

超高画質カラーリバーサルフィルム 「フジクローム プロビア 100F ,400F」の開発

池田 秀夫* , 原口 暢之* , 長岡 克郎* , 首藤 定伸* ,
桑島 茂* , 金房 邦彦* , 坂東 信介*

Development of Super High Image Quality Color Reversal Films “ FUJICHROME PROVIA 100F and 400F ”

Hideo IKEDA* , Nobuyuki HARAGUCHI* , Katsuro NAGAOKA* , Sadanobu SHUTO* ,
Shigeru KUWASHIMA* , Kunihiko KANAFUSA* , and Shinsuke BANDO*

Abstract

As Color reversal film images are often enlarged by high magnification, it is very important to improve their image quality. In the summer of 2000, Fuji Photo Film released two new color reversal films having ISO speed of 100 and 400 with much finer granularity than those of their predecessors. In this paper, we will describe the features and new technologies implemented in the two new films, FUJICHROME PROVIA 100F and 400F.

1. はじめに

カラーリバーサルフィルムは、プロやハイアマチュアのユーザーに使用される頻度が高く、その画像は拡大のための原稿として使用されることが多い。印刷業界では、カラーリバーサルフィルムの画像をスキャナーでデジタル画像として読み取り、その画像情報を利用して大伸ばしの印刷物を作成することが日常的に行われている。このように、カラーリバーサルフィルムの画像を高拡大倍率で利用する場合、粒状性が優れているほど高画質の画像を得ることができるため、粒状性のさらなる改良が望まれていた。

上記市場ニーズに応え、富士写真フィルム(株)は、従来のカラーリバーサルフィルムから粒状性を大幅に改良した「フジクローム プロビア 100F (RDP III)」と「フジクローム プロビア 400F (RHP III)」を2000年の夏に市場導入した。

本報告では、プロビア 100F とプロビア 400F の特長とそれらを実現した主要技術について紹介する。



Photo 1 FUJICHROME PROVIA 100F.



Photo 2 FUJICHROME PROVIA 400F.

本誌投稿論文 (受理 2000 年 12 月 12 日)

* 富士写真フィルム(株)足柄研究所
〒 250-0193 神奈川県南足柄市中沼 210

* Ashigara Research Laboratories, Fuji Photo Film Co., Ltd.
Minamiashigara, Kanagawa 250-0193, Japan

2. プロビア 100F , 400F の特長

新製品プロビア 100F およびプロビア 400F の主な特長を Table 1 にまとめた。

Table 1 Features of FUJICHROME PROVIA 100F and 400F.

特長	プロビア 100F	プロビア 400F
1. 超微粒子	世界最高の粒状性 (RMS 粒状度 8)	ISO400 で世界最高の粒状性 (RMS 粒状度 13)
2. 抜群の増減感処理適性	- 1/2 ~ + 2 絞りの増減感処理で階調・カラーバランス変化小	- 1/2 ~ + 3 絞りの増減感処理で階調・カラーバランス変化小
3. 優れた色再現性と調子再現性	<ul style="list-style-type: none"> 忠実かつ高彩度の色再現性 滑らかでつながりの良い肌色再現性 	<ul style="list-style-type: none"> ISO100 クラスの高彩度な色再現性 ISO100 クラスの豊かな調子再現性

第一の特長は、世界最高の粒状性にある。プロビア 100F は、あらゆるカラーリバーサルフィルムの中で世界最高の粒状性を実現した。プロビア 400F も ISO 400 の高感度カラーリバーサルフィルムの中で世界最高の粒状性を実現した。

第二の特長は、100F、400F とも抜群の増減感処理性を有していることである。100F では、-1/2 絞りの減感処理から +2 絞り増感 (感度 400 相当) の範囲において、増減感処理にともなう階調変化とカラーバランス変化が画期的に改良されている。高感度フィルムの 400F では、スポーツ写真や夜景撮影などで超高感度領域まで増感処理される頻度が高いことを想定し、さらに +3 絞り増感 (感度 3200 相当) までの増感処理適性が付与されている。

第三の特長は、色再現性と調子再現性の向上である。プロビア 100F は、従来のプロビア 100 の特長であった汎用フィルムに必須な忠実かつ高彩度の色再現性を踏襲しつつ、ハイライトの調子再現性を向上させてより一層滑らかな肌色再現を実現した。プロビア 400F は、高感度フィルムは低彩度で硬調というこれまでのイメージを完全に払拭し、ISO 100 クラスのフィルムに匹敵する高彩度の色再現性と豊かな調子再現性を実現した。

