



松井 真二 Matsui Shinji

兵庫県立大学 名誉教授
2014年～17年 A-STEP 研究責任者



阿部 誠之 Abe Masayuki

旭化成株式会社 マーケティング&イノベーションセンター
PEDプロジェクト プロジェクト長
2014年～17年 A-STEP 企業責任者

特集

OVERVIEW

微細な凹凸を転写するナノインプリント まねができない技術力で偽造防止に貢献

小型化、高性能化が進む半導体の量産技術として期待されているナノインプリント技術。微細な凹凸パターンを持つ「型」を、基板に押しつけることでハンコのように転写できるのが魅力だ。兵庫県立大学の松井真二教授(当時)と旭化成は、10年以上に及ぶ共同研究で超高精細なパターンを転写できる円筒形の型の作成に成功した。この誰にもまねできない高い技術力の先に見えてきた市場は、世界の被害総額が年間500兆円にも上る偽造防止のソリューションだった。誰も予想しなかった展開を見せた技術開発の歩みについて聞いた。

初号機失敗でも信じて改良 3カ月後、円筒形の原版誕生

携帯電話をはじめとした身の回りの電子機器は、登場した頃に比べてどれも非常にコンパクトかつ高性能になっていることは疑いないだろう。その陰にあるのは、半導体の小型化、高集積化だ。わずか数ミリメートル四方ほどの広さのチップ上に、細い線で電子回路を作ること、小さくても複雑な処理が可能になっている。

波長の短い光で細い線を描き微細な回路を作る技術が急速に進む中、1995年に米プリンストン大学のステーブン・チョウ教授らが発表したのは、微細な回路図が書かれた「ハンコ」を使って基板に回路を転写するナノインプリント技術だ(図1)。光や熱に反応する素材をあらかじめ基板上に塗っておき「モールド」と呼ばれる凹凸で回路図を描いた型を基板上に押しつけるというもので、今では欠かすことのできない技術になっている。

「ナノインプリント技術を使えば、次世代の機能性フィルムが作れるかもしれない」と考え、2000年代初めから注目していたのは、旭化成マーケティング&イノベーションセンターの阿部誠之PEDプロジェクト長だ。当時、社内でも素材に手を加え、付加価値を生み出すことで競争優位に立つ、という戦略に重点が置かれ始めていたためだ。市場イメージは漠然としていたが、研究を進めたいと06年に応用物理学学会内で立ち上がったナノインプリント技術研究会に参加した。

この研究会を主導していた人こそ、後にチームメンバーとなる

兵庫県立大学の松井真二教授(当時)だった。松井さんは前職で電子ビーム描画装置の開発に携わり、大学に移ってからCRESTなどでナノインプリントの基礎研究に取り組んでいた第一線の研究者だ。「当時ナノインプリントはあまり知られていませんでしたが、重要な技術だと確信し、国内産業への普及を図るために、研究会を立ち上げました」と語る。

阿部さんが研究会に通い始めてから5年が経過した11年12月、阿部さんが所属する旭化成富士支社(静岡県富士市)では、ナノインプリントで転写用の原版であるモールドの作製が行われていた。露光装置から、直径10センチメートル、長さ7センチメートルの円筒形のローラーモールドを取り外す。露光に成功していれば、表面に微細なパターンが刻み込まれ、表面はCDの裏面のような構造色が輝くはずだ。

5億円を投じた露光プロセスの初号機は、完成までにゆうに1年をかけた。「後処理の溶液からモールドが引き上げられていく様子を開発メンバーで見守りました」と阿部さんは当時を振り返る。ところが出来上がったモールドには、虹色の輝きはなかった。「何かの間違いではない

