

生物センシング工学

— 光と音による生物計測 —

近藤	直	
小川	雄一	編著
鈴木	哲仁	
西津	貴久	共著
椎木	友朗	

コロナ社

はじめに

「生物センシング工学」というタイトルは、2012年から京都大学農学研究科の一つの教育研究分野の名称として使い始めた言葉であり、編者ら所属教員が提供する科目の一つにもなっている。本分野は1925年、京都大学に「農業機械学」講座が設置されてから45年を経た1970年に3番目の農業機械関係の講座として設置された「農産加工機械学」を前身としており、比較的新しい研究分野といえる。その後、1995年に「農産加工学」と分野名を変更したが、その間、収穫後の機械やセンサを開発するための農産物の物理的特性の計測を基礎として発展してきた。

その名称変更でもわかるように、当講座が設置された後、機械工学が基盤技術となると同時に、機械自身を研究対象とすることは少なくなり、種々の工学的手法を用いたセンシングシステムが主たる研究対象となった。計測対象としては農産物にとどまらず畜産物や水産物まで幅広く取り込まれ、その計測手法は力学・熱、音・振動、電気、光・画像に加えて、最近では生化学にも及ぶ勢いである。

生物材料の特性については、すでにコロナ社より2巻に分けて出版した「農産物性科学(1)および(2)」があるのでご参照願いたい。本書では、それらで詳述した手法の中でも特に非接触で迅速にセンシング可能な「分光」、「画像」、「共鳴」、「音響伝播」を利用したものに絞って解説している。特に、生物材料から目的の情報をセンシングするための手法を中心に紹介することで、生物を対象とする多くの計測に貢献することを目的とする。また、「画像」や「照明」に関わる箇所については、これも既発刊の「農業ロボット(I)」の第2章を中心に記述しており、本書は部分的にそれを改訂したものである。

以下に、章立てならびに編者および筆者を示す。

1章(近藤編)：生物センシング工学とは(近藤)

2章(鈴木編)：計測の基礎(2.1：鈴木、一部「農業ロボット(I)」近藤分を改訂、2.2.1～2.2.3：西津、2.2.4：椎木、2.3.1～2.3.6：小川、2.3.7、2.3.8：椎木)

3章(小川編)：生物を対象とした分光によるセンシング(小川)

4章(近藤編)：生物を対象とした画像のセンシング(近藤、一部「農業ロボット(I)」近藤分を改訂)

5章(近藤編)：生物を対象とした音のセンシング(5.1.1～5.1.3、5.2.1、5.2.3、5.3.1～5.3.3、5.3.5：西津、5.2.2、5.3.4：椎木)

生物センシングそのものが対象とする範囲は、食料生産を目的とした生物材料の器官・群落レベルの計測に限らず、細胞・分子レベルのスケールまでカバーするとともに、食料はもとより生命や

環境の計測も含む。本書は京都大学農学部地域環境工学科が開講する「生物センシング工学」という3回生配当の授業の教科書として用いる目的で構成されているため、かなり食料生産における器官レベルの生物センシングを意識している。しかし、近年の農学の範囲は食料生産にとどまらず、生命および環境にも及ぶことより、それらに対しても本書で学んだことを基に積極的に自学自習されることを期待している。

一般に言われることであるが、理系の理論や技術はテキスト等の熟読だけでなく、自らの実験によって理解が深まり、習得が容易となる。特に生物を対象としたものは読んだだけではイメージできなかつたところが明らかになるだけでなく、さらなる好奇心を呼び起こすことや、新たな発見となることも多い。「5.3.3 音響共鳴計測システムの自作指南」では、読者自身でヘルムホルツ共鳴実験を簡便に試してもらうため、著者の一人である西津教授のご好意により、計測・解析用ソフトウェア (volume.exe) をコロナ社のホームページで読者に公開している (p. 170 参照)。不定形の対象物の体積計測、音響の周波数解析を理解するための自己学習教材として役立つものと信じている。

本書の基本的な構成は、各章ともまずセンシング手法に関する基礎知識・理論ならびに手法の説明の後に応用例を解説している。応用例の説明では実験や実習等の副読本としても利用可能となるよう、また実際に農産物を扱った実験等が容易となるよう、写真や図を多く取り入れている。

本書では読者が生物を計測するシステムを自分自身で構成できるよう、また陥りやすい失敗を自分で発見できるような書き方としたつもりではあるが、まだまだ満足のいくレベルまで到達していない。近い将来、読者からのご批判、ご意見を基に、是非改訂したいと考えている。そのためにもできるだけ関係のある読者（例えば農学部のみならず、環境学部、工学部、情報学部等の学部学生および大学院生）に読んでいただき、生物の多様性や複雑性に基づくセンシングの難しさと面白さを体感してもらいたい。

最後に、本書の企画段階から深い理解で協力をして頂いた株式会社コロナ社の諸氏に感謝の意を表す。

2016年7月

近藤 直

目 次

1 生物センシング工学とは

1.1 生物センシングの対象	1
1.2 生物センシングと食料生産に関わる問題	1
1.3 生物センシングの手法とその計測上の注意	4

2 計測の基礎

2.1 光計測の基礎	7
2.1.1 光とは何か	7
2.1.2 光源の種類と特性	11
2.1.3 光学素子の仕組みと取扱い	18
2.1.4 検出器の種類と特性	22
2.2 音計測の基礎	25
2.2.1 可聴音と超音波	25
2.2.2 発振装置と受振装置	27
2.2.3 音速と吸収	29
2.2.4 ドップラー効果	32
2.3 信号処理	36
2.3.1 信号と雑音	36
2.3.2 フーリエ変換	37
2.3.3 サンプルング定理	39
2.3.4 離散フーリエ変換と高速フーリエ変換	40
2.3.5 ノイズ除去処理	41
2.3.6 ロックインアンプによる微小信号検出	43
2.3.7 M系列と相関処理	45
2.3.8 変調と復調	46
演習問題	48
コラム：「イルカのソナー」	49

