

LED 光源小型近赤外分光測定器による魚の非破壊脂肪測定の可能性について

山内 悟*

魚の脂肪を測定する小型近赤外分光測定器に使用される小型ハロゲンランプの代替光源として、LED 光源実用化の可能性について調べた。測定に用いた LED は、狭帯域近赤外 LED とブロードバンド LED の 2 種類であり、これらを従来のハロゲンランプと比較した。この測定器は、市販小型分光器ユニット(640~1050nm)を用いて試作した。得られたスペクトルデータは、吸光度 2 次微分スペクトル変換して、化学分析値とのあいだで重回帰分析により脂肪含量を推定する検量線を作成して評価した。測定試料として脂肪含量の多寡のあるマアジ干物 9 個体を用い、その脂肪含量の範囲は 6.8~14.1%であった。2 次微分スペクトルデータと化学分析値とのあいだの単相関係数が高かった光源は、ハロゲンランプ $r=-0.79$ であり、次にブロードバンド LED $r=-0.73$ であり、これらは狭帯域近赤外 LED $r=-0.41$ とは大きな差があった。魚の脂肪測定において、ブロードバンド LED は従来のハロゲンランプの代替として利用できる可能性が示された。

キーワード：近赤外分光 LED 光源，非破壊測定，脂肪，ブロードバンド LED

回折格子型波長掃引法による汎用型近赤外分光光度計とバンドルファイバを組み合わせることで測定することにより、完全非破壊で迅速に魚肉の脂肪を推定することが可能となった^{1,2)}。魚類を測定したスペクトルから、脂肪の吸収は 928nm, 1037nm 以外にも多くのピークが存在することがわかっている³⁾。しかし、水による光の吸収が 1000nm 以上の長波長側で大きいことから、多水分系試料である魚肉を対象とした拡散反射法による測定の場合は、おもに 928nm をターゲットとした近赤外領域の入り口付近である 800~1200nm 帯域付近の走査が行われている。

これらの測定器は、汎用性が高く、高性能、高感度であることから高価であり、安易に屋外へ持ち出すという取り扱いが困難であった。そこで、比較的安価で、かつ生産や流通の現場で使用するために魚類の脂肪測定に特化した小型近赤外分光測定器が開発された^{4,5)}。この測定器は筐体内部の限られたスペースで分光処理を行うため、その方法として小型の可変干渉フィルタ(リニアタイプ)⁶⁾とリニアイメージセンサを組み合わせる方法が用いられていた。近年ではこの干渉フィルタの特殊性と高価格が原因と考えられる需要の低迷からあまり生産されなくなり、やがてこの測定器の生産も中止された⁷⁾。

このように、限られたスペースに分光システムを実装するためには高度な技術とノウハウが求められる。この問題を解決するためには、分光システムの部分のみをパッケージ化した部品(以降分光器ユニットと略記)を導入して、所望する測定器全体を設計することが効率的である。国外を含めると多様な分光器ユニットが存在するが、魚類の脂肪を測定する小型近赤外分光測定器を設計するために必要な条件である波長範囲やチャンネル間隔、光源、電荷出力などを勘案すると適切な製品は極めて少ない。

2024 年 7 月 4 日受理

静岡県水産・海洋技術研究所(本所)業績第 1186 号

* 静岡県水産・海洋技術研究所資源海洋科

(株)浜松ホトニクスは光関連の電子部品や電子機器を製造・販売しており、最近では分光器部品の小型化および低価格化を図った製品が生産されている。そして、分光器ユニットである「ミニ分光器」シリーズの中から、魚類の脂肪測定に利用できる分光器ユニットを利用して、必要最低限のシステム構成で設計が可能となった⁷⁾。

一般的な小型分光測定器では、光源として電球の頭頂部にレンズ加工を施した小型ハロゲンランプ(以降ハロゲンランプと略記)を用いることが多い。しかし、近年では一般的な白熱電球がLEDへ置き換わることにより生産中止されるのと同様に、小型分光測定器に搭載するハロゲンランプの生産が激減している。

そこで、本研究ではハロゲンランプの代替光源としてLED光源を用いる小型分光測定器を試作して、マアジ干物を試料として用い魚類の脂肪を測定する小型近赤外分光測定器としての実用化の可能性を探ることとした。測定に使用するLEDとして、一般的に信号送信用途として市販されている狭帯域近赤外LED(以降狭帯域LEDと略記)と、最近新たに開発されたブロードバンドLEDの2種類の光源を用いて、従来のハロゲンランプと比較した。ここでは、ブロードバンドLEDとは単一の半導体素子により広範囲な波長を発光するLED(以降BBLEDと略記)と定義する。

