

階層形ファジィ積分モデルによる乳房画像の総合評価

山下 一也¹ 天野 貴司¹ 荒尾 信一¹ 北山 彰¹
末森 慎治² 真田 泰三² 岡田 弘治³

¹川崎医療短期大学 放射線技術科

²川崎医科大学附属病院 中央放射線部

³近畿大学医学部附属病院 中央放射線部

(平成9年9月17日受理)

Integrated Evaluation of Mammograph by Hierarchical Fuzzy Integral (HFI) Model

Kazuya YAMASHITA¹, Takashi AMANO¹, Shinich ARAO¹,
Akira KITAYAMA¹, Shinji SUEMORI²,
Taizou SANADA² and Hiroharu OKADA³

¹*Department of Radiological Technology,
Kawasaki College of Allied Health Professions*

²*Department of Radiology, Kawasaki
Medical School Hospital*

³*Department of Radiology, Kinki University Hospital
(Accepted on Sep. 17, 1997)*

Key words : 乳房画像, 画像評価, ファジィ積分, 階層形ファジィ積分, ファジィ測度

概 要

乳房画像の総合評価について、ファジィ測度とそのファジィ積分法を用いた手法に加えて、画質属性である鮮鋭さ・粒状性・コントラストが、三つの注視陰影：繊維状・石灰化状・腫瘤状に対してどのような影響を与えているかを、主観的判定の曖昧さをも含めて心理的な計量を行なうものである。

評価対象には三種類の増感紙/フィルム系を用い、それらのうち乳房撮影にもっとも適した系を見いだす。乳房ファントムはRMI-Model 165を使用して、ファントム中に存在する三つの注視陰影を直接評価・評定した。

評価目標が2階層(画質属性と注視陰影)になっているので、階層形ファジィ積分モデルによって計量した。その結果、乳房撮影に最も適した増感紙/フィルム系の選定と、注視陰影への画質属性の寄与を定量することができた。

画質属性の評価値に物理量を用いると、心理量との総合評価が可能になることも提言した。

はじめに

1995年3月、日本医学放射線学会と日本放射線技術学会は協同で「乳房撮影ガイドライン」を刊行した。その序によれば、検診効果の評価法としてもっとも信頼度の高い rando-mized

controlled trial 法を乳房検診X線撮影に導入した結果、アメリカやスウェーデンでは死亡率の低下を確認したが、この方式をわが国に導入するにはいくつかの課題がある、として次のような指摘をしている¹⁾。

「それは、用いられる機器の性能とその品質管

理、そして読影者の養成とその精度管理であるう」

ここには「機器」と「読影者」への言及はあっても、この両者双方にもっとも関係が深い立場の「撮影者」が欠けていて、いかにも課題がないかのような印象を与えている。しかし現実のX線撮影現場における「撮影者」には、品質と精度の両方にまたがる管理に直接の責任をもち、しかも解決しなければならない多くの「課題」があることは、周知の事実である。

これまでに乳房画像のファントム、写真特性、感材システム、撮影手技などにかかわる「課題」の研究報告は多数ある²⁻⁷⁾。しかし品質と精度の管理上、大きな「課題」の一つである乳房画像を総合評価した研究はない。著者らはこれまでに、写真特性を異にする三種類の増感紙/フィルム系を用いた主観評価による二つの研究報告をした。一つは、乳房の模擬物体を有するファントム [RMI-Breast Phantom: Model-156] 画像において、繊維（線）状・石灰化状・腫瘤状の三種の模擬物体の陰影を放射線技師 8 名で観視し、視認可能な模擬陰影の大きさ（視認限界）をファジィ測度とそのファジィ積分法を適用して評価を行なったもので、少ない試料枚数で診断目的に応じた重要度：ファジィ測度を考慮し、しかも曖昧さを含んだ主観的判断の定量的扱いを可能にした。そして乳房撮影系の品質管理に一つの提案を行なっている⁸⁾。もう一つの報告は、同じ三種類の増感紙/フィルムを用いて、実際の乳房を模したファントム [RMI-Anthropomorphic Breast Phantom: Model-165] 画像を撮影し、繊維状模擬陰影（以下、繊維状陰影）・石灰化状模擬陰影（以下、石灰化状陰影）・腫瘤状模擬陰影（以下、腫瘤状陰影）に対してそれぞれに診断上の重要度：ファジィ測度を与え、専門医（内分泌外科医）6 名によって観察した結果を、前研究と同様にファジィ測度とそのファジィ積分法で評価を行なったものである。その結果、Model-156 の総合評価との間に高い相関（0.894）が得られた⁹⁾。

一般に、画像を観察するとき、読影上の注視陰影の「見にくさ・見やすさ」を左右する根本要因としては、鮮鋭さ、粒状性、コントラストの代表的な三つの画質属性が考えられる。読影

