

映画用カラーネガフィルム ETERNA シリーズの開発

白井 英行*, 日吉 弘測**, 山領 貞行**, 横田 耕一*, 西村 亮治*

Development of Motion-picture Color Negative Film ETERNA

Hideyuki SHIRAI*, Hironori HIYOSHI**, Sadayuki YAMARYO**,
Kouichi YOKOTA*, and Ryoji NISHIMURA*

Abstract

In 2004, Fuji Film introduced ETERNA500—the first offering in the ETERNA series—a product offering the highest sensitivity of E.I.500. Fuji Film has subsequently expanded the series with the release of new films of sensitivities ranging from medium to high, including E.I.250, E.I.250D and E.I.400. The ETERNA series has successfully achieved our development goal of providing motion-picture color negative films that offer not only high image quality for traditional analog filming but also significantly improved adaptability to telecine, film scanning and other digital processes for which there is growing demand.

1. はじめに

映画制作は、撮影、編集、配給・上映の工程に大別され、各工程の用途に対応した銀塩フィルムが使用されてきている。近年、映画制作の現場でもデジタル化が進み、特に、編集工程において、種々のソースから作成された画像の合成、および編集のデジタル化が主流となり、観客に新鮮な驚きや感動を与える映像の創出を容易にしている。さらに、ここ数年、撮影から上映までの全工程をデジタル技術で行なう、いわゆるデジタルシネマも登場してきたが、インフラ整備などの問題以外に、銀塩フィルムの有する卓越した性能（高感度・高画質・広ラチチュード）との間にまだ隔たりがあり、依然として、ほとんどの映画制作で銀塩フィルムを使用している。筆者らは、今後も銀塩フィルムとデジタル編集システムの相互のメリットを活か

し合いながら、アナログ・デジタルの融合による映像制作がさらに進化してゆくと考え、今回、従来の撮影用途としての性能の飛躍的な改良に加え、デジタル編集システムに対応した映画用撮影フィルムの開発を目的とした。

富士写真フィルム（株）は、2004年10月にE.I.500「ETERNA500」（タンゲステンタイプ）^{1), 2)}、2005年に軟調E.I.400「ETERNA400」（タンゲステンタイプ）、E.I.250, E.I.250D「ETERNA250, 250D」（D：デイトタイプ）の映画用撮影カラーネガフィルム「ETERNAシリーズ」を完成し、市場導入した^{3), 4)}（Fig. 1）。

本報告では、「ETERNAシリーズ」の開発の背景および特徴、さらにこれらの新製品の開発を可能にした技術について説明する。

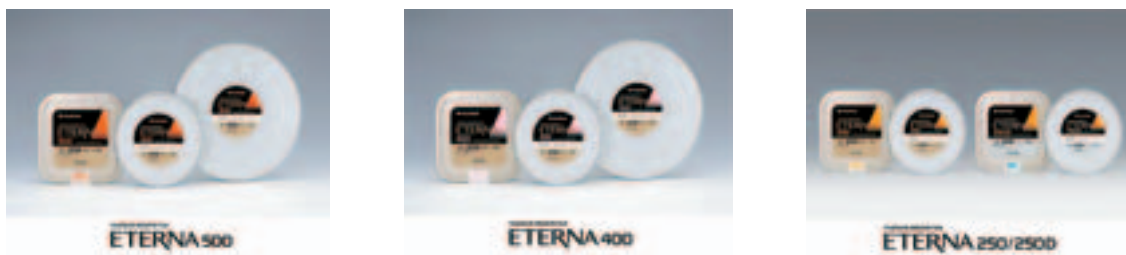


Fig. 1 Newly developed series of motion picture color negative films “ETERNA500, 400, 250 and 250D”.