材料および方法

試料魚および化学分析

マアジ *Trachurus japonicus* を加工した干物9尾を加工業者から入手、または市販品を購入した。脂肪含量の化学分析は、半身全体をホモジナイズしてソックスレー抽出法により行った。

測定に使用した光源

狭帯域LEDは、脂肪の吸収波長である928nmに近いピークを持つ3タイプの市販品、L1915((株)浜松ホトニクス, ピーク発光波長890nm, VF=1.4V), L2388((株)浜松ホトニクス, 945nm, 1.3V), L9338((株)浜松ホトニクス, 945nm, 1.3V)を用いた。BBLEDは、脂肪の吸収バンドをカバーしている近赤外BBLEDとしてSFH4737(OSRAM, Germany, VF=2.9V)を用いた。なお、使用したBBLEDは形状が小型のため、2個並列で装備した。また、対照測定のために従来のハロゲンランプとしてLNS-MD7(浜井電球(株), 5V1A)を用いた。

小型分光測定器の試作

分光器ユニットは、C11708MA(波長範囲640~1050nm, (株)浜松ホトニクス)を用いた。上記3種類の光源および分光器ユニットの形状を図1に示した。設計した回路のブロックダイアグラムを図2に示した。



図1 測定に用いた光源と分光器ユニット

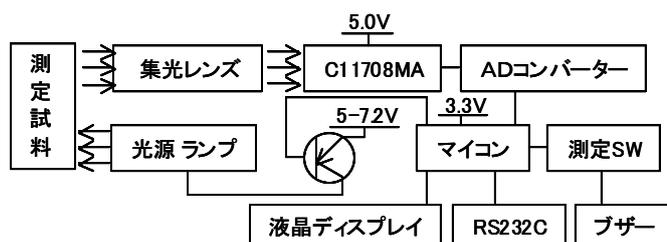


図2 測定器のブロックダイアグラム

測定器全体を制御するマイコンは DSPIC33FJ64GP706 (Microchip Technology, USA) を用いた。小型分光測定器を設計するには、分光器ユニットの出力ピンから出力される各波長に対応する電荷のデジタルデータへの変換スピードとして、サンプリングレート 1Msps を必要とする。このことから、アナログデジタル変換コンバータ(以降 ADC と略記)は、マイコン内蔵 ADC を使用することなく外付け ADC を実装した。また、電源として 1.2V リチウムイオン電池を使用し、光源の仕様に基づいてハロゲンランプは単 4 型 6 本、狭帯域 LED および BBLED は単 3 型 4 本を直列で供給した。

スペクトルの測定

マアジ干物のスペクトル測定は図 3 に示す測定ヘッドを表皮に軽く接触させて、拡散反射法により測定した。測定した魚体部位は後腹部で表皮が白色を呈している部位とした。スペクトルの測定は同じ部位で 3 回繰り返した。各光源におけるマアジ干物測定時の積算時間は、ハロゲンランプ 100ms, BBLED 300ms, 狭帯域 LED 200ms とした。1 回測定時のスペクトルのスキャン回数は 5 回として平均スペクトルを得た。

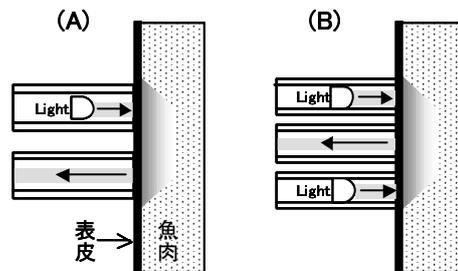


図 3 魚肉に対する拡散反射測定方法
A : ハロゲンランプおよび狭帯域 LED
B : BBLED

スペクトルの解析

測定したスペクトルデータは、測定毎に RS232C によりパソコンのシリアルポートを経てデータを蓄積した。得られたオリジナルデータは、反射率 → スムージング処理(segment 20 ポイント) → 吸光度 → 吸光度微分スペクトル(segment 7 ポイント) → 吸光度 2 次微分スペクトル(segment 7 ポイント)の順に変換⁸⁾して、最終的に吸光度 2 次微分スペクトルと化学分析値とのあいだで重回帰分析により脂肪含量を推定する検量線を作成した。

