

## 強度目盛法と時間目盛法による X 線フィルムの 特性曲線の比較と相互変換法

石川英子, 片倉 剛, 大石幹雄  
安彦 茂\*

東北大学医療技術短期大学部診療放射線技術学科

\*仙台赤十字病院放射線部

## Comparison of the Characteristic Curves of Screen/X-Ray Film System between the Intensity-Scale and the Time-Scale and their Mutual Conversion Method

Eiko ISHIKAWA, Tsuyoshi KATAKURA, Mikio OISHI and Shigeru ABIKO

*Department of Radiological Technology, College of Medical Sciences, Tohoku University*

*\*Department of Radiology, Sendai Sekijoji Hospital*

Key Words: Screen/X-ray film System, Radiographic Sensitometry, Bootstrap Method,  
Reciprocity failure, Intermittency effect

The H&D curves of the screen/X-ray film system are obtained by the intensity-scale or time-scale exposure, but the latter tends to show a lower gradient than the former. In this study, the time-scales are given by a lead sector, which has logarithmic angles from 1.1 to 180 degrees, and three different curves are made under the varied intensities at the film focus distances (FFDs) of 1, 1.4 and 2 meters. If the intensity-scale equals the time-scale in exposure effect, each theoretical shifting value between these curves should be  $\log t = 0.3$  on the time scale, but the practical value is  $\log t = 0.38$ . The difference results from the reciprocity failure effect. Thus, its factor  $p$  equals  $0.3/0.38 = 0.8$ . If the time scale curve is corrected by  $p \cdot \log t$ , then it corresponds with the intensity-scale curve.

Furthermore, in this study, the intermittency effect is observed by repeating exposures under the same X-ray condition at each FFD. The shifting value between two adjacent curves is not  $\log I = 0.3$  but  $\log I = 0.25$ . Thus, the intermittency effect factor is  $0.25/0.3 = 0.8$ . This factor has influence on the bootstrap method. So, in the method, the exposures should be done by changing FFDs, not by repeating.

### はじめに

フィルムの黒化は入射する光量によって生じるが、この2者間の関係を示すのがフィルムの特性

曲線である。

この特性の表示法として、露光量を横軸とするが、この露光域は広範囲に亘るので、一般に露光量の対数値で表す。この場合、特性は線形とはな

らず、曲線はS字状となるがこの形状は写真乳剤の種類によって異なる。

特性曲線からは、主としてフィルムの感度、コントラスト、カブリを知ることができ、X線写真においては撮影条件の決定や目的部位に対するフィルムの選択のために使用される。一方、X線画像の解像系、粒状系などの画像解析を行う場合は、この特性曲線を使用して写真濃度から逆に露光量を知ることが必要となり、これを強度変換と呼び放射線写真では特に重要項目とされている。

特性曲線の作図のためには横軸の定量化が必要であり、このための露光法としてX線の強度を変化させる強度目盛法(Intensity Scale: 以下、 $I$ ・スケール)と露光時間を変化させる時間目盛法(Time Scale: 以下、 $T$ ・スケール)がある。

この2者による特性曲線の形状は、一般に $I$ ・スケール法に比較して $T$ ・スケール法のグラジェントが低いことが指摘されており、この主な原因は相反則不軌現象によるものと言われている<sup>1)~4)</sup>。

しかし、これまで $T$ ・スケール法に関する報告は少なく、また時間設定には装置のタイマーを使用したもので、正確度に問題がある。

著者らは、鉛セクター長により露光時間を変化する装置を製作して $T$ ・スケール法を行い、その結果を距離を変化させる $I$ ・スケール法と比較し、両曲線間の相互変換法について検討を行った。

また、X線の間欠曝射によっても写真効果が異なることも指摘されており<sup>5)6)</sup>、この現象はX線写真でブートストラップ法を使用する場合に問題視されているので、間欠曝射法と $T$ および $I$ ・スケール法との関連をも検討した。