か」と阿部さんは愕然としたものの、すぐに原因究明へ乗り出した。

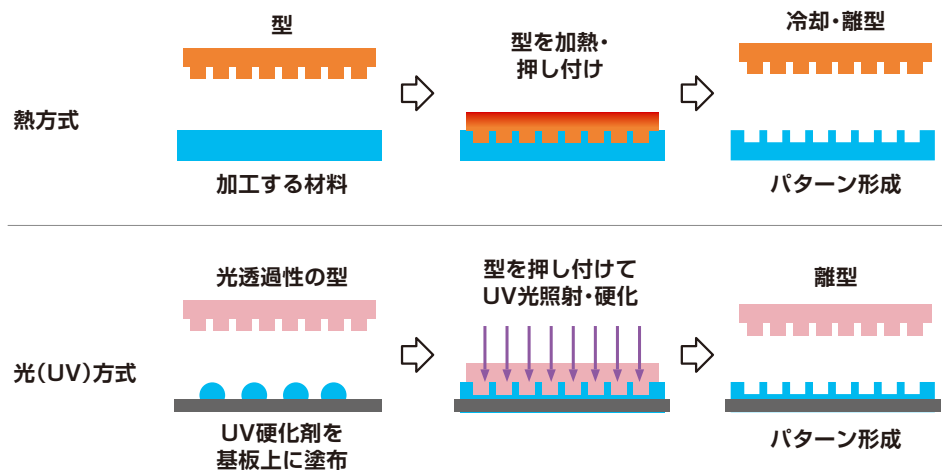
露光の工程で何が起きているかを目視では確認することはできないため、思いつく限りの問題点を挙げ、1つずつ丁寧に検証する日々が続いた。「電子ビームを改めて学び直し、必ずできると信じて作業改良を続けました」。3カ月後、ようやく阿部さんたちの苦労が実を結んだ。露光装置から取り外して現像用の液に浸すと、表面が見事に虹色に輝いた。従来よりも大きな面積に、より微細な線でズレなくパターンを転写できる、新しいローラーモールドの誕生だった。

量産可能なR2R方式を開発 A-STEP採択で状況が好転

阿部さんはナノインプリント技術研究会への参加を皮切りに、実用化に向けた研究開発を進める中で、次第に産業界の役割を自覚し始めたという。「基礎的な実証研究も、最後には量産技術という課題にたどり着きます。そこを乗り越えるのは、私たち企業側の責務ではないか、と思い始めました」。

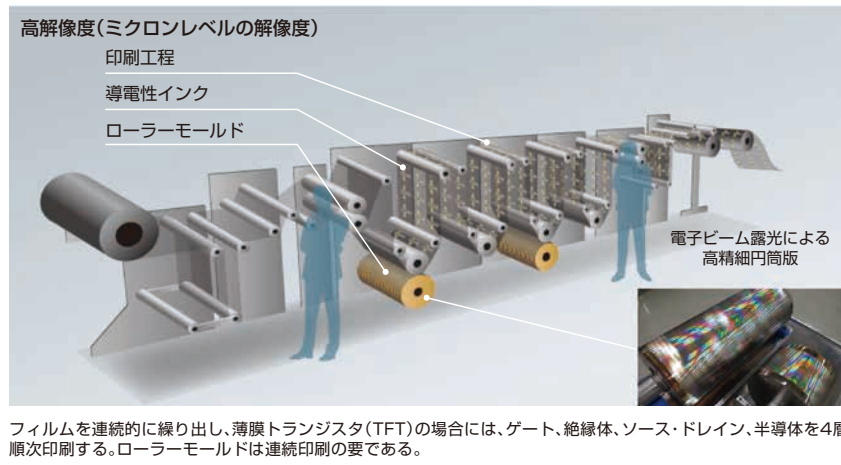
量産のポイントは「ロール・トゥー・ロール(R2R)」と呼ばれる転

図1 ナノインプリント技術



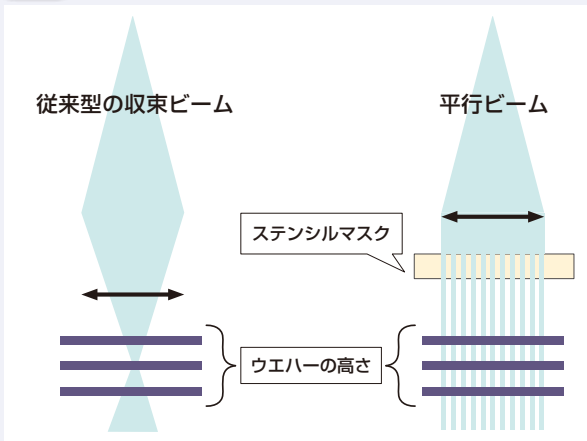
熱や光に反応するレジストを塗布した表面に、凹凸のあるモールドを押しつけて、パターンを形成する。熱方式は冷却の待ち時間や熱による変形などの課題があるため、半導体材料の加工では光方式が利用されることが多い。

図2 ロール・トゥー・ロール(R2R)量産プロセスのトータルイメージ



フィルムを連続的に繰り出し、薄膜トランジスタ(TFT)の場合には、ゲート、絶縁体、ソース・ドレイン、半導体を4層順次印刷する。ローラーモールドは連続印刷の要である。

図3 既存電子ビームと平行電子ビーム露光の特徴



写方式にある。1つのロールからフィルムがローラーを介して繰り出され、モールドで表面に微細な加工が施された上で、別のロールに巻き取られる(図2)。連続転写が量産を可能にするのだ。当時、曲面を描くロール表面に露光・描画することでモールドを製造する装置はなかった。

