

カメラ付携帯電話用撮像レンズの進展

福 嶋 省

Progress in Image Taking Lens for Camera-Equipped Mobile Phone

Akira FUKUSHIMA

Today, camera-equipped mobile phones have become one of the fastest growing markets in consumer markets, and production volumes of the camera module for mobile phone have been showing significant growth. At the same time, resolution and specification of the camera modules have been upgrading from CIF toward digital still camera level during past several years. It goes without saying that the most fundamental element comprising the camera module for mobile phone is an image taking lens. Even now, image taking lenses for the mobile phones are still developing in a different way from the image taking lenses for digital still cameras in order to deal with the trade-offs among image quality, compactness, cost and manufacturability. Reported here are the progress and recent technical topics of the image taking lens for camera-equipped mobile phone.

Key words: mobile phone, digital still camera, camera module, lens

カメラ付携帯電話の市場は、DDI ポケット（現ウィルコム）から1999年9月に発売された京セラ製端末VP-210（PHS）、翌年2000年11月にJ-PHONE（現ソフトバンクモバイル）から発売されたシャープ製端末J-SH04を皮切りに、2001年より成長を始めた。その後、撮影した画像をメールに添付するコミュニケーション手段が一般化され、また常に携帯している端末にカメラが搭載されているという利便性もあり、カメラ付携帯電話は、単焦点レンズ仕様のデジタルカメラ市場が淘汰されるほどのコンシューマー製品となった。カメラの解像度は当時CIF（11万画素）であったが、VGA（31万画素）、SXGA（130万画素）、UXGA（2M画素）を経て、現在ではQXGA（3M画素）またはQSXGA（5M画素）のカメラ付携帯電話も珍しくはない。また、2004年には光学ズーム機能搭載機種も上市されている。携帯電話向けカメラモジュールの撮像レンズやその周辺技術に着目すると、小型化への強い要求とその量産ボリュームの大きさを背景に、技術の進展スピードはかなり速い。

1. 市場動向

1.1 単焦点カメラモジュール

図1は、カメラ付携帯電話の世界市場における画素数別カメラ搭載予測を示す¹⁾。2006年度の携帯電話の出荷台数は10億台を上回り、搭載率もはじめて50%を上回った。画素数別で見ると、2007年度は海外でも高画素化が進み、2Mのカメラモジュールが急増している。最近では端末の薄型化が加速していることもあって、海外で3Mが普及するのは、CMOSセンサーメーカーが画素ピッチ1.75 μ mの1/4インチ3Mセンサーを本格的に製品化しはじめる2008年度になる見込みである。2010年度には15億台の端末が販売され、カメラの搭載率も70%を超え、その中で3M以上の構成比は30%程度を占め、画素数別で最も大きな構成比となるものと予想されている。

1.2 光学式ズームモジュール

図2は、光学ズームを搭載するカメラ付携帯電話の需要予測¹⁾を、カメラ映像機器工業会のデジタルカメラ出荷見通しと合わせてグラフ化したものである。現状ではポリ

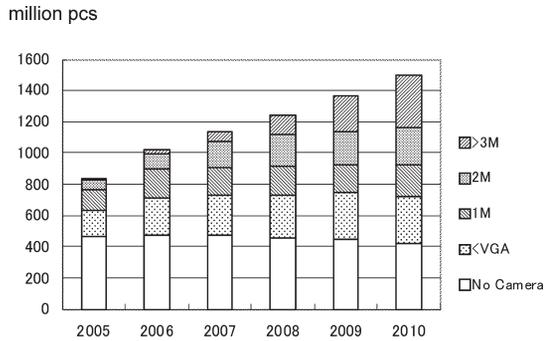


図1 世界市場における画素数別カメラ搭載予測。

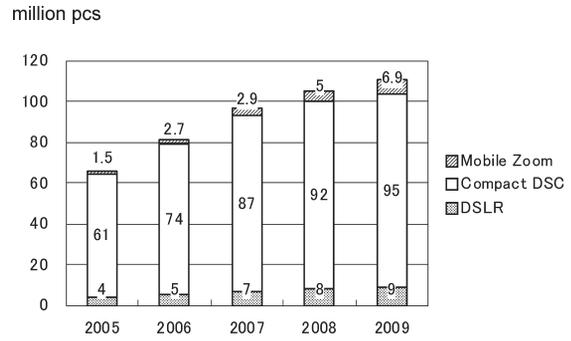


図2 光学ズーム搭載携帯電話の需要予測とデジタルカメラ出荷見通しの比較。

ームゾーンに搭載されるにはまだまだサイズが大きいいため、2009年度の需要予測でも690万台と、カメラ映像機器工業会のコンパクトデジタルカメラ出荷見通しの9500万台の約7%にすぎないが、徐々に数量は伸びていくと予想されている。