結果

光源のスペクトル

白色ポリアセタール樹脂(以降白色板と略記)を測定対照として得られた、各種光源のスペクトル分布の比較を図 4 に示した。測定データは、分光器ユニットから出力される電荷を ADC により 12 ビットに変換した値(count data)で示した。(A)ハロゲンランプでは、分光器ユニットの測定範囲であるおよそ 600~1100nm の広範囲にわたり反射光が得られた。そのピークは 800nm 付近にあり、さらに脂肪の吸収バンドである 920nm 付近で最大ピークの約 70%の光量が認められた。(B)BBLED では、600~700nm 付近の可

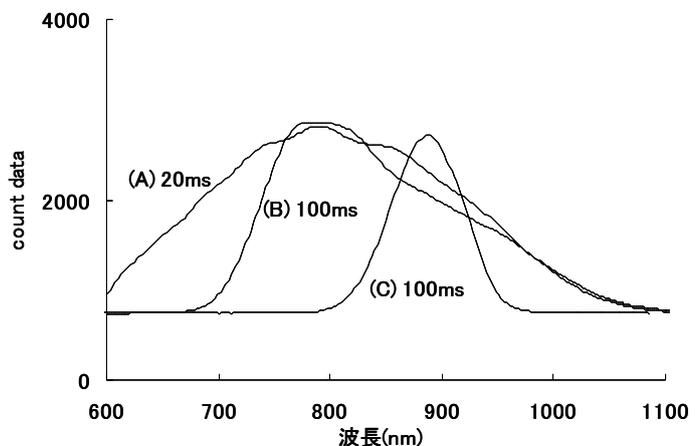


図 4 光源スペクトルの比較
A : ハロゲンランプ
B : BBLED
C : 狭帯域 LED (L1915)
図中の数字は積算時間

視領域での発光は認められず，ハロゲンランプと同様に 800nm 付近にピークが認められた。また，脂肪の吸収バンドである 928nm 付近では最大ピークの約 60%の光量が認められ，これより長波長側でも光量は少ないもののハロゲンランプ同様に反射光が得られた。(C)狭帯域 LED(L1915)では，上記 2 種の光源と比べて発光スペクトルの範囲は狭く約 800~1000nm であった。狭帯域 LED の最大ピークは，定格値の 890nm に対して 887nm であった。

マアジ干物の化学分析結果

スペクトル測定に用いたマアジ干物試料 9 個体の脂肪含量化学分析の結果，脂肪含量の範囲は 6.8~14.1%，平均 10.7%であった。

オリジナルスペクトルの比較

3 種類の光源により測定したマアジ干物 9 検体 27 スペクトルについて，ADC 変換直後のデータをオリジナルスペクトルとして図 5 に示した。それぞれの光源により測定したスペクトルの形状は，図 4 に示した各光源のスペクトル分布と類似したパターンを示した。しかし，その反射強度は 3 種類の光源ともに，個体または測定毎に大きく異なりばらつきが認められた。

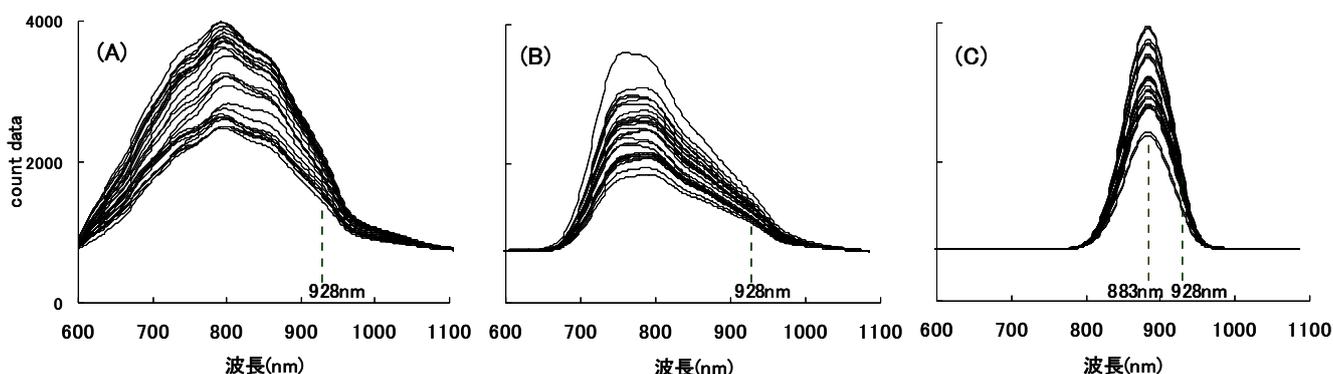


図 5 マアジ干物オリジナルスペクトルの比較(A:ハロゲンランプ、B:BBLED、C:狭帯域 LED(L1915))