3 生物を対象とした分光によるセンシング

3.1 分光センシングの基礎	50
3.1.1 生物材料の特徴	50
3.1.2 分光法の基礎	51
3.1.3 分光装置	56
3.1.4 分光手法	60

3.2	スペクトル解析法	73
3.2.1	前処理	73
3.2.2	多変量解析	76
3.2.3	2次元相関法による解析	80
3.2.4	マルチスペクトル画像の解析	83
3.2.5	時間領域スペクトルの解析	85
3.3	分光センシングの応用例	88
3.3.1	蛍光を利用した農産物の評価	88
3.3.2	近赤外分光法を用いた糖度測定	90
3.3.3	テラヘルツ時間領域分光法を用いた水溶液分析	92
3.3.4	マルチスペクトル画像を用いた物質特定	96
3.3.5	スペクトル変化を利用したセンサ	98
	演習問題	101

4 生物を対象とした画像のセンシング

4.1	画像センシングの基礎	102
4.1.1	生物材料の光学特性	103
4.1.2	照明の照射方法	109
4.1.3	カメラと光学フィルタ	112
4.2	画像解析方法	117
4.2.1	色計測	117
4.2.2	寸法・形状計測	122
4.2.3	ステレオビジョン	127
4.2.4	テクスチャ計測	130
4.2.5	欠陥計測	133
4.3	画像センシングの応用例	135
4.3.1	X線画像による果実の内部品質測定	135
4.3.2	紫外画像による花卉のネクターガイド	136
4.3.3	カラー画像、透過画像を用いたコメのモニタリング	137
4.3.4	透過画像によるカンキツ果実の腐敗検出	138
4.3.5	カンキツ果実の蛍光画像	139
4.3.6	グリーンハウス内での偏光フィルタリング画像	140
4.3.7	ステレオ画像による3次元画像	141
	演習問題	144

5 生物を対象とした音のセンシング

5.1	音のセンシングの基礎	145
5.1.1	生物材料の音響特性	145
5.1.2	パッシブ測定とアクティブ測定	148
5.1.3	波長と計測法の選定	153

5.2 音響計測法	154		
5.2.1 音響共鳴法	154	5.2.2 スペクトル拡散法	159
5.2.3 超音波法	162		
5.3 音のセンシングの応用例	165		
5.3.1 音響共鳴法による果菜類品質（密度、糖 度）の連続測定	165	5.3.2 音響共鳴法による遊泳魚の体積測定	168
5.3.3 音響共鳴計測システムの自作指南	170	5.3.4 スペクトル拡散音波による位置計測	172
5.3.5 超音波法による果菜類の内部品質（密 度、硬さ）測定	175		
演習問題	178		
引用・参考文献	179		
演習問題解答	186		
索引	190		

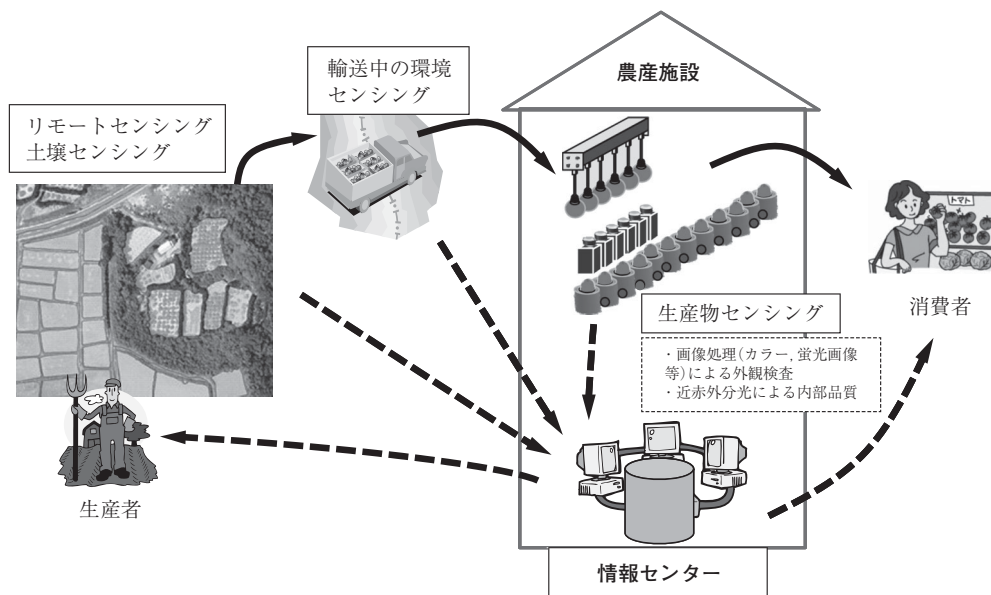


図 1.3 食料生産現場におけるセンシングとその情報の流れの例

1.3 生物センシングの手法とその計測上の注意

センシング手法は、対象物の何を計測するか、どのような対象物を計測するかによって大きく異なる。まず、基礎的な計測項目としては寸法、形状、体積、質量、密度が、また穀粒や粉体であれば流動性やレオロジーがあげられる。熱的特性の計測項目には、温度、熱量、比熱、熱伝導率、熱拡散率などが、力学的特性には、圧力、応力やひずみ、それに伴うポアソン比や弾性、粘性、粘弾性、摩擦、安息角などがある。音響・振動特性としては、周波数（特に共鳴周波数）、対象物の振動の減衰係数の計測を、電気的特性としては、電圧、電気抵抗率、導電率、電気容量、磁束密度、インダクタンス、周波数、誘電率などの計測を行うことがある。さらに、光学的特性としては、反射率、透過率、吸光度、散乱、偏光などの計測を行うことが多い。一方、農産物や食品の香りや味といった生化学的特性⁹⁾も計測することが行われており、化学的手法も生物センシングにおいて重要な位置を占めてきている。

