

解説

レンズシャッターカメラ用光学系

小川 良太・伊藤 孝之

旭光学工業(株)研究開発センター光学研究室 〒174 東京都板橋区前野町 2-36-9

(1988年4月16日受理)

Optical System for Lens-Shutter Camera

Ryota OGAWA and Takayuki Iro

Optical Research Department, Research & Development Center, Asahi Optical Co., Ltd.,
2-36-9, Maeno-cho, Itabashi-ku, Tokyo 174

1. はじめに

レンズシャッターカメラ (LS カメラ) の国内総生産台数がスチルカメラ全体の 80% を超える勢いで伸びている。カメラの形態も、以前は薄型の単焦点レンズを基本としたものから、2焦点化・ズーム化する多焦点化の方向へ変わってきた。さらにズーム比の高倍化や、これがクイックリターンミラーを用いた TTL ファインダー方式で実現されるなど、新しいカメラが出現する動向もうかがえる。技術的な背景としてはオートフォーカス機構の信頼性の向上や、ファインダー光学系の進歩がある。これらの技術をバランスよくカメラに組み込むシステム設計も重要なポイントとなってきている。そこで本稿では光学設計の立場から、カメラのシステム設計の基本となる光学系のコンパクト化やズーム化、レンズ群の感度およびオートフォーカス方式とピント精度などに着目し考察する。

2. 単焦点レンズ

単焦点レンズには、レンズ系の後方にシャッターを兼ね備えた絞りを配置し、レンズ系と絞りを完全に分離したビハインドタイプと、レンズ系の中間部にシャッター絞りを配置したビトウィンタイプがある。

ビハインドタイプには図 1(a)のように、 $F3.5$ クラスのものにはトリプレット¹⁾、 $F2.8$ クラスになるとテッサ²⁾が多い。なかには5枚構成³⁾でコンパクト化を図ろうとしたものもある。焦点距離はレンズ全長の薄型化と被写界深度を大きくとるために $f=35\sim 40$ mm の

広角域が選ばれる。このタイプにはビトウィンタイプと比較してレンズ全長が多少大きくなる欠点があるが、レンズ系周りの機構や組立てが容易で、かつ製造誤差による劣化も少ない。

ビトウィンタイプは図 1(b)のように3群構成の前群と曲率の大きな負メニスカスレンズの後群との間にシャッター絞りを配置するのが代表的なレンズタイプ⁴⁾である。このタイプは後群による弱い望遠効果によりレンズ全長(第1面～結像面)を約1割程度小さくすることが可能で、かつ有限物体に対する前群の繰出し量も約半分ですむという利点があるが、レンズ系が二つに分割されることによって製造工程が複雑になり、かつ前群と後群の相対的な傾きや光軸ずれによる悪影響も大きくなりやすい。

また後群の負メニスカスレンズは絞りに対してコンセントリックな形状をしている。加工コストを考慮してプラスチック⁵⁾を使用し、非球面化されたケースが多い。球面形状の場合に比較して、歪曲収差、像面湾曲などが良好に補正できる。

カメラのコンパクト化のために、一時はビトウィンタイプが使用されたが、製造性や2焦点化のやりやすさを考慮して最近ではビハインドタイプも多い。収納時にレンズ系全体がさらにフィルム側に繰り込むなどの機構的工夫によりカメラの薄型化が図られる。

3. コンバーターによる望遠方式

広角系の単焦点レンズを望遠化する方法としては図 2 のようなフロントコンバーター方式⁶⁾とリアコンバーター

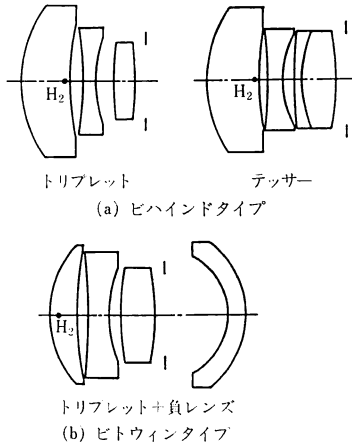


図1 単焦点レンズのシャッター絞り位置による分類
H₂ は第2主点

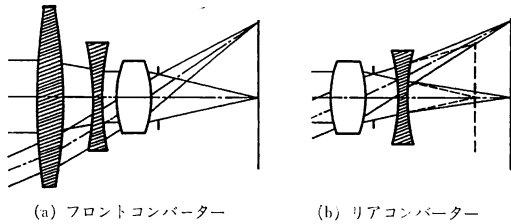


図2 コンバーター (斜線部) による望遠化

一方式^{6,7)}が一般的である。他にも特殊な方式として、レンズ系の中間部にコンバーターレンズを挿入あるいは交換する方式⁸⁾も特許出願されている。また望遠化とは逆に広角化のコンバーター^{6,9)}も存在するが、あまり一般的ではない。

