

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ナノレベルの超精密非球面形状からなる太陽電池用集光フィルムの熱インプリント
連続形状転写技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成26年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 明昌機工株式会社

目次

第1章 研究開発の目的と概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 研究の内容と成果

- 1 フィルム転写の高速化／大面積化
 - 1-1 冷却機構付き熱式ロール転写装置の研究開発
 - 1-2 薄膜ロール金型の研究開発
- 2 転写精度の向上
 - 2-1 ロール転写条件（温度、圧力、速度）の最適化
- 3 フッ素集光フィルムの評価
 - 3-1 実曝露電試験

第3章 全体総括

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1) 研究開発の背景

1)-1 社会的背景

近年、顕在化しつつあるエネルギー資源問題や地球環境問題に対応して、国内外では太陽光発電の重要性が増しており、太陽光発電の利用拡大とエネルギー供給技術としての地位確立を目指したさらなる努力が必要になっている。現状、太陽光発電がその利用拡大により、エネルギー資源問題や地球環境問題に対応した主要エネルギー源の一つとなるための認知と信頼獲得の期間と位置づけられている。

経済性改善では、目標達成へのマイルストーンとして、2010年には従量電灯電力料金並み(23円/kWh程度)、2020年には業務用電力料金並み(14円/kWh程度)、2030年には汎用電力並み(7円/kWh程度)の発電コストが設定されており、中でも最重要課題はモジュール製造コスト低減で、現状技術の延長線上にはない「技術革新」や「性能向上」からなる新しいコンセプトの太陽電池開発が必要となっている(図1)。

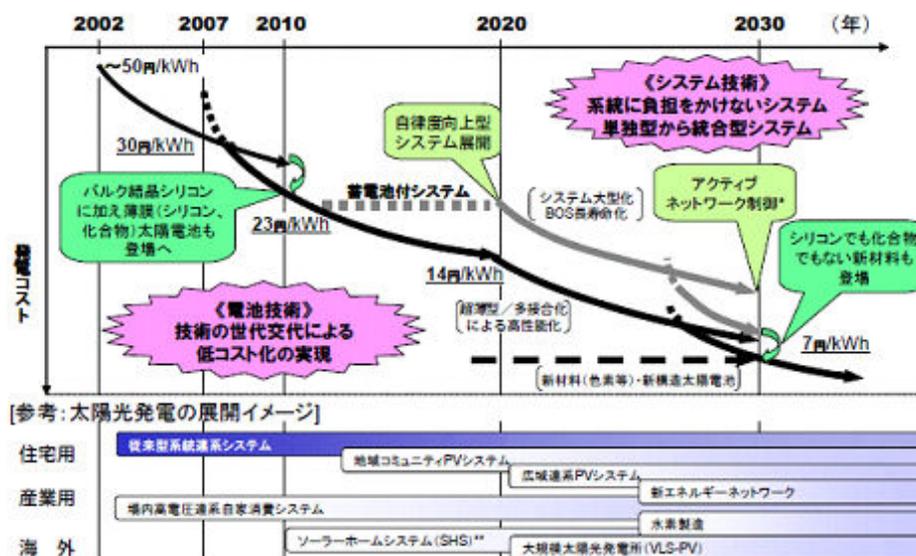


図1. ～太陽光発電の経済性シナリオ～ 「2030年に向けた太陽光発電ロードマップ(PV2030)」

1)-2 技術的背景

図1および、(独)産業技術総合研究所 太陽光発電研究センター長 近藤道雄氏が言われている仮説『太陽電池は長期的な目標は、コストにして7円/kWhに加えて、発電効率40%以上の高効率を目指す開発がおこなわれている。発電効率は特に日本における土地面積の制約と国際市場における競争力という観点から重要である』にしたがい、発電の高効率化のアプローチとして、一つには太陽光「セル」への「集光効率」を引き上げるといった観点がある。従来、集光素子には主に3つの方式がある。

