

2波長から計算される特徴量の逆投影による 果実内糖度分布推定

岩口 堯史^{1,a)} 久保 尋之¹ 向川 康博¹

概要: 本稿では、我々の果実内糖度分布推定のための取り組みを紹介する。糖などの化学物質は固有の吸収スペクトルを持つため、透過光のスペクトルに影響を与える。そこで、分光器を用いた実験では、糖の吸収スペクトルにおいて吸収が特徴的な波長を調査し、この波長を利用することで実際の果実の糖度の違いが判別可能であることを示す。次に、糖の吸収スペクトルを踏まえ、我々は2波長から計算される糖度を近似する特徴量を定義し、この特徴量を利用することで、分光器ではなく、カメラと帯域通過フィルタの簡易な計測系により、物体断面の糖度の違いを可視化できることを示す。さらに、CTの要領で特徴量を逆投影することにより、物体断面の糖度分布推定を試みる。

1. はじめに

今日では、農作物の流通の国際化により、日本国内においても世界各地で生産された青果が店頭に並ぶようになっており、厳しい価格競争が行われている。生産者たちは、自らの青果商品が消費者に選ばれるように、様々な方法で商品の差別化を試みている。特に国内の果物生産者にとっては、安価な輸入品に対抗するため、果実の計測により果実品質を保証し、高付加価値化することが重要になっている。

果実品質を保証するためには、甘さの評価は不可欠である。すでに分光分析による糖度の計測が行われているが、1つの果実につき、平均値の糖度値が示されるだけである。しかし、例えばスイカでは中央部ほど甘いことを我々が経験的に知っているように、実際の果実の糖度は1つの果実でも部位ごとに異なり、必ずしも均一ではない。さらに、日当たりなどの栽培時の環境により、個々の果実はすべて異なった糖度の偏りを持っている。そこで、我々は果実品質の指標として、1点計測で得られた糖度の代表値ではなく、糖度の分布を利用することが、青果商品のさらなる高付加価値化に有効であると考え。商品となる果実の計測を行い、例えば「中までまんべんなく甘い果実」といった情報を消費者に提示することは、購買意欲の向上につながると考えられる。

実際、一般的に果実の糖度分布の重要性は広く認められており、栽培技術や果実品質の向上のために糖度分布に関

する研究が行われてきた。石上ら [1] は、メロンの水平断面の糖度分布を部位ごとの搾汁により計測し、部位により糖度が異なることを明らかにした。また、適期を過ぎて収穫された果実では各部位の糖度の差が小さくなることを示したが、これは糖度分布と果実品質が密接に関連していることを表している。梶浦ら [2] は、ニホンナシの平均糖度を計測するためのサンプリング手法に関する研究の中で、着果時の果実の方位が糖度分布に影響することや、搾汁方法によっても糖度の計測値が変化することを明らかにした。これらは、1点計測による糖度計測や、搾汁による糖度計測の限界を示すものといえる。糖度分布の可視化の例として、杉山ら [3] によるメロンの糖度分布の3次元可視化の研究があげられる。ここでは、特定波長の近赤外光を用いて果実断面を撮影することにより、糖度の可視化を実現している。しかし、この手法は実際に果実を一定間隔ごとにスライスする必要があるため、青果商品の糖度計測には利用できない。

これらの先行研究では、糖度分布計測を果実の切断を伴う破壊的な手法により行っている。しかし、非破壊糖度分布推定が可能になれば、多くの利点がもたらされと考えられる。例えば、果実の全数検査により、高価な果物であっても廃棄することなく計測することができる。また、果実の生長にともなう糖の蓄積過程を経時的に計測するなど、栽培技術の研究への貢献も期待できる。

そこで、我々は果実の糖度分布推定のために非破壊な計測手法を確立することを研究目標とする。その技術の中核は、スペクトル分析による糖度計測と果実内の断層撮影による空間分布の推定の2つである。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

^{a)} iwaguchi.takafumi.il6@is.naist.jp

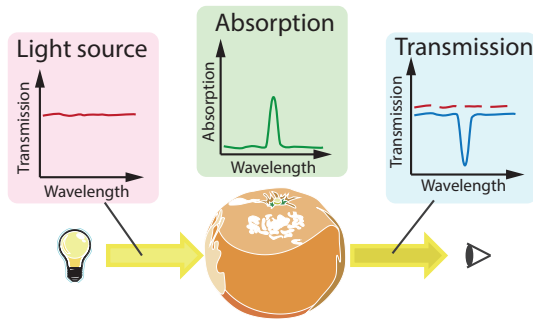


図 1: 化学成分によるスペクトル吸収

しかし、断層撮影では広範囲の撮像が必要であるにもかかわらず、分光器は1点計測であることが多いためサンプリングコストが高くなる。そこで、スペクトルから糖度推定を行う代わりに、2波長の計測から計算される特徴量により糖度を近似する。そして、この特徴量をCTの要領で空間に逆投影して断面を再構成することにより、果実の糖度分布を推定する。