本書では、迅速かつ簡便な非破壊検査が可能で波の性質を有する光と音を用い、複雑で多様な生物を対象にしたセンシング技術の基礎と応用に焦点を当て記述を進める。特に光技術はここ 20 年で非常に進歩し、X 線、紫外線、可視光、近赤外光さらにはテラヘルツ波までを対象とした分光情報あるいは画像情報が、種々の方法で計測されている。近年では、農作物、農産物、畜産物、水産物などの食料や加工食品のみならず、ヒトの細胞中の水溶液ならびに水和状態・水素結合の評価にまで研究¹⁰⁾は及んでいる。音においても、不定形な農産物や水産物を対象にして、共鳴現象を利用した体積計測が空気中ならびに水中で行えること^{11), 12)}、安価で簡便な装置で位置検出の可能性が

あること¹³⁾などの理由より、種々のセンシングを可能としている。

本書で学ばれる読者には、対象物が生物材料であるというだけで、その技術は工業材料とは大きく異なることの面白さに気づいてもらえればと考えている。特に、冒頭で述べた多様で複雑な構造を有し、継時的変化にも気を配る必要のある生物を対象としたセンシングにおいては、単に既成の装置を購入し、それで計測結果を得て解析を行うということだけでは正確な計測が行えないことが多い。本書では読者が対象物の特性を知ったうえで、計測システムを自分自身で構成できること、また陥りやすい失敗を自分自身で発見できることを目標に記述する。

そのわかりやすい例として、画像を用いたセンシングについてここで述べる。画像は対象物の色、形状、寸法などを容易に抽出可能で、比較的手軽に計測できることから簡便に用いられる計測方法の一つであるが、生物材料の表面は多層性を有し、その特性が時々刻々と変化していくことより、画像入力の際には正確なハードウェアのセッティングを心掛けてほしい。

まず、生物材料（例えば果実）を手に入れるときは、スーパーマーケットなどで購入するのではなく、できれば自分自身で収穫から手掛けてほしい。というのは、同じ品種でも株や樹木によってばらつきがあり、材料の特性が微妙に、あるいは大きく異なることもあるからである。また、一つの果実中でも部位によって（例えば果柄に近い部分、中央部、果頂部）特性が異なる。さらに、その特性は時々刻々と変化するため、材料の保存環境（温湿度、空気組成など）や経過時間にも留意してほしい。特に、魚類、肉類は水分の蒸発や品質の劣化が起りやすい。

一般に、果実などは不定形で、その表皮にクチクラ層や特別な構造を有するものが多いことより、ハレーションや影が計測の障害とならないよう、各種フィルタの利用、最適な光の入射角を考慮して（例えばブリュースター角にしてp偏光を最小にするなど）システムを構築することをお薦めする。実際、光源からの光はクチクラ層表面で反射する光、ならびに表皮で吸収、散乱してカメラに入力される光に分けられるため、同じ装置を用いても目的に応じてフィルタなどの調整を行うことで、**図 1.4**のように異なる画像を得ることができる。

色を計測するのであれば、生物材料の特徴に基づき、光源の色温度、強度、対象物への入射角などを決めるが、ハロゲンランプなどの光源では、入力電圧が色温度、強度、寿命を変化させること

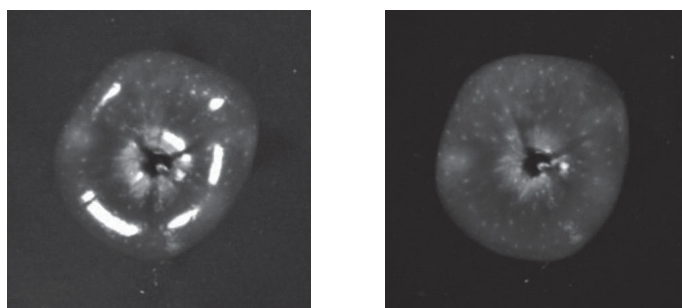


図 1.4 異なる偏光フィルタの調整によるリンゴの画像

6 1. 生物センシング工学とは

より、まず0.01 V単位で電圧調整をしてもらいたい。続いて必要となる感度を有するカメラおよびレンズを選択し、ピントを合わせた後、露光およびホワイトバランスなどのセッティングを行う。3次元的な奥行きや変化を有する対象物では、カメラレンズのF値、シャッタースピードを調整し、被写界深度をどの程度深くするかということも、対象物に応じて慎重に決定しなくてはならない。

このような計測を心掛ければ、繊細な生物材料を対象としたセンシング技術を学ぶことは、種々の問題解決能力を高めることにつながる。同時に、光や音という手段を通じて生物という非常に多様で奥深い対象物を、より深く知る喜びを感じてもらえると確信している。生物は研究者にとってはまだまだ知られていないことの多い対象物であると同時に、今後も変化していく対象物であることから、研究対象の宝庫であるといえる。本書で学ぶ学生には、是非とも物理、生物、化学などを幅広く勉強して、生物材料を計測する面白さを味わってもらいたい。

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.6)$$

ここで、 h はプランク定数 ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$)、 c は真空中における光速 ($2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$) を表す。この式は電磁波の波長に応じてエネルギーが異なることを意味しており、スペクトル計測からさまざまな情報が得られる所以である。詳細は3章を参照されたい。

