

実習 R&D ビームライン : BL47XU

レントゲン (X線) 写真を解釈するために

—吸収・屈折像コントラスト生成の基礎知識—

高輝度光科学研究センター

淡路晃弘

1. はじめに

1895年、Wilhelm Conrad Roentgenにより物体を透過する未知の放射線 (X線) が発見された。物の内部が透けて見えるという素晴らしい性質を持つことから医学診断に応用され、今日では人体内部のみならず広く医学、生物学、材料科学において光学顕微鏡や電子顕微鏡では不可能な情報を探る重要な手段としてゆるぎない地位を確立している。撮影されたレントゲン (X線) 写真は濃淡 (コントラスト) によって表現されるが、これを解釈するためにはコントラストの生じるメカニズムを理解しておく必要がある。BL47XUでは、吸収によるコントラストと屈折によるコントラストを例に、撮影した像がどのように違って見えるのかを実際に体験してもらう。

1. 吸収コントラスト

一定波長のX線が物質中を通過するとき、X線強度の減少の割合は通過した物質の種類や密度 (状態) と距離によって変化することが実験事実として解っている。そこで物質層の厚さ dx によって強度 I が dI だけ減少するとすると、

$$-dI/I = \mu dx$$

と表される。これを積分すれば、

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

となる。ここで I_0 の入射強度が物質の厚さ x を通過して強度 I になるとしている。 $\mu [m^{-1}]$ は線吸収係数とよばれる。 μ はX線の波長と物質によって決まっている。観察対象物 (被写体) 各部の吸収の違いによって濃淡 (コントラスト) がつくので吸収コントラストと呼ばれている。