3. 粒状性

3.1 粒状性の向上

よく知られているように、カラーフィルムの粒状が細かいと画像の見た目のスムーズさが増し、高画質の写真が提供できる。印刷や拡大プリントの原稿として使用されることが多いカラーリバーサルフィルムの場合には、特に高画質化が重要である。

カラーリバーサルフィルムを単純に高拡大倍率 (たとえば、135 サイズからポスターサイズ程度の拡大) で印刷すると、粒状のざらつきとシャープネスの低下が生じる。粒状のざらつきは、フィルムのミクロ濃度のばらつきが拡大によって見えてきたものである。一方、シャープネスの低下は、カメラレンズやフィルムの乳剤層を通過する際の光の散乱により、特に、高周波数領域のコントラストが低下するためである。拡大によって劣化した

シャープネスは、アンシャープマスクなどのデジタル処理によって強調することが可能であるが、このとき、シグナル (画像のコントラスト) のみならず、同時にノイズ (粒状) も強調してしまう。したがって、シャープネス強調後の画像のトータル品質を損なわないためには、フィルムの粒状性をより改良する必要がある。

Fig. 1 の左側に、従来のプロビア 100 (RDP II) の 135 サイズ画像を示し、Fig. 1 の右側にはこの画像を 5 μ m のアパーチャーサイズのスキャナーで読み込み、20 倍に拡大した画像の一部を示す。この画像から、高倍率拡大によって粒状はざらつき、画像のシャープネスも劣化することがわかる。

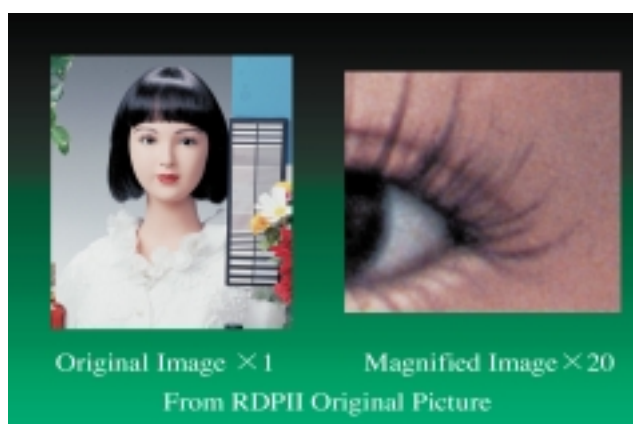


Fig. 1 Influence of magnification on image quality.

拡大により劣化したシャープネスは、アンシャープマスクなどのデジタル処理によって強調することが可能である。Fig. 2 に、シャープネス強調処理前後の画像を示す。これらの画像を比較すると、シャープネス強調処理によってシャープネスの劣化は回復できるが、このとき、同時に粒状性の悪化が生じることがわかる。



Fig. 2 Influence of sharpness enhancement on image quality.

一方、フィルムの粒状性を改良すると高い倍率の拡大に必要なシャープネス強調が可能となり、オリジナル画像をより細かく再現できるようになる。すなわち、画像のトータル品質を向上させることが可能となる。

Fig. 3に、RDP IIの拡大画像と、粒状性を改良したRDP IIIの拡大画像をシャープネス強調処理した画像を示す。右側のRDP IIIの画像は、左のRDP IIの拡大画像と粒状性がほぼ同等でシャープネスに優れており、トータルの画質が向上していることがわかる。

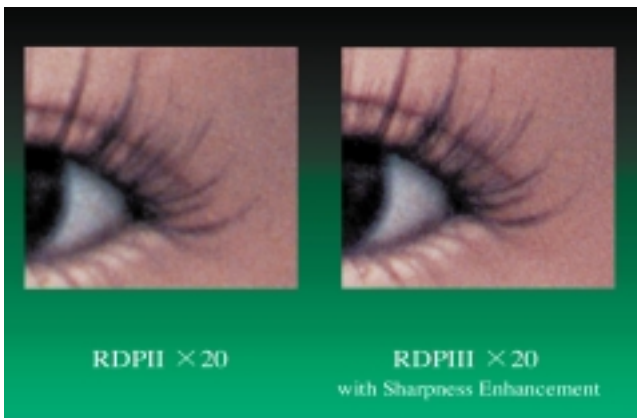


Fig. 3 Influence of sharpness enhancement on image quality for the fine grain film.

