**粒子のブレード前配向：
高アスペクト比顔料塗工における均一塗工構造開発
のための新設計概念**

ECC インターナショナル P. A. C. ゲイン, L. コゴン, J. J. フーパー
(訳) ECC ジャパン(株)

**Particle pre-orientation :
A novel design concept for developing uniform coating
structures in the application of high aspect ratio pigments**

P. A. C. Gane, L. Coggon and J. J. Hooper
ECC International Ltd.

The physical properties of a coated sheet are strongly related to the coating structure developed through the interactions between the coating formulation, the basepaper and the coating machine during application of the coating layer. Control of coating structure and basepaper coverage is a complex phenomenon generally confined in discussion to a consideration of the dewatering and subsequent immobilisation properties of the colour, the particle packing characteristic of the mineral components in the colour and basesheet surface profile. The influences of coating colour solids, machine speed and the flow characteristic at the coating head (and roll applicator if applicable) are manifest particularly by the observed pressure penetration of fluid coating colour into the basepaper surface voidage, the instantaneous rheological properties of the pigment-based formulation and the runnability at the blade. Poor particle packing in the region immediately upstream of the blade tip is seen as a major contributing factor to blade bleeding and stalagmite formation. Many of the demands for superior coverage in LWC papers, and uniformity of coating structure in general, depend upon a highly stable packing configuration at the crucial region entering the blade nip. Film split effects in roll applicators, circulation instabilities in short dwell coating and sensitivity to blade geometry conspire to create non-uniformities in the coating structure. Amongst coating pigments, highly anisometric particle forms, such as platy kaolin, are particularly susceptible to orientational instabilities arising from the many complexities of these interactions.

A novel approach to stabilising the flow upstream from the doctor blade is afforded by using a pre-metering blade unit which initiates a relatively small shear-related pressure zone under which the coating colour interface boundary with the basepaper is established and the colour is sheared prior to the final metering to the desired coat weight at the doctor blade. The effect of initiating coating colour dewatering and immobilisation of the colour in contact with the basepaper promotes contour coverage, and the pre-shearing serves to orient high aspect ratio particles with resultant significant improvements in runnability and coating quality including gloss and coverage. The primary design discussed refers in particular to the ECC International HARPOC (High Aspect Ratio Particle Pre-Orienting Coater) as applied to the ECC International Helicoater[®] and published

本報は '92 PAN-PAC PPTC (1992. 9. 8~10, 東京) において発表したものである。

in the embodiment of the European Patent Specification EP 0198622 B 1.

Keywords : Coating, runnability, gloss, coverage, blades, coat heads, packing, pigmentation, dynamics, uniformity

はじめに

経済的圧力が強まる中であって、効率良く一定の品質を達成する事への関心が製紙業界で一段と高まっている。コーテッドペーパーの生産効率を決定する要因をいくつかの範疇に分類すると塗工機の操業性、連続生産性、および塗工技術がもたらす品質保証（この技術により潜在的危険度の高い問題の発生を安全に防止）に分けられよう。それらの問題には被覆性の悪さ、低い強度、加えて、さらに重要なモットルの無い印刷に不可欠な均質コート層の生成が含まれる。

コーテッドペーパーの特性に影響を及ぼす多数の要因の一つに、コーティングヘッドにおける、水性塗工カラーと多孔性原紙間での特定な相互作用がある。ブレードブリーディングの研究の結果では¹⁾、ブレードチップから上流側の流れに対する制約と絡んで、塗工カラー内の粒子の大きさ、形、および充填特性により塗工カラーの塗工適性が影響されることが示されている^{2,3)}。流れの境界部のジオメトリー（このジオメトリーはブレードの湾曲形状によって決定される）はブレード角の減少に伴い、あるいは速度の上昇に伴い、あるいはその双方により圧力脈動の増加をもたらす。この圧力の脈動は過剰な塗工カラーをかき落す際に、液状の塗工カラーが大量に移動することにより生成される衝撃力に関係する^{4,5,6)}。衝撃圧力に伴う運動量の変化率が増大するにつれ、圧力により原紙表面の空隙に押し込められる塗工カラーが増加し、原紙表面のプロファイルの緩和・崩壊が高まってくる⁷⁾。その結果、被覆性が低下し、脱水が促進され操業性は低下することになる。