同じ操作をロールの回転方向にも軸方向にもズレなく繰り返す、回転ステージの精度の高さが装置開発と実用化の壁となっていたのだ。さらに技術的な困難さに加え、当時はビジネス的な見通しがはっきりしないため、社内では懐疑的な意見が多かった。

しかし、JSTのA-STEP採択が状況を好転させた。研究成果の社会還元を目指すプログラムで、技術シーズの実用化に向けた研究開発などを

大学や企業などで組織するチームに委託する形で支援している。阿部さんが頼ったのは、ナノインプリント技術研究会で会って以来、親交があった松井さんだ。全てのモノにデバイスを取り付け、ICTが暮らしに溶け込んだ「アンビエント社会」をつくと意気込む阿部さんに、松井さんは心を動かされたという。「ストーリー性があるし、将来性も感じ、メンバーとして参加することを決めました」と当時の

想いを振り返る。

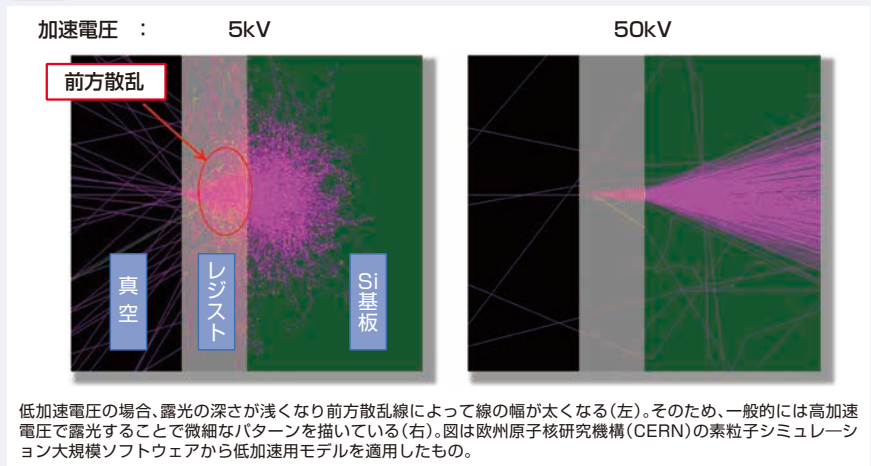
自社開発ではなく、A-STEPで大学との共同研究に舵を切ったことが、流れを大きく変えることになった。「大学の技術、資金面、さらに第三者の評価も加わり、会社からの理解も得やすくなりました。もし、採択されなかったらこの技術は生まれていないと思います」と阿部さんは語る。採択を受けた14年12月、技術シーズの実用化に向けた研究開発が始まった。

アンビエント社会を大きな目標として掲げ、これを実現するための研究開発の目標は、A4短辺相当の長さを持つロールへの高解像度露光技術の確立とした。当時は、ロールの長さは7センチメートル、解像度に相当するパターンサイズは150ナノ(10億分の1)メートルが限界だったが、ロールの長さが3倍の21センチメートル、パターンサイズ50ナノメートル以下という、実用化に耐え得る水準に引き上げる目標を掲げたのである。

高解像度実現の条件明らかに 国内外の展示会でニーズ発掘

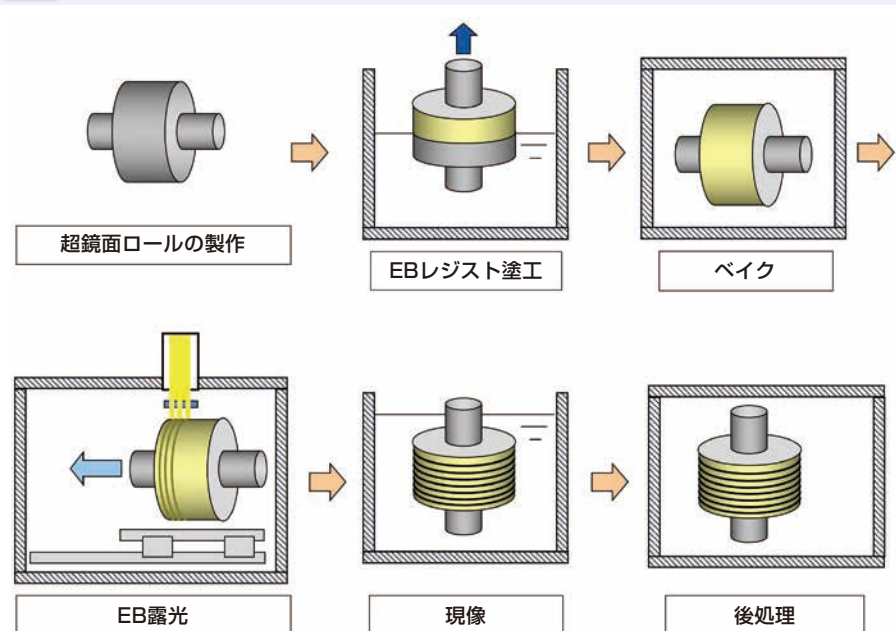
目標達成に向けた課題のうち露光技術に関する2点は、主に兵庫県立大学が受け持った。具体的には、50ナノメートル以下のパターンサイズを形成する露光基礎技術の確立と、高解像度露光を実現する最適なフォトレ