Fig. 4に、富士写真フィルム(株)が製品化したカラーリバーサルフィルムについて、RMS粒状度*の変遷を示した。このように、当社は着実に高画質化を実現してきており、今回開発したRDP IIIとRHP IIIでより一層の粒状の微細化が達成されている。

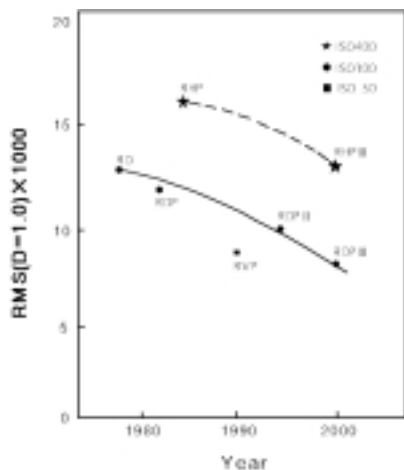


Fig. 4 RMS granularity improvement in Fuji's color reversal films.

Fig. 5に、プロビア 100F(RDP III)、400F(RHP III)のRMS値を、従来製品のプロビア 100(RDPII)、プロビア 400(RHP)とそれぞれ比較した図を示す。また、MTF特性を同様に比較した図をFig. 6に示す。新フィルムのRDP IIIとRHP IIIは、従来のRDP IIおよびRHPに比べて明らかに優れた粒状性を示している。また、粒状性のみならずシャープネスも大幅に改良されていることがわかる。

* RMS粒状度：最低濃度プラス1.0のマイクロ濃度のばらつき標準偏差(RMS値)を、1,000倍した値

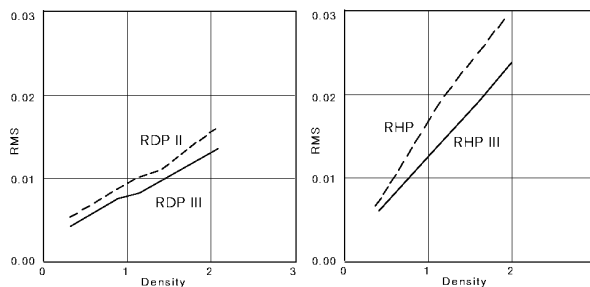


Fig. 5 RMS granularities of RDP III (vs. RDP II) and RHP III (vs. RHP).

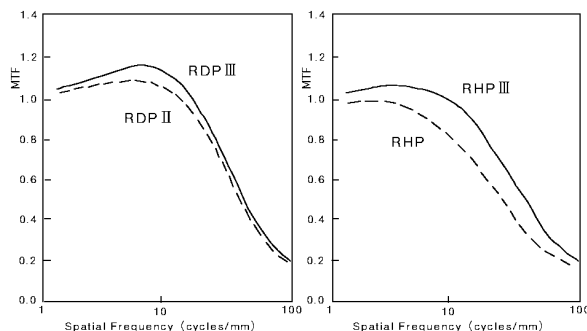


Fig. 6 MTF curves of RDP III (vs. RDP II) and RHP III (vs. RHP).

3.2 粒状性改良技術

3.2.1 Super Fine Sigma Crystal 技術

プロビア 100Fおよび400Fに導入された Super Fine Sigma Crystal (SFSC)技術により、従来のフィルムよりも小さいサイズの粒子でありながら同じ感度を保つことができるようになった。

Fig. 7に、SFSC技術の概念図を示す。SFSC技術は、第一にハロゲン化銀粒子の形をより平板化して受光面積を増やし、光吸収量をアップさせた。第二に、電子トラップに加え、正孔トラップをハロゲン化銀粒子に導入することにより、電子と正孔の再結合による潜像破壊のメカニズムを防止し、潜像形成効率を向上させた。この第二の技術は、低照度相反則不軌特性の向上による長時間露光適性の改良を同時にもたらしている。

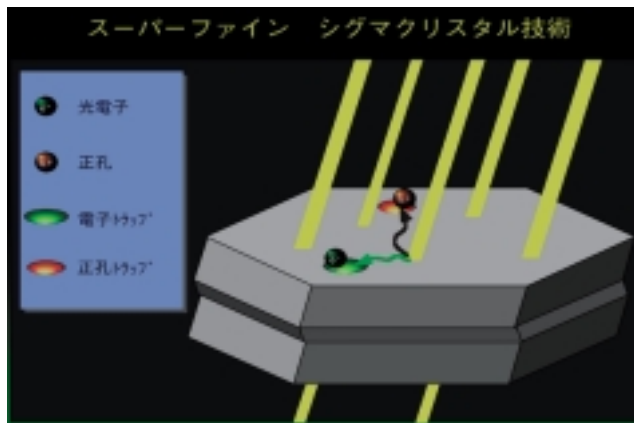


Fig. 7 Schematic illustration of Super Fine Sigma Crystal (SFSC) technology.

