

X線CTによる位置依存性を考慮した硬さ測定に関する基礎的研究

○野村拓男（日本大学大学院） 村山嘉延（日本大学） 尾股定夫（日本大学）

Development on hardness measurement using X-ray computed tomography in consideration of position-dependent

*T. Nomura (Graduate School of Engineering, Nihon University),

Y. Murayama (Nihon University) and S. Omata (Nihon University)

Abstract- Although X-ray CT plays an active role in the medical world today, it is not used for analyzing the hardness and/or softness. This research aims to use the X-ray CT scanner for the non-invasive measurement of soft tissue hardness. From the correlation of CT values of X-ray CT scanner and the amount of change in frequency of a tactile sensor, we demonstrated that hardness measurement was possible

Key Words: CT value, Young's modulus, change in frequency, Hardness, Position-dependent

1. 序論^{[1][2]}

現在、X線CTスキャナは非侵襲的に大きさ・位置・形状といった3つの情報から体内臓器の形成的変化を得る事ができ、多くの病状の診断に用いられ、医療現場で活躍している。

一方、前立腺癌のように病状が悪化すると正常時と比べて硬くなる事が知られている。この診断方法は医師が肛門から直接指を挿入して、直腸前面に突出している前立腺を触診する方法であり、癌の有無を確認するのに最も簡単で発見率の高い診断方法である。この様に医療現場では硬さ・軟らかさの情報は診断を行う上で、大変重要なファクターである。しかし、肝臓などの体内臓器には直接手で触れる事が出来ない為触診を行う事は不可能である。

そこで、非侵襲的に体内臓器の形成的変化を取得可能なX線CT画像から、医師の手の届かないような部位にも触診で得られるような硬さ・軟らかさの情報を引き出す事ができれば、より高精度で定量的な診断が期待できると考えられる。しかし、X線CT画像には位置依存性という問題点がある。これはFig.1のCT画像に示されるように、これら2枚の画像は同じシリコンゴムで撮影位置を除き同一条件下で撮影した結果であるが、画像の濃淡が異なっている。これはCT値が撮影する位置によって変動する為である。

本研究では、定量的にCT画像から硬さ・軟らかさの情報を取得する事を研究目的としている。軟組織モデルであるシリコンゴムを用いて、位置依存性を実験的に求め補正を行い、ヤング率及び触覚センサの周波数変化率とX線CT画像からのCT値

との相関特性について実験を行い、位置依存性を考慮し硬さ測定の可能性について検討した。

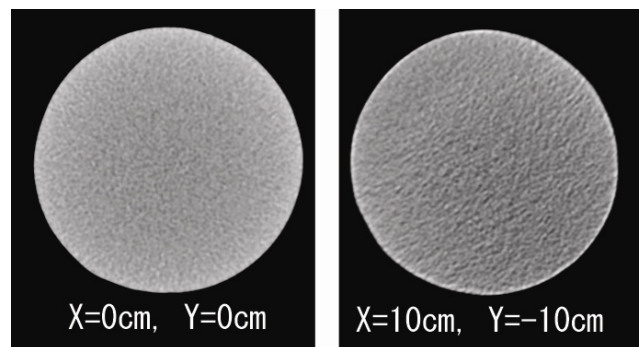


Fig.1 CT Image of silicone gum measured by X-ray CT instrument

2. 原理

2.1 X線CT^[3]

X線CTスキャナは直進性の高いX線を被写体に同心円的に照射する事によりX線減弱量を測定し、被写体に対して360度方向におけるX線減弱量の情報からX線減弱係数の分布をコンピュータで高速演算し、被写体の断層写真を求めることができるものである。

被写体の断層写真（以下CT画像）はCT値によって構成されており、Fig.2に示すように、X線管と検出器によってX線減弱係数を測定している。

X線管から測定物に入射するX線強度 I_{in} を、測定物を通過し検出されたX線強度を I_{out} とし、測定物のX線通過距離を x 、測定物のX線減弱係数 μ_x をとすると、次の式が成り立つ。