脂肪の吸収波長である 928nm の値と脂肪含量化学分析値のあいだの単相関係数を求めると，ハロゲンランプ $r=0.14$ ，BBLED $r=0.45$ ，狭帯域 LED $r=0.13$ であった。オリジナルスペクトルでは，928nm 付近のバンドは脂肪の吸収により，脂肪含量の多寡に従ってスペクトルの下降を示す。つまり，928nm の値と化学分析値のあいだに関係性があれば負の相関関係が現れる。しかし，今回の結果では 3 種類の光源ともに正の相関を示した。

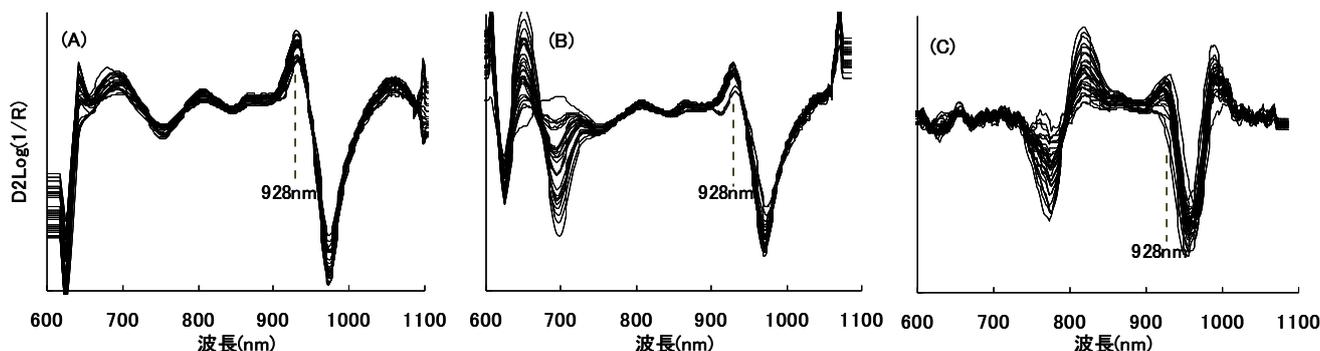


図 6 マアジ干物 2 次微分スペクトルの比較(A:ハロゲンランプ、B:BBLED、C:狭帯域 LED(L1915))

2次微分スペクトルの比較

図5のオリジナルスペクトルを2次微分スペクトルに変換した結果を図6に示した。なお、(C)狭帯域LEDは、他の2つの光源と比較するため、発光スペクトルの範囲外も含めて同じ条件でスペクトル処理を行った。

2次微分スペクトルでは、波長に依存しない加算的なベースライン変動は取り除かれるため⁸⁾、多くの測定試料スペクトルのベースラインが中央部分に重なった。しかし、(C)狭帯域LEDでは波長有効範囲である800~1100nmのうち800~900nmおよび970nm付近においてもばらつきがあり、安定したベースラインから構成されるスペクトルパターンを示さなかった。また、3種類の光源ともに970nm付近に強い下向きのピークが認められた。970nmは水の吸収バンドであることから、魚肉中の水分による吸収が明瞭に捉えられていた。

2次微分スペクトルにおいて、脂肪の吸収波長である928nmの値と脂肪含量化学分析値のあいだの単相関係数を求めると、ハロゲンランプ $r=-0.64$ 、BBLED $r=-0.68$ 、狭帯域LED $r=-0.25$ であり、3種類の光源とも脂肪の吸収の多寡に基づく負の相関が認められた。

相関スペクトルの比較

分光器ユニットの波長範囲640~1050nmにおける全256チャンネルと脂肪含量化学分析値の単相関係数を求めた相関スペクトルを図7に示した。脂肪の吸収バンドにおいて最も相関の高かった波長は、ハ