1.3 イメージセンサーの画素ピッチ微細化

表1に、画素ピッチとイメージセンサーのフォーマット、インチサイズを示す。携帯電話向けカメラモジュールのイメージセンサーは、今日ではそのほとんどがCMOSセンサーである。2007年には画素ピッチ $1.75\mu\text{m}$ のCMOSセンサーが商品化され、今後は、小型化と画素数が両立できる1/4インチサイズの3Mセンサーがボリュームゾーンになっていくと予想されている。また、同一インチサイズで画素数拡大という観点から、1/3.2インチや1/2.5インチのセンサーも画質重視のハイエンド機向けとして重要なセンサーとなっていくであろう。画素ピッチが $2.2\mu\text{m}$ から $1.75\mu\text{m}$ 、次世代では $1.4\mu\text{m}$ 、さらに将来的には $1\mu\text{m}$ クラスと微細化されるにつれて、回折による結像性能の劣化を無視できなくなるため、撮像レンズにはより明るいFナンバーが要求されてくる。

2. 小型化が要求されるカメラ付携帯電話用単焦点レンズ

カメラ付携帯電話用単焦点レンズと、過去のデジタルカメラ用単焦点レンズの差異を、図3(A)、(B)、(C)のレンズ断面図を参照しながら説明したい。なお、レンズ断面図は大きさの比較がしやすいよう、共通の撮像画面サイズで規格化した大きさに描画した。

2.1 デジタルカメラ用レトロフォーカス型単焦点レンズ

図3(A)は、1999年4月に発売されたニコンCOOLPIX E700のレンズ²⁾と同タイプの断面図を特許³⁾のレンズデータをもとに作成したものである(特許データのため実製品とは若干の相違がある可能性あり)。これは、固体撮像素子向けとして当時一般的であった、最も物体側に負屈折力のレンズ群を配置するレトロフォーカスタイプの5枚構成レンズである。このタイプは、固体撮像素子の前方にローパスフィルターやIRカットフィルターを配置するためのバックフォーカスが確保しやすい点、および固体撮像素子でのシェーディングを防止し光利用効率を高めるため射出瞳を比較的速くに行える点がメリットであるが、レンズ全長が大きくなりがちである。携帯電話向けのカメラモジュールの登場の前には、PCカメラや監視カメラ用途に、

表1 画素ピッチとイメージセンサーのフォーマット。

画面フォーマット	CIF	VGA	SXGA	UXGA	QXGA	QSXGA	QUXGA
	0.1M	0.3M	1.3M	2M	3M	5M	8M
解像度	352	640	1280	1600	2048	2560	3200
	288	480	1024	1200	1536	2048	2400
画素ピッチ (μm)							
3.30	1/12	1/7	1/3.3	1/2.7	1/2	—	—
2.80	1/14	1/8	1/4	1/3.2	1/2.5	1/2	—
2.20	1/18	1/10	1/5	1/4	1/3.2	1/2.5	1/2
1.75	1/23	1/13	1/6	1/5	1/4	1/3.2	1/2.5
1.40	1/28	1/16	1/8	1/6	1/5	1/4	1/3.2

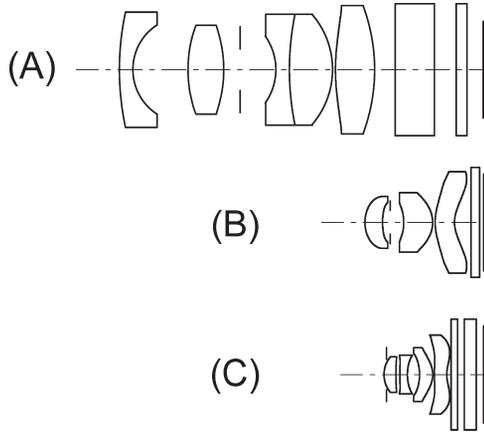


図3 デジタルカメラ用単焦点レンズとカメラ付携帯電話用単焦点レンズ。(A) 特開2000-47101 F2.8 画角62.7°, (B) 特許第3567327 F2.4 画角65.6°, (C) USP 7274518 B1 F2.8 画角60°。