フロントコンバーターの特徴は、アフォーカル(無焦点)系であるが角倍率 γ を有し、 F ナンバーを不変のままマスターレンズの焦点距離を γ 倍できることである。しかしマスターレンズの前方に配置されるので、絞りの位置の関係から必然的にコンバーターの径は大きくなる。マスターレンズに対する物体距離 u' と実際の物体距離 u には

$$u \doteq \gamma^2 u' \quad (1)$$

の関係がある。このために生ずるピントのくいを補正するために、測距系をも補正する方式¹⁰⁾も考案されている。

リアコンバーター方式の特徴は、負の焦点距離を有するコンバーターを正のマスターレンズの後方に配して望遠タイプとすることである。マスターレンズの口径は変わらずに焦点距離だけがリアコンバーターの横倍率 m だけ拡大されるので、 F ナンバーも m 倍されて暗くな

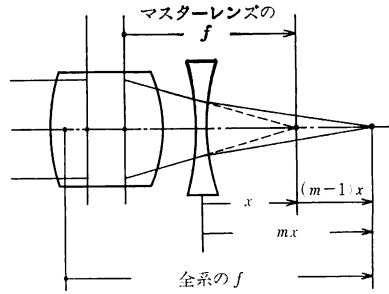


図3 リアコンバーターの取付位置と結像面の移動

る。図3に示すように、リアコンバーターの取付位置を x とすると、マスターレンズ(シャッターを含めて)を前方に $(m-1)x$ だけ移動させなければピントが合わなくなる。したがってフロントコンバーターに比べると機械的な構造は複雑になるが、カメラへの内蔵が可能となるのでコンパクトになる。

被写界深度には

$$(\text{被写界深度}) \propto (F \text{ ナンバー}) / (\text{焦点距離})^2 \quad (2)$$

の関係がある。望遠化による焦点距離の増加比率を $Z (>1)$ とするとき、フロントコンバーター方式では焦点距離のみが Z 倍 (γ 倍) されるのに対して、リアコンバーター方式では焦点距離・ F ナンバーがともに Z 倍 (m 倍) される。したがって被写界深度は方式によりおのおの Z^{-2} 倍・ Z^{-1} 倍と異なる。より深い深度が得られるリアコンバーター方式はカメラとしてまとめやすく、まず2焦点カメラとして製品化され、次章で述べる2群ズーム方式へと発展した。

4. 望遠タイプ2群ズーム

3.節においてLSカメラの2焦点化について説明したが、SLRカメラの交換レンズでさえズームレンズが主流となっている今日、レンズの交換のできないLSカメラは2焦点化では、まだ人間の「空間を自由に切り取りたい」という欲求に対して不十分であり、ズームレンズの開発への移行は必然的であった。特許を分類してみると、被写体側より正の群・負の群からなる望遠タイプの2群ズーム¹¹⁾が多く、図4のように構成が簡単のためかこのタイプがまず製品化された¹²⁾。他にも変倍比が2倍以下の3群ズーム¹³⁾・4群ズーム¹⁴⁾の出願もみられるが、製品化までには至っていない。

望遠タイプの2群ズームが採用されたのは、構成が簡単であるだけでなく、SLRカメラと違いLSカメラはバックフォーカスの制約が小さいのでレンズ全長を非常に小さくできるからである。望遠タイプの2群ズームの

