

ズームタイプの発展と設計手法

升本久幸

1980年代は、レンズが使われているあらゆる分野で、単焦点レンズからズームレンズへの置換が進行した¹⁻³⁾。そのなかで、ズームタイプの発展がその促進に大きく貢献してきた。

本解説では、銀塩カメラ用レンズに限定して、ズームタイプの発展と設計手法について述べる。さらに、そのズームタイプ発展の基盤となった設計・製造技術に関しても言及する。

レンズを中心とした光学分野の発展スピードは、最近のエレクトロニクス、通信分野の発展に比べると緩やかなもので、10年を1つの区切りにみて初めて大きな流れが捕まえられる。したがって本解説では、最近10年間におけるズームタイプ発展を、主に、筆者が開発にかかわってきた一眼レフカメラ用の標準・望遠ズームレンズ、コンパクトカメラ用のズームレンズを中心に述べる。そのなかで、設計手法に関しても、主に、筆者がその開発で用いてきた手法を中心に解説する。

1. カメラ用レンズとズームタイプの発展

最近の10年間におけるズームタイプの発展は、主に銀塩カメラ用が主導的役割をはたしてきた。その背景には、この間、銀塩カメラ用が以下のようないくつかのユーザーニーズを抱えていたことが挙げられる。

- 1) 多様な光学仕様（焦点距離領域、口径比）
- 2) 一眼レフカメラ用ズームレンズの小型・低価格化と高変倍化

Development of zoom lens and new optical design method
(1996年7月30日受理)

Hisayuki MASUMOTO ミノルタ(株)光学機器事業本部カメラ第3開発部(〒590 堺市大仙西町3-91)

3) コンパクトカメラのズーム化と高変倍化

したがって、光学設計としては、種々の製品領域において、最適なズームタイプの選択、もしくは新たなズームタイプの開発の要求が強く求められていた。特にズームレンズの光学設計においては、光学仕様のマクロな特徴（大きさ、レンズ構成枚数など）は設計初期段階におけるズームタイプの選択によって決まってしまうといつても過言ではない。

2. ズームレンズの光学設計と光学理論

2.1 『自動設計』と『設計解析』

コンピューターの発展に伴って、ズームレンズの光学設計も、ほとんどは『自動設計』と呼ばれる最適化手法で行われている。『自動設計』は設計者の与えた初期条件の近傍での解の探索には有効であり、通常は類似の光学仕様の設計例からスタートする。しかしながら、『自動設計』でスタートすべき類似の設計例がない新しいズームタイプの開発においては、設計者自身の経験と『設計解析』などのマクロな洞察がどうしても必要となる。

以下に、新しいズームタイプの開発における『自動設計』と『設計解析』の各々の役割と相互の関係を、開発フローに従って示す。

- 1) 既存のズームタイプの限界把握…『設計解析』
 - 2) 新規ズームタイプの開発
 - ①新規ズームタイプの導出…『自動設計』
 - ②ズームタイプの展開 …『設計解析』
 - 3) ズームタイプの実現（製品設計）…『自動設計』
- ここでは、ズームタイプの光学特性、その拡張性および光学仕様の限界の把握などに有効な『設計解析』が、重要な役割を果たすことがわかる。

2.2 『設計解析』と光学理論

ズームレンズの設計における『設計解析』としては、ズームタイプを決定し、その近軸解を決める段階で(『自動設計』で具体的なレンズ形状を決定する前に)マクロな収差補正の見通しを立てることがポイントとなる。ズームレンズの収差補正の光学理論としては、山路の「ズームレンズの特性行列」⁴⁾があり、このステージでの『設計解析』にきわめて有効である。

一方、次に、具体的なレンズ形状を決定する段階で非球面を多用するような設計では、どのレンズにどのような非球面が有効かのマクロな見通しを立てることがポイントになる。そうしたステージでの『設計解析』には、松居の「収差論」⁵⁾の光学理論が有効である。