微粒子化の一例として、Photo 3 に RDP II と RDP III の各々について、人間の目に最も敏感なマゼンタ色素画像を形成する緑感性乳剤層の断面写真を示した。この写真から、RDP III のハロゲン化銀乳剤粒子は、より平板状でサイズが小さくなり、粒子の個数が増加していることがわかる。RDP III の緑感性乳剤の体積は RDP II 粒子の約 1/2 になり、粒子個数は約 2 倍になっている。

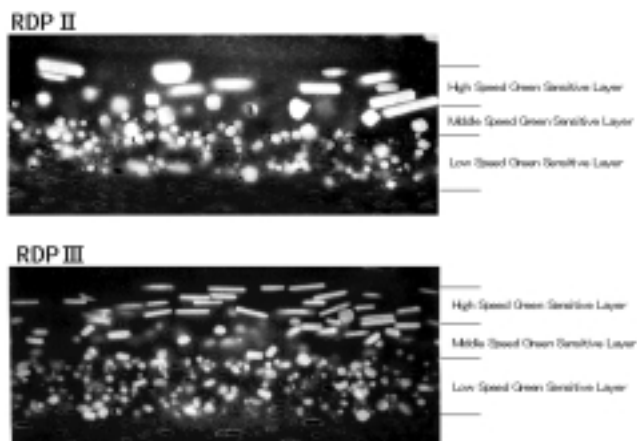


Photo 3 Cross sections of the green sensitive layers in RDP II and RDP III.

Photo 4 に、RDP II および RDP III の緑感性高感度乳剤層粒子の電子顕微鏡写真を示した。RDP III の乳剤粒子は均一性が増し、微粒子化されていることがわかる。

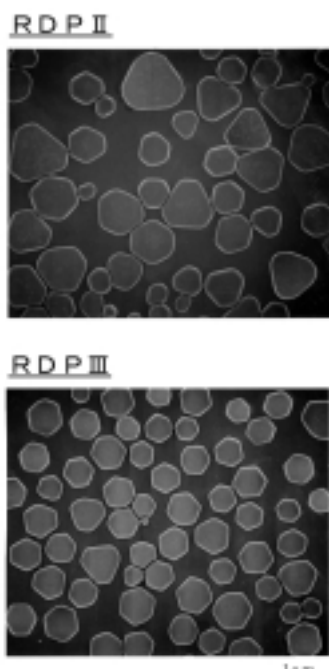


Photo 4 Emulsion grains used in the high speed green sensitive layers of RDP II and RDP III.

3.2.2 Micro Grain Solubility Control 技術

前述の SFSC 技術により、乳剤粒子の微粒子化が可能

となるが、リバーサルフィルムの粒状性改良に結びつけるためには、溶解度の高い微粒子の現像処理中の溶解性をコントロールする必要があった。

Fig. 8 は、粒子サイズの異なるハロゲン化銀乳剤をそれぞれ塗布した試料を作製し、これらの試料をカラーリバーサル処理した際の透過濃度 0.5 における RMS 値を求め、この値を粒子体積の平方根に対してプロットしたものである。

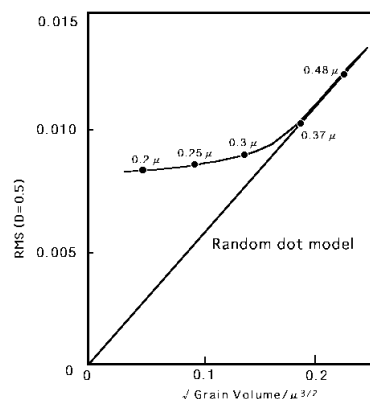


Fig. 8 Relationship between square root of grain volume and RMS granularity value (D=0.5).

粒状 (RMS 値) がランダムドットモデルに従うとすれば、粒状は次式で示される²⁾。

$$A^{1/2} \cdot d = D/n^{-1/2} = DV^{1/2}$$

- A : 開口面積
- d : RMS 透過変動
- D : 開口平均光学濃度
- n : 開口平均粒子数
- V : 開口平均粒子体積

すなわち、粒状は $1/\sqrt{\text{粒子数}} = \sqrt{\text{粒子体積}}$ に比例することになる。しかしながら、カラーリバーサル処理では、球相当直径 0.3μ 以下のサイズ領域ではランダムドットモデルからの逸脱 (粒子サイズを下げてても粒状が良化しないという現象) が起こる。この問題を解決したのが微粒子溶解制御技術: Micro Grain Solubility Control (MGSC) 技術である。

Fig. 9 に、MGSC 技術の概念図を示す。リバーサル処理の第 1 現像液中にはチオシアン酸カリウムのようなハロゲン化銀溶剤が含まれており、化学現像に加えて溶解物理現象が起こるように設計されている。これは、未感光ハロゲン化銀粒子の溶解を促進することにより、透過鑑賞フィルムに必要なハイライトの抜けを良くするためであり、さらに、インターイメージ効果の強調や増感処理適性の付与にも寄与している。このように、溶解物理現象はカラーリバーサル処理の系では必須のものであるが、ハロゲン化銀粒子が微粒子になり溶解性が高まると、必要以上に作用して、粒状がランダムドットモデ

