

## 視覚によるボケの最小認知

林 明子, 山下 一也, 北山 彰  
荒尾 信一, 天野 貴司

### Minimum Detectable Limitations on Human Vision

Akiko HAYASHI, Kazuya YAMASHITA, Akira KITAYAMA,  
Shinichi ARAO and Takashi AMANO

キーワード：ボケ，視覚評価

### 概 要

X線画像の視覚系でボケの最小認知に関する報告はあるが，それらは線状陰影に関するものであり広がりをもった陰影に関するものではない．今回，腫瘤状陰影を想定し，広がりをもった鉛チャートを自作し，そのボケ像の視認可能な最小値について検討を行なった．併せてボケ像の大きさや形状，観察者などについても比較検討した．

その結果，ボケの最小限界はおよそ0.1mmから0.2mmの範囲にあった．この値は過去に報告されている線状陰影でのボケの最小認知とほぼ同じであった．また分散分析法で有意差検定した結果，ボケ像の大きさと形状については有意差はなかった．しかし観察者群については有意差を認め，視覚系で評価する場合に影響があることが認められた．

### 1. 緒 言

X線画像がもっている被検体の情報は，伝達系の最終過程の視覚系で得られる．この場合，提示画像と視覚系との間での情報のやりとりで過不足があってはならない．したがって視覚系の機能と特性を十分に把握しておくことが重要である．

X線画像の画質属性のなかでもボケは視覚系に直接反映するので，重要な属性の一つである．しかし，ボケを物理的に定量化した研究や報告は数多くあるが，X線画像の多変量要因を提示して心理的視覚系で評価した研究は木村らの報告<sup>1)</sup>だけである．一般に物理的なボケ量（たとえば MTF：modulation transfer function）と，視覚系によって認知されるボケ量とは必ずしも一致しないといわれている<sup>2-6)</sup>．

X線画像のボケは一般に幾何学的因子，写真学的因子，そして運動の因子によって発生する．

幾何学的因子は，X線管の焦点が点でなくある面積を持っていることと，被検体が立体構造であるため目

的部位とフィルムの間にある距離をもつことで生じる．写真学的因子は，増感紙とフィルムの組合わせ（以下，受像系）によってそれぞれの特性が原因で生じるものである．運動の因子は焦点，被検体，受像系のどれかがなんらかの原因で動くことによって生じる．

高い画質を得るにはX線画像のボケは小さいほど好ましい．ただし人の視覚系の特性として，ボケがある大きさよりも小さくなるとそれをボケとして受容しない．つまりボケの最小認知の限界があると考えられる．

X線写真の視覚系でボケの最小認知を行った木村らの実験的な報告では，照射時間，撮影距離，X線管焦点のサイズといった撮影の諸条件について述べている．

たとえば，運動機能の激しい被検体の撮影では運動の因子のボケの関与は避けられない．そこで照射時間をできるだけ短縮して行う必要がある．視覚系のボケの最小認知の大きさを基準にして被検体（たとえば臓器・器官）の動きの振幅の大きさ，あるいは蠕動運動との関係を求めることで，被検体が許容できる最長の照射時間を設定できる．人の視覚系で認知できる最小限界を知ることは，情報量の多いX線写真を撮影するには必要なことである．

また，木村らの報告はボケの最小認知の値を線状陰影を対象に行ったものであり，面積をもった陰影に関

(平成12年9月7日)

川崎医療短期大学 放射線技術科

Department of Radiological Technology, Kawasaki College of Allied Health Professions

するものではない。線状陰影は血管や骨梁などに適するが、複雑で重層した構造を持った人体の広がりを持つ陰影については不適と考える。

そこで今回われわれは、腫瘤状陰影を想定して広がりをもった被検体（以下、鉛チャート）を自作し、ボケ像の視認可能な最小値について視覚系の実験を行った。併せてボケの大きさと形状、そして観察者が視認評価にどのような影響を与えるかについても比較検討したので報告する。

## 2. 方 法

### (1) 試料作成

鉛チャートは厚さ0.5mmの鉛片を、正形状（一辺が3mm, 5mm, 10mm）の3種と、正円形状（直径が3mm, 5mm, 10mm）の3種の2つの形状、6種類を自作して用いた。