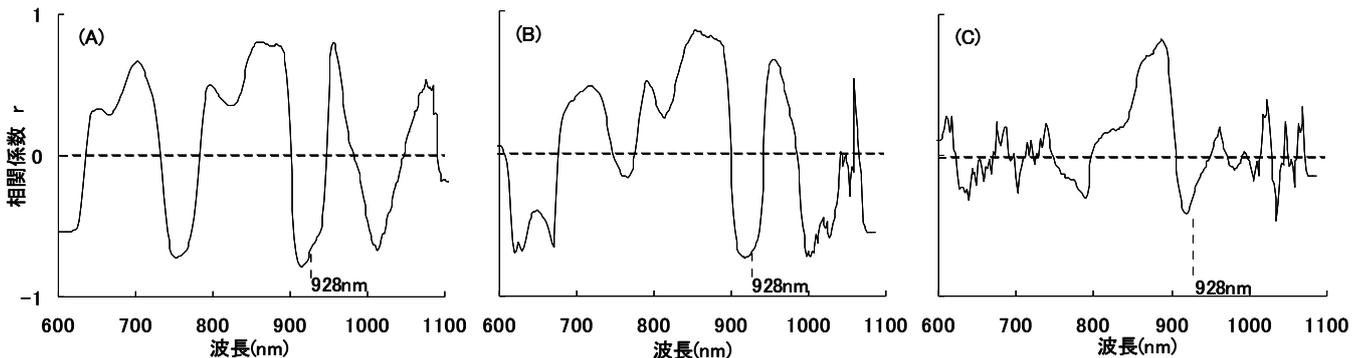


図7 マアジ干物相関スペクトルの比較(A:ハロゲンランプ、B:BBLED、C:狭帯域LED(L1915))

ロゲンランプ 915nm $r=-0.79$ であり、それ以外は BBLED 918nm $r=-0.73$ 、狭帯域LED 918nm $r=-0.41$ であった。この結果は、表1に単波長選択時の相関係数として示した。いずれの光源も、脂肪の吸収波長である928nmよりもわずかに短波長側での相関が高かった。この3種類の光源の中で単相関係数が最も高かった光源は、ハロゲンランプであり、最も単相関係数の低い狭帯域LEDとは大きな差が認められた。

表1 化学分析値を推定する重回帰検量線の作成結果

光源の種類	波長(nm)		相関係数(R)	誤差の平均(%)	誤差の標準偏差(%)
	$\lambda 1$	$\lambda 2$			
ハロゲンランプ	915	—	-0.79	1.03	1.33
	915	978	0.97	0.48	0.55
BBLED	918	—	-0.73	1.25	1.47
	918	977	0.95	0.61	0.65
狭帯域LED(L1915)	918	—	-0.41	1.63	1.97
	918	884	0.93	0.65	0.82

化学分析値を推定する重回帰検量線の作成結果

脂肪含量を推定する重回帰検量線の作成結果を表1に示した。各光源の検量線における第1波長の選

択は図7 相関スペクトルの結果に基づいて決定し、第2波長は第1波長選択時に最も相関の高い波長で、さらに光源スペクトルの強度から適切な波長を選択した。その結果、2波長重回帰式の相関係数はハロゲンランプ R=0.97, BBLED R=0.95, 狭帯域 LED R=0.93 が得られた。この2波長選択時の重回帰検量線に基づく、化学分析値と推定値の関係について図8に示した。

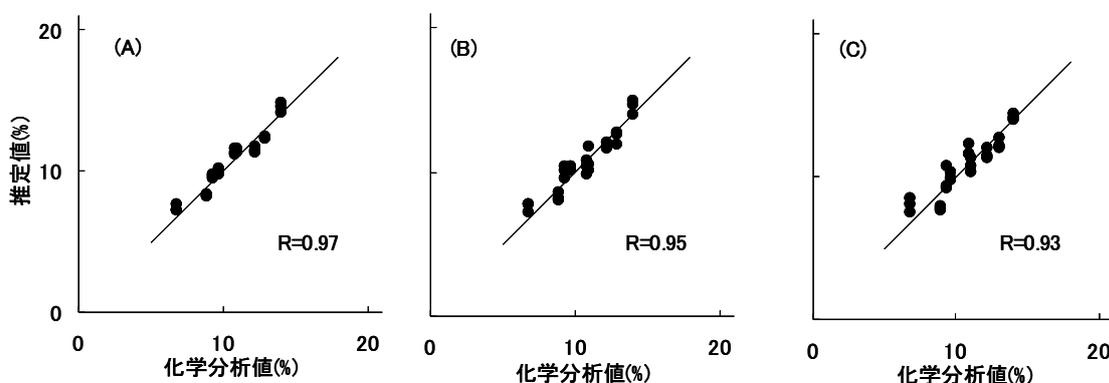


図8 化学分析値と推定値の関係 (A: ハロゲンランプ、B: BBLED、C: 狭帯域 LED (L1915))

