

## ブートストラップセンシトメトリー用 ステップウェッジの開発

吉田 彰<sup>1)</sup> 小橋 利美<sup>2)</sup> 大川 義弘<sup>2)</sup> 三上 泰隆<sup>2)</sup>  
平木 祥夫<sup>2)</sup> 東 義晴<sup>1)</sup> 山田 俊治<sup>1)</sup> 杉田 勝彦<sup>1)</sup>

### New Stepwedge for Bootstrap Sensitometry in Medical Radiography

Akira YOSHIDA<sup>1)</sup>, Toshimi KOBASHI<sup>2)</sup>, Yoshihiro OHKAWA<sup>2)</sup>, Yasutaka MIKAMI<sup>2)</sup>,  
Yoshio HIRAKI<sup>2)</sup>, Yoshiharu AZUMA<sup>1)</sup>, Toshiharu YAMADA<sup>1)</sup> and Katsuhiko SUGITA<sup>1)</sup>

A new stepwedge has been developed for bootstrap sensitometry, which is used for determining the characteristic curve of radiographic screen/film systems. Since each step of the stepwedge is separated by the lead septum, flare generated under one step will not penetrate the region of another step. The metal of the stepwedge can be changed with various materials. Characteristic curves obtained with new stepwedge bootstrap (NSB) and conventional stepwedge bootstrap (CSB) techniques were compared with those obtained for screen/film systems with inverse square sensitometry. The inverse square method was used as the reference standard for accuracy. The NSB method provided characteristic curves that agreed well with those obtained using the inverse square method. The slope of the curve in the CSB method was lower than that in the inverse square or NBS method, because of scatter radiation. The shape of the characteristic curve from the NSB method did not vary with the materials of step metals (aluminum and copper). The cumulative error involved when using the bootstrap method is also discussed.

---

**Key Words :** Stepwedge, Bootstrap, Characteristic curves, Sensitometry, Radiographic screen/film systems

---

#### 1. はじめに

増感紙/フィルム系のX線センシトメトリーは、大別すると、時間スケール法と強度スケール法がある。臨床におけるX線写真の成り立ちや相反則不軌の影響を考慮すると、強度スケールによるセンシトメトリーが望ましい<sup>1)-2)</sup>。強度スケールセンシトメトリーの中でも、距離逆2乗法（以下距離法）が標準的センシトメトリーとして考えられている<sup>3)-5)</sup>。しかしながら、このセンシトメトリーの最も大きな欠点は、焦点-フィルム間距離が少なくとも4m程度必要であり、装置自体が大規模なものとなることである。特に、病院のよ

うな臨床の場において、距離法は簡単には実行できない<sup>6)</sup>。X線写真の感度特性のみならず、最も基本的な画質特性であるフィルムコントラストを表現する特性曲線を、どの施設でも容易に測定できないことは由々しき問題ではある。

この問題に対する一つの解決法として、アルミニウムのステップウェッジを用いるブートストラップ法がKodakより発表されている<sup>7)</sup>。これは、「特性曲線の形が、診断用X線エネルギーの範囲では変わらない<sup>8)-9)</sup>」ということを利用して、ブートストラップ法は、簡便なセンシトメトリーとして広く使用されているが、ステップウェッジ

<sup>1)</sup>岡山大学医療技術短期大学部診療放射線技術学科

<sup>2)</sup>岡山大学医学部附属病院中央放射線部

からの散乱線、相反則不軌などにより、精度がよくないことも報告されている<sup>4), 10)</sup>。そこで、われわれは、従来のステップウェッジと比べると、ほとんど散乱線の入らないステップウェッジを開発した。この新しいステップウェッジと従来のステップウェッジによるブーツストラップ法を距離法と比較した。また、ブーツストラップ法における誤差の累積の問題も検討した。

## 2. 新しいステップウェッジの作製

Fig. 1 に、今回作製した新しいステップウェッジの外観を示す。100mm×100mm×27mmの鉛ブロックを縦横5列の格子状に区画して、Fig. 2 に示すようなステップウェッジの枠組みを作製した。外