プラスチック材料を用いた小型撮像レンズが多く開発された時期があったが⁴⁾、その多くがこのレトロフォーカスタイプであった。

2.2 携帯電話向けカメラモジュール用単焦点レンズ

2.2.1 1.3M～2M クラス向けレンズ

本報告では、VGA クラス以下の1～2枚構成のレンズについては割愛し、3枚構成以上のレンズタイプについて解説したい。1.3M～2M クラスでは図3 (B) に代表される、物体側より順に正屈折力の第1レンズ、絞り、正屈折力の第2レンズ、負屈折力の第3レンズという構成が知られている。図3 (B) は、この3枚構成レンズの代表的な特許⁵⁾のレンズデータをもとに作成した断面図である。このレンズは、正レンズ群の後ろに負の第3レンズを配置する、いわゆるテレフォトタイプの構成であり、全長の小型化には有利な構成である。収差補正に関しては、第1、第2レンズが絞りに対してコンセントリックな形状であるため、正レンズ群で発生する軸外諸収差を補正しやすい形状となっている。また、第3レンズの像側面は、中心から周辺にいくに従い負の屈折力が徐々に弱まり、周辺部においては正のパワーを有している面となっている。このような、非球面形状に変曲点を有する形状とすることで、画面周辺部での像面湾曲および歪曲収差を補正し、また固体撮像素子への主光線入射角を小さくする役割を担っている。このレンズタイプは、軸上色収差が補正不足になりがちだが、屈折力配置が物体側より順に正負正と並ぶいわゆるトリプレットタイプのレンズに比べ、製造誤差感度が小さいという特徴があり1.3M～2M クラスで多く普及したレンズタイプである。

2.2.2 3M～5M クラス向けレンズ

商品化が始まった画素ピッチ1.75 μm といった狭画素ピッチのイメージセンサー対応レンズでは、回折による結像性能の劣化を抑えるため、F ナンバーを十分明るくしなくてはならない。3枚構成のレンズでは、明るいF ナンバーで回折限界の設計性能を有する解を得るのが困難なため、図3 (C) に代表される4枚構成のレンズが開発されている。図3 (C) は、特許⁶⁾のレンズデータをもとに作成した断面図である。軸上光線通過高さの高い第2レンズに、高分散材料を用いる負レンズを配置することで、図3 (B) のタイプで補正不足になっていた軸上色収差や、球面収差、コマ収差を無理なく補正することが可能となる。この先イメージセンサーの進歩により、8M センサーや10M センサーを搭載するカメラモジュールが登場するのも時間の問題であるが、単焦点レンズの構成枚数としては生産性を考慮し4～5枚構成が上限であると予想される。

2.3 イメージセンサーへの主光線入射角特性

小型低背レンズとイメージセンサーへ入射する光束の主光線入射角特性（一般に chief ray angle の頭文字をとって CRA 特性とよばれる）は重要な関連がある。イメージセンサーとして固体撮像素子を用いる光学系の場合は、イメージセンサーへの主光線入射角をできるだけ小さく抑えること（すなわち射出瞳をできるだけ像面から遠ざけること）が重要となる。主光線入射角が大きくなると画面周辺部においてシェーディングが発生し周辺光量不足となったり、また隣接する画素間のクロストークが生じたりと、画質劣化の要因になってしまう。しかし近年、携帯電話向けカメラモジュールのイメージセンサーにおいては、オンチップマイクロレンズアレイのピッチを各画素のピッチよりわずかに小さく設定することで、撮像面周辺部にいくほど各画素に対し画素上のマイクロレンズは撮像レンズ光軸側へシフトして配置されるような構成となり、斜入射の光束を効率的に光電変換部に導くことができるようになっていく。さらに、各画素の光電変換部の開口効率の向上、色フィルターや層間膜の薄膜化、マイクロレンズのギャップレス構造等の技術の進歩もあり、イメージセンサーで発生するシェーディングやクロストークをより小さく抑えることができるようになってきた。一般的に撮像レンズの小型化と、射出瞳を像面から遠ざけることは相反する特性のため、イメージセンサーごとに異なる主光線入射角特性の許容レベルを十分に把握することが設計上重要である。図3 (A)、(C) のレンズのイメージセンサーへの主光線入射角の最大値を特許データからの光線追跡によって求めると、図3 (A) のレトロフォーカスタイプは3.5°以下であるの