ロールアプリーケーターとトレーリングブレードを組み合わせることで、高品質塗工の開発に成功したわけであるが、その理由の一つとして、原紙表面に隣接する塗工カラーが部分的に不動化することが挙げられる。こうして不動化した層は、逆にブレード部で発生した圧力浸透に抵抗する傾向を示す。しかし、ロールアプリーケーター技術にもロールニップにおけるフィルム・スプリットとスプラッシュ、塗工カラーへの空気の混入、およびロールとブレード間のドウエル時間が長いことによるカラー固形分濃度の増加といった点においてやはり限界がある。ショートドウエル塗工では速度

上の制約およびロールアプリーケーターでは特定のレオロジー的な制約がないとはいえ、チェンバー内の不安定な渦の発生および空気の混入により塗工が不安定になる傾向があり、特にクロスマシン方向の塗工量の変動が発生しやすく、極端な場合にはマシン方向にストリーク（ウェットストリーク）が発生することがある⁸⁾。

高アスペクト粒子：理想的なレオロジー

ブレードニップの境界領域での例に見られるように、塗工カラーが持つ瞬間的なレオロジー特性はブレードの形状、固形分、および速度のすべてに起因している^{1,9)}。塗工カラーがブレード下にあるわずかな時間を考えると、カラー内の構成粒子にとって、塗工カラーが液相環境にある間に均衡充填状態に達することが可能か否かという問題が浮上しよう。この液相環境には塗工カラー中の構成要素間の種々の化学的・物理的相互作用による緩和特性の影響が含まれる^{10,11)}。塗工カラーの粘弾性および伸び特性は、ずり速度および流れ方向が急速に変化する領域において重要な役割を演じる場合がある。

非等軸晶性の極めて高い鉱物質顔料を配合することは被覆性、塗料の保持性、および圧力脱水への観点からは有益である。塗工量が同一の場合には、扁平粒子はアスペクト比の低い粒子と比較した場合、隘路性が高まり、一定の沈降直径に対する粒子の数も増加する。重量ベースで一定の固形分濃度では粒子の濃度が増大すると、カオリン等の扁平状鉱物性材料では粒子がブレードの下を通過する際に、粒子が殺到し「渋滞」を起こす可能性が高いので、塗工する際に厳しい塗工適性（走行性）が要求されよう。高速でブレードチップ下における滞留時間が短いということは、全体の充填性、特にニップに入る粒子の配向が、上流側であらかじめ効果的に配向されており、かつ流れの形状に対する粒子配向への応答性が極めて重要であるということの意味している。

粒子の事前配向：「情報」という概念

塗工カラーに対してひずみを与えることは、情報の交換に例えることができよう。粘性要素、あるいは弾性要素、あるいはその双方がずり速度または変形と共

に変化するので、あらゆる非ニュートン流動特性に対する情報能力には限りがある。非等軸晶粒子を含む塗工カラーの場合、「情報」は粒子を配向させる物理的プロセスおよび流れ内の剪断面の伝達に関係したものとなろう。従って、懸濁粒子によって伝達される情報は粒子相互の配向を変えることで、いわば暗号化される。まず第一に、粒子は雑然と配向した『板状粒子』の集合を形成する。コーティングシステム（例えばブレードにより紙の表面から塗工カラーをかき落として計量を行うシステム）は、ブレードの下を通過しやすくするために粒子を配向させ、その液状カラーにひずみを起こして、効果的に無秩序から秩序を作り出すことで塗工カラーを情報で暗号化する。剪断流において粒子の秩序を図る方法を理想図にしたものが図1である。塗工紙の粗さ、グロス、白色度、および不透明性等（すなわち、塗工層の表面特性および構造特性）を観察する際に、こうして伝達された情報が『解説』されることになる。