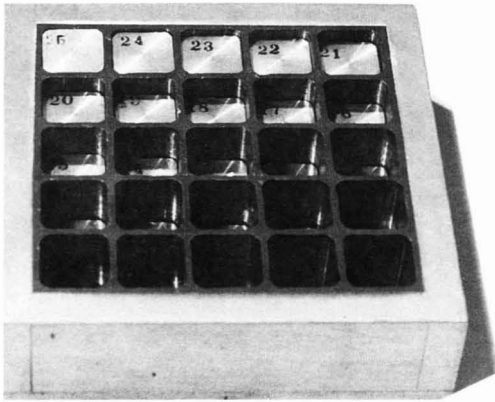


Fig. 1 New stepwedge for bootstrap sesitometry.

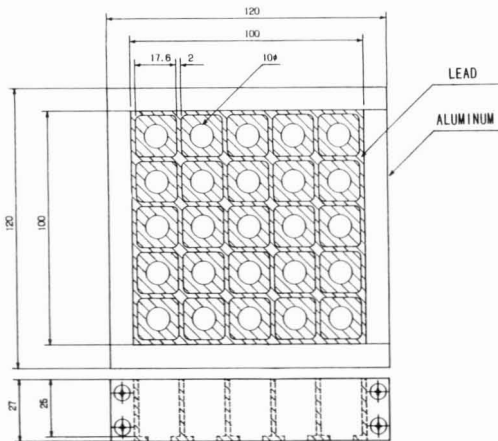


Fig. 2 Design of the framework of the stepwedge.

枠のアルミニウムは、鉛枠の補強材として用いている。その1区画の大きさは、17.6mm×17.6mm×25mmであり、中心部にはX線透過用に直径10mmφの窓を設けている。隣接する格子間の鉛隔壁の厚さは2mm、または底部の鉛厚も2mmである。従来のステップウェッジの各段を切り離し、鉛格子の中に入れたものと考えられる。これにより、隣接ステップからの互いの散乱線を除去できる。また、実際の使用に際しては、下部の窓に対応して、10mmφの窓を25個持つ2mm厚の鉛板をステップウェッジの上部にもせ、金属ステップ内の散乱線も最小になるようにした。

格子の1つに高さ25mmまでの金属ステップを入れることができる。Fig. 3 は、そのようなステッ

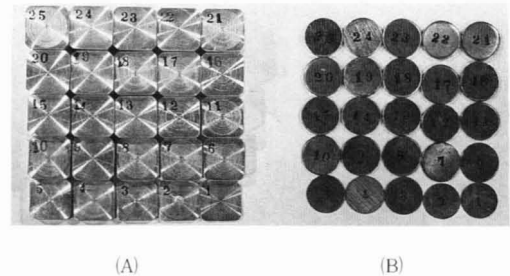


Fig. 3 Materials of the stepwedge.  
A : Aluminum. B : Copper.

プを示すもので、(A)は1mmごとの1~25mmまでの厚さのアルミニウムであり、(B)は0.1mmごとの0.1~2.5mmまでの厚さの銅である。この場合、アルミニウムは低エネルギーX線用、銅は高エネルギーX線用として用いる。また、必要に応じて、ステップウェッジの材質・厚さを別のものに変えることもできる。

## 3. 実験材料および方法

### 3. 1 ブーツストラップ法

従来型のステップウェッジ (conventional stepwedge) および新しいステップウェッジ (new stepwedge) を用いた bootstrap 法をそれぞれ CSB, NSB 法と略す。NSB 法の場合、2. で述べたようにステップウェッジの材質としてアルミニウムと銅を用いているので、それぞれ NSB (Al)

法および NSB (Cu) 法とそれらを区別することにする。CSB 法で用いたステップウェッジは、100mm×250mm×25mm (MELCO 社製) の外形をもち、1 段の大きさが100mm×10mm、厚さの増分が1 mm、段数25段のアルミニウム階段である。

使用した増感紙/フィルム系は、ブルーシステムとして化成オプトニクス BM-Ⅲ/Konica A, グリーンシステムとしてFuji G-4/Konica MG である。これらの増感紙/フィルム系をビニール製真空カセットに入れて吸引、密着させる。

