

塗布技術研究会 2021 年秋 第 67 回定例会合 関西会場 【事例紹介】

微粒子を含む濃厚塗液の塗布流動シミュレーション

三菱製紙株式会社/MPM数値解析センター株式会社 安原 賢

1. はじめに

ウェットコーティング(塗布)とは、液を基材(紙・フィルム・ガラス基板・金属箔等のウェブ)に塗りつけてウェット薄膜を形成するプロセスで、近年ではフラットパネルディスプレイや電池部材等の電子材料分野で高粘度非ニュートンスラリーのロット塗布が良く用いられる。塗布を科学的に表現すれば、基材表面に元々存在する空気を液に置き換えて均一で薄い液膜を得ることを目指すが、液膜が乱れて塗布故障を生じる場合もある。

液がウェブに向かって架橋する部分は塗布ビードと呼ばれ、その形状は自由表面(気液界面)でスケールは百 μm 程度と微小なため、コンピュータシミュレーションによる可視化と挙動解明が進められてきた。化学工学会 材料界面部会 塗布技術研究会 塗布・乾燥シミュレーションワーキンググループ(略称: CRACFDWG)では、各種の流体解析ソフトでビード解析の比較検証¹⁾を行い、スーパーコンピュータによる計算速度向上も検討してきた。

通常の流体解析では、液は連続体の粘性流体相と扱い、空気相も考慮したオイラー混相流の VOF 解析が一般的だが、液中に分散された固体微粒子(粉体)の挙動をラグランジェ的に連成解析する試みも進めており、以前の DEM 法及び最近の MP-PIC 法の拡張事例を紹介する。

2. 微粒子連成塗布ビード解析への拡張

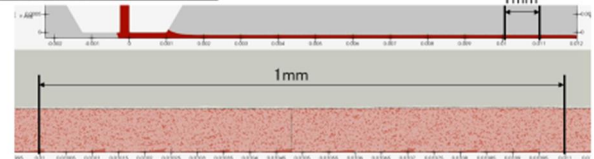
実際の塗液の主成分は、溶媒・高分子・固体微粒子で構成され、非ニュートン高粘度かつ高濃度の微粒子を含む液体はスラリーとも呼ばれる。但し、上述の VOF 塗布解析では微粒子挙動までは未考慮で、今回は 2 種類の粒子連成拡張を述べる。

以前に進めた DEM 粒子連成では、球形粒子の粒径分布、球形粒子をクラスタ連結した棒形状の表現、柔軟連結による変形繊維、更にはセルロースを狙ったフィブリル繊維のように球形のみならず多様な固体形状の挙動再現を目指してきた。但し、微小で濃厚な微粒子を実スケールで扱うには粒子数が莫大化して非現実的であった。また、固体物性(ヤング率等)に依存する衝突反発を厳密に解くため空気中の岩石や種子等の剛体挙動に好適だが、高粘度流体中の微粒子には簡略化が妥当と考えていた。

他方、最近取り組んでいる MP-PIC 粒子連成では、粒子形状は球形に限られるが、実スケールの濃厚スラリー(粒

子直径 $0.1\mu\text{m}$ 、体積粒子濃度 50%) が表現可能となりつつある。Fig. 1 は液粘度のみ変更した比較で、(a) 低粘度ニュートンならば均一な粒子分布でも、実際に近い (b) 高粘度非ニュートンでは不均一を生じる一例である。このように、従来の塗布解析では、自由表面形状の乱れを塗布故障と考えてきたが、形状の乱れは僅かでも液内部の粒子分布は意外に不均一なケースもあり、塗布解析の正常範囲内に更に限定的な粒子均一範囲が存在する可能性が高まった。ここでは基本的な 2 次元断面解析を示したが全巾 3 次元解析におけるマクロ的な巾方向粒子分布、更には間欠塗布やストライプ塗布に特有の挙動も興味深い。また、微粒子特有の物理モデルとして、凝集濃縮パッキング、粒子間力、静電気力、磁力等の考慮も進めたい。

(a) 低粘度ニュートン



(b) 高粘度非ニュートン

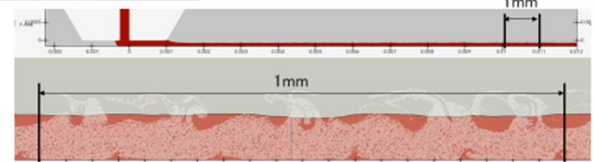


Fig. 1 塗布膜における粒子分布状況

3. おわりに

塗布流動という複雑な剪断場での粒子挙動として、条件によっては塗布ビード直後で既に粒子分布不均一を生じる可能性が示唆された。但し、塗布工程に次ぐ乾燥(膜表面のみからの溶媒蒸発による濃度分布発生)にて膜厚方向の粒子分布が変化することも知られており、乾燥解析の初期条件として本結果を適用する、更には塗布~乾燥の一貫解析も興味深い。

SDGs 時代のウェットプロセスとして、塗液の高濃度濃縮化は乾燥エネルギー CO_2 コスト削減に直結する重要なテーマである。但し、濃縮による液の高粘度化・粒子の高濃度化は塗布故障(液の不均一)・粒子分布不均一を招く方向であり、正常範囲の解明と最適設計を目指したい。