3. ズームタイプ発展の技術要素と設計自由度の活用

3.1 技術要素と設計自由度

ズームタイプの発展は光学設計単独で達成される例はきわめて稀で、通常はその時代の技術要素の発展との相乗効果で達成される。技術要素の発展は光学設計の自由度を増すことになり、光学設計者には、その時代のユーザーニーズに合わせてその自由度をいかに活用するかが求められる。

最近10年間の銀塩カメラにおけるズームタイプの発展も、いくつかの技術要素の発展とそれに伴う設計自由度の活用に密接に関係している。表1に、ズームタイプ発展に寄与した2つの大きな技術要素とそれに伴った光学設計上の自由度を示す。この他にもフォーカシングに関するものもある^{6,7)}が、ここでは割愛する。

3.2 設計自由度の活用と『設計解析』

設計自由度の活用にはどうしても『設計解析』が必要である。それも大抵の場合は、直接光学理論を適用しようとすると複雑になりすぎて、なかなか設計の実用になりにくい。そこで、設計者の経験に基づく着想と近似を基本とした『設計解析』が重要になってくる。

ここでは、ズームの移動の自由度を活用するための「ズーム近軸解の設定と特性行列」、非球面の自由度を活用するための「3次および高次の収差係数」がポイント

表1 ズームタイプ発展における技術要素と設計自由度。

技術要素 ↓	高精度な鏡胴設計 と製造技術	高精度で低成本な 非球面レンズの製造 技術
設計自由度 ↓	ズーム移動（量） の自由度	非球面の自由度
ズームタイプ 発展	多成分移動のズー ムタイプ	非球面多用のズーム タイプ

となる。筆者らが試みた『設計解析』を紹介する。

- 1) ズーム解を大幅な近似を用いて、「大きさ」と「収差補正の容易性」を規定する2つのパラメーターに展開し、さらに後者を簡略化した「特性行列」で評価することで、光学仕様とズームタイプおよびズーム解の見通しを立てる⁸⁾。
- 2) 球面レンズには、光学仕様からくるズーム解に必要な近軸パワーと色収差の補正のみ負担させ、それ以外の収差補正は、非球面レンズで各面の3次収差係数を独立に設計することで、非球面を多用したズームレンズの初期解の見通しを立てる⁹⁾。

4. ズームタイプの発展例とその光学設計手法

4.1 主な製品領域とズームタイプ

最初に述べたように、ここでは一眼レフカメラ用の標準・望遠ズームレンズ、コンパクトカメラ用のズームレンズについて述べる。表2に、銀塩カメラにおける主なズームタイプを示す。ここではそのなかで特に、筆者が開発にかかわってきた特徴的なズームタイプの発展例(図1)を、発展の原形になったと思われる設計例(製品または特許の実施例)と合わせて紹介する。負正2成分タイプに関しては、1986年以前に発展したタイプなのでここでは割愛する。

4.2 ズームタイプの発展例と設計手法

4.2.1 一眼レフ用標準ズーム

この領域で発展の原形になった設計例、35-105 mmのズームレンズ¹⁰⁾は、特許ではなくいきなり製品として世に出てきた(図1,1)の左端例および図2(a))。全長が可変のズームタイプ(4成分ズームで、1群、3群、4群がズームで移動する、いわゆる多成分移動のズームタイプの原形でもある)による小型化には驚かされた。このレンズの出現によって、一眼レフ用標準高倍ズームの可能性が開けてきた。

図1の1)に、原型となった設計例から、さらなる小型化と高倍化の要求がズームタイプの発展を促した例を示す。ズームタイプとしては、ズーム解の改良はあるものの、本質的には原型となったタイプを踏襲している。発展例として典型的な2つの製品例を示す。このなかで35-105 mmの例¹¹⁾は、ズーム移動の自由度を活用したズーム解の改良と、4成分ズームの第4成分のレンズ形状の改良により小型化を達成した。小型化のために各成分のパワー配分が強くなったズーム解のなかで、球面レンズのみでは補正しきれない収差を非球面を活用し

て補正している。28-200 mm の例¹²⁾は、先の非球面技術に加え、4成分ズームの第1成分の移動量の大きさの自由度を活用したズーム解の改良により小型化と高変倍化の両立を図った発展例である。第1成分の移動量が大きくなっている。

