

OCT技術の食品・工業製品検査への応用に関する研究

岡崎 伸哉, 飯島 俊匡, 本間 稔規, 大村 功

Research on Application of Optical Coherence Tomography for Food and Industrial Product Inspection

Shin'ya OKAZAKI, Toshimasa IIJIMA, Toshinori HONMA, Isao OHMURA

抄 録

非破壊・非接触で計測対象物の表面・内部構造を計測可能な技術として、光コヒーレンストモグラフィ(Optical Coherence Tomography, 以下OCT)がある。主に医療診断技術として実用化されており、非接触・非侵襲、数 μm ～数十 μm の高空間分解能、計測可能な深度が数mmという特徴を有している。

本研究では、OCTの産業分野への応用を目的に光軸方向における計測範囲拡大のための改良型SD-OCTシステムを構築し、食品では骨を含む鮭の切り身、工業製品では傷があるユニバーサル基板と打痕があるベアリングの計測を行った。その結果、表層付近の骨やマイクロメートルオーダーの傷・打痕の計測が可能であり、食品内部や工業製品の表面における傷検査への適用が可能であることを確認した。

キーワード：光コヒーレンストモグラフィ, 食品, 工業製品, 内部検査, 製品検査

Abstract

Optical Coherence Tomography (OCT) can be used to measure the surface and internal structure of an object non-invasively. OCT has been mainly put to practical use as a medical diagnostic technology. OCT features are non-invasive, high spatial resolution of several μm to several tens μm and measurable depth of several mm.

In this research, an improved SD-OCT system for the purpose of applying to the industrial field has been developed by expanding the measurement range in the direction of the optical axis. The fillet of salmon with bone, the electric circuit board and the bearing with scratches and dents were evaluated by the OCT system. As a result, the system has shown good performance, and we confirmed that the system can be applicable to the internal inspection of food and industrial products.

KEY-WORDS : Optical Coherence Tomography, Food, Industrial Products, Internal Inspection, Product Inspection

1. はじめに

光干渉の原理を応用して対象物の表面・内部の構造情報を取得する技術として、光コヒーレンストモグラフィ(Optical Coherence Tomography, 以下OCT)がある^{1,2)}。OCTは光が一定量内部に到達可能なサンプルに対して断層画像を取得可能な技術であり、非接触・非侵襲、高空間分解能(数 μm ～数十 μm)、計測深度が数mmという特徴を有している。主に医療分野において研究・開発が進められており、

眼底検査で実用化されている。一方で、医療分野以外への適用事例は少ない。

そこで本研究では、医療分野以外、主に産業分野へのOCTの適用を目的に、食品の内部検査、及び工業製品の表面における欠陥検査への適用可能性について検討した。

事業名：経常研究

課題名：OCTの産業応用に向けた断層情報解析技術に関する研究

2. OCTの概要

2.1 OCTの原理

OCTの構成は低コヒーレンス光源を用いたマイケルソン干渉計である。低コヒーレンス光とはレーザーのような高コヒーレンス光とは異なり、時間方向の狭い範囲でのみ干渉をおこす光である。OCTの原理を図1に示す。光源から出射された平行光束はビームスプリッタにより、リファレンス光とサンプル光の2つに分割される。サンプル光はサンプル表面及び内部の屈折率が変化する境界面で反射し、リファレンスミラーで反射したリファレンス光とビームスプリッタで再度1つに合成され、検出器に入射する。このとき、リファレンス光の光路長 L_R とサンプル光の光路長 L_S が一致したときのみ干渉がおり、増幅された信号が得られる。リファレンスミラーを光軸方向に走査し、光路長を変化させることにより、サンプル内部の境界面を走査することができ、構造情報（屈折率が変化する境界面の位置）を取得することができる。