ここまでは、電界も磁界も同じ向きに1平面上で振動する場合を想定してきた。このように、電界や磁界の振動が特定の方向に偏った状態のことを**偏光** (polarization) といい、なかでも上記のように振動の向きが一定のものを直線偏光という。一方、一般に電界と磁界は、大きさも向きも時間とともに変化するベクトルで表される。偏光のうち、振動面が時間とともに変化するものは楕円偏光と呼ばれる。これは、同じ方向に進む二つの直線偏光に分解して考えるとわかりやすい³⁾。

図2.4のように z 方向に伝播する偏光光を x 方向と y 方向に分解したときに、両者の位相のずれが0または π であれば合成波は直線偏光となり、そうでなければ楕円偏光となる。さらに大きさが同じで位相がちょうど $\pm \pi/2$ ずれる場合には、ベクトルの先が一方方向に回転して真円を描き、これを円偏光と呼ぶ。

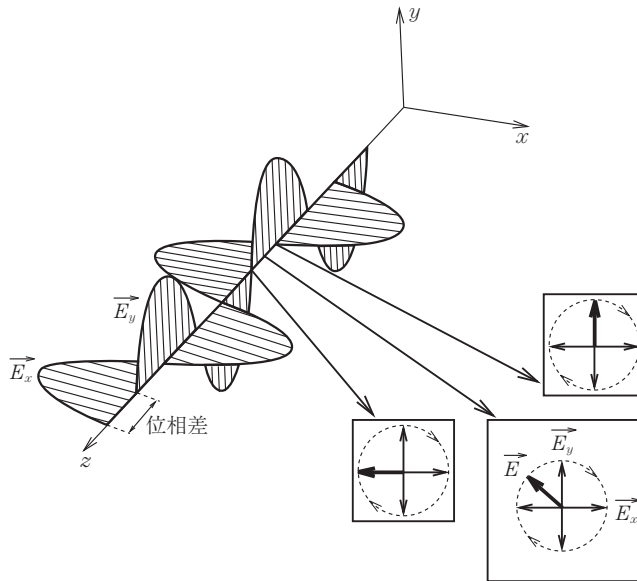


図2.4 電界の振動面と偏光³⁾を改変

つぎに、物質に対して直線偏光の光が斜めに入射する場合を考える (図2.5)。入射光、反射光、透過光の光路を含む面を入射面と呼び、この入射面と電場の振動面が直交する場合をs偏光、重なる場合をp偏光と呼ぶ。物質からの反射率は、偏光の向きや入射角によって変化する。特にp偏光では、反射率がきわめて小さくなる角度が存在し、その角度のことを**ブリュースター角** (Brewster's angle) と呼ぶ。

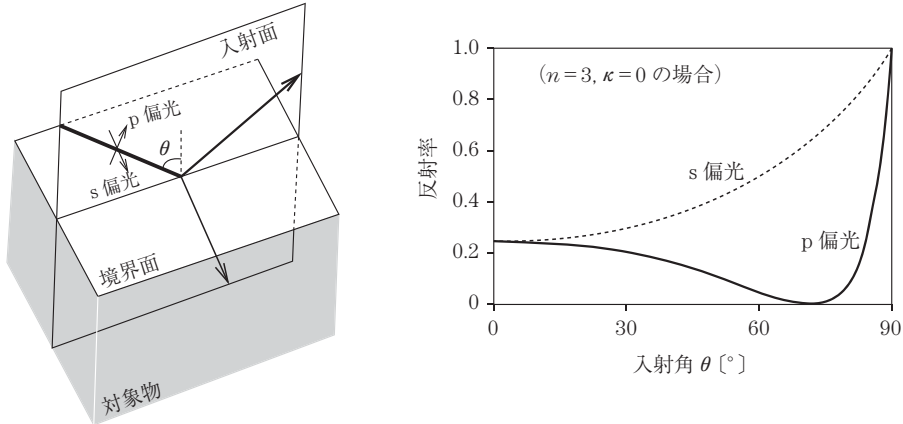


図 2.5 偏光の種類と反射率

2.1.2 光源の種類と特性

研究用途では、強力な光源といえばレーザーが用いられる。レーザーは発振器によって増幅され、波の位相がそろった状態の光源である。このように波の位相がそろっており干渉しやすい光をコヒーレント光、白熱ランプ光や太陽光のように、位相のそろっていない状態の光をインコヒーレント光という。レーザーは出力パワーが大きいために、光源としてのみならず、金属加工などにも用いられている。出力波形によってさらに CW (continuous wave, 連続波) の場合とパルス波の場合に分けられる。CW はスペクトル線幅が狭くパワーが集中しているのが特徴で、波長を走査して高感度高分解能な分光が可能になる。一方、パルスは、位相のそろったさまざまな波長の波が重なってできる波形であるため、スペクトル分布が広い。時間が短くパワーの大きなパルスレーザーは、非線形効果の研究にも用いられるほか、時間領域分光、時間応答を計測する用途などにも用いられる。

一方でレーザー、環境変化によって動作が不安定になりやすく、コヒーレントであるために光路調整にも手がかかるため、特殊な用途を除き、汎用的な分光光度計やマシンビジョンにはインコヒーレントな光源が用いられる。分光とマシンビジョンでは共通する光源も多くあるものの、波長帯域の違いや輝度、寿命などによってさまざまな種類があり、それぞれの特徴を把握していないと思わぬ誤用をしてしまうこともある。本項では、インコヒーレント光源を対象に、選定に必要な基礎知識とともに光源の種類と特徴を説明する。

