

報 文

ピンホールカメラによる画像再現

——ピンホール口径の最適な大きさ——

浜松職業訓練短期大学校* 新野 信夫

Image Reproduction by Pinhole Camera
——Optimum Size of Pinhole Aperture——

Nobuo Shinno

要 約 レンズの代わりに小さなピンホールを用いて画像の形成を行うピンホールカメラは、最も単純なカメラであり、その原理は古くから知られている。しかし、一般の撮影に利用されることはほとんどなく、その画像の再現性についてもあまり知られていない。ピンホールカメラにおける画像の再現性に最も影響を与える因子にはピンホール口径の大きさと像距離があり、これについての理論式が提案されている。これは、光の回折現象によりピンホール口径の大きさには最適な大きさが存在することを示すものである。本報は、ピンホールカメラのピンホール口径の大きさが画像の再現性に与える影響について解像力を基に調べた結果を述べ、ピンホール口径の最適な大きさが像距離に応じて存在することを実験により確認し、その理論式の適用性について報告するものである。また、理想レンズを用いたときに得られる理論上の解像力の限界とピンホールカメラで得られた実際上の解像力とを比較し、さらに、実際にピンホールカメラで撮影して得られる結果についても報告する。

I. はじめに

現在のカメラは高度に電子化され、自動露出や自動焦点調節機構を搭載し、誰でも簡単に失敗なく写真撮影ができるようになったが、原理的な基本構造は写真の発明当時の150年前と何ら変化していない。カメラの原形は写真の発明される以前に絵を描く際の写生道具として用いられたカメラオブスキュラ(camera obscura)で、レオナルド・ダビンチによって発明された。当初、カメラオブスキュラはピンホール(針穴)による結像を利用したものであったが、後にレンズを用いるようになり、ニエプス(Joseph Nicéphore Niépce)やダゲール(Louis Jacques Mandé Daguerre)の写真術の発明とともに今日のカメラへと発展したものである。したがって、ピンホールカメラはカメラの原点ともいえるが、画像の鮮鋭度が悪く、露光時間が非常に長いなど、普通のカメラに比べて欠点が多く、一般的な分野での実用性は極めて低い。しかし、被写界深度が大きく、画像に歪曲や像面

湾曲がなく、画角の大きい写真も比較的簡単に撮影できる長所もあり、また、X線などの放射線でも画像が得られるなど特殊な分野では利用されている。

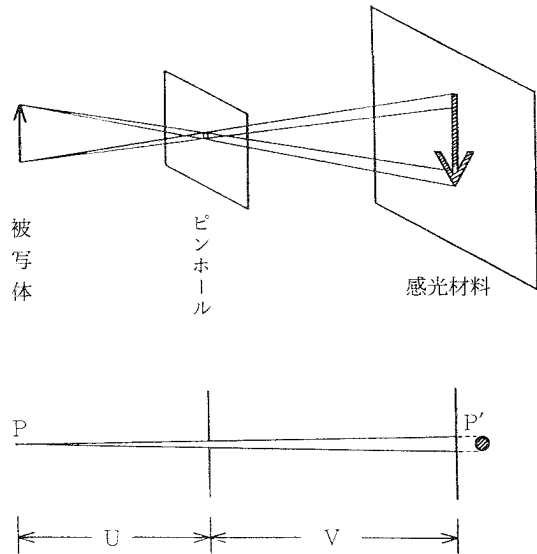


図1 ピンホールカメラの像形成
(U: 被写体距離, V: 像距離)

論文受付日 1990.1.17

* 現在 群馬職業訓練短期大学校

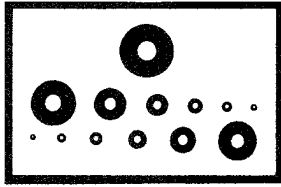


図2 ハウレット型解像力テストチャート

ピンホールカメラは図1に示すように光の直進性を利用して像形成を行うもので、物点Pからの光はピンホールを通過して感光材料に達し、P'のボケた像となり、面積を持った錯乱円ができる。この錯乱円の大きさはピンホールの口径と像距離(レンズの焦点距離に相当)で決まり、幾何光学的にはピンホールの口径が小さいほど鮮鋭な像が得られることになるが、あまり小さくし過ぎると円形開口による回折が生じ、像の広がりが大きくなる。したがって、ピンホールの口径には錯乱円P'を最小にする最適の大きさが存在することが分かる。