者や観察者の判断に、これらの画質属性の「良い・悪い」が、大きく影響を与えていることはいうまでもない。したがって乳房画像の総合評価において診断する上で、複数の注視陰影の重要度：ファジィ測度と、その注視陰影が三つの画質属性によって「良い・悪い」と判定された結果とを、同時に包括統合した評価が必要となる。その上、各注視陰影が重なりあった場合に生じる診断上の相殺効果と相乗効果をもあわせて考慮しなければならない。

以上の諸点に着目し、著者らは乳房画像の総合評価において、ファジィ測度モデルをさらに発展させた階層形ファジィ積分法を適用した結果、興味ある考察と結論が得られたので、それについて報告する。

1. 階層形ファジィ積分について

1.1 ファジィ測度

ファジィ測度 (fuzzy measure) は、適当な対象を評価したり観察したときに生じる曖昧な判断を左右する主観的重要度・主観的寄与率で、一般に単調性だけを仮定する非加法的集合関数である。したがってファジィ測度は、非加法的な尺度で、相殺効果 (劣加法性) や相乗効果 (優加法性) をもつ。そして、次のように定義される¹⁰⁾。

いま X をある集合とし、 X の部分集合を 0 から 1 までに対応させる集合関数 m が、

$$m(\phi) = 0, \quad m(X) = 1 \quad (1)$$

の性質をもつとき、 m を X 上のファジィ測度という。ここで ϕ は空集合である。そして X の部分集合 A と B が、

$$A \subset B \subset X$$

であれば、

$$m(A) \leq m(B) \quad (2)$$

として、単調性を示す。

本研究では、乳房画像の診断や撮影の経験の深い有識者 11 名から得たアンケートから注視陰影の重要度：ファジィ測度を求めた。また、二つ以上の部分集合 (要素) が複合するときは互いに干渉しあうので、必ずしも加法的にはなら

ない。この場合、同様にアンケートの結果から得た配点をもとに、次式で定義するλ-ファジィ測度¹¹⁾を求め、それを用いた。

$$A \cap B = \phi$$

のとき、

$$m_\lambda(A \cup B) = m_\lambda(A) + m_\lambda(B) + \lambda m_\lambda(A) m_\lambda(B) \quad (3)$$

ここで、 $-1 < \lambda < \infty$ である。

(3)式から分かるように m_λ は、 $\lambda > 0$ であればAとBの間には優加法性(相乗効果)をもち、 $\lambda < 0$ ならば劣加法性(相殺効果)が働く。そして、 $\lambda = 0$ であれば、AとBは互いに独立で相乗効果と相殺効果は互いに打ち消しあい加法的和を示すことになる。

1.2 ファジィ積分

ファジィ積分は、室伏と菅野が提案した積分形: Choquet 積分を用いる^{12,13)}。この積分は、被積分関数の区間が $[0, \infty]$ で、比較的自由に積分ができ、一般に次のような形式で定義される。

$$\langle c \rangle \int H(X_i) dm(X_i) = \sum_{i=1}^n [H(X_i) - H(X_{i-1})] \cdot m(X_i) \quad (4)$$

ここで、 $H(X_i)$ は被積分関数、 $m(X_i)$ は積分変数(ファジィ測度)である。これを分かりやすく $i = 1, 2, 3$ として、図示すれば、Fig. 1のようになる。この図において、

$$\langle c \rangle \int H(X_i) dm(X_i) = (\alpha) + (\beta) + (\gamma) \quad (5)$$

ここで、

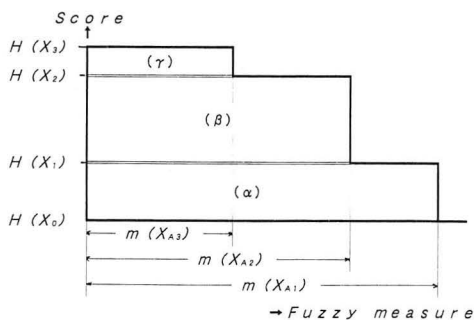


Fig. 1 A schematic of the method of calculation for fuzzy integral. (An example)

$$(\alpha) = [H(X_1) - H(X_0)] \cdot m(X_{A1})$$

$$(\beta) = [H(X_2) - H(X_1)] \cdot m(X_{A2})$$

$$(\gamma) = [H(X_3) - H(X_2)] \cdot m(X_{A3})$$

である。そして、

$$m(X_{A1}) = m(X_1, X_2, X_3)$$

$$m(X_{A2}) = m(X_1, X_2)$$

$$m(X_{A3}) = m(X_1)$$

であり、 $m(X_1, X_2, X_3)$ 、 $m(X_1, X_2)$ は、三つの、あるいは二つの要素が複合したときのファジィ測度で、これはλ-ファジィ測度から求めた。