## 測定方法

### 1. 時間目盛法

厚さ1mmの鉛板に表1に示す12段の扇形状のセクターを設け、各段の露光量 $E$ の対数値が $\log t=0.2$ ステップになるように設計した(図1)。セクターはコンピュータで作図して切り抜いた。フィルムは180度/28秒の等速回転台で移動され、この場合、露光時間は0.17-28秒の範囲で変化する。セクターの拡大を避けるため、セクターと

表1. 時間法の相対露光量

No	セクター (角度)	時間 (sec)	相対露光量 (RE)	log RE
1	1.1	0.17	1.00	0.0
2	1.8	0.26	1.58	0.2
3	2.8	0.42	2.51	0.4
4	4.5	0.66	3.98	0.6
5	7.1	1.05	6.33	0.8
6	11.3	1.67	10.00	1.0
7	18.0	2.65	15.87	1.2
8	28.3	4.27	25.64	1.4
9	45.1	6.67	40.00	1.6
10	71.4	10.42	62.50	1.8
11	113.4	16.67	100.00	2.0
12	180.0	27.78	166.67	2.2

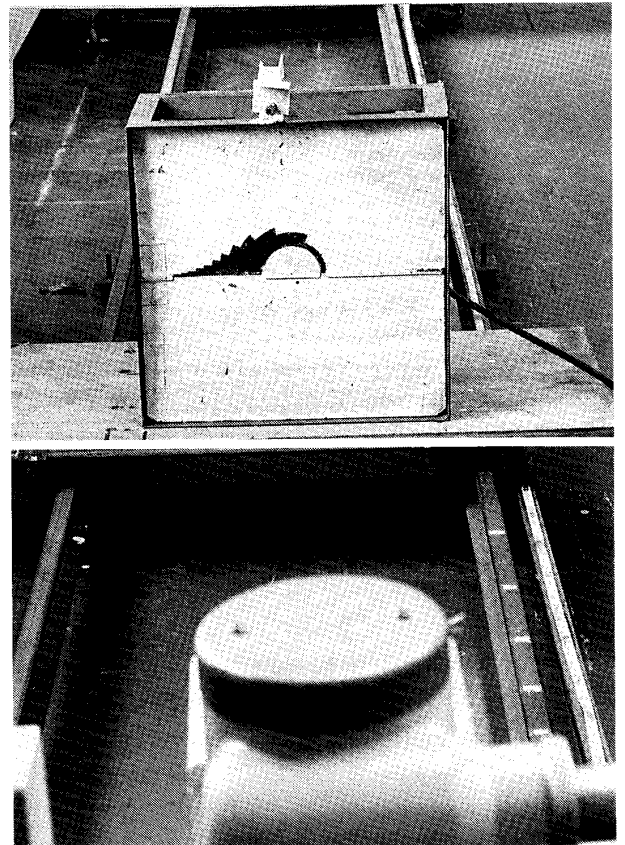


図1. 時間目盛と強度目盛の露光装置

フィルム間は5 mm程度に保持し、X線管焦点-フィルム間距離は200 cmとした。X線の照射は鉛板厚を考慮して60 kV, 1.5 mAで連続照射を行った。

### 2. 強度目盛法

X線強度の変化は距離の逆2乗則による距離法で行った。この距離を変化させるために、6 mのレールに目盛を付しフィルム移動台を載車した。フィルムの移動は段差  $\log I = 0.15$  で13段の露光を行った。

### 3. ブートストラップ法

ブートストラップ法の露光のため、段差1 mm, 20段のA1階段を使用した。ブートストラップ法を行うためには露光比の異なる2枚の試料が必要であるが、低露光部は141 cmで行い、高露光部は低露光を2回のくり返し曝射する方法と距離を100 cmにする方法とで行った。