この鉛チャートを一定の速度で動かしながら撮影し、運動によって生じたボケのあるチャート像を試料とした。

一定速度を得るにはマイクロデンシトメータ（PDS-15, コニカ社製）の試料台の微小移動機構を利用し、これで運動を制御した。この機構によってチャートを一定の速度で移動させ、その速度と照射時間で7段階（0mm：静止, 0.12mm, 0.17mm, 0.19mm, 0.24mm, 0.34mm, 0.36mm）の運動の大きさ（以下、ボケ量）とした。

また試料は各3枚ずつ作成したので全試料数は計126枚になった。

試料の作成はX線発生装置（KXO-1000, L-2, 東芝社製）とX線管（DRX-2903 HD, 焦点サイズ0.1mm×0.1mm, 東芝社製）で行い、素地濃度が $1.0 \pm 0.03$ になるように照射条件を調整した。管電圧はコントラストを考慮して65kVから72kVの範囲で、管電流は150mAから300mA、照射時間は再現性と精度を考慮して0.6秒から1.4秒までの範囲にした。

7段階のボケ量をそのままX線写真の持つボケ量とするには、ボケの成因を運動によるものだけにする。そこで、幾何学的因子と写真学的因子を排除するために撮影距離を比較的遠距離の200cmとし、受像系にはノンスクリーンフィルム（X-Omat TL II, コダック社製）を用いた。図1はその幾何学的配置図である。

なお、X線発生装置の照射時間とマイクロデンシトメータの移動機構の再現性および精度を事前に確認した。再現性については問題はなかった。しかし、精度は装置の設定値との間に多少の誤差があった。したが

って実測値からボケ量を求めた。

### (2) 視覚系の評価方法

観察者は診療放射線技師3名と学生5名の計8名とし、事前に十分な学習を行った。

観察時に直接光が視野に入らないように試料の周囲を遮光板で囲った。観察時間は10秒以内とし、観察距離は観察者の明視距離にして観察時に大きく変えないようにした。試料の提示は、図2のように観察時の両眼を結ぶ瞳間線とチャートが動いた方向が同一になるように配置した。

評価方法としては、yes-no 実験（以下、YN 実験）と7段階強制選択実験（以下、7段階選択実験）を行った。

YN 実験は観察者に全試料（126枚）をアトランダムに1枚ずつ提示し、観察者は「yes（ボケている）」、あるいは「no（ボケていない）」と評価をする。そして同一試料内で「yes」と評価した割合を求め、視覚系のボケの最小認知の指標とした。

7段階選択実験は、鉛チャート別の試料（21枚）からアトランダムに1枚ずつ提示する。試料のボケ量は0mm：静止, 0.12mm, 0.17mm, 0.19mm, 0.24mm, 0.34mm, 0.36mmの7段階である。観察者は提示されている

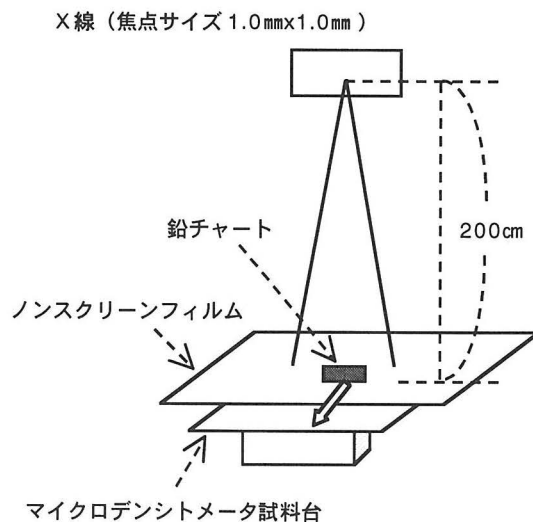


図1 試料作製配置図

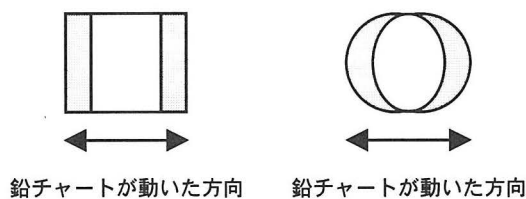


図2 ボケの観察方向

試料のボケ量を7段階から強制的に選択し指定する。その選択値を視覚系の絶対的なボケ量とした。

### 3. 結 果

図3は、YN 実験で YN 評定によってボケている(「yes」:「Y」)とした割合とボケ量の関係である。この図からボケていると評定した割合が50%と80%になるボケ量の数値を整理して、表1にまとめた。

