

フジカラー Super400/Nexia H400の開発

須賀 陽一*

Development of Fujicolor Super400/Nexia H400

Yoichi SUGA*

Abstract

In August 1998, Fuji Photo Film Co., Ltd. proudly announced the introduction of two new lines of Fujicolor negative film: New Nexia H400 for the Advanced Photo System, and Super400 for 35mm photography. As the most sweeping update in the history of Fujicolor products, the new films incorporate Fujifilm's proprietary new fourth layer technology for reproducing colors more vivid and yet truer to life than ever before.

1. はじめに

1998年8月に富士写真フィルムから発表されたフジカラー「Super 400」/「Nexia H400」は、銀塩写真の魅力をもっと表現できる要素、すなわち「色」の再現性向上にポイントを置いた新世代のカラーネガフィルムである。新たに開発した「ニューフォースレイヤー技術」により、赤や黄色といった原色をさらに鮮やかに、紫や黄緑といった中間色を忠実に再現し、また、色変わりを起こしやすい蛍光灯下での撮影においても自然な仕上がりを可能にしている。本報告では、フジカラー「Super 400」/「Nexia H400」の性能の特長とそれを達成するための技術について説明する。

2. Super400/Nexia H400商品化のねらい

フジカラーリアラは人間の目に近似した分光感度分布を持ち、自然界のさまざまな色をほぼ目で見た通りに再現できるカラーネガフィルムとして1989年に発売され、その色再現の忠実性や優れた蛍光灯適性などが色にこだわるユーザーから支持されていた。

また、同年、それまでのISO感度400のカラーネガフィルムのイメージを一新するフジカラースーパーHG400を発売し、カラーネガフィルムの常用感度をISO100から400に引き上げ、常用感度400化を確立した。一方、ISO400カラーネガフィルムが常用されるようになると室内撮影における蛍光灯の緑がかりが目立つようにな



り、光源適性の優れた高感度フィルムが必要となってきた。しかし、フィルムの分光感度を人間の目の分光感度に近似させることは乳剤の感度への負荷が大きくなり、粒状・シャープネスを劣化させることなく高感度カラーネガフィルムにリアラの技術を適用することは困難であった。

乳剤技術開発はその後も継続して行われ、1996年に小フォーマットのAPSシステムを発売するなど、乳剤技術はさらに進歩してきている。

そこで今回のISO400カラーネガフィルムの開発では、リアラで開発した色再現技術と最新の乳剤技術を融合させて、高感度常用フィルムに要求される性能である蛍光灯適性を向上させるとともに、近年のガーデニングブームなど、色にこだわるユーザーのカラーフィルムの色再現への要求を満足できるフィルムを目指してスタートした。

本誌投稿論文 (受理1998年11月4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

3. フジカラーリアラの色再現技術

フジカラーリアラでは第4の感光層 (CL) を導入して、色忠実性を向上させている¹⁾。この第4の感光層の技術について以下に概説する。

カラー写真の色忠実性を上げるには、人間の目の分光感度にカラーフィルムの分光感度分布を近似させる必要がある。Fig. 1に国際照明委員会 (CIE) により決定された等色関数を示したが、ここで特徴的なのは等色関数に負の部分があることである。カラーフィルムは基本的に3原色の重ね合わせで色を再現しているの、この負の分光感度をカラーフィルムでは実現できないと説明することが、カラーフィルムの色再現が忠実でないことの言い訳になっていた。

この困難を乗り越えるためには、2つの方法が考えられる。第1の手段はRGB等色関数を一次変換してすべて正の感度とする方法であり、第2の手段は何らかの近似を行い、負の感度を実現する方法である。