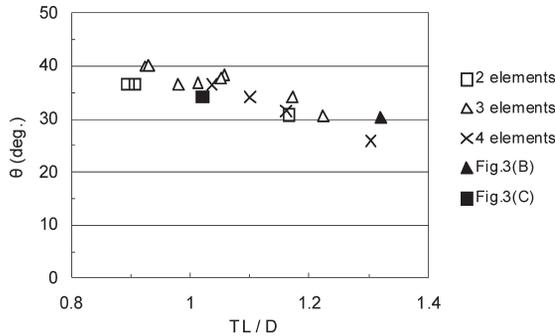


図4 レンズ全長と最大像高における近軸計算上の主光線入射角。

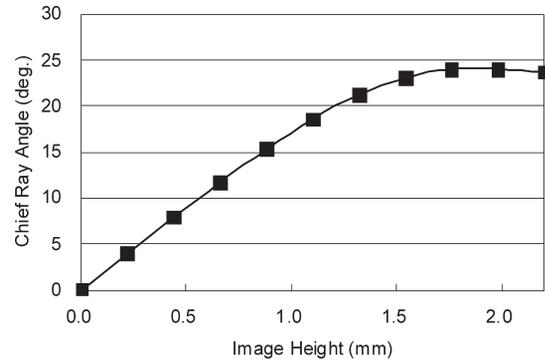


図6 図3(C)のレンズの主光線入射角の像高特性(最大像高2.2mm)。

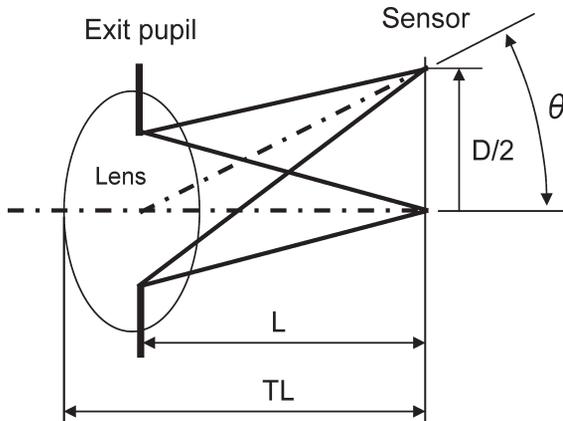


図5 最大像高における近軸計算上の主光線入射角 θ 。

に対し、図3(C)の携帯電話用レンズは最大 24° と大きな主光線入射角を有している。

図4は、コニカミノルタで開発した2~4枚構成のいくつかの携帯電話向けカメラモジュール用レンズと、上記の図3(B)、(C)のレンズについて、全長 TL (mm)とイメージセンサー撮像面对角線長 D (mm)の比に対して、最大像高(= $D/2$ (mm))におけるイメージセンサーへの近軸計算上の主光線入射角 θ ($^\circ$)をプロットした図である。ここで、近軸計算上の主光線入射角は、図5に示すように、像面からレンズ射出瞳までの距離を L として下式(1)で定義した。

$$\theta = \arctan(D/2L) \quad (1)$$

図4をみると、レンズ全長 TL/D が小さくなるにつれて、近軸計算上の主光線入射角が大きくなり、 30° を超えているレンズも多い。図6は、図3(C)のレンズの各像高でのイメージセンサーへの主光線入射角特性をプロットしたものである。画面周辺部において主光線入射角を 25° 程度に抑える必要があるため、おもに最も像側のレンズの非球面の作用により、 25° 以下に収まるようにしている。し

かし、図6の曲線の通り、小型化になればなるほど主光線入射角特性の線形性を損なうことになるため、イメージセンサー側でのシェーディング対策も簡単ではなく、レンズの小型化にあたってはイメージセンサーや後段の画像処理の対応力を十分に把握する必要がある。

今日、通常のデジタルカメラ用CCDでは主光線入射角は $8\sim 10^\circ$ 程度が上限であるが、携帯電話向けカメラモジュールに搭載されるCMOSセンサーでは 25° 程度またはそれ以上が許容されている。したがって、主光線入射角特性の緩和に対するイメージセンサーメーカーの努力がなければ、小型の撮像レンズは実現できなかったであろう。

2.4 黎明期の携帯電話向け光学式ズームレンズ

変倍光学系を搭載した携帯電話として最初に国内市場に登場したのは、シャープが2004年5月に発表したV602SH(変倍比2倍, 2Mセンサー)である。この光学系は厳密な定義ではズームレンズではなく、広角端と望遠端の2点だけを使用する「2焦点切り替え系」であった。その後、2006年9月には同じくシャープから、本格的な連続ズームレンズを搭載した910SH(変倍比3倍, 5Mセンサー)が発表された。最近では、2007年10月にSamsungが920SC(変倍比3倍, 5Mセンサー)、2007年11月にSony-EricssonがSO905iCS(変倍比3倍, 5Mセンサー)を発表している。一方、国際市場に目を転じると、コンパクトタイプのデジタルカメラと同様な沈胴方式のズームレンズを搭載した携帯電話が2004年以降、韓国市場で発売されているが、これらは電話機能付デジタルカメラというイメージに近い。携帯電話用に特化したものとしては、Nokiaが2006年4月に発表したN93(変倍比3倍, 3Mセンサー)に搭載されたものが世界初の本格的な携帯電話用ズームレンズである。