すべての試料において、ボケていると評定した割合が50%のボケ量は約0.13mmであった。また、約0.19mmよりも大きいボケ量については80%以上がボケていると評定した。

図4は、図3の正形状と正円形状の鉛チャートをそれぞれ別個に取り出したもので、鉛チャートの大きさごとに示している。図5は、図3から鉛チャートの大きさ別に3mm、5mm、10mmと取り出して鉛チャートの形状ごとに示したものである。鉛チャートの大きさ

が10mmでの正方形と正円形で若干差があるようにみられるものの、全試料において鉛チャートの形状と大きさでは著明な評定の差は認められない。

表2は、ボケていると評定した割合が80%であったボケ量0.19mmでの評定結果を基にして求めた分散分析表である。要因Aは鉛チャートの大きさ(7種類)、Bは鉛チャートの形状(3種類)、そしてRは観察者群(8名)とした。この三つを要因とし、実験結果の平均値の一様性を検定した。またAB、AR、BRは各要因の交互作用効果の有意差を検定するための組み合わせである。eは残差である。

表2で明らかのように、鉛チャートの大きさと形状では有意差が認められなかったが、観察者群では有意差があった( $P < 0.01$ )。さらに、寄与率から観察者群の要因は全変動の原因の27.6%を占めていることがわかった。

7段階選択実験の結果で、各試料に対する強制選択

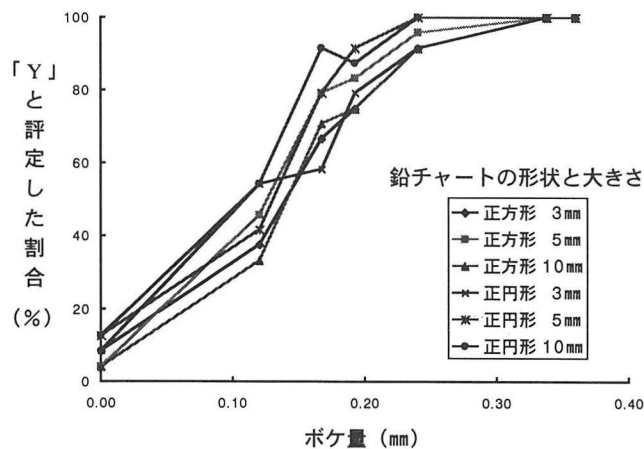
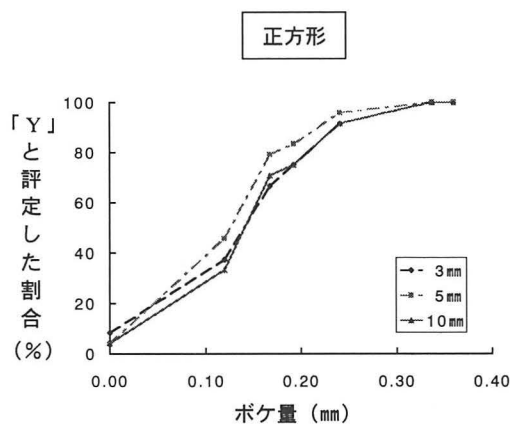


