

Lens Shutter 機構の理論的・実験的解析

(第 2 報)

—Prontor Type Shutter に就いて—

市 川 誠 *

信州大学工学部 機械工学教室

1956年10月15日受理

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE LENS SHUTTER MECHANISM (2nd Report)

— ON THE PRONTOR TYPE SHUTTER —

Makoto ICHIKAWA

(Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

Received ; october 15. 1956

Synopsis Author intended to study the theoretical as well as the experimental analysis of motion on the Prontor type shutter, one of the three types of lens shutters, and divided the motion into three strokes—the opening stroke, the full opened stroke and the shutting stroke.

The equations of motion in each stroke are obtained and solved under the initial and boundary conditions of motion. The results thus obtained from the theoretical analysis are compared with those of actual experiments by the use of apparatus specially devised by the author and it becomes clear that the motion of this type shutter is in agreement with those theoretically calculated.

1 序 言

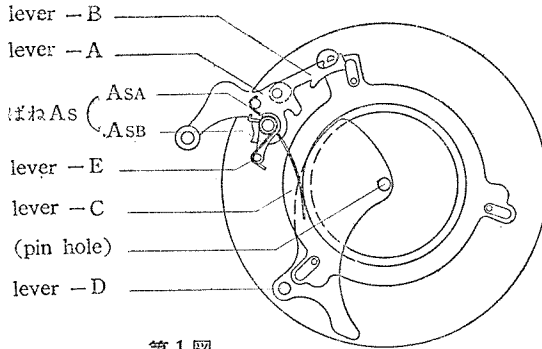
前報⁽¹⁾⁽²⁾に引続いて本報⁽³⁾においては、lens shutter 型式の中 Prontor 型に就いての解析結果を報告する。この型は lens shutter 中最も普及されており種類も多いが、普通の3枚羽根について解析した。この shutter は一般に、 $1 \sim 1/200$ sec. 8種の称呼露出機構を有するものであるが、ここでは $1/100$ sec. 及び $1/200$ sec. 機構について述べる。

なお、本解析進行中に、新しく高感度フィルム(例えば国産3S級等)が市販されるよ

* 信州大学助手

うになり、shutter の高速且つ正確性は益々要求されることとなつた。本報告がそのために、いささかなりとも貢献出来れば幸甚である。

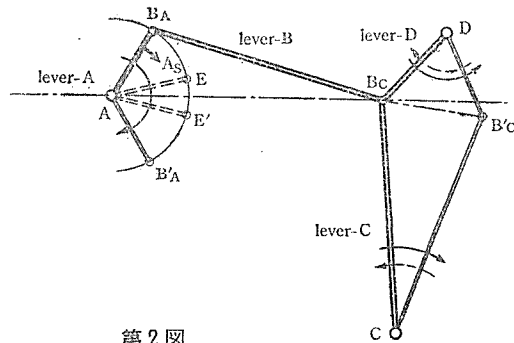
2 機構と動作



第1図

機構の大略を理解し易いように簡単に図示すると第2図の如くなる。

lever-A が所謂 set lever で起動すると A を中心として A_s のばね力により矢印の方向に回転し、lever-B は B_A において lever-A に、 B_C において lever-C 及び lever-D に pin joint されているので、lever-A が AB_A から AB'_A まで回転する間に、lever-D は D を中心として B_C , B'_C 間を往復回転して露出羽根の開閉が行われることになる。



第2図

以上の動作は lever-D 即ち露出羽根の運動を中心に考えて行くと、次の3行程に大別される。

1. lever-A が AB_A から AE まで回転する。この間に lever-B を介して B_C は B'_C へ来て、lever-C 及び lever-D が矢印（実線）の方向に回転する。（開放行程）
2. 機構上、lever-A が lever-B のみを伴い、 AE から AE' まで回転する。この間 lever-C, lever-D は停止している。（全開行程）

* 実際は lever-D は lever-C と B_C 以外の他の点で pin joint されている。又これらは何れも厳密な意味の pin joint でない。