2. 糖度を反映する特徴量

2.1 透過スペクトルの変化

まず、透過光のスペクトル計測による成分分析について述べる。化学物質を含む物体を光が通過するときのスペクトル変化を図1に模式的に示す。光源から出た光は、その光源に固有のスペクトルを持っている。光が物体を通過するとき、化学物質の分子と衝突する。このとき、化学物質はそれぞれに固有の吸収スペクトルに従って、入射光の特定の波長のエネルギーを吸収する。また、化学物質の濃度が高く、衝突する分子の個数が増えるほど吸収は強くなる。出射光と入射光のスペクトルの比較により吸収された光のスペクトルが得られ、ここから物体内に含まれる化学物質の種類と含有量を推定できる。

特に、近赤外領域では、吸収スペクトルが大きく異なるため、化学物質の判別が比較的容易である。近赤外光を用いた成分分析手法は、近赤外分光法とよばれ食品の検査などに広く用いられている[4]。現在実用化されている果実の糖度計測も近赤外分光法によるものであり、専用の装置により果実の透過光や反射光のスペクトルを計測し、糖度を推定する。

2.2 特徴量の定式化

前節で述べたように、果実の糖度計測には吸収スペクトルが利用される。吸収スペクトルは分光器により計測されるが、分光器は対象物体のある1箇所の光を集光して計測する、1点計測であることが多い。後述のように、本手法では断層撮影により糖度分布推定を行うために、果実全体に光源を照射したときの透過像を撮影する必要がある。しかし、1点計測の分光器により透過像を撮影するためには、

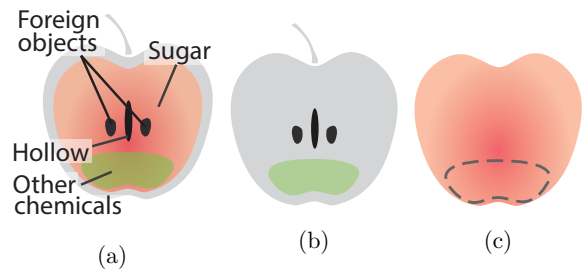


図 2: 糖度の特徴量画像 (a) 依存波長の透過像, (b) 非依存波長の透過像, (c) 差分により得られる特徴量画像

位置を移動しながら計測しなければならないため、装置は大きかりで高価なものになる。さらに、計測時間も長くなるため、計測コストは高い。もし、全波長のスペクトルを用いずに、限られた波長の透過率のみから糖の含有量を推定することができれば、分光器ではなく、帯域通過フィルタとカメラによる簡易な装置で透過像の撮影が可能である。

そこで、本節では2波長の透過率から計算される糖度の特徴量を導入する。ここでは、果実の透過スペクトルに影響を与える要素として、糖、糖以外の化学物質、果実中の空洞と異物を考える。まず、糖の影響が最も大きい波長は、糖が光の吸収を示す波長である。この波長の透過率は糖度に依存するため、この波長を**依存波長**と呼ぶ。しかし、この波長の透過率には、糖だけでなく、糖以外の化学物質と果実中の空洞と異物も影響すると考えられる。そこで、特徴量の計算に用いるもう1つの波長として、糖が光を吸収しない波長を選び、これを**非依存波長**と呼ぶ。この波長の透過率には、糖以外の化学物質と果実中の空洞と異物が影響する。これらより、依存波長の透過像は図2(a)、非依存波長の透過像は図2(b)のようになる。ここで、依存波長と非依存波長の透過率の差分を計算すると、果実中の空洞と異物は両波長の透過率に同じ大きさの影響を与えているため、相殺される。さらに、非依存波長として依存波長に十分近い波長を選ぶとき、糖以外の化学物質の透過率がそれぞれの波長でほぼ等しいと近似できれば、差分を計算すると相殺される。このことを模式的に図2(c)に表す。結果として、依存波長と非依存波長の透過率の差分には、糖による透過率の変化のみが反映されるため、糖度を推定するために有用であると考えられる。そこで本稿では、依存波長と非依存波長の透過率の差分を糖度の特徴量として定義する。

3. 特徴量の逆投影

3.1 全周計測と内部推定

果実の糖度分布推定のための手法を考える。図3は、光の吸収率の高い領域を持つ物体の断面に、複数の方向から平行光を照射したときに対面で計測される透過像を表している。一般に物体により光が吸収される量は、物体の持つ吸収係数と、光が物体中を進んだ距離により決まる。断層