### 4. 使用感光材料

X線発生装置：単相全波整流

レギュラー系：増感紙極光FS, フィルム  
                  コニカAタイプ。

オルソ系：増感紙コニカKO-380, フィルム  
                  コニカMGタイプ

## 結 果

### 1. 特性曲線の比較

図2はレギュラーシステムのT・スケール法とI・スケール法との特性曲線を示す。特性曲線は2曲線の形状を比較するために濃度1.2の点で交差させた。両曲線を比較すると、I・スケール法に比較してT・スケール法の曲線がグラジエントが低いことを示している。

相反則不軌係数を考慮した露光量は

$$E = I \cdot t^p \quad (1)$$

で表される。

したがって、特性曲線上で露光量  $\Delta E$  の増加に対する濃度  $\Delta D$  の上昇の関係は

$$\begin{aligned} \Delta D &= G \cdot \log \Delta E \\ \Delta D &= G \cdot \log \Delta I + G \cdot \log \Delta t^p \end{aligned} \quad (2)$$

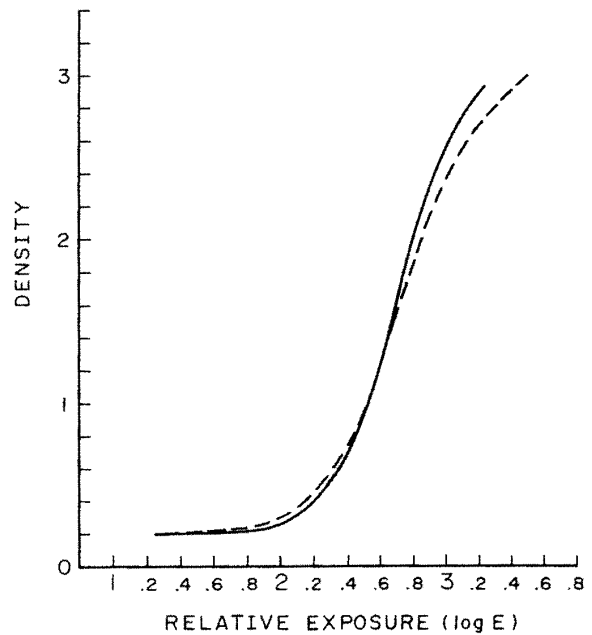


図2. 強度目盛法(実線)と時間目盛法(点線)による特性曲線

であり、I・スケールでは時間  $t$  が一定であるから  $t=1$  とすれば

$$\Delta D = G \cdot \log \Delta I \quad (3)$$

となり、 $G$  はI・スケールのグラジエントを示し、同様にT・スケールでは  $I=1$  であり

$$\Delta D = p \cdot G \cdot \log \Delta t \quad (4)$$

となり、相反則不軌係数  $p$  は一般に  $p < 1$  であるから、T・スケールのグラジエントは  $p \cdot G$  となりI・スケールより低い値を示す。