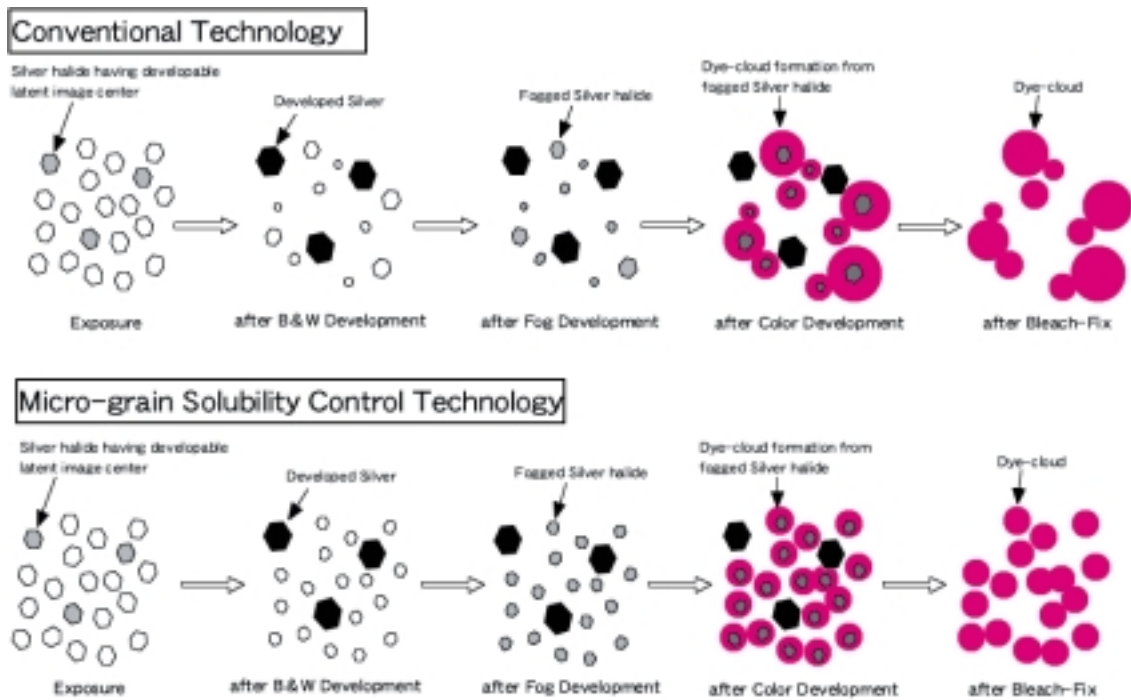


Fig. 9 Micro Grain Solubility Control (MGSC) technology.

ルから逸脱する原因となる。すなわち, Fig. 9の上側の図に示したように, 感光した粒子の周辺で未感光微粒子の溶解が起こり, 続くカラー現像で, 不均一かつ像の抜け穴のある色像が形成されるため粒状が悪化する。

Fig. 9の下側の図に, MGSC技術を導入後の変化を示した。すなわち, 第1現像での微粒子の溶解を抑制し, 続くカラー現像で, 画像に変換される粒子の均一性と数を増大させることにより, 粒子サイズが小さな領域でも微粒子化により粒状をさらに良くすることを可能にした。

4. 増減感処理性

4.1 増減感処理性の向上

透過型の鑑賞用メディアであるカラーリバーサルフィルムは, カラーネガなどに比べ露光ラチチュードが狭いために, 露光量の過不足を適正に補正する目的で増減感処理が頻繁に行われる。このため, カラーリバーサルフィルムの増減感処理性能向上に対する要求はきわめて高い。従来のフジクロームも優れた増減感処理適性を有していたが³⁾, プロビア100Fおよび400Fでは, さらに増減感処理適性を向上させた。

プロビア100F(RDP III)の増減感処理特性を, 従来製品のRDP IIと比較したものを Fig. 10に示す。RDP IIIは, RDP IIに比べ増減感処理でのカラーバランスの崩れと階調変化がきわめて小さくなっていることがわかる。RDP IIとRDP IIIの増減感処理性能を比較した Photo 5からも, RDP IIIでは増減感処理に伴うカラーバランス変化と階調変化が小さいことがわかる。

高感度フィルムの400F(RHP III)では, より一層増感処理される頻度が高いことを考慮し, +3絞増感(感度3200相当)までの増減感処理性能が付与されている(Fig. 11)。

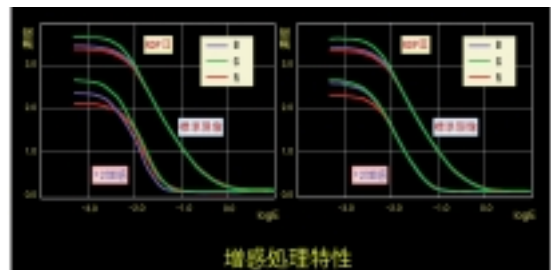


Fig. 10 Push-processing characteristic curves of RDP II and RDP III.