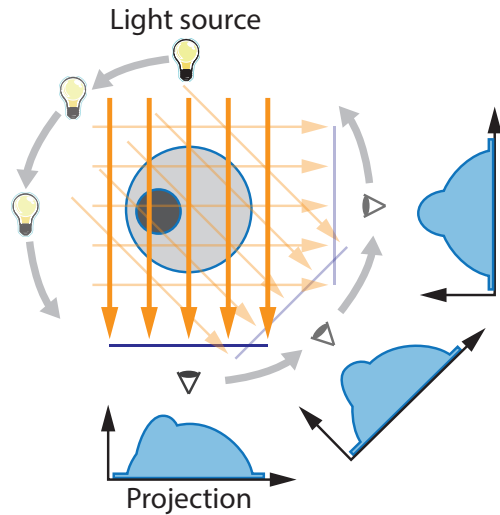


図 3: 物体に光線を照射したときに得られる透過像

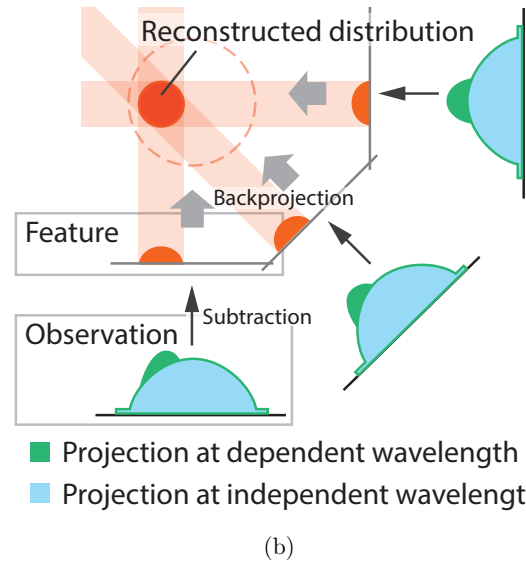
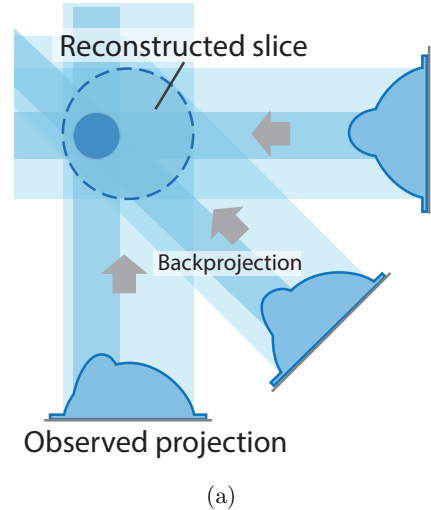
撮影とは、全周から透過像を撮影し、物体断面の吸収係数の分布を再構成することである。前章で述べたように、糖度は近赤外光の吸収率から計算されるため、近赤外光を用いた断層撮影を行うことにより糖度分布が推定できると考えられる。

3.2 逆投影法

断面画像の再構成に用いられる手法に、逆投影法 [5] がある。まず、対象物にある入射方向から近赤外線のパallel光線を照射し、透過像を計測する。次に、物体を回転させ、複数の角度方向からの透過像を撮影する。そして、図 4(a) の模式図で示すように、計測された透過像を撮影方向と逆方向に投影することで、断面画像が再構成される。しかし、逆投影法で再構成された断面画像は、複数の方向からの逆投影が重なり、ボケが生じるため不鮮明である。このボケを軽減した断面画像を得られるようにした手法が、フィルタ補正逆投影法 [5] である。この手法では、透過像にフィルタ処理を行い、エッジを強調した上で逆投影することでより鮮明な断面画像を得る。本研究でも、フィルタ補正逆投影法を用いて断層撮影を行う。

3.3 特徴量の逆投影

前述のように、通常の断層撮影では、計測された透過像を逆投影することで内部の吸収率分布を推定する。本手法では、糖度分布を推定するために、透過像を逆投影する代わりに糖度の特徴量を逆投影する。このときの模式図を図 4(a) に示す。まず、通常の逆投影のときと同じ方法で、糖度の依存波長と非依存波長の全周の透過像を得る。次に、それぞれの角度で計測された透過像の 2 波長の差分をとり、特徴量を計算する。そして、撮影方向と逆方向に投影すると断面の糖度の特徴量分布が得られ、その結果糖度分布が推定できる。



■ Projection at dependent wavelength
■ Projection at independent wavelength

図 4: 逆投影による断面再構成 (a) 透過像の逆投影, (b) 特徴量の逆投影

4. 計測と結果

4.1 分光器を用いた予備実験

本章では、まず糖度が透過スペクトルに与える影響を調査するため、分光器を用いた予備実験を行う。この結果を用いて、本研究では糖度を表す特徴量を新たに定義する。なお、糖度はショ糖濃度と強い相関があると仮定し、ショ糖を用いて一連の実験を行った。

4.1.1 実験装置

図 5 に透過スペクトルを計測するための実験装置を示す。ハロゲン光源から光ファイバにより光線を取り出し、コリメートレンズを通して対象物体に入射させる。そして、物体から出射される光をコリメートレンズにより集光し、光ファイバにより分光器に入力することで透過スペクトルが得られる。なお、分光器には OceanOptics 社製の Maya Pro、光源には同 HL-2000 を使用した。

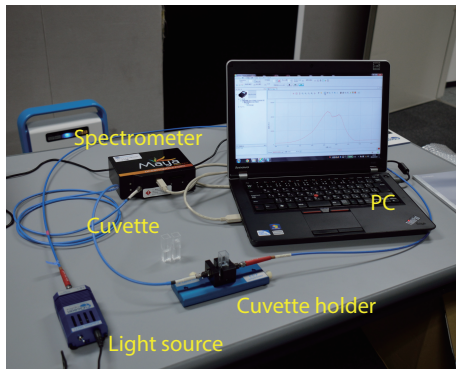
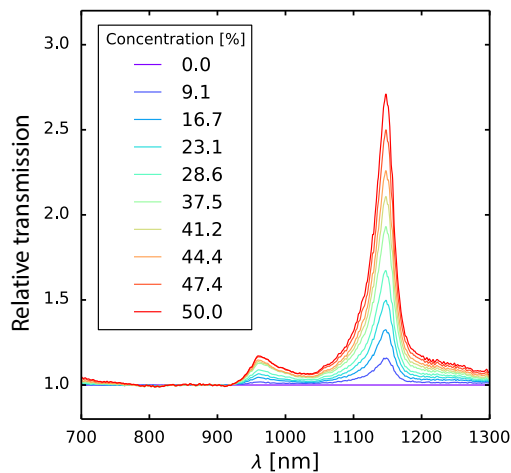
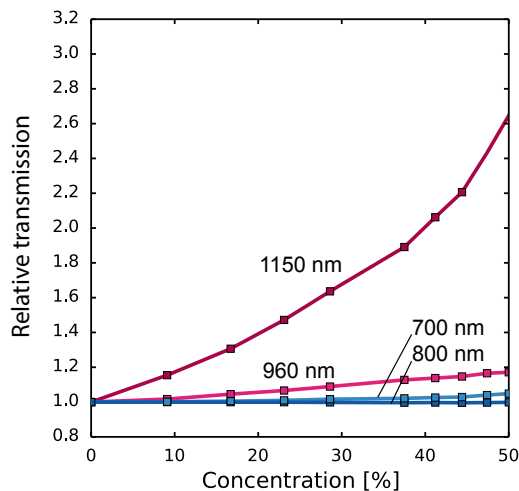