機構の主要部を起動直前の状態で示すと第1図のようになる。この図では緩速度装置等が除かれている。各 lever の通称は、A が起動桿、B が連結桿、C が操作環、D が露出羽根、E が高速用ばね操作桿である。 A_s (A_{sA} , A_{sB}) が lever-A に附属しているばねで、 A_{sA} はその機能源で高速露出の場合には速度調節環による E の操作により、 A_{sB} が更に加わる。

3. lever-A が再び lever-B を介して, lever-C, lever-D を伴つて AB'_1 まで回転する。勿論この間に lever-C, lever-D は夫々矢印(点線)の方向に回転して元の位置へ戻る。(閉鎖行程)

然し, 本行程においては, 最初 lever-B が停止せる lever-C, lever-D に衝突することになるので, 更に次のように2段階に分けることが出来る。

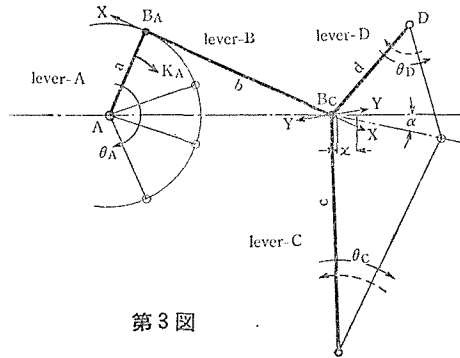
- a. lever-A, lever-B が lever-C, lever-D に衝突する。これを機構上完全非弾性衝突と考える。
- b. その衝突によつて, lever-A が lever-B を介して lever-C, lever-D を伴つて AB'_1 まで回転する。従つて, lever-C, lever-D も元の位置へ戻る。

3 理論的解析

3.1 回転運動方程式

3.1.1 開放行程

各 lever に就いて 回転運動方程式を作るため, 第3図のように B_A, B_C における各反力を X, Y とし, lever-B の質量が lever-A と lever-C の先端に半分づつ加わるものと考えれば,



第3図

lever-A について

$$\left(I_A + \frac{1}{2}M_B a^2\right) \frac{d^2\theta_A}{dt^2} - aX \sin \angle AX + K_A \theta_A = 0 \tag{1}$$

lever-C について

$$\left(I_C + \frac{1}{2}M_B c^2\right) \frac{d^2\theta_C}{dt^2} + cX \sin \angle CX - 3cY = 0 \tag{2}$$

lever-D について

$$I_D \frac{d^2\theta_D}{dt^2} + dY \sin \angle DY = 0 \tag{3}$$

- 但し, I_A, I_C, I_D各 lever の慣性能率
- M_B lever-B の質量
- a, c, d各 lever の長さ
- K_A lever-A 附属ばねのばね常数

(1), (2), (3) 式より X, Y を消去すると,

$$\left(I_A + \frac{1}{2}M_B a^2\right) \frac{d^2\theta_A}{dt^2} + K_A \theta_A + \frac{a \sin \angle AX}{c \sin \angle CX} \left(I_C + \frac{1}{2}M_B c^2\right) \frac{d^2\theta_C}{dt^2} + \frac{3a \sin \angle AX}{d \sin \angle CX \cdot \sin \angle DY} I_D \frac{d^2\theta_D}{dt^2} = 0 \tag{4}$$

然し, (4) 式は $\theta_A, \theta_B, \theta_C$ を含んでおりこのままでは解けないので, θ_B, θ_C を θ_A に

関するものに置き換えなければならない。そのために次のような近似的計算を行った。

即ち, lever-A と B_c 点の運動を piston crank 機構と同様に考え B_c 点の AB_c 方向の変位を x とすれば次の如くなる。(第3図参照)

$$x = a \left(1 - \cos \theta_A + \frac{a \sin^2 \theta_A}{2b} \right) \quad (5)$$

t について微分すると,

$$\frac{dx}{dt} = a \left(\sin \theta_A + \frac{a \sin 2\theta_A}{2b} \right) \frac{d\theta_A}{dt} \quad (6)$$