いかなる通信システムにおいても情報交換速度というものが存在し、この速度以上でメッセージの伝達を行うと、メッセージが不正確になるか、もしくはメッセージに「ゆがみ」が生じてくる。伝達される情報の相対的量を増加させる方法は、伝達される『情報』を何らかの形で予見させ、情報の受け手、すなわちこの場合には顔料、（人間に例えるなら聞き手）に待機態勢を取らせることである。あらかじめ何らかの情報を与えることで、メッセージをすべて伝達するのに必要な情報の量または割合が効果的に減少しよう。『情報』伝達の割合が減少すると、逆にそれを反映して、レオロジー的に表現するなら、任意のずり速度に対するずり応力または粘性が実質的に減少することを観察することができる。コーティング工程においてその結果、発生する粘性の減少はいかなるものであっても、圧力脱水に対する抵抗が一定で、かつその他のいかなる『相互作用』にも支配されないならば、塗工するカラーの

Fig. 1 Alignment of platey particles in shear planes under laminar flow

固形分濃度のアップに寄与し、操作性が改善されよう。

HARPOC (High Aspect Ratio Particle Pre-Orientating Coater <高アスペクト比粒子事前配向コーター>) の設計の前提となっている仮説は、懸濁する偏平粒子があらかじめ流体の流れに沿って配向状態にされれば、乱流およびそれに伴うダイラタント性を発生させることなく、その懸濁粒子は流動性連続体のごとき挙動を示すというものである¹²⁾。図2はブレードの前でそうした配向上の『情報』を組み込んだ塗工カラーを使用した際の、通常のコーティングブレードの位置における効果を示したものである。このように塗工カラーを事前に配向させておくことの長所は、大きい偏平粒子を非現実的な短時間内に配向させる必要がなくなり、かつブレードにおける流体の剪断が粒子の面に沿ったものとなり、粒子が流体内の境界分離を助長するという点である。すなわち、液状塗工カラーを『薄皮をむくようにはがし取り』、原紙上に平滑な配向状態の塗工層を形成するための内添助剤として粒子を見なすことができるということである。こうした挙動により塗工面の乱れを最小限にしながらかつ、ブレード圧を高めることが可能となる。粗い偏平粒子を配合する場合、偏平粒子の面の部分が原紙と平行状態となっていないと表面の平滑性が乱れやすくなるの

Fig. 2(a) Pre-oriented Particles

Fig. 2(b) Disordered Particles
Poor runnability single blade coating

で、上記の工程の結果得られる塗工層プロファイルが極めて重要になる訳である。

コーティングヘッド：一つ的设计案

ドクターブレードまたは計量ブレードより前で配向の情報を組み込むには、塗工カラーはコーティング工程におけるそれ以前の箇所では何らかの形で強制的に剪断ジオメトリにさらされる必要がある。粒子の整列を極大化し、かつダイラタンシー発生等のレオロジー上の問題を回避するには、使用するジオメトリは一般的な計量用ブレードよりも、実質的に緩やかに変化する剪断状態を発生させる必要がある。

こうした基準を達成するためのメカニズムの一つは、標準のトレーリング・ドクターブレードの上流側にフレキシブルな湾曲ブレードを設置するというものである。図3はこういったツイン・ブレードコーター（現在の HARPOC プロトタイプ）の設計を示したものである。このコーターではフレキシブルな第1ブレードの材質は金属、エラストマー系、またはプラストマー系（例えば、薄いばね鋼または p.t.f.e）である。フレキシブルブレードは一端に沿って固定されており、この例では、固定されていない側はほぼタンジェント（接線）的に原紙に接触している。これに加え湾曲形成物、例えば弾性を有する棒（この図では、フレキシブルなプラスチック管を使用）でフレキシブルブレードの固定端付近が支持されている。

二つのブレード間の距離は多数の重要因子に支配されている。こうした因子には、原紙への浸透による塗

工カラーの脱水率または毛管現象等による周辺への水損失が含まれる。当然のことながら、脱水により塗工カラーの固形分は実質的に増加しトレーリングブレード位置におけるレオロジーは変化する。急速な局部的脱水を制御することは、塗料の完全性を維持するため、ならびに原紙に対する塗工液の過大な浸透を防止するために不可欠である。それ故、最高の固形分濃度のカラーを塗布する場合、ブレード間の距離はできるだけ最短にする必要がある。しかし、第1フレキシブルブレードによって塗布されたカラーがトレーリングブレードによる処理の前にいくぶん脱水するのは避け得ないものであり、現在採用されている塗工カラーに対するドクターブレードとアプリーケーターロール間のドウェル時間が実質的には最大値であると見なすことが適切であろう。Helicoater のプロトタイプで使用しているブレード間の実際の距離は6 cm に設定されており、この間隔では運転速度 400 m/min の場合、ドウェル時間は9 msec になる。これはアプリーケーターロールとドクターブレード間が約25 cm、運転速度約1,500 m/min の実機プラントに匹敵するものである。