夜空に浮かぶ恒星がそうであるように、物体が高温になると赤みを帯び、さらに温度が上がると発光が可視領域全体に及び、青白く見えるようになる。すなわち、ある高温の物質が光源となるとき、その温度によって放射光の分光分布が決まる。そのため、ある光源が発する光の色について、同じ色の放射をする高温の黒体に置き換えて表現され、この温度のことを**色温度** (color temperature) と呼び K (ケルビン) で表す。例えば、昼間の太陽光は約 5 000 K 程度、後述するハロゲンランプは 2 700～3 500 K 程度のものが多い。黒体放射の輝度 I は、色温度 T と波長 λ からプランクの法則⁴⁾で説明され、式(2.7)で表される。

3

生物を対象とした 分光によるセンシング

3.1 分光センシングの基礎

3.1.1 生物材料の特徴

われわれヒトの体を構成する物質は、タンパク質、脂質、糖質、無機質がそれぞれ約16%、13.5%、0.5%、4%と言われており、残りの約66%が水とされている。一方、農産物では水の存在割合はさらに多く、葉物野菜だと含水率は95%に達すると言われている。つまり水分子の大きさが分子量18という大きさを考えると、生物は圧倒的多数の水分子で構成されていると考えることができ、そこにタンパク質や脂質、イオンなどが混ざった混合液のようなものと考えることができる。

他方で、生物の体は分子、細胞小器官、細胞、組織、器官、個体と階層化された構造をもち、その大きさの広がり、分子サイズのナノメートル (10^{-9} m) から個体サイズのメートルオーダーまで、8~9桁ものレンジをもったさまざまな大きさの物質で構成されていることを意味する(図3.1)。このような事実を若干乱暴に総括すると、生物は混合液で満たされた細胞という小さな袋が一見無秩序に並び、それを俯瞰すると、組織あるいは臓器になって構成されているものと考えることができる。

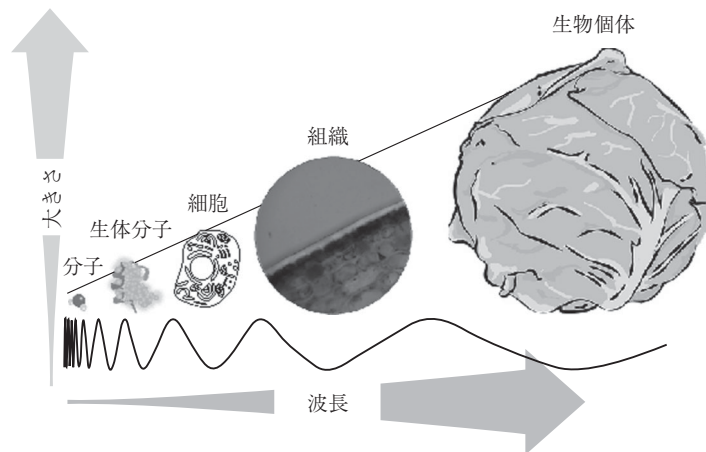


図3.1 対象物のサイズと波長

このような生物材料に対して、本章では光（電磁波）を用いた分光法について述べたい。光は波としての性質をもつことから、**回折**（diffraction）や**散乱**（scattering）といった現象を見せる。この現象は、物質と光との相互作用によって生じ、その作用は大雑把にいうと物質のサイズと波長の長さの関係に関連付けられる。そして本章では、波長 200 nm の紫外線から 1 mm 程度のテラヘルツ波までの光（電磁波）を扱う。

この光は先述のようなさまざまなサイズや誘電特性をもつ対象物と相互作用し、場合によってはそれらがノイズとなり、本来得たかった情報とは異なる情報をつかまされる場面が生じる。そのため、われわれはつねにどういった生物材料を測定対象としているのか、そういった対象物を分光測定する場合にはどういったことに注意すべきかなどを知っておく必要がある。この点は、分析化学のように極力不要なものを除去した対象物を分光分析するのとは異なる。

生物材料の特徴は、先述のとおり階層化されている点にある。そしてそこから化学分析的手法でサンプリングすると、分析はしやすくなるが、生物としての特徴もしくは生物内での状態が失われる場合がある。また、個体としての特性を分光分析したいにも関わらず、一部を取り出して測定することで、個体そのものとは異なる情報になってしまうことも予想される。そのため、できるだけ多くの情報を残して分光分析に供する方が望ましいわけであるが、そうすると必ずスペクトルが複雑になり解析が困難になる。つまり抽出したら観測できていた吸収ピークが、混合物のままだと見えなくなるといったことが起こる。さらには、実験結果にばらつきが多くなる。

われわれが測定対象にしている生物材料は工業材料と異なり、もともとばらつきをもつことが大きな特徴である。すなわち、われわれの実験結果にはつねに生物由来のばらつきが含まれることになるが、じつはそのばらつきの中にこそ、生物材料の本質が含まれていることがある。少なくとも、これらのことを予想したうえで実験データを見ることは重要であり、以降の項では分光法の基本とともに、生物材料を測定する場合に注意すべき点や、複雑なスペクトルの中から目的の情報を引き出す解析手法についても紹介したい。

3.1.2 分光法の基礎

(1) 分光法と原子・分子の性質 分光法とは、光に対する対象物の応答を調べる分析法で、対象物の組成やそこに含まれる物質の成分量を知ることができる。具体的には、分光する（光を分ける）ことで、波長の異なる光で生じる吸収や発光量を、光の波長や振動数などを横軸としたスペクトルデータとして得ることを特徴とする。