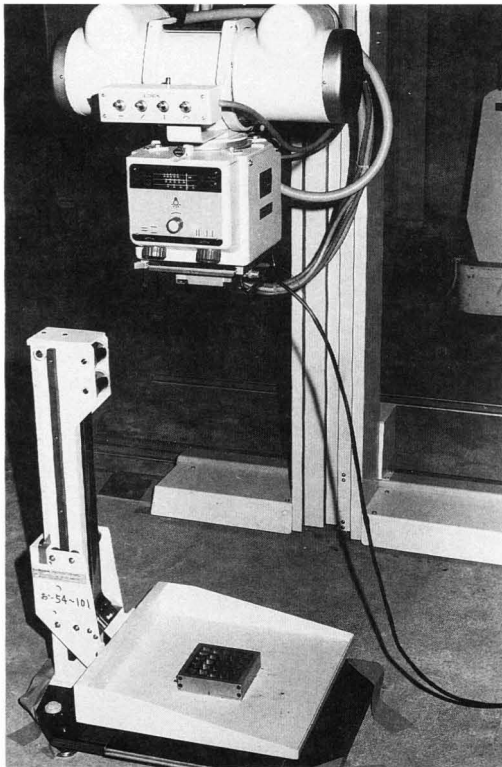


Fig. 4 Sensitometer for the bootstrap method.

Fig. 4 に示す 3 mm 厚の鉛遮蔽板をもつ専用台の上に従来型または新型のステップウェッジを置き、下にカセットを置いて X 線曝射した。なお、この専用台のカセットを置く部分は、後方散乱線を防止するために鉛板が張られている。CSB 法では、そのステップウェッジの上部および下部に幅 10 mm のスリットをもつ厚さ 2 mm の鉛板を置いて、ステップウェッジからの散乱線の影響を少な

くした。

基本露光と倍数露光の露光量比は対数値で 0.2 である。このとき、露光量比は従来の時間ではなく、距離を変化させる強度スケールで変えた。したがって、相反則不軌の累積誤差の問題は避けられる<sup>10)-12)</sup>。X 線出力は透過型線量計 RAD-CHECK PLUS (VICTOREEN 社製) でモニタした。X 線発生装置および X 線管はそれぞれ Toshiba KXO-15, DRX-190D である。

得られた基本露光と倍数露光の 2 つの濃度段階から、“bootstrapping” することにより特性曲線を決定するわけであるが、その方法は従来の Kodak の方法<sup>7)</sup>ではなく、Bednarek 等の方法<sup>11), 13)</sup>を用いた。

### 3. 2 距離法

距離逆 2 乗則を利用して露光量を変えるこの手法はよく知られており、他で詳しく説明されている<sup>13)</sup>ので、簡単に述べる。焦点-フィルム間距離は、35-350cm、その間を相対露光量の対数値で 0.1 刻みの 21 段階に目盛っている。X 線出力は CAPINTEC 192X (PM-05 チェンバ) 線量計でモニタした。X 線発生装置および X 線管はそれぞれ Toshiba KXO-15, DRX-191A である。

### 3. 3 データの収集と処理

データ取得のための曝射条件などを Table 1 に示す。増感紙/フィルム系ごとに、NSB 法、CSB 法および距離法とも Konica VX-400 自動現像機 (現像液: XD-90C, 34℃, 定着液: XF-C, 90秒処理) で同時現像し、各センチメートルごとに 4 枚のフィルム試料を作成した。それらのフィルムより、標準ステップタブレットで校正された Konica PDA-15 濃度計で濃度値を読み取った。

読み取った濃度値は Toshiba UX-300F (Operating System: OS/UX V2 (UNIX 準拠)) コンピュータに入力される。入力データは、C 言語によって作成したコンピュータプログラム、「H-D 曲線処理システム」<sup>14)</sup>で処理した。すなわち、距離法の特異曲線およびブートストラップ法の濃度-濃度関係曲線<sup>13)</sup>の最小 2 乗法によるカーブフィッティング、ブートストラップ法のつなぎ合わせは、グラフィックディスプレイ上に曲