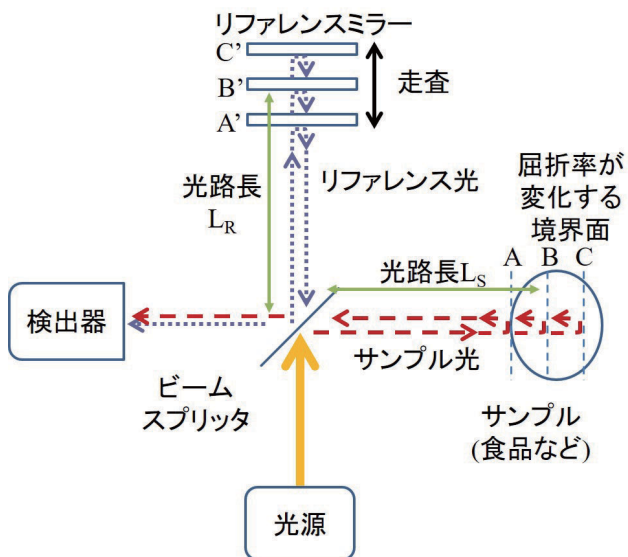


図1 OCT原理図

2.2 OCTの分類

OCTは大きく2つの方式に分類される。2.1節で説明した方式はタイムドメインOCT (Time-Domain OCT, 以下TD-OCT) と呼ばれており、リファレンスミラーを走査しながら強度信号を取得する。光路長が一致すると干渉現象による信号の増幅が生じることから、強度信号のピーク位置を解析して光軸上の構造情報を得ることができる。一方、フーリエドメインOCT (Fourier-Domain OCT, 以下FD-OCT) と呼ばれる方式では、検出器にマルチチャンネル分光器などを用いて干渉スペクトルを計測する。干渉スペクトルは光路長の差に応じて変調されることから、フーリエ解析を行うことにより、リファレンスミラーを固定した状態で、光軸上の一

定範囲の構造情報を得ることができる。

それぞれの方式はさらに複数の方式に分類される³⁾(図2)。

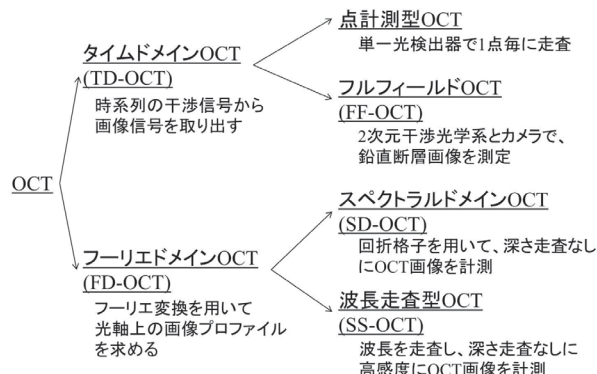


図2 OCTの分類

3. 構築したOCTシステム

3.1 SD-OCTシステムの構築

本研究では、感度・測定速度で優れているFD-OCT⁴⁾のうち、検出器にマルチチャンネル分光器を用いることで構成可能なSD-OCTをベースとし、サンプルホルダを電動ステージに設置することにより、光軸方向に対してサンプルを走査可能な改良型SD-OCTを構築した。

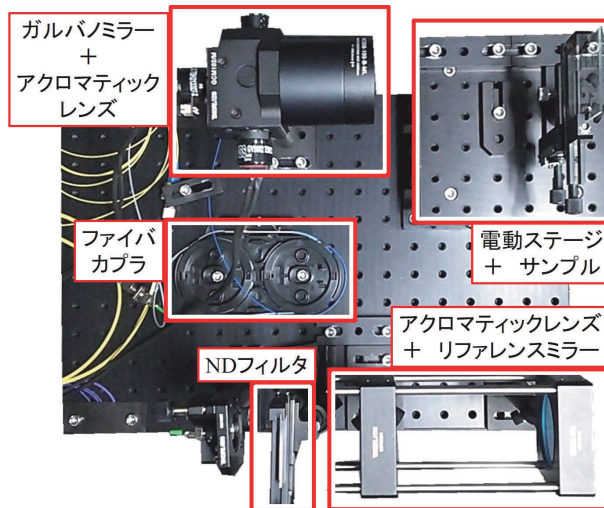


図3 構築した改良型SD-OCT

SD-OCTは光軸方向に対し、リファレンスミラーを基準として、一定範囲の構造情報を一括で取得可能である。その計測深度 z_{max} は次式で表わされる。

$$z_{max} = \frac{1}{4n} \frac{\lambda_c^2}{\delta\lambda} \dots (1)$$

ここで、 n は計測対象物の屈折率、 λ_c は光源の中心波長、 $\delta\lambda$ は検出器の波長分解能である。今回構築したSD-OCTシステムの場合、 $\lambda_c = 850 \text{ nm}$ 、 $\delta\lambda = 0.369 \text{ nm}$ であり、 $n = 1$