再び微分すると,

$$\frac{d^2x}{dt^2} = a \left(\sin \theta_A + \frac{a \sin 2\theta_A}{2b} \right) \frac{d^2\theta_A}{dt^2} + a \left(\cos \theta_A + \frac{a \cos 2\theta_A}{b} \right) \left(\frac{d\theta_A}{dt} \right)^2 \quad (7)$$

又, B_c の運動方向 $B_c B'_c$ については,

$$x \cos \alpha = c \theta_c \quad (8)$$

であるから (5), (8) 式から,

$$\theta_c = \frac{a \cos \alpha}{c} \left(1 - \cos \theta_A + \frac{a \sin^2 \theta_A}{2b} \right) \quad (9)$$

同様にして,

$$\frac{d\theta_c}{dt} = \frac{a \cos \alpha}{c} \left(\sin \theta_A + \frac{a \sin 2\theta_A}{2b} \right) \frac{d\theta_A}{dt} \quad (10)$$

$$\frac{d^2\theta_c}{dt^2} = \frac{a \cos \alpha}{c} \left(\sin \theta_A + \frac{a \sin 2\theta_A}{2b} \right) \frac{d^2\theta_A}{dt^2} + \frac{a \cos \alpha}{c} \left(\cos \theta_A + \frac{a \cos 2\theta_A}{b} \right) \left(\frac{d\theta_A}{dt} \right)^2 \quad (11)$$

(9), (10), (11) 式を次の如くおく。

$$\theta_c = SP \theta_A \quad (9)'$$

$$\frac{d\theta_c}{dt} = SQ \frac{d\theta_A}{dt} \quad (10)'$$

$$\frac{d^2\theta_c}{dt^2} = SQ \frac{d^2\theta_A}{dt^2} + SR \left(\frac{d\theta_A}{dt} \right)^2 \quad (11)'$$

更に, 実際の機構図から次のようになる。⁽⁵⁾

$$\theta_D = \frac{c \sin \angle DY}{d} \theta_c \quad (12)$$

$$\frac{d\theta_D}{dt} = \frac{\lambda^2 - 2\lambda \cos \theta_D + 1}{\lambda \cos \theta_D - 1} \cdot \frac{d\theta_c}{dt} \quad (13)$$

$$\frac{d^2\theta_D}{dt^2} = \frac{\lambda^2 - 2\lambda \cos \theta_D + 1}{\lambda \cos \theta_D - 1} \cdot \frac{d^2\theta_c}{dt^2} - \frac{\lambda \sin \theta_D (1 - \lambda^2) (\lambda^2 - 2\lambda \cos \theta_D + 1)}{(\lambda \cos \theta_D - 1)^3} \cdot \left(\frac{d\theta_c}{dt} \right)^2 \quad (14)$$

但し, $\lambda = CD/d$

(12), (13), (14) 式を次の如くおく。

$$\theta_D = L \theta_c \quad (12)'$$

$$\frac{d\theta_D}{dt} = M \frac{d\theta_c}{dt} \quad (13)'$$

$$\frac{d^2\theta_D}{dt^2} = M \frac{d^2\theta_C}{dt^2} - N \left(\frac{d\theta_C}{dt} \right)^2 \quad (14)'$$

(9)' と (12)', (10)' と (13)', (11)' と (14)' 各式から,

$$\theta_D = LSP \theta_A \quad (15)$$

$$\frac{d\theta_D}{dt} = MSQ \frac{d\theta_A}{dt} \quad (16)$$

$$\frac{d^2\theta_D}{dt^2} = MSQ \frac{d^2\theta_A}{dt^2} + (MSR - NS^2Q^2) \left(\frac{d\theta_A}{dt} \right)^2 \quad (17)$$

