テクニカルノート

Bootstrap 法によるセンシトメトリーの測定精度と誤差要因について

小倉 明夫・仁井田 秀治・*小川 憲一

*駒井 良則・**轟 英彦・**増田 寿一

***細 野 弘

京都市立病院放射線科

*京都大学附属病院

**京都府立医大附属病院

***学際研究所附属病院

(論文受理 1990年9月14日)

(最終論文受理 1991年2月8日)

(Code No. 313)

Key words: Bootstrap method, Inverse square method, Sensitometry error factor, Aluminium step wedge

ACCURACY AND ERROR FACTORS OF SENSITOMETRIC CURVE USING
THE BOOTSTRAP METHOD

AKIO OGURA, HIDEHARU NIIDA, *KENICHI OGAWA

*YOSHINORI KOMAI, **HIDEHIKO TODOROKI, **TOSHIKAZU MASUDA

and ***HIROSHI HOSONO

Department of Radiology, Kyoto City Hospital

*Department of Radiology, Kyoto University Hospital

**Department of Radiology, Kyoto Medical university Hospital

***Department of Radiology, Gakusai Laboratory Hospital

(Article received ; Sep, 14, 1990)

Summary

One of the important factors affecting radiographic image quality is the film contrast of the recording system, which may be expressed by the gradient of its characteristic curve.

The methods for measuring the gradient have been investigated with regard to their accuracy. It has been published that the most accurate measurement of the sensitometric curves of screen-film systems is an intensity-

scale X-ray sensitometer employed in the inverse square law of distance. However, in this method, the measuring is rather laborious.

In this study, the accuracy of sensitometric curve by the bootstrap method using an aluminium step wedge was examined. The influences on the shape of its curve affected by several factors such as X-ray energy and the scatter factor were examined. We also compared the accuracy of the bootstrap method with the inverse square method by the standard deviation of each density at ten times the sensitometry.

The measurements indicated that those factors failed to change the shape the sensitometric curve. At high density of sensitometric curves, the standard deviation at ten times of the bootstrap method were less than the inverse square method using the X-ray tube employed during daily clinical examinations.

It is concluded that the bootstrap method is simple and effective to measure the gradient of sensitometric curves except for a laborious type measurement.

1. 緒 言

増感紙フィルムシステムの特性曲線は画像特性の基本であり、かつ最も重要なパラメータであるといえる。そのため、センシトメトリーは研究室レベルから、臨床施設のレベルまで、あらゆる施設で測定され、その測定法も数多く発表されている¹⁻⁷⁾。それら各方法には一長一短があり、いずれかの方法に限定し、固執する必要性はないと考える。つまり、各方法の長所、短所を十分把握し、また各方法の精度も認識し、真値とどの程度の誤差があるかを理解した上で使いわけのべきである。

1984年に日本放射線技術学会X線センシトメトリー班の委員会報告として、距離の逆二乗則を応用する方法(以下、距離法)の有用性が報告されている⁸⁾。この方法は委員会報告にあるように、理論的にも最良の方法であり、少なくとも研究室レベルの実験や、高い精度を要する実験にはこの方法を採用すべきであると考えられる。しかし、距離法は距離の逆二乗則を応用するものであり、正確に距離の逆二乗則が成立する線質を設定する必要がある。そのためには線量計などでモニターし、前もって確認しておく必要がある。また距離設定も繊細な注意を払うべきで、委員会報告には距離設定の許容誤差は各露光点において最小 ± 0.5 cmの精度が要求されている。最近、センシトメトリー測定専用の装置を有する施設もあり、これらの施設では問題ないが、一般施設での天井走行のX線管装置で精度の高い測定をするのは少し困難なものがある。またセンシトメトリーの目的がフィルムの比較であったり、平均階調度の測定である場合が多く、高い精度を要求されないならば、他の方法も見直されるべきであろう。

そこでわれわれは距離法以外の方法の中で、まずアルミステップを使用した Bootstrap 法²⁻⁴⁾について再度、

検討を加えた。この方法は簡便で測定に要する時間や設備も少なく、アルミステップと濃度計があれば、どの施設でも測定可能である。しかしテキストや学会発表の中でも Bootstrap 法の測定精度の問題、ステップからの散乱線の影響、増感紙の線質依存性、などによりフィルム増感紙システムのセンシトメトリーとして、適切でないとしたものがある^{6,8-9)}。われわれはそれらの問題点が最終的な特性曲線の形状にどの程度、影響をもたらすかについて実験を行った。また京都市内の6施設において Bootstrap 法により特性曲線を作成し比較検討を行った。