$m(X_i)$ は要素が単独の場合のファジィ測度を示す。そして、 $H(X_i)$ は評点総和法¹⁴⁾で獲得したそれぞれの評定点で、

$$H(X_1) \leq H(X_2) \leq H(X_3) \quad (6)$$

としている。ただし、 $H(X_0)$ は、0点である。

1.3 階層形ファジィ積分の構造

一般に人間社会において、個人(あるいは団体)が重要な課題にたいして複雑で曖昧な状況のもとで、なんらかの主観的な人間の判断にもとづく選択行動(意志決定)を行なうとき、できるだけ正しい決定を行なうために課題の評価対象・評価項目をいくつかの階層に分けて解析する。その方法として、階層的分析法(analytic hierarchy process, AHP)がある^{15,16)}。この手法の問題点は、重要度を加法性のある比例尺度と考えると、単純な加重法で統合しているために重要度が加法的な枠組みに拘束されていることや、利用者の負担が大きくなることなどである^{17,18)}。このような問題を解決するための一つの方法が階層形ファジィ積分法(hierarchical fuzzy integral, HFI)である^{19,20)}。以下、乳房画像における適応例にもとづいて、そのモデルの構造を図示する。

Fig. 2において;

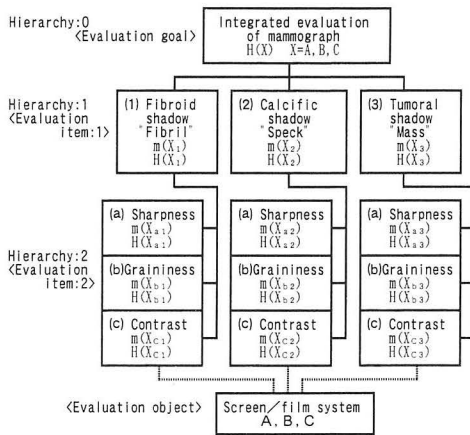
階層0は評価目標である。ここでは「乳房画像の総合評価」とする。評価対象は乳房画像に適した「増感紙/フィルム系の選定」である。

階層1は評価項目1で、評価対象を分析的に評価するための評価基準の設定で、ここでは繊維状陰影 [1]、石灰化状陰影 [2]、腫瘤状陰影 [3] とする。

階層 2 は評価項目 2 で、評価項目 1 をさらに細分化した評価基準として、ここでは三つの画質属性：鮮鋭さ [a]、粒状性 [b]、コントラスト [c] を評定する。

最初に階層 2 の各属性にそれぞれファジィ測度を付加しておく。次にこれらの画質属性が、階層 1 の各注視陰影に及ぼしている影響の度合いを評定し、その評定点を求める。そして、この値と前に提示したファジィ測度を用いてファジィ積分値を算出する。

次に階層 1 の各陰影に診断上の重要度：ファジィ測度を与えておき、さきに求めた積分値とで、ふたたびファジィ積分を行なう。そして得られた積分値が、統合・包括した最終的な総合評価値となる²¹⁾。



$m(X_{i,j})$: Each weight of hierarchy 1 (Fuzzy measure of hierarchy 1) [$\# = 1, 2, 3$]
 $H(X_{i,j})$: Each score of hierarchy 1 (Score can be obtained on hierarchy 2) [$\# = 1, 2, 3$]
 $m(X_{i,j,k})$: Each weight of hierarchy 2 (Fuzzy measure of hierarchy 2) [$* = a, b, c \ \# = 1, 2, 3$]
 $H(X_{i,j,k})$: Each score of hierarchy 2 [$* = a, b, c \ \# = 1, 2, 3$]

Fig. 2 A illustration for structural concept of hierarchical analytic integrated method. — Hierarchical fuzzy integral: HFI —

2. 実験の方法

2.1 観察試料の作成

- ① 評価対象の増感紙/フィルム系：UM MAMMO FINE/UM-MA (富士メディカルシステム社・以下、UM [A])、Min-R/Min-R M (コダック社・以下、MR [B])、Min-R medium/Min-R M (コダック社・以下、MRm [C]) の三種類。
- ② 乳房ファントム：Anthropomorphic Breast Phantom [Model-165] (RMI社、以下、M-165)。
- ③ X線装置：乳房撮影用X線装置 MGU-10 C (東芝メディカル社)、使用したX線管はモリブデン焦点、公称焦点サイズは $40 \times 40 \mu\text{m}$ で、付加フィルタはモリブデン $30 \mu\text{m}$ 厚。
- ④ 撮影条件：管電圧は 28 kV 一定とし、撮影距離は 60 cm 、散乱X線除去用グリッド ($4 : 1$, 45 lines/cm , wood) を使用。また、撮影時には M-165 のアクリル容器内の模擬乳房像の辺縁に組み込まれているアルミ階段の 3 段目の写真濃度が、 1.48 ± 0.03 になるように管電流量で調整している (Table 1)。ここで、相対的感度は、MR [B] を 100 として求めたものである。
- ⑤ 現像処理：自動現像機 (コニカ社・ 32.9°C , 90 秒) で処理。
- ⑥ 観察試料：各増感紙/フィルム系について上記の諸条件で、各 3 枚ずつの合計 9 枚を作成。

2.2 試料の観察と評定

- ① 観察方法：乳房専用のシャウカステン (輝度： $15,000 \text{ lx}$) を用い、事前に十分な観察学習を行なった。そして観察時には、各試料の大きさに切り抜いたマスクで覆い、画像面以外の外光を遮光した。そして 9 枚の試料からアットランダムに 1 枚ずつ観察者に提示し、

Table 1 The mAs values used to produce the mammo-phantom (RMI Model-165) radiograph, and relative speed of each screen/film system.