このドウェル時間の最短化を実現するには、①第1ブレードと第2ブレード間の距離を最短に抑え、②ショートドウェル・コーティングヘッドで採用されているように、第1の事前配向ブレード直前で原紙に対して塗工カラーを適切に供給し、第1ブレードにおいて塗布することである。

ここで熱力学が一因となり、塗工カラー懸濁内の粒子のブラウン運動によってエントロピーの増大が誘発され、時間経過に伴って、事前配向の度合い、すなわち秩序が崩れていく点に留意する必要がある。こうした固有の秩序崩壊時間は、アスペクト比の高い粒子を直径 d 、アスペクト比 ρ の円盤と考えることで理想的にシミュレーションすることができる（図4）。こうした粒子が溶媒または水分子からの衝撃により回転状のブラウン運動を受けるならば、結果として生ずる回転拡散により、次の式で表されるように配向は指数的に緩和される。

Fig. 3 HARPOC : Diagrammatic representation

Fig. 4

$$\langle \text{配向} \rangle \propto e^{-t/T_R} \quad \dots\dots(1)$$

この式で、粒子の集合平均配向 ($\langle \rangle$) の緩和時間 T_R は、平均的配向が当初の整列度の $1/e$ に崩壊するまでの所要時間を示している。緩和時間 T_R は円盤の直径とアスペクト比との間に次の関係が成り立つ。

$$1/T_R = \frac{6kT}{\pi\eta} \frac{\phi(\rho)}{d^3} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、一定の厚さの円盤の場合には、 $\phi(\rho) = 3\pi/4$

k = ボルツマン (Boltzmann) 定数

T = 絶対温度

η = 懸濁媒体の粘性

集合の配向に対する半減期は次式のように与えられる。

$$T_{1/2} = T_R \ln 2 \quad \dots\dots(3)$$

従って、公称直径が例えば $1\mu\text{m}$ の円盤状粒子の集合平均配向が初期値の半分に減衰するまでの所要時間は、室温で水中に懸濁している場合、約 40 msec、($T_{1/2}$) である。この推定では、粒子は媒介中に十分に拡散しており、近隣の粒子に何ら阻害されることなく回転できるものという仮定に基づいている。当然のことながら、固形分濃度が高い場合はこの前提条件が崩れ $T_{1/2}$ は増大する。同様に塗工カラーの水相の実質的な粘度は、水単独の場合よりもいっそう高く、これもまた $T_{1/2}$ の増大に寄与してくる。従って、ドウェル時間 $\leq 10\text{ms}$ の場合、ブレード間の回転拡散による配向の崩壊は最小限に抑えられることになる。

試験塗工…コーティング結果

LWC および LLWC オフセット—光沢度の向上—

光沢度の最適化に対して偏平状顔料がどう反応するかについては固形分、ブレードジオメトリ、および速度の関数であることが論証されている²⁾。軽量塗工

Fig. 5 Gloss optimisation by upstream geometry at fixed solids

Fig. 6 Dependence of gloss on coat weight over a range of solids when applied at constant tip angle