- ①レンズ(球面、非球面タイプ)
- ②凹面鏡
- ③平面プラスチックフィルム

そのうち、平面プラスチックフィルムには従来「反射防止膜」「モスアイフィルム」などの光学フィルムや、光学プラスチック部材として「レンチキュラレンズ部材」「プリズム部

材」などの従来部材（非フッ素素材：PMMA 素材_2mm 程度の厚膜）が単品として存在するものの、360 度の視野範囲の太陽光を全方位で、また非追尾型太陽電池用 集光素子として最適化された「高効率かつ低コスト」の光学素子フィルムは未だ存在していない。

そして「太陽光の朝昼夕での全方位かつ非追尾型集光（各時間での採光率の向上）」や「素材の長期耐久性（黄変の防止、耐湿性の向上）」「発電効率（集光素子の全光線透過率の向上）」もさることながら、その安価な量産化技術開発が重要な技術的な課題となっている。

1)-3 現状の問題点

上記の技術的背景のもと、特に周方向 360 度の視野範囲の太陽光を「全方位」で「集光効率」を向上させるために、従来 特開 2010-219495 では、太陽電池表面へ「moth-eye（昆虫の目）構造」反射防止フィルムを貼り付け、また特開 2011-159965 では「太陽電池用レンズシート」を作製する試みがあるものの、面内方向に対して浅い角度から入射する光を高効率で集光することはできなかった。

なぜなら、これらは微細な円錐や三角錐、四角錐などの透明形状物を形成することで、反射損失を少なくし効率よく外部光を取り入れ、集光するものであるが、図2のように従来技術であるmoth-eye構造でさえ、未加工状態より透過率の改善は見られるが、入射角 30° 未満での透過率の大きな低下は避けられないものであった。

しかしながら、プロトタイプ品の「全方位集光を可能とするフッ素系太陽電池用集光フィルム」は、電磁場解析シミュレーションに基づく設計により作製した「微細パターン金型」を用いて従来の平行平板式インプリント装置にて熱インプリントを施した。

その結果、図2のような入射角 30° 未満でも透過率が大きく、実際に本集光フィルムを多結晶系太陽電池への貼付のみで、実曝環境下での発電検証で月平均 4.6 % 発電力が向上しており（図3）、さらに曇天時では 6.7 % の発電力向上を確認している。

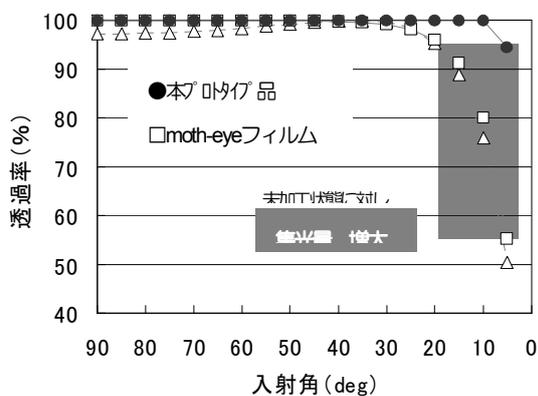


図2. プロトタイプフィルムの集光量向上



図3. 結晶系モジュールでの発電検証（1）

さらに、プロトタイプ品の「全方位集光を可能とするフッ素系太陽電池用集光フィルム」を多結晶系太陽電池に貼付け、太陽光の波長特性を人工的に模擬したソーラーシミュレーターにおいて入射角度を変化させ（南中～日没相当）、太陽光発電の発電量と比例関係にある短絡電流値を計測して発電量向上の評価を実施した。その結果、年間 4.6 % の発電量増加に相当する値を実測している。特に、短絡電流値の入射角度による増幅率変化をみると、30° 未満の入射角での発電性能向上が確認できる（図4）。

