.
- [6] 田中等幸, 丸山新, 山田俊郎, 江崎雅康, 棚橋英樹: “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 -”, FIT2011 (第10回情報科学技術フォーラム) 論文集, pp.297-300, 2010.
- [7] 田中等幸, 丸山新, 山田俊郎, 江崎雅康, 棚橋英樹: “牛肉脂質測定装置のためのマルチスペクトル画像解析モデルの設計と評価”, 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.2182-2184, 2010.
- [8] 尾崎幸洋, 河田聡: “近赤外分光法”, (株) 学会出版センター, pp.157-172, 2008.
- [9] 岩元, 河野, 魚住: “近赤外分光法入門”, 幸書房, pp.40-61, 2002.
- [10] 田中等幸, 平湯秀和, 丸山新: “画像を用いた食品評価に関する研究 (第2報)”, 岐阜県情報技術研究所研究報告, Vol.10, pp.54-57, 2008.
- [11] 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.