本誌投稿論文（受理2006年1月19日）

* 富士写真フィルム（株）R&D統括本部材料研究本部
デジタル&フォトイメージング材料研究所
〒250-0193 神奈川県南足柄市中沼210

* Digital & Photo Imaging Material Research Laboratories
Materials Research Division, Research & Development
Management Headquarters, Fuji Photo Film Co., Ltd.
Nakanuma, Minamiashigara, Kanagawa 250-0193, Japan

** 富士写真フィルム（株）R&D統括本部材料研究本部
品質設計評価センター
〒250-0193 神奈川県南足柄市中沼210

** Quality Design and Evaluation Center
Materials Research Division, Research & Development
Management Headquarters, Fuji Photo Film Co., Ltd.
Nakanuma, Minamiashigara, Kanagawa 250-0193, Japan

2. 開発の背景

近年の撮影ネガとデジタル技術の市場動向を述べる。

2.1 撮影ネガの市場動向

Fig. 2に、米国で発売されている「American Cinematographer」誌上で紹介されている、映画作品の撮影に使用されたカラーネガフィルムの感度別比率を示した。近年、E.I.500に代表される高感度フィルムの使用比率が増加し、高感度と中庸感度フィルムで全体の約80%を占めていた。高感度フィルム比率の増加は、1984年に当社が初めてE.I.500の高感度フィルムを開発し、以後、技術進歩による画質向上がシネマトグラファーに支持されたからである⁵⁾。高感度フィルムを使用するメリットは、暗部の撮影領域が拡大したことにより、暗いシーンでの映像表現が可能になること、映画制作に負担となっている、撮影用ライティング機材の簡素化によるコストダウンや機動性の向上などである。一方、シネマトグラファーからは、E.I.500に対して、さらなる粒状性向上の要望があり、主力商品であるE.I.500の高感度・高画質化を謳った新製品の導入は重要であった。

また、Fig. 3に、映画一作品に使用されるカラーネガフィルム数を示した。映画に使用されるフィルムは、二種以上使用される比率が高い。これは、撮影用カメラのシャッタースピードの選択肢が少ないため、カメラマンはシーンごとに絞り値を変えて撮影しており、その絞り値に対応した感度を有するフィルムを選択しているためである。このため、一作品の中で、感度の異なるフィルムを使用したシーンを編集時におおのつなげる際に、感度が異なるフィルムがシームレスにつながる事が重要で、これをインターカット適性と呼んでいる。従って、主力商品のE.I.500と同時に、E.I.250を始めとした中庸感度フィルムを含めたラインナップとして市場に提供することが重要である。

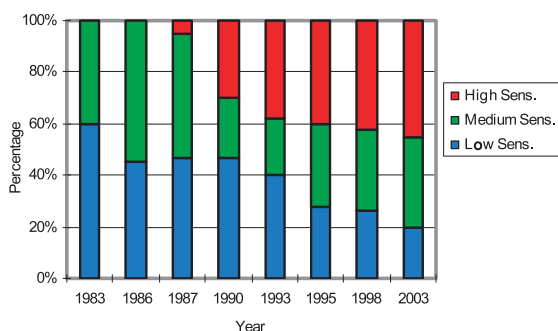


Fig. 2 Percentage of film use with regard to film sensitivity in motion-picture production.

2.2 デジタル技術の市場動向

Fig. 4に、映画撮影から上映までの流れを簡単に示した。映画制作は、撮影、編集、配給・上映の工程に大別される。

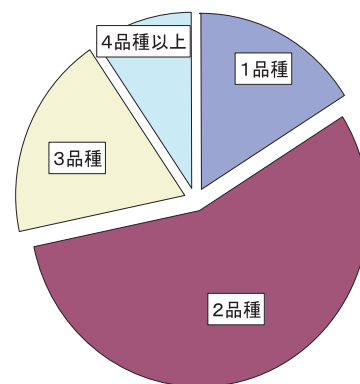


Fig. 3 Number of films of different sensitivities used per one title.