Screen/Film systems	mAs value	Rel. speed
UM MAMMO FINE/UM-MA:UM [A]	44	134
Min-R/Min-R M:MR [B]	59	100
Min-R/Min-R medium/Min-R M:MRm [C]	37	163

(MR [B] = 100)

観察時間は、一部位あたり20秒以内とした。

学習^{22,23)}は、ある反応の確率的变化と考えられるもので、単純な練習ではない。観察実験の目的・内容・方法などを十分に把握させ、同時に実験の全体にかかわる注意事項；たとえば観察者自身が定めた観察距離を変更できないことや、観察環境が実験途中で変更できないことも完全に理解させる。そのために、実際の観察実験と同じ条件下で、典型的な注視陰影像の確認やそれらの画質属性の意味の理解なども併せて体得させる。

本論文末尾に著者らが実験に用いた「乳房画像観察マニュアル」(学習・観察の申しあわせの一例)を付録として掲載した。

- ② 観察者：診療放射線技師7名。その撮影経験年数は、28年(1名)、14～18年(2名)、8年(2名)、6年(1名)、2年(1名)である。
- ③ 観察の対象と注視陰影：Fig. 3は、実験に用いた模擬乳房ファントム(M-165)のX線画像である。観察注視陰影として、前述したように繊維状陰影：Fibril [1]、石灰化状陰影：Speck [2]、腫瘤状陰影：Mass [3]を対象にした。
- ④ 評定の方法：評定は、評価対象である各陰影の鮮鋭さ [a]、粒状性 [b]、コントラスト [c]の三つの画質属性について行ない、次のように5段階5点法の評点総和法を採用した。
非常に良い = 5、やや良い = 4、
普通 = 3、やや悪い = 2点、
非常に悪い = 1点。

観察者は提示された試料について、それぞれに評定点を与える。同一の増感紙/フィルム系が3枚と観察者が7名で合計21枚分の評定点を平均して平均評定値とした。

2.3 ファジィ測度の配分と計量

- ① ファジィ測度の算出：ファジィ測度は、次のようなアンケート形式で求めた。調査した対象は、乳房画像の撮影や観察に経験の深い11名の放射線技師と専門医である。
 - 1) 三つの観察注視陰影である繊維状、石灰化状、腫瘤状について、診断上の重要度(寄与率・重視度)を [%] で回答を求めた。
 - 2) 各注視陰影を診断するとき、二つの陰影

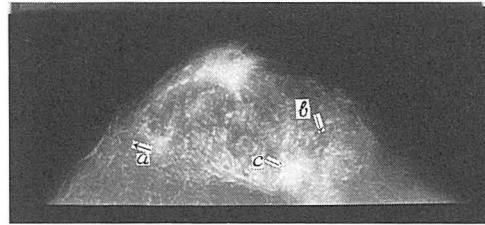


Fig. 3 A mammo-phantom (RMI Model-165) radiograph.

- a: Fibroid shadow — Fibril —
b: Calcific shadow — Speck —
c: Tumoral shadow — Mass —

に同時に関心をもった場合、各陰影それぞれの重要度が干渉あって相殺効果を生むか、相乗効果の与えるか、の回答を求めた。相殺効果が考えられるときは [-] 点、相乗効果では [+] 点を、効果の大きさによって、1から3までの点数を按配した。そして、単純に加法和になるときは、0点としている。

- 3) 各注視陰影に対して三つ画質属性がそれぞれ影響を与える程度(重要度)を [%] で、先に示した同じ方法で回答を求めた。
- 4) また、各注視陰影に対する三つ画質属性の相殺効果・相乗効果を、2)の場合と同様の方法で [-] 点・[+] 点で回答を求めた。

以上のアンケートで得られた結果から、前述した(3)式の λ -ファジィ測度を求め、それをファジィ積分の計算に用いた。

- ② ファジィ測度の配分：アンケートの結果から得られた各画質属性と各注視陰影のファジィ測度、およびその配分を Table 2 に一覧表として示した。表の(a)は、各注視陰影に対する画質属性のファジィ測度で、それぞれ単独(左欄)と複合時(右欄)を示した。また(b)は、各注視陰影の診断上の重要度：ファジィ測度で、上段が単独、下段が複合時のそれぞれのファジィ測度である。
- ③ ファジィ積分：(4), (5), (6)の各式で定義される Choquet 積分を用いた。その数値計算の具体的な手法は、引用文献 [8], [13] で詳細に報告している。
- ④ 計量の方法：すでに 1.3 の項で述べたよう

Table 2(a) Fuzzy measures of attributes of the each shadow on the mammo-phantom radiograph.