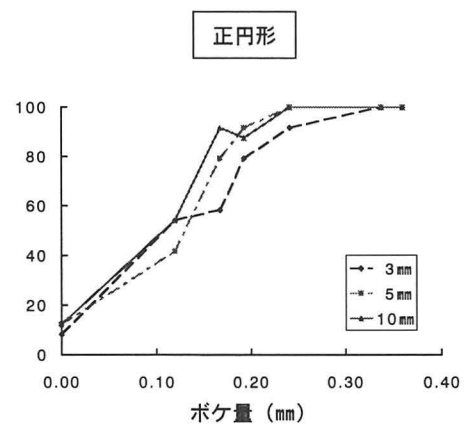
図3 ボケの認知とボケ量の関係

表1 ボケの認知とボケ量の関係

鉛チャートの種類	ボケ量 (mm)	
	「Y」と評定した割合 50%	80%
正方形		
3 mm	0.14	0.21
5 mm	0.13	0.17
10mm	0.14	0.21
正円形		
3 mm	0.11	0.20
5 mm	0.13	0.17
10mm	0.11	0.15
平 均	0.13	0.19



(a)



(b)

図4 ボケの認知と鉛チャートの大きさの関係

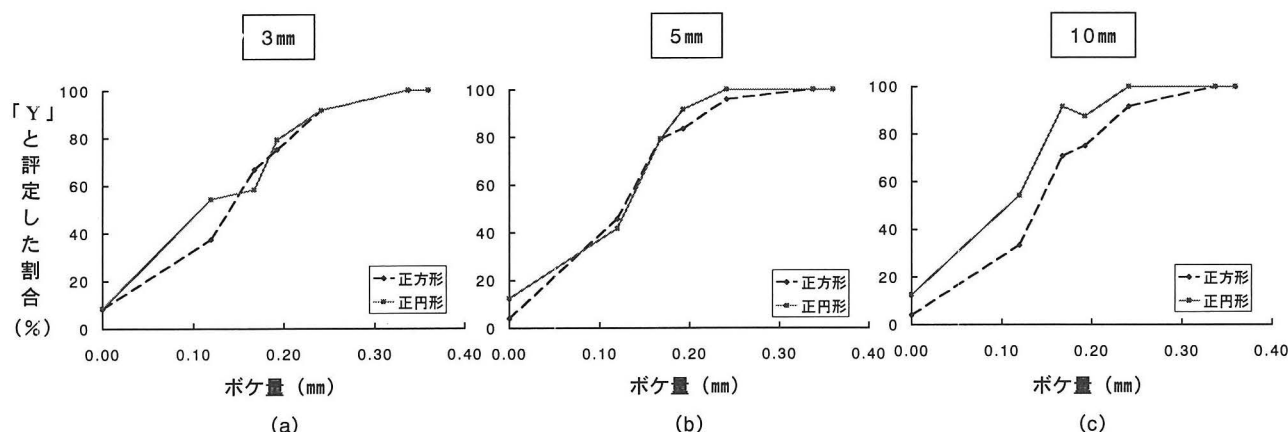


図5 ボケの認知と鉛チャートの形状の関係

表2 分散分析表 (ボケ量0.19mm)

要因	自由度	変動	分散	分散比	寄与率 (%)
A	2	0.26	0.13	1.20	
B	1	0.25	0.25	2.28	
AB	2	0.04	0.02	0.19	
R	7	6.64	0.95	8.64**	27.6
AR	14	1.40	0.10	0.91	
BR	7	0.64	0.09	0.83	
e	110	12.07	0.11		
計	143	21.31			

A: 鉛チャートの大きさ (3 mm, 5 mm, 10mm)

B: 鉛チャートの形状 (正方形, 正円形)

R: 観察者群

e: 誤差

した大きさの密度度数を求めた。ここでの密度度数は、7段階のボケ量に強制選択した結果、それぞれの段階に分配した度数を全体の度数で割った値で、「%」表示した。

図6(a)(b)は、YN実験で80%の割合でボケているという評定を得たボケ量0.19mmの鉛チャートに対する7段階選択実験の密度度数である。鉛チャートの大きさ(a)、鉛チャートの形状(b)として示した。なお、強制選択の7段階のなかで0.34mmと0.36mmは度数0%だったのでグラフに表示していない。

鉛チャートの大きさが10mmの場合と形状が正円形の場合を除いて、ボケ量が0.19mmと選択した度数がもっとも高かったことがわかる。鉛チャートの大きさでは、最も小さい3mmの場合に0.19mmのボケ量を正しく認知した度数が高い。また形状では正方形が正円形よりも高い認知を得た。