における光沢度変化の例を図 5, 6 に示す。ある一定の塗工量における光沢度の最高値は最適化されていない塗工の場合よりも 10~15% 高いことが分かる。

ある塗工量以上となるとこの影響は大幅に低減するが、この限界塗工量は顔料の粒度分布の中における最大の分子直径に依存する傾向がある。

ごく一般的な 80 wt. % $< 2\mu\text{m}$ の偏平状クレーに大きな粒子 (約 $5\mu\text{m}$) がわずかに含まれていると仮定する。この大きさは乾燥後の塗工厚である $9\sim 10\text{g/m}^2$ にほぼ等しいものである。従って、塗工量が 9g/m^2 以上の塗工層が備えている厚さならば、塗工層内において粒子はどのような配向状態になることも可能であり、カレンダーがけ処理により、各配合の持つ最適光沢度を得るための表面特質を取り戻すことができる。以上のほかに、均一塗工等の要因も光沢度に関与しており、上記の一般規則に対して変動をもたらすことになる。

HARPOC を使用した次の試験は、最適化を行った場合と行わなかった場合のシングルブレード塗工による光沢度を比較したものである。使用したコーティング顔料は、80 wt. %, $< 2\mu\text{m}$ のアスペクト比の高いカオリンで、この配合には 11 pph の SB ラテックスおよび 1 pph のカルボキシメチルセルロースが含まれている (クレ重量 100 部基準)。塗料の固形分濃度は 60 wt. % に固定し、塗工速度は 600 m/min、ブレード固定角は 45° と 55° の 2 つの設定で塗工を行った。図 7 に示すようにシングルブレード塗工では 7g/m^2 においてブレード角度によって最高 8% の光沢度 (TAPPI グロス) の違いが見られ、高角度のほうが光沢度が高くなる。HARPOC による塗工では高角度 55° の塗工と同様の光沢度を、ブレード固定角 45° の設定でも得ることができる。すなわち、事前計量を使用することにより高い固形分で最適の光沢度を得ることが可能となり、低角度における塗工の悪影響を克服できるという事である。さらに、シングルブレード塗工と比較した

Fig. 7 Gloss optimisation

Fig. 8 LWC coating thickness distributions

場合、HARPPOC は高い塗工量においても、わずかであるが光沢度におけるメリットが期待できる。

図8に示すように、HARPPOCによる塗工厚分布はシングルブレード・コーティングの場合よりも均質である。こうした等高塗工に近づく傾向は従来のロングドウェル・ロール・アプリーケーター・システムで得られる結果と同じで、塗工カラーの固有の原紙界面での不動化⁷⁾は、より高い塗工量において均一な被覆を促進する傾向を有している。

グラビア印刷適性の向上

グラビアではプリントニップにおける平滑性を最大にするために圧縮性、あるいは柔軟性、あるいはその双方を高める塗料配合で塗工層構造の向上を図っている。現在の配合の多くは、軽量紙での塗工の被覆性を伸ばすために比較的荒い偏平状鉱物を採用しており、アルカリ増粘ラテックスーソールバインダー系と組み合わせられて使用されている。

図9はHARPPOCの事前計量装置の使用がもたらすグラビアの網点再現性へのメリットをLWC中質紙で示したものである。配合は55 wt.%の固形分濃度で65 wt.%, $<2 \mu\text{m}$ の偏平状クレーおよび4.5 pphのアクリル自己増粘ラテックスを使用し、光沢度が最適になるようにしている。シングルブレード塗工と比較す

Fig. 9 Rotogravure printability

ると、網点欠落のパーセンテージは低い塗工量において最も顕著に見られ、前述のオフセットコーティングと同様に高塗工量まで網点欠落率の減少が及んでいる。

操業性

コーターの操業性を考える際、断紙の低減、塗工量に対する柔軟性、およびスピットやスクラッチ等の塗工不良の発生抑制といった機械効率に注目する傾向がある。ブレードの塗工適性が不十分であることに起因する問題の多くは、ブリーディングおよび石筈(スタラグマイト)の形成に関連している¹⁾。しかし、こうした基準を満たしていても、前述の議論のように紙の品質が低下することがある。

高速化に伴うHARPPOC塗工方式の影響を見るために、上記のオフセット塗工カラーを使用し、スピットまたはストリークの発生が見られない最大塗工速度について、HARPPOCと同様のボンド型の45°シングルブレードとHARPPOCとで比較してみた。HARPPOCを使用した場合、最大塗工速度はシングルブレードの700 m/minから約1,000 m/minに増速可能であることが観察された(図10)。