ピンホールの最適口径を求める式は、これまでに種々提案されており、Nebletteによれば、

$$D = \sqrt{2 \lambda V} \quad (1)$$

で示されている⁽¹⁾。ここに、Dはピンホールの直径、λは光の波長、Vは像距離(ピンホールと感光材料の距離)を表す。この式は、回折理論と幾何光学の観点から導き出された近似式である。

また、フレネル回折理論より得られるゾーンプレート

の中心の明るい開口である第1輪帯の直径より、

$$D = 2 \sqrt{\lambda V} \quad (2)$$

が示されている^{(2),(3)}。なお、(2)式で得られる値より20~30%小さい方が実際にはよいとされている⁽³⁾。

これまでのピンホールカメラに関する研究報告は上記のようにピンホール口径の最適な大きさを求める式について理論的に考察したものが多く、実際の実験により定量的に画像の再現性を調べたものがないように思われる。そこで、本報では上記の計算式が実際に適用できるかどうかを、解像力により調べた結果について報告する。

II. 実 験

ピンホールカメラの像距離は100mm、150mm、200mmおよび250mmの4段階とし、ピンホールは表1に示したように直径が0.251mmから1.04mmまでの12種類のものを用いた。解像力は、ブルーフラッドランプ(色温度5500K)で照明したハウレット(Howlett)型解像力テストチャート⁽⁴⁾(図2)を撮影して、その解像力を調べた。その他の撮影条件は表2の通りである。なお、この露光時間は、フィルムの低照度相反則不軌特性を補正するため、1.2~2.5倍の範囲で時間を増加したものである。解像力の測定は、ライトテーブルに撮影したネガを置き、4倍のルーペで観察して行った。各々の像距離における撮影倍率は、像距離が100mmおよび150mmのとき0.325倍、200mmのとき0.324倍そして250mmのとき0.326倍であった。

表1 ピンホールの種類および各像距離における有効Fナンバーとその露光時間

ピンホールの種類		像距離 : 100mm		像距離 : 150mm		像距離 : 200mm		像距離 : 250mm	
No.	直径 (mm)	有効Fナンバー	露光時間(秒)	有効Fナンバー	露光時間(秒)	有効Fナンバー	露光時間(秒)	有効Fナンバー	露光時間(秒)
1	0.251	398	58	598	131	797	388	996	605
2	0.313	319	37	479	84	639	250	799	390
3	0.373	268	26	402	59	536	105	670	275
4	0.385	260	25	390	56	519	99	649	258
5	0.410	244	22	366	49	488	87	610	137
6	0.455	220	18	330	40	440	71	549	111
7	0.477	210	16	314	36	419	65	524	101
8	0.503	199	15	298	33	398	59	497	90
9	0.634	158	8	237	20	315	36	394	57
10	0.776	129	5	193	13	258	24	322	38
11	0.847	—	—	177	11	236	21	295	32
12	1.04	96	3	144	7	192	13	240	21

表2 撮影および現像条件

チャートの照明	フルフラットランプ(500W)を左右から各2灯 (EV値で12になるように距離を調整)
カメラ・ボディ	トヨ・ビュー45F
フィルム	コダックT-MAX400プロ 4053 (感度はISO320に設定)
現像	コダックHC-110 (B希釈) 20℃, 8分30秒

III. 実験結果および考察

1. ピンホールの最適口径

ピンホールカメラにおいて像距離に応じてピンホールの最適口径が存在することを確認するために、撮影解像力を評価基準として画像の再現性を調べる実験を行った。

各々の像距離におけるピンホールの直径と撮影解像力の関係を図3～図6に示した。各々の像距離においてピンホールの口径を徐々に大きくしていくと解像力は次第に高くなり、ある大きさのところで極大値に達し、それ以上大きくしても解像力は低下している。このことは、ピンホールカメラにおける最適口径の存在を示すものである。したがって、最適口径よりピンホールが小さい場合、幾何光学上の錯乱円は小さくなるが、回折現象による像の広がりが大きくなって解像力はかえって低下し、像の鮮鋭度も悪くなることが確認できた。