#### 4. 考 察

すべての試料について、ボケていると認知した割合が50%であるボケ量は0.11mmから0.14mmであった。また80%では0.15mmから0.21mmの大きさであり、これらの値は木村らが報告している線状陰影のボケの最小認知とほぼ同じ値であった。

眼のMTFは約2 cycles/mmに極大値があって、それよりも低空間周波数領域でも高空間周波数領域になっても特性は低下する<sup>7)</sup>。図7は矩形関数(sinc関数)近似法で求めた運動のMTFである。空間周波数が2 cycles/mmで、MTF値が0.8(低濃度差で低コントラストチャートの解像力に相当する領域)では、運動量は0.18mmになる。これはわれわれの視覚系の評価結果とよく一致する。

しかし、物理的なボケ量と視覚系の心理的ボケ量とは必ずしも一致しないと一般にいわれている。これは臨床に用いられているX線画像では多数の影響因子が輻輳し、ある種の錯視状況が視覚系で認知する過程に混乱を与えた結果であるとわれわれは考えている。今回用いた鉛チャート像は臨床的なX線画像と比較すると単純な構造であるため、視覚系の評価が物理的な値に近くなったのであろう。

ボケ量が0.19mmでの分散分析では、鉛チャートの大きさと形状は有意でなく、観察者群は有意であった。このことは、視覚系でのボケの認知において鉛チャートの大きさと形状はほとんど誤差の範囲であるといえる。

観察者群の分析結果が有意であったことは、人によってボケを認識する知覚のレベルが違うということで、個人のばらつきが無視できないことを意味している。

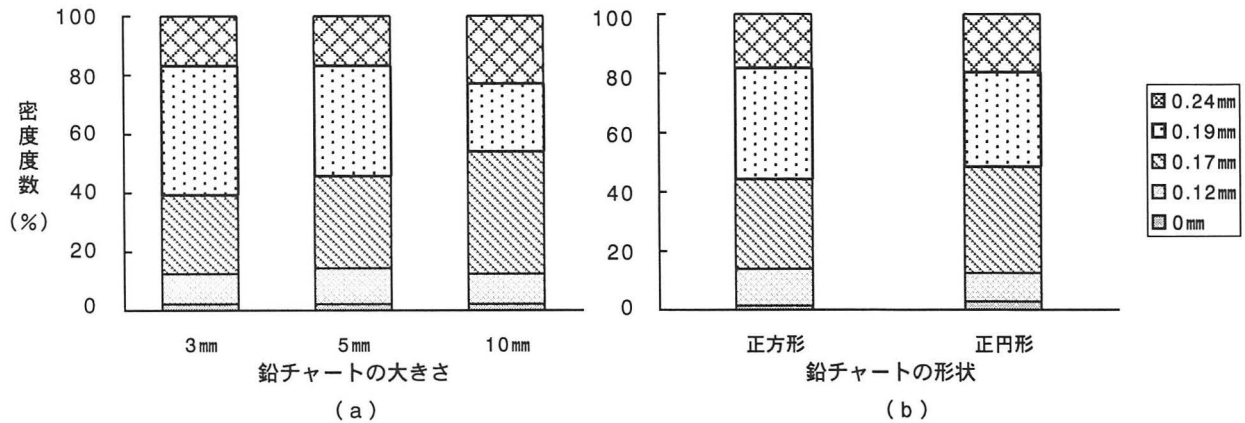


図6 密度度数 (ボケ量0.19mm)

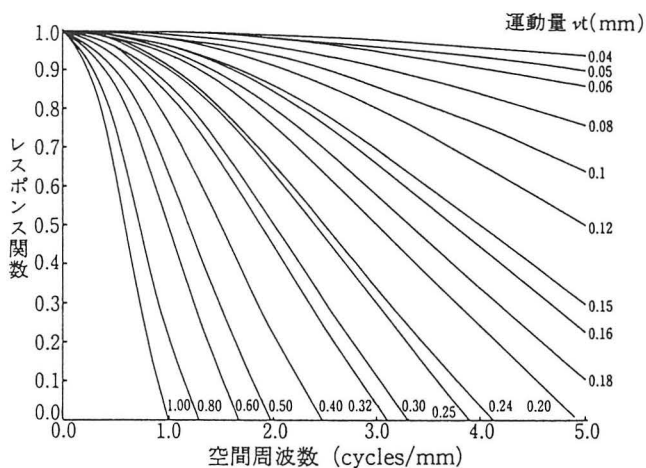


図7 運動の MTF (矩形関数による近似)