このとき、2.1 節で述べたとおり、光（電磁波）のもつエネルギーと振動数は比例関係をもつため、異なる振動数の光は異なるエネルギーを有しており、例えば赤外吸収の場合、対象物に赤外線を照射すると対象物を構成している分子がその分子構造に応じたエネルギーを吸収し、振動や回転の状態が変化する。このエネルギー吸収は量子化されているため、特定の振動数の電磁波に対してのみ生じる。その結果、対象物を透過した赤外線は特定の振動数の赤外線が減衰が生じ、対象物中の分子に吸収された痕跡が吸収スペクトルとして表れる。言い方を変えると、原子や分子は量子化

図 5.29 は、掛川市のキウイフルーツ園で 2005 年と 2007 年に、収穫直後のキウイフルーツ (2000 個程度) を無作為に選んで本装置で密度を測定したものである。2005 年に比較して 2007 年の密度分布が低下、つまり例年よりフルーツの糖度が低めになったことがわかる。2007 年は夏が例年よりも高温で年間降水量も年間よりも少なく、低品質化をまねいたものと考えられる。

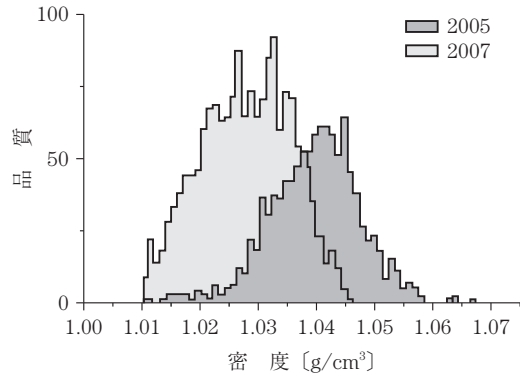
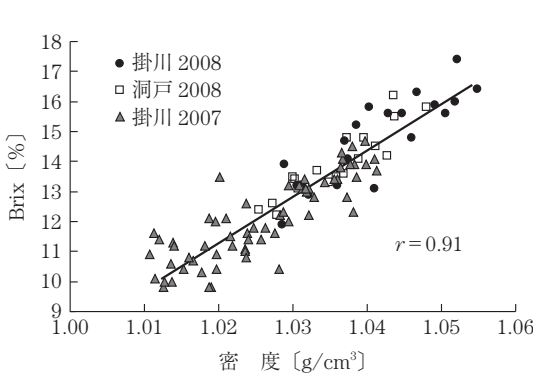


図 5.28 収穫直後のキウイフルーツ密度と追熟後の糖度

図 5.29 収穫直年度別のキウイフルーツ密度分布

(3) コンベア式連続測定 図 5.26(d) の対向する 2 本のネックを貫いてコンベアベルトを設置し、コンベア上を流れる対象物の体積を連続的に測定できるようにした装置を図 5.30 に示す。物体が空洞部にあるときの周波数を式(5.23)に代入して、物体体積 V を推定することができる。コンベアで移動する木片の体積を開放型ヘルムホルツ共鳴方式で測定した結果、コンベアスピードが 30 mm/s 以下では物体体積と推定値の間の決定係数 r_2 が 0.99, 45 mm/s では 0.97 であった²⁹⁾。質量測定用のデバイスを組み込むことで、糖度や澱粉価による選果に供することが可能である。

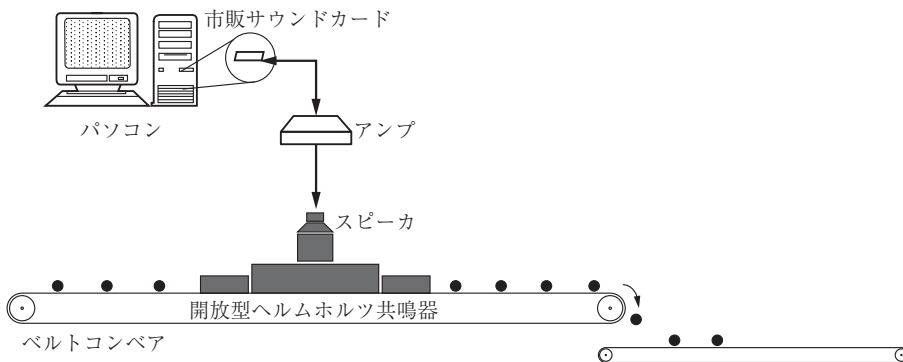


図 5.30 開放型ヘルムホルツ共鳴器を用いた連続測定系の概略²⁹⁾

索 引

【あ】

アクティブ測定 148
 アコースティックエミッション 148
 圧縮率 168
 圧電型スピーカ 27
 圧電体 27
 アンダーフィッティング 78

【い】

異時相関スペクトル 81
 異常透過 100
 位 相 9
 位相差スペクトル 86
 位相敏感検波 43
 位相補正項 70
 移動鏡 58
 イメージセンサ 112
 色温度 11
 色収差 20
 インピーダンス整合 147
 インピーダンスマッチング 147

【う】

ウィーンの法則 12
 鰐 168

【え】

永久双極子モーメント 52
 映像信号 102
 エキスポネンシャルホーン 28
 エッジ検出フィルタ 133
 エネルギー透過率 86
 エバネッセント波 71
 円形度 123
 円形比 125
 遠心度 124
 円錐ホーン 28
 遠赤外領域 107

【お】

遅い緩和 93
 オーバーフィッティング 78
 オパールガラス法 66
 音響共鳴法 154

音 速 152,163

【か】

カイ二乗値 95
 回 折 51,55
 回折格子 21,57
 外部摂動 81
 外部反射 69
 ガウシアンフィルタ 135
 画 角 113
 拡散透過法 66
 拡散反射法 67
 角周波数 94
 角振動数 8
 可視領域 103
 画像間演算 121
 可聴域 162
 可聴音 25,26
 環境問題 3
 干渉計 58
 干渉波 58
 慣性等価楕円径 123
 間接照射方式 109
 観測行列 174
 緩和時間 94