2. 屈折コントラスト

屈折率の異なる2つの媒質の境界ではX線もスネルの法則 (図1) にしたがって屈折をうける。

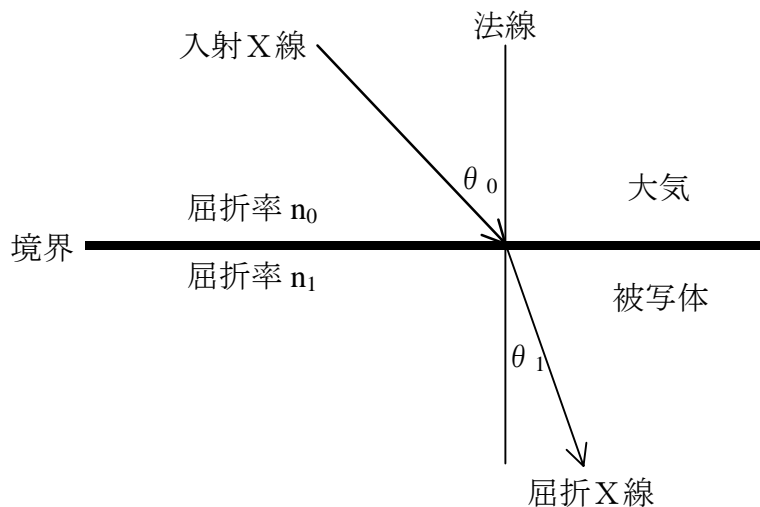


図1 : スネルの法則

この時、 $\sin(\theta_0) / \sin(\theta_1) = n_1 / n_0$ が成り立つ。

ここで、 θ_0 、 θ_1 はそれぞれ大気、被写体側での入射角と屈折角であり、 n_0 、 n_1 は大気の屈折率および被写体の屈折率である。

この屈折を受けたX線と屈折を受けずにそのまま透過してきたX線とによって境界の観察像に明暗のコントラストを生じる(図2)。

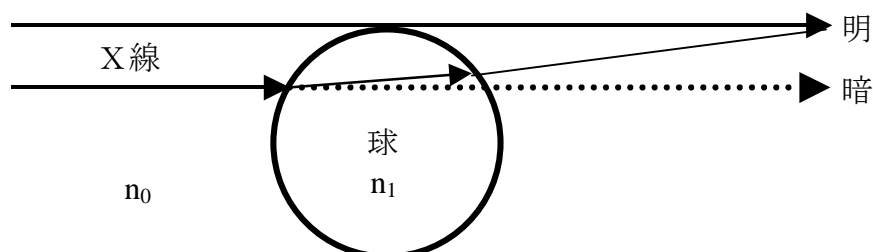


図2：球殻によるX線の屈折

これは屈折コントラストと呼ばれている。今、一方の媒質を大気とすると、その成分の約80%が窒素、約20%が酸素であり、被写体が液体や固体の場合に比べて密度も3桁程度低いので一般に大気の屈折率は被写体が液体や固体の場合は $n_0 = 1$ としても差し支えない。吸収の影響を無視して被写体の屈折率を $n_1 = 1 - \delta$ と表すと、屈折によって生じる偏向角 $\Delta\theta$ ($\equiv \theta_1 - \theta_0$)が小さい場合の境界での屈折は近似的に

$$\Delta\theta = \delta \cdot \tan(\theta_0)$$

で表される¹⁾。ここで、

$$\delta = r_e \lambda^2 N_a Z \rho / (2\pi M)$$

であり、 r_e ：古典電子半径 ($r_e = e^2/m_e c^2 = 2.818 \times 10^{-15} \text{m}$, $m_e c^2$: 電子の静止エネルギー)、 λ ：X線の波長、 N_a ：アボガドロ数、 Z ：原子番号、 ρ ：媒質の密度、 M ：原子量である。人体を構成する元素、例えばカルシウムや炭素のX線エネルギー($5 \text{keV} < E < 50 \text{keV}$)に対する δ の値は $10^{-5} \sim 10^{-7}$ の大きさに過ぎないのでX線の偏向角 $\Delta\theta$ も δ と同程度の値を持つ。従って、屈折コントラスト像を観察するためには、このわずかに偏向したX線を検出する必要がある。この為、X線源と被写体との距離を離すことで平行性の高いX線が必要であるがBL47XUでは光源の大きさが約0.1mm程度と小さく距離も44m以上取れることから十分に平行なX線を被写体に照明することが出来、被写体から画像検出器までの距離も最大で約7m程度取れるようになっていたのでわずかに偏向したX線も検出することができる。実習での像撮影は、画像検出器の位置は固定で、被写体の位置のみを変えることによって屈折コントラスト像及び吸収コントラスト像を観察する予定である。図3にBL47XUで撮影されたマウス・マウスの屈折コントラスト像及び吸収コントラスト像をまた、図4に肺部の拡大像をそれぞれ示す²⁾。図3,4から解るように、肺組織など軽元素で構成された臓器は吸収ではコントラストがつかないが屈折を利用すればたとえ僅かな屈折率の差($10^{-5} \sim 10^{-7}$)であっても明瞭なコントラストを観察できる。