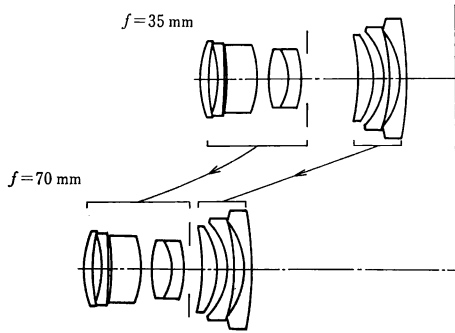


図4 2群ズームレンズの例¹²⁾
35~70 mm/F 3.5~6.7

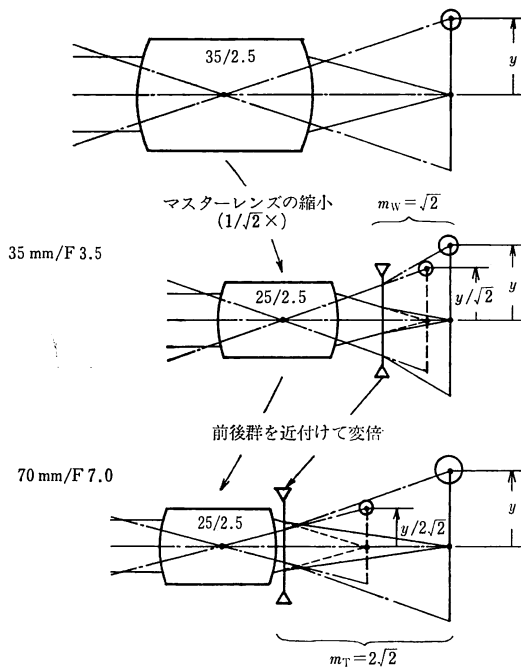


図5 理想リアコンバーターによる2群ズームの構成手順
○は収差の大きさの比較を表わす。

起りには、SLR 用広角タイプの2群ズームを前後反転、あるいは前節で述べたリアコンバーター方式を拡張したものと考えられるが、後者の立場より説明する。

図5に示すように、理想リアコンバーターとマスターレンズ 35 mm/F 2.5 を組み合わせると 35~70 mm/F 3.5~7.0 ズームレンズを構成してみる。まず 35 mm マスターレンズを $1/\sqrt{2}$ 倍に縮小 (25 mm/F 2.5) し、次に $\sqrt{2}$ 倍リアコンバーターを装着してワイド端 (35 mm/F 3.5) を作る。さらにマスターレンズとリアコンバーターの間隔を近づけてテレ端 (70 mm/F 7.0) を作る。こ

の過程からも類推されるように、像高 y におけるズームレンズの収差量 $\delta(y)$ とスケーリング後のマスターレンズの収差量 $\delta_M(y)$ との関係は

$$\delta(y) = Z \cdot m \cdot \delta_M(y/Z \cdot m) \quad (3)$$

ただし m : ワイド端でのリアコンバーターの倍率

Z : (焦点距離 f) ÷ (ワイド端の焦点距離 f_w) と表わすことができる。図5の場合には $Z=2$, $m = \sqrt{2}$ なので、テレ端ではスケーリング後のマスターレンズの $1/2\sqrt{2}$ の像高の性能を $2\sqrt{2}$ 倍した量の収差が発生する。実際にはマスターレンズの収差とリアコンバーターの収差の符号および倍率との関係をバランスさせることによって、設計的に $\delta(y)$ の極小化を図ることができる。

2群ズームレンズ系をカメラに組み込む場合にポイントとなるファクターの計算式を示す。

- ワイド端におけるレンズ全長 L (第1面~結像面)

$$L = f_1 + (m_{2,w} - 1) \cdot x + (\text{厚肉化補正值}) \quad (4)$$

- 後群の移動量 X_2

$$X_2 = -(f_T - f_w) \cdot f_2 / f_1 \quad (5)$$

ここで、 f_1, f_2 は前、後群の焦点距離、 f_w, f_T はワイド、テレ端の焦点距離、 $m_{2,w}, x$ はワイド端での後群の横倍率および後群の第1主点から前群の結像面までの距離である。 f_1, f_2 は前後群が最も接近するテレ端での近軸式

$$1/f_T = 1/f_1 + 1/f_2 - e_T / f_1 \cdot f_2 \quad (6)$$

を満足するように決定される。 e_T はテレ端での前群の第2主点と後群の第1主点の間隔である。

(4)式の L はカメラの厚み方向のコンパクト化に直接的に影響する。厚肉化補正值とは、前後群おのおのの主点間隔と前群の第1主点距離を加算することを意味する。 x を小さく選べば L は小さくできるが、フィルムサイズが決まっているために後群の径が大きくなったり、フレアー発生の原因にもなりやすく、適当な値が選ばれる。