このように、各社からデジタルカメラに匹敵する仕様を達成したズームレンズ搭載機が発表・発売されている

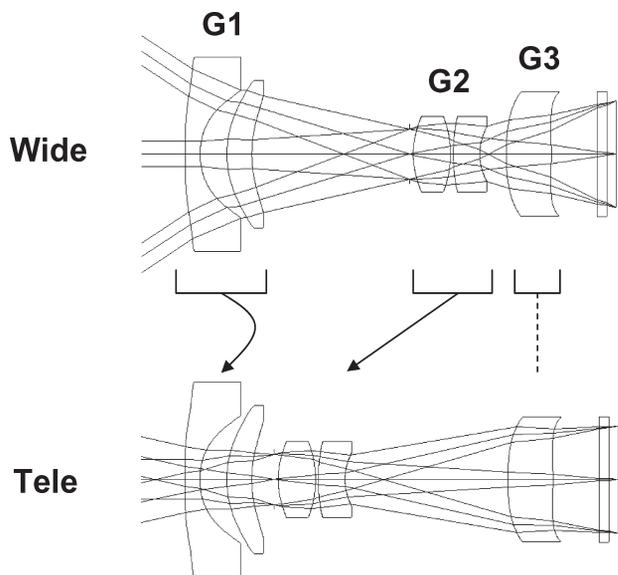


図7 製造誤差感度を考慮したズームレンズ。

が、機種数や流通量の点では、ズームレンズ搭載機は圧倒的少数派であり、市場的にはまだまだ黎明期にあるといえる。ズームレンズ搭載機が主流となっていない要因のひとつに、ズームカメラモジュールの大きさが挙げられると考える。ズームレンズはどうしても単焦点レンズよりも大きくなってしまいが、各社ではサイズ縮小に向け、光学設計的な努力とアクチュエーターを含めた機構設計的な努力が行われている。

光学設計的には、単にサイズを縮小すればよいというわけではない。ズームレンズに限らず光学系のサイズ（特に全長）を短縮しようとする時、製造誤差感度が增大する。ズームレンズでは変倍のためにレンズ群が移動する空間が存在するが、全長短縮のためにはその空間を短縮する必要がある。結果として、小さな移動量で所定の変倍比を得るために、レンズ群の屈折力を強くしなければならなくなる。これは単焦点レンズには存在しないズームレンズ特有の事情であり、全長短縮に伴う製造誤差感度の増大は、単焦点レンズよりもズームレンズのほうが顕著となる。したがって、ズームレンズにおいては、全長短縮と並行して製造誤差感度低減への努力が不可欠となる。

製造誤差感度を考慮したズームレンズの設計例を図7~9に示す^{7,8)}。図7に示したのは携帯電話搭載用に開発した負正正の3成分3倍ズームで、構成はコンパクトタイプのデジタルカメラ用ズームレンズによく見かけるタイプであるが、レンズ全長的には同じセンサーサイズのデジタルカメラ用ズームレンズに比べて約半分程度と、はるかに小さい。このズームレンズの第2群（4面とも非球面）に対して、レンズ面およびレンズ単体のシフト偏芯に対す

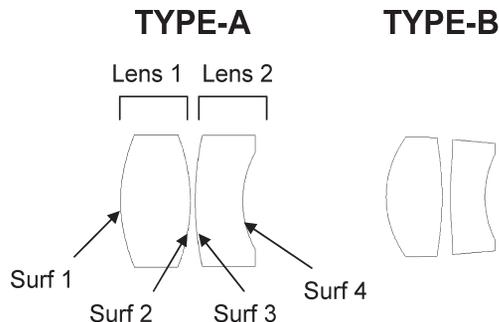


図8 図7のズームレンズにおける第2群の製造誤差感度低減設計。TYPE-A：誤差感度低減後、TYPE-B：誤差感度低減前。

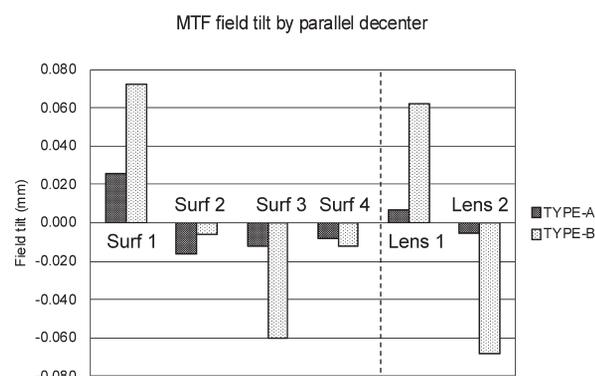


図9 図7のズームレンズにおける第2群の製造誤差感度低減結果。

る片ぼけ誤差感度低減が行われた。図8のTYPE-A、TYPE-Bは、それぞれ感度低減後と低減前の第2群である。図9は感度低減前後での片ぼけ誤差感度比較であり、縦軸は一定のシフト偏芯発生時の片ぼけ発生量を示す。図9から、大幅に製造誤差感度が低減できていることが見て取れる。これは製造誤差感度低減に非球面の自由度を活用した例であり、非球面活用の新たな方向性を示していると考えられる。