また、逆にT・スケールのグラジエントを  $G$  とするためには、

$$\Delta D = G \cdot (p \cdot \log \Delta t) \quad (5)$$

とし、露光軸を  $p \cdot \log t$  で目盛ればI・スケール曲線に一致する。したがって

$$T-I \text{ 変換: } \log I = p \cdot \log t$$

$$I-T \text{ 変換: } \log t = (\log I) / p$$

により、相互変換が可能となる。

図3は次項で得た  $p$  値 (0.8) を使用して、図2の相互変換を行った結果である。

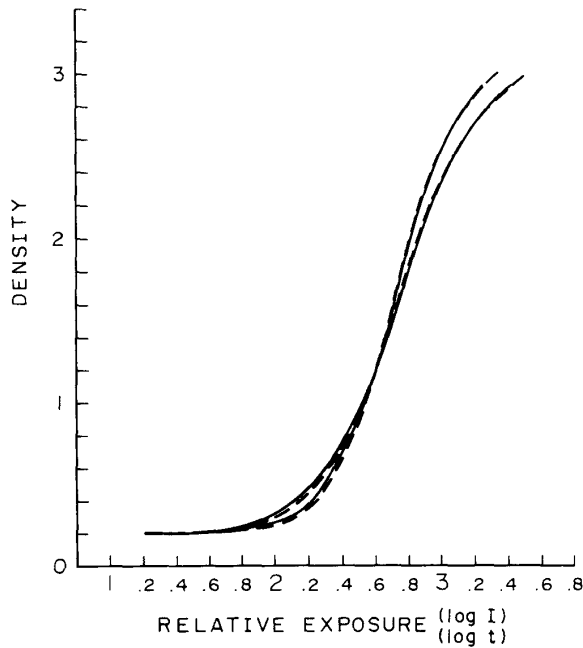


図3. 強度目盛法（実線）と時間目盛法（点線）の相互変換

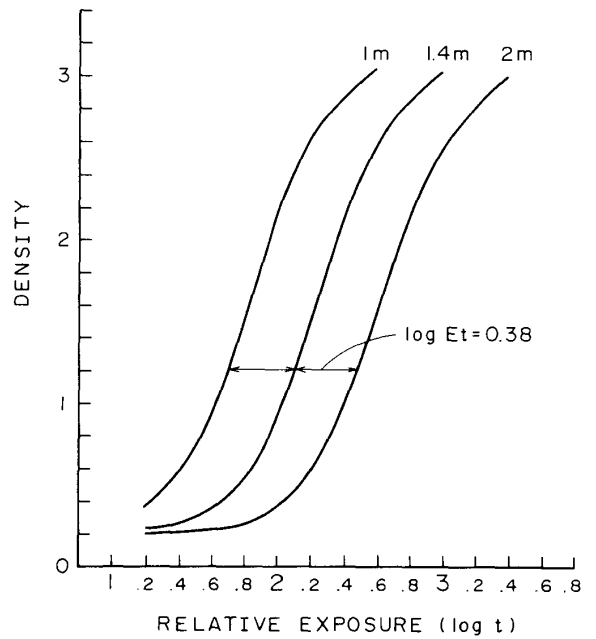


図4. 1 m, 1.4 m, 2 m における時間目盛法の特性曲線

### 2. 相反則不軌係数の算定

図4は距離1 m, 1.4 m, 2 m の点で  $T$ ・スケール法による特性曲線である。3 曲線は、それぞれ  $\log t$  軸で 0.38 の間隔となっている。

同一濃度を生じるために、相反則不軌係数を考慮した露光量  $E$  は一定であるから、 $E=1$  とすれば

$$-\log I = p \cdot \log t \quad (6)$$

となり、各距離での X 線強度は  $1/2$  であり、 $\log I = -0.3$  に対して  $\log t = 0.38$  となっている。したがって相反則不軌係数  $p$  は

$$p = 0.3 / 0.38 = 0.8$$

となる。

### 3. 間欠露光（くり返し曝射）法の写真効果

くり返し曝射法（以下、 $n$  法）は同一強度と時間条件で、 $n$  回、加算的に露光を行う方法である。 $n$  法の最も単純なものは、2 回のくり返し曝射であり、ブートストラップ法などで、しばしば使用される手法の一つである。図5は  $T$ ・スケール法で1回、2回および4回くり返し曝射を行った特性曲