ただこのことを逆に考えれば、観察者群別にボケの最小認知を類別できることを示唆している。

また、因子の水準の組み合わせによる交互作用効果は有意ではなかったもので、鉛チャートの形状や大きさの違いに対する認知の傾向は観察者によって差がないといえる。

線状の被検体では、画像構成の伝達・記録系でなにかの歪みの影響を受けるとかならずボケが随伴する。われわれの実験のように広がりをもった被検体を受ける歪みの影響は、広範囲の領域のコントラストに変化を与える。つまり人間の眼は、画像の平均の明るさに対しての応答は比較的低くあらわれ、コントラストの変化に対しては逆に大きくあらわれる<sup>8)</sup>。

ところが、今回広がりを持った陰影でのボケの最小認知と線状陰影での値はほぼ同じで、コントラストの影響はあらわれなかった。これは視覚系の評価において観察者群の要因が有意だったためであり、各観察者

による線状陰影と広がりを持った陰影とのボケの認知を比較検討する必要があることを推測できる。

7段階選択実験で、鉛チャートの大きさが最も小さい3mmの場合にボケの大きさが正確に認知されていた。これは、人間の視覚系が鉛チャートが大きい場合にボケの大きさとの相対的な感覚のズレを生じるためであろう。また、鉛チャートの形状では正方形の方が正確に認知されていた。正円形ではボケが三日月状にみえることから、正確に大きさを認知するのが困難であった。

われわれの視覚系のボケ量の認知実験では、左右の眼球を結ぶ瞳間線に平行な方向にボケが存在する場合だけを対象にしたが、直交する方向では違った結果になることが推定できる。今後の検討課題にしたい。

## 5. 結 論

- (1) 全ての試料で、ボケていると認知した割合が50%であるボケ量は0.11mmから0.14mmの範囲であり、80%の認知では0.15mmから0.21mmの範囲の大きさであった。
- (2) 視覚系によって認知可能なボケの最小限界は0.1mmから0.2mmの範囲であった。この大きさは線状陰影でのボケの最小認知とほぼ同じ値であった。
- (3) ボケの最小認知について分散分析法の検定では、鉛チャートの大きさと形状には有意差は認められず、観察者群では有意差があった ( $P < 0.01$ )。
- (4) 7段階強制選択による視覚系の絶対的なボケ量の認知を密度度数で分析したところ、鉛チャートの大きさでは最も小さい3mm、形状では正方形の方が正確に選択した度数が高かった。

## 文 献

- 1) 木村典子, 長畑 弘, 山下一也: ボケの視覚による最小認知の限界, 日本放射線技術学会雑誌39(4): 409—415, 1983.
- 2) Rossman K: An approach to image quality evaluation, using observer performance studies, Radiology 113: 541—544, 1974.
- 3) Goodenough DJ, et al.: Radiographic applications of receiver operating characteristic (ROC) curves, Radiology 110: 89—95, 1974.
- 4) 小塚隆弘: X線写真の画質, 日本放射線技術学会雑誌31(4): 349—354, 1975.
- 5) 山下一也, 若松孝司: 信号検出理論のX線撮影系への適用, 日本放射線技術学会雑誌33(2): 111—117, 1977.
- 6) 山下一也: X線像の画質評価の問題点とその展開, 日本放射線技術学会雑誌33(3): 267—281, 1977.
- 7) テレビジョン学会編: テレビジョン・画像工学ハンドブック, 東京: オーム社, pp. 49—50, 1984.
- 8) 樋渡涓二: 視覚とテレビジョン, 東京: 日本放送出版協会, pp. 73—74, 1968.