Fig. 2にRGB等色関数を一次変換することによって得られたLMS等色関数を示した。LMS等色関数は以下のようなRGB等色関数の線形結合で表される。

$$\begin{aligned} L(\lambda) &= 0.354 r(\lambda) + 0.643 g(\lambda) + 0.002 b(\lambda) \\ M(\lambda) &= 0.182 r(\lambda) + 0.807 g(\lambda) + 0.011 b(\lambda) \\ S(\lambda) &= 0.000 r(\lambda) + 0.010 g(\lambda) + 0.990 b(\lambda) \end{aligned}$$

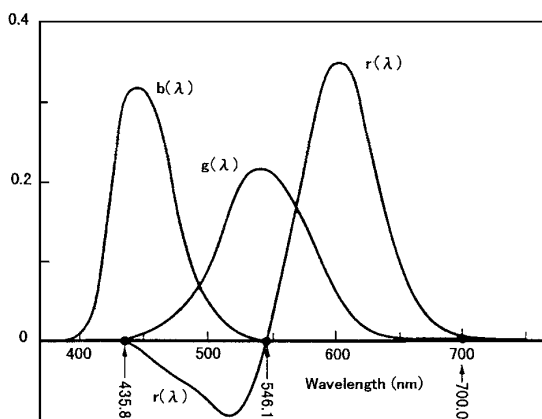


Fig. 1 Color matching functions

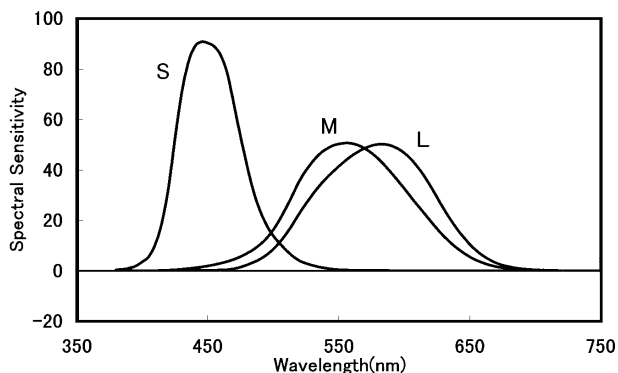


Fig. 2 No negative lobe color matching functions (LMS)

このLMS感度はおおむねRGB感度に対応しているが、すべて正の値で示され、かつLMの重なりがきわめて大きいという特徴を持っている。このように3原色の重ね合わせだけで色を再現することは可能であるが、負の分光感度を回避すると、RGの感度の重なりが大きくなり色分離性が劣化するとともに、LMSに対応する原色が存在する原色ではないため、このような画像入力系では大きな色補正が必要となる。

カラーネガフィルムでこの等色関数を実現するためには以下の条件を満たす必要がある。

- (1) 分光感度をLMS等色関数に合わせる
- (2) デジタル処理や重層効果などによって大きな色補正をかける
- (3) 再現したい色を出力メディアで使用されている色要素の混合で再現できる

ここで、(1)の条件について考えてみたい。カラーネガフィルムは青感層、緑感層、赤感層が層状に重なり合っているのは周知の通りである。赤感層を感光させる光は必ず緑感層を通過してきた光である。Fig. 3に現行ISO400カラーネガフィルムの緑感層の透過率を示したように、550nmの光は緑感層を通過すると約25%に減少しており、緑感層と赤感層の重なりを大きくしようとすると、重なった部分の波長の光が赤感層に到達するのを減じてしまうことを示している。したがって、カラーネガフィルムのような層状構造では、緑感層と赤感層の重なりをLMS等色関数のように大きくすることは困難である。