図4 電子ビーム露光における加速電圧と線幅の関係



低加速電圧の場合、露光の深さが浅くなり前方散乱線によって線の幅が大きくなる(左)。そのため、一般的には高加速電圧で露光することで微細なパターンを描いている(右)。図は欧州原子核研究機構(CERN)の素粒子シミュレーション大規模ソフトウェアから低加速用モデルを適用したもの。

図5 電子ビームリソグラフィを用いるSRM作製のトータルプロセス



幅25センチメートル、表面粗さ2ナノメートルの超平滑表面に加工されたローラーへ、浸漬塗布で電子線レジストを塗り、予備焼成(ベイク)の後、平行電子ビームによる露光(EB露光)と現像、後処理を経てレジストパターンが出来上がる。このパターンを用いる後加工により、硬いモールド表面に微細パターンを形成する。

ジスト(感光樹脂)の確保である。核となるのは松井さんの研究成果である平行電子ビーム露光技術だ(図3)。一般的な電子ビーム露光は、対象物との間にレンズを挟んでビームを細く絞り、高解像度のパターンを描く。

これに対して平行電子ビーム露光は、対象物との間にパターンと同じ形の穴が空いたマスクを挟んでビームを当てることで、パターンを一気に描ける。大幅に効率は上がるが、平行電子ビームは加速電圧が低い

め、レジストを薄膜化しないとうまく露光できない(図4)。一方で、薄膜化すると電子ビームが基板に当たって後方散乱し、解像度は下がってしまう。「そこで、あえて反応性の低いレジストを採用し、後方散乱を抑える条件を突き止めました」と松井さんは説明する。50ナノメートルという高解像度実現への見通しが、そこで得られたという(図5、6)。

旭化成にとっては、A-STEPにより量産化の技術的なめどが立ったこ

とから、本腰を入れて確立した技術を基に事業を立ち上げなければならない。製品イメージは描けていたものの、それを誰が利用するのか、市場イメージは漠然としたままだった。ところが19年4月、旭化成の組織改革に伴い、阿部さんのチームは生産技術本部から新設のマーケティング&イノベーション本部(現マーケティング&イノベーションセンター)へ異動になった。

これまでは性能を上げることに注力し、誰もまねできないモールドも作り上げた。今度は、それを100億円規模の事業にするために、技術の提供価値を徹底して問われることになったのだ。阿部さんたちはサンプル提供が可能となった段階で国内外の展示会に積極的に出展し、提供価値を意識しながら来場者の声に耳を傾けることにした。市場イメージが徐々に像を結んでいく中、大きなヒントとなったのは、紙幣印刷関係者からの「偽札防止に利用したい」という声だった。

この声はやがて、アパレル市場におけるブランド品の偽造防止という

という声があった。

図7 Akliteia®の偽造防止ラベル



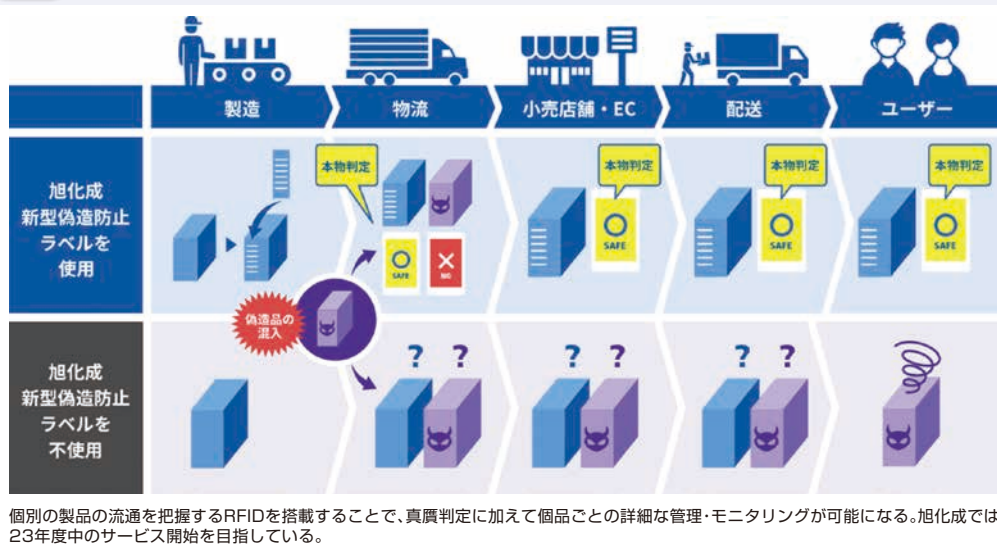
微細パターンを印刷したシートは、タグやシールなどに加工して使われる見込みだ。無色透明で軽量のため、バッグや財布などの製品のデザインを損なわない形で、真贋判定機能を組み込むことができる。