2. 方 法

2.1 線質依存性

一般に診断領域では線質により、特性曲線の形状は変化しないことが知られている¹⁰⁾。しかし、Bootstrap 法においてはフィルムのみの場合には問題ないが、フィルム増感紙システムのセンシトメトリーでは増感紙の発光効率に線質依存性があるため特性曲線への影響が考えられる¹¹⁾。その理論を説明すると、ステップの各段を通過したX線の線質は Fig. 1 に示すようにステップによって線質が異なったものとなる。他方、増感紙の蛍光体のX線吸収効率は Fig. 2 に示すごとく線質に依存して変化し、その発光効率に影響を及ぼす。

そこで、その線質依存性が特性曲線の形状にどのような変化をもたらすかについて実験をするため、管電圧を 40 kVp~100 kVp まで変化させ、その曲線を比較した。実験には特に線質依存性が顕著である、希土類増感紙 KODAK Lanex-fine と KONICA-MG フィルムを使用した。これらの実験は曲線の形状の差を比較することを目的とするため、各曲線は感度測定に多用される濃度、Gross Fog+Net density $D=1.2$ の点で重ね合わせた。

Bootstrap 法によるセンチメートルの測定精度と誤差要因について (小倉・他)

Fig. 1 X-ray intensity through the Aluminium step wedge.

Fig. 2 Calculated X-ray absorption as function of photon energy for rare-earth screen and a calcium tungstate screen.

2.2 散乱線による影響

各ステップから発生する散乱線の影響により特性曲線へ変化を与えることが考えられる。そこで散乱線の量を変化させるため、25 cm 幅のアルミステップを用い、X線照射野を2 cm～20 cm まで変化させ、特性曲線の形状へ

の影響を検討した。また実際に撮影したステップ像をマイクロデンシトメータによりステップの段差のある方向に測定し、1 ステップ内の濃度変化を検討し、ステップの測定位置による特性曲線への依存性も検討した。

2.3 使用するステップによる影響

ステップも材質、形状が異なる種々のものがある。その中で特にアルミステップの三種類の形状の異なるもの(ステップ厚, ステップ幅)を使用し、形状の差による特性曲線への影響を検討した。

2.4 倍数露光の精度

Bootstrap 法で特性曲線を作成する際には、倍数露光が必要であるが、この方法も各種あり基準露光の倍数曝射が一般的である。しかし、この方法は間欠露光効果の影響が推測される。そこで①基準露光の二回露光による方法、②基準露光の照射時間を倍にする方法、③距離法によりセンチメートルを行い、同時現像して特性曲線を求め、比較検討を行った。

距離法による特性曲線の作成法は、技術学会X線センチメートル一班報告に準ずる。線質は三相70 kVpで固有フィルタ(1.5 mm Al)、付加フィルタ(0.7 mm Cu + 1.5 mm Al)を使用した。各設定距離において、距離の逆二乗則が成立していることを蛍光量計で測定し確認した。また、この実験において、倍露光の各方法で両者ともX線量が倍に照射されていることを確認するため、同様に蛍光量計で測定を行った。

2.5 測定再現性

測定再現性を検討するため、同一のフィルム増感紙を用い、資料を作成(資料数10)後、同時現像して得た特性曲線と距離法で求めた特性曲線(資料数10)の測定再現性を各 log E の濃度の標準偏差を指数として比較を行った。

2.6 Bootstrap する手技の誤差

ステップ-濃度曲線から、特性曲線を作成する場合、人間の手により各ステップ濃度を補間して Bootstrap を行う場合が多く、1つのポイントの誤差が単独ではなく、他のポイントにも増幅されて影響をもたらす。その再現性を測定するため、1つの基準露光と倍露光のステップ濃度データを、それぞれ10人のオペレータによって Bootstrap し、その誤差を検討した。

2.7 施設間の測定再現性

測定する装置の依存性を検討するため、6施設で同一のフィルム、増感紙(KONICA NEW A, KYOKKO BF3)、ステップで資料を作成し、同一施設で同時現像を行い Bootstrap 法による特性曲線の測定再現性を検討

した。

3. 結 果

特性曲線の線質依存性に関しては、理論的には影響されるはずであるが、実験的には Fig. 3 に示すように有意差は見られなかった。

また散乱線による特性曲線の形状に与える影響も Fig. 4 に示すように有意差は認められなかった。しかし散乱線によってフィルムに到達する線量が増加するため

Fig. 3 Characteristic curve of bootstrap method sensitometry using a different beam quality. (overlapped at density of 1.2)

Fig. 4 Characteristic curve depends on different field size. (overlapped at density of 1.2)

Fig. 5 Density of the film exposed through the aluminium step wedge scanned by a microdensitometer.