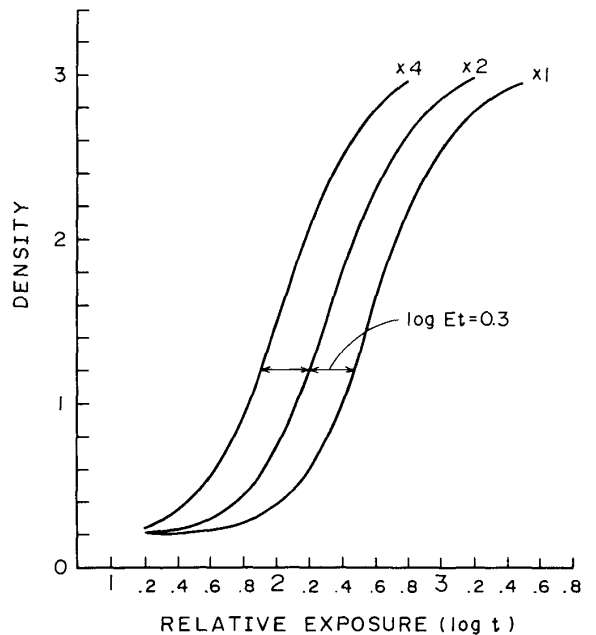


図5. くり返し露光による時間目盛法の特性曲線

線であり、各曲線の  $T$ ・スケール上での間隔は  $\log t = 0.3$  であり、 $T$ ・スケール法と等価であることを示している。

図6は距離法の各位置で1回曝射と2回のくり返し曝射を行ったもので両曲線の間隔は  $\log I =$

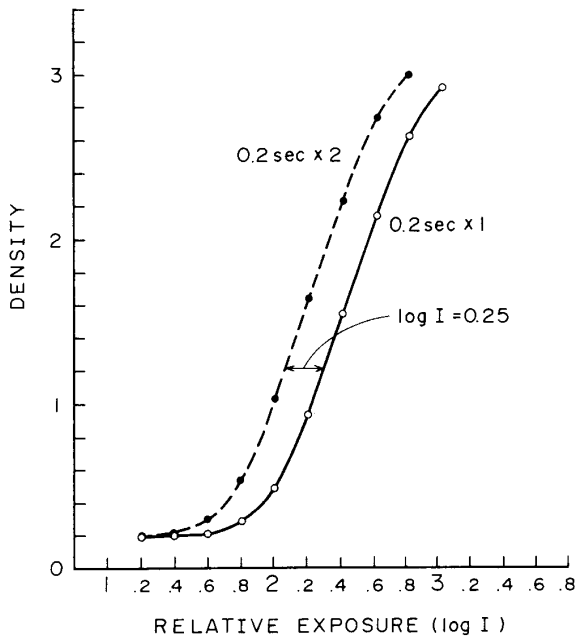


図6. くり返し露光(点線)による強度目盛法の特性曲線

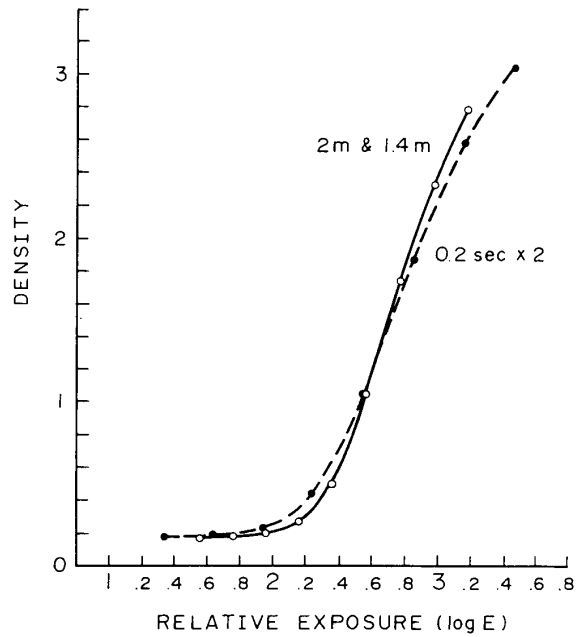


図7. 距離(実線)とくり返し露光(点線)によるブートストラップ法の特性曲線

0.25であり、 $n$ 法にたいする相反則不軌係数の存在が考えられる。

したがって、くり返し曝射における露光量は

$$E = (It^p) \cdot n^p \quad (7)$$

で表され、前述と同様に同一濃度で比較すれば

$$-\log I - p \cdot \log t = p \cdot \log n \quad (8)$$

であり、 $t$ は一定であるから $t=1$ とし、また、 $n=2$ でシフトする $\log I$ は $-0.25$ なので、くり返し曝射に起因する相反則不軌係数 $p$ は