(11)', (17) 式を (4) 式へ代入して整理すると,

$$\begin{aligned} & \left\{ \left(I_A + \frac{1}{2} M_B a^2 \right) + \frac{a \sin \angle AX}{c \sin \angle CX} \left(I_C + \frac{1}{2} M_B c^2 \right) \right\} SQ + \frac{3a \sin \angle AX}{d \sin \angle CX \cdot \sin \angle DY} I_D SMQ \left\{ \frac{d^2\theta_A}{dt^2} \right. \\ & \left. + \left\{ \frac{a \sin \angle AX}{c \sin \angle CX} \left(I_C + \frac{1}{2} M_B c^2 \right) SR + \frac{3a \sin \angle AX}{d \sin \angle CX \cdot \sin \angle DY} I_D (SMR - NS^2Q^2) \right\} \left(\frac{d\theta_A}{dt} \right)^2 \right. \\ & \left. + K_A \theta_A = 0 \right. \quad (18) \end{aligned}$$

(18) 式中 $\angle AX$, $\angle CX$, $\angle DY$ 及び M , N , Q , R の値は動作中相当に変動するので, 本行程を 5 区間に分け各区分毎にそれらの値を求めて運動方程式を作り, 第 1 ~ 3 表に示す各部件の定数及び運動の境界条件から近似解を得た。そして前区分終了時の速度をその区分開始時の速度として順次解を進めた。

即ち, (18) 式は数値を代入してみると第 2 項が非常に小さくなるので近似的に

$$\frac{d^2\theta_A}{dt^2} + n^2\theta_A = 0 \quad (19)$$

の形となる。従つてその解は

$$\theta_A = A \cos nt + B \sin nt \quad (20)$$

となり, 境界条件 θ_A を満足させる t の値から各区分の運動状態及び所要時間が得られる。更にその区分終了時の速度は (20) 式を微分した

$$\frac{d\theta_A}{dt} = -An \sin nt + Bn \cos nt \quad (21)$$

から得られるので, 次の区分開始時の速度として解法における初期条件となる。

3・1・2 全開行程

lever-B のみを伴う lever-A の運動であるから, lever-B の質量が全部その重心に集まるものと考えれば, 本行程の運動状態は次の方程式を解くことによつて求められる。

$$(I_A + M_B a_{AB}^2) \frac{d^2\theta_A}{dt^2} + K_A \theta_A = 0 \quad (22)$$

但し, $a_{AB} \cdots A$ から lever-B の重心までの長さ。

解法における初期条件は前行程終了時の速度を本行程開始時の速度とすればよい。

3・1・3 閉鎖行程

本行程開始時においては, lever-A, lever-B が B'_c 付近で lever-D を伴う lever-C と衝突する。この衝突を機構上, 完全非弾性衝突と考え, 2組の lever に就き夫々衝

突点における仮想質量を求めて衝突直前の速度から衝突直後の速度を求め本行程開始時の速度とした。

即ち、前行程終了時の速度を衝突直前の速度とし、衝突直後の共通速度を V とすれば、 B_C 点の運動方向に就いて

$$V = \frac{M_{AB} v_{AB} + M_{CD} v_{CD}}{M_{AB} + M_{CD}} \quad (23)$$

但し、 M_{AB} , v_{AB} ……lever-A, lever-B を一体と考えた場合の衝突点における仮想質量、及び速度。

M_{CD} , v_{CD} ……lever-C, lever-D を一体と考えた場合の衝突点における仮想質量、及び速度。

となる。然し

$$v_{AB} = \cos \alpha \frac{dx}{dt} \quad (24)$$

であるから(6)式より

$$v_{AB} = a \cos \alpha \left(\sin \theta_A + \frac{a \sin 2\theta_A}{2b} \right) \frac{d\theta'_A}{dt} \quad (25)$$

となる。上式の $d\theta'_A/dt$ は全開終了時の速度である。

又、前行程において lever-C, lever-D は停止しているから

$$v_{CD} = 0 \quad (26)$$

となり(23)式は次のようになる。

$$V = \frac{M_{AB}}{M_{AB} + M_{CD}} \cdot a \cos \alpha \left(\sin \theta_A + \frac{a \sin 2\theta_A}{2b} \right) \frac{d\theta'_A}{dt} \quad (27)$$