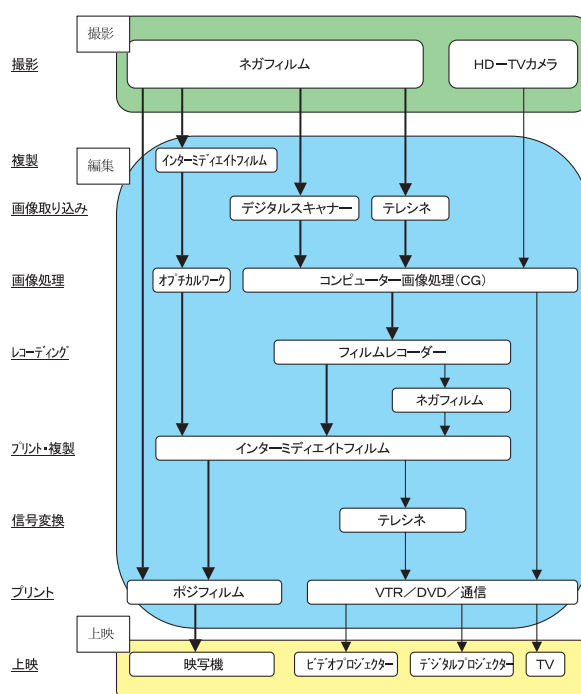


Fig. 4 Workflow of motion-picture film production.

1999年に、銀塩フィルムで撮影された「Star Wars Episode1」がUSAの4劇場にてデジタル上映されたこと、2000年に開発されたSONY製HD24pビデオカメラを使用し、ジョージルーカスが「Star Wars Episode2」を撮影から上映までデジタル化できることを業界に示したことで、映画業界では、映画制作について、銀塩フィルムを使用せず、撮影から上映までの全制作工程をデジタル技術で行なうデジタルシネマに移行すると考えられた。しかし、上映プロジェクターの導入およびメンテナンスのコスト負担、海賊版防止およびアーカイバル性への信頼度が低いなど、未解決の課題が多くあり⁶⁾、実際には、全制作工程をデジタル技術で行なうデジタルシネマの普及は鈍く、銀塩フィルムシステム

が現在も主流である。一例として、Fig. 5に世界中のデジタル上映プロジェクターについて、1999年頃の新聞、雑誌などの調査から予想したスクリーン数増加の見通しと、実際に市場に導入されたスクリーン数の推移を示した。1999年時に立てられた見通しに対し、実際の普及は鈍い。

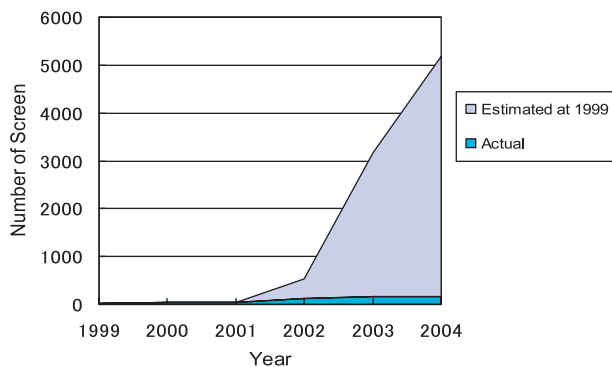


Fig. 5 Worldwide digital cinema screening.

その一方で、近年、編集工程において、高解像度で情報を取り扱うデジタル映像技術の進歩から、銀塩フィルムで撮影された高画質画像をフィルムスキャナー、テレシネで読み取り、デジタル情報に変換してコンピューターによる合成・編集で現実には有り得ない映像を創り出し、フィルムレコーダーで再びフィルムにアナログ変換して上映される制作工程が増加している。Fig. 6に、Fig. 2と同様の誌上で、このような編集工程におけるデジタル編集の推移を示すが、着実に増加している。このことは、デジタル変換プロセス時に、粒状性や画像エッジ付近のにじみがノイズとなる問題、シャドーからハイライトまで階調や色再現の変化が大きい時、色補正に与える問題を低減させる重要性を示している。

これらの撮影用途、デジタル編集用途の背景から、ETERNAシリーズの開発に着手した。

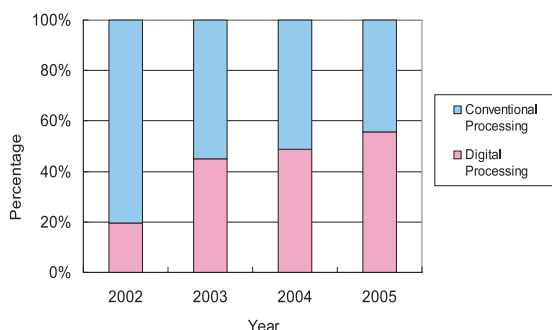


Fig. 6 Trend toward digitization in editing process.