それぞれの像距離において最も高い解像力を示したピンホールの直径(最適口径)は、像距離が100mmのとき0.344mm、150mmのとき0.429mm、200mmのとき0.471mmおよび250mmのとき0.513mmであった。これは、像距離が短いほど最適のピンホールの大きさが小さくなることを示している。したがって、最適口径における解像力は像距離が短いほど高くなると予想されるが、つぎに示す実験結果からもそれが裏付けられた。すなわち、最適口径における解像力は、像距離が100mmのとき3.35 (lines/mm)、150mmのとき3.31 (lines/mm)、200mmのとき2.91 (lines/mm) および250mmのとき2.70 (lines/mm) であった。

さらに、像距離が短いほどピンホールの直径と解像力の関係を示す曲線のピークが急になり、像距離が長くなるとピークがなだらかになることも分かった。これは、像距離が短くなるにつれて最良の画像の得られるピンホー

ルの大きさの許容範囲が狭くなることを示している。

2. 最適口径を求める計算式の適用性

本実験で用いたピンホールは完全な真円ではなく、口径の直径が部分的に変化しているところがあり、実験で得られた値にはこの誤差が含まれる。ピンホールの最大直径の部分が、解像力に及ぼす影響が大きいと考えられるので、本実験に用いた各像距離における最適口径に近いピンホールの平均直径に対する最大直径の割合を誤差として表し、表3に示した。表4はこれを基に実験値を補正し、計算式で得られる値との比較をし、その適用性を見たものである。これから、(1)式で得られる値と本実験で得られた値(修正値)とはほぼ一致し、その誤差は-0.55%~+4.72%の範囲内であった。しかし、像距離が150mmのとき、修正値と(1)式で得られる値との誤差が4.72%と他の像距離に比べてやや大きくなっている。これは、ピンホール製作上の誤差が現れたものと考えられ、前記の直径誤差に加えて、円周上の一部に直線部分があり、スリット開口による影響がたものと思われる。これがなければ、修正値と(1)式との誤差はもっと小さくなるものと考えられる。また、(2)式の70~80%の値ともかなり一致することが分かったが、(2)式そのものの適用性は否定された。(1)式と(2)式では、式そのものの基本部分は同じで、係数部分が異なるのみであり、