**Table 1** Techniques for data collection

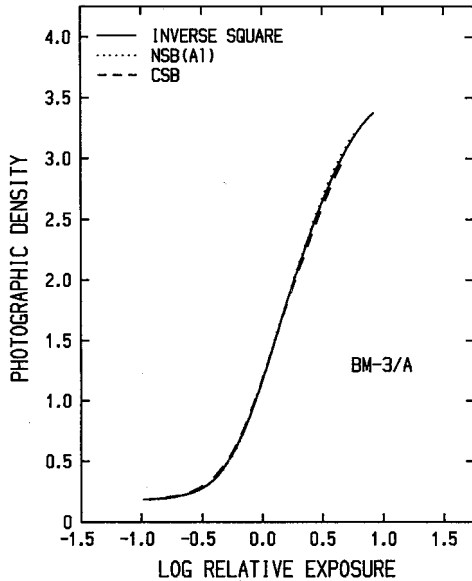
	Inverse square sensitometry	CSB and NSB (Al) sensitometry	NSB (Cu) sensitometry
kV	70	50, 60*	75
mA	50	150, 100*	150, 100*
sec	0.1	0.14, 0.1*	0.2, 0.14*
Filter (mm)			
Copper :	0.5	—	0.2
Aluminum :	4.0	—	4.0
FFD (cm)	35.0—350.0	119.15, 150.0	119.15, 150.0

\* Asterisk represents the exposure condition for the G-4/MG screen/film system.

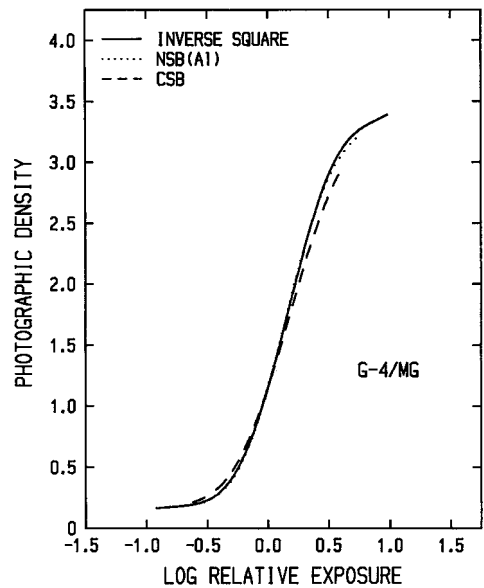
線を表示させ、目で確認しながら行った。さらに、モニタ線量計によるX線出力の補正、特性曲線の正規化および平均化、任意の濃度における相対露光量の平均とその標準偏差の算出、平均階調度の算出なども、すべてこのシステムにより計算処理した。

#### 4. 実験結果

NSB (Al) 法, CSB 法および距離法による特性曲線を, BM-III/A システムおよび G-4/MG システムについて, それぞれ Fig. 5, Fig. 6 に示す。



**Fig. 5** Comparison of characteristic curves for the BM-3/A screen/film system using the inverse square, NSB (Al) and CSB methods.



**Fig. 6** Comparison of characteristic curves for the G-4/MG screen/film system using the inverse square, NSB (Al) and CSB methods.

各手法とも4回の測定値の平均である。センシトメトリーの比較のため、特性曲線はベース+カプリー濃度上1.00の濃度で相対露光量1.000になるように正規化している。図よりCSB法は、他の2つの手法と比較すると、特性曲線の傾きが緩やかである。特に、G-4/MGシステムでその傾向が顕著である。このことは、Table 2の平均階調度をもみても明らかである。距離法を基準として平均階調度の違いをBM-III/Aシステムについてみると、NSB (Al)法では+0.98%、CSB法では-4.60%であり、G-4/MGシステムでは、それぞれ