$$I_{out} = I_{in} \text{EXP}(-\mu_x x)$$

$$\mu_x = \frac{1}{x} \ln \frac{I_{in}}{I_{out}}$$

更に、CT 値とは水の X 線減弱係数 μ_w を基準とし、単位を持たない値であり、つぎの式で定義されている。

$$(\text{CT 値}) = \frac{\mu_x - \mu_w}{\mu_w} \times K$$

K は Hounsfield 単位で 1000 である。

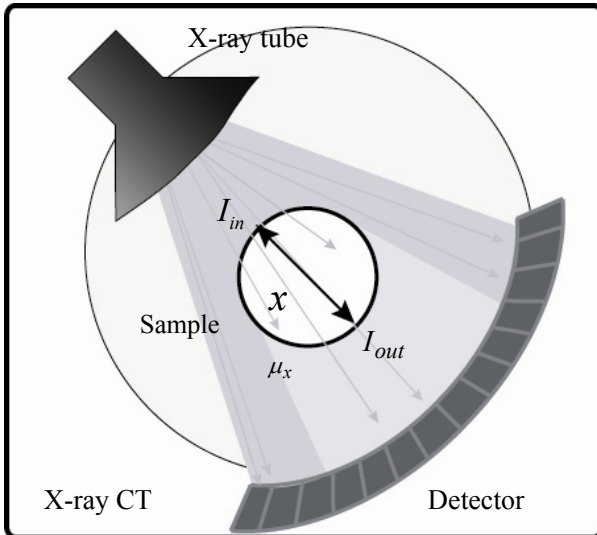


Fig.2 Basic performance of X-ray CT system

2. 2 触覚センサ^[4]

触覚センサの基本原理は有限長の振動棒を任意の物体に接触させると、棒の固有振動数が対象物体の音響インピーダンスによって変化する事を利用して、この時センサが柔らかい物体に触れた時の周波数変化量 f_m は次式で示され、質量効果と呼ぶ。

$$\Delta f_m = -\frac{k_0}{2\pi Z_0} \frac{m_x}{m_0}$$

センサが硬い物体に触れたときの周波数変化量 Δf_s は次式で示され、スティフネス効果と呼ぶ。

$$\Delta f_s = -\frac{1}{2\pi^2} \frac{k_x}{Z_0}$$

Z_0 : センサ部の固有音響インピーダンス

k_0 : センサ部の等価スティフネス

m_0 : センサ部の等価質量

m_x : 対象物体の等価質量

k_x : 対象物体の等価スティフネス

対象物体に接触していない状態での共振周波数を f_0 とし、質量効果とスティフネス効果の様子を、Fig.3 に示す。

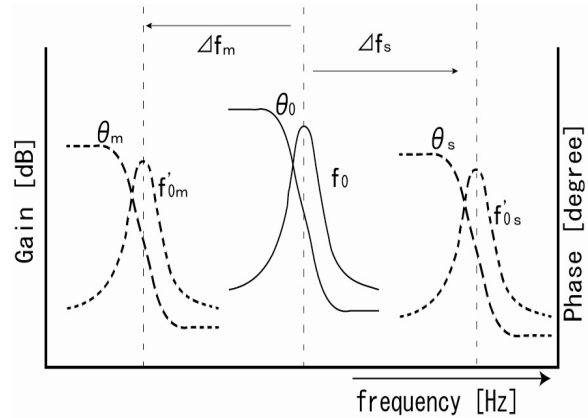


Fig.3 Change in resonant frequency of a Tactile Sensor using Phase shift circuit

2. 3 位相シフト法^[4]

硬さ測定に用いた触覚センサは、位相シフト法を用いており、圧電セラミック素子(PZT)からなるセンサの出力信号を反転増幅器、位相シフト回路を介してセンサに強制帰還させることで発振回路系とし、動作概要を Fig.4 に示す。発振回路系を構成した触覚センサの発振条件は従来の発振回路系とは異なり $(\theta_1 + \Delta\theta_1) + (\theta_2 + \Delta\theta_2) = 0$ である。ただし、非接触時のセンサの位相を θ_1 、センサが測定物に触れた時の位相変化を $\Delta\theta_1$ とし、これらの位相補正回路の位相と位相変化を θ_2 、 $\Delta\theta_2$ とする。