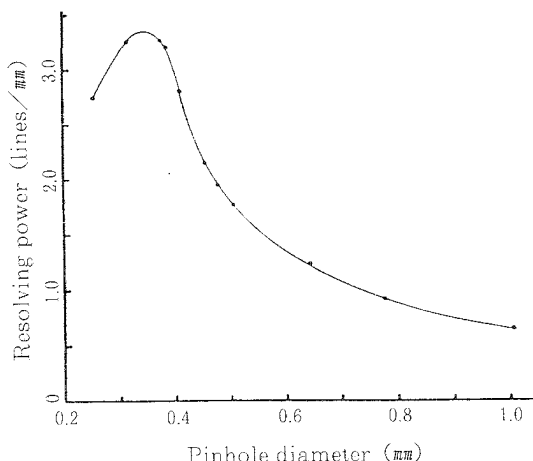


図3 像距離100mmにおけるピンホールの直径と撮影解像力の関係

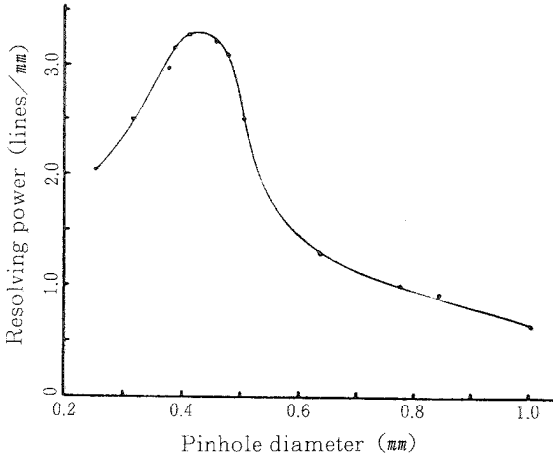


図 4 像距離150mmにおけるピンホールの直径と撮影解像力の関係

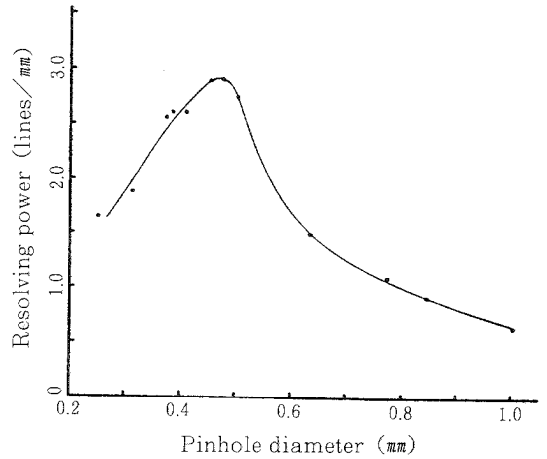


図 5 像距離200mmにおけるピンホールの直径と撮影解像力の関係

(2)式の70.7%は(1)式と一致する。

したがって、ピンホールカメラにおけるピンホールの最適直径は、(1)式により計算することができるといえよう。なお、次節(3)式に示すように解像力は、光の波長が長波長になるほど低下し、実験値もこれに影響されると考えられるので、計算式に用いる光の波長は、使用フィルムの分光感度を考慮し、600nmとした。

3. 理想レンズの理論的解像力と実験により得られたピンホールの解像力

収差の全くない理想レンズの理論的解像力は、Rayleighにより

$$R = 1 / 1.22 \lambda F \quad (3)$$

ここに R : 解像力(lines/mm)

λ : 光の波長(mm)

F : レンズのFナンバー (焦点距離を口径で除した数)

で与えられており、⁽⁵⁾本実験で最も高い解像力が得られたピンホールの有効Fナンバーをもつ理想レンズの理論的解像力をこれより求め、表5に示した。理想レンズを用いても、Fナンバーを数百まで絞って撮影すると1桁台の解像力しか得られないことになり、ピンホールカメラで得られる解像力と極端な差異はないように思われる。したがって、最適な大きさのピンホールをもつピンホールカメラで形成される画像は、理論的に再現可能な解像力の限界近くまで再現されているといえよう。

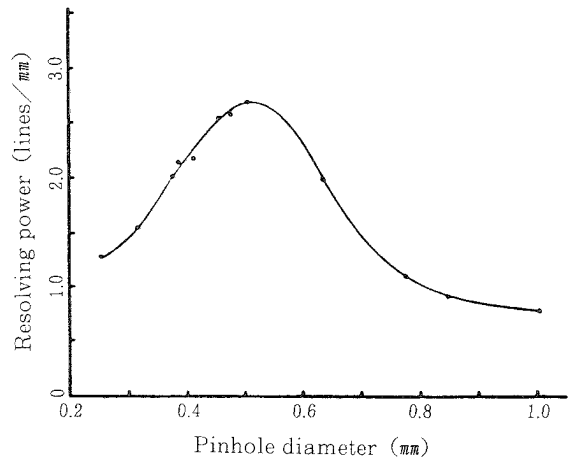


図 6 像距離250mmにおけるピンホールの直径と撮影解像力の関係

表 3 本実験に用いたピンホールの平均直径に対する最大直径の誤差

像距離 (mm)	ピンホールのNo.	平均直径 (mm)	最大直径 (mm)	誤差 (%)
100	3	0.373	0.384	2.95
150	5	0.410	0.424	3.41
200	6	0.455	0.468	2.86
250	8	0.503	0.534	6.16