$$p = 0.25 / 0.3 = 0.83$$

となり $t$ に関する係数と同様な値となった。

したがって、 $n$ 法を含めた関係式は

$$E = I \cdot (nt)^p \quad (9)$$

となり $n$ 法は $T$ ・スケール法に含めることができる。

#### 4. ブートストラップ法における露光法の比較

図7は、ブートストラップ法を2回のくり返し曝射で行った場合と距離を変化させて得た特性曲

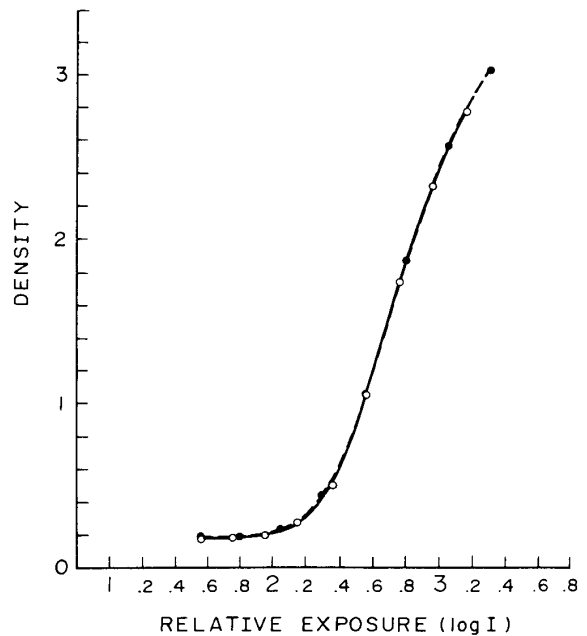


図8. くり返し露光ブートストラップ法の特性曲線の $p$ 係数による補正

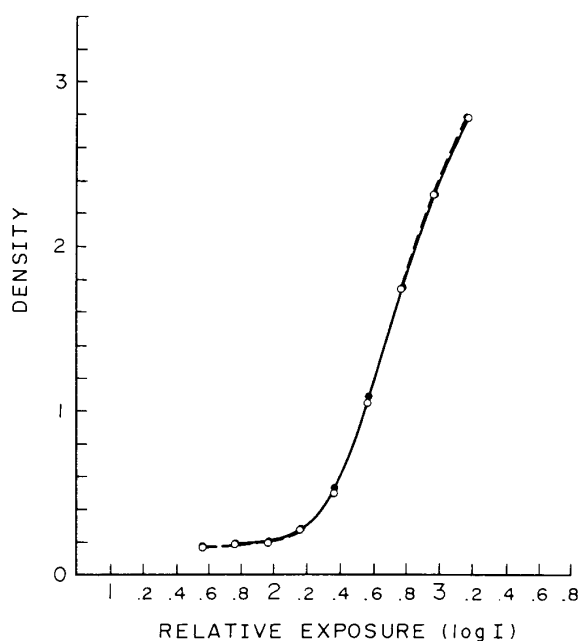


図9. 距離ブートストラップ法(点線)と強度目盛法(実線)との特性曲線の比較

線の比較を示す。距離を変化させた場合に比較して、くり返し曝射による特性は低いグラジエントを示した。この相違の主な因子は $p$ 係数によるものと考え、2回曝射による露光効果を $\log E=0.3$ とせず、 $p$ 係数補正を行って、 $\log E=0.25$ ステップで作図した結果、図8に示すように両曲線は一致した。また、図9は距離によるブートストラップ法と $I$ ・スケール法の比較を示すもので、両曲線はほぼ完全に一致した。