発振状態におけるセンサの共振周波数は測定物体の持つ音響インピーダンスに応じて共振周波数が変化する。すなわち周波数変化量により物質の硬さを検出する事が可能となる。

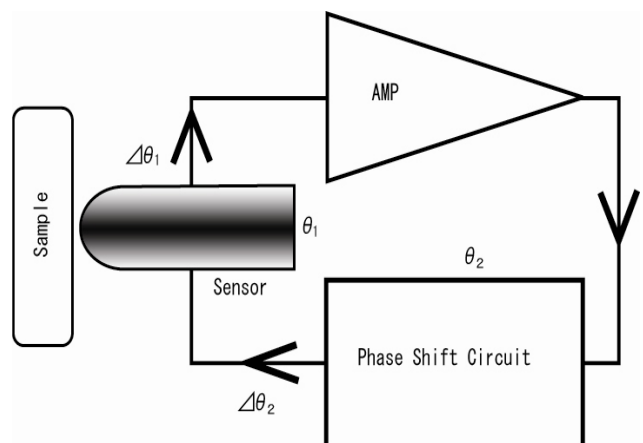


Fig.4 Phase shift circuit and its measuring system

3 実験方法

3. 1 位置依存性

一般的に CT 値は撮影する位置によって画像の濃

淡が Fig.1 に示すように異なる。この位置依存性に関する影響を明らかにするために次の実験を行った。

軟組織モデルとして濃度40%のシリコーンゴムを測定試料に用いた。測定位置はX線CTスキャンの有効視野（以下 FOV）の中心を原点とし、水平方向に-14cm から+14cm、鉛直方向に-13cm から+11cm まで各方向に 1cm ずつ移動させ、計 725 点のCT撮影を各4回行った。尚、測定条件は、撮影方法 Standard、管電圧 120kV、管電流 130mA、撮影時間 1.5sec、スライス厚 1.0mm と常に一定に保ち撮影を行った。部分体積効果とビームハードニング効果を考慮し、各撮影位置のCT画像から、測定試料の中心部のCT値を関心領域（以下 ROI とする）により抽出した。

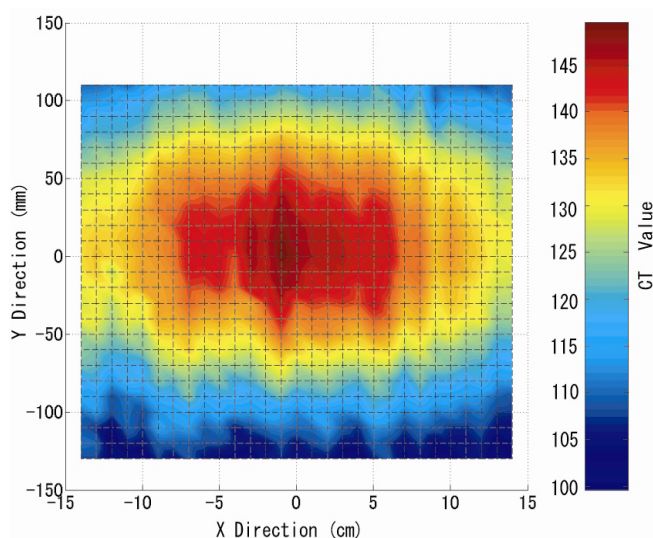


Fig.5 CT value of X-ray CT instrument

Fig.5は横軸にFOVの水平方向を、縦軸にFOVの鉛直方向を、カラーバーにCT値を示したグラフである。このグラフに示されるように濃淡は均一でなくほぼ同心円的に色合いが変化している。これはFOV内の位置が変化するとCT値が変化する事が認められる。このときのCT値はFOV中心から離れる程大きく減少していく事が認められた。尚、FOV中心とのCT値の最大の差は49.8であった。

3. 2 位置依存性の補正実験

3. 1の位置依存性の結果から、各撮影位置のCT値変動を補正するための係数を、FOV中心を1となるように算出した。

補正実験は位置(0,0), (-10,0), (10,0), (0,-10), (-10,-10), (10,-10), (0,10), (-10,10), (10,10)の計9箇所

において、3. 1の撮影条件下で、シリコーンゴム40%のCT撮影を行った。得られた各位置のCT画像からROIによってCT値を取り出し、位置依存性補正係数を掛けたものを補正後のCT値とした。

Table 1 CT values using correction curve obtained experimentally

FOV内の位置		シリコーンゴム40%のCT値	
X(cm)	Y(cm)	補正前	補正後
0	0	147.2	147.2
-10	0	137.1	149.0
10	0	137.1	147.6
0	10	140.5	147.0
-10	10	130.0	145.5
10	10	130.4	146.5
0	-10	131.6	143.8
-10	-10	124.4	146.9
10	-10	125.5	142.6

Table 1はFOV各位置におけるシリコーンゴムのCT値と位置依存性の補正を行った後のCT値を示したものである。補正前ではCT値はFOV中心と最大で22.7ずれている。さらに、各位置によってCT値が大きく変動している事が認められる。これに対し補正後のFOV中心との差の最大は-4.6であり、各位置のCT値の変動は小さくなっているため、補正前と比べて大きく改善できた事が認められた。

3. 3 硬さとCT値との相関

CT値と硬さとの相関関係を求めるために、硬さ測定とCT値測定を行った。硬さは応力・歪み法からヤング率を求め、当研究室で開発された触覚センサの周波数変化率を硬さの指標として次の実験を行った。