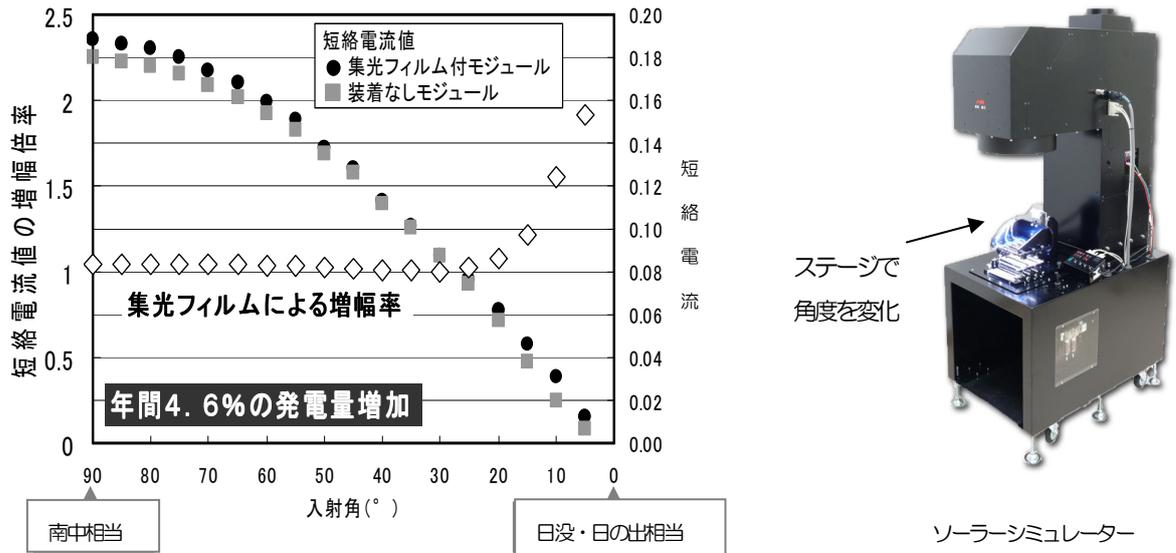


図4. 結晶系モジュールでの発電検証 ソーラーシミュレーター試験

しかしながら、このプロトタイプ品の「全方位集光を可能とするフッ素系太陽電池用集光フィルム」はすべて約 10 cm 角以下の小スケール版のサイズでしか、これまで作製することができなかった (図 5)。

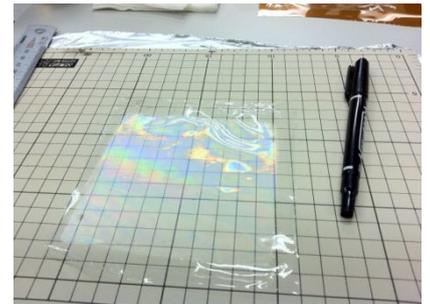


図5. プロトタイプ品 (フッ素系太陽電池用集光フィルム)

今回、用いるフッ素フィルム素材は「不燃性」なので、太陽光パネルへ貼り付けた際、仮に火災が起きても従来の微細転写用素材 (UV硬化型は非フッ素系素材なため易燃性) と比べて、耐熱性を有しており安全性を確保している。

また、国内での電力全量買取り制度の実施が予定されており、それが開始されると既設の太陽光パネルへ集光フィルムの「後貼り」も可能なため、ユーザー電力売電量の増大に基づく、消費者メリットが高まることが予想される。

このように、フッ素フィルム素材へ「熱インプリント」した「全方位集光を可能とするフッ素系太陽電池用集光フィルム」は、従来の「ガラス素材」と比べて、発電量も向上し、さらにガラス加工ではなし得なかった「ナノレベルの超精密非球面形状の光学物品加工」を「大面積」で可能とするものである。

しかしながら、このように「プロトタイプ品」では性能発現を検証が出来るものの「小面積」でしかなく、従来の「平行平板式で作製したインプリントフィルム」も同様に「小面積」でしか作製できない。また、インプリントの「タクト時間」を要してしまい、この加工方式での実用化については「製造コスト的かつ設備的」にも問題となっている (特開 US5772905)。

このような中、また台頭する中国メーカーによる「低コスト化」に対して、本開発ではプ

ロトタイプ品で発現する「発電効率への高い集光寄与（高機能性：[特許出願中：特願 2011-218351]）」を維持し、かつ「安価」かつ「大面積な量産化（特開 2007-281099）」を可能とする「熱インプリント」技術を両立する、「透明性に優れるフッ素フィルムにナノレベルの超精密非軸対称非球面形状加工による全方位集光を可能とし、新規PV用非球面フィルムの高度化した連続加工法と、その量産技術を確立する」ものである。