異なる狭帯域 LED での比較

ハロゲンランプと BBLED では、図7 相関スペクトルにおいて、単相関係数がそれぞれ $r=-0.79$ と $r=-0.73$ と比較的高かったことから、2波長重回帰式の相関係数がそれぞれ $R=0.97$ と $R=0.95$ と高い推定精度を示した。しかし、狭帯域 LED では単相関係数が $r=-0.41$ と他の2種類の光源と比較して低かった。この時に使用した狭帯域 LED の魚肉測定時のスペクトル強度と脂肪吸収バンドの関係を見ると、図5(C)に示すように、狭帯域 LED の反射強度のピーク発光波長と脂肪吸収波長 928nm のあいだには 45nm の波長の差があった。

そこで、さらに脂肪の吸収バンドに近いピーク発光波長を持つ2タイプの狭帯域 LED の測定を行い、脂肪含量化学分析値と2次微分スペクトルデータとの単相関係数の向上の可能性について比較検討した。諸元表のデータから各狭帯域 LED のスペクトル半値幅は、L1915, L2338, L9338 でそれぞれ 80nm, 45nm, 60nm であった。

各種狭帯域 LED の脂肪吸収バンドにおける2次微分スペクトルデータと化学分析値との単回帰分析の比較結果を表2に示した。新たに測定を行った L2388 と L9338 のピーク発光波長の実測値はおよそ 945nm

表2 各種狭帯域 LED の脂肪吸収バンドにおける2次微分値と化学分析値との単回帰分析の比較

狭帯域LED	ピーク波長 (nm) 観測値	脂肪吸収 波長との差 (nm)	半値幅 (nm)	脂肪吸収バンドにおける単回帰分析		
				最適波長 (nm)	単相関係数 (r)	誤差の平均 (%)
L1915	887	41	80	917	-0.41	1.63
L2388	946	18	45	937	-0.28	1.63
L9338	944	16	60	953	-0.49	1.37

であり、脂肪吸収波長との差はおよそ 17nm と当初使用した L1915 の 41nm よりも接近していた。

この3タイプの狭帯域 LED のうち、最も単相関係数が高かったものは L9338 $r=-0.49$ であった。また、L2388 はそのピーク発光波長が脂肪の吸収波長と接近しているにもかかわらず $r=-0.28$ と低く、そのスペクトル半値幅は 45nm と3種の狭帯域 LED の中で最も小さかった。

狭帯域 LED におけるスペクトル処理の影響

これまでの測定では、従来のハロゲンランプ、BBLED、狭帯域 LED (L1915) の 3 種類を比較するため、測定したスペクトルは同一の条件でスペクトル処理を行った。しかし、分光器の全波長範囲に対して一部の範囲のみに有効なスペクトルが得られる狭帯域 LED では、他の光源と同一のスペクトル処理では効果的な結果が引き出せない可能性がある。

そこで、狭帯域 LED (L1915) の測定データを用いて、スペクトル処理の条件を変えて脂肪含量推定検量線を作成してその効果を検証した。スムージング処理と 2 次微分変換の条件を変えた検量線の作成結果を表 3 に示した。第 1 波長選択時の単相関係数では、スムージングのポイント数を小さくするほど良い結果が得られた。しかし、第 2 波長重回帰式の相関係数ではいずれのスムージングポイントでもほぼ同等の推定精度であった。また、2 次微分変換においてポイント数を変化させても、2 波長重回帰式の重相関係数を向上させる効果はなかった。

表 3 狭帯域 LED のスペクトル処理の違いによる検量線の推定精度の比較

スムージング (ポイント)	2次微分処理 (ポイント)	第 1 波長選択時		第 2 波長選択時	
		単相関係数(r)	波 長 (nm)	重相関係数(R)	波 長 (nm)
20	7	-0.41	917	-0.93	993
	4	-0.41	917	-0.93	885
	2	-0.41	917	-0.93	887
10	7	-0.59	925	-0.93	858
	4	-0.64	927	-0.93	856
	2	-0.66	925	-0.93	872
4	7	-0.65	929	-0.92	854
	4	-0.70	931	-0.92	872
	2	-0.72	931	-0.92	878

考 察

光源のスペクトル

BBLED、および狭帯域 LED の光源は、脂肪の吸収バンドである 928nm 付近の発光強度が得られており、魚の脂肪を測定する光源として使用可能であると考えられた。図 4 において 3 種類の光源におけるスペクトルのピークの強度はほぼ同じように見えるが、図中に示すように白色板測定時の積算時間は異なる。狭帯域 LED と BBLED の 100ms に対してハロゲンランプは 20ms と短い時間で同等の光量が得られている。これは、実際に試料魚を測定する時の測定時間に大きく影響する。つまり、狭帯域 LED または BBLED を搭載する小型分光測定器は、実際に試料を測定する時間(秒)が長時間を要することになる。