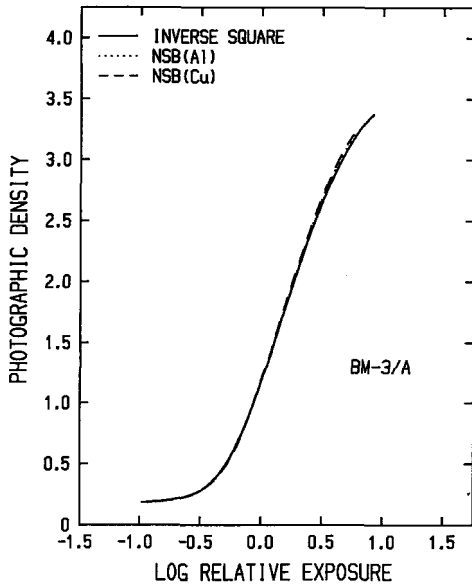
**Table 2** Average gradient for the BM-3/A and the G-4/MG screen/film systems<sup>a)</sup>

	Inverse square sensitometry	NSB (Al) sensitometry	NSB (Cu) sensitometry	CSB sensitometry
BM-3/A	2.65±0.02	2.68±0.04	2.73±0.18	2.53±0.10
G-4/MG	3.09±0.02	3.16±0.14	3.05±0.10	2.72±0.15

a) Each value is the mean ± standard deviation of four measurements.

+2.63%, -11.85%となる。CSB法の平均階調度は、実験精度以上に有意の差がある。

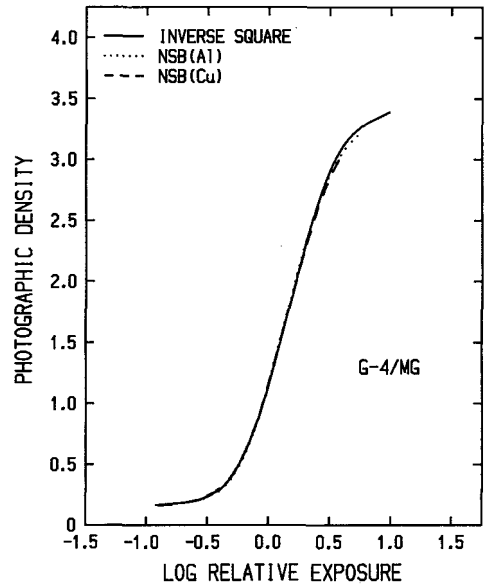
Fig. 7 および Fig. 8 は、NSB法において、ステッ



**Fig. 7** Comparison of characteristic curves for the BM-3/A screen/film system using the inverse square, NSB (Al) and NSB (Cu) methods.

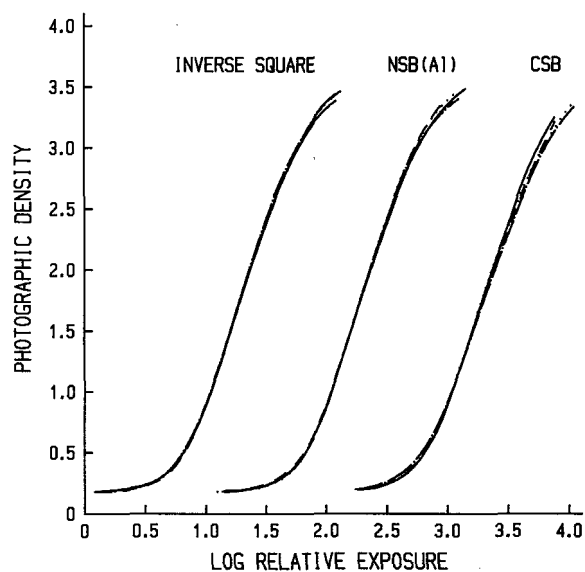
プウェッジの材質による特性曲線の形への影響 (X線エネルギー依存性) を調べたものである。BM-III/A, G-4/MG 両システムとも、アルミニウムおよび銅の金属材質による特性曲線の形状の実質的な差は認められない。Table 2 の平均階調度の値からも、同様のことがいえる。

Fig. 9 は、BM-III/A システムについて、距離法、NSB (Al) 法および CSB 法のそれぞれ 1 回測定の特曲線を 4 本重ね書きしたものである。距離法が最もバラツキが少なく、CSB 法のバラツキが大きいことがわかる。さらに、それらのバラツ



**Fig. 8** Comparison of characteristic curves for the G-4/MG screen/film system using the inverse square, NSB (Al) and NSB (Cu) methods.