速度上、または固形分濃度上のこうした利点は、プロトタイプの供液構造設計が持つ限界から比較的低速

Fig. 10 Runnability of platey pigments

度で試験されたとはいえ、製造効率向上に対する HARPOC が有しているポテンシャルが明らかに示されている。

結 論

塗工カラーの非ニュートン流動特性、特にアスペクト比の高い扁平状顔料を含むカラーの特性は、一般に均一剪断の均衡状態におけるずり速度流動化の部分のみにあつたものである。しかし、実際の塗工は必ず応力の変化速度が非常に急速であるという点で、通常の粘度計の条件とは明確に異なるものである。ブレードコーターにおいてはブレード下の滞留時間は極めて短い(例: 塗工速度 1,000 m/min 以上で 20 μ s 未満)。ブレードニップの上流側に制御された剪断を与え、このミクロストラクチャーを作り出すことができ、このミクロストラクチャーが計量用ブレードにおけるレオロジー特性に影響を及ぼし、ブレードにおける実質的な粘性は連続的な剪断層流中で粒子が配向した状態の均衡状態に近づいてゆく。従来のロールアップリケーター型システムよりも短時間での限定されたパルス脱水と塗工カラーの剪断経緯とを組み合わせさせた結果、塗工適性、被覆性および塗工構造の均一化の向上が得られた。こうした原理の具体化が塗工用のツインブレードの概念の基礎となっている。

Helicoater 用に設計された新たなコーティングヘッド (HARPOC) を用いた研究室で得られた結果は塗工適性の改善により、グロス、適用範囲、および印刷適性を向上させることが可能であるという予測を裏付けている。

文 献

- 1) Gane, P. A. C., Watters P. and McGenity P. M., Proceedings of PTS Coating Symposium, Munich, September 1991 and Tappi Coating Conference, Orlando 1992, Tappi Press, Atlanta.
- 2) Gane P. A. C. and Coggon L. Coating Blade Geometry: its effect on coating colour dynamics and coated sheet properties, Tappi J. 70 (122): 87 (1987).
- 3) Gane P. A. C. and Watters P., Orientierung der Pigmentteilchen in Strich: eine analyse der möglichkeiten zur optimierung der Blade Coater-Runnability und der eigenschaften der gestrichenen papiere durch gezielte Beeinflussung der Strömungsgeometrie, Wochenblatt für Papierfabrikation 13, 1991 p. 499-505.
- 4) Windle W. and Beazley K. M., The Mechanism of Blade Coating, Tappi J. 50 (1): 1-7 (1967).
- 5) Kahila S. J. and Eklund D. E., Factors Influencing the Coat Weight in Blade Coating with Bevelled Blades: Theory and Practice, Proceedings 1978 Tappi Coating Conference, Tappi Press, Atlanta, p. 13-29.
- 6) Altug M. N. and Triantafillopoulos N. G., An Experimental Investigation of Bevelled Blade Coating for Paper, AIChE Meeting, Los Angeles, No. 17-22, 1991.
- 7) Gane P. A. C. and Hooper J. J., Fundamentals of Papermaking, Trans. of the Ninth Fund. Res. Symp., Vol. II, Mech. Eng. publ. Ltd., London, 1989 p. 871.
- 8) Triantafillopoulos N. G. and Aidun C. K., Relationship between flow instability in short dwell ponds and cross-directional coat weight non-uniformities, Proceedings of Tappi Coating Conference, Boston, Tappi Press, Atlanta, 1990, p. 309.
- 9) Gane P. A. C. and Hiorns A. G., Blade modelling brings pilot coating nearer mill practice, Paper Technology, April 1991, p. 26-32.
- 10) McGenity P. M., Husband J. C., Gane P. A. C. and Engley M. S., Effect of Interactions between coating colour components on rheology, water retention and runnability. Proceedings Tappi Coating Conference, Orlando, Tappi Press, Atlanta, 1992.
- 11) Husband J. C. and Adams J. M., Shear-induced aggregation of carboxylated Polymer Latices, Colloid and Polymer Science, in the Press.
- 12) Gane P. A. C., European Patent Specification EP 0198622 B 1.
- 13) Perrin F. (1934) J. Phys. Radium 5, 497.