相対濃度も変化し、横軸 log E のずれは当然ながら認められた。グラフは形状への依存性を注目するため、 $D = 1.2$ でスライドして重ね合わせている。

Fig. 5 はステップを撮影した像を長軸方向にマイクロデンシトメータでスキャンしたものである。濃度分布からもわかるように、同一ステップでも隣合った高い方のステップから低い方のステップへ濃度の傾斜がみられた。Fig. 6 は各ステップの傾斜を持つ濃度分布の中で、高い方のステップに近い側、中間、低い方のステップに近い側とポイントを三カ所設定し、各ポイントで Bootstrap したものである。その結果、三本の曲線に有意差は見られなかった。このグラフの縦軸はマイクロデンシトメータで測定した平行光濃度であり、Q ファクターでの変換は行っていない。

Fig. 7 は三種類の形状の異なるアルミステップを使用した場合の特性曲線を比較している。タイプ A は 3 cm 幅、段差 1 mm、20 段のアルミステップ、タイプ B は 10 cm 幅、段差 1 mm、20 段のアルミステップ、またタイプ C は 25 cm 幅、段差 2 mm、15 段のアルミステップである。結果的には三者に有意差は見られなかった。

Fig. 8 に倍露光の方法による差を示す。下の実線が基準照射、上の実験が基準照射の照射時間のみを倍にしたステップ-濃度曲線で、波線は基準照射を二回照射したものである。タイマーの精度の問題もあるため、蛍光線量

Fig. 6 Characteristic curve measured at different points of the step.

Fig. 7 Characteristic curve using third type of the aluminium step wedge.

Bootstrap 法によるセンシトメトリーの測定精度と誤差要因について (小倉・他)

計によって入射線量を測定した結果、どちらの方法も同線量照射されていることを確認した。それぞれの方法を Bootstrap したものが Fig. 9 である。グラフに示すように、二回照射は一回倍時間照射に比べ平均階調度が低い値となった。また一回倍時間照射の特性曲線は距離法によるものと一致した。

次に Bootstrap 法、距離法の各測定再現性のバラツキを Log RE ごとに標準偏差で示したのが、Fig. 10 である。Log RE が 0.3 から 0.6 で特性曲線の足の部分であり、1.2 から 1.5 が肩の部分に相当する。各曲線は $D=1.2$ (Log RE=1.0) で重ね合わされている。低濃度部に関してはどちらの方法も大差はないが、高濃度部になる

と距離法による曲線のバラツキが増加した。距離法による測定誤差は特性曲線の直線部から肩にかけてのポイントがピークであり、それ以上の線量で曲線の肩の部分になると誤差はまた低下した。

Fig. 11 は Bootstrap の手技をする際の誤差を同様に標準偏差で示したものである。線量と濃度の増加とともに、標準偏差の値も増加するが、これも曲線の肩の部分になると減少した。

Fig. 12, 13 は施設間の特性曲線の測定再現性を示したものである。二回に渡って測定を行ったが、大きな誤差は見られなかった。

Fig. 8 Step density using a different double exposure technic.

Fig. 9 Characteristic curve obtained with a different double exposure technique and inverse square sensitometry.

Fig. 10 Standard deviation of measurement density obtained with the bootstrap sensitometry and inverse square sensitometry on 10 times.

Fig. 11 Standard deviation of sensitometric density obtained with 10 operators.

Fig. 12 Characteristic curves of bootstrap method sensitometry obtained by 6 facilities. (overlapped at density of 1.2)

Fig. 13 Characteristic curves of bootstrap method sensitometry obtained by 5 facilities. (overlapped at density of 1.2)

4. 考 察

以上の結果より、Bootstrap 法による特性曲線は理論的には線質依存性や散乱線の影響を受けるが、実測的には、最終的な特性曲線にそれらによる有意差は見られなかった。つまり、かなり精度の高い特性曲線を必要とする場合を除けば、Bootstrap 法は、その特性曲線の形状についてのみいえば、それらによる誤差は無視できるといえる。

また一つのステップ内でも高い方のステップに近い側と低い方のステップに近い側では濃度差が存在するが、全てのステップでほぼ同じ位置で測定すれば、測定位置による依存性はないといえる。

Bootstrap 法の資料作成の方法として、ほとんどのテキストには倍数露光の方法を基準露光の二回照射をするべく書かれているが、この方法は間欠露光効果の影響を受け、結果的に本来の特性曲線より平均階調度を下げる傾向がある¹²⁻¹³⁾。そのため倍数露光の方法は一回照射が望ましく、照射時間や照射距離を変化させて、一回照射で倍数露光を行うべきであると考ええる。ただし照射時間を変化させる場合は装置のタイマーの精度が問題であり、照射距離を変化させるほうが良いかもしれない。