故に、衝突直後の lever-A の回転速度は(6)式より

$$\frac{d\theta_A}{dt} = \frac{2b}{a(2b \sin \theta_A + a \sin 2\theta_A)} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (28)$$

となり、(24)式と同様に

$$V = \cos \alpha \frac{dx}{dt} \quad (29)$$

であるから、(27)、(28)、(29)式より結局次のようになる。

$$\frac{d\theta_A}{dt} = \frac{M_{AB}}{M_{AB} + M_{CD}} \cdot \frac{d\theta'_A}{dt} \quad (30)$$

かくして、本行程開始時の速度が得られたので以後の運動は(18)式がそのまま適用出来る。本行程においても常数係数が相当に変化するので、5区間に分け開放行程と同様にして解いた。

3・2 各部件の定数及び運動の境界条件

各 lever 及びばねの定数を第1表及び第2表に示す。第1表中の慣性能率は図式解法により求め、平均長は機構を投影器で拡大して描き、後述の境界条件を満足する位置、接触点等から求めたものである。第2表のばね常数も計算より求めたがこの場合

(1) 式においては $K_A = K_{SA} + K_{SB}$ となる。^{*}

第 1 表

	慣性能率 (gr · cm ²)	平均長 (cm)	備 考
lever-A	$I_A = 0.48$	$a = 0.48$	黄銅, 比重 8.5 として計算
lever-C	$I_C = 6.18$	$c = 2.11$	
lever-D	$I_D = 0.70$	$d = 0.48$	発条鋼板, 厚さ 0.06mm, 比重 7.8
lever-B	$M_B = 0.2\text{gr}$ (質量)	$b = 0.83$	黄銅

第 2 表

	ばね常数 (gr · cm / rad)	備 考		
		線径 (mm)	巻数	外径 (mm)
A_{SA}	$K_{SA} = 15.56$	0.32	4	4.7
A_{SB}	$K_{SB} = 66.66$	0.40	2	4.6

○ピアノ線,
 $E = 20000 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-2}$
○外径は巻線を中心径

第 3 表に各 lever の運動の境界条件を示す。lever-A については、上述の K_A の平衡位置を基準とした値である。

第 3 表

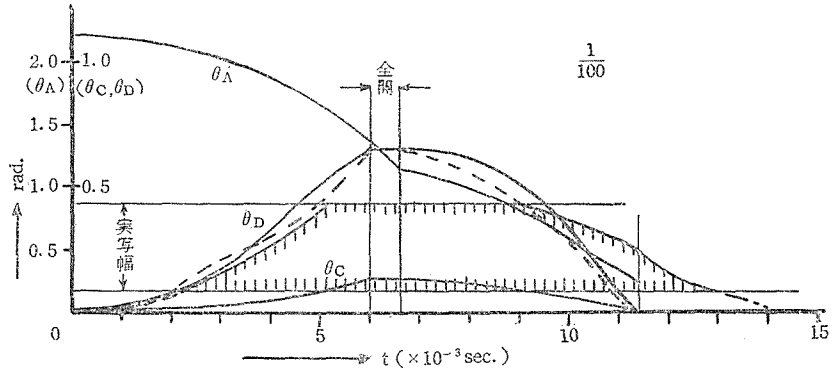
	称 呼	lever-A (θ_A)	lever-C (θ_C)	lever-D (θ_D)
開放行程	100	2.2209 ~ 1.3484	0 ~ 0.1398	0 ~ 0.6457
	200	2.6456 ~ 1.7731		
全開行程	100	1.3484 ~ 1.1041	0.1398	0.6457
	200	1.7731 ~ 1.5288		
閉鎖行程	100	** 1.1041 ~ 0.2316	0.1398 ~ 0	0.6457 ~ 0
	200	1.5288 ~ 0.6563		