## 考 察

写真の感光材料は化学工業製品として提供されるが、その品質を含め、その評価には数多くの因子が含まれる。現像処理系もその一つであり、処理液の新旧、液温変動など写真計測の再現性を困難にしている。

しかし、実用的な使用範囲での特性の把握は、放射線写真技術上の重要事項であり、この計測に誤差を生じる基本因子を追求する必要がある。

相反則不軌現象も基本因子の一つであり、時間目盛法と強度目盛法の不一致の原因となっている。

この現象はSchwarzschildによって発見され<sup>7)~9)</sup>、X線写真としても現在まで数多くの報告がなされている。しかしこれまでの報告では誤差の原因として定性的な指摘がなされているのみで定量的な報告はない。この定量化を困難にした原因はX線量を正確に時間制御することが困難であったからである。X線発生装置のタイマーは計測用として使用するには精度、正確度に問題があり、また時間設定範囲が狭く、ステップ数も少ない。さらにX線の開閉に伴う立ち上がり誤差や高圧ケーブル容量による遮断遅延などがあり、時間法の実施を困難にしてきた。

われわれが今回試作した回転セクター型時間法は連続照射のX線をセクター長のみで時間制御を行うので、X線の投入および遮断誤差はなく時間の間隔設定も任意に設計できる。

この方法での問題点は照射X線の安定性、セクターの精度、ストロボ効果さらにフィルムの回転精度である。X線の安定性はmA計でモニタすることが可能であるが、交流安定化電源の使用が望ましい。セクターの製作は最も重要な要素であるが、この作図にはコンピュータを使用し、鉛板をカッターによる手法で行ったが、製作後、密着X線写真で精度を確認した。ストロボ陰影は狭スリット域で単相X線で発生し易い。しかし、本測定条件は1.5 mAの低管電流であるため脈動率が低く、またフィルムは低速回転であるから積分効果によりストロボの発生は無視できた。

相反則不軌係数は有効露光量 $E=It^p$ の関係から強度 $I$ をパラメータとした時間目盛特性から算出した。このセクターでの時間設定は表1の示すごとく0.17-28秒まで可能であり、特性曲線の作図範囲での相反則不軌現象の検出には充分であるが、さらに高速回転によるmSec.オーダーでの $p$ 係数をも確認する必要がある。この場合、大電流で定出力のX線発生装置が必要となる。

強度を距離によって、1 mから1.4 mにすることで、 $I$ を1/2倍にした場合、もし相反則不軌現象がなければ、時間目盛 $\log t$ 軸で0.3右方向に平行移動するが、試料フィルムでは0.38移動している。これは強度変化による写真効果が、時間変化

による写真効果より大きいことを意味し、相反則不軌現象の存在を示唆している。

この試料フィルムでの相反則不軌係数  $p$  の算出は (6) 式より 0.8 を得たが、これはフィルムの種類により異なる。同様の測定をオルソフィルム (コニカ MG) について行ったが、 $p$  係数は 0.9 と低い値を示した。

相反則不軌係数に影響する因子としては乳剤の種類、環境温度、現像処理などが指摘されている。しかし、実用状態における学生実験での経年観察でも、 $p$  係数は現像による影響は少なかったが、系統的な検討が必要と思われる。

本来、長時間の露光を必要とする天文写真では相反則不軌現象が重要であり、これをなくすためにフィルムを、環境温度をはるかに下まわる  $-30^{\circ}\text{C}$  程度に冷却する手法が常用されているが、X線作業環境での温度変化は無視できるものと考えられる。

くり返し曝射による露光法は撮影実技よりも計測上でしばしば使用される。ブートストラップ法はその代表的な適用例であり、その他時間軸の拡張やスリット法による MTF 測定のための倍数露光法にも使用される。