図 5: 分光計測装置



(a)

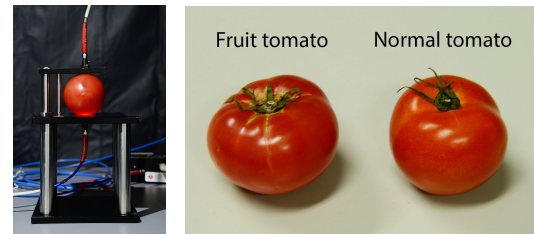


(b)

図 6: ショ糖の透過スペクトル計測 (a) 透過スペクトル, (b) 濃度と透過率の関係

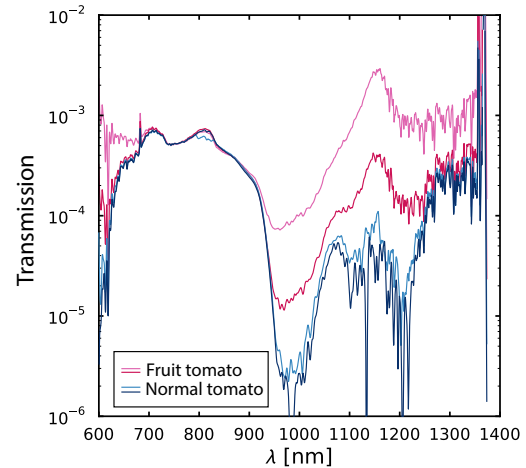
4.1.2 ショ糖の透過スペクトル計測

まず、上で述べた装置を使ってショ糖の透過スペクトルを計測し、糖度が透過スペクトルに影響を与えることを確認する。透過率の濃度依存性を求めるため、0-50%の範囲で濃度が異なるショ糖溶液を用意し、それぞれの透過ス



(a)

(b)



(c)

図 7: 果実の透過スペクトル計測 (a) 計測装置, (b) 計測対象; 左がフルーツトマト, 右が通常のトマト, (c) 糖度の異なるトマトの透過スペクトル

ペクトルを計測する。このとき、溶液は分光計測用のキュベットに注入し、キュベットホルダを用いて計測した。

図 6(a) に水を基準としたときのショ糖溶液の透過スペクトルを示す。まず、最も濃度の高い 50% のショ糖溶液のスペクトルに注目すると、大部分の波長でショ糖の透過率はほぼ 1 であり、水に近い透過スペクトルを持つことがわかる。その一方で、960 nm と 1150 nm の透過率はそれぞれ 1.2 と 2.7 程度であり、他の波長と比較して透過率が高くなっている。次に、他の濃度のショ糖溶液の透過スペクトルに注目すると、50% の溶液と同様に、大部分の波長で水に近い透過スペクトルであるが、やはり 960 nm と 1150 nm で高い透過率を持つことがわかる。濃度と透過率の相関をみるために、700, 800, 960 と 1150 nm の波長について、濃度に対する透過率の変化を図 6(b) に示す。700 nm と 800 nm の透過率は、濃度に関わらずほぼ一定であるため、これらの波長の透過率はショ糖溶液の濃度と無関係であることがわかる。一方、960 nm と 1150 nm の透過率は、濃度に比例して高くなっていることがわかる。このことから、本稿では糖度に透過率が影響される依存波長として、960 nm と 1150 nm を用い、非依存波長にはそれ以外の波長を用いる。

4.1.3 果実の透過スペクトル計測

本節では、実際の果実において糖度の違いが依存波長と非依存波長の透過率に現れることを確認するために、糖度の異なる果実の透過スペクトルを計測し、比較する。本実験では、図 7(a) に示すようにステージ上に果実を置き、赤道面上に光を入射させ、その反対側から出射する光のスペクトルを計測する。計測対象としては図 7(b) に示すような、ほぼ同じ大きさの糖度が異なる 2 つのトマトを選んだ。1 つは、通常のトマトであり、もう 1 つは糖度の高い「フルーツトマト」として販売されるトマトである。図 7(c) に、それぞれのトマトについて 2 カ所ずつ計測したときの透過スペクトルを示す。果実の大きさの違いによる透過率の違いを補正するために、各スペクトルの最大値が等しくなるようにスペクトルの正規化を行っている。糖度の依存波長である 960 nm と 1150 nm では、フルーツトマトのほうが透過率が高いことがわかる。その一方で、非依存波長である 750 nm と 850 nm では、2 種類のトマトの透過率はほぼ等しくなっている。このことから、前節で求めた糖度の依存波長と非依存波長に注目することで、実際の果実の糖度の違いを判別できることがわかった。