Shadows	Single			Compound		
	$m(X_{a\#})$	$m(X_{b\#})$	$m(X_{c\#})$	$m(X_{a,b})$	$m(X_{a,c})$	$m(X_{b,c})$
Fibril [1]	0.39	0.19	0.42	0.61	0.92	0.62
Speck [2]	0.37	0.30	0.33	0.63	0.86	0.63
Mass [3]	0.22	0.17	0.61	0.60	0.89	0.64

Provisos:

$m(X_{a\#})$: Sharpness, $m(X_{b\#})$: Graininess, $m(X_{c\#})$: Contrast
(# = 1, 2, 3)

$m(X_{a,b})$: Sharpness + Graininess

$m(X_{a,c})$: Sharpness + Contrast

$m(X_{b,c})$: Graininess + Contrast

Table 2(b) Fuzzy measures of the each shadow on the mammo-phantom radiograph.

In case of the single		
Fibril: $m(X_1)$	Speck: $m(X_2)$	Mass: $m(X_3)$
0.17	0.38	0.45

In case of the compound		
$m(X_{1,2})$	$m(X_{1,3})$	$m(X_{2,3})$
0.50	0.65	0.98

Provisos:

$m(X_{1,2})$: Fibril + Speck

$m(X_{1,3})$: Fibril + Mass

$m(X_{2,3})$: Speck + Mass

に, Fig. 2において;

最初に階層2(評価項目2)の三つの画質属性である鮮鋭さ[a], 粒状性[b], コントラスト[c]が, 階層1(評価項目1)の繊維状[1], 石灰化状[2], 腫瘤状[3]の各注視陰影に, どれだけ影響を与えているかを評定した。このとき各属性が得た平均評定点 $[H(X_{*#})]$ と各属性に付加されているファジィ測度 $[m(X_{*#})]$ (Table 2(a))を用いてファジィ積分値を算出し, 各注視陰影が獲得した平均評価値 $[H(X_{*})]$ とする。

次に, 階層1の各注視陰影に与えられているファジィ測度 $[m(X_{*})]$ (Table 2(b))と, 先に求めた各注視陰影の平均評価値 $[H(X_{*})]$ を使って, 再びファジィ積分を行ない, その積分値を算出し, 総合評価値 $[H(X)]$ とする。これが階層0における三種類の評価対象: 増感紙/フィルム系 $[X = A, B, C,]$ の, それぞれの総合評価

値 $[H(A), H(B), H(C)]$ になる。ここでは, 各増感紙/フィルム系が満点を獲得したときの総合評価値に対する割合として総合評価比(総合評価値/5.00)を求め, これを用いて評価対象の良否を判定した。

3. 結果と考察

Table 2(a)の各注視陰影に対する各画質属性の重要度(ファジィ測度)は, 各注視陰影に与えている各画質属性の影響の度合いを示すものである。繊維状陰影は線状の細い陰影の集まりであるから, その細かさに対する「鮮鋭さ」のファジィ測度が大きく, しかもコントラストも比較的高い。つまり繊維状陰影の視認には「明瞭さ」が重要であることを意味している。石灰化状陰影は, 比較的高いコントラストのある微小な粒子陰影であるから, 他の陰影に比べて「粒状性」のファジィ測度が大きく寄与することは当然である。腫瘤状陰影では, 淡い平面状の陰影である。したがって「コントラスト」が重要であることは論をまたない。これらの線状・微粒子状・平面状の各陰影は, 日常の他の各種X線撮影像にもみられるもので, これに対する画質属性の影響もおおよそ共通しているものである。

Table 3は, 階層2において各注視陰影から三つの画質属性が獲得した平均評定点である。同一の増感紙/フィルム系3枚と観察者7名の総和評定点の平均値である。UM[A]は「コントラスト」の平均評定点が高く, UM[B]は「鮮鋭さ」と「粒状性」の平均評定点が高い。しかし, この平均評定点だけでは, 各注視陰影に

Table 3 Score averages of seven observers.

Shadows	UM [A]			MR [B]			MRm [C]		
	[a]	[b]	[c]	[a]	[b]	[c]	[a]	[b]	[c]
Fibril [1]	3.24	2.19	3.76	3.33	3.43	2.90	3.10	3.19	2.86
Speck [2]	3.05	2.19	3.52	3.43	3.10	2.95	2.90	3.19	2.71
Mass [3]	2.86	2.33	3.62	3.24	3.14	3.19	3.05	3.14	3.00

Provisos:

UM [A]: UM MAMMO FINE/UM-MA

MR [B]: Min-R/Min-R M

MRm [C]: Min-R medium/Min-R M

[a]: Sharpness

[b]: Graininess

[c]: Contrast

Table 4 Fuzzy numerical integration of the each shadow on the mammo-phantom radiograph.