2) 研究目的

透明性に優れるフッ素フィルムにナノレベルの超精密非球面形状の光学物品加工により得られる全方位集光を可能とするフッ素系太陽電池用集光フィルムの「高度化した連続加工法」と、その「量産技術を確立」する。具体的に言えば、転写精度の良いロール型転写技術及び装置とナノレベルのレンズパターンがある薄膜ロール金型を開発し、太陽電池用高集光フィルムの作製及び評価をし、連続加工法とその量産技術を確立する。

3) 研究目標

新技術である薄膜ロール金型を用いた冷却機構付き熱式ロール転写方式により、太陽電池用集光フィルムの高い生産性と高精度転写を実現させる。また、製作した集光フィルムにより太陽電池の発電効率向上を確認する。各々の課題研究項目についての目標値を以下の表に示す。

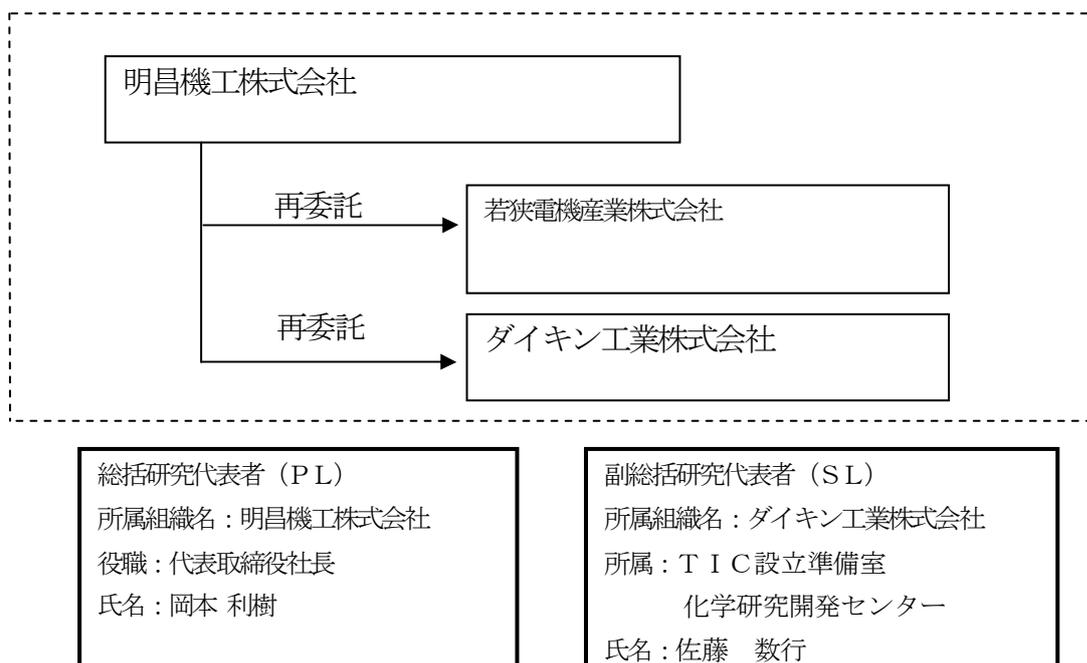
研究開発項目	技術的目標値
1. フィルム転写の高速化/大面積化	フィルム生産速度 1m ² /min 以上 (従来比 5 倍)
2. 転写精度の向上	転写率 90%以上の転写精度 (従来比 1.5 倍)
3. フッ素集光フィルムの評価	5%以上の発電効率向上

4) 実施内容

太陽電池用集光フィルムの高い生産性と高精度転写を実現させるための装置開発をすることから、以下の研究開発項目を実施する。

1. フィルム転写の高速化/大面積化
 - 1-1 冷却機構付き熱式ロール転写装置の研究開発
 - 1-2 大面積薄膜ロール金型の研究開発
2. 転写精度の向上
 - 2-1 ロール転写条件（温度、圧力、速度）の最適化
3. フッ素集光フィルムの評価：
 - 3-1 実曝発電試験