4.1.4 糖度を含む物体を通過する光の透過スペクトル計測

本研究では、果実に光を照射したときに表面の出射光を計測することで、内部の糖度分布推定することを目標としている。果実内に光が入射すると散乱が起こり、光は様々な経路をとりながら内部を通過して表面から出射される。その過程で光は糖の分子に衝突し、特定の波長のエネルギーを失うため透過スペクトルが変化する。糖分が不均一に分布する果実においては、光が通る経路に存在する糖の量が異なるため、透過スペクトルは異なったものになる。つまり、果実の出射される光の透過スペクトルには、その光がとった経路の糖度分布の情報が含まれるはずである。このことを確かめるために、糖度分布が不均一な物体に 1 点から光を入射させ、物体の表面から出射される透過スペクトルを計測する実験を行った。

対象物体は、図 8(a) に示すような糖を含む円筒状の物体で、中央の円筒部は高糖度領域となっている。対象物体は糖の分布を固定するため寒天により作成し、周辺部のショ糖濃度は 3%，中央部は 30% とした。本実験では、糖度の非依存波長は、700 nm と 800 nm とした。図 8(b) に示す実験装置を用いて、入射点から 10° ごとにプローブにより透過スペクトルを計測した。図 8(c) に、各計測位置で計測された透過スペクトルを示す。入射点の正面に近い 180° 付近では、全体の透過率が高いことがわかる。次に、図 8(d) に各波長ごとの計測位置と透過率の関係を示す。青のグラフで示した非依存波長の透過率と、赤のグラフで示した依存波長の透過率は 90° 以下の計測点ではほぼ同じ値である。その一方で 110° 以上の計測点では、依存波長の透過率が

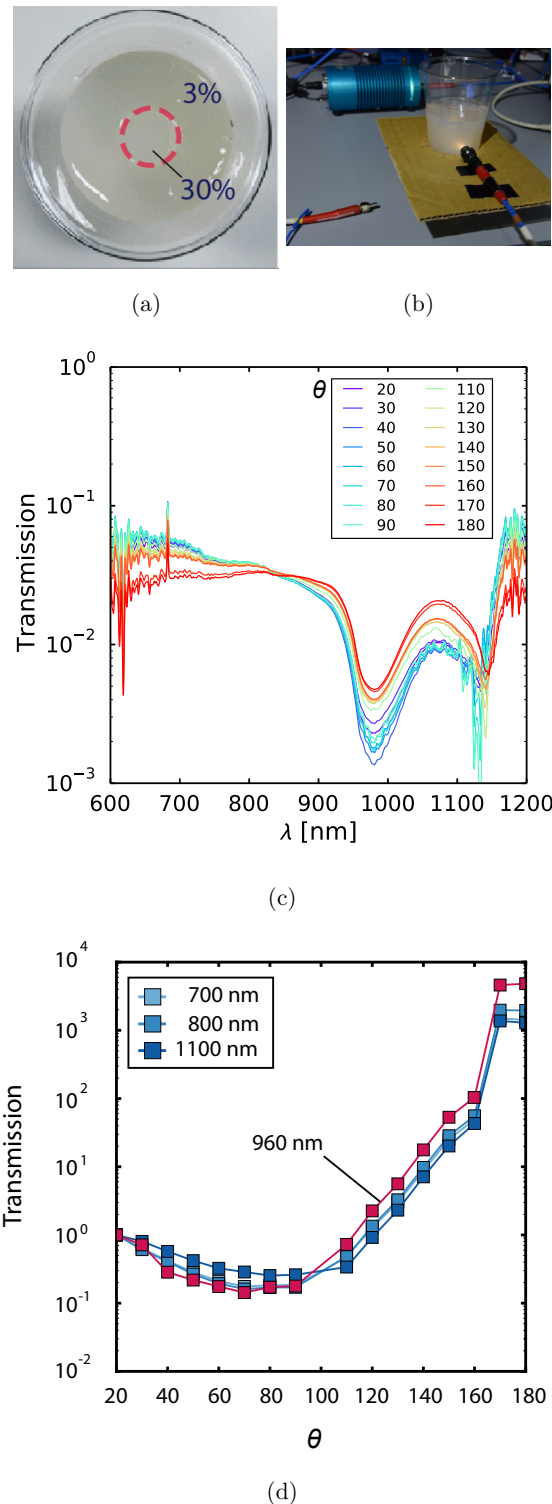


図 8: 糖度を含む物体を通過する光の透過スペクトル計測
(a) 計測対象, (b) 計測装置, (c) 各計測点の透過スペクトル, (d) 波長ごとの各計測点における透過率

非依存波長と比較して高くなっていることがわかる。^{*1} これは、110° 以上で計測される透過光は、中央の高糖度領域を通る割合が高いため、糖の影響で依存波長の光の透過率が高くなったためだと考えられる。このことは、物体の周