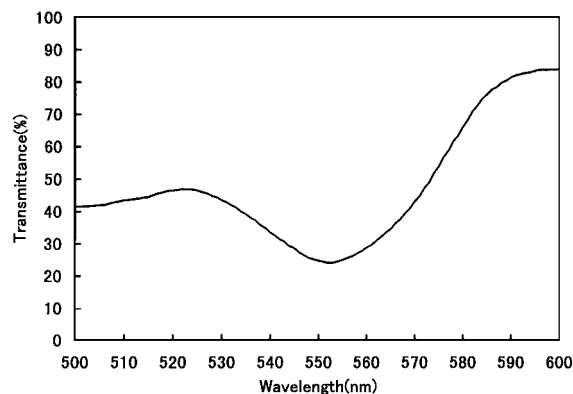


Fig. 3 Transmittance of the green sensitive layer

次に、(2)の条件である“大きな色補正”とはどの程度のものであるかを検証してみたい。LMS等色関数からRGB等色関数への変換係数を求めることにより見積もることができる。以下にその変換式を示す。

$$\begin{aligned} r(\lambda) &= 4.22 L(\lambda) - 3.20 M(\lambda) - 0.02 S(\lambda) \\ g(\lambda) &= -1.25 L(\lambda) + 2.28 M(\lambda) - 0.03 S(\lambda) \\ b(\lambda) &= 0.03 L(\lambda) - 0.05 M(\lambda) + 1.02 S(\lambda) \end{aligned}$$

上記第1式において、等色関数 $r(\lambda)$ は $L(\lambda)$ を4.22倍

した後にM ()の3.2倍を差し引くことにより得られることを示している。近似的にカラーフィルムの濃度に置き換えて考えてみると、緑感層の濃度の数倍分の濃度を赤感層から差し引くこと（緑感層の濃度の数倍分の重層効果を赤感層にかけること）になり、通常のカラネガフィルムの重層効果としては非現実的である。

そこで、カラネガフィルムにおいて実現できる解決策を検討してみると、LMS等色関数の線形結合によって新たな赤感層の分光感度分布を作ることにより、この困難な課題を解決できることがわかる。Fig. 4にLMS等色関数の線形結合によって新たに作り出される赤感層の分光感度分布を示した。赤感層に負の部分を作ることにより、赤感層の短波感度を下げ、ピーク波長を長波にすることが可能となり、緑感層と赤感層の重なりを減少させることができることがわかる。

このようにして得られた等色関数の負の部分は、赤感層への重層効果を高めることにより近似的に実現可能である。しかし、赤感層の負の部分の波長と緑感層の波長にずれがあり、赤感層の負の部分の方が短波長であることに注意しなければならない。緑感層から赤感層に重層効果をかかけたのでは赤感層の負の部分は緑感層と同じ波長になり、等色関数に対して長波になってしまう。同時に、赤感層の正の部分の短波端が長波によるため、緑感層と赤感層の重なりが減少し、好ましくない。このような不具合を解消するために、赤感層の負の部分の波長に相当する分光感度を有する感光層を新たに導入し、等色関数に類似の分光感度を実現した。この新たな層が第4の感光層 (CL) である。

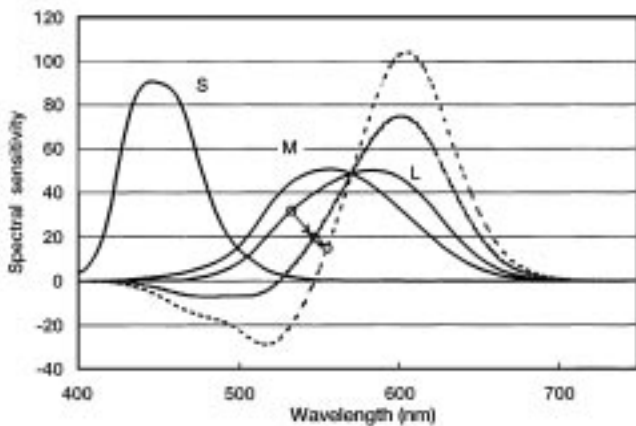


Fig. 4 New red sensitivity distributions given by linear combinations of LMS functions

4. 第4層 (CL) の配置

フジカラーリアラでは第4層をイエローフィルター層と緑感層の間に設置していたが、Super400では、緑感層と赤感層の間に配置した (Fig. 5)。本来、4層は赤感層に抑制をかけるための層であり、赤感層に近い方が有利であること、隣接層が緑感光性層の最高感度層ではなく、最低感度層と接するため、混色防止層が不要と

なり、薄層化が可能であること、緑感層へのCLのフィルター効果による感度ロスがなく、高感度感材に適用できることなどの利点があり、この層構成を採用した。

一方、CLに到達する光は、緑感層を通過時に一部吸収されるため、光量が減少しており、CLの感度の観点からは不利である。これについては後述する乳剤粒子調製技術 (スーパーユニフォームファイングレイン) により、解消している。

また、赤感層の分光感度はフジカラーリアラの思想通り、等色関数を再現できるように短波化する方針とし、赤末反射による色変わりを改良した。

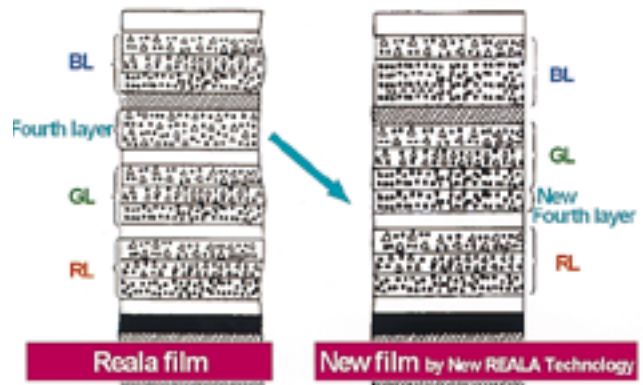


Fig. 5 Cross section diagrams

5. Super400/Nexia H400の特長

Super400/Nexia H400の主な特長は

- (1) 色彩度と忠実性の大幅な向上
- (2) 蛍光灯適性の向上
- (3) 優れたシャープネス

である。以下に、各性能について説明する。

5.1 色彩度，忠実性の向上

Super400と従来のACE400でマクベスチャートを撮影したときの色再現性をLab色度図にプロットした (Fig. 6)。この色度図上では原点からの距離が長いほど彩度が高く、ある点と原点を結んだ直線上は同一色相であることを示している。従来品のACE400に対して、ブルー、グリーン、マゼンタをはじめとして各色の彩度が向上していることがわかる。また、各色においてオリジナルに近づき、忠実性の向上が認められる。

Photo 1にさまざまな花の実技を示した。黄色い花の色相が現行品に対してマゼンタ味が取れ、忠実でピュアな色相に再現され、また、マゼンタの花びらの彩度が向上し、青紫色の忠実度が向上するなど、よく特長が現れている。さらに、深紅のバラの花びらに陰影がつき、今までフラットにしか再現されなかった赤の再現の違和感を低減している。

Photo 2に赤末反射をもつ被写体の色変わりの改良例を示した。モデルは人間の目にはほぼ同じ紫色に見えるベストスーツとセーター（袖の部分）を着用しているが、セーターは赤末反射があるために赤感層が長波である現行品では赤く再現されている。一方、赤感層を短波化した Super400 は赤末反射の影響を受けないため、この2つの洋服をほぼ同じ紫色に再現している。