キを、濃度0.2~3.0までの各濃度における相対露光量の平均値とその標準偏差でもって、数値的に表したのが Table 3 である。有効濃度域 (ベース+カブリ濃度上0.25から2.00) 辺りで、相対露光量の平均値に対する標準偏差の割合、すなわちパーセント SD (変動係数) をみると、距離法で0.4~1.6%, NSB (Al) 法で0.3~2.2%, CSB 法で0.3~3.8% となっている。Table 4 は、G-4/MG システムについての同様の結果で、距離法、NSB (Al) 法および CSB 法のパーセント SD は、それぞれ0.0~0.7%, 0.2~3.5%, 0.2~5.0% となった。



**Fig. 9** Variations of characteristic curves for the BM-3/A screen/film system using the inverse square, NSB (A1) and CSB methods. The relative positions of the three sets of curves have no significance.

**Table 3** Relative exposure vs photographic density for the BM-3/A screen/film system<sup>a), b)</sup>

Density	Inverse square sensitometry	NSB (A1) sensitometry	CSB sensitometry
0.20	0.170±0.013	0.173±0.014	0.146±0.008
0.40	0.440±0.007	0.445±0.010	0.420±0.016
0.60	0.592±0.006	0.602±0.008	0.581±0.013
0.80	0.730±0.004	0.740±0.005	0.722±0.009
1.00	0.871±0.003	0.875±0.004	0.865±0.003
1.20	1.020±0.004	1.020±0.004	1.018±0.003
1.40	1.185±0.005	1.181±0.004	1.187±0.010
1.60	1.371±0.006	1.366±0.004	1.382±0.019
1.80	1.587±0.009	1.580±0.008	1.612±0.030
2.00	1.842±0.016	1.833±0.015	1.889±0.044
2.20	2.152±0.028	2.135±0.024	2.227±0.061
2.40	2.537±0.043	2.502±0.037	2.644±0.087
2.60	3.029±0.056	2.960±0.052	3.170±0.130
2.80	3.678±0.059	3.554±0.072	3.856±0.193
3.00	4.580±0.084	4.395±0.111	4.817±0.277

a) Base plus fog densities in four measurements of the three methods were about 0.17.

b) Each value is the mean ± standard deviation of four measurements.

**Table 4** Relative exposure vs photographic density for the G-4/MG screen/film system<sup>a), b)</sup>

Density	Inverse square sensitometry	NSB (A1) sensitometry	CSB sensitometry
0.20	0.258±0.008	0.260±0.018	—
0.40	0.497±0.003	0.507±0.018	0.451±0.022
0.60	0.642±0.002	0.654±0.014	0.608±0.020
0.80	0.773±0.002	0.782±0.010	0.751±0.013
1.00	0.902±0.001	0.906±0.005	0.891±0.006
1.20	1.034±0.000	1.032±0.002	1.037±0.002
1.40	1.173±0.002	1.166±0.009	1.195±0.012
1.60	1.323±0.003	1.312±0.017	1.369±0.024
1.80	1.489±0.005	1.474±0.026	1.566±0.038
2.00	1.675±0.006	1.658±0.036	1.794±0.054
2.20	1.890±0.008	1.873±0.047	2.065±0.071
2.40	2.147±0.009	2.135±0.062	2.397±0.091
2.60	2.466±0.009	2.472±0.083	2.825±0.110
2.80	2.890±0.010	2.941±0.112	3.423±0.124
3.00	3.525±0.023	3.697±0.145	—

a) Base plus fog densities in four measurements of the three methods were 0.15.

b) Each value is the mean ± standard deviation of four measurements.