^{*1} なお、100° は計測ミスによりデータが得られていない。

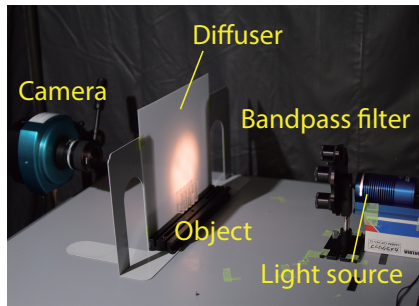


図 9: 透過像の撮影装置

囲の出射光の透過スペクトルから、中央部に高精度領域があるという手がかりを得られることを意味している。これらより、物体の全周で計測される透過光のスペクトルには、物体内部の糖度が影響を与えることがわかった。

4.2 糖度の特徴量画像

本実験では、糖度の特徴量が実際の糖度分布を反映することを確認するために、既知の糖度分布を持つ物体断面を、帯域通過フィルタを利用し糖度の依存波長と非依存波長の2波長において撮影する。撮影された2枚の画像から、各画素における糖度の特徴量を計算し、糖度の特徴量画像を作成する。そして、糖度の特徴量画像と実際の糖度分布を比較することで、糖度の特徴量と糖分濃度の関係を求める。

4.2.1 実験装置

図9に示す実験装置により、特定波長の光源が照射されるときの対象物体の透過像を取得する。光源は近赤外領域に十分な出力を持つハロゲン光源を用い、光源直後に帯域通過フィルタを設置することで、特定の波長帯の光のみを照射する。また、物体のカメラ側に設置したディフューザ上にできる透過像を撮影することにより、本来であればカメラに直接入射しない透過光も計測できる。本実験では、濃度がそれぞれ0, 10, 20, 30, 50%のショ糖溶液を分光分析に用いられるキューベット内に注入し、並べたものを対象シーンとした。また、光源の帯域通過フィルタには糖度の依存波長、非依存波長であるそれぞれ950 nmと750 nmのものを使用した。

4.2.2 撮影結果

糖度の依存波長の光源を用いたときの透過像を図10(a)、非依存波長の光源を用いたときの透過像を図10(b)に示す。透過像とは、対象物体を光源により照射したときにできる投影像を、物体を置かず光源のみの投影像で除算することにより求められる、物体断面の透過率分布を表す画像である。それぞれの透過像には、ショ糖溶液や容器の形状、ディフューザ表面の細かい模様が現れている。まず、溶液部分に注目して2つの透過像の比較すると、明るさに明確な差は認められない。依存波長の透過像では高濃度の溶液部分ほど明るくなると予想されるが、4.1.2節で計測されたショ糖溶液のスペクトルによると、ショ糖溶液による透過

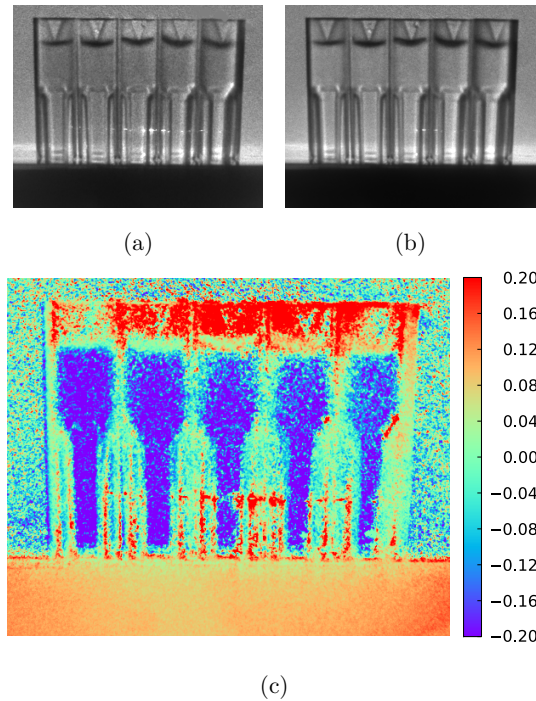


図 10: 糖度の特徴量画像 (a) 依存波長の透過像, (b) 非依存波長の透過像, (c) 特徴量画像

率の上昇は数%程度である。このため、撮影シーンでは容器の形状やディフューザ表面の模様による明るさの違いが支配的になり、濃度による透過率の違いが透過像に現れなかったと考えられる。また、透過像に現れる容器の形状やディフューザ表面の模様はショ糖濃度とは無関係であることを考えると、単一波長の透過像のみから糖度を推定することが困難であることは明らかである。

次に、これらの透過像の差分で求めた糖度の特徴量画像を図10(c)に示す。それぞれの濃度の溶液部分に注目すると、高濃度であるほど特徴量が大きくなっていることがわかる。また、透過像に現れていた容器の形やテクスチャは、特徴量画像には現れていない。これは、それぞれの透過像に現れていた容器の形状やディフューザ表面の模様が、差分を取ることで相殺されたためだと考えられる。これらより、依存波長の透過像だけでは糖の濃度推定は困難であったが、非依存波長の透過像も計測し、特徴量を計算することにより推定できることがわかった。

4.3 特徴量の逆投影による糖度分布推定

前節では、物体断面の糖度分布は提案する特徴量画像の計算により推定されることを確認した。しかし、果実の非破壊な糖度分布推定のためには、断層撮影が必要である。そこで、特徴量の逆投影による断面再構成による糖度分布推定を試みた。