1-2 研究体制



明昌機工株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
岡本 利樹	代表取締役社長	1、2
片瀬 徹也	開発部 神戸開発センター長	1、2
古林 孝元	開発部 システムグループ GL	1-1、2
吉住 崇	開発部 開発課員	1、2
益塚 勝	開発部 神戸開発センター員	1、2

若狭電機産業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
清水 利寛	代表取締役社長	1-2

ダイキン工業株式会社

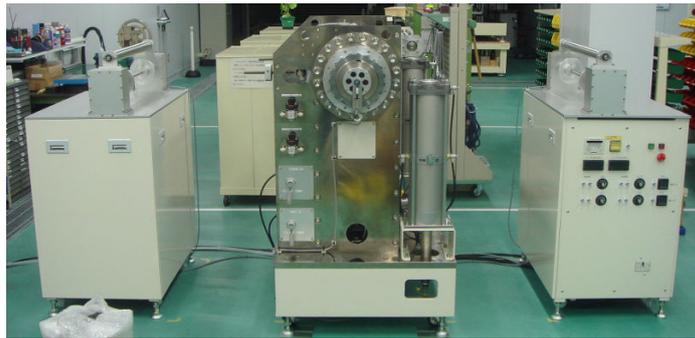
氏名	役職・所属	実施内容 (番号)
佐藤 数行	化学研究開発センター 主事	1-2、2-1、3
松浦 哲哉	環境技術研究所 副参事	2-1、3
藤原 明大	環境技術研究所 副長	2-1、3
兵頭 孝之	環境技術研究所 主事	2-1、3

アドバイザー

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 松井 真二 教授	熱インプリント技術
宮崎大学 工学部 材料物理工学科 西岡 賢祐 准教授	太陽電池モジュールの実用評価

1-3 成果概要

1. 薄膜ロール金型を用いた冷却機構付き熱式ロール転写装置を設計、開発した。



ロール転写装置

2. 電鋳装置を改良及び電鋳条件を最適化することで、板厚均一性が±10%以内の薄膜ロール金型を製作することができた。



薄膜ロール金型

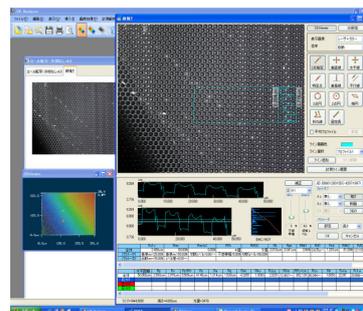
		端からの位置 (mm)								均一性
		40	60	100	150	200	250	300	340	
角度 (°)	10	216	219	216	211	213	216	215	182	±9.2%
	45	214	203	189	200	208	203	203	187	±6.7%
	115	219	206	205	205	201	209	201	180	±9.8%
	170	214	201	205	201	209	207	195	177	±9.5%
	230	213	203	210	206	199	203	201	175	±9.8%
	315	215	211	203	206	197	204	209	179	±9.1%
	350	215	223	214	213	217	212	208	189	±8.3%

薄膜ロール金型の膜厚分布

3. 製作した薄膜ロール金型とロール転写装置により、 $1\text{m}^2/\text{min}$ の生産速度で、転写深さ 90% 以上の転写精度でフッ素フィルムに集光パターンを転写することができた。



転写フィルム



レーザー顕微鏡測定結果

4. 作製した集光フィルムを市販の太陽電池パネルに貼り付けて、ブランクモジュールと比較しながら屋外での太陽光発電の実曝発電試験を行なった結果、5%以上の発電効率向上があることを確認した。