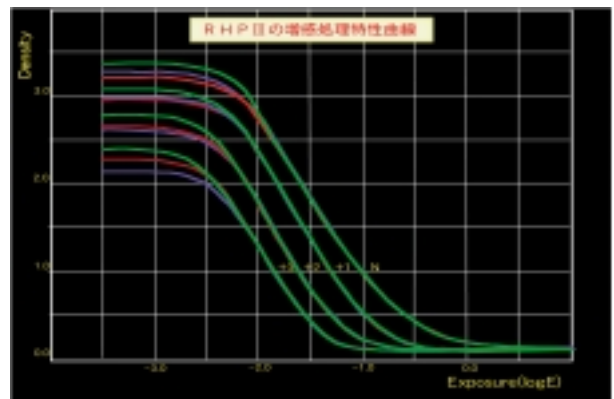


Fig. 11 Push-processing characteristic curves of RHP III.



Photo 5 Comparison of push-processing characteristic between RDP II and RDP III.

4.2 増減感処理性改良技術

4.2.1 Advanced DIR 技術

増減感処理性を改良するため、プロビア 100F と 400F には、富士写真フィルム独自の DIR 技術¹⁾⁴⁾⁵⁾をさらに発展させた Advanced DIR 技術が導入されている。

Fig. 12 に、Advanced DIR 技術の要点を図解した。Advanced DIR 技術は、DIR ハイドロキノン(DIR-HQ)化合物から現像時に放出される現像抑制物質の抑制力をより高めたものである。この化合物が、第 1 現像の進行に伴って現像抑制物をより多く放出することにより、増

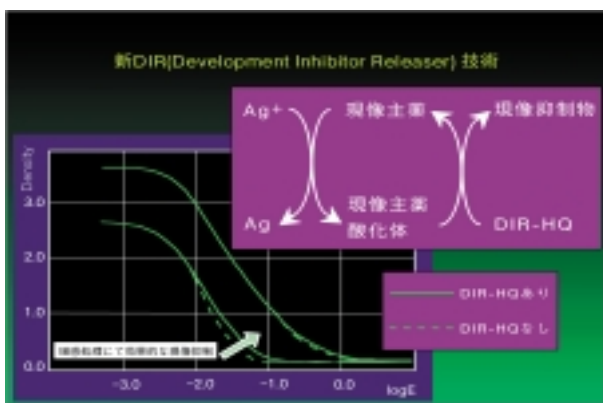


Fig. 12 Advanced DIR technology.

感現像での過度な硬調化やカラーバランスの崩れを抑えている。

4.2.2 Yellow Filter Dye 技術

プロビア 100F と 400F には、前述の Advanced DIR 技術に加えて Yellow Filter Dye 技術が導入されており、増減感処理性がより一層改良された。

撮影用銀塩カラーフィルムには、通常、緑感性乳剤層と赤感性乳剤層のハロゲン化銀の固有吸収をカットするためにイエローフィルター層が設置されている。従来、このイエローフィルター層にはイエローコロイド銀が用いられていたが、Yellow Filter Dye 技術は、コロイド銀に置き換えて新規に開発した固定性イエロー染料を導入したものである。従来のコロイド銀は、フィルター機能に加え溶解物理現象核として作用する性質も有しており、意図せず隣接層(青感性乳剤層)の現像を促進してしまい、増感処理時のカラーバランスがブルー味に変化しやすい副作用があったが、固定性イエロー染料に変更することでこの副作用を除去することができた (Fig. 13)。

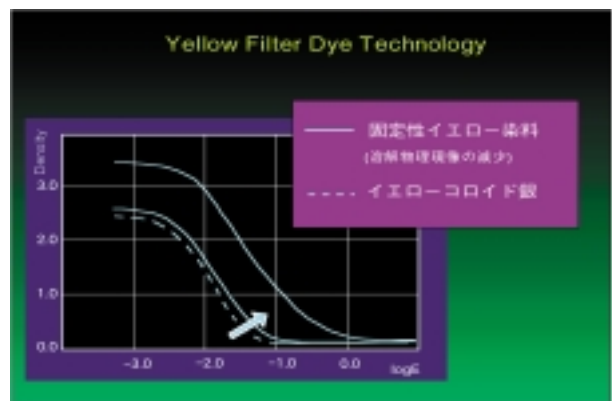


Fig. 13 Yellow Filter Dye technology.