【き】

疑似雑音符号 45
 基底状態 53
 吸光度 53
 吸収係数 9,53,68,152,163
 吸収スペクトル 51
 共 振 155
 共進化 103
 共 鳴 155
 共鳴現象 154
 共鳴周波数 94,155
 極性分子 52
 寄与率 80
 近赤外領域 103
 金属メッシュ 100

【く】

空間フィルタ 133
 クチクラ 104

クチクラ層 104
 屈折率 9,111
 クベルカー-ムンク関数 68
 クマリン系 108
 クラスタ分析 79
 グラディエント 133
 クロスバリデーション 77
 クロロフィル吸収帯 103

【け】

計画行列 174
 蛍 光 53
 蛍光画像 139
 蛍光指紋 90
 蛍光寿命 54
 蛍光特性 108
 蛍光波長 89
 蛍光物質 108
 形状特徴量 123
 決定係数 76
 ケモメトリクス 90
 原刺激波長 117
 減衰全反射法 71
 減衰定数 94
 検量線標準誤差 76

【こ】

硬 X 線 135
 光学セル 61
 光学フィルタ 116
 項間交差 54
 高周波極限 94
 高速フーリエ変換 41
 光電子増倍管 (PMT) 23
 光路長 61
 黒体放射 57,58,59
 国連環境計画 3
 国連食糧農業機関 2
 固定鏡 58
 コニカルホーン 28
 固有音響インピーダンス 28,146
 固有振動数 154
 固有値 79
 昆 虫 106
 コンデンサ型マイクロフォン 28

【さ】

最大弦長	122
最大長シフトレジスタ系列	45
彩 度	120
魚の反射率	106
サージ電流	37
差スペクトル	73
三刺激値	117
サンプリング定理	40
散 乱	51,55
散乱係数	68

【し】

紫外領域	103
時間波形	88
時間領域分光装置	59
時間領域分光法	85
色 相	120
色 度	117
色度図	119
色度変換	117
自己相関ピーク	81
指数ホーン	28
自然光散乱	65
視点の対象物方向移動による方法	128
しみ出し深さ	72
視野角	113
シャッタースピード	108
重回帰分析	76
周 期	153
収 差	20
重心距離差	124
自由水	93
重相関係数	76
柔組織細胞	104
周波数	153
主成分回帰分析	76
主成分分析	79
錠剤法	65
消衰係数	9
焦点距離	18
照度ムラ	116
食品ロス	3
食料問題	3
シングルビーム方式	57
振 動	25
振動強度	94
振 幅	8
振幅反射係数	70

【す】

水和水	93
ステファン-ボルツマンの法則	12
ステレオ画像法	127
ステレオビジョン	127
ストークスシフト	54
スペクトル拡散法	159
スムージング	74

【せ】

静電型マイクロフォン	28
静電容量式の体積測定法	165
正透過法	64
精度劣化指数	174
生物材料	5
精密農業	3
世界人口	1
赤外活性	52
赤外分光法	52
積分球	66
絶対拡散反射率	68
説明変数	76
ゼロフィリング	58
遷 移	53
占有度	124

【そ】

双極子モーメント	52
相互相関ピーク	81
相対拡散反射率	68,69
ソバル	134

【た】

対角幅	122
対称度	124
体積測定法	157
体積弾性率	168,169
ダイナミック型スピーカ	27
ダイナミック型マイクロフォン	28
打音法	156
多重共線性	77
多重反射	86
縦 波	25
縦波音速	152
ダブルビーム方式	57
多変量	76
多変量解析	76
単色収差	20
弾性率	152

【ち】

地球温暖化	3
超音波	25,162
超低周波音	26
直接照射方式	109
直接放射型スピーカ	27
直交検波	34
直交ニコル	109

【て】

テクスチャ	103,130
テクスチャ計測	130
テラヘルツ時間領域分光法	59
テラヘルツ帯	107
テラヘルツ領域	107

【と】

等価円直径	123
透過画像	138
透過セル	60
透過特性	107
透過法	60,163
同時生起行列	130
同時相関スペクトル	81
動電型スピーカ	27
動電型マイクロフォン	28
到来時刻	173
到来時刻差	173
特徴ベースマッチング	127,141
土 壤	105
土壤センサ	107
ドップラー効果	32
ドップラー偏移周波数	34
ドーム	110
トレーサビリティシステム	3