Shadows	Fuzzy numerical integration		
	UM [A]	MR [B]	MRm [C]
Fibril [1]	3.37	3.18	3.02
Speck [2]	3.08	3.17	2.92
Mass [3]	3.27	3.20	3.05

Provisos:

UM [A]: UM MAMMO FINE/UM-MA

MR [B]: Min-R/Min-R M

MRm [C]: Min-R medium/Min-R M

Table 5 Integrated evaluation values and normalized evaluation ratios of the mammo-phantom radiograph on each screen/film system.

systems	Integrated evaluation value	Normalized evaluation ratio
UM [A]	3.22	0.644
MR [B]	3.19	0.638
MRm [C]	3.00	0.600

Provisos:

UM [A]: UM MAMMO FINE/UM-MA

MR [B]: Min-R/Min-R M

MRm [C]: Min-R medium/Min-R M

Normalized evaluation ratio = $\frac{\text{Integrated evaluation value}}{5}$

与えた影響の大きさ（良・否）は判定できない。それは各注視陰影の診断上の重要度（ファジィ測度）が、ここでは考慮されていないからである。

Table 4は、各増感紙/フィルム系において階層2が得た各画質属性の平均評定点とそのファジィ測度から算出した各注視陰影のファジィ積分値：平均評価値である。また Table 5は、階層1の各注視陰影のファジィ測度と、その平均評価値を用いて求めた総合評価値である。こ

こでは総合評価比も併せて示した。総合評価値あるいは総合評価比がもっとも高かったのは、UM [A] : 0.644であった。以下、MR [B] : 0.638, MRm [C] : 0.600の順になった。このことは、各注視陰影が得た平均評価値において、相対的にMRm [C]が低い値であったことから理解できる。そして、「コントラスト」におけるUM [A]の平均評定点が、他のシステムに比較して高い獲得点を得ていることと、UM [A]システムの平均階調度もまた、相対的に高い値を

もち、明瞭さにおいても優れていることを考え併せてみれば、当然の結果といえる。ちなみに著者らが各システムの特曲線から求めた平均階調度は、UM[A] = 3.55, MR[B] = 2.90, MRm [C] = 2.90であった。また、以上の結果は、著者らの前研究報告[引用文献, 8), 9)]とまったく同じ結果を示したが、このことは三つの画質属性を包括した視覚による総合的主観評価の方法の妥当性を示すものと考えている。

Fig. 4は、MR [B]を100としたときの各増感紙/フィルム系の相対感度 (Table 1) と、総合評価比、各注視陰影が獲得した画質属性の平均評定値の関係を示したものである。乳房撮影系では系の特殊性から、とくに被検者に与える被曝線量が重要な関心事である。図において、実験に用いた三つの増感紙/フィルム系のなかで、UM [A]がほぼ、中間のシステム感度を示ししかも最高の総合評価比を得たことは、臨床的に乳房撮影に適した増感紙/フィルム系であるといえる。システム感度が他に比べて格段に高いMRm [C]は、被曝線量を考慮に入れた乳房撮影のスクリーニングを目的にした場合に有効な増感紙/フィルム系であると考えてよい。

Fig. 5は、実験に使用した増感紙/フィルム系の NEQ (u) : 雑音等価量子数 (number of noise-equivalent quanta (u)) (写真濃度: 1.0) である。一般に NEQ (u) では、MTFの成分と Wiener スペクトルのそれとは相反する関係にある。したがって Wiener スペクトルの寄与

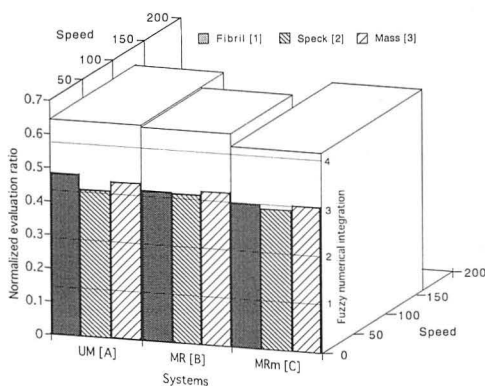


Fig. 4 A drawing showed four the relationships between normalized evaluation ratio and screen/film systems and system speed and fuzzy numerical integration.

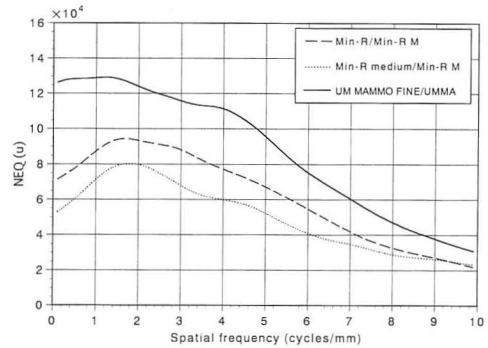


Fig. 5 Number of noise-equivalent quanta (u) (NEQ (u)) of each screen/film system for the mammo-phalton radigraphs.