5. 調子・色再現性

5.1 調子・色再現性の向上

Fig.14 に、RDP II と RDP III の特性曲線の比較を示す。

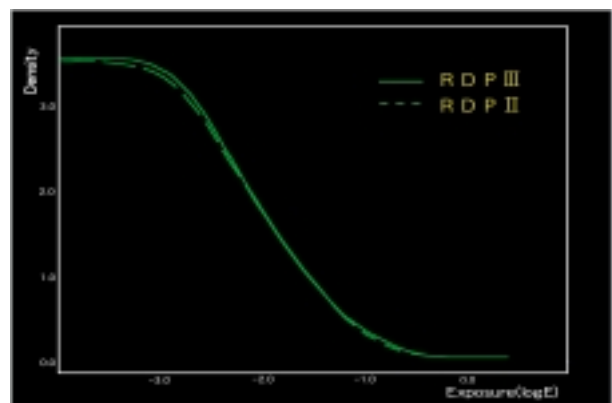


Fig. 14 Characteristic curves of RDP II and RDP III.

RDP IIIは、RDP IIに対してハイライトが軟調に設計されており、ハイライトの描写力が向上するとともになめらかな肌色再現性を実現した。

RDP IIとRDP IIIのグレートーンの写真比較をPhoto 6に示す。RDP IIIは、RDP IIに対してハイライトの描写力が向上しており、また、グレーバランスも良好であることがわかる。

次に、RDP IIとRDP IIIの肌色再現性の写真比較をPhoto 7に示す。RDP IIIは、RDP IIに対して肌の調子再現が滑らかでつながりが良くなっている。



Photo 6 Gray tone reproduction with RDP II and RDP III.

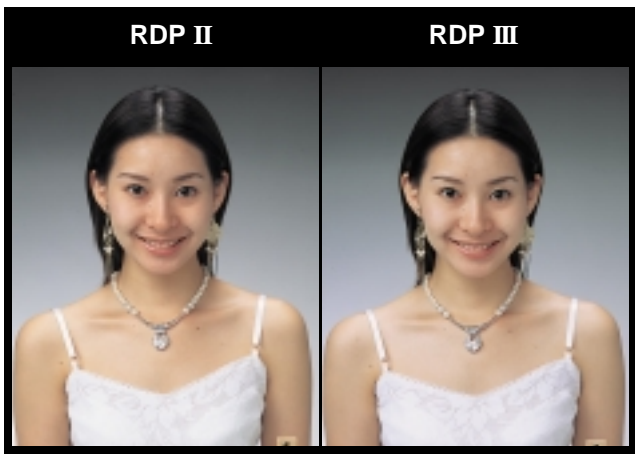


Photo 7 Skin tone reproduction with RDP II and RDP III.

次に、RHPとRHP IIIの特性曲線を比較したものをFig. 15に示す。RHP IIIでは、RHPに対し、シャドー感度を上げて露光ラチチュードを広げることで、ISO 1000のフィルム並のシャドーディテール描写を可能にした。また、ハイライトも軟調に設計することで、階調全体としてより一層豊かな調子再現を実現した。

RHPとRHP IIIのグレートーンの写真比較をPhoto 8に示したが、RHP IIIはハイライトからシャドーまで描写力が格段に向上していることがわかる。

Fig. 16に、RHP IIIの色再現性を、従来製品のRHPおよびISO 100フィルムのアスティア(RAP)⁶⁾と比較したものをCIE Lab色度図で示す。図の中心からの距離が彩度を表しており、外側ほどそれぞれの色の彩度が高い。

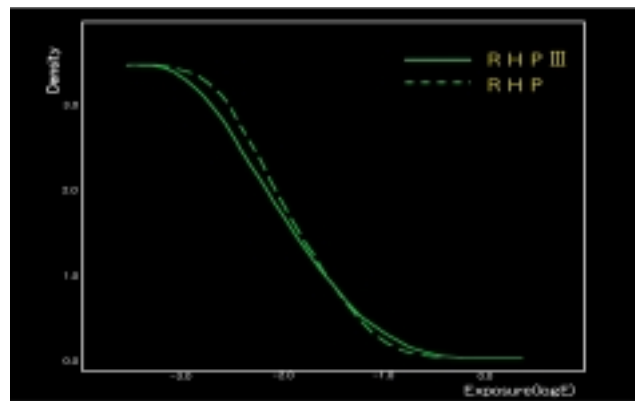


Fig. 15 Characteristic curves of RHP and RHP III.



