〔第32回総会シンポジウム〕

III. 拡大撮影に関する技術的諸問題

（軟X線拡大撮影について）

国立名古屋病院放射線科

鈴木章吾・柴山孝行・山口幸三

(Code No. 21462, 21260)

SOFT-TISSUE MACRO-RADIOGRAPHY

by SHOGO SUZUKI,
TAKAYUKI SHIBAYAMA and
KOUZO YAMAGUCHI
National Nagoya Hospital, Nagoya

Summary

Macroradiography with soft X-ray is considered to be useful for the detection of early lesion in breast, thyroid and soft parts of extremities. Whereas the microcalcification in breast cancer, also in thyroid cancer is very important radiological findings, its clear demonstration is not usually easy.

The retrospective study of the mammograms taken in our department revealed that 43% of the breast cancer cases showed microcalcification on the films. Also it was found that the majority of the microcalcifications were smaller than 300 microns in diameter. Thus, we have studied on the technical factors extensively to obtain more useful mamography images, comparing with the conventional mammography technique.

Accordingly, the main focus of this study was placed on the development of macro-mammography technique especially on the precise revelation of the microcalcifications. However, this effort was lead to the development of the macroradiography of soft tissue in general, as the results.

For this particular research purpose, special x-ray tube furnished with ultrafine focus (100 microns) and with carefully designed full-wave rectifier was developed. Also, auxillary apparatus, cassetts and X-ray table (for bidirectional use) were specially designed.

Utilizing these new inventions, we finally reached the practically satisfactory technical factors for macro-mammography, as follows:

magnification: 2~3 times, kVp: 25 kVp, FFD: 70 cm, mA: 8~10 mA, focus: 100 microns, Exposure: 2~3 sec, (Surface Doses: 300~800 mR), (The compression of the breast is recommened), Film: LoD, Screen (bcak): LU (Toshiba)

1. はじめに

軟X線拡大撮影法の対称となる部位としては乳房、甲

状腺、上下肢の軟部組織等があげられる。その中で最も軟X線拡大撮影を必要とするのは乳癌、甲状腺癌等の鑑別診断における微小石灰化の描出であろう。乳癌のマン

Fig. 1. 乳癌の型式

モグラフィー像としては Fig. 1. に示す 3つの型に分類される¹⁾。各々の特徴として、A型は管内進展型で微小石灰化像を特徴とし、B型は間質内浸潤増殖型で、球状腫瘍とそれに伴うスピクラ像を特徴とする。C型はA型、B型の混合型である。この微小石灰化を含む乳癌の割合は Fig. 2 のようで、A型29%、C型14%で合計43%を占める¹⁾。これら微小石灰化の大きさの分布は Fig. 3 のようで、300 μ 以下のものが多く存在する¹⁾。その中で肉眼で識別できたものは Fig. 4 に黒点で示すように20%に過ぎない²²⁾。これを拡大撮影により、100 μ までの微小石灰化を描出し得たとすると、70%が視認可能と

Fig. 2. Patterns in Mammography (100 cases)

Fig. 3. Histological Size of minute Calcification (micron, in diameter) (von Koss-technique)

Fig. 4. 石灰化の大きさとその数 (黒点部分が肉眼で識別できた)

なり診断上極めて有用である。甲状腺癌についても藤本らによると、59%に微小石灰化が存在すると言われている²⁾。以上のような微小石灰化の描出の重要性から、当院の柴山らによって昭和42年から主として乳房の軟X線拡大撮影法の研究開発が進められてきた。軟X線拡大撮影は撮影部位により Positioning は異なるが、基本的な問題は共通であるから乳房の軟X線拡大撮影を中心に報告する。

2. 実験及び結果

2.1 使用装置および器具

X線装置: 日立 DR-155-23 軟X線用 (50 kVp 以下)
単相定電圧方式

X線管: 日立 U-6M-55P UH-6H 10Z 100 μ .

線量測定器: ビクトリン社製 555型ラドコンII, プロープ 10 LA (6~35 keV)

濃度計: 東京光電 ANA-82T

マイクロフォトメータ: ナルミ社製 NLM-III 特型.

テストチャート: Funk 社製 No. 6745 0.05 mmPb No. 6716 0.05 mmPb 矩波形チャート, 試作点状チャート (40 $\mu\phi$ ~175 $\mu\phi$)

ファントム: アクリライト 0.5 cm 厚さ 10枚, 乳癌切除切片 (0.5 cm~1.0 cm) 2種.

フィルム: Kodak RP/TL, デュポン LO-Dose, Fuji Rx.

増感紙: 極光 HS, BS, 東芝 LU, LM, さくら GTS, GTH, Fuji G-4, G-8, Kodak レイネックス

現像機: Kodak M4A X-OMat.

撮影台: 試作撮影台, 軸方向用, 側方向用

カセット: 試作軟X線拡大撮影用カセット

2.2 X線管電圧について

乳房などのようなX線吸収差の少ない軟部組織の微細構造及び微小石灰化を描出するためには、その組織相互の吸収差をより大きくすることが最も重要である。一般にX線の吸収は $I = I_0 e^{-\mu x}$ (I_0 , I : 吸収層通過前, 後のX線強度, μ : 吸収係数, x : 吸収層の厚さ) で表わされる。又 $\mu = aZ^3 \rho \lambda^3$ (a : 比例定数, Z : 原子番号, ρ : 密度, λ : X線の波長) で表わされ、X線の波長 λ についてはその3乗に比例する。したがってX線管電圧は原則的には低い程良い。しかし佐藤によればパラフィン7.5 cm (5 cmの厚さの更年期乳房に相当)の附加によって1 Å以上の軟X線は除去されると言っている³⁾。したがって被写体の特に薄い場合は別としてDuane-Huntの式 $\lambda = 12.34/kV$ [Å] より12.34 kV以下の低い電圧の使用は意味のないことになる。山崎らは12~16 kV (半価層: 0.2~0.4 mmAl) が適当であるといっている。文献を総合すると、乳房の軟X線撮影には20~40 kVpが多く使用されている⁴⁾。

軟X線拡大撮影における適正な管電圧を求めるため、Fig. 5に示すように微小石灰化を含む乳癌切除切片(厚さ約5 mm)をアクリライト板3 cm (圧迫固定法を採用しているので実際の被写体による軟X線吸収はこれより少ない)の上にせ、Focus 100 μ , Film RP/TL, 増感

Fig. 5. 実験方法図

Fig. 6. Demonstrability of Micro calcifications according to "Tube-voltage"

紙 HS 及び LM (各々 Back) を使用し、2 倍及び 3 倍拡大撮影を行い管電圧による描出能を検討した。その結果は Fig. 6 に示すように、管電圧 30 kVp までは約 130 μ の微小石灰化まで描出するが、35 kVp では消失しはじめる。したがって被写体の厚さにもよるが、30 kVp (実効電圧約 18 kV) 以下が適当と言える。しかし 20 kVp (実効電圧 14.6 kV) では適正濃度を得るのに極度に長い照射時間を要し実用に適しないことが判った。

2.3 拡大率について

拡大撮影における実用的な拡大率は描出し読影しようとする目的により定められるべきである。乳房の拡大撮影においては微小石灰化の描出を主目的とする。したがってX線装置、感光材料、附属器具等の性能及び撮影手技等によって、どの程度の微小石灰化までX線吸収の差として写真上に描出し得るかが基礎となる。前節の実験において描出し得る微小石灰化は Fig. 6 に示すように電圧を低くしても 130 μ ままで、拡大率を 2 倍、3 倍と変えても見易さが変わるだけで描出能は変らなかった。したがって更に微小なものまでX線吸収の差として描出しえない限り 2 倍でも良く、無理に 3 倍拡大する必要もない。むしろ管電圧を低くしてX線吸収差を大きくし、より微小なものの描出に努めることが望ましい。したがって現在の装置及び感光材料の性能では 2~3 倍が適当であろう。拡大撮影における拡大率は一次元的な表示であるが、写真を読影する場合は二次元の面として観察する。したがって 2 倍拡大で面積は 4 倍であり、3 倍拡大では 9 倍となる。これが特に微小物を目的とする拡大撮影を行った場合、情報量の飛躍的に向上する理由である。

2.4 X線管焦点について

拡大撮影用X線管焦点は微小である程よいが、X線出力との関係で制限を受ける。したがって描出しようとする目的物の大きさ、それに伴う必要拡大率及びX線出力、感光材料の性能等の諸条件より決定せざるを得ない。前節の実験から描出しようとする石灰化の直径は 100 μ 前後で、必要拡大率は 2~3 倍である。X線写真を読影する場合、障害を感じない量の大きさは約 200 μ 以下と言われている⁷⁾。いま 3 倍拡大した場合、量を 200 μ 以下に抑えるためのX線管焦点の大きさは、被写体の動揺がなく、半影の大きさを量とした場合、半影を求める式、 $H = F \times \frac{b}{a}$ (F : 焦点の大きさ, a : 焦点被写体間距離, b : 被写体フィルム間距離) より焦点の大きさは 100 μ となる (Fig. 7 参照)。しかし目的物は 100 μ 前後の微小石灰化である。したがって Fig. 7 右のように、100 μ の焦

Fig. 7. 焦点と半影

点では半影の占める面積が大きく、ボケた像として観察される。さらに鮮鋭な像として描出するためには、Fig. 7 左のように焦点は 30μ が適当であろう。しかしわれわれが依頼して試作した 100μ 焦点 X 線管では、陽極を 3 倍回転にし、高圧回路にコンデンサーを入れても 35kVp で約 10mA の出力しか得られない。したがって現状では焦点を 30μ にしても、出力が著しく低下して実用には適しない。診断の場合は微小石灰化の存在を確認することが主目的である。したがって多少像はボケるが、 100μ 焦点でも充分描出し視認することができ、実用上は許容される。以上のことから現在の装置及び感光材料の性能では管球焦点は 100μ が限界であろう。

2.5 各種材料の軟 X 線吸収率について

軟 X 線拡大撮影では出力が著しく制限されている現在、限られた出力を有効に使用するためフィルムに到達するまでのロスを少なくすることは極めて重要である。したがって各種材料を選定する資料とするため、 35kVp (実効電圧 18.5kV) で各種材料の X 線吸収率を測定した。結果は Table. 1 に示すようで、増感紙及びカセット材料の吸収率は極めて大きい。したがって、これらの使用方法については後述するように十分な考慮が必要である。

2.6 フィルム及び増感紙について

軟 X 線拡大撮影では X 線出力が著しく制限されるのでこれを補うため増感紙の使用は絶対に必要である。われわれの実験によれば高鮮鋭度フィルムを使用すれば、HS 級の高感度増感紙でも粒状性の低下は少なく、充分使用可能である。しかし増感紙は Table. 1 に示すごとく軟 X 線の吸収が著しく大きいのでフィルムのフロントに使用することはできない。フィルムも感度の高いことが望ましいが、一般医療用フィルムでは高鮮鋭度増感紙 (BS) と組合せても粒状性が悪く、微小陰影は消失するので、non screen タイプで感度の高いものが適当である。われわれは従来、RP/TL フィルム (以下 TL とする) と HS 増感紙のバックを組合せて使用してきたが X 線出力が少ないため感度の点で満足すべきものではなかった。近年被曝量減少の目的で高感度の希土類増感紙が発売されたので、フィルムとの組合せを考慮し、その性能を検討した。またマンモグラフィー用の高感度片面乳剤フィルムとの組合せについても併せて検討した。

先づ高感度の増感紙を見出すため、従来最も良い性能を示した TL に各種増感紙 (バック) を組合せ、アクリル階段を使用し、同一曝射 (30kVp , 60mAs , 100cm) を行い比較した。結果は Fig. 8 のようで、HS より感度の良いものは、LU, LM, GTH で LU が最も高い感度を示した。

次にフィルムを変え片面乳剤の Low-dose フィルム、(以下 Lo-D とする) と各種増感紙を組合せ同一条件で実験した。結果は Fig. 9 に示すごとく、HS より高い感度の増感紙はやはり LU, LM であった。フィルムについては、TL より Lo-D の組合せの方が高い感度を示した。

次に高感度を示した LU, LM 増感紙と TL, Lo-D の組合せについて、 30kVp 、濃度 1 における TL+HS に対する相対感度を調べた。結果は Fig. 10 に示すようで、TL+LM で 2 倍、TL+LU で 3 倍、Lo-D+LM で 6 倍、Lo-D+LU では約 10 倍の感度を示した。

次に各フィルムと増感紙の組合せによる粒状性について、 30kVp で濃度約 1 をとり各組合せによる RMS を

Table 1. X-Ray Absorption by the materials placed in the front of mammography Film

materials	intensifyig screen				cassette		Acrylite 3.0 mm	blistered polystyrene	
	HS front	MS front	FS front	LM front	Bakelite 3.2 mm	Alumi. 1.06 mm		soft 50 mm	hard 45 mm
Absopction (%)	85.2	71.4	73.5	52.9	36.1	58.8	26.4	8.8	11.7

35 kVp (effective, 18.4 kV)

Fig. 8. Characteristic curve of Screen

Fig. 9. Characteristic curve of Screen

求めた。結果は Table 2 に示すようで、従来使用してきた TL+HS が最も良く、以下 TL+LM, TL+LU, LO-D と各種増感紙の組合せの順で、医療用フィルム RX では高鮮鋭度用の BS と組合せても粒状性は最も悪い結果を示した。希土類増感紙では増感紙の種類による粒状性の差は殆んど見られず、組合せたフィルムの感度が高い程、粒状性が悪い結果を示した。

次に高感度を示したフィルムと増感紙の組合せについて MTF を求めて比較検討した。結果は Fig. 11 に示すようで、TL+LM の組合せが最も良い結果を示した。増感紙については、LU より LM の組合せが良く、フィ

Fig. 10. フィルム、増感紙の組合せによる感度 (30 kVp)

Table 2. Radiographic mottle

	Film+Screen	RMS
1	TL+HS	37×10^{-3}
2	TL+LM	40×10^{-3}
3	TL+LU	41×10^{-3}
4	Lo-D+LM	46×10^{-3}
5	Lo-D+LU	46×10^{-3}
6	Lo-D+G-4	46×10^{-3}
7	Lo-D+G-8	45×10^{-3}
8	RX+BS	63×10^{-3}

30 kVp, 8 mA, D=1, 50 $\mu\phi$

ルムについては Lo-D よりも TL の組合せが良く、従来使用してきた TL+HS の組合せに比較して、特に高周波領域で良い結果を示した。

次にこれらの組合せが、どのような描出能を示すか、乳癌切除切片をアクリライト 3 cm に重ねたファントムを使用し、25 kVp で 2 倍拡大撮影を行なった。結果は TL+LM の組合せが最も良い描出能を示し、次に

Fig. 11. Film, Screen の組合せレスポンス

TL+LU の組合せで、各々 130μ の微小石灰化まで描出した。その他の Lo-D+LM, Lo-D+LU の組合せでは、写真濃度が 1.0 以上になると 130μ は消失するが、濃度を 0.8~0.9 にすると、TL+LM, TL+LU の組合せに比較すると少し劣るが、 130μ まで描出することができた。臨床例から判断すると、被写体の薄い場合は TL+LU の組合せがよく、厚い場合は感度の高い Lo-D+LM の組合せが良い。

2.7 カセットについて

軟X線拡大撮影には片面増感紙を使用するので、フィルムとの密着を良くするためにカセットが必要である。従来のベークライト板やアルミ板を使用したものでは Table 1 に示したように軟X線の吸収が 36%~59% と非常に大きく適当でない。したがって、われわれは Fig. 12 に示すようなフロントにX線吸収の少ない発泡スチロール板 (厚さ約 4 cm) を使用したカセットを考案し使用している。これによって従来のカセットより軟X線の吸収を 30%~50% 減少させることができる。Fig. 13 は試作し好結果を得ている軟X線拡大用カセットの外観である。

2.8 撮影台について

軟X線拡大撮影ではX線管出力、感光材料の性能等から曝射時間は長く (2~3 秒) なるので、動揺による暈を防ぐため安定な体位が必要である。したがって撮影台は側方向用はベット型、軸方向用はテーブル型が良い。われわれが試作した撮影台は、高さ 90 cm で、天板は透

Fig. 14. 側方向撮影台

明なアクリライト板 (厚さ 1 cm) 張りとし、乳房を位置させる部分を切りとり、代りに発泡スチロール板 (厚さ 3 cm) を使用した。カセット受けは撮影台の下に距離を自由に調節できるように取付けてある。軸方向撮影で問題になるのは、生殖腺への被曝と乳房が胸壁部まで十分に写し出されないことである。これらを解決する目的で試作した軸方向撮影台は患者の位置する側に被曝防止のために厚さ 1 mm の鉛板をサンドしたベニヤ板を 10 度の傾斜で取付けてある。この 10 度の傾斜は乳房が胸壁部まで十分に写し出されるよう、フィルムを胸壁垂直下よりも奥に入れるためである。これにより乳房以外の被曝をなくし、胸壁部まで良く描出される。Fig. 14 は側方向用撮影台で、Fig. 15 は軸方向用撮影台である。

2.9 圧迫固定器について

軟X線拡大撮影ではX線出力、感光材料の性能等から曝射時間は長く 2~3 秒を要する。拡大撮影では量は拡大率に比例して増大するので、被写体の動揺を防止することは極めて重要で、これが軟X線拡大撮影法発展の大きな障碍となっていた。われわれはこれを解決する目的で Fig. 16 のような圧迫固定器を考案した。この圧迫固定器は管球側に支持金具で取付けられ、上下、前後、左右及び回転等が自由に調節できるようになっている。したがって焦点被写体間距離を一定のまま自由に圧迫固定ができる。圧迫部は発泡スチロールで軟X線の吸収が少なく、しかも感触がよく写真上に障害陰影を投影することもない。Fig. 16 のように圧迫固定を行なうと、動揺が防止されると同時に被写体が薄くなるためX線照射量が少なくてすみ、管電圧も低下させることができる。したがってコントラストが向上し微小石灰化の描出が容易となる。また乳房辺縁部と胸壁部の黒化度差が少なくなり全体の読影が容易になる。従来内部構造の描出が困難であった授乳期乳房でもその描出が容易となった。以上のように圧迫固定器は乳房の軟X線拡大撮影には必須の

Fig. 12. フィルム取枠使用断面図

Fig. 13. カセット外観

Fig. 15. 軸方向用撮影台

Fig. 16. 圧迫固定

用具で、その考案により乳房軟X線拡大写真の情報量を著しく向上させることができた。

2.10 ポジショニング及び撮影条件について

側方向撮影体位 (Medio lateral projection) は患者を側臥位とし、乳房は発泡スチロールの支え台で下から胸壁に沿って押し上げるようにし、上から圧迫固定器で圧迫固定する。Fig. 17 はその撮影状況を示す。

軸方向撮影体位 (Cranio Cauded projection) は患者を撮影台の前面に膝まずかせ、身長に応じて膝下の発泡スチロール台の高さを調節する。上体はやや斜位で防護板に沿って支え、乳房を天板の発泡スチロール製受け台に位置させ、上方より圧迫固定器で圧迫固定する。Fig.

Fig. 17. 側方向撮影体位

Fig. 18. 軸方向撮影体位

18はその実況を示す。

当院では拡大撮影が情報量に優れていることから、乳房撮影は全例拡大撮影のみ実施している。

次に撮影条件及び臨床写真を例示する。

- 2倍拡大撮影 厚さ 5 cm (成熟期乳房)
Film+Screen 電圧 電流 時間 距離
Lo-D+LU 25 kVp 7 mA 2.0 sec 70 cm
Lo-D+LM 25 kVp 7 mA 3.0 sec 70 cm
TL+LM 34 kVp 8 mA 2.0 sec 70 cm
- 2倍拡大撮影 厚さ 3 cm (♀)
TL+LM 30 kVp 8 mA 2.0 sec 70 cm
- 3倍拡大写真 厚さ 5 cm (♀)
Lo-D+LM 35 kVp 10 mA 3.0 sec 90 cm
- 3倍拡大撮影 厚さ 3 cm (♀)
Lo-D+LM 32kVp 10 mA 3.0 sec 90 cm

Fig. 19. 管内型乳癌

Fig. 21. 間質型早期乳癌

Fig. 20. 間質型乳癌

Fig. 22. 甲状腺癌

- Fig. 19 はA型乳癌で微小石灰化が良く描出されている (2倍拡大側面像).
- Fig. 20 はB型でスピクラーが良く描出されている (2倍拡大側面像).
- Fig. 21 はB型早期癌 (軸方向3倍拡大像).
- Fig. 22 は甲状腺癌, 石灰化が良く描出されている (3

〔第32回総会シンポジウム〕 拡大撮影に関する技術的諸問題 (鈴木)

倍拡大側面像)。

2.11 被曝線量について

患者への被曝は軸方向撮影の場合でも、試作拡大撮影台を使用することにより乳房以外への被曝は無視できる。乳房の被曝線量は2倍拡大撮影の場合、皮膚焦点間距離30 cm、電圧25~30 kVp で約300~800 mR で一般乳房撮影より少ない。

3. ま と め

乳癌、甲状腺癌等の初期診断上、微小石灰像の描出は極めて重要である。軟X線拡大撮影用微小焦点管および撮影用具の開発並びに感光材料の性能向上と撮影手技の工夫により、従来軟X線では不可能とされていた拡大撮影法が可能となった。管電圧も25 kVp (実効電圧14.6 kV) で撮影できるようになり、軟部の微細構造は勿論、直径約130 μ の微小石灰化まで描出できるようになり診断能は著しく向上した。被曝量は1回の照射で300~800 mR で普通乳房撮影より少なく、ポジショニングも比較的容易である。

稿を終るに際し、第32回総会シンポジウムに発表の機会を与えていただいた上田稔会長、柴山孝行座長、そして本研究に際して指導と援助下さいました当院外科久保完治博士並びに当院技師諸氏に感謝いたします。

文 献

- 久保完治：マンモグラフィーにおける乳癌の診断，臨床外科24，195，1969.
- 藤本吉秀：甲状腺，外科診療，昭和46年.
- 佐藤伸雄：Mammography における諸問題，第1報 撮影寛容度及びコントラスト，さくら X-Ray 研究，17，6，1966.
- 山崎 武，他：乳房の低電圧撮影法に関する基礎的研究，日医放學誌，27，4，1967.
- 江藤秀雄：放射線医学，医学書院，1965.
- 高橋信次，X線拡大撮影法，最新医学，12，9，1957.
- 高橋信次，X線撮影と検査の手引き，南山堂.
- 柴山孝行，他：乳房軟X線拡大撮影法の研究，第4報，医療，27，9.
- 柴山孝行，他：乳房の低電圧同位相拡大撮影法，日放技學誌，24，359，1967.
- 秋貞雅祥，他：乳腺撮影に関する研究(第3篇)，基礎的研究ならびに乳癌における石灰沈着の特殊性に関して，日医放學誌，26，4，1966.
- 秋貞雅祥：乳腺撮影に関する研究(第1篇)，日医放學誌，26，1，1966.
- 秋貞雅祥：マンモグラフィーに関する研究(第2篇) 臨床放射線，12，5，1967.
- 中村 実：軟X線撮影法の検討，日放技學誌，22，3，1966.
- 綾川良雄，他：レスポンス関数よりみた拡大撮影の至適拡大率，X線拡大撮影法の研究，日医放學誌，27，5，1967.
- 中村 実，他：軟X線撮影法の研究(第2報)，乳房撮影法の研究，日放技學誌，32，4，1968.
- 佐藤伸雄，他：軟部組織X線撮影技術I~IV，日放技學誌，28，3.
- 伊藤久寿：ゼロラジオグラフィーによる乳腺疾患のX線学的研究，日医放誌，28，3，1968.
- 高橋信次：拡大撮影，診断と治療，47，6，1975.
- 高橋信次：X線拡大撮影，内科，8，1，1961.
- 柴山孝行，他：乳房の軟X線拡大撮影法(第5報)，圧迫固定拡大撮影法，第30回総会抄録，1974.
- 柴山孝行，他：乳房の軟X線拡大撮影法(第6報)，軸方向拡大撮影法，第32回総会抄録，1976.
- Kanji Kubo: Enlargement mammography for early diagnosis of breast cancer, Third International Symposium on Detection and Prevention of cancer, 1976.
- 佐藤伸雄：乳房撮影に関する研究(その1，その2) 日放技學誌，31，4，1975.
- 佐藤伸雄：乳房撮影に関する研究(その3)，日放技學誌，31，5.