が、MTFの2乗の成分よりも大きいとき NEQ (u)は、低空間周波数領域にピークをもつことになる。また、コントラスト(グラディエント)値は、全空間周波数領域にわたって NEQ (u) 値のレベル(高さ)に影響を与える。この図からも分かるように、各システムにおいて NEQ (u) のピークの前後で、なだらかな上昇と減少を示している。このことは、他の一般的な医用画像システムに比べて高い応答特性(MTF)を持ち、しかも低レベルのノイズ特性(Wiener スペクトル)を所有するシステムであることを示唆している。

実験に用いた三種類の増感紙/フィルム系では、空間周波数の全域にわたって、UM [A]が高い値を示している。これは本研究の階層形ファジィ積分モデルによる視覚的主観評価で得た結果とよく一致している。そして前述した著者らのファジィ測度論にもとづく最初の研究[引用文献, 13)]でも同じ結果が得られていることと考え併せて、ファジィ測度とそのファジィ積分モデルによる総合評価法が、主観評価法として優れていることの証左といえる。

本階層形ファジィ積分モデルでは、階層2の各画質属性の評価値を、MTF値、Wiener スペクトル値、そして画像コントラスト値、あるいは NEQ (u) 値などの物理量に置き換えて計量すれば、心理量と物理量とを統合した文字どおりの本質的な総合評価ができる可能性もっている。今後の研究に譲りたい。

4. 結 論

- 1) 模擬乳房画像の総合評価を階層形ファジィ積分モデル法によって行ない、比較的臨床感覚に沿った結果が得られた。
- 2) 評価対象がもっている種々の属性：画像の注視陰影（繊維状・石灰化状・腫瘤状）や画質の種類（鮮鋭さ・粒状性・コントラスト）などが複雑に組みあわせられ、しかも観察者（読影者）の「主観的なゆれ」と「曖昧さ」などを包含した乳房画像の総合評価において、この階層形ファジィ積分モデルによる評価法は、簡便に意思決定を可能にする一つの手段といえる。
- 3) 階層の最初の段階で、評価値に「物理量」を用いて計量すれば、心理量と物理量を統合した総合評価の可能性も持っている。今後を期したい。

5. 謝 辞

本研究に乳房診断のあり方や読影について多大の助言を寄せていただいた川崎医科大学教授（内分泌外科学）園尾博司博士、同じく教授（放射線医学）梶原康正博士に心からの感謝の辞を表す。また、川崎医科大学中央放射線部の石井幸志技師長ほか、観察者になっていただいた技師の方々に付言して感謝する次第である。

なお、本研究の一部は、第117回医用画像情報学会・春季大会（大阪・1997.2.1）で荒尾が、また第44回山陽乳腺疾患研究会（岡山・1997.2.1）では北山がそれぞれ報告した。

引用文献

- 1) 日本医学放射線学会乳房撮影ガイドライン委員会編：乳房撮影ガイドライン（序：高島 力）、東京、日本アクセル・シュプリンガー出版、1995。
- 2) 佐藤伸雄：乳房撮影に関する研究（その3）—至適撮影条件設定用ファントムの試案—、日放技学誌、31(5)、412—425、1976。
- 3) 千安式部、伊勢俊秀、加藤 功、浅川芳久、中前晴雄、松田秀治：乳房撮影系における写真特性と透過X線スペクトルについて、日放技学誌、36(1)、10—19、1980。
- 4) 佐藤伸雄：乳房撮影に関する研究（その5）—高感度 Screen System と幾何学的不鮮鋭の関
- 係—、日放技学誌、36(4)、462—471、1980。
- 5) 内藤光利、堀田勝平、梶原和則、岩根 茂、安部忠夫：X線撮影用補助具乳房ついでV—乳房拡大圧迫スポット撮影の補助具—、日放技学誌、38(3)、367—371、1982。
- 6) 佐藤伸雄（宿題報告）：低コントラスト微細被検体の識別度—特に乳房撮影における—、日放技学誌、38(6)、869—890、1982。
- 7) 寺田 央：マンモグラフィの撮影法、臨床画像、11(11)、22—33、1995。
- 8) 天野貴司、荒尾信一、北山 彰、山下一也、真田泰三、末森慎治、逸見典子、大倉保彦：ファジィ測度モデルによる乳房ファントム画像の総合評価—乳房撮影系の品質管理への一提案—、医用画像情報学会誌、12(3)、106—115、1996。
- 9) 天野貴司、荒尾信一、北山 彰、山下一也、真田泰三、末森慎治、逸見典子、大倉保彦：ファジィ測度モデルによる乳房ファントム画像の総合評価—Model 156と Model 165について—、川崎医療短期大学紀要、16、47—53、1996。
- 10) 菅野道夫：ファジィ測度とファジィ積分、計測自動制御学会論文集、8(2)、218—226、1972。
- 11) 菅野道夫：Fuzzy 測度の構成と Fuzzy 積分によるパターンの類似度評価、計測自動制御学会論文集、9(2)、361—368、1973。
- 12) Murofushi T. Sugeno M: An interpretation of fuzzy measures and the Choquet integral as an integral with respect to a fuzzy measure. Fuzzy Sets and System, 29(2)、201—227, North-Holland, 1989.
- 13) 山下一也、滝川 厚、石田隆行、中西利久：ファジィ測度論による胸部画像の総合評価、日放技学誌、48(4)、616—624、1992。
- 14) Likert R: A technique for the measurement of attitudes. Arch. of Psychol. 140, 52, 1932.
- 15) Saaty TL: The analytic hierarchy process. McGraw-Hill, 1980.
- 16) Godon BL, Wasil EA, Harker PT: The analytic hierarchy process-applications and studies. Springer-Verlag, 1989.
- 17) 椎塚久雄：階層型ファジィ積分(HFI)、ファジィ評価講習会テキスト（日本ファジィ学会編）、13—26、1995。
- 18) 若林高明、三田村保、大内 東：順序尺度に基づく階層分析法、日本ファジィ学会誌、9(1)、108—113、1997。
- 19) 椎塚久雄、杉山孝男：階層化ファジィ積分による主観的意思決定法について、第8回ファジィシステムシンポジウム講演論文集、33—36、1992。
- 20) Sugeno M, Fujimoto K: Hierarchical decomposition theorems for Choquet integral