3. ETERNAシリーズの設計思想と特徴

前述のように、ETERNAシリーズの設計上のポイントは、主力商品である高感度E.I.500に対し、画質向上、特に、粒状性の向上を実現することを最も重視した設計である。さらに、高感度フィルムから中庸感度フィルムを含め、シャドーからハイライトまで階調や色再現のつながりを良くし、インターカット適性を付与することを重視して設計した。また、高感度フィルムに期待される、暗部の撮影シーンの再現性についても向上させる設計とした。今回、開発したETERNAシリーズの特徴を以下に詳細に説明する。

3.1 卓越した粒状性

これまで、高感度フィルムは、高感度・低画質というイメージを払拭するため、高画質化への挑戦、特に、粒状性を最も重要な性能として技術進歩を振り向けてきた。高感度フィルムE.I.500は、持続的な開発により、現在、主力商品として最も使用頻度が高いフィルムであるが、前述のようにシネマトグラファーからはさらなる粒状性の向上を強く望まれていた。さらに、近年、増加してきた画像のデジタル変換の際にも、シャープネス強調処理など、粒状がノイズとなることがあり、粒状性の改良への要望が大きい。シネマトグラファーの調査から、中庸感度フィルム（感度E.I.250以下のフィルム）の粒状性は不満が少ないことから、E.I.500で、中庸感度フィルム以上の粒状性を達成することを目標として掲げた。一般的に、粒状性を向上させるには、感光素子であるハロゲン化銀粒子の粒子サイズを小さくすることが必要である。しかし、粒子サイズを小さくすれば感度が低下するので、小さくしたままで感度を向上させる技術が必須である。

Fig. 7に、ETERNA500で実現した粒状性の進歩を、Fig. 8に、新旧でのフィルムの断面写真を示した。Fig. 7で示されるように、ETERNA500は従来のF500に対し飛躍的に粒状性が向上し、E.I.250（F250）と同等レベルの、E.I.500として世界最高水準の粒状性を実現した。

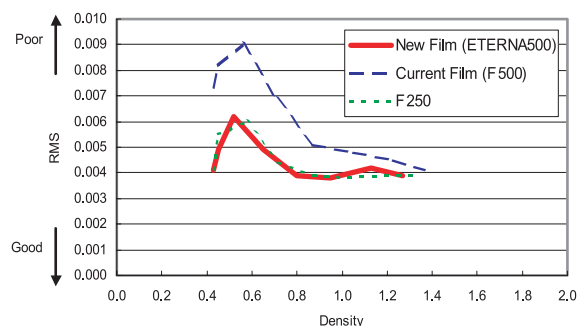


Fig. 7 Improvement of RMS granularity.

Fig. 8の断面写真からも、ハロゲン化銀粒子サイズが小さくなっていることがわかる。飛躍的な粒状性の向上を支え、このハロゲン化銀粒子の微粒子高感度化を実現したのが、スーパー・ナノ・ストラクチャー・シグマ・グレイン技術である。技術内容については後述する。

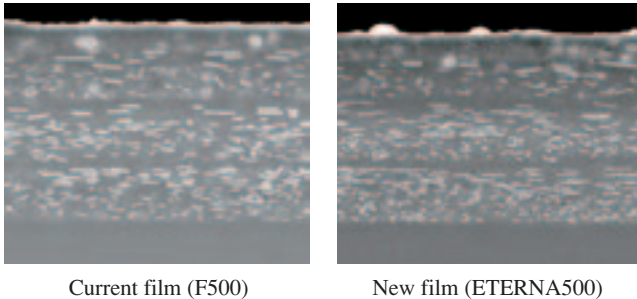


Fig. 8 Cross section of color negative films.