1-4 当該研究開発の連絡窓口

転写装置について

明昌機工株式会社 開発部開発センター

片瀬徹也

651-1303 神戸市北区有野中町2-17-13

TEL 078-981-2148

FAX 078-981-2153

E-mail katase@meisyo.co.jp

集光フィルムについて

ダイキン工業株式会社 TIC BKプロジェクト 化学研究開発センター

佐藤数行

〒566-8585 大阪府摂津市西一津屋1-1

TEL06-6349-4196

FAX06-6349-4751

E-mail kazuyuki.satou@daikin.co.jp

薄膜ロール金型について

若狭電機産業株式会社

清水利寛

〒565-0806 大阪府吹田市檜切山21-S館8号

TEL 06-6876-5541

FAX 06-6876-3154

E-mail toshihiro_shimizu@wakasadenki.co.jp

第2章 本論

2.1 フィルム転写の高速化／大面積化

(明昌機工株式会社、若狭電機産業株式会社、ダイキン工業株式会社)

平行平板型熱転写では、「加熱→加圧保持→冷却→離型」のサイクルで平面金型の微細パターンを樹脂へ転写していくが、転写性は良い一方、全体の転写サイクルタイムは5分程度要し、生産性が低いのが課題である。また、従来のローラー式熱転写では、ローラーの表面に微細なパターンを形成したロール金型を用いて「加熱→加圧→離型」と連続的に転写を行うが、非常に生産性が高く装置の小型化も容易である一方、転写サイクルに冷却工程が無い場合、パターン転写性が悪いのが課題である。

新技術である薄膜ロール金型を用いた冷却機構付き熱式ロール転写方式は、従来のロール式の高い生産性（大面積転写及び高速性）に加え、離型前に冷却プロセスを付加することで高精度な転写が実現できる。ロール金型を薄膜にすることで金型自体の熱容量が小さくなり加熱及び冷却の繰り返しサイクルを短時間で行うことが可能である。

以上のことより、大面積薄膜ロール金型とそれを用いた冷却機構付き熱式ローラー型インプリント転写装置の研究開発を行い、フィルム転写の高精度化かつ高速化を達成する。

目標は、フィルムの生産速度を $1\text{m}^2/\text{min}$ 以上とする。

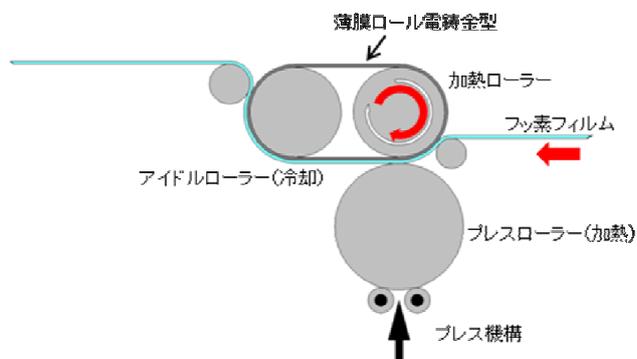
2.1-1 冷却機構付き熱式ロール転写装置の研究開発

(明昌機工株式会社)

本研究テーマの概要

薄膜ロール金型の保持方法とフィルムの生産速度を $1\text{m}^2/\text{min}$ 以上とするための、加熱冷却機構、プレス機構及びフィルムの搬送方式またはセット方法等の検討を行い、ローラーの送り速度、プレス圧力や成型及び離型温度等の成型条件をフレキシブルに精度良く設定できる装置を設計、製作する。

プレス圧力や加熱冷却温度の分布が不均一では、良好な転写が望めない。プレス圧力分布の均一化に関しては、偏荷重のかからないプレス機構とロール金型や転写ローラーの厚みムラを補うような緩衝機構の試作評価を行い、圧力分布の均一性を $\pm 10\%$ 以内にする。また、加熱冷却時の温度分布に関しては、加熱方式（ランプ加熱、カートリッジヒーター加熱等）、冷却方式（冷却水循環、低温ガス吹き付け等）の試作評価を行い、加熱冷却機構を開発し、温度分布の均一性を設定温度に対して $\pm 3^\circ\text{C}$ 以内にする。



研究内容と成果

①予備試験

ロール転写装置を開発するにあたり、既存の平行平板型転写装置で転写条件の検討を行い、またその結果から既存のロール転写装置に必要な転写プレス力の検討と加熱冷却機構の検討を行った。その結果を以下に述べる。