3.3 理論結果

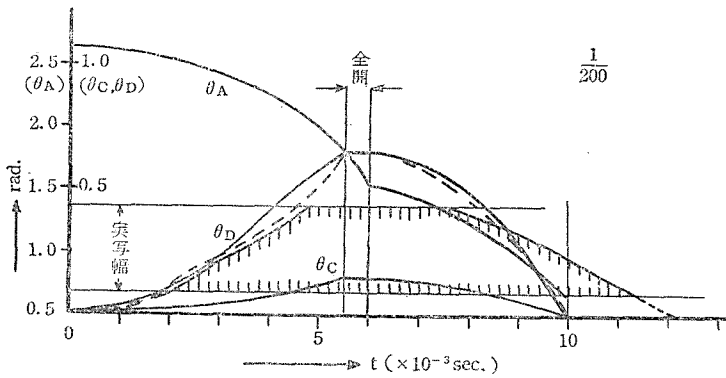
各行程における運動方程式を解いて、各 lever の運動状態を示すと第 4 図 ($1/100 \text{ sec.}$) 及び 第 5 図 ($1/200 \text{ sec.}$) となる。この場合 θ_A は方程式の解をそのままとればよいが、 θ_C 、 θ_D は (9)' 及び (15) 式から換算しなければならない。

* $1/100 \text{ sec.}$ 機構において閉鎖行程の最終 2 区間は K_{SB} が働かず $K_A = K_{SA}$ となる。従つて境界条件も K_{SA} のみの平衡位置を基準にするので第 3 表 ** 欄が次の如くなる。

1.1041 ~ (0.4759) ~ (0.2316)
2.5132 ~ 2.2689



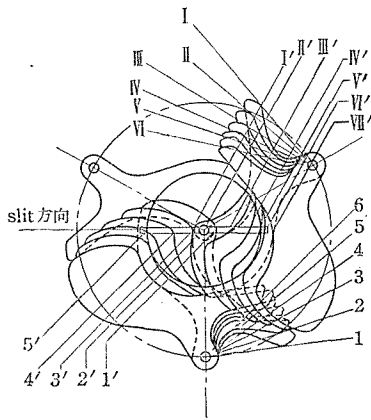
第 4 図



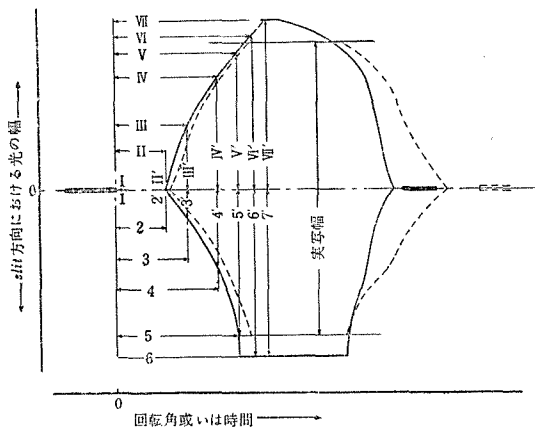
第 5 図

なお、lever-D の運動はこのままでは後述する実験結果（写真映像）と比較するに不十分なので、slit 方向における運動状態を知るため第 6 図及び第 7 図の如き方法により、shutter 中心における羽根の重なり、絞りによつて遮蔽される部分等を実際の機構図から求めて、実写巾と関連させた。

即ち、第 6 図は露出羽根の回転角と slit 方向に通過する光の巾の関係を求める機構図である。光の巾は回転角即ち時間によつて変化するからその関係は第 7 図（実線）のように表すことが出来る。従つて、第 4 図及び第 5 図に点線で示すような光学的開閉状態が得られる。



第 6 図

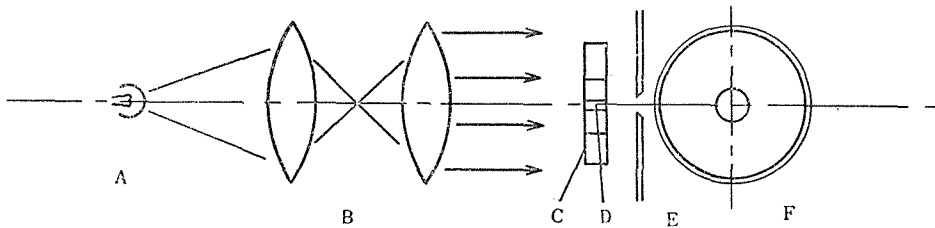


第 7 図

4 実験的解析

4.1 実験装置

理論値と比較検討し易いように、露出羽根の開閉状態をその重なるの中心を通る一定方向の slit を通過する光によって感光紙に記録させる方法を取り第 8 図の如き実験装置を作った。