3.2 シャドーからハイライトまで安定したグレーバランスおよび色再現性

映画は動画であり、露光量の異なるシーンを連続して撮影することが多い。このため、シャドーからハイライトまで階調、色再現のつながりの変化が大きいと、連続したシーンで色変わりが生じる。通常、このような場合、プリント工程での色補正あるいはデジタル変換による色補正を行なうが、この補正には多大な手間がかかる上、補正が困難な場合には撮影者の意図する色表現が不可能な場合もある。

Fig. 9に、E.I.500の新旧フィルムでのシャドーからハイライトまでのグレーのグラデーションを背景としたプリントを示した。従来のF500は、背景のシャドーからハイライトに掛けてグレーの色相が変化しているが、ETERNA500は、安定したグレーバランスを実現した。さらに、Fig. 10に肌色再現性の露光量依存性を示したが、ETERNA500は、色度図上でシャドーからハイライトまで色再現のつながりの変化が小さい設計とした。



Fig. 9 Improved gradation balance.

3.3 インターカット適性の付与

劇映画など同一作品で、感度の異なるフィルムを併

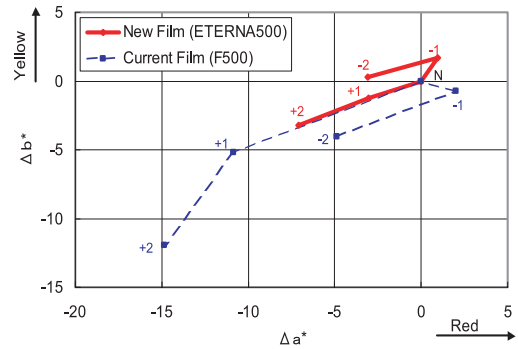


Fig. 10 Exposure dependence of skin tones.

用することが一般的であり、インターカット適性が重要となることを述べた。Fig. 11にETERNA500とETERNA250の特性曲線、Fig. 12にLab色度図を示した。インターカット適性を付与させるためには、フィルムの階調の γ や色再現・彩度を合わせる感材設計が重要であり、Fig. 11, Fig. 12に示すように、階調の γ 、色再現・彩度を同様な性能を有するように設計し、インターカット適性に優れたラインナップを実現した。

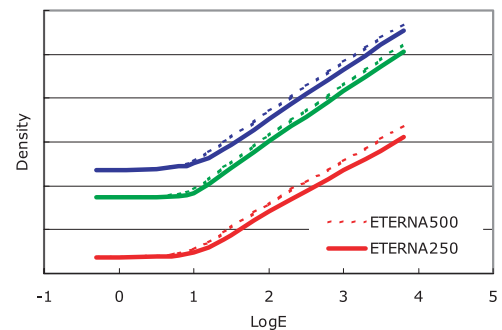


Fig. 11 Comparison of photographic characteristic curves. (with the standard exposure points matched.)

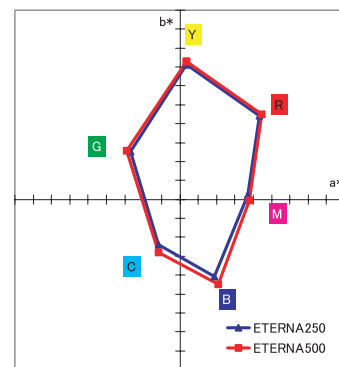


Fig. 12 Lab chromaticity chart.

3.4 優れたシャープネス

近年、フィルムをスキャナーやテレシネを使用して高解像度で取り込み、デジタル変換する編集が増加し

ていることを述べた。合成作業時に、取り込まれる画像のノイズとして、画像のエッジ付近のにじみが問題となるケースがある。このにじみは、例えば、デジタル編集で画像を切り取る際に、切り取り位置が不明瞭となり、編集作業の多大な非効率の原因となる。この現象は、R、G、Bのにじみのプロファイルがそろっていないことに起因している。Fig. 13に、ETERNA500とF500の画像のエッジ部を拡大した写真を示した。F500はエッジ部分が赤味を帯びているが、ETERNA500では赤味の低減を実現した。この赤味の低減を実現したのが、後述するシャープネスを向上できる新コープラー技術である。



Fig. 13 Improved red fringe.