きくなった分は、ズームの移動機構を2段にして繰り出している。

図2に、この間のズーム光学系の詳細比較を示す。小型化と高変倍化の発展度合いが明瞭にわかる。

表2 銀塩カメラにおける製品領域と主なズームタイプ。

用途	製品領域	ズーム比小	ズーム比大
一眼レフ カメラ用	広角領域	負正2成分タイプ	負正負正4成分タイプ
	標準領域	負正2成分タイプ	負正負3成分タイプ
	望遠領域	負正負3成分タイプ	負正負正4成分タイプ
コンパクト カメラ用	標準大口径領域	負正負正4成分タイプ	正負正負4成分タイプ
	望遠領域	正負正3成分タイプ	正負正負4成分タイプ
		正負正正4成分タイプ	正負正負5成分タイプ
		正負正負4成分タイプ	
		正負正正負5成分タイプ	
コンパクト カメラ用		正負2成分タイプ	正正負3成分タイプ
			正負正負4成分タイプ
			負正正負4成分タイプ

ゴシック体の部分が本解説で取り扱っている領域。

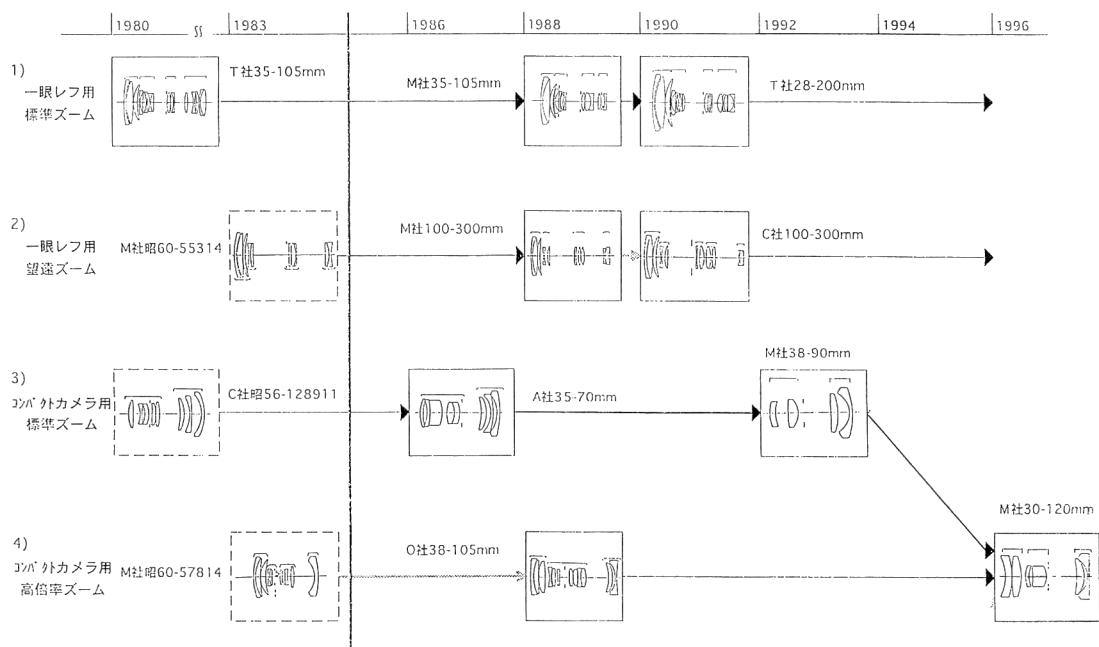


図1 最近10年間の特徴的なズームタイプの発展例。

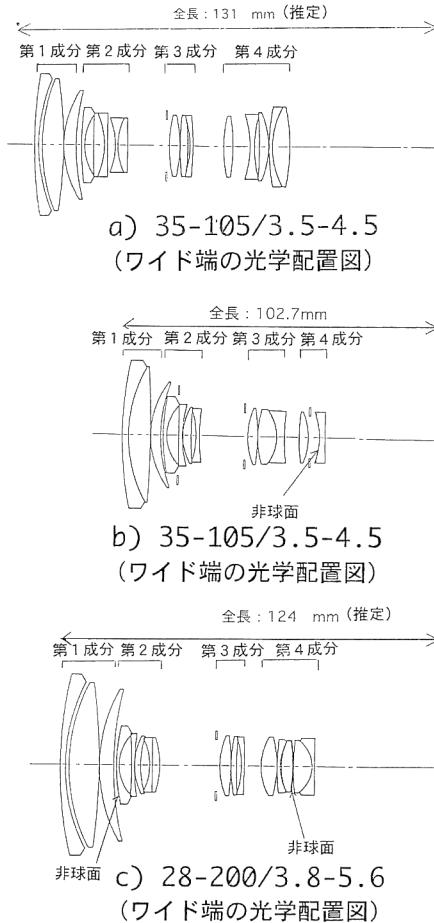


図2 一眼レフ用標準ズームの発展例。

さらに、図3に、先の35-105 mmのズームタイプを発展させたときに用いた設計手順を紹介する。このなかでは、ズームタイプの決定プロセスにおいて、3.2の1)で紹介した『設計解析』が有効に活用された¹³⁾。

4.2.2 一眼レフ用望遠ズーム