また Bootstrap 法の測定誤差は距離法によるものに比べ、再現性を指標としてみた場合、誤差の少ないものであった。特にその差は距離法でいえば高濃度域の距離の短いポイントに相当し、設定距離の数ミリの誤差が影響したものと考察する。また Bootstrap する際の実験者の手技による段階の誤差も若干認められたが、これらは各ポイントの補間とくつひも操作をする時点での誤差と考えられ、コンピュータなどでソフトを作成し、これらの操作で行えばその誤差も解消できると考える¹⁴⁻¹⁵⁾。

最後に施設間で画像情報について討論する場合には、特性曲線は最小限、不可欠なものであり、一つのスケールとして使用されるべきものであろう。そのためには少なくとも同一のフィルム増感紙、現像処理であれば各施設で同一の特性曲線が得られなければならない。その確認のため、2 年に渡り、1 年目が 6 施設、2 年目が 5 施設の各施設において Bootstrap 法の手法により、特性曲線を比較したがほとんど誤差はみられなかった。

5. 結 論

特性曲線の作成法としては、距離法によるものが、理論的にも精度の面からも最も優れていることはセンシトメトリー班の委員会報告のとおりである。しかし距離法

を使用すれば、状況を選ばず正確な特性曲線が得られるというのではなく、かなり精密な実験系と測定技術があることが前提である。

それらのことを考慮すれば、従来からある Bootstrap 法も、測定目的によっては有効的なセンシトメトリーの手段として見直されるべきであると考ええる。ただし倍露光の方法は分割照射より、一回照射で距離か照射時間によって倍露光する手法を選択すべきである。

ただし、これらの実験は特性曲線の形状についてのみ検討した結果であって、平均階調度などの測定には問題ないが、相対感度など log RE の横軸で比較する場合には上記の各ファクターによる誤差が生じる可能性はありえる。

それらについては今後、検討していきたい。

6. 謝 辞

実験に御協力いただいた各施設の技師諸兄に深く感謝します。またフィルムなどを各施設、持ちまわり頂いたコニカ株式会社の野村氏に感謝いたします。最後に、研究の場を与えて頂いた日本放射線技術学会京都支部、野原弘基支部長に感謝の意を表します。

7. 文 献

- 1) Haus AG, Rossmann K: X-ray srensitometer for screen-film combinations used in medical radiology. *Radiology*, **94**, 673-678, (1970).
- 2) Sensitometric properties of X-ray films. Rochester, Radiography Markets Division, Eastman kodak, 21-27.
- 3) Hole j, Bloch P: Step-Wedge Sensitometry. *Radiology*, **128**, 820-821, (1978).
- 4) Yester MV, Barnes GT, King MK: Kilovoltage Boot strap sensitometry. *Radiology*, **136**, 785-786, (1980).
- 5) Wagner LK, Haus AG, Barnes GT, et al: Comparison of methods used to measure the characteristic curve of radiographic screen/film systems. *Proc SPIE*, **233**, 7-10, (1980).
- 6) 山下一也, 山本義憲, 他: 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**(1), 59-78, (1984).
- 7) 吉田 彰: Filter Bootstrap 法と Modified step-wedge 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**(5), 535

Bootstrap 法によるセンシトメトリの測定精度と誤差要因について (小倉・他)

- 541, (1988).
- 8) 川本澄夫, 他, : BootStrap 法によるセンシトメトリについての考察. 日放技誌, Vol. 29, No. 5, 39-44, (1982).
- 9) 西島昭彦, 他: アルミ階段を用いたブーツストラップ法の再検討. 第39回日放技学会総会予稿集, 585, (1983).
- 10) Vyborny CJ: H and D curves of screen-film systems: factors affecting their dependence on X-ray energy, Med. Phys., 6, 39-44, (1979).
- 11) 大塚昭義, 上田克彦, 他: 増感紙とX線エネルギーによる写真コントラストの変化. 日放技学誌, 43(7), 760-766, (1987).
- 12) 栗井一夫, 他: X線シネフィルムのセンシトメトリ. 12. 相反則不軌と間欠露光効果. 日放技学誌, 45(2), 154, (1989).
- 13) 安彦 茂, 他: ブーツストラップ法の検討. 第41回日放技学会総会予稿集, 744, (1985).
- 14) Chan HP, Doi K: Determination of radiographic screen-film system characteristic curve and its gradient by use of a curve-smoothing technique, Med. Phys., 5, 443-447, (1978).
- 15) 菊池 務, 他: Spline 関数による H-D curve の補間と強度分布関数変換の精度. 第39回日放技学会総会予稿集, 202-203, (1983).