4.3.1 シミュレーションによる実験

まず、散乱や屈折が起こらず、光源が平行光であるときに正しく糖度分布が推定できることを確認するために、シ

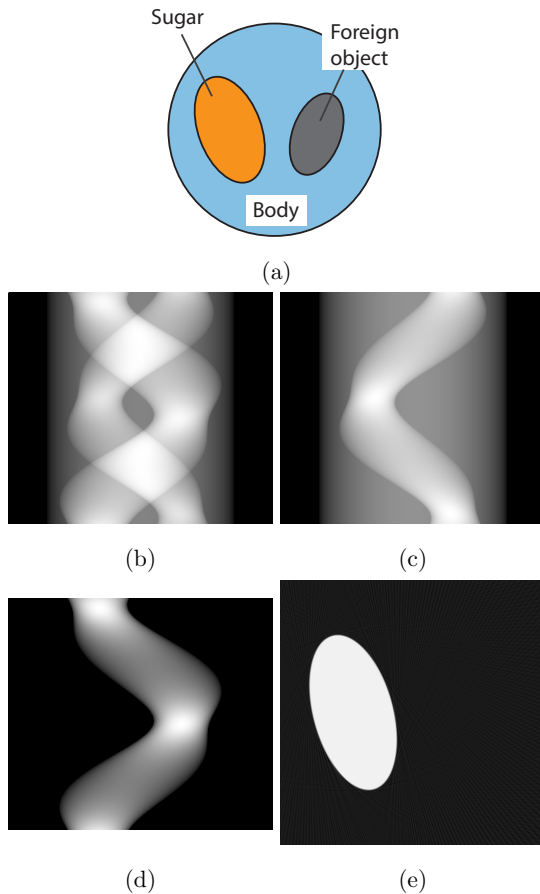


図 11: 断層撮影のシミュレーション (a) シミュレーションに用いる物体断面, (b) 依存波長のサイノグラム, (c) 非依存波長のサイノグラム, (d) 特徴量のサイノグラム, (e) 糖度の再構成結果

シミュレーションによる実験を行う。図 11(a) に示すように、物体の断面には糖と異物が存在する。投影のシミュレーションと断層画像の再構成には、CT シミュレータである ctsim[6] を利用する。図 11(b) には、ctsim を使って求めたサイノグラムを示す。サイノグラムとは、それぞれの方向の透過像から再構成したい断面の部分を抜き出し、方向順に縦に並べることで得られる透過像の表現である。この図からは、物体の外形の他に、糖の領域と異物による像が投影されていることがわかる。次に非依存波長のサイノグラムを図 11(c) に示す。ここでは異物による像のみが投影されていることがわかる。さらに、これらの差分により得られる特徴量のサイノグラムは図 11(d) のようになる。このサイノグラムを用いて特徴量を逆投影することにより推定された糖度分布を、図 11(e) に示す。物体の外形や異物がキャンセルされ、糖度分布のみが再構成されていることがわかる。この結果から、理想的な実験環境では、提案法で糖度分布推定が可能であることが確認できた。

4.3.2 実物体による実験

次に、実物体を対象に断層撮影による糖度分布推定を行う。シミュレーションとは異なり、実物体は空気と異なる

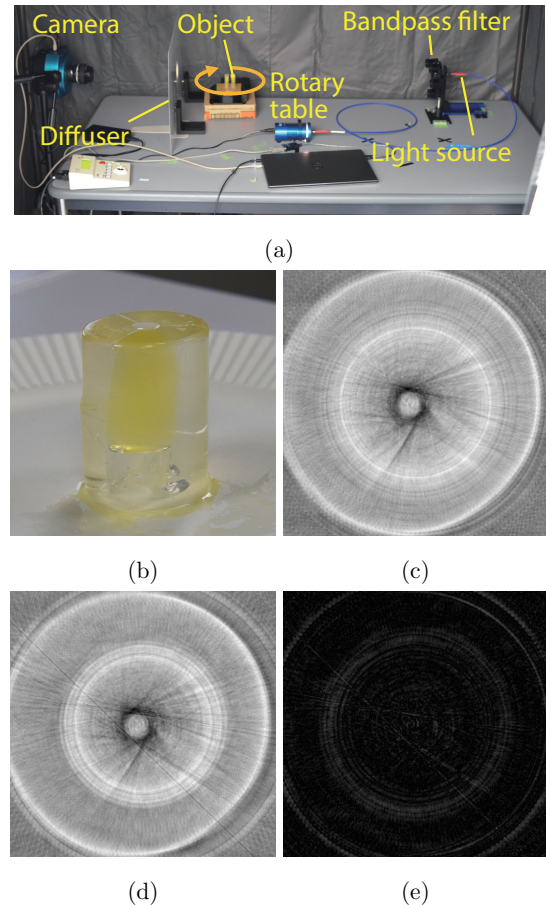


図 12: 実物体断面の糖度分布推定 (a) 撮影装置, (b) 対象物体, (c) 依存波長の断層画像, (d) 非依存波長の断層画像, (e) 特徴量の再構成結果