今回紹介した屈折コントラストの更なる詳細については参考文献3)を参照されたい。

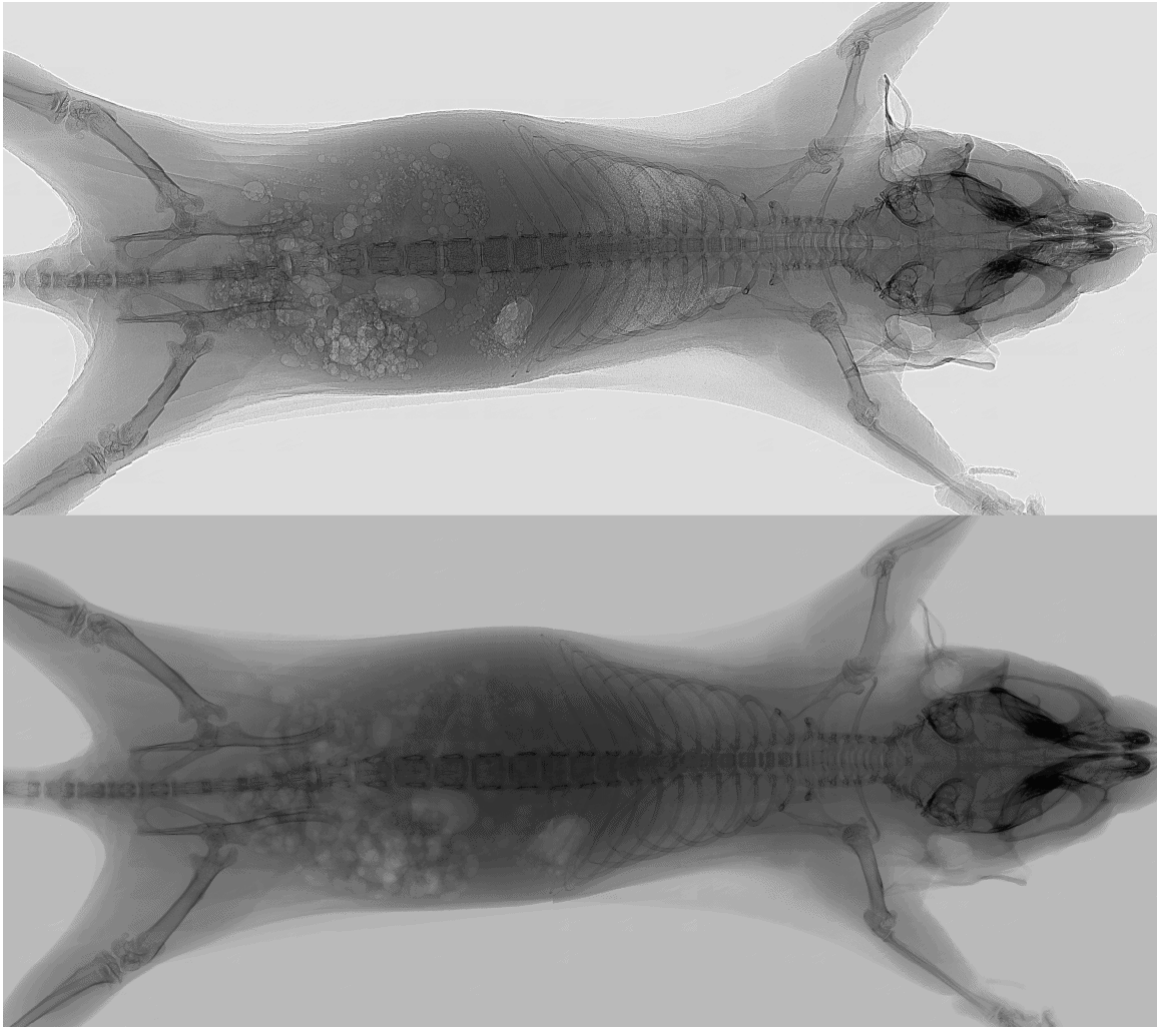


図3 上：ヌード・マウスの屈折コントラスト像（マウスー画像検出器距離＝6.5 m）；
下：吸収コントラスト像（マウスー画像検出器距離＝20 cm）
E = 28.8keV, Exposure Time = 1.5 s.