ピンホールカメラによる画像再現

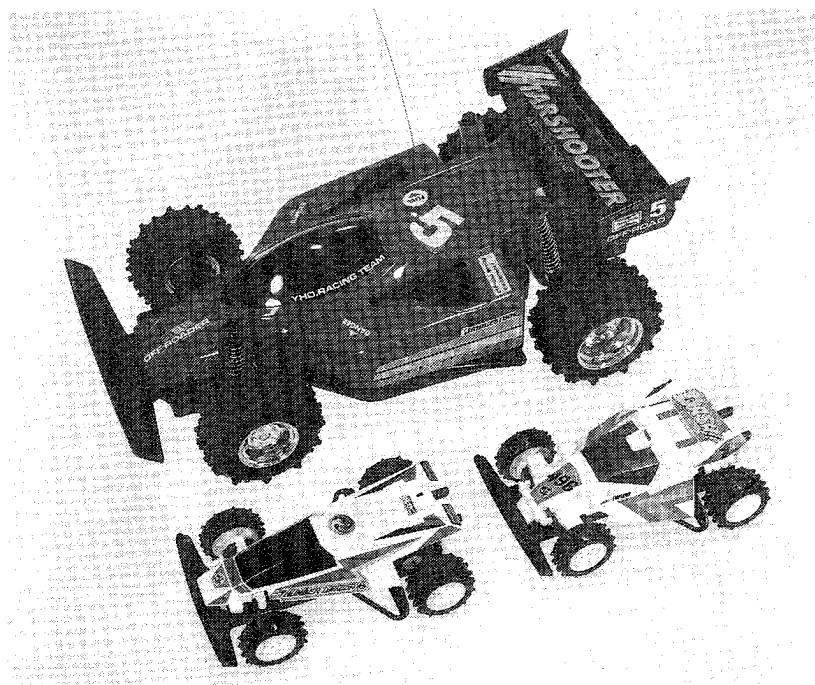


図7 レンズ（フジノンW1 : 6.5/150）露光F64, 1秒

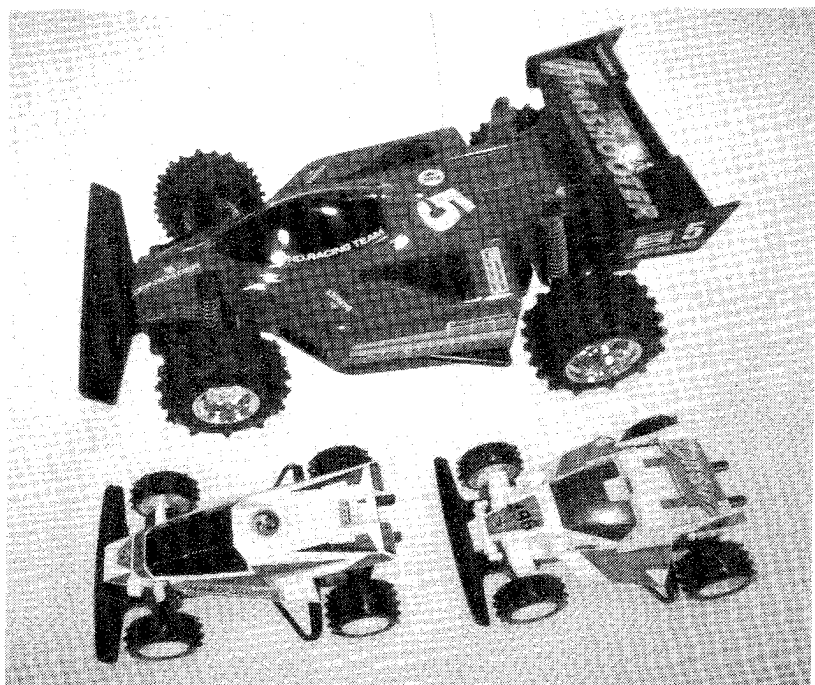


図8 像距離100mm, ピンホールの直径0.313mm
有効Fナンバー319, 露光37秒

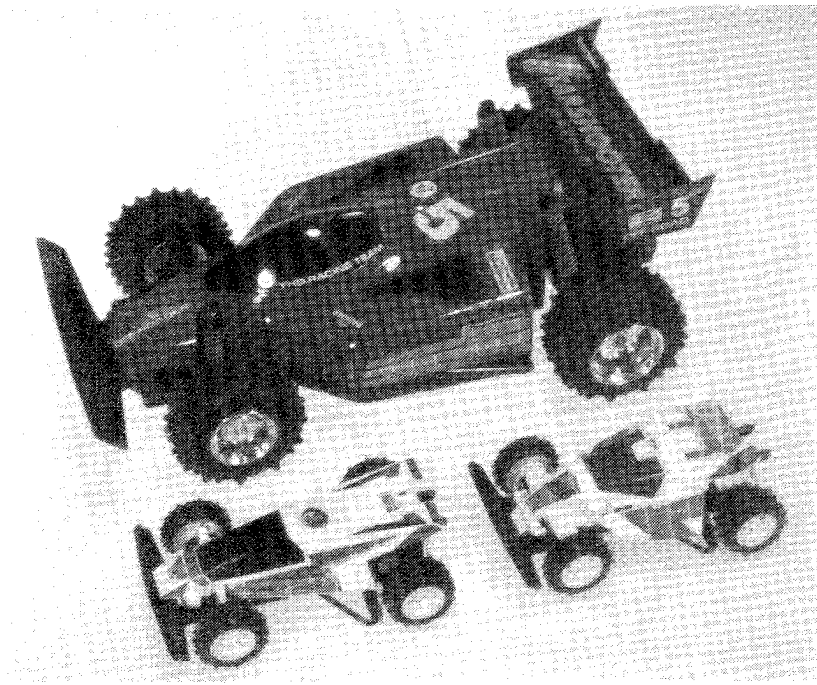


図9 像距離250mm, ピンホールの直径0.503mm
有効Fナンバー497, 露光1分30秒

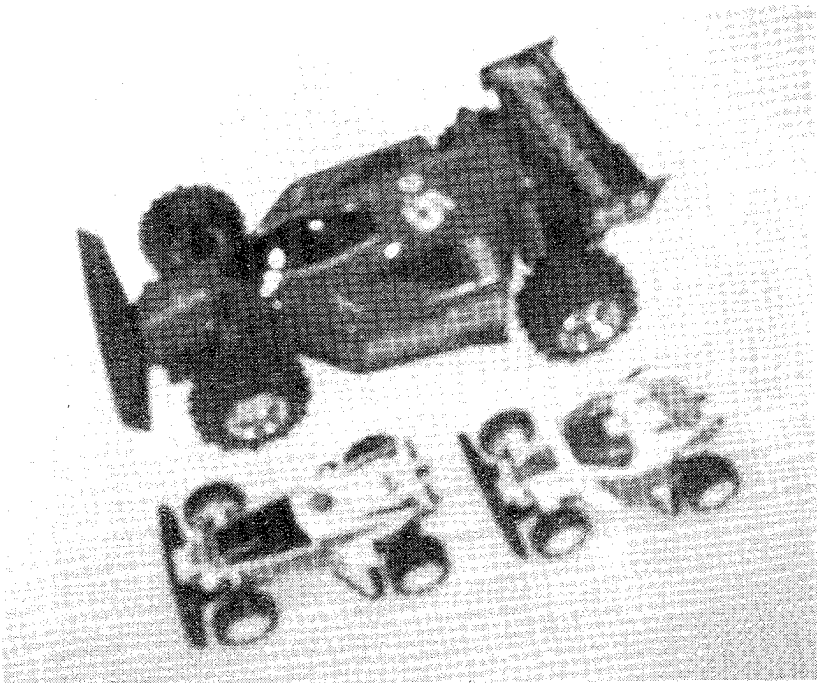


図10 像距離150mm, ピンホールの直径1.04mm
有効Fナンバー144, 露光7秒

表4 最適なピンホールの口径

像距離 (mm)	最適なピンホールの直径 [*] (mm)					(1)式で得られる値に対する許容範囲の割合(%)
	実験値	修正値 ^{**}	(1)式	(2)×0.8	(2)×0.7	
100	0.344	0.354	0.346	0.392	0.343	+2.31
150	0.429	0.444	0.424	0.480	0.420	+4.72
200	0.471	0.485	0.489	0.554	0.485	1.02
250	0.510	0.545	0.548	0.620	0.543	-0.55