X_2 と $-f_2/f_1$ との関係を図3通りのズーム比 $Z=1.5, 2.0, 2.5$ に対して(5)式に基づいてグラフ化したものが図6である。横軸値を $-f_2/f_1 < 1$ とすることは(6)式からも明らかのように、小さな e_T に対して全系の f_T を正にするためにはきわめて困難である。多くの特許出願例をみても $-f_2/f_1 > 1$ の領域に限られている。一般的には $-f_2/f_1 = 1 \sim 1.5$ 程度に選ばれる。一方、後群の移動量 X_2 が大きくなると機構的な困難さが増加する。望遠タイプの2群ズームではこのような制限から図中の☆印の値が選ばれている。

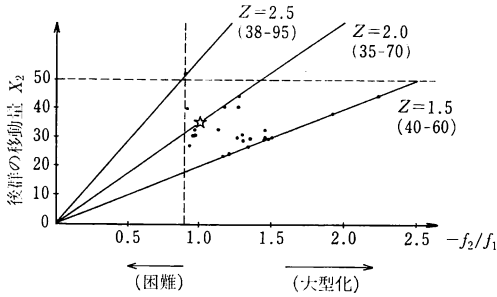


図 6 2群ズームの移動量と高倍化との関係
 Z はズーム比, $f_1 f_2$ は前後群の焦点距離.
 ☆は製品化されたもの¹²⁾, 他のプロットは特
 開昭 56-128911, 57-201213, 60-48009, 60-
 170816, 60-191216, 60-191217, 61-87120,
 62-90611, 62-113120, 62-264019 の実施例
 より計算

望遠タイプ2群ズームでは以下のような問題点がある。

1. ズーム比を大きくしにくい。
2. テレ端ワイド端の F ナンバー差が大きい。
3. 広角化が困難である。

いずれにおいても基本的構造に起因している。問題点1と2に関しては次節で述べるような3群以上の移動群を有するズームタイプの導入により解決される方向がすでに示されている。問題点3は望遠タイプで広角化を図る困難さを意味する。解決のためには前玉径の増大を見きわめながら高度な収差補正技術が要求されよう。ズーム比を同じと仮定した場合に、後群の倍率はズームレンズのほうが2焦点タイプのそれよりも大きく(たとえば図5の $m_T=2\sqrt{2}$ に対して、2焦点タイプでは $m_T=2$)、前群は全焦点距離範囲で後群の影響を受け、さらに倍率も変化する。このような理由から、ズーム比2倍程度の大きになると、前群としては、トリプレットやテッサーでは収差補正が難しく、構成枚数が1~2枚多い変形テッサータイプが採用されている。

5. 新しい形態のカメラ用の高倍ズームレンズ

LSカメラ用ズームレンズにも、特許では2群タイプ以外に変倍比が2倍以下の3群・4群タイプのものが出願されているが、最近SLRカメラと従来のLSカメラの中間に属するような、ズームレンズとカメラが一体化した新形態のカメラが製品化されてきた。そしてこのカメラの最大の特徴は2倍を超える約3倍の高変倍ズームレンズ¹⁵⁾を装着していることである(図7)。

2群タイプのズームレンズの解析において、高倍化が

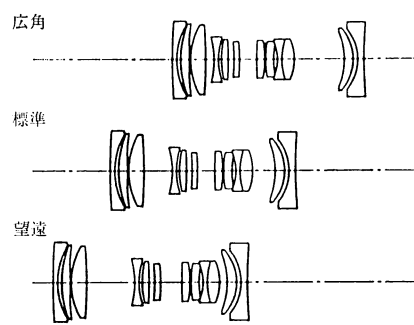


図 7 高変倍ズームレンズの例¹⁵⁾
 38~105 mm/ F 4.5~6

非常に難しいことを説明したが、図7のような正正負の3群タイプではレンズ群を一つ増加することによって、各レンズ群移動量およびピント感度を小さく設定可能となる。これはレンズ群が一つ増えることによって可動部も一つ増え、2群ズームに比べて自由度が二つ増えることになり、各レンズ群のパワー配置と相対的な移動量をバランスさせることが可能となったものである。 F ナンバーの変化も4.5~6と少なく抑えることができるのも特徴である。