【な】

内外接円径比	125
内部反射	69
軟 X 線	107,135

【に】

肉の反射特性	105
二次微分	74

【ぬ】

ヌジョール	65
-------	----

【ね】

ネクターガイド	136
---------	-----

【の】		フラボノイド系	108	【む】	
ノイズ	36	プランクの法則	59	無極性分子	52
濃度共起行列	131	フーリエ変換	37,131	無限媒体	153,154
【は】		フーリエ変換型分光装置	58	【め】	
ハイパスフィルタ	42	ブリュアン散乱	65	明 度	120
バイモルフ型振動子	27	ブリュースター角	10,69,111	メディアンフィルタ	135
白熱ランプ	14	ブレイズ角	22	【も】	
波 数	8	ブレイズト回折格子	22	目的変数	76
波 長	8,153	ブレイズ波長	22	モノクロメータ	58
バックライト	137	プレビット	133	モーメント	127
発光波長	89	プログレッシブタイプ	112	モル吸光係数	53
パッシブ測定	148	フロントライト	137	【ゆ】	
波 動	25	分 極	52	有限媒体	153,154
波動方程式	26	分光イメージング	96	【よ】	
速い緩和	93	分光器	56	横 波	26
バルク水の遅い緩和	94	分光反射特性	103	【ら】	
ハレーション	104	分光法	51	ラブラシアン	134
ハロゲンサイクル	14	分散型分光装置	56	ラマン活性	52
ハロゲンランプ	14	【へ】		ラマン散乱	65
反射特性	103	平滑化	74	ラマン分光法	52,65
反射法	69	平滑化フィルタ	134	ランダムトリガ機能	113
バンドパスフィルタ	42	平均化フィルタ	134	【り】	
判別分析	78	ヘルムホルツ共鳴	157	粒径パラメータ	64
【ひ】		偏 光	10	硫酸バリウム	66
被写界深度	116	偏光フィルタ	109	粒子速度	26
非破壊検査	4	偏光フィルタリング画像	140	領域ベースマッチング	130,142
微分処理	74	変 調	46	臨界角	71
ビームスプリッタ	58	【ほ】		りん光	53
標準化	80	放射インピーダンス	28	隣接平均法	74
標準偏差	77	ホワイトバランス	115	【る】	
表皮構造	104	ホーン型スピーカ	27	累積寄与率	80
表皮細胞	104	【ま】		ルミネセンス	108
表面プラズモン	98	マイケルソン干渉計	58	【れ】	
表面プラズモン共鳴	99	前処理	73	励起一重項状態	53
【ふ】		曲がり	126	励起蛍光マトリクス	89
フィッティング	95	マシンビジョン	102	励起三重項状態	54
フェレ長	123	窓関数	39	励起状態	53
フェレ長比	123	マハラノビスの汎距離	78	レイリ-散乱	64,65
不均一分散系	64	マルチスペクトル画像	83,97,107	【ろ】	
複雑度	124	丸み度	125	ローディング	73
複素音速	31,152	マンセル表色系	120	ローパスフィルタ	42
複素屈折率	9,85	【み】		ロックインアンプ	43
複素振幅透過率	86	ミー散乱	64		
複素弾性率	31,152	水の吸収帯	104		
複素フーリエ変換	86	水の速い緩和	94		
複素誘電率	85,94	水分子間伸縮振動	94		
復 調	46				
ブラックライト	136				

<p>【数字】</p> <p>2次元相関法 80</p> <p>【A】</p> <p>AE 148 ATR スペクトル 72 ATR プリズム 71 ATR 補正 72</p> <p>【B】</p> <p>BIAS 77 BPSK 47 Brewster's angle 10</p> <p>【C】</p> <p>CCD 112 Czerny-Turner 型 57 C マウント 113</p> <p>【D】</p> <p>Debye-Lorentz 関数 94 Debye 緩和モード 93</p> <p>【F】</p> <p>FAO 2 FIR フィルタ 42 F 値 108, 113</p> <p>【G】</p> <p>GFP 89 GPS 方式 172</p>	<p>【H】</p> <p>HSI 117 HSI 変換 120</p> <p>【I】</p> <p>IGPS 方式 172 IIR フィルタ 42</p> <p>【K】</p> <p>KBr 66 Kramers-Kronig 解析 70</p> <p>【L】</p> <p>$L^*a^*b^*$ 117 $L^*a^*b^*$ 変換 119 Lambert-Beer 則 53 Levenberg-Marquardt 法 95 Lorentz 振動モード 93</p> <p>【M】</p> <p>MLR 76 MOS 112 MSC 75 M 系列符号 45</p> <p>【P】</p> <p>PCA 79 PCR 76 PLS 回帰分析 76 p 偏光 111</p> <p>【R】</p> <p>RAS 法 69</p>	<p>RGB 信号 117 RMSEP 77</p> <p>【S】</p> <p>Savitzky-Golay 法 74 SEC 77 SECV 77 SEP 77 SNV 75 SPR 99 SXGA 113 s 偏光 111</p> <p>【T】</p> <p>THz-TDS 59</p> <p>【U】</p> <p>UNEP 3 UV-A 107 UV-B 107 UV-C 107 UXGA 113</p> <p>【V】</p> <p>VGA 113</p> <p>【X】</p> <p>XGA 113 XYZ 表色系 118 X 線 CT 135</p> <p>【その他】</p> <p>γ 補正 116</p>
---	--	--

—編著者・著者略歴—

近藤 直 (こんどう なおし)

1984年 京都大学大学院農学研究科修士課程修了
1993年 岡山大学助教授
2000年 石井工業株式会社技術開発部 部長
2006年 愛媛大学教授
2007年 京都大学教授
現在に至る

小川 雄一 (おがわ ゆういち)

1997年 岡山大学大学院農学研究科修士課程修了
1997年 ヤンマー農機中央研究所
2003年 理化学研究所川瀬独立主幹研究ユニット
ユニット研究員
2004年 東北大学助手
2005年 東北大学助教授
2009年 京都大学准教授
現在に至る

鈴木 哲仁 (すずき てつひと)

2012年 京都大学大学院農学研究科修士課程修了
2012年 日本学術振興会特別研究員 (DC1)
2013年 京都大学助教
現在に至る

椎木 友朗 (しいぎ ともを)

2012年 京都大学大学院農学研究科博士課程研究
指導認定
2015年 水産大学校助教
現在に至る

西津 貴久 (にしづ たかひさ)

1989年 京都大学農学部農業工学科卒業
1990年 京都大学助手
2008年 岐阜大学准教授
2014年 岐阜大学教授
現在に至る

生物センシング工学 —光と音による生物計測—

Bio-Sensing Engineering

—Optical and Acoustic Measurement for Biological Material—

© Kondo, Ogawa, Suzuki, Nishizu, Shiigi 2016

2016年9月28日 初版第1刷発行



検印省略

編著者 近藤 直
小川 雄一
鈴木 哲仁
著者 西津 貴久
椎木 友朗
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-06752-1 (高橋) (製本: 愛千製本所)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします