モノづくり産業における材料とプロセスの饗宴

Symphony of Materials and Processing in the Printing Industry

黒田 孝二

Koji Kuroda

Keywords : Nanotechnology, Material behavior, Processing, Visualization, Knowledge, 21st Science, Human sense

1. 21世紀の科学

科学は道具である。道具は時代に合わなくなれば、改良交換しなければならない。21世紀のソリューションは20世紀型科学の発展の延長上には無く、新たな知識・経験則や科学との融合領域に存在する(図1)。

21世紀はナノ領域制御技術の時代になると予測されている。この複雑系の制御でグローバルリーダーになるには、科学を人間の知識・経験則と統合した新体系に革新し、次世代の活力に引き継がねばならない。

印刷の網点は数10～約200 μm に分布して濃淡や色調を表現しており、ルーペでも確認できる。しかし、このインキが版から紙に転移する時間は1ミリ秒以下で完結する高速現象であることは知られていない。

印刷技術は15世紀のグーテンベルクの発明以来、大量、高速化が目覚しく進展し、さらに精密さと複雑さの追求がなされているが、その制御は主に現場の経験則に基づいているのが実情である。それを科学するには、従来の理想系・平衡論から複雑系・速度論に基

図1 21世紀の科学技術ソリューション

づいた体系への転換が必要である。

インキの濡れや、表面の滑り、接着を左右するのは表面界面のナノ領域の機能であり、ナノテクは印刷産業に不可欠の技術である。ここでは、インキが機能性塗膜に成長する過程をモデルに、これを制御してきた熟練者の感性と連動する解析技術と、知識・経験とを活かした実学ソリューションの新科学を考えてみる。

2. ナノテクノロジーは印刷産業の既存技術

平成元年の印刷初の分析センター発足以来、約8000件の経験の集約を図2に示す。横軸は印刷技術の細かさで、印刷の網点は数10 μm から約200 μm に分布して色の濃淡を表現している。縦軸は解析事例から得た経験則で、表面から深さ方向にどの機能が分担されているかを示している。注目すべきは、印刷の基本機能である滑り、濡れ、離型、転写、接着はナノメーターの深さの機能であり、人間の感性と経験則はナノテクノロジーを駆使してきたという事実である。

これを、プロセスに必要な時間から見ると、濡れ等

2003年12月8日受付
粉体工学会第39回夏期シンポジウム(2003年7月、瀬戸市)にて発表
大日本印刷(株)技術開発センター物性分析研究所
(〒277-0871 千葉県柏市若柴250-1) TEL 04-7134-3005

< 著者紹介 >

昭和45年東大工学部卒、大日本印刷中央研究所をへて平成12年から物性分析研究所所長。平成6年より民間分析部門連携のサークル活動。

専門：高分子表面界面挙動解析。現在、プロセス中の材料挙動解析にビジュアル化技術を応用して現場課題解決を進めている。

図2 印刷加工技術と機能発現領域

のナノ領域機能の発現時間はミリ秒以下に対し、ヒートシールには秒の緩和時間が必要なことを経験しており、縦軸は現象の緩和時間とも対応している。

図2の欠陥領域の診断からは治療に至らないため、平成9年にソリューション型の研究組織に改組し、塗布・成膜過程の材料挙動解析技術開発に挑んだ。

図3に示すように、印刷プロセスでは、多成分の液体が複雑な相互作用を経て、多機能性膜に変貌する。

この複雑な現象の解明に、川上・川下産業の分析部門間交流を推進して、企業各々の知識・経験則に根ざした視点を融合したソリューションを目指して来た。

コラボレーションの時代にあって、分析部門は異なる基盤技術に根ざした企業間にも、共通の言語を持った通訳として今後大いに活用すべきである(図4)。

3. プロセス中の成膜挙動の解析

印刷工程では、分子分散体(インキ)→集合体→組織→構造体(製品)へと材料は劇的な成長を遂げ、表面・界面が形成される。多種の物質が様々な時定数で状態を転換する挙動の集大成ともいえる成膜挙動解析

図3 材料挙動の時間軸解析の必要性

図4 川上・川下産業間の基盤技術と分析部門交流

には、分析、計測、評価技術や実証データを総動員して、時間軸上で階層間の挙動を相関解析する手法でモデル像を追求している(図5)。

以下にこの視点からの解析事例をいくつか示す。

3.1 ポリイミド溶液の乾燥成膜挙動のモデル化

金属基板上に塗布したポリイミド溶液は、乾燥過程で溶液物性が急激に変化する転移点を持つ。溶液状態から乾燥して固体膜になるまでの挙動を、赤外分析、揮発成分のガスクロ分析、動的粘弾性物性等のデータを時間軸上で相互に相関解析して、転移点濃度では金属面にポリイミド分子が一気に水平配列構造に配列するとのモデルを推論した。これは、ポリイミドの水平配向性と溶液の液晶性の物性知見とも整合する¹⁾。