3.5 シャドーディテールの向上

シネマトグラファーに対する調査から、映像表現で重要な色再現として黒と白が挙げられる。特に、黒の色再現が重要であり、ETERNAシリーズでは技術原資をアンダー側ラチチュードの拡大にも配分し、黒の表現力向上を実現した。例として、Fig. 14にETERNA400とF400のノーマル露光の18%グレー点を合わせた特性曲線を、Fig. 15に実技プリントを示した。Fig. 14の特性曲線に示すように、ETERNA400のアンダー側のラチチュードを拡大する設計とした。Fig. 15の実技により、背景にある置物やセーターの細部にわたるまで再現され、シャドーディテールに優れていることがわかる。

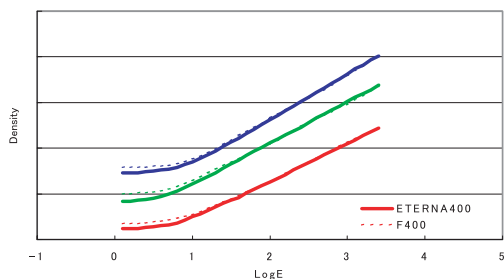


Fig. 14 Comparison of photographic characteristic curves. (with the standard exposure points matched.)



Fig. 15 Improved expression of black.

4. ETERNAシリーズを実現した技術

ETERNAシリーズに搭載した技術は以下である。

- ① スーパー・ナノ・ストラクチャー・シグマ・グレイン技術
- ② スーパー・エフィシエント・DIRコープラー技術
- ③ スーパー・エフィシエント・コープラー技術

4.1 スーパー・ナノ・ストラクチャー・シグマ・グレイン技術

粒状性の向上、アンダー側のラチチュード拡大によるディテール向上にはハロゲン化銀乳剤の高感度が不可欠である。ETERNAシリーズでは、新たにスーパー・ナノ・ストラクチャー・シグマ・グレイン技術を開発し導入した。スーパー・ナノ・ストラクチャー・シグマ・グレインは、感光素子であるハロゲン化銀乳剤の設計を、光吸収から現像に至るまですべての過程を見直し、トータルとして最も効率的に光を利用することのできる高感度ハロゲン化銀粒子である。

ハロゲン化銀粒子に入射した光は、その表面に吸着している増感色素に吸収されて光電子を発生させる。この光電子はハロゲン化銀粒子に移動し、電子蓄積部を経由して感光核に集まり、現像核となる潜像を形成する。その後、現像処理においてその潜像が現像され、画像を形成する。上述の過程の中で、粒状性を損なうことなく感度を向上させるためには、(A) 光吸収率、および (B) 潜像形成効率の向上、が重要である。

(A) 光吸収率の向上

ハロゲン化銀粒子の光吸収率を向上させるためには、粒子を平板化して表面積を増加させ、光を吸収する増感色素の一粒子当たりの吸着量を増加させることが有効である。さらに、干渉によって平板粒子で反射する光の波長が平板粒子の厚みにより変化することから、フィルムの下層で吸収される緑色および赤色光の反射が少ない厚みに設定することが重要となる。今回、平板状粒子の主平面と側面の粒子成長を精密に制御することにより、粒子体積が少なく、光反射が小さくなる粒子厚みとなるようにハロゲン化銀粒子の薄板化に成功した。この技術により、光吸収率の向上を達成して

いる。Fig. 16に新旧乳剤の粒子写真を示した。粒子の厚みが薄く，単位体積当たりの表面積の割合が増加していることがわかる。

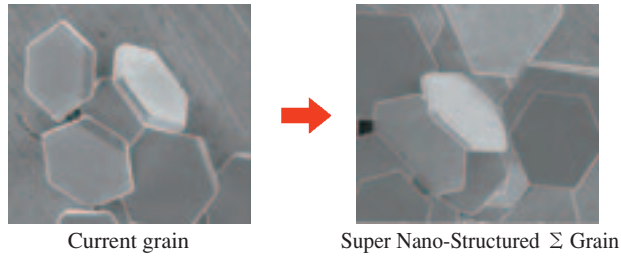


Fig. 16 Comparison of the current grains with the Super Nano-Structured Σ Grains.