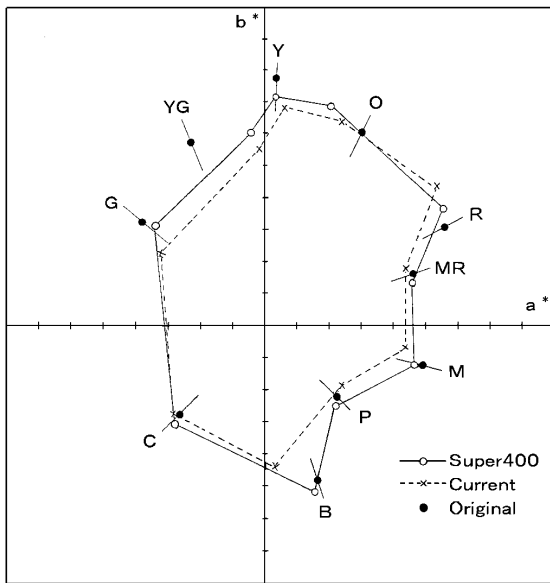


Fig. 6 Color reproduction of Super400 and current film



(a) Super400 (b) Current type
Photo 1 Improvement in color reproduction-1



(a) Super400 (b) Current type
Photo 2 Improvement in color reproduction-2

5.2 蛍光灯適性の向上

従来のアマチュア用カラーネガフィルムが苦手とするものの一つとして、蛍光灯下での撮影がある。

Photo 3の実技写真は、画面の左側から太陽光、右側から白色蛍光灯で照明して撮影したものである。従来品では蛍光灯で照明されている右側部分がグリーン味に再現されるのに対して、Super400ではそのグリーン味が軽減されて、ミックス光源下においても自然な仕上がりになっていることがわかる。



(a) Super400 (b) Current type
Photo 3 Reduction of the ugly green cast caused by fluorescent lamp

5.3 優れたシャープネス

Fig. 7にSuper400と従来品のCTF曲線を示した。Super400のCTF値は従来品に対して大幅に改良されており、シャープネスが大幅に改良されていることを示している。これにより、135サイズだけでなく、APSフォーマットにおいても切れの良いシャープネスが確保されている。

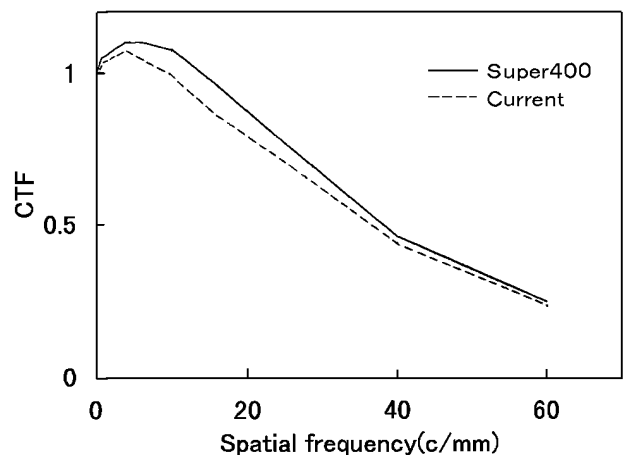


Fig. 7 Sharpness (the CTF curves) of Super400 and current film

6. Super400/Nexia H400を実現した技術

6.1 ニューフォースレイヤー技術

冒頭で述べたように、負の分光感度を持つRGB等色関数に近似の分光感度を実現するために第4の感光層 (CL) を導入した。Fig. 8にあらかじめわずかに赤色露光したあとにスペクトル露光した時の、Super400のスペクトル分光濃度分布を示した。赤感光性層の濃度がカブリレベルよりも下がっている部分が、重層効果により現像抑制を受けている部分である。特に、斜線部分がCLから赤感層に重層効果をかかけた部分であり、等色関数の負の分光感度を近似的に再現している。