*) λ:600nm, **) 表4に基づいて実験値の誤差を修正した値

表5 理想レンズの理論的解像力

像距離 (mm)	fナンバー	理想レンズの 理論的解像力 [*] (lines/mm)	実験により得られた 撮影解像力 (lines/mm)
100	291	4.69	3.35
150	350	3.39	3.31
200	425	3.21	2.91
250	487	2.81	2.70

*) λ:600nm

4. レンズとピンホールにより形成される画像

レンズを用いて通常の絞り値で撮影したものの解像力は、ピンホールカメラの解像力より1桁以上高い値を示し、図7のようにシャープでコントラストのよい画像を形成する。一方、ピンホールカメラにより得られる画像は、図8～図10に示したように画面全体がソフトでコントラストのやや低い独特な表現となり、レンズの鮮鋭な画像とはひと味違った雰囲気の写真が得られる。また、ピンホールカメラの像距離が短くなるにしたがって鮮鋭度がよくなっており(図8と図9参照)、前記の解像力の測定結果とも一致する結果が得られた。これより、ピンホールカメラで一般的な写真撮影を行う場合は、像距離の短い、つまり、画角の広い(広角の)写真の撮影が適していることが分かる(露光時間も短くなるという付随的な利点もある)。なお、図10は像距離が150mmで、本実験に用いた最も大きい口径のピンホール(直径1.04mm)を用いて撮影したもので、細部はほとんど再現されておらず、最適な口径に近いピンホールで撮影した図8および図9との差は明らかであろう。

IV. まとめ

ピンホールカメラに用いるピンホールの口径には最適な大きさが存在し、その大きさを求める理論式の実際の適用性について、主として解像力の観点から調べた結果、ほぼ(1)式を満足することが分かった。

また、像距離が短いほど最適なピンホールの大きさが小さくなり解像力は高くなると予想されるが、実験結果からもそれが裏付けられ、実際に撮影した写真の鮮鋭度を見ても同様の結果が得られた。

さらに、像距離が短くなるにつれピンホールの直径と解像力の関係を示す曲線のピークが急になり、最良の画像の得られるピンホールの大きさの許容範囲が狭くなることが分かった。

また、Rayleighの回折限界より求められる無収差の理想レンズの解像力と実験により得られたピンホールの解像力の比較から、最適な大きさのピンホールによって形成される画像は、再現可能な限界に近い再現性を示すことも分かった。

V. おわりに

これまでの写真科学あるいは画像工学の学生実験においてピンホール写真を制作する実験を行ってきた。この実験は、カメラの原理や光の性質および感光材料の特性(光の直進性、光の波動性、照度、有効fナンバー、露光量、相反則不軌など)を総合的に考え、科学的に実験を進めなければよい結果が得られない。また、これは、自分で手作りした非常に簡単なカメラから比較的良好な写真が得られることから、学生に写真への好奇心や興味をもたせることができ、学生の積極的な取り組みが期待できる実験である。したがって、ピンホール写真を制作する実験過程を通して、必然的に写真に関する知識や技術が修得できる点において評価できる実験である。これまでも、回折理論より得られる理論式通りのピンホール口径を用いて実験を行い、比較的良好な画像を得ていたが、今後の学生実験にこの成果を生かし、より充実した実験が行えるものと考えている。

最後に、本報をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた九州産業大学・斉藤光範助教授に感謝致します。

参考文献

- (1) C.B.Neblette, "Photography—Its Materials & Processes", D.Van Nostrand, New York (1962), p.55.
- (2) 鶴田匡夫, 「純光の鉛筆—光技術者のための応用光学—」, 新技術コミュニケーションズ (1988), p.196.
- (3) 辻内順平, 「光学情報処理」, 朝倉書店 (1974), p.46.
- (4) 例えば
菊池貞一ほか編, 「科学写真便覧 中巻」, 丸善 (1959), p.452.
小瀬輝次, 「写真レンズの性能評価(Ⅰ)」, 日本写真学会誌, 40 (1977), p.255. など
- (5) 例えば
林 一男, 久保島 信, 「写真技術講座 カメラ及びレンズ」, 共立出版 (1955), p.217.