Photo 8 Gray tone reproduction with RHP and RHP III.

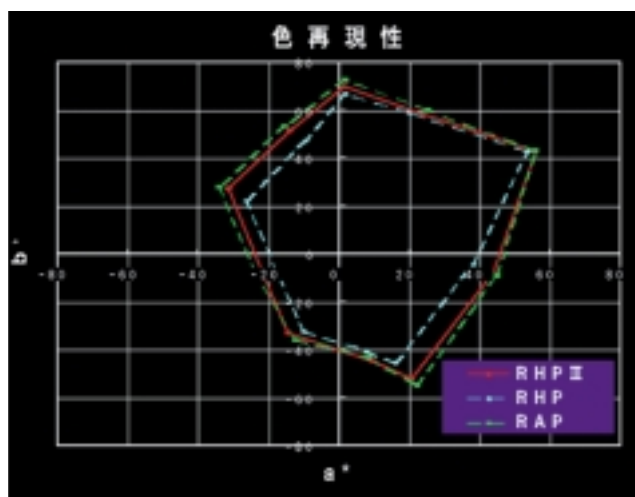


Fig.16 Comparison of color reproduction among RHP III, RHP and RAP.

RHP IIIは、ISO 400の高感度フィルムでありながら、従来のRHPのレベルをはるかに越えて、ISO 100フィルムに匹敵する高彩度の色再現性を実現している。

Photo 9に、RHP IIIとRHPの色再現性を比較した写真を示す。RHP IIIは、RHPに対して色彩度が大幅に向上していることがわかる。



Photo 9 Comparison of color reproduction between RHP and RHP III.

5.2 調子・色再現性向上技術

プロビア 100F, 400F は、BGR の感色層が各々感度の異なる3つの層より構成されており、さらにこれら9層に必要なに応じて感度の異なる単分散粒子乳剤が複数ブレンドされている。これら各乳剤層中の乳剤の濃度配分パラメータと感度パラメータを精密に制御する富士写真フイルム独自の技術：Accurate Gradation Control (AGC)技術⁵⁾により、ハイライトからシャドーまでニュートラルなグレー再現を実現した。

さらに、前述の Advanced DIR 技術でインターイメージ効果を強調して色彩度を向上させると同時に、層間のインターイメージ効果を精密に制御することにより、きれいな色再現を保ちつつハイライトからシャドーまでつながりの良い肌色再現を実現した。

6. おわりに

カラーリバーサルフイルムの撮像素子であるハロゲン化銀粒子の撮像効率向上には、まだまだポテンシャルが

あり⁶⁾⁷⁾、撮像効率向上はさらなる高画質のカラーリバーサルフイルムの開発を可能にし、より一層、写真家や印刷業界の高画質化へのニーズに応えうるものと確信している。今後も、高画質の銀塩撮影材料がその特長を生かし、最近、急速な進歩を遂げている DSC とともに多彩で豊かな画像文化の実現に寄与することを期待する。

参考文献

- 1) 芝原嘉彦, 山田耕三郎, 石丸信吾. フジクローム・プロビア 100 の特徴と技術. FUJIFILM RESEARCH & DEVELOPMENT. No.37, 1-9 (1995)
- 2) T. H. James. Research Laboratories Eastman Kodak Company. The Theory of the Photographic Process Forth Edition. Macmillan Publishing Co., Inc. NEW YORK, Collier Macmillan Publishes LONDON. 517-635 (1977)
- 3) S. Shuto; M. Kuramitsu ; S. Bando. Journal of the Society of Photographic Science and Technology of Japan. 62-93 (1999)
- 4) 石丸信吾, 池田秀夫, 坂上恵, 宮崎桂一, 平野茂夫, 玉野順一. 超高画質カラーリバーサルフイルムフジクローム『ベルビア』の技術と性能について. 日本写真学会誌. 55 (3), 174-183 (1992)
- 5) 首藤定伸, 倉光昌之, 桑島茂, 坂東信介. フジクローム ASTIA100 の開発. FUJIFILM RESEARCH & DEVELOPMENT. No.43, 1-8 (1998)
- 6) T. Tani. Photographic Sensitivity : Theory and Mechanisms. Oxford University Press. 228 (1995)
- 7) T. Tani. Journal of Imaging Science and Technology. 42, 1 (1998)

(本報告中にある“フジクローム”, “FUJICROME”, “プロビア”, “PROVIA”, “ASTIA”, “ベルビア”は富士写真フイルム(株)の商標です。)