間欠露光法による写真効果については、古く Webb によって指摘され、分割数や露光周期などが影響すると言われている<sup>7)~9)</sup>。しかし、X線写真におけるこの現象に関する定量的な報告はない。X線写真の露光条件には多くの因子があるので、正確な倍数露光法の手段として同一条件を繰り返す方法が使用されてきた。最も単純な繰り返し露光は2回曝射であるが、この場合でも図6に示すように明かな写真効果の低下が見られる。しかし、この現象は時間における相反則不軌係数と同一値を示すので露光量  $E$  は  $I \cdot (t \cdot n)^p$  となり、この場合、間欠現象はなく、単に時間の延長であることを意味する。すなわち、時間軸については時間とくり返し数は相反し、時間軸の拡張も容易である。逆に、強度目盛においてはくり返し因子を混合してはならないことを意味する。

ブートストラップ法はコダック社で開発されたものである<sup>6)</sup>。この原理はアルミ階段で得られた

濃度から定量的な特性曲線を作図するためのもので、このため正確な露光比で曝射された2枚の写真より作図される。この露光比は横軸を目盛る基準となるもので、他の因子を含まないように2回曝射が適用され、単位目盛を  $\log E = 0.3$  とした。しかし、くり返し露光は図6に示すように、強度法より写真効果が低いので強度法曲線とは一致せず、時間目盛法と一致する。したがって、露光比を距離を変化させて強度比で行い、単位目盛とすれば、図9に示すように強度法の特性曲線と一致する。しかしながら、この相違はそのフィルムの相反則不軌係数によるものであり、いずれの曲線からでも  $p$  値により、相互変換が可能である。

## 結 論

スクリーン/フィルムシステムの特性曲線において、 $I$ ・スケール法と  $T$ ・スケール法のグラジェントが異なる因子は相反則不軌現象が支配的であった。この  $p$  係数の定量法には、次の3法がある。

- 1) 距離法の各段でくり返しによる倍数露光を行い、各曲線間の間隔より算出する。
- 2)  $T$ ・スケール法で距離を変化させ、曲線間の間隔より算出する。
- 3) ブートストラップ法をくり返し法と距離法で行い、 $p$  係数を変化させて作図し、2曲線が一致する  $p$  値を求める。

この相反則不軌係数を使用して、 $I$ ・スケール法と  $T$ ・スケール法の相互変換が可能であった。

今回は、実用時間範囲で  $p$  係数は定数として扱えたが、今後高輝度の短時間域での  $p$  係数を確認するため、フィルムを高速回転できる  $T$ ・スケール装置を開発し、高輝度での相反則不軌現象を解析する。

## 文 献

- 1) 山下一也, 山本義憲, 粟井一夫ほか: 増感紙フィルムの X 線センシトメトリーについて, 日放技会誌, **40**, 59-78, 1984
- 2) 藤田広志, 浜島一夫, 掘口和裕ほか: 放射線受光

- 系における相反則不軌特性, 放射線像研究, **7**, 18-23, 1977
- 3) 藤田広志, 内田 勝: 希土類増感紙—オルソシステムの相反則不軌特性, 放射線像研究, **10**, 30-37, 1980
  - 4) Hiroshi Fujita and Suguru Uchida: A New Development in the Method of Measurement of Reciprocity-Law Failure and Application to Screen/Green-Sensitive X-ray Film Systems, *Jpn. J. Appl. Phys.* **20**, 227 -231, 1981
  - 5) 吉田 彰: ブートストラップ法, インナービジョン, **3** 30-33, 1988
  - 6) Sensitometric properties of X-ray films. Rochester NY., Radiography markets division, Eastman Kodak Co. 1963, p 27
  - 7) T.H. James: The Theory of the Photographic Process, Macmillan, New York, 4th ed, 1977, p 134
  - 8) B.H. Carroll: Introduction to Photographic Theory, John Wiley & Sons, New York, 1980, p 137-147
  - 9) 日本写真学会編: 写真工学の基礎 (銀塩写真編), コロナ社, 東京, 1980, p 6-13