しかしこの方式も、レンズ群が増えることによって機構が複雑となりやすく、レンズの枚数も増えコストの問題が残る。またLSカメラが求められるコンパクト性をいかに達成すべくまとめるかが課題である。なかには、ハーフサイズの画面フォーマットを採用してコンパクト化を図ったカメラ¹⁶⁾も製品化された。

6. ファインダー光学系

レンズシャッターを内蔵するLSカメラでは、ファインダー系は撮影レンズ系と別系統で設けられるのが基本である。このため、マスターレンズの F ナンバーはファインダーの明るさには影響しないため、カメラの多焦点化のときにテレ側の F 値を大きな値に設定できるので、撮影レンズの小型化やピント精度の確保に有利になる。一方、ファインダー自身の変倍化を工夫しなければならない。

ファインダーにはアルバダ式逆ガリレオファインダーと実像式ファインダーがある¹⁷⁾。アルバダ式逆ガリレオファインダーではフレーム枠を眼に近いレンズ面にコートし、これを前方のハーフミラーコート面で反射させ、被写体の像と重ねて観察する。アルバダ式はコート面での光量ロスがあるが構成は簡単である。図8(a)に変倍化を実施した例¹⁸⁾を示す。このタイプでは第1レンズの

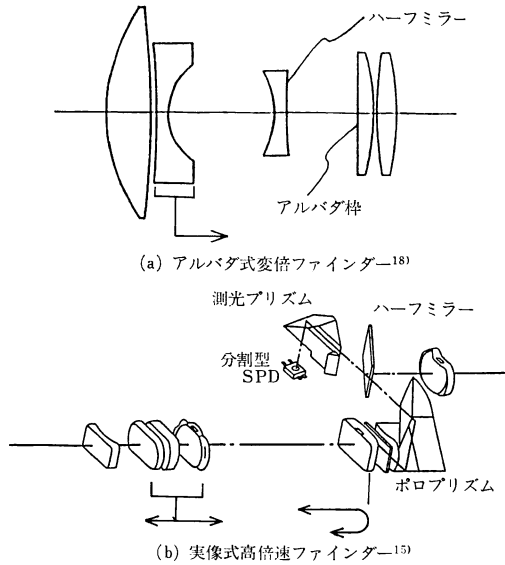


図8 変倍ファインダーの例

径を小型に保ちながら移動のスペースを確保することが難しく高変倍化には限度がある。

実像式ファインダーでは光学系内で一度結像する位置があり、ここにフレーム枠を設けることができる。ただしこのままでは像は反転して観察されるため、反転プリズムを用いるか、またはリレーレンズ系を付加してレンズ系の内部で2度結像させる等の工夫が必要である。構成は複雑となるが高い変倍比を得やすく、図8(b)のような光学構成で3倍ズームファインダー¹⁵⁾が実現された。

以上述べたような外付けのファインダー（撮影レンズとファインダーが別系統）がLSカメラでは一般的であるが、SLRカメラのようにTTL方式を採用するカメラが現われた¹⁶⁾。ズーム比の高倍化とともに、ファインダー像と撮影像の間にずれが生ずるパララックスの問題はこの方式では発生しない。しかもズームによる変倍は撮影レンズが分担するのでファインダー内での変倍移動は行わずにすむ。

7. オートフォーカス光学系

LSカメラのオートフォーカス化は、1977年にコニカC35 AF¹⁹⁾がハネウェル社が開発したビジロニックモジュール²⁰⁾を使用したのが最初であり、それ以後各メーカーで種々の改良・開発が重ねられてきた。AF光学方式は三角測距方式をベースとしていて、被写体距離の逆数をほぼ等ピッチのずれ情報として光電的に検知し、その情報を撮影レンズの全部あるいはフォーカス部へ伝達