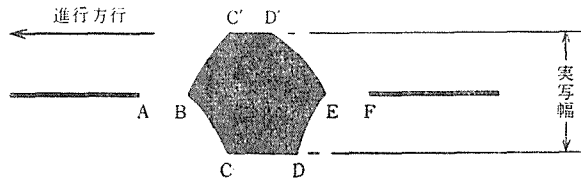


第 8 図

A は 100V, 500W の特殊電球光源で、その光は B の condenser lens によつて平行にされ、C の shutter の露出羽根の中心に pin hole D (第 1 図参照) をあけることによつて、その運動を後掲の如き映像として synchronous motor に直結された drum 上の感光紙に記録させる。

4.2 実験結果

第 9 図は実験による記録写真である。これは感光紙の速度がわかっているので、映像



第 9 図

輪廓を座標的に求めることによつて、図上の操作で第7図（点線）のように理論値と比較することが出来、更に第4図及び第5図の影を施した部分として示すことが出来る。

第9図 A~F の代表的な点について

- A……………起動即ち開放始点
- B……………光学的開放始点
- C(C')* ……光学的開放終点（光学的全開始点）
- D(D') ……光学的全開終点（光学的閉鎖始点）
- E……………光学的閉鎖終点
- F……………閉鎖終点

を表わす。

5 結 言

理論的には各 lever についてその運動を解析出来るが、実験的には lever-D（露出羽根）の運動が解析出来るに過ぎない。従つて、既に述べて来たように lever-D の slit 方向の運動について第4図と第5図によつて両者の比較を試みる。

先ず実写巾について、shutter 規格の項目によつて比較すると第4表のようになり、実験値が大きい値を示している。これは、理論値が機構の摩擦、ガタ等を無視した理想的な状態における計算結果であるからその傾向は当然であろう。更に、数量的の差異も

第 4 表

×10⁻³sec.

		全露出時間	全開時間	有効露出時間	効率 (%)
1 100	理論値	9.05	4.25	6.65 (1/130 sec.)	73.48
	実験値	11.00	3.90	7.45 (1/134 ")	67.73
1 200	理論値	7.79	3.69	5.74 (1/174 ")	73.68
	実験値	9.22	2.66	5.94 (1/168 ")	64.43

$$\text{有効露出時間} = \frac{\text{全露出時間} + \text{全開時間}}{2}$$

$$\text{効 率} = \frac{\text{有効露出時間}}{\text{全露出時間}} \times 100$$

* 一般に C, C' 及び D, D' は時間的に一致しない。

僅かで、途中の運動状態も相当に一致する。換言すれば、この種 shutter も充分理論的な動作をすると言える。即ち、理論的設計が可能であることを示す。

又、shutter の露出時間とは、一般に有効露出時間をいうのであるから、この shutter は第4表その欄括弧内の値を有するわけで、 $1/100$ sec. 機構は早く、 $1/200$ sec. 機構は遅く動作している。これらは主として、 A_{SB} ばねの作動条件によるものと考えられるので、この点の設計・製作・調整に留意するならば、称呼時間により一致する機構が得られるであろう。

参 考 文 献

- (1) 市川：機械・精機両学会合同講演会前刷（昭30.5）
- (2) 市川：信州大学工学部紀要，5号（昭30.11）
- (3) 市川：精機学会春季講演会前刷，第4分冊（昭31.4）
- (4) F. Dyson : Principles of Mechanism, Pp.96~98 (1951)
- (5) 上掲 (2) p.32