前述のように、第4層 (CL) をGLの下層に設置した (Fig. 9)。CLの赤感層への抑制は、RLに隣接する位置にある方がかけやすく有利である。

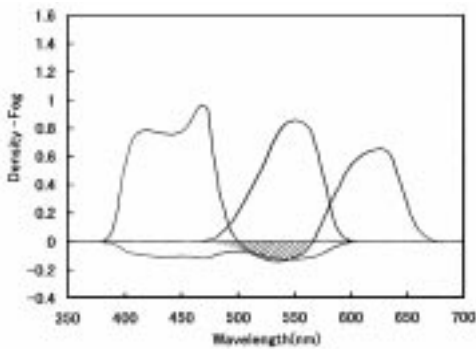


Fig. 8 Density profile of the spectral sensitivity of Super400

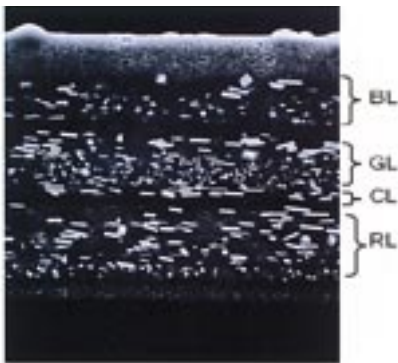


Fig. 9 Cross section of Super400

従来感材では、赤感層に届く光は緑感層を通過して来るため、緑感層の吸収と重なる赤感光性層の短波側は緑感層がフィルターとなり、光量が少なく低感化しやすいが、CL層を有する本感材では、緑感層 (+CL層) の長波側の吸収が減少しており、下層の赤感層の短波側の感度を上げやすくしている (Fig. 10)。

また、通常のBGR3感色性のフィルムでは緑感層から赤感層に重層効果をかけるため、緑感層の長波側から赤感層の短波側が抑制され赤感光性層の短波化が困難であった。本感材では緑感層の短波側のCL層から抑制をかけることにより、赤感層の短波感度を出しやすくしている。Fig. 11に一点鎖線で示すように、CLは緑感

層の短波側の分光感度を有している。

Fig. 12にスペクトル写真を示した。575nm付近にSuper400は黄色の部分があるのに対して、現行品にはその領域が非常に少なく、緑色に再現されていることがわかる。これは、現行品では赤感層の短波感度が低く、また緑感層の長波側から赤感層に重層効果がかかっているために、赤感層と緑感層の重なりが少ないことに対応している。

Fig. 11に白色蛍光灯の発光スペクトルを示したが、蛍光灯は575nm付近にブロードな発光があり、上記スペクトル再現に示されるような現行品の575nm 付近の光を緑色に再現する傾向が、蛍光灯による緑がかりの原因となっている。上記分光感度の改良により、蛍光灯による緑がかりを改良することができた。

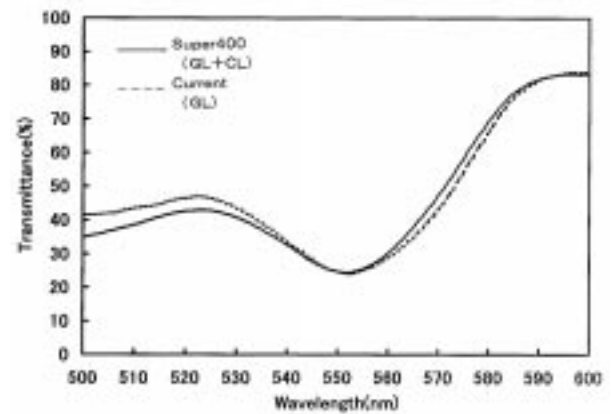


Fig. 10 Transmittance of the green sensitive layer

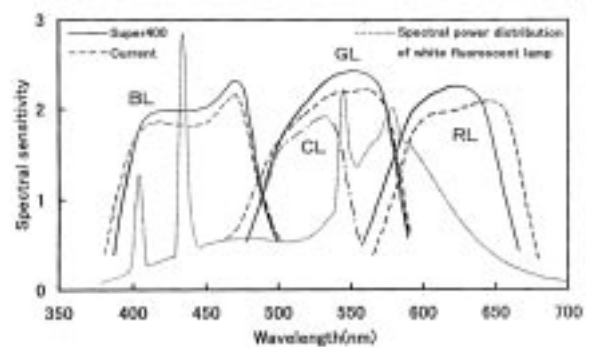


Fig. 11 Spectral sensitivity of Super400 and current film and spectral power distribution of white fluorescent lamp