オリジナルスペクトルの比較

3 種類の光源により測定したマアジ干物 9 検体 27 スペクトルの ADC 変換データ直後のオリジナルスペクトル反射強度は、個体または測定毎に大きく異なりばらつきが認められた。これは、測定毎のスペクトルのベースライン変動が激しいためであると考えられる。特に、今回の測定のように魚の皮の上から測定する場合は、魚体の皮の汚れや色の変化、乾燥等が大きく影響する。したがって、今回の測定では魚体後腹部としたが、推定精度を向上させるためにスペクトルの測定部位をできる限り厳密に定める必要がある。

脂肪の吸収波長である 928nm の値と脂肪含量化学分析値のあいだの単相関係数を求めた。928nm の値と化学分析値のあいだに関係性があれば負の相関関係が現れるが、今回の結果では 3 種類の光源ともに正の相関を示した。このことから、オリジナルスペクトルの脂肪吸収バンドと脂肪含量化学分析値のあいだにはほとんど関係性は認められない、つまりオリジナルスペクトルデータでは脂肪含量を推定する

検量線を作成することは困難であると考えられた。さらに、それ以後のスペクトル変換である反射率や吸光度についても同様に解析したが関係性は低かった。

2次微分スペクトルおよび相関スペクトルの比較

2次微分スペクトルでは、脂肪の吸収波長である 928nm の値と脂肪含量化学分析値のあいだの単相関係数を求めると、ハロゲンランプ $r=-0.64$ 、BBLED $r=-0.68$ 、狭帯域 LED $r=-0.25$ であった。このように、3種類の光源ともに 928nm における 2次微分スペクトルデータと化学分析値のあいだに負の相関関係が認められることから、2次微分スペクトルデータによる重回帰検量線を作成して脂肪含量を推定することが可能であると考えられた。

2次微分スペクトルデータを用いて相関スペクトル図を作成した結果、3種類の光源ともに吸収波長である 928nm よりもわずかに短波長側での相関が高かった。脂肪の吸収波長と最も相関の高い波長が完全に一致しない現象は、近赤外分光法における重回帰検量線作成時の波長の帰属が明らかなピークにおいて起こる現象である。

この3種類の光源の中で、単相関係数が最も高かった光源はハロゲンランプであり、狭帯域 LED の単相関係数とは大きな差があった。BBLED においてもハロゲンランプ同様に単相関係数が比較的高い値を示していることから、ハロゲンランプや BBLED 光源から得られる広範囲な有効データのスムージング処理と微分スペクトル変換が影響していると考えられた。

異なる狭帯域 LED での比較

図 7 において狭帯域 LED (L1915) の単相関係数は $r=-0.41$ であり、他の2種類の光源(ハロゲンランプ、BBLED)と比較してかなり低かった。この原因として、図 5 (C) に示したように狭帯域 LED の反射強度のピーク発光波長が魚油の吸収波長と大きく離れていたことが原因と考えられた。そこで、さらに脂肪の吸収バンドに近いピーク発光波長を持つ2タイプの狭帯域 LED の測定を追加して比較検討した結果、追加測定した狭帯域 LED においても良好な結果は得られなかった。これは、光源として狭帯域 LED を選択する場合には、そのピーク発光波長と脂肪吸収波長の一致性よりも、その狭帯域 LED の特性であるスペクトル半値幅、つまりピークの広さが脂肪含量化学分析値と2次微分スペクトルデータとの単相関の向上に影響していると考えられた。

狭帯域 LED におけるスペクトル処理の影響

狭帯域 LED は分光器の波長範囲に対して放射光の範囲が狭い。そこで、スペクトル処理を最適化することにより推定精度を改善することを目的として、数種類のパターンのスムージング処理および2次微分変換の組合せで脂肪含量を推定する検量線を作成した。しかし、スムージング処理や2次微分変換の条件を変えることによる効果は認められず、狭帯域 LED においてもハロゲンランプや BBLED 同様にスムージング処理 20 ポイント、2次微分変換 7 ポイントの条件が最適であると考えられた。

LED 光源の総合評価

ハロゲンランプ、BBLED、狭帯域 LED の3種類の光源を用いてマアジ干物脂肪含量の推定精度を把握するために2波長で構成する検量線を作成し、検討した。その結果、2波長重回帰式の相関係数はハロゲンランプ $R=0.97$ 、BBLED $R=0.95$ 、狭帯域 LED $R=0.93$ であり、BBLED と狭帯域 LED でやや推定精度が低かった。しかし、脂肪の吸収バンドにおける単相関係数では、狭帯域 LED で特に低かった。このこと