一方、全長短縮や携帯電話に搭載するうえでのメリットを有する、新たなズームタイプの開発への努力も必須である。図10は、前述したシャープ製910SHに搭載されたズームレンズと同タイプの断面図を特許⁹⁾のレンズデータをもとに作成したものである（特許データのため実製品とは若干の相違がある可能性あり）。この光学系は、負正正の4成分タイプで第2群と第3群が可動である。特徴的なのは、通常は負レンズと正レンズのペアを第1群とするところ、負レンズと正レンズを分割してそれぞれ単独の群とし、負レンズは固定、正レンズを可動としている点である。図7のズームレンズでは第1レンズ群はズーミング中

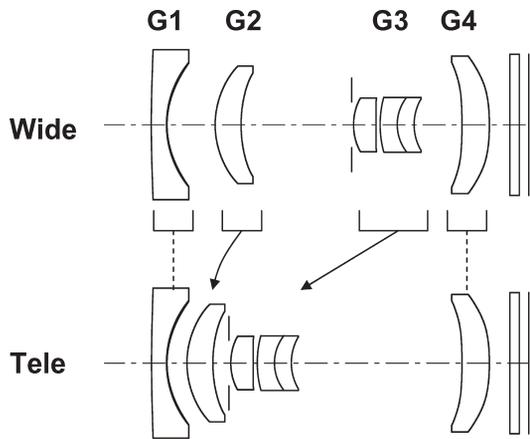


図10 特開2007-156417記載のズームレンズ。

可動であり、光学的に第1群はコンペンセーターの役割を担っている。一方、図10の光学系では、物体側の負正のペアを分割して第1レンズ（群）を固定とし、第2レンズ（群）をコンペンセーターとしている。携帯電話では、デジタルカメラよりも厳しい耐衝撃性が要求されるため、最も径が大きく重量もある第1レンズ群はズーミング中固定であることが機構設計上有利な場合があるが、図10のズームレンズはこの目的をも踏まえたものであると理解できる。

以上述べたように、携帯電話に搭載されるズームレンズは、市場的には黎明期にあるが、技術的には数々の新技術が盛り込まれてきている。最近では液体レンズ¹⁰⁻¹²や液晶レンズ¹³に代表される屈折力可変光学素子の進歩が著しく、これらの光学素子を用いてズームレンズの可動群を減らす検討もなされている¹⁴。今後も新技術を盛り込みつつ、携帯電話用ズームレンズの小型化、高画素対応の流れは続いていくものと考えられる。

3. 生産性向上へのアプローチ

3.1 プラスチックレンズの有効活用

携帯電話向けカメラモジュールの量産ボリュームの大きさから、それに耐えられる非球面プラスチックレンズがカメラモジュールを支え続けている¹⁵。生産設備が整うにつれ、ガラスモールドレンズも使用されてはいるがまだまだ数は少ない。射出成形により製造されるプラスチックレンズは、有効径外のフランジ部も高精度に寸法を維持することができるため、複数枚の各レンズのフランジ部を直接径嵌合させ同軸度を、端面を突き当てることで面間隔の精度を確保することができる。これらプラスチックレンズの利点を生かし、全自動組み立てを前提としたモジュール構造設計の例を紹介する¹⁶。

図11にマクロ切り替え機構付カメラモジュールの断面図を、図12にレンズユニット部の斜視図を示す。固体撮像素子はカメラプロセッサー一体のCMOSセンサーで、周辺受動部品やコネクターとともにPWB (printed wiring board) 上にペア実装される。イメージセンサー部はPWBに接着されたハウジングと、ハウジングに接着されたカバープレート（光学プラスチック材料からなる平行平板）により完全に封止され防塵される。このカバープレートは、CMOSセンサー表面で撮像エリア外の信号処理部に直接当接する脚部をもち、同時にレンズユニットの受け面となる基準面が一体成形されている。カメラユニット本体の組み立てとは別の工程で組み立てられるレンズユニットは、プラスチックレンズ3枚を高精度なフランジ部を基準に直接嵌合し接着したもので、第3レンズはカバープレート受け面に当接する脚部をもち、レンズユニットもカバープレートと同様にハウジングに落とし込まれ、その後マクロレバー、コイルスプリング、モジュールヘッドを組み込み、