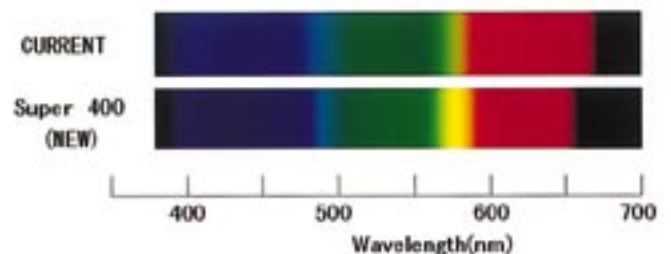


Fig. 12 Reproduction of the visible spectrum

6.2 スーパーユニフォームファイングレイン技術

Super400/Nexia H400ではCLを緑感層の下に配置しているため、CLにとってGLがフィルターとなり、CLに届く光量が減少して感度の観点からは不利であるが、スーパーユニフォームファイングレイン技術により感度/粒状比の劣化を防いでいる。

富士写真フィルムは1992年に発売したフジカラースーパーG400に、感光効率を高めるための構造を内蔵させた六角平板粒子を本格的に導入し、それ以降のフジカラーの感光粒子としての改良を重ねてきた²⁾。

一粒子の体積を一定にして粒子を薄くすることは、表面積を増加させ、より多くの増感色素を吸着させることができるので光吸収に有利となる。さらに、増感色素の多量吸着による固有減感を防止することができれば高感化が可能となる。六角平板粒子は2枚の双晶面の出た側面が存在し、成長条件の選択により主平面より側面の成長を速くでき、高アスペクト比化が可能となる。しかし、この条件では同時に大サイズの平板粒子が小サイズの平板粒子より成長速度が速くなり、結果としてサイズ分布が広がる傾向があった。

Super400/Nexia H400では、平板粒子調製の核形成条件を見直し、平板度と単分散度を両立させ、かつ各粒子に内蔵させた構造をより均一にさせ、スーパーユニフォームファイングレインを開発することに成功した。

多量色素による固有減感を防止する策としては、六角平板粒子のフリンジ部に刃状転位の構造を内蔵させることが有効である。転位はマイクロ波光伝導などの測定から光電子の一時トラップとして作用することが確認され、そのトラップによる光電子と色素正孔の再結合抑制が固有減感防止のメカニズムである。また、フリンジ部のトラップから再放出された電子は、六角平板の頂点の感光中心に捕獲されて、潜像を効率的に作ると考えている。この仮説に従い、粒子間で均一な構造を持つ乳剤を導入し、性能向上をはかることが可能となった (Fig. 13)^{3,4)}。

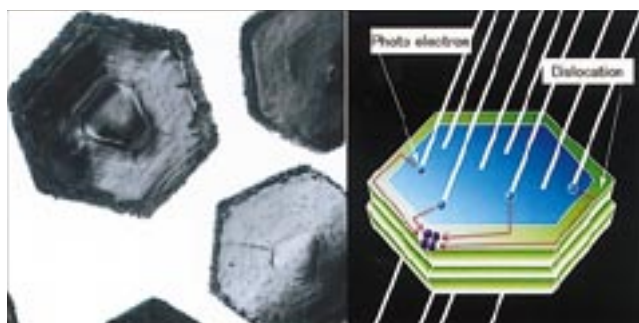
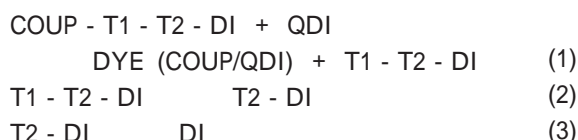


Fig. 13 Dislocation in the super uniform fine grains

6.3 2 段タイミングDIRカプラー

イメージシャープネスを向上させるためには、エッジ強調することが一つの有力な方法である。Fig.14に示すように、現像抑制物質がフィルム面に平行に拡散して周囲の現像可能なハロゲン化銀を現像抑制することにより、エッジ強調することはよく知られている。このためには、抑制物質の適度な拡散による現像抑制が必要である。この目的のために、当社独自技術である2段タイミングDIRカプラーの導入を試みた。