## 5. 考 察

CSB 法ではアルミニウムのステップウェッジの上部と下部を鉛板スリットでマスクして散乱線の影響を少なくしているが、隣接するステップからの散乱線は、完全には除くことができない。それにひきかえ、NSB (A1) 法では、隣接するステップからの散乱線を完全に取り除くことができる。散乱線は、特性曲線の低濃度部に大きな影響を与え、結果として曲線の傾きを低下させる<sup>15)</sup>。したがって、CSB 法の特性曲線の傾きが、距離法および NSB (A1) 法と比べて低いのは、隣接するステップウェッジからの散乱線のためであると推察される。

ステップウェッジの材質の違いによる特性曲線への影響では、一般によく用いられているアルミニウムと銅において差は認められなかった。今回の実験では2種類の材質のみであるが、マンモグラフィなどの低エネルギー用の材質として、プラスチック系のステップウェッジの利用も可能であろう。さらに、場合によっては、適当な容器に

ヨード系あるいはバリウム系の造影剤などを入れた液体性のステップウェッジも考えられる<sup>16)</sup>。

新しいステップウェッジは、全体が100mm×100mmのX線照射野内に入るため、ステップウェッジの中心をX線束中心に合わせると、半径70mm以内にすべてのステップウェッジが含まれる。同じ10mm幅、25段のステップをもつ従来のステップウェッジでは、125mmの半径の照射野を必要とするから、それに比べると新しいステップウェッジでは、よりX線中心束付近でX線曝射ができることになる。そのため、X線管焦点面のヒール効果<sup>17)</sup>などに起因するX線強度分布の不均一性の影響を受けることが少ない。

次に、ブートストラップ法における累積誤差について考察する。Fig. 10はブートストラップ法のつなぎ合わせの原理図である。Fig. 10(B)のrが2回のX線曝射における計算上の露光量比の対数値 $r = 4 \log E$ である。この値は、X線出力変動、距離合わせの誤差などによりゆらぐ。ここで、ある1回の測定において、rの真の値がr'であっ

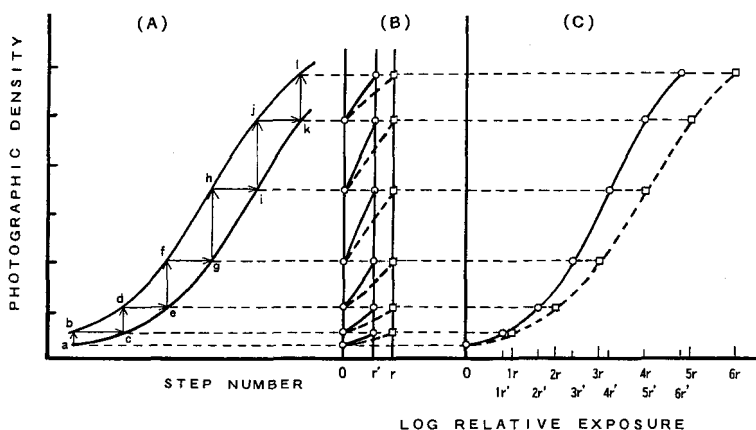


Fig. 10 Illustration of cumulative error in the bootstrapping technique. A : Density vs step number curves. B : Segments of the characteristic curve. Log-exposure-ratios  $r$  and  $r'$  indicate the calculated and actual values, respectively. C : Solid line represents the true characteristic curve and the broken line is the curve with the cumulative error.

たとする。Fig. 10(C)において、本来は  $r'$  ごとに Fig. 10(B) の濃度値をプロットしなければならないが、真の値はわからないので、 $r$  ごとにプロットされる。すると、つなぎ合わせによって、それらの小さな誤差が累積される。その結果、Fig. 10(C)の破線のように特性曲線全体に大きなカタヨリを生じさせる恐れがある。測定を多数回繰り返すと、これらの  $r'$  は  $r$  の周りでランダムにばらつくはずである。そこで、多数回測定特性曲線を平均化すれば、カタヨリは避けられる。

以上のことにより、NSB法は距離法と比較すると、バラツキは大きいですが、NSB法の平均化された特性曲線が距離法特性曲線とよく一致することの理由と思われる。

## 6. 結 論

1) 今回作製したステップウェッジは以下の特長を有する。

- ① 隣接する金属ステップからの散乱線は完全に取り除かれており、また、ステップウェッジ内の散乱線の影響も少ない。
- ② 金属ステップは、目的に応じて任意の材質に変えることができる。