この領域で発展の原形になった設計例は筆者らが開発した一眼レフ用の望遠ズーム¹⁴⁾で、後に「ダブルレフオートズームタイプ」と呼んだ特許の実施例（図1,2 左端例）である。正負正負のパワー配置をもつ4成分ズームタイプで、特に第2成分のパワーが弱いことが特徴であり、超小型化、レンズ枚数の削減、誤差感度の減少に寄与している。一方このズームタイプは、本来はコンパクトカメラ用の標準ズーム¹⁵⁾（図1,4）の左端例）として開発されたもので、以後少しづつズームタイプを変えながらコンパクトカメラ用の高変倍ズームへも発展していく¹⁶⁾（4.2.4を参照）。

ズームズームの設計手順

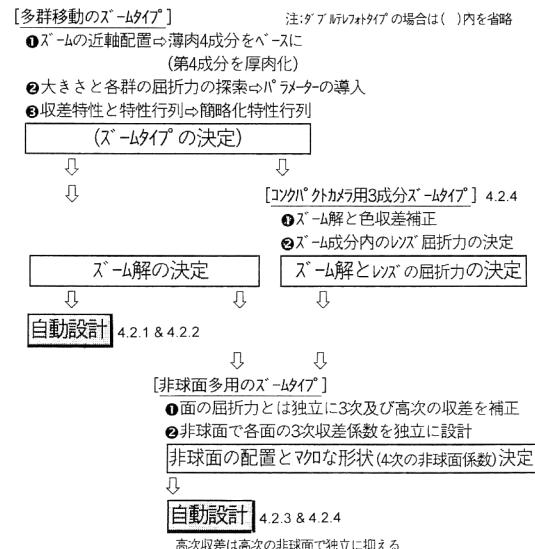


図3 各種ズームタイプにおける設計手法例。

図1の2)に、原型となったズームタイプから、望遠ズームの大幅な小型化の要求がズームタイプの発展を促した例を示す。ここでも先の3.2の1)で紹介した『設計解析』が有効で、ズーム移動の設計自由度と焦点距離領域から決まる最適なズーム解の決定により、大幅な小型化が達成できた¹⁷⁾。図3に、その際に用いた設計手順を紹介する¹⁸⁾。

先の標準ズームの例も含めて、ズーム移動の設計自由度が活用できた基盤技術としては、新しいズーム移動機構と高精度な鏡胴設計および製造技術の発展^{2,12)}が挙げられる。

4.2.3 コンパクトカメラ用の標準ズーム

この領域で発展の原形になった設計例は特許の実施例¹⁹⁾であった。一眼レフ用の2成分ズームタイプの物点と像点を逆転させたズームタイプ（図1,3）の左端例）で、見事な発想である。

コンパクトカメラ用のズームは比較的新しい製品領域で、カメラの急速な発展とその仕様拡大が撮影レンズのズーム化を促した。一方この領域の発展には、今まででは触れていなかったが、フィルムの高感度化による開放F値の自由度活用（望遠端でのF値が暗くできる）も見逃せない。