(B) 潜像形成効率の向上

光吸収した後に発生した光電子を，効率的に感光核に集め，潜像形成させることも重要である。増感色素が吸着したハロゲン化銀粒子は，光電子と色素正孔の再結合による固有減感が生じ，特に，増感色素を多量に吸着させる場合には，この固有減感を防止することが高感化の鍵となる。固有減感の防止は，光電子を一時捕獲して，色素正孔との再結合を抑制する電子蓄積部として平板状粒子のフリンジ部に刃状転位構造を内蔵させることが有効である (Fig. 17)。当社は，ナノ・ストラクチャー・シグマ・グレイン技術⁷⁾によってこれを実現してきたが，平板粒子の厚みが薄くなるにつれて転位構造が不均一となり，感度の減少を伴う。フリンジ部に限定して転位構造を内蔵させるには，基盤となるホスト平板粒子と格子定数のミスマッチが大きいハロゲン化銀エピタキシーを，ホスト粒子側面に均一に局在させることが重要となる。このことから，ナノスケールで制御できるエピタキシーの成長方法を新たに開発し，各粒子のフリンジ部に高密度でかつ均一な刃状転位を内蔵させることを実現した。この高密度で均一な転位による電子蓄積部により，潜像を効率的に形成することを達成した。Fig. 18に，新旧粒子の透過電子顕微鏡写真を示した。刃状転位が，粒子のフリンジ部に高密度で均一に内蔵されていることがわかる。

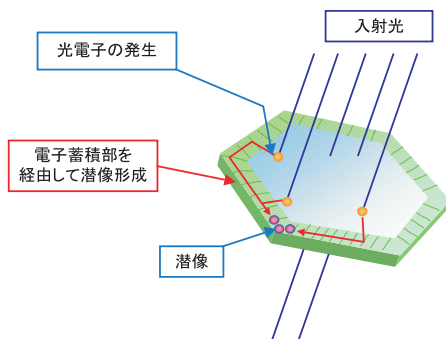


Fig. 17 Higher efficiency of latent image formation.

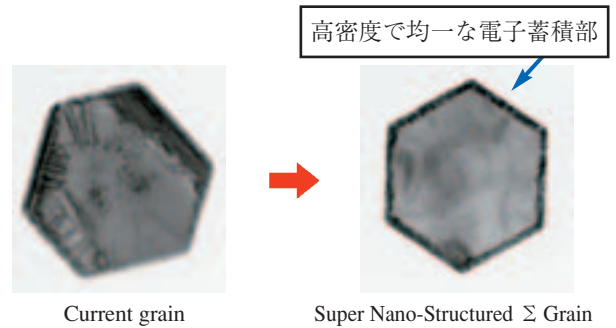


Fig. 18 Comparison of the current grain with the Super Nano-Structured Σ Grain.

4.2 スーパー・エフィシエント・DIRカプラー技術

DIRカプラーは，従来から色再現性，シャープネスの向上を目的としてカラーネガフィルムに一般的に使用されている。現像時に抑制剤を放出することにより，現像銀の成長を抑制し，重層効果およびエッジ効果を与える技術である。当社は，カップリング反応に特徴のある独自のDIRカプラー技術を開発してきた⁸⁾。その特徴とは，現像主薬酸化体 (T^+) とのカップリング反応後，引き続き分子内反応が起こり，無色の化合物を形成するものである。従来のDIRカプラーは，カップリング反応によって抑制剤を放出する現像抑制放出機能に加え，発色色素形成機能を併せて持つため，使用する層の感光性と補色関係でない色に発色するDIRカプラーは，その使用量が制限され，大きな重層効果およびエッジ効果が得られない場合があった。一方，新開発のDIRカプラーは，着色しないことから，使用層，使用量に制約無く使用できる。Fig. 19に作用機構を示したように，ETERNAシリーズでは，当社独自のこのDIRカプラー技術をさらに進化させるため，新規開発のスーパー・ナノ・ストラクチャー・シグマ・グレインの現像銀に効率的に抑制を与えることができるように放出される抑制剤 (DI) を，さらに，その抑制剤の他の感光性層への拡散性をより向上させるようにタイミング基 (T) を設計して導入した。これらの，新規開発の抑制剤およびタイミング基により，従来より大きな重層効果およびエッジ効果を示すスーパー・エフィシエント・DIRカプラー技術の開発に成功した。この技術により，優れたシャープネスバランス，色再現性の向上を実現した。