屈折率を持つため表面では光が屈折するが、この影響は無視して再構成を行った。

実験装置

図 12(a) に示すような撮影装置により、特定の波長における全周の透過像を撮影する。光源は 4.2 節と同様の方法で、特定の波長のみを照射する。光源にはコリメートレンズが取り付けられており、光源と物体までの距離が離れているため光線は平行光と見なせる。本実験では、物体を 2° ずつ回転させながら、全周の透過像を撮影する。対象物体は図 12(b) に示すような、円筒形の物体であり、中央の円筒部分は約 30% のショ糖を含む。対象物体はゼラチンにより作成し、中央部にはショ糖濃度を高くしたオレンジジュースを加えた。

実験結果

まず、図 12(c) に糖度の依存波長で撮影した透過像を逆投影法により再構成した結果を示す。再構成画像は、対象物体断面の吸収係数の大きさを表している。結果からは、物体の外形と中央部の形状が復元されていることがわかる。吸収係数は領域の境界部で大きくなっているが、外側と内側の領域では、吸収係数の大きさに明確な差は見られない。図 12(d) に糖度の非依存波長で撮影した透過像を示

す。依存波長のときと同様に、吸収係数の大きさは外側と内側の領域で差異が見られない。このことから、単一波長における断層撮影では、糖の分布を推定できないことがわかる。

次に、図 12(e) に糖度の特徴量を逆投影し、再構成した結果を示す。再構成画像は、対象物体断面の糖度の特徴量の大きさを表している。結果からは、外側と内側の領域では、特徴量の大きさに明確な差は認められない。特徴量が高い部分が疎らに分布するが、これは 2 回の計測の間に対象物体がわずかに動いた結果、透過像に生じたずれが逆投影されたためだと考えられる。また、物体の外形と領域の境界部で特徴量が高くなっているが、これは実際の糖度分布とは異なる。図 12(c), 12(d) の透過像の再構成画像を比較すると、非依存波長では依存波長に比べ、物体の形状と境界部がわずかに小さくなっている。これは、対象物体内で屈折が起こった結果、より波長の短い非依存波長では屈折が大きいため、透過像が小さくなったからであると考えられる。

今回の実験では、実物体の糖度分布を推定するまでには至らなかった。4.1.2 節で計測されたショ糖溶液のスペクトルからわかるように、糖度の影響による透過率の違いは数%程度である。しかし、本計測手法では前述の通り、対象物体のずれや屈折が発生し 2 波長の透過像に影響を与えた。依存波長と非依存波長の透過率の差分を計算すると、これらが原因の透過率変化が大きく特徴量として現れ、糖による透過率変化を上回った。その結果、特徴量を逆投影した再構成画像には糖度分布が現れなかったことが原因だと考えられる。

5. おわりに

本稿では、果実内糖度分布推定のための我々の取り組みを紹介した。分光器による実験では、ショ糖溶液のスペクトルを計測し、ショ糖により透過率が変化する波長を決定した。さらに、この波長の透過率を用いることで、実際の果実の糖度の違いを判別できることを確認した。次に、2 波長から計算される糖度の特徴量を定義し、糖度の特徴量画像を作成することで、糖度分布を推定できることを示した。最後に、特徴量の逆投影による糖度分布推定を行い、シミュレーションでは物体断面の糖度分布を再構成できることを確認した。しかし、実物体における実験では糖度分布を推定するまでには至らなかった。断層撮影に悪影響を及ぼす屈折は、今後考慮すべき現象である。また、果実のような半透明の物体では散乱も起こると考えられる。散乱する媒体の内部推定技術として、光散乱トモグラフィがあげられる [7], [8], [9]。今後は、これらの光学現象を考慮した断層撮影手法を考案していきたいと考えている。

謝辞 本研究は、ヤンマー株式会社の研究助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 石上 清, 松浦 英之. 温室メロン果実の糖度分布と部位別糖類組成. 静岡県農業試験場研究報告 Vol. 37, 33-40 (1992).
- [2] 梶浦 一郎, 佐藤 義彦, 大村 三男, 町田 裕. “ニホンナシ果実中の糖度分布と試料切片の果実からのサンプリング法. 果樹試験場報告 Vol. 6, 1-14 (1973).
- [3] 杉山 純一, 小川 幸春. メロンの糖度分布の 3 次元可視化. 日本食品科学工学会誌 Vol. 48, No. 4, 263-267 (2001).
- [4] 尾崎 幸洋, 河田 聡. 近赤外分光法. オーム社 (2011).
- [5] 日本放射線技術学会. CT 撮影技術学. 学会出版センター (1996).
- [6] Rosenberg KM. CTSim-the open source computed tomography simulator. URL <http://www.ctsim.org/>.
- [7] Yasunori Ishi, Toshiya Arai, Yasuhiro Mukaigawa, Jun'ichi Tagawa, Yasushi Yagi. Scattering Tomography by Monte Carlo Voting. MVA2013.
- [8] Toru Tamaki, Bingzhi Yuan, Bisser Raytchev, Kazufumi Kaneda, Yasuhiro Mukaigawa. Multiple-scattering Optical Tomography with Layered Material. The 9th International Conference on Signal-Image Technology and Internet-Based Systems (SITIS 2013), December 2-5, 2013, Kyoto, Japan. (2013 12).
- [9] Ryuichi Akashi, Hajime Nagahara, Yasuhiro Mukaigawa, Rin-ichiro Taniguchi. Scattering Tomography Using Ellipsoidal Mirror. The 21th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision, 2015.01.