(空气中) の場合は、 z_{max} は約 $490\mu\text{m}$ となる。一方、光軸に直行する軸方向については、ガルバノミラーを用いて光を走査する。ガルバノミラーには2枚のミラーが内蔵されており、それぞれのミラーの角度を制御することにより、光軸に直行する軸方向に光を走査することができる。

空間分解能については、光軸方向と光軸に直行する軸方向に分けて考える。光軸方向の分解能 Δz は、光源のコヒーレンス長により決定され、次式で表わされる。

$$\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda_c^2}{\Delta \lambda} \dots (2)$$

ここで、 λ_c は光源の中心波長、 $\Delta \lambda$ は光源の半値全幅(FWHM)、 \ln は自然対数である。また、光軸と直行する軸方向の分解能 Δx は、光束の直径により決定され、次式で表わされる。

$$\Delta x = \frac{4 \lambda_c}{\pi} \frac{f}{d} \dots (3)$$

ここで、 f はレンズの焦点距離、 d はコリメート光の直径である。

3.2 改良型SD-OCTシステム

今回構築したシステムでは光軸(深さ)方向に対して約 $490\mu\text{m}$ しか計測することができず、産業分野への適用を考えた場合、厚さが $490\mu\text{m}$ 以下の対象物に限られてしまう。前述したとおり、SD-OCTはリファレンスミラーまでの光路長を基準に一定範囲、本システムでは約 $490\mu\text{m}$ の範囲を一括で計測できることから、計測対象物を電動ステージで走査し、対象物からの反射光が得られる範囲において、異なる基準面からの構造情報を取得・合成可能な改良型SD-OCTシステムを構築し、光軸方向における計測範囲の拡大を図った。

3.3 空間分解能の検証

構築した改良型SD-OCTシステムの空間分解能について検証を行った。3.1節でも記載した通り、空間分解能は光軸方向と光軸に直行する軸方向に分けて考える。

光軸方向の空間分解能については式(2)で算出できる。検証時の各パラメータは $\lambda_c = 873.9\text{nm}$ 、 $\Delta \lambda = 35.6\text{nm}$ であり、理論値は $\Delta z = 9.46\mu\text{m}$ となる。実測値については、取得した強度ピークプロファイルに対してガウスフィッティングを施すことにより、その半値全幅が実測値となる。図4にテストターゲットを対象に取得したプロファイルとガウスフィッティングの結果を示す。得られたガウスフィッティングの半値全幅、即ち実測値は $10.11\mu\text{m}$ となり、ほぼ理論値通りの空間分解能が得られていることが確認できた。

一方、光軸と直行する軸方向の空間分解能については式(3)で算出できる。本システムでは $f = 50\text{mm}$ と $f = 100\text{mm}$ のレンズにて検証を行った。そのほかのパラメータは $\lambda_c = 873.9\text{nm}$ 、 $d = 2.1\text{mm}$ である。理論値は $f = 50\text{mm}$ の場合、

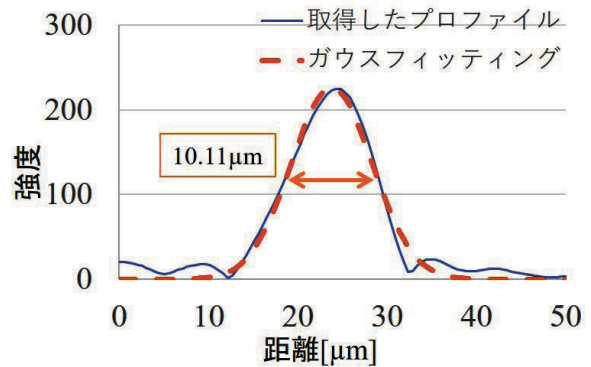


図4 光軸方向の空間分解能の検証

$\Delta x = 26.49\mu\text{m}$ 、 $f = 100\text{mm}$ の場合、 $\Delta x = 52.98\mu\text{m}$ となる。