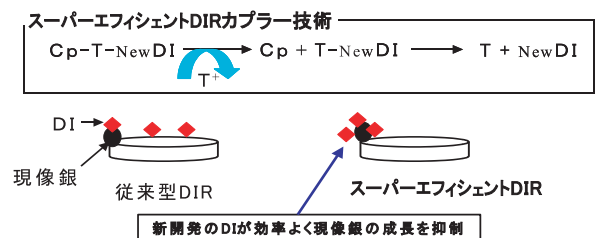


Fig. 19 Super Efficient DIR-Coupler Technology.

4.3 スーパー・エフィシエント・カプラー技術の開発

シャープネスを向上させる設計として、乳剤層を薄層化し、乳剤粒子や油溶性素材などによる光散乱の影響を少なくすることが重要な手段の一つである。従って、入射光により近い乳剤層を薄層化するほうが効果が高い。ETERNAシリーズでは、最も上層の感光性層である青感光性層に使用しているカプラーに、高活性、高 ϵ のイエロー発色カプラーであるスーパー・エフィシエント・カプラー技術を導入した。このカプラーは、従来から用いられてきたアセトアニリド型カプラーに換わり、新骨格であるベンゾチアジアジンジオキシド型カプラーであり、発色色素のモル吸光係数が高く、クリアな色相、暗保存堅牢性に優れる特徴を有している。Fig. 8に示したように、感光性層の最上層である青感光性層に新開発のカプラーを導入し、発色効率の向上によってカプラー使用量を低減でき、青感光性層を薄層化することに成功した。これにより、光の散乱を抑制し、シャープネスの向上を実現した。

5. おわりに

映画市場は、銀塩フィルムシステムが現在でも主流であると同時に、デジタル技術の融合が進んでいることを述べてきた。そのような市場状況を背景に、本報告の「ETERNAシリーズ」は、従来からの銀塩フィルムの特徴である高画質化の追求に加え、近年、増加している編集工程のデジタル化も考慮した感材設計になっている。今後も、映画市場のデジタル化に対応した、高画質な銀塩フィルムの開発を通して、映画産業に貢献できると考えている。最後に、本研究を進める上でご指導いただいた方々、および本感材の開発に携わり、ご協力いただいたすべての方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) Hideyuki Shirai et al. 146th SMPTE Technical Conference & Exhibition 予稿集. (2004).
- 2) 富士写真フィルム(株). Fujicolor Negative Film ETERNA500. 映画テレビ技術. No. 630, 75 (2005).
- 3) Tetuo Kikuchi et al. 147th SMPTE Technical Conference & Exhibition 予稿集. (2005).
- 4) 富士写真フィルム(株). Fujicolor Negative Film ETERNA400/Fujicolor Negative Film ETERNA250/Fujicolor Negative Film ETERNA250D. 映画テレビ技術. No. 641, 51 (2006).
- 5) 西村亮治ほか. 高感度映画用カラーネガフィルム“New Super Fシリーズ”の開発. 富士フィルム研究報告. No. 45, 1 (2000).
- 6) 河合清ほか. デジタルシネマ時代のフィルム技術. 日本写真学会誌, 66 (3), 263 (2003).
- 7) 豊田雅義ほか. 高感度ネガ「Venusシリーズ」の開発と新コンセプト「写ルンですNight & Day」への展開. 富士フィルム研究報告. No. 49, 6 (2004).
- 8) 須賀陽一ほか. フジカラー「ズームマスター800」の開発. 富士フィルム研究報告. No. 46, 9 (2001).

(本文中にある“ETERNA”, “Fujicolor”, “写ルンですNight & Day”, は富士写真フィルム(株)の商標です。)