図6 量産化に対応した最新のローラーモールドと転写したパターン



最新の長さ21センチメートルのローラーモールドのデモ機(左)。従来の一筆書きによる電子線描画で作成すると100年かかると試算されていたが、約20時間で全幅・全周を露光できる。ナノメートルレベルの複雑なパターンや、100ナノメートル幅の細いラインも転写できる(右)。

図8 偽造防止ラベルを活用した流通ソリューション



ニーズ発掘につながった。調べてみると、模倣品・海賊版による被害総額は世界で約500兆円に上るといふ。「例えば高級化粧品ユーザーを対象としたアンケートでは、偽造品購入をきっかけに、別ブランドに切り替えてしまう人が少なくないこともわかりました。さまざまな企業で販売機会の損失につながっている実態も明らかになりました」と阿部さんは語る。

防止対策、コストから投資へ「アンビエント社会」が目標

偽造防止には現在、QRコードのような二次元コードやホログラムなどの方法がある。「どんなに良い方法が出て、コード自体を複製できる限り、すぐに模倣されてしまっていたらごっこになっていました」と阿部さんは指摘する。A-STEPで確立した技術を基に微細なパターンを転写したラベルは複製が困難なため、競争優位に立てるといふ。

旭化成は金融などの基幹システム開発を手掛けるTIS社と手を組み、22年10月に偽造防止デジタルプラットフォーム「Akliteia®」を開始すると発表した。名前の由来は、本物を見極め、偽造品を排除する鍵を提供したいとの思いを込め、真実とい

う意味を持つ女神「^{アリテア}Äletheia」に、鍵「^{キー}Key」を組み合わせた。

偽造防止ラベル、真贋判定のための読み取り装置、結果を共有するためのプラットフォームを3点セットで顧客に提供し、利用料を得る仕組みだ。すでにいくつかのブランドでは試験的な利用も始まっている。意匠性を損ねない透明なラベルはブランド品とも相性が良く、希望に合わせてシールやタグへの加工も可能だ(図7)。またシールタイプのラベルは剥がすとパターンが崩れるため、使い回しの心配もない。

さらに偽造品の情報は、サプライチェーンで共有するため、偽造品が流通全体のどの段階で混入したか、被害実態の定量的な把握や可視化も可能になる(図8)。偽造品で阻害されていた販売機会を取り戻すきっかけにもなると期待されており、いずれ偽造品防止対策はコストから収益向上のための投資に変わる日も近いだろ

う。そしてブランドの流通を担う物流業界も重要な顧客だ。「競争が激化する中で、偽造防止ソリューションは付加価値になるはず。ゆくゆくは社会インフラにしていきたいですね」とその先を語る。

A-STEPで確かめられた成果は、もう1つある。それは、導電性のインクでナノレベルの解像度を持つ電極をフィルム上に印刷したデバイスの開発だ。これは阿部さんが2000年代初

頭から思い描いていたものだ。すでに偽造防止ソリューションの一環として、無線で自動識別ができるRFID用アンテナをフィルム上に搭載することにも成功している。偽造防止ラベルにRFIDタグの機能を加えることで、生鮮品の鮮度管理などへの活用も見込まれている。

こうした進化の過程の先に見据えるのは、最終目標であるアンビエント社会の実現だ。「ビジネスはもちろん、産業として取り組んでいきたいと思っています」と笑顔を見せる阿部さん。ナノインプリント技術が社会に欠かせない土台となる日が、すぐそこまで来ている。

(TEXT:茂木俊輔、PHOTO:石原秀樹)



プロジェクトを経て、ビジネスだけでなく産業を開拓する視点ももらえました。新しいシーズを捉えた産学連携が、これからの研究のカギになると思います。