実測値の算出には、図5のテストターゲットを使用した。テストターゲットには明・暗のラインが垂直・水平方向に5本ずつ描画されている。1つのラインと次のラインまでの空間を1つのサイクルとしており、サイクルの周波数[サイクル/mm]が数値で表示されている。例えば、40のラインであれば、暗のラインから次の暗のラインまでの距離が $1/40 = 25\mu\text{m}$ となっている。

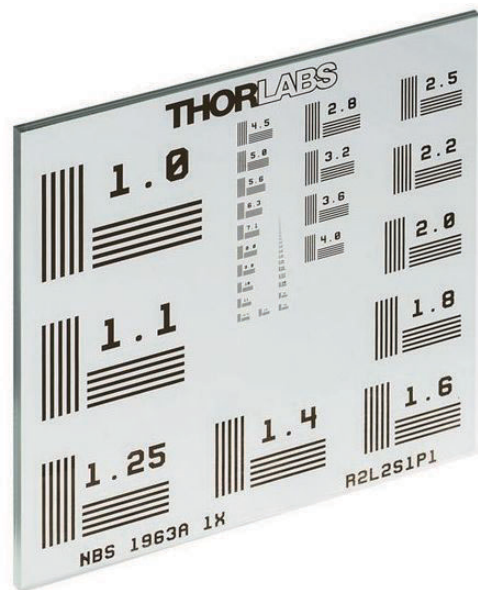


図5 使用したテストターゲット (THORLABS 製)

図6に $f = 50\text{mm}$ において40のラインを計測した結果を示す。左図が取得したスライス画像、右図がスライス画像の一部における明度変化をグラフ化したものである。右図のグラフより、垂直・水平ラインにおける明・暗が分離されていることから、 $1/40 = 25\mu\text{m}$ とほぼ理論値通りの空間分解能が得られていることがわかる。また、図7に $f = 100\text{mm}$ において20のラインを計測した結果を示す。各図は図6と同様で、こちらからも $1/20 = 50\mu\text{m}$ とほぼ理論値通りの空間分解能が得られていることがわかる。

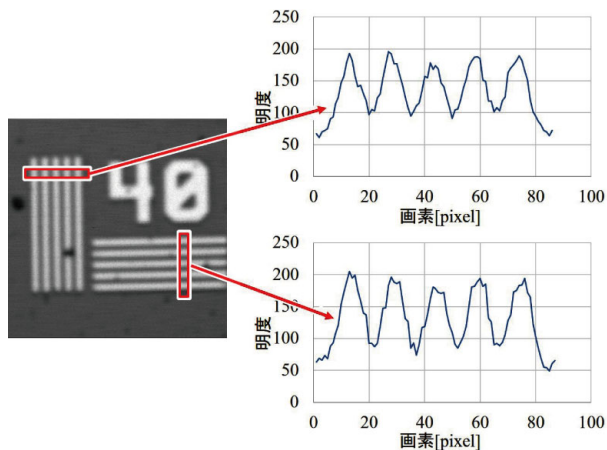


図6 光軸と直行する軸方向の空間分解能の検証 ($f=50\text{mm}$)

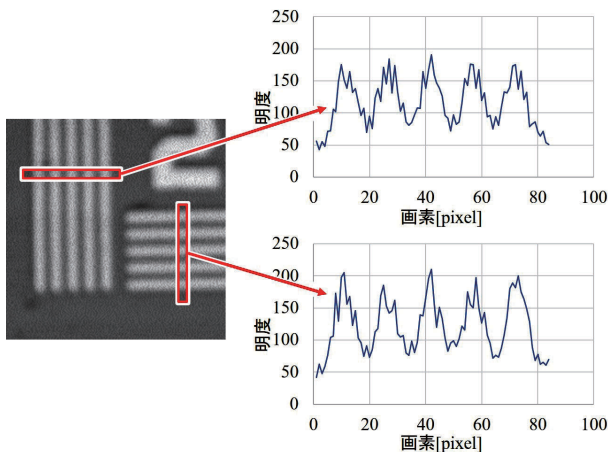


図7 光軸と直行する軸方向の空間分解能の検証 ($f=100\text{mm}$)