2段タイミングDIRカプラーの反応スキームを以下に示す⁵⁾。



COUPはカプラー残基、DIは現像抑制剤、QDIはカラー現像液の酸化体、T1は第一タイミング基、T2は第二タイミング基を表す。2段タイミングDIRカプラーはQDIと反応して、T1 - T2 - DIを放出し、さらに、2ステップの反応を通じて、DIを放出する。この反応速度を制御することにより、DIの放出タイミングをコントロールすることができ、エッジ強調することが可能となる。結果をFig.15に示すが、Super400のエッジ効果が大きくなっていることがわかる。これにより、卓越したシャープネスを持たせることができた。

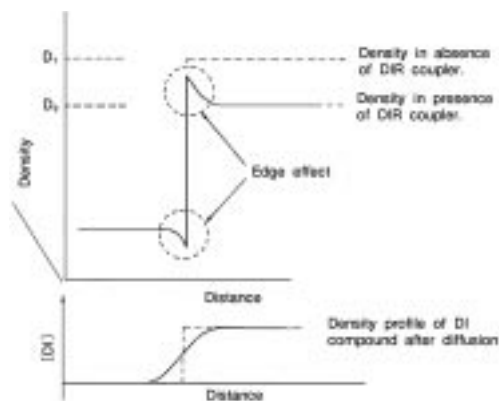


Fig. 14 Edge profile in the presence of DIR coupler

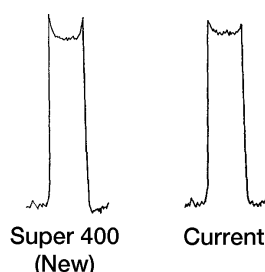


Fig. 15 Edge effect of Super400 and current film

6.4 YF固体分散染料の導入

Nexia H400には、イエローフィルター (YF) 固体分散染料を導入し、APSの小フォーマットであることによる画質の劣化を解消している。従来、YF層にはコロイド銀を使用してきたが、吸収がブロードで長波側に不要の吸収があるために下層の感度を損なっていた。YF染料を用いることにより、長波側の不要な吸収を除去して下層の感度を上げ、感度/粒状比を改良することができた。

7. おわりに

1989年に第4層を内蔵したフジカラーリアラを発売して以来9年を経て、この技術を汎用のカラーネガフィルムに展開することができ、カラーネガフィルムは21世紀に向け、また新たな第一歩を踏み出すことができた。本報告で述べてきたニューフォースレイヤー技術をはじめとする技術は、海外用のNew Superiaシリーズ (ISO100, 200, 400) や New Nexia A200, D100にも導入されている。これにより、ISO400以下のアマチュア用カラーネガフィルムは、従来からのリアラエース、Nexia Fを含めると、そのラインアップのほとんどが

第4層を内蔵することとなり、あらゆる撮影シーンで色にこだわるユーザーのニーズに応えることができるようになった。これからも富士写真フィルムは革新的な技術開発に挑戦し、多くのユーザーのニーズに応えるとともに、数百年の歴史が作り上げてきた写真文化をさらに昂揚させていきたいと考えている。人間の目で見たとおりの色に忠実に再現することがカラーフィルムの本来の使命であり、ここへの挑戦はまだまだ始まったばかりである。

参考文献

- 1) 佐々木ら，日本写真学会誌，52 (1)，41 (1989)
- 2) 佐々木，富士フィルム研究報告，No. 39，1 (1994)
- 3) 石丸ら，富士フィルム研究報告，No. 37，1 (1992)
- 4) 池田ら，US4, 806, 461
- 5) 市嶋，日本写真学会創立70周年記念ファインイメージシンポジウム講演要旨集，279 (1995)

(本報告中にある“フジカラー”，“Fujicolor”，“NEXIA”，“Nexia”，“Fujifilm”，“リアラ”，“Superia”は富士写真フィルム(株)の商標です。)