③ X線中心束付近の比較的狭い範囲のみを利用できるため、X線強度分布の影響が少ない。

2) CSB法では、ステップウェッジからの散乱線の影響のため、距離法やNSB (Al)法より特性曲線の傾きが低下する。

3) NSB (Al)法およびNSB (Cu)法の特性曲線は距離法によく一致し、アルミニウムと銅の材質による違いは認められなかった。

4) ブートストラップ法では、つなぎ合わせによる誤差の累積が生ずるため、バラツキが大きく、多数回測定の平均を必要とする。

## 謝 辞

実験に御協力頂いた岡山大学医学部附属病院中央放射線部 三村誠一、井上龍也、江草具視氏に心より感謝いたします。

本論文の一部は、日本放射線技術学会第43回総会 (1987年、東京) において発表した。



## 参 考 文 献

- 1) James, T. H., ed. : The Theory of the Photographic Process. 4th ed., Macmillan, New York, p495, 1977
- 2) Haus, A. G., Marsh, L., Bencomo, J. and Vyborny, C. : Sensitometry in medical imaging. Proc. SPIE., 127 : 76-86, 1977
- 3) Haus, A. G. and Rossmann, K. : X-ray sensitometer for screen-film combinations used in medical radiography. Radiology., 94 : 673-678, 1970
- 4) Wagner, L. K., Haus, A. G., Barnes, G. T., Bencomo, J. A. and Amtey, S. R. : Comparison of methods used to measure the characteristic curve of radiographic screen/film systems. Proc. SPIE., 233 : 7-10, 1980
- 5) 山下一也, 山本義憲, 粟井一夫, 大竹英則, 岡田弘治, 田中俊夫, 西島昭彦, 山口和也 : 増感紙フィルムシステムのX線センシトメトリーについて. 日放技学誌, 40 : 59-78, 1984
- 6) Yoshida, A., Hiraki, Y., Ohkawa, Y., Yamada, T., Hashimoto, K. and Aono, K. : Modified inverse square sensitometry for the determination of the characteristic curve of radiographic screen/film systems. Acta Med. Okayama., 40 : 33-38, 1986
- 7) Sensitometric Properties of X-ray Films. Radiography Markets Division, Eastman Kodak Co., Rochester, New York, p27, undated
- 8) Haus, A. G., Rossmann, K., Vyborny, C. J., Hoffer, P. B. and Doi, K. : Sensitometry in diagnostic radiology, radiation therapy, and nuclear medicine. J. Appl. Photogr. Eng., 3 : 114-124, 1977
- 9) Vyborny, C. J. : H and D curves of screen-film systems: factors affecting their dependence on X-ray energy. Med. Phys., 6 : 39-44, 1979
- 10) 吉田 彰 : ブートストラップ法. INNERVISION, 3 : 30-33, 1988
- 11) Bednarek, D. R. and Rudin, S. : Comparison of modified bootstrap and conventional sensitometry in medical radiography. Proc. SPIE., 233 : 2-6, 1980
- 12) Wagner, L. K., Barnes, G. T., Bencomo, J. A., and Haus, A. G. : An examination of errors in characteristic curve measurements of radiographic screen/film systems. Med. Phys., 10 : 365-369, 1983
- 13) 吉田 彰 : Filter bootstrap 法と modified stepwedge bootstrap 法による増感紙／フィルムシステムのX線センシトメトリー. 日放技学誌, 44 : 535-541, 1988
- 14) 三村誠一, 吉田 彰, 大川義弘, 小橋利美, 江草具視, 服部綾雄, 松島紀志夫, 山田俊治 : H-D 曲線処理システム. 第27回日放技学会中国・四国部会発表, 山口県宇部市, 1986
- 15) Curry, T. S., Dowdey, J. E. and Murry, R. C. : Christensen's Introduction to the Physics of Diagnostic Radiology. 3rd ed., Lea & Febiger, Philadelphia, pp165-166, 1984
- 16) 西原貞光, 大塚昭義 : 放射線受光系の特性曲線, 2. コントラストに及ぼす増感紙の影響. INNERVISION, 3 : 10-13, 1988
- 17) Bushong, S. C. : Radiologic Science for Technologists : Physics, Biology, and Protection. 2nd ed., Mosby Co., St.Louis, pp110-111, 1980

(1990年10月29日受理)