4. 工業製品や食品の計測事例

表面検査への適用事例として、銅箔にカッターで傷を付加したユニバーサル基板と打痕があるベアリングを計測した。また、内部検査への適用事例として乳白色の樹脂で電極がパッケージされているLEDと骨を含む鮭の切り身を計測した結果を示す。

4.1 銅箔に傷があるユニバーサル基板の計測事例

銅箔部分に傷があるユニバーサル基板の表面構造を計測した。銅箔厚さは $35\mu\text{m}$ であり、 $f=50\text{mm}$ のレンズを使用した(光軸と直行する軸方向の分解能 $\Delta_x=25\mu\text{m}$)。光軸に直行する軸方向への光の走査は $1.57\mu\text{m}$ 刻みでX軸方向に161点、Y軸方向に161点、合計25,921点計測した。1点計測するのに30ミリ秒、全体の計測に約13分を要する。計測したユニバーサル基板の写真と計測範囲及び取得した表面の構造情報を図8に示す。視認性の観点から点群データそのままでは

なく、三角メッシュを生成し、表面をレンダリングしている。グレースケールは高さ(紙面奥行き方向、またはZ軸方向)情報を示しており、単位は μm である。

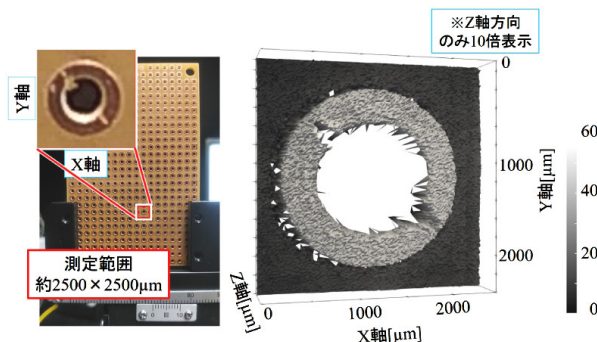


図8 計測したユニバーサル基板(左)と点群データから生成した三角メッシュ(右)

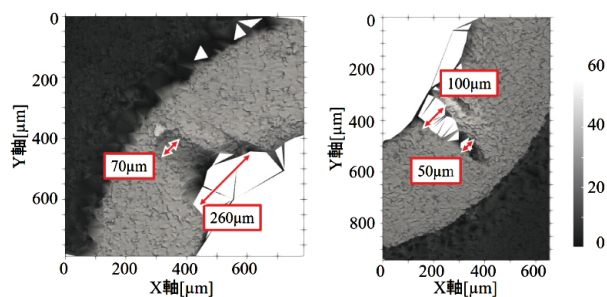


図9 傷部分の拡大図

銅箔の平面とそれ以外の平面、それぞれの平均値の差分を計算すると約 $35\mu\text{m}$ となった。また、傷部分についてはデータが欠落しており、欠陥があることがわかる。図9に傷部分を拡大した図を示す。画像上で傷の大きさを計測したところ、約 $50\mu\text{m}$ ~ $260\mu\text{m}$ の欠陥があることが確認できた。以上のことから、マイクロメートルオーダーの欠陥検査が可能であると考えられる。

4.2 打痕があるベアリングの計測事例

打痕があるベアリングの表面構造を計測した。ベアリングは外径 19mm 、内径 10mm であり、 $f=100\text{mm}$ のレンズを使用した(光軸と直行する軸方向の分解能 $\Delta_x=50\mu\text{m}$)。光軸に直行する軸方向への光の走査は $3.26\mu\text{m}$ 刻みでX軸方向に101点、Y軸方向に101点、合計10,201点計測した。1点計測するのに30ミリ秒、1面の計測に約5分を要する。加えて、サンプルを光軸方向に $100\mu\text{m}$ 刻みで走査し、計3回計測したことから、全体の計測には約15分を要した。計測したベアリングの写真と計測範囲及び取得した表面の構造情報を図10に示す。前節と同様に三角メッシュを生成し、表面をレンダリングしている。グレースケールは高さ(紙面奥行き方向、またはZ軸方向)情報を示しており、単位は μm である。