- models. Proceedings of the International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and the Second International Fuzzy Engineering Symposium, 4, 2245—2252, 1995.
- 21) 山下一也：「視る」物差し・「読む」物差し—乳房画像の総合評価を考える—(総説). 日放技学

誌, 53(7), 783—790, 1997.

- 22) 印東太郎編, 印東太郎, 小野 茂, 池田 央: 心理・測定・学習理論 (現代統計数理シリーズ 14), 東京, 森北出版, 1977, p.93.
- 23) Coombs CH, Dawes RM, Tversky A (小野 茂 監訳): 数理心理学序説. 東京, 新曜社, 1974, p.241.

[付録]

乳房ファントム (RMI-165) 画像の階層形総合評価 <観察者用>

— 画像読影実験のマニュアル —

- (1) この実験は、乳房X線撮影時に用いる最適の増感紙/フィルム・システムを選定することを目的としています。
- (2) その解析・評価の方法として階層形ファジィ積分法を適用します。そしてシステムの総合評価をしますものです。
- (3) これから特性を異にする3種類の増感紙/フィルム・システムを観察・読影し、評定していただきます。この評定結果を解析データにして、計量します。

- (4) 評定の方法は、乳房ファントム写真の繊維状陰影、石灰化状陰影、腫瘤状陰影の三つの模擬状の陰影に対して「鮮鋭さ」「粒状性」「コントラスト」の三つの画質属性のそれぞれがどの程度、影響を与えているかを5段階評点総和法で採点していただきます。

- (5) ここでは次のように画質属性を定義しておきます。

「鮮鋭さ」：画像の線状・針状、あるいは辺縁などの陰影が、どの程度まで細かい部分まで視認できるか、の尺度。細部にわたって視認が可能であれば、鮮鋭さはすぐれているとする。

「粒状性」：画像上に生じる微小・微細な粒状模様のザラツキの感じが、どの程度まで目的の陰影の視認に影響を与えているか、の尺度。ザラツキ感の影響の程度が少なければ、粒状性はすぐれているとする。

「コントラスト」：画像上で、あい隣り合った部分の濃淡の差が、どの程度まで視認できるか、の尺度。濃淡の差が大きければ、高いコントラストであるとする。

- (6) 採点は、各陰影に対して次のような基準(評定)と評点で、採点して下さい。

評 点	5	4	3	2	1
◎ 鮮鋭さが ……………	→ 「もっとも良い」	「まあまあ良い」	「普通」	「いづらか悪い」	「もっとも悪い」
◎ 粒状性の影響が …	→ 「もっとも少ない」	「まあまあ少ない」	「普通」	「いづらか多い」	「もっとも多い」
◎ コントラストが …	→ 「もっとも高い」	「まあまあ高い」	「普通」	「いづらか低い」	「もっとも低い」

- (7) いま提示しています乳房ファントム写真は、観察に用いるX線写真の一例で、説明のためにお見せしているものです。繊維状陰影は、文字通り「線状・針状の陰影」です。石灰化状陰影は、「微粒状の微細な陰影」です。また腫瘤状陰影は「広がりをもった陰影」です。一枚のX線写真で、この三つの模擬陰影をご確認下さい。

これらの陰影に対して前記しましたように、各画質属性の影響を評定していただくわけです。また、観察距離は一度決めましたら、原則として変更できません。ご注意願います。

- (8) 読影・評定していただく乳房ファントム写真の枚数は、全部で9枚です。一枚あたり約60秒以内(一つの陰影あたり20秒以内)で採点をお願いします。

- (9) 評定していただく順序は各1枚ごと、繊維状陰影、石灰化状陰影、腫瘤状陰影の順で行ない、画質属性も「鮮鋭さ」「粒状性」「コントラスト」の順でお願いします。

- (10) ご質問があれば、ご遠慮なくお願いします。いったん読影・評定に入りますと、あらためてご質問はお受けできませんので、あらかじめご了承下さい。

- (11) では、読影・評定をお願いします。