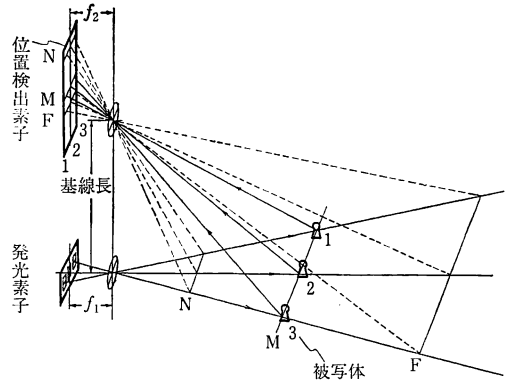


図9 複数ビームアクティブ方式による多点測距方式の例²¹⁾

しこれを移動している。このとき、フォーカスの段数が有限個に設定されているために、次節で述べるピントの量子化誤差を原理的に内包する。方式は被写体の像をセンサーが受光するパッシブ方式と、カメラから被写体へ投光した赤外光の反射像を再び検知するアクティブ方式がある。

パッシブ方式は被写体が明るく高コントラストであることが望ましく、低輝度低コントラストなどの苦手の被写体をもつが、レンズの望遠化に伴い、無限遠方でも信号が得られる長所から、見直されている。

アクティブ方式は高輝度LEDの供給により可能となった。電子回路構成のシンプルさと暗い被写体などに強いので多用されているが、LEDの投光距離に限界があるために、無限側のフォーカスピッチを粗くせざるをえない。

図9には、アクティブ方式であって測距ゾーンを中央だけでなく左右にも設けて、合焦の確度を高めた実施例²¹⁾を示す。具体的な方式例の解説は文献^{22,23)}を紹介するのに留める。

8. ピントの量子化誤差

図10は被写体距離（像側のボケ量が等ピッチとなるように変換されている）によって錯乱円径が変化するようにすをあらわす。距離①, ②, ③に対して錯乱円径は最小から最大に変化する。第kゾーンの距離②の場合であっても、第k段と判定されずにk+1段へ飛ぶこともあり、このとき錯乱円径はABからA'B'へ不連続的に変化する。フォーカス段数が量子化されている²⁴⁾ためのピント誤差に対して、筆者らは次のように取り扱っている。

撮影者が出会う第kゾーン内距離の発生確率は図11

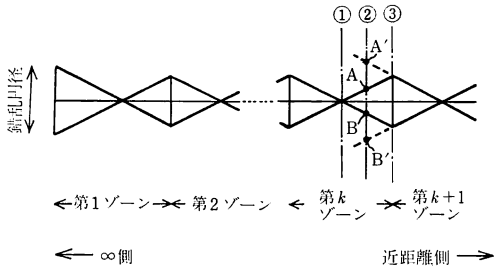


図 10 ピントの量子化による錯乱円径の変化

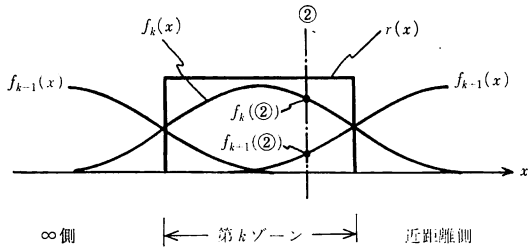


図 11 第 k ゾーン内の被写体が $k-1, k, k+1$ 段と判定される確率関数の思考モデル

の $r(x)$ のような一様な箱関数と考えるのが最も自然である。 $r(x)$ は第 k ゾーン内距離の撮影に対して、フォーカス段がすべて第 k 段に入るという理想的な場合の確率関数とみなせる。実際にはオートフォーカス系の誤差などのために、ゾーンの境界に近づくにつれて、適正な第 k 段へ入る確率は減少し、代りに隣接段へ入る確率が増加する。このようすが図 11 の f_k, f_{k+1} などにあらわれている。確率関数 $f(x)$ は裾野を広げて量子化の周期と同じ周期で重なり合う。たとえば距離②では、 k 段へ入る確率 $f_k(②)$ と $k+1$ 段へ入る確率 $f_{k+1}(②)$ が存在し、これに従って k または $k+1$ 段へフォーカスレンズ群が移動する。 $f(x)$ は理想的確率分布 $r(x)$ がボケた状態と考えられるので、不確定関数 $g(x)$ を導入することにより