図10の左下に打痕なしのデータを、右下に打痕ありのデー

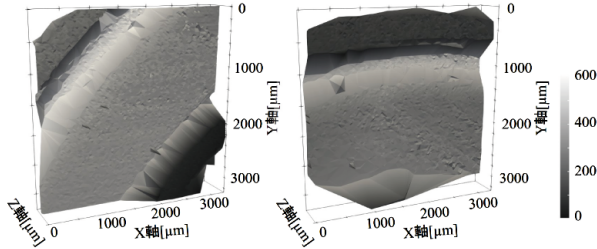


図10 計測したベアリング(上)と点群データから生成した三角メッシュ(左下:打痕なし, 右下:打痕あり)

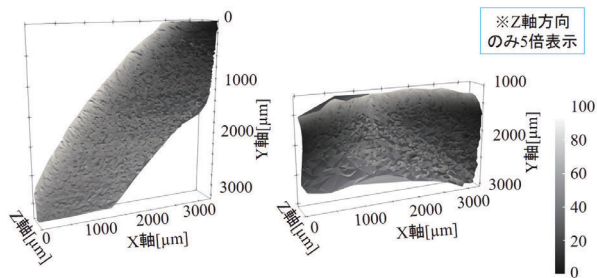


図11 打痕部分の拡大図(左:打痕なし, 右:打痕あり)

タを示している。一見すると両データとも、打痕はないように見える。図11に打痕がある面と、打痕なしのデータと同じ面を拡大した図を示す。打痕なしのデータ(左)では左下から右上に向かって濃度、即ち奥行き値に変化はあるが、一様な変化をしていることから、フラットな面であり、打痕は存在しないことわかる。一方で打痕ありのデータ(右)では左右から中央に向かって濃度、即ち奥行き値の変化が生じていることから、中央に凹みがあることを示しており、打痕の存在が確認できる。またその深さは、約60~80μmであった。

4.3 LEDの計測事例

乳白色の樹脂で電極がパッケージされているLEDを計測した。樹脂パッケージの厚さは2mmで、電極は厚さ方向に対しほぼ中央にある。計測には $f=100$ mmのレンズを使用した(光軸と直行する軸方向の分解能 $\Delta x=50\mu\text{m}$)。光軸に直行する軸方向への光の走査は $3.26\mu\text{m}$ 刻みでX軸方向に101点、Y軸方向に101点、合計10,201点計測した。1点計測するのに30ミリ秒、1面の計測に約5分を要する。加えて、樹脂表面と電極が計測できるようサンプルを光軸方向に走査し、計2回計測したことから、全体の計測には約10分を要した。計測したLEDの写真と計測範囲及び取得した表面及び

内部の構造情報を図12に示す。前節と同様に三角メッシュを生成し、表面をレンダリングしている。グレースケールは高さ(紙面奥行き方向、またはZ軸方向)情報を示しており、単位はμmである。

得られた点群データにおいて、Z軸の0μm付近にある平面が樹脂パッケージの表面、Z軸の1000μm付近にある平面が内部の電極の構造情報である。LEDの構造上、樹脂-電極-樹脂の3つの平面が得られることが予測されるが、後ろ側の樹脂面は計測できなかった。原因としては、樹脂による光の減衰により後ろ側の樹脂面からの反射光が得られず、計測することができなかったと考えられる。

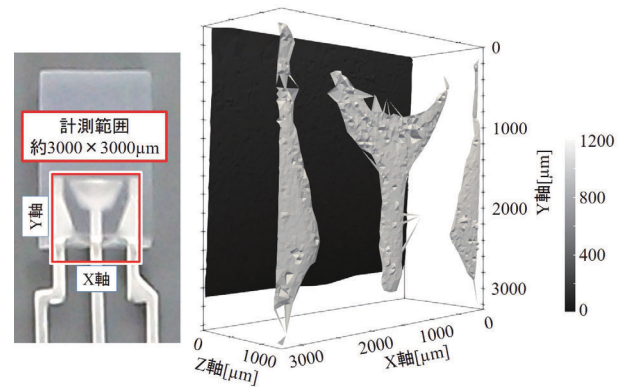


図12 計測したLED(左)と点群データから生成した三角メッシュ(右)