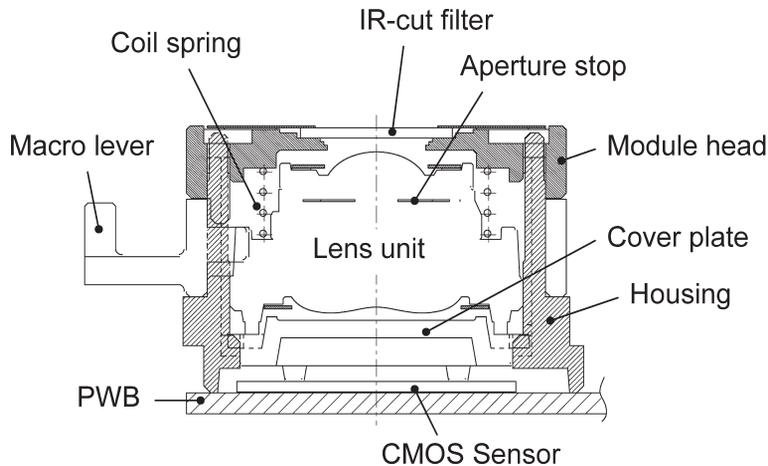


図11 全自動組み立てを前提としたカメラモジュール断面図。

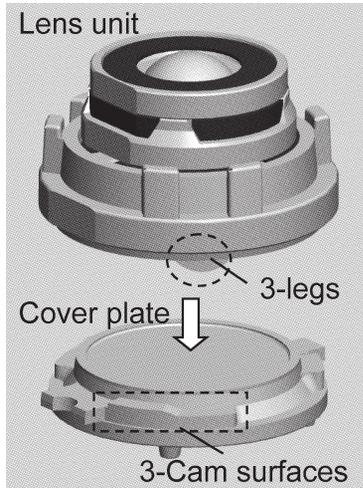


図12 プラスチックレンズの形状自由度を利用したマクロ切替機構。

IR カットフィルターで蓋をする。構成部品はすべて図11の上側からの落とし込みによって組み立てられるため、レンズユニットおよび本体カメラユニットともに自動機による完全自動組み立てが可能である。また、光学性能に影響する寸法はすべて高精度なレンズ部品で決定される構造とすることで、バックフォーカス誤差量を焦点深度に対し所定比率以下に抑えることができ、カメラモジュール組み立て時のピント調整は省略している。なお、プラスチックレンズの形状自由度を生かし、カバープレートには通常撮影時とマクロ撮影時の2つの受け面を形成し、マクロレバーでレンズユニットを回転することにより当接位置が変わり、それぞれの撮影時に対応してレンズユニットをカメラモジュール内で移動させることができる。

3.2 カメラモジュールの半田リフロー実装への流れ

最近では、カメラモジュールを携帯電話基板へ実装する際のスペース効率の向上（コネクタのスペースが省略可能）と製造効率化の観点から、半田リフロー方式によるカメラモジュールの実装が検討されており¹⁷⁾、一部商品化もなされている。半田リフロー方式とは、ペースト状の半田をプリント基板に塗布した後高温のリフロー炉に通し、半田を溶かして実装する方法である。鉛フリー半田では約270°Cの炉に通す必要があり、携帯電話向けの撮像レンズには、高耐熱性が強く要求されるようになってきた。この流れは、携帯電話のメインカメラではなく、画面で相手を見ながら会話する際に使用するVGAクラスのサブカメラにまず普及しつつある。従来からのプラスチックレンズ用の熱可塑性光学樹脂ではこれほどの耐熱性はなく、またガラスモールドレンズでは、その金型寿命の点で生産性に限界があるため、平板ガラス上に硬化性樹脂によってレンズ

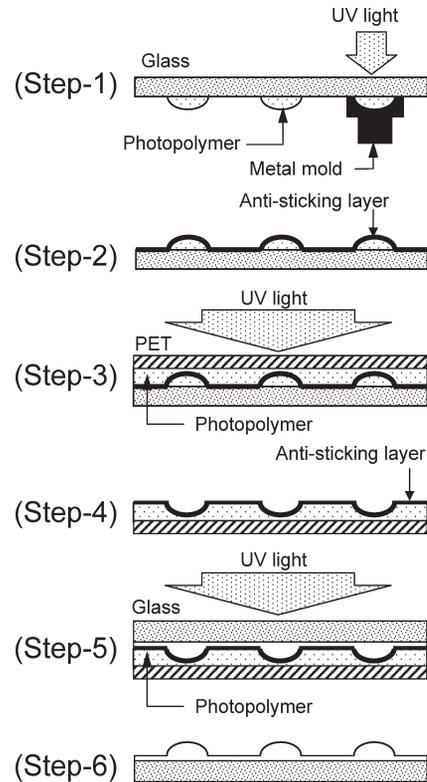


図13 紫外線によるエンボッシング工程。(Step-1) mastering, (Step-2) anti-sticking of master surface, (Step-3) soft molding, (Step-4) anti-sticking of soft-mold surface, (Step-5) lens replication, (Step-6) final lens-embedding wafer.