3.2 紫外線硬化反応プロセスの総物質収支解析

基板上に紫外線(UV)硬化樹脂組成物を塗布して、乾燥→UV露光→現象→加熱硬化に至る工程を追跡しながら、エネルギー物質収支と分子量変化等の逐次プロセス解析を試みた。

その結果、UV露光、現象を経た後加熱工程では熱架橋反応が進む一方で、一部の結合が熱分解して低分子量シフトして耐熱安定化するという新たな機能モデルを得て、この間に発生する予期しない揮発成分が得

図5 印刷プロセス中の材料挙動と時間軸解析

図6 課題解決型分析における知的ワークフロー

意先工程の不安定性の原因であると特定して、製品安定化への工程改善が奏効した¹⁾。

4. 分析課題の解決への知的ワークと知識ベース

分析課題解決のポイントは初動の分析設計にある。設計の知的ワークに注目すると、過去の経験から類似モデルを抽出し、不足する要因を分析から得て、分析データを総合的に矛盾なく説明しうる仮想モデルに練り上げ、人間の「欠陥抽出能力」を駆使して、原因究明から改善策提案に至る。この成否が新たな知識ベースに蓄えられる。従って、課題解決型組織の最大の武器は、データ精度に加えて、これを知恵に活かす「知識ベースの多様さと豊富さ」にあることを認識し、沢山の挑戦的な失敗を財産と考えるべきである(図6)。

5. 21世紀の産業技術の変革に必要なもの

5.1 21世紀科学技術のあり方

21世紀は理想系でなく実学系の科学の時代である。次に起きる現象の予測・制御のためにどちらの科学が有効か、その前提となるしくみの違いを以下に示す。

20th (理想系) 21st (実学系)

① STATIC ⇒ DYNAMIC

モノの次の動きを予測!

② LOW SPEED ⇒ HIGH SPEED

モノづくりは高速現象!

③ EQUILIBRIUM ⇒ RELAXATION RATE

モノの持つリズムを把握!

速度を予測する科学的手法は乏しい!

④ DILUTE ⇒ CONC

モノは複雑な相互作用の中!

⑤ UNIFORM ⇒ STRUCTURAL

モノは構造化して機能発現

⑥ DATA ⇒ VISUAL

モノの姿をみんなで知る!

⑦ MATERIAL FLOW ⇒ ENERGY FLOW

モノの姿を決めるエネルギー!

⑧ IDEAL ⇒ ACTUAL

モノづくりの知恵は現場に聞く!

⑨ LABOLATRY SOLUTION ⇒

BY SITE SOLUTION 現場と協業!

5.2 ビジュアル化技術によるソリューション

図7は、21世紀の企業競争の利益源のシフトである。20世紀の新製品一辺倒から生産技術の競争力を高めねば、熾烈な競争に勝てない時代である。

これに伴い、分析の活動は単なるデータ提供でなく、実プロセス解析からシミュレーション、提案、実証までして、現場にアクションを生まねばならなかった。このコミュニケーションにビジュアル化技術が効を奏している。以下に事例を示して解説する。

5.2.1 高速度VTRによるソリューション

印刷の網点は、濡れ、伸び、ちぎれ、レベリング、乾燥、析出、相分離などの複雑な過程を経て形成される。転移の時間は1ミリ秒以下である。この現象を、水性インキと、従来の溶剤インキで比較すると、前者では一般に濡れる緩和時間が遅く、高速では印刷できない。現場のオペレーターは経験と感性でこれを直感

図7 企業競争力の注力分野の変遷

するが、説明できない。現場に、「移動分析車」を派遣し、高速度VTRでこの現象を映像化して、オペレーターとプロセス、機械、材料の技術員間の橋渡し役となって、ソリューションをコーディネートするのが、分析の役割である。

表1は、企業の利益源の歴史的変遷であり、材料の無駄排除の次には、エネルギー収支や均一性の問題点の可視化が新たな視点での生産性向上に繋がる技術となると考えている。

5. 2. 2 ビジュアル化から時間軸解析へ

環境安全対応で、グラビアインキの水性化が進んでいる。インキの印刷適性の良し悪しが画像で把握されると、細部の挙動解析へ関心がフォーカスされる。

図8の上下は、塗布液が成膜する過程の基材界面側からの時間軸変化を全反射赤外吸収スペクトル法で追跡した挙動解析である。上の良品は乾燥の進展とともに、顔料と樹脂が同時に界面に形成されて、良質な膜になるのに対し、下の不良品は顔料の沈着に樹脂が伴わない。その過程がナノ領域の接着機能を左右し、印刷版磨耗を引き起こす原因である。