図1の3)に、小型化へのさらなる要求が、原型となったズームタイプのなかでのレンズ形状の改良を発展させた例を示す。

35-70 mm の例²⁰⁾ は、原型となったズームタイプから、設計自由度であるズーム移動量（特に、移動量の大きな第2成分の移動量）を最適なズーム解にコントロールして、実用化への道を開いた。38-90 mm の例では、コンパクトカメラの本質的な要件である小型・低価格化の要求を満たすために、非球面技術の徹底的な活用を図った。その結果、銀塗カメラ用ズームレンズとしては最小レンズ構成枚数の4枚構成のズーム光学系が達成できた^{21,22)}。図3に、その際に用いた設計手順を紹介する。

ここでは先の3.2の2)で紹介した『設計解析』が有効で、種々の光学仕様に対する非球面の適切な配置がズームタイプのさらなる発展につながった²³⁾。

4.2.4 コンパクトカメラ用の高変倍ズーム

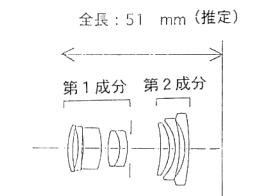
コンパクトカメラでは、ズーム比（結果的な望遠端の焦点距離）がカメラそのもののグレードを決める状況の下で、ズーム光学系の高変倍化（小型・低価格化を前提とした）の強い要求がズームタイプの発展を促した。図3の4)にその発展例を示す。

38-105 mm の例²⁴⁾ では、原型となったズームタイプは4成分ズーム（4.2.2参照）であったが、第2成分と第3成分の間隔を保ったままで一体で移動させる（正正負の3成分ズームにする）ことで、ズーム比の拡大と製品としての実用化を可能にした。次に30-120 mm の例²⁵⁾ では、さらなる高変倍化に対して、非球面を活用して3成分ズームの第2成分を薄くすることと、レンズ枚数の削減を図っていった。非球面の徹底的な自由度を活用した点は前節同様であるが、非球面の設計自由度が活用できない色収差の補正にズームの移動の自由度を活用した点が新たなポイントである。ズーム解と第2成分のレンズパワーの最適化で、高変倍ズーム（3成分以上のズームタイプ）としては最小レンズ構成枚数の6枚構成の4倍ズームを達成した。

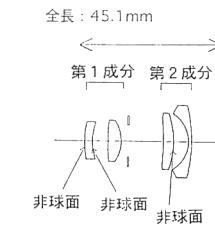
図3に、その際に用いた設計手順を紹介する。非球面の活用に関しては前節と同様であるが、『設計解析』として新たに1次の色収差係数が有効であった。

コンパクトカメラ用のズーム光学系は比較的新しい製品領域なので、ズームタイプの発展も目を見張るものがあり、この10年間で、ズーム比とレンズ構成枚数の関係からみても、8枚構成の2倍ズームが6枚構成で4倍ズームまで発展したことになる。図4に、この間のズーム光学系の詳細比較を示す。

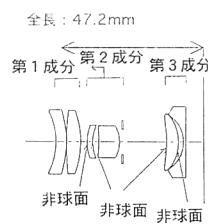
前節の標準ズームの例も含めて非球面の設計自由度が徹底的に活用できた基盤技術としては、高精度かつ低成本な非球面レンズの製造技術と、誤差感度を緩和す



a) 35-70/3.5-6.7
(ワイド端の光学配置図)



b) 38-90/3.5-7.7
(ワイド端の光学配置図)



c) 30-120/3.5-9.9
(ワイド端の光学配置図)

注:新システム対応オーマット

図4 コンパクトカメラ用標準・高変倍ズームの発展例。

るための組立て技術が挙げられる。硝子素材から成型のみで非球面を転写できる非球面ガラスモールドレンズの製造技術の確立²¹⁾が大きく貢献している。さらに後者に関しては、レンズを玉枠に組込む際に直接収差を測定して自動的にレンズを芯合わせする、調芯組立て技術²⁶⁾も同時に考案された。