部を形成してレンズの耐熱性を高めるという技術が報告されている¹⁸⁾。

3.3 ウェハースケールレンズの登場

上記の半田リフロー方式の流れから、ガラスウェハー上に高耐熱性のUV硬化樹脂を用いてマイクロレンズを多数形成し、マイクロレンズが形成されたガラスウェハーを複数枚スタックすることにより撮像レンズを形成する、ウェハースケールレンズの開発が盛んになってきている¹⁹⁻²¹⁾。図13に、ウェハースケールレンズの重要な技術であるUVエンボッシングを用いたレンズの複製プロセスを示す²¹⁾。高精度金型を用いてマスターテンプレートを作製し(Step-1)、そのテンプレートからUVエンボッシングによりソフトモールドを作製(Step-3)、そのソフトモールドを用いてもう一度UVエンボッシングを行い(Step-5)多数のマイクロレンズが形成されたガラスウェハーを作製する(Step-6)というプロセスである。高画素対応のレンズとするためには、複数ウェハーをスタックした際の精度の確保が課題であると予想されるが、生産性は高く、携帯電話用撮像レンズの新たな製造方法のひとつである。

4. カメラ付携帯電話用撮像レンズの今後

本報告では、カメラ付携帯電話用の撮像レンズにフォーカスし、これまでの進展と最新技術動向を紹介した。携帯電話向けカメラモジュールは、1つの方向としては、さらなる高画素対応、光学ズーム搭載や手振れ補正など、ある意味ではデジタルカメラの進展と類似した光学系開発の方向性と、もう1つにはウェハースケールレンズに代表される多量生産に適した光学系開発の方向性の2つがある。いずれにせよ、携帯電話市場が巨大市場である限りは、今後も新たなアプローチが積極的に試されていく光学技術分野である。

文 献

- 1) (株)ブレンチャイルド：カメラ付携帯電話用マイクロアクチュエータの開発動向と需要予測 (2007年3月26日)。
- 2) 芝山敦史, 鈴木憲三郎, 大下孝一：“デジタルカメラレンズシステムの開発”, 光設計研究グループ機関誌, **21** (2000) 16-23.
- 3) 鈴木憲三郎：特開2000-47101.
- 4) 堂 智：“CCDV用プラスチックレンズの応用”, 光アライアンス, 10月号 (1998) 5-10.
- 5) 篠原義和：特許第3567327 (2004).
- 6) H. C. Tang and C. S. Chen: U.S. Patent No. 7274518 B1 (2007).
- 7) S. Ozawa, K. Matsusaka, R. Yoshida and T. Yuasa: “Ultra compact zoom lens unit which uses glass-mold lenses,” *International Congress of Imaging Science* (2006) pp. 22-24.
- 8) K. Matsusaka, R. Yoshida, T. Yuasa, Y. Souma and S. Yamaguchi: “Recent technology of optical zoom lens for mobile phone,” *Joint Symposium by OSK and OSJ on Optics Design & Fabrication* (2007) pp. 4-5.
- 9) 上田 稔：特開2007-156417.
- 10) B. H. Hendriks, S. Kuiper, M. A. J. Van As, C. A. Renders and T. W. Tukker: “Electrowetting-based variable-focus lens for miniature systems,” *Opt. Rev.*, **12** (2005) 255-259.
- 11) B. Berge: “Variable focus lens for mobile phone applications,” *Optics Japan 2005 講演予稿集* (2005) pp. 156-157.
- 12) B. Berge: “Liquid lens technology for adaptive optics: Principle, physical limitation and application,” 第31回光学シンポジウム予稿集 (2006) pp. 55-56.
- 13) 橋本信幸, 栗原 誠：“液晶分布屈折率型量子化レンズの特性と可変焦点光学素子への応用”, 第31回光学シンポジウム予稿集 (2006) pp. 53-54.
- 14) F. C. Wippermann, P. Schreiber, A. Bräuer and P. Craen: “Bifocal liquid lens zoom objective for mobile phone applications,” *Proc. SPIE*, **6501** (2007) 650109.
- 15) 篠原義和：“小型撮像装置に用いられるプラスチックレンズ”, 光設計研究グループ機関誌, **32** (2005) 33-38.
- 16) S. Yamaguchi, H. Sato, N. Mori and T. Kiriki: “Recent technology and usage of plastic lenses in image taking objectives,” *Proc. SPIE*, **5872** (2005) 58720E.
- 17) 技術情報協会セミナーテキスト「リフロー対応カメラモジュール・レンズの最新技術動向」(セミナー No. 710462).
- 18) 例えば, 堂 智：特許第3929479 (2007).
- 19) M. Salt and M. Rossi: “Replicated micro-optics for multimedia products,” *Proc. SPIE*, **6196** (2006) 61960F.
- 20) A. Bräuer, P. Dannberg, J. Duparre, A. Brückner, F. Wippermann, P. Schreiber and D. Michaelis: “Microoptical solutions for imaging and displays,” *13th Microoptics Conference* (2007) pp. 330-331.
- 21) H.-S. Jeong, I.-C. Chang, H.-S. Yoo and H.-R. Oh: “New fabrication method and planar optics for slim camera lens,” *Joint Symposium by OSK and OSJ on Optics Design & Fabrication* (2007) pp. 6-13.

(2008年2月1日受理)