4.4 骨を含む鮭の切り身の計測事例

内部に骨がある鮭の切り身を計測した。計測には $f=100$ mmのレンズを用いた(光軸と直行する軸方向の分解能 $\Delta x=50\mu\text{m}$)。光軸に直行する軸方向への光の走査は $3.26\mu\text{m}$ 刻みでX軸方向に101点、Y軸方向に101点、合計10,201点計測した。1点計測するのに30ミリ秒、1面の計測に約5分を要する。加えて、サンプルを光軸方向に $100\mu\text{m}$ 刻みで走査し、計3回計測したことから、全体の計測には約15分を要した。計測した骨を含む鮭の切り身の写真と計測範囲及び取得した内部の構造情報を図13に示す。右図にある構造情報はボリュームデータであり、XYZ軸の3次元位置情報に加え、各点の強度をグレースケールで表示している。面状に生

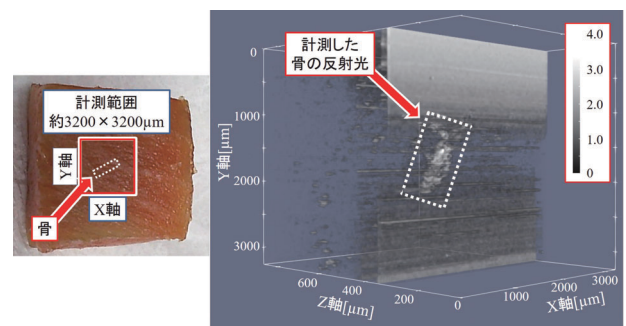


図13 計測した鮭の切り身(左)と取得したボリュームデータ(右)

じているデータはノイズであり、中央の点線で強調しているデータが切り身内部の骨からの反射光となる。今回の実験条件では、深さ600 μ m程度まで計測できたが実用化を考えた場合、600 μ m程度の深度では範囲が狭いため、更なる計測深度の向上が必要である。

5. OCTによる計測の優位性についての考察

4.2節のような光沢物を、カメラを用いた画像処理により検査しようとした場合、欠陥の検出は可能であるが、欠陥の向きなどにより照明の当て方を工夫する必要がある。一方で、本技術の場合は計測面に対してほぼ垂直に光を照射することにより、構造情報を得ることができるため、光沢の有無にかかわらず、検出が可能である。

また、4.3節のような光の散乱の影響が大きい対象物の内部構造を、カメラを用いた画像処理により検出しようとした場合、光の散乱の影響で検出が困難となる可能性がある。一方で、本技術を用いた場合、図12のように電極の構造情報が得られており、4.1節のユニバーサル基板や4.2節のベアリングのように欠陥を検出できる可能性が高いことから、本技術による欠陥計測は有効であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、OCTの産業分野への応用を目的に改良型SD-OCTシステムを構築し、光軸方向における計測範囲の拡大を実現した。また、食品として骨を含む鮭の切り身、工業製品としてマイクロメートルオーダーの傷があるユニバーサル基板や打痕があるベアリングの計測を行った。その結果、内部の骨や傷・打痕が計測できたことから、食品の内部検査、工業製品の表面における微小な傷検査への適用が可能であることが確認できた。

今後は計測深度の拡大や高速化などの性能向上を目的としたシステム改良を行い、OCTの産業分野への応用について更なる開発を進める予定である。

引用文献

- 1) Brett E.Bouma, Guillermo J.Tearney : Handbook of Optical Coherence Tomography, informa, 756PP., (2001)
- 2) 佐藤学・丹野直弘：光コヒーレンストモグラフィの基礎, 光学, Vol.32 No.4, pp.268-274, (2003)
- 3) 島田敏男：バイオメディカルフォトンクスー生体医用工学の基礎と応用－, 社団法人 電気学会, 198PP., (2009)
- 4) R.Leitgeb, C.K.Hitzenberger and A.F.Fercher : Per-

formance of fourier domain vs. time domain optical coherence tomography, Opt. Express, Vol.11, pp.889-894, (2003)