測定試料には、硬さを濃度により変化可能なシリコーンゴムを濃度40%から85%まで5%刻みで計10種類用いた。硬さ計測は触覚センサを測定試料に対して垂直に秒間1mm、3mmまで押し込んだ。このときの押し込み量[mm],接触荷重[g],周波数変化量[Hz]をコンピュータによりリアルタイムで取り込み測定を行った。CT値測定は、測定試料をFOV中心にセットし、

10回CT撮影を行った。撮影条件は3. 1と同様に一定に保った。CT値は各CT画像から、硬さ測定部位にROIを定めCT値を抽出し、平均値として算出した。

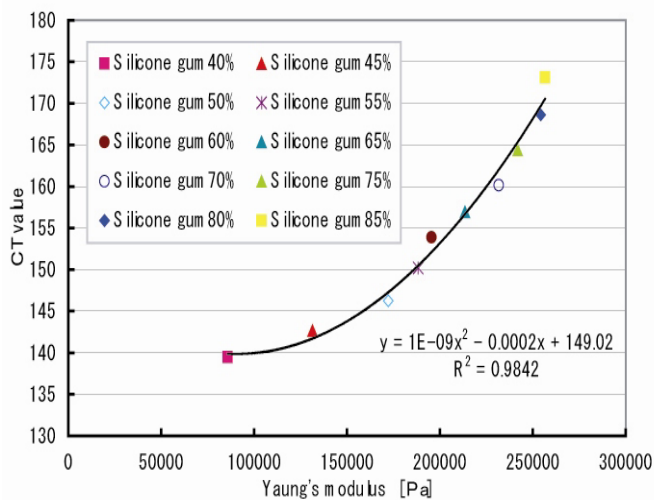


Fig.6 CT value vs. Young's modulus of silicone gum

Fig.6 は各シリコンゴムのヤング率を横軸にとり、縦軸にCT値を取った特性である。これは、シリコンゴム濃度が段階的に増す度にヤング率が増加している事から硬くなる事が分かる。さらに、ヤング率とCT値との間には $R^2 = 0.9842$ と相関関係が得られた。この関係から、CT値からヤング率を識別する事が可能である。

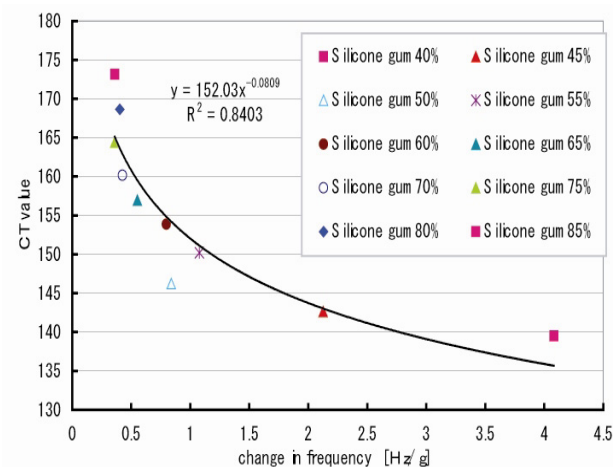


Fig.7 CT value vs. change in frequency measured by Tactile sensorsystem

Fig.7 は各シリコンゴムの周波数変化率を横軸にとり、縦軸にCT値を取った特性である。これは、シリコンゴムが軟らかくなる程周波数変化率が大きくなっている事が分かる。さらに、周波数変化率はより軟らかいシリコンゴムの判別に向いていると言える。

5 考察

CT値は撮影位置によって大きく変動し、Fig.5に示されるようにFOV中心から離れる程CT値が減少するという規則性が認められ、位置依存性を補正する事が可能であった。さらに、CT値とヤング率間の強い相関関係から、CT値からヤング率を識別でき、硬さ・軟らかさの度合いをCT値から判断できた。Fig.7より触覚センサとX線CT装置との間にシリコンゴムに関して互換性がある事が認められた。

従って、軟組織モデルにおいてCT画像から位置依存性を考慮し、より定量的に硬さ・軟らかさの情報を引き出す事が可能となった。これらの結果から今後、生体体内臓器の硬さ・軟らかさの情報もCT画像から解析できる可能性が示された。

参考文献

- [1]<http://www.kusuriyasan.org/byoukitoyobou/zanritusen-gan.htm>
- [2]Blake G.M., McKeeney D.B., Chhaya S.C., Ryan P.J., Fogelman I. Dual energy X-ray absorptiometry: the effects of beam hardening on bone density measurements. Medical Physics, Volume 19, Issue 2, 1992, Pages 459-465
- [3]Nishitani M., Yamada K., Maekoshi H. Radiation Measurement, Japan, Ohmsha, 2003
- [4]Omata S., Terunuma Y. New tactile sensor like the human hand and its applications. Sensors and Actuators A, 35 9-15(1992)