$$f(x) = \int r(x')g(x-x')dx' \quad (7)$$

とコンボリューション積分で表わすことができる。 $g(x)$ はオートフォーカス系の総合信頼度を表わし、 δ 関数となった理想状態で $f(x)=r(x)$ となる。オートフォーカス系の不確定関数 $g(x)$ を求める一方法は、実験的に $f(x)$ を求めてから $g(x)$ を逆算する。すなわち $f(x), r(x), g(x)$ のフーリエ変換をおのおの $F(u), R(u), G(u)$ とするとき

$$G(u) = F(u)/R(u) \quad (8)$$

となる関係があるので、実験値 $f(x)$ と既知の $r(x)$ よ

り $g(x)$ を求めるルートが存在する。

フォーカス段数を増加することは必ずしもピント精度の向上にそのまま結びつくものではない。 $r(x)$ を狭く設定しても $g(x)$ の存在のために $f(x)$ が直接的に狭くならないためである。オートフォーカス系の性能と設定フォーカス段数とのバランスの見きわめが設計のポイントの一つであり、さらにレンズ群の移動やフィルムの平面性の誤差などをすべて加味したシステム設計が行なわれる。

9. おわりに

レンズシャッターカメラの形態が急速に変化しつつある。LS や SLR の中間に位置するような新しい製品も現われている。このような動向を正しく位置付けし全貌を俯瞰するためには、さらに一年くらい待つのがよいと思われる。変化の激しい時期では製品を網羅することよりも基本となった技術を中心に紹介するのがよいと考えて本稿のような形式をとった。

LS カメラは SLR と比較して萌芽しつつある技術を比較的早く取り入れやすい環境にあった。これが現在の活性を生み出した。今後もこの分野では、撮影レンズ・ファインダー・オートフォーカスの各光学系を含めたシステム設計によりいろいろな形態のカメラが考察され、非球面・新材料・メカ・エレキ等の多くの技術革新によってレンズ設計も新しい展開が可能となり、レンズ系も新しいタイプが開発されていくであろう。

最後に本稿をまとめるにあたって協力いただいた旭光学工業(株)カメラ開発設計部主査原口恵介氏と光学研究室菅原三郎氏に深く感謝する。

文 献

- 1) たとえば、若宮孝一：特開昭 60-177313.
- 2) たとえば、山田康幸：特開昭 59-18916.
- 3) 佐藤重忠：特開昭 58-166316.
- 4) たとえば、工藤吉信：特開昭 59-147312.
- 5) 小島 忠：“プラスチックレンズの光学系への適用”，光学技術コンタクト，23 (1985) 11.
- 6) 小倉敏布：レンズの科学入門(下) (朝日ソノラマ，東京 1981) pp. 115-120.
- 7) たとえば、山田康幸：特開昭 57-46224.
- 8) たとえば、池森敬二，田中一夫：特開昭 56-132305.
- 9) たとえば、辻 定彦：特開昭 63-61215.
- 10) たとえば、菅原三郎：特開昭 62-264030.
- 11) たとえば、田中一夫，田島 晃：特開昭 56-128911；伊藤孝之：特開昭 62-264019.
- 12) 旭光学工業：“CAMERA TEST テクニカルレポート”，写真工業，2月号 (1987) 81.
- 13) たとえば、坂野 誠：特開昭 58-184916.
- 14) 升本久幸：特開昭 60-57814.
- 15) 那和秀峻：“'88日本カメラショー 注目の新製品詳報”，

- 日本カメラ, 3月号 (1988) 252.
- 16) 京セラ: "CAMERA TEST テクニカルレポート", 写真工業, 2月号 (1988) 81.
 - 17) 中村重彌: 光学技術ハンドブック (朝倉書店, 東京, 1968) pp.865-866.
 - 18) 藤田久雄, 大田耕平: 特開昭 61-87122.
 - 19) 小西六写真工業: "新型カメラの技術資料", 写真工業, 1月号 (1978) 74.
 - 20) 小倉磐夫: "ビジトロニックモジュール", 写真工業, 4月号 (1978) 93.
 - 21) 竹花高道: 特開昭 62-223734.
 - 22) 山本 晃: "オートフォーカスカメラの展望", 写真工業, 2月号 (1979) 75.
 - 23) 赤羽根登: "オートフォーカス", 写真工業, 4月号 (1988) 102.
 - 24) 小倉磐夫: "オートフォーカスにおける距離の量子化", 写真工業, 2月号 (1981) 106.