今まで述べてきたように、強いユーザーニーズを背景に、設計自由度を与えるその時代の技術要素をいかに活用化するかが、設計技術発展の鍵である。カメラ用のズームレンズにおいても、今後も小型・コスト化、高変倍化に加えて、手ぶれ補正の要求、小型化のなかでも三次元的な小型化の要求が新たに出てきている。一方、設計自由度を与えてくれる技術要素としても、回折光学素子、屈折率分布光学素子の実用化が見え始めていて

る。さらに軸非対象光学系の活用によっても可能性が広がり、今後もますます新しいズームタイプが発展していくであろう。

筆者の限定した視点からみた「私的なズームタイプの発展と設計手法」になりすぎたきらいがあるが、設計現場の生の視点ということでご了承願いたい。

文 献

- 1) 小島 忠：“高倍率ズームの最新技術を探る”，写真工業 6 月号(1983) 77-84.
- 2) 得丸 祥：“最近の撮影用ズームレンズ”，光学, 8 (1987) 324-330.
- 3) 小島 忠, 宮前 博監修：ズームレンズの設計と評価（トリケップス, 1991).
- 4) 山路敬三：“ズームレンズの光学設計に関する研究”，キヤノン研究報告, No. 3 (1964).
- 5) 松居吉哉：レンズ設計法（共立出版, 1972).
- 6) 石山唱三, 坂野 誠, 小島 忠：“ズームレンズの新フォーカシン方式”，光学, 10 (1981) 364-371.
- 7) 得丸 祥：“ズームレンズの新フォーカシン方式”，光学, 12 (1983) 359-366.
- 8) 升本久幸：“「ダブルテレフォトズームタイプ」と各種ズームタイプの特性比較”，光技術コンタクト, 8 (1989) 465-472.
- 9) 大沢 聰：“非球面を多用した4枚構成ズームレンズの開発”，光技術コンタクト, 3 (1993) 67-73.
- 10) 中川治平：レンズ設計工学（東海大学出版会, 1986).
- 11) ミノルタカメラ：“テクニカルレポート”，写真工業 8 月号 (1988) 84-96.
- 12) タムロン：“レンズテクニカルレポート”，写真工業 4 月号 (1993) 76-82.
- 13) 升本久幸：“一眼レフカメラ用ズームレンズ”，ズームレンズの設計と評価（トリケップス, 1991) pp. 97-113.
- 14) 升本久幸：特開昭 60-55314.
- 15) 升本久幸：特開昭 60-57814.
- 16) 中川治平：“ズームレンズの歴史”，ズームレンズの設計と評価（トリケップス, 1991) p. 11-30.
- 17) 升本久幸, 小島亜矢子, 福島 省：“ダブルテレフォトズームタイプ”，ミノルタテクニカルレポート, 6 (1986) 26-36.
- 18) 升本久幸：“新規なズームタイプの解析と設計”，光学, 8 (1983) 515-522.
- 19) 田中一夫, 田島 晃：特開昭 56-128911.
- 20) 旭光学工業：“テクニカルレポート”，写真工業 2 月号 (1987) 81-89.
- 21) 福島 省：“APEX 90を中心とした撮影レンズにおける最近の非球面技術”，写真工業 11 月号 (1991) 88-95.
- 22) 大沢 聰, 岡田 尚, 福島 省, 升本久幸：“非球面を多用した4枚構成ズームレンズの開発”，第17回光学シンポジウム予稿集 (1992) pp. 69-70.
- 23) 大沢 聰, 萩森 仁, 升本久幸：“非球面を多用した4枚構成ズームレンズの開発（高倍率化と広角化）”，光学連合シンポジウム'92 予稿集 (1992) pp. 137-138.
- 24) オリンパス光学：“テクニカルレポート”，写真工業 6 月号 (1988) 81-88.
- 25) 萩森 仁：“LS用高倍率ズームレンズ光学系”，光技術コンタクト, 2 (1996) 68-73.
- 26) 北條誠考：“カメラ用ズームレンズ高精度調芯技術の開発”，日本写真学会誌, 5 (1995) 432-437.