から、各種光源の適性を比較する場合は成分の帰属に由来する単波長検量線で評価することが望ましいと考えられた。今回の検討結果から、魚の脂肪測定においても「ブロードバンドLED」は従来のハロゲンランプの代替として利用できる可能性が示された。

他方で、ハロゲンランプの代替として、いわゆる「脂肪の吸収バンドを含む一般的な狭帯域LED」は、小型分光測定器の光源としての推定精度はやや劣った。しかし、小型分光測定器としての低価格性を重視する、または1回の充電における大幅な測定回数の増加を期待する場合は、低い電力消費特性を持つ狭帯域LEDの採用を優先するべきであると考えられた。さらに、狭帯域LEDを選択する際には、脂肪の吸収バンドを含み、かつ半値幅の大きいタイプを選択することが望ましいと考えられた。

今回試作したBBLEDまたは狭帯域LEDを光源とした小型分光測定器は、ハロゲンランプと比較して以下の長所を有する。ハロゲンランプは光源の安定のためにランプ点灯直後から測定までに遅延時間の設定が必要であるが、LED光源は点灯直後に発光強度が安定するため測定時間の短縮が可能となる。また、LED光源はハロゲンランプよりも発熱量が少ないので、測定後の魚体へのダメージが極めて少ない。さらに、LED光源はハロゲンランプよりも長寿命である。

すでに生産が中止された「魚類の脂肪を測定する小型近赤外分光測定器」を用いて、これまでに多くの魚種の非破壊測定が実証されてきた。今後は、BBLED光源と分光器ユニットを組み合わせた小型分光測定器で、同様の魚種の測定が可能であると考えられた。

文 献

- 1) 山内悟・澤田敏雄・河野澄夫(1997)：近赤外分光法によるカツオ粗脂肪の非破壊測定の可能性。静岡県水産試験場研究報告，**32**，21～24.
- 2) 山内悟・澤田敏雄・河野澄夫(1999)：インタラクタンス方式の光ファイバーを用いた近赤外分光法による冷凍カツオ脂肪含量の非破壊測定。日本水産学会誌，**65**(4)，747～752.
- 3) 山内悟・澤田敏雄・河野澄夫(2004)：非接触反射型近赤外分光法による冷凍カツオ粗脂肪量の非破壊測定。農業施設，**35**(1)，25～31.
- 4) 山内悟・寫本淳司・水野俊博(2006)：ハンディー型近赤外測定器によるマアジおよびその干物の脂肪測定。日本食品科学工学会誌，**53**(7)，393～397.
- 5) 清川智之・井岡久(2007)：ポータブル型近赤外分光分析装置によるマアジ、アカムツ脂肪含有量の非破壊測定とその活用事例。島根県水産技術センター研究報告，**1**，11～17.
- 6) 河田聡(1996)：3章 近赤外分光の実際。近赤外分光法(尾崎幸洋・河田聡)，学会出版センター，東京，64～65.
- 7) 山内悟(2022)：近赤外分光法による小型脂肪測定器の開発，碧水(静岡県水産・海洋技術研究所)，**179**，3～5.
- 8) 尾崎幸洋・宇田明史・赤井俊雄(2002)：4章 スペクトルの前処理。化学者のための多変量解析(鈴木俊男)，講談社サイエンティフィック，東京，85～86.

Possibility of non-destructive fat determination of fish using a compact near-infrared spectrophotometer with LED light source

Satoru Yamauchi

Abstract We investigated the practical application of LEDs as an alternative to halogen lamps used in small near-infrared spectrometers that measure fat in fish. Two types of LEDs were used for the measurements, narrowband near-infrared LEDs and recently produced broadband LEDs, and compared with conventional halogen lamps. A commercially available compact spectrometer unit (600-1100 nm) was used for the trial production of the spectrometer. The measured spectral data was subjected to absorbance second-order derivative spectral conversion, and multiple regression analysis was performed to create a calibration model to estimate the fat content between chemical analysis values. A total of nine dried mackerel were used as the measurement samples, with a fat content of 6.8-14.1%. Light source lamps with high single correlation coefficients between second derivative spectrum data of the fat absorption band and chemical analysis values were $r=0.79$ for halogen lamps, followed by $r=0.73$ for broadband LEDs. There was a significant difference from narrowband near-infrared LEDs with $r=0.41$. Therefore, although not equivalent to conventional halogen lamps, broadband LEDs are considered desirable as a light source to replace them.

Keywords: Near-infrared spectrophotometer, Light emitting diode, Non-destructive determination, Fat content