時間軸挙動解析は、モノづくり過程の材料機能発現を見極める優れた手段である。

表1 企業資源の活用の変遷

	資源	資源価値	企業価値
見える(量)	土地/建屋	規模/重厚長大	売上
↓ ビジュアル化	設備/システム	能率/軽薄短小	売上/利益
	人材	新製品	付加価値
	材料	ムダ排除	合理化益
	エネルギー	安定生産	整合品質
見えない(質)	情報	持続的発展	先見先行

IRピークプロファイル <正常品：溶剤系>

IRピークプロファイル<異常品：水系>

図8 赤外ATR法による界面形成過程の時間軸解析

5. 2. 3 有機電子デバイスの界面ナノ構造と電磁気特性の相関解析

有機分子デバイスや、有機ELは電極界面の分子の配列構造が、塗布条件によって異なり、化学的には良好な分子配列に見えても、電磁気学的には不安定構造になっている場合があり、必ずしも相関が明確でないのが実態である。筆者らの実験によると、ある種の有機分子デバイスは、塗布に用いる溶媒が同じキシレン溶剤でも異性体によって、電気効率や熱安定性が異なる事実をつかんでいる。

今回、分子配列と電子のバンドギャップ構造を相関解析するため、表面導波路分光法を試みたところ、溶

電子デバイスSolutionsモデル

図9 有機デバイスの構造と機能評価モデル

M-Xylene溶液系で特異的な挙動を確認

図10 表面導波路法によるナノ界面のスペクトル比較
(キシレン異性体溶液のキャスト直後と乾燥後の比較)

剤の異性体による差異が把握できたので紹介する。

この溶液の場合、m-Xyleneでキャストされた膜は、特異的に熱安定性に優れており、経時変化が少ない特徴が認められた(図9, 10)。

5. 2. 4 温度分布像=エネルギーの可視化

電子部材中心に、高精度の均一性を要求されており、一部はプレスロールによる均一化を図っている。

1時間後に、均一性が失われる原因は、冷却ロールの左右の軸受けの温度上昇にあることを、サーモビューア観察で初めて見出した。わずか0.5℃の上昇が品質を左右していることに気づき、改善の効果は可視化で歴然であった(図11)。

5. 2. 5 視覚による欠陥抽出能力(感性フィードバック型のソリューション)

以下の図は、プラズマディスプレイの蛍光体輝度の正規品と、輝度が20パーセント低下した不良品の電子顕微鏡写真の比較である。両像の比較の中に、原因が潜んでいる。

図11 蓄熱によるプレスロールの経時変化

しかしながら、この写真では要因が浮き彫りにされておらず、アクションを起こす納得性に至らない。アクションを引き起こさないデータは、不良在庫である。微小領域の電子顕微鏡写真は内在する課題が感性に訴えかけない時がある。

図12の写真が輝度測定スポットの100分の1の面積でしかないことから、正常部2点と不良部2点の計400枚の輝度測定スポット全体の写真を図13のように敷き詰めて、材料、技術、機械の関係者全員に見てもらった結果、共通認識に至った。

不良部表層に、細かく破碎した低質の蛍光体が多く、輝度を低下させていた。人間の感性は充分な全体データを俯瞰すると、無意識にノイズを平均化して、特徴を見出そうと閾値のレベルを調整して、素早く特異点を抽出する能力に優れている。

SEM 観察結果

図12 蛍光体輝度低下原因究明 SEM 像(左不良品)

SEMによる形態観察

図13 ビジュアル化によるソリューション

市場価値に合わせ込んだ加工技術への変革 -DNP材料挙動のあらゆる姿を「みる」- 分析の「七み」(見・観・視・診・看→察・顧)の活用

図14 材料挙動をみるビジュアル化技術

6. 次世代のソリューションは次世代の力で！

図2に示したように、ナノテクノロジーは、既存技術である。但し、経験則でサイエンスされていない。この達成には、単なるナノマテリアルの開発では達成できない。図2の縦軸をもう一度考えると、各機能が発現する緩和時間を示していることに気づく。吸着反応は、分子レベルのピコ秒、ナノ領域はミリ秒以下、ヒートシールには秒以上の緩和時間が必要であり、事実、製造工程では機能発現の緩和時間を無視して製造時間を短縮できない。

ナノ領域の配列は、速すぎて直接時間軸制御ができないので、周辺環境を整えて、連鎖的な自己組織化を待たねばならない。

今、ナノテクに求められる技術は、ナノマテリアルを整列させる下地となる材料組織のあり方とエネルギーの伝達方法であり、その制御に材料の持つエネルギーレベルと固有の緩和時間を動画で記録・計測し、その動的なリズム解析から次の挙動を総合的に予測するシミュレーション技術の開発が今後必要である。