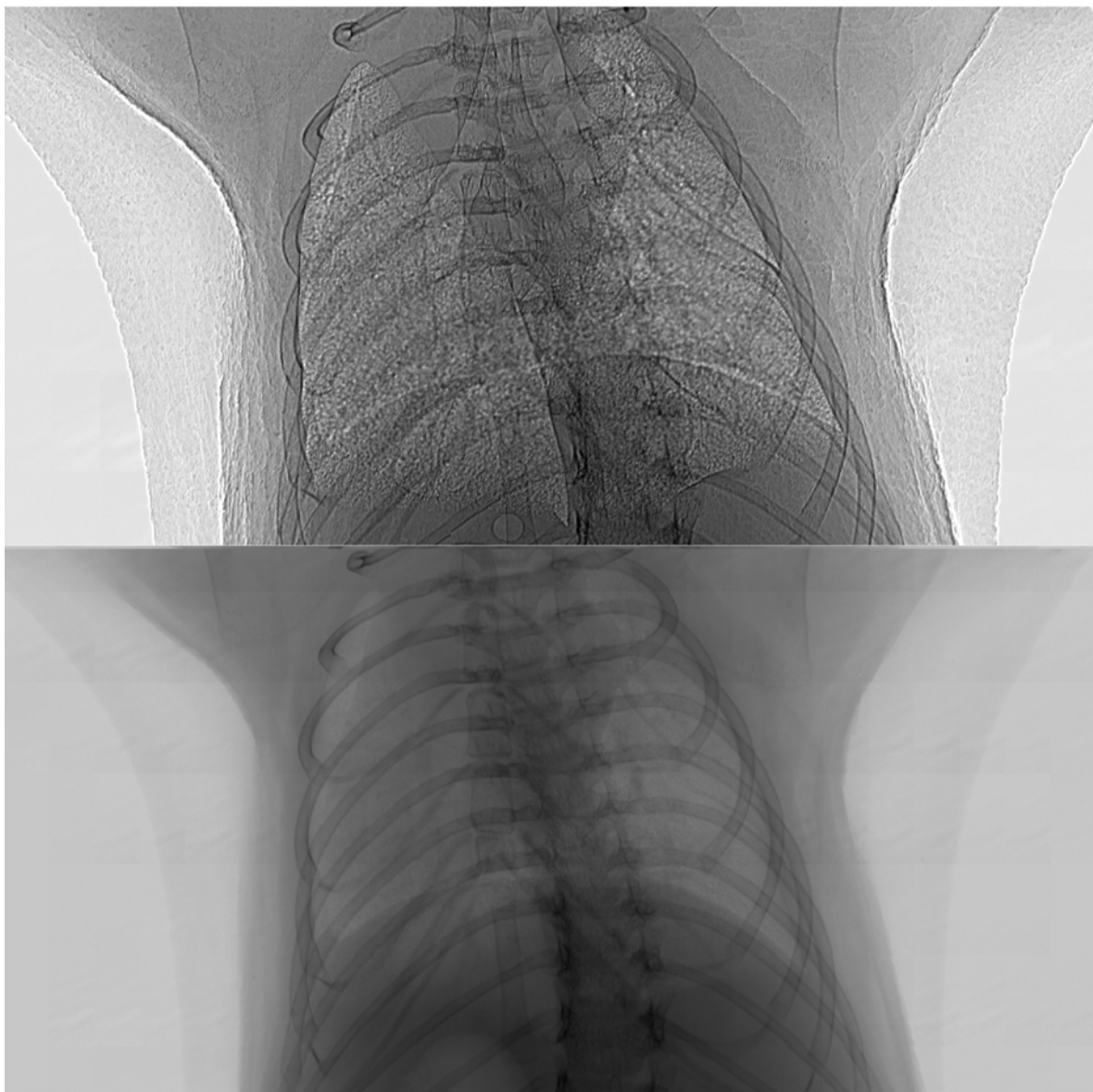


図4（上：肺部の屈折コントラスト拡大像；下：吸収コントラスト拡大像）

3. おわりに

現在、医療現場において広く用いられているX線写真は吸収コントラストを用いている。今回示したマウスの写真からも明らかなように屈折コントラストを撮影することによって肺、気管支、空気（ガス）と組織の界面、骨と組織の界面等を造影剤を用いなくても撮影できることが確認されている。早期発見が難しい肺ガンなど従来は医師が吸収コントラスト像から経験を頼りに診断を行っていたがこの方法を用いれば正常か異常かの診断において信頼性を大幅に向上できる可能性がある。将来屈折コントラスト法が広く臨床に応用され診断能力がこれまでよりも一段と高まるよう期待している。

参考文献

1. Y. Suzuki, T. Hirano and K. Usami, X-ray micro-tomography using synchrotron radiation, X-ray Microscopy in Biology and Medicine, ed. By K. Shinohara et al., Japan Sci. Soc. Press, Tokyo/Springer-Verlag, Berlin, p.179-190 (1990).
2. N. Yagi, Y. Suzuki, K. Umetani, Y. Kohmura and K. Yamasaki, Refraction-enhanced x-ray imaging of mouse lung using synchrotron radiation source, Medical Physics, p.2190-2193, 26 (1999).
3. Y. Suzuki, N. Yagi, K. Umetani, Y. Koumura and K. Yamasaki, Refraction-contrast imaging using undulator radiation at SPring-8, SPIE Proc. on Medical Applications of Penetrating Radiation, p. 13-22, 3770 (1999).