この領域は時間依存で、平衡論的ではない、すなわち、非線形で、従来の教科書には出ていない現象である。従って、もう一度現場に戻って、実験観察挙動記録の原点から始めねばならない。

解析技術が進み膨大なデータが出てくる時代となり、そのデータの奥にある真の材料挙動を直感できる感性を、人間こそが養わなければ制御できない。

「みる」眼を養ってほしい。失敗の積み重ねで(図14)。

「人を知る」ということは、単に目鼻立ちを精度良く記憶しているということではなく、働きかけに対する反応パターンを把握しているということである。

「物を知る」ということは、物質の構造を精密写真

で細かく記述するのではなく、与えたエネルギーに対して物質がどのように挙動するのかを活用できる形で、リズムを感じる動画で人間の「知識ベース」として把握しているということである。これがソリューションパスの多様性を産み、次世代が自力でデータを活かす知恵を産む源泉となる。「知識生産システム」の構築こそが次世代への継承財産である(図1)。

6.1 感性融合型の科学技術体系

今後の機能性膜の解析には、川上・川下産業を一貫プロセスと捉えて、材料挙動をプロセス全体像に投影して解釈する視点が求められる。プロセス中の材料挙動を時間軸に整理して分子状態から組織、構造体までの階層を相関させて主要因を把握すれば、産業横断的なプロセスソリューションが獲得できる。

図15の分子、集合体、機能をつなぐ線の太さは相互作用の強さ、数はその多様性を示している。モノづくり技術は、川下の加工技術であるが、弱い相互作用の現象を多様に組み合わせ、総合的なバランスをとる技術に立脚している。

従来の科学は体系を要因に細分化して、要素解析を積上げてきた。21世紀には、科学体系自体ファジーな要素をも統合した複雑系であることを前提として、データや知識を取込む度に科学体系自体の内部構造を成長させていく、自己発展型の科学体系になるべきではないか。今、この転換期にあって必要なのは、原点である人間の感性で判断把握できる科学技術体系への変革である。いずれ、最終判断は人間がするのであるから。

物質挙動の知識を、次世代に伝える方法論を実験の原点に戻って、ビジュアル化から始めたい。これが20世紀の原体験を次世代に継承し、創造的な知的ワークを活性化して、ITと人間が双方向で連携しう

図 15 21 世紀の物質プロセス科学のあり方

る新たな科学体系の姿ではないかと思う。

人間の感性は、モノの分子構造を、組織を見なくても
も良し悪しを判断できる。いったい何が、モノから人
に伝わっているのか？

人間に、満足感動を与えるプロセスには、職人の熟練、芸術的センスなど、人間が、複雑な現象を制御してきた事実がある。もう一度、人間の感性を磨くことから、モノづくりを見直したい。

モノづくりの現場では、熟練者が原子／分子／集合体を機能体に仕立てあげる。音楽、文学や芸術は、音符や文字という要素から音楽、物語を生み出す。人は個々の要素を知らずとも満足や感動を覚える。個々の要素積上げのみでモノづくりは達成できない。多様な失敗を経た感性は雑音から有効要素を見出す。博物学的な 20 世紀の科学から人の感性と連動する 21 世紀の科学の創成が次世代のために緊要である。

科学は哲学を否定する形で発展してきた面がある。もう一度、科学を哲学し、その人間とのインターフェイスのあり方を考え直すべきである。

引用文献

- 1) 黒田孝二: “最新 高分子による表面機能設計「高分子表面機能ソリューションのための動的挙動解析」”, 高分子学

図16 感性融合型の科学技術コンセプト

モノづくりの世界から見て、熟練と芸術のなせる技に何か共通性を見出せないだろうか？上の図は、職人と芸術家に共通する創造性の原点を考察する参考にしていただきたい。

人は個々の分子を認識しなくてもモノから心地良さを感じる、物語や音楽も、個々の記号は覚えていなくても、感動や満足を感じる。この集合体が人間にアピールするものは何か？

すべての科学や芸術が、人間の知性と感性と融合し、満足感や感動を与えるものは何か？追求を始めるファーストステップとして21世紀を位置付けたい。私は、それを「エネルギー&リズム」(ENERGY & RHYTHM)だと直感する。

個々の要素が把握できなくても、物質固有のエネルギーレベルと、リズムを感知できれば、モノの特徴を生かした適切なモノづくりができ、ひいては、階層的な緩和時間の相互作用解析でバルクからナノ領域までの連鎖的制御が可能になるものと期待している。