①-1. 予備試験1 目標プレス圧力の設定

平行平板型の熱転写方式でフッ素フィルムに転写を行った。転写プロセスは、加熱→プレス→保持→加圧しながら冷却→離型である。加熱温度 200℃以上での転写プロセスでは、金型に施す離型膜の耐久性が著しく劣化するため、加熱温度 150℃で最適転写条件の検討を行い、プレス力 100MPa、保持時間 10 秒、離型温度 70℃で高精度に転写することができた。この結果をふまえ、熱式ローラーナノインプリンター (RM-0606 明昌機工製) を使用して、ロール転写する際のプレス圧力と転写圧力の関係を調べた。図 6 に転写模式図を示す。

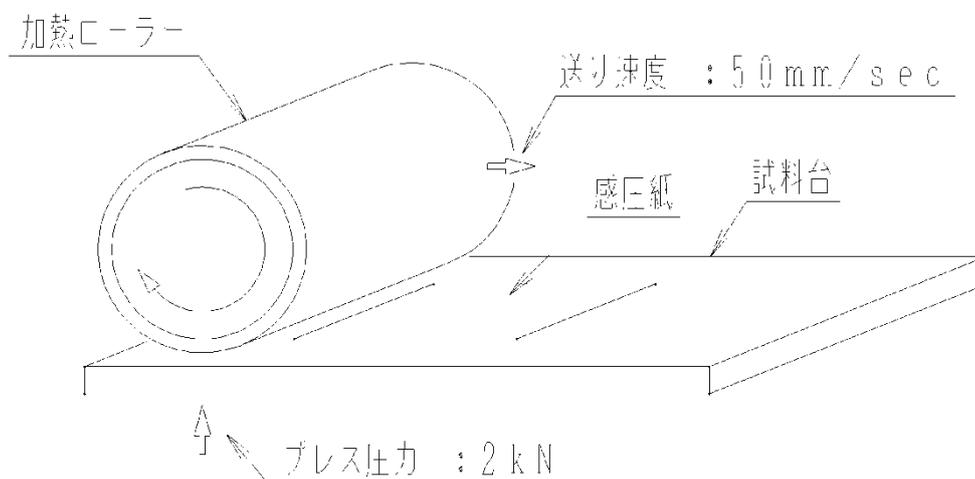


図6 転写模式図

感圧紙 (プレスケール高圧タイプ 富士フィルム製) を試料台上に設置し、直径 150mm の加熱ローラーで 20 kN まで加圧した状態で、送り速度 50mm/sec で試料台上を転がした。感圧紙の変色した濃度から約 54MPa の圧力がかかっている結果となった。必要な転写圧力は 100MPa なので、結果から開発機に必要なプレス圧力は 40kN 程度であるが、ロール型では瞬間に樹脂が金型に充填する必要があることを考慮して、必要プレス圧力の 5 倍の 200kN まで加圧できるプレス仕様とした。

①-2. 予備試験2 薄膜ロール金型の温度分布測定

新型装置では薄膜ロール金型を短いサイクルで加熱・冷却しなければならない。

加熱ローラーと冷却ローラーを有する試作装置で幅 105mm、直径 250mm の試験用薄膜ロール金型を取り付けて、加熱ローラーは 70℃まで加熱し、冷却ローラーはチラーによる循環冷却水 (設定温度 20℃) で強制冷却した状態で、送り速度 30mm/sec で回転駆動させ、その時の金型の温度変化を計測した。写真 7 に試験の様子を示す。

結果は、図 8 のとおりで、室温に近い温度設定にもかかわらず、加熱ローラー部 (転

写位置) と冷却ローラー部 (離型位置) において温度差が 30°C以上つくことがわかった。これより、この方式で薄膜ロール金型を高速に加熱冷却できることが実証できた。

開発する装置は、薄膜ロール金型とロールとの密着を良くし熱伝導の効率を上げるために、テンションをかけて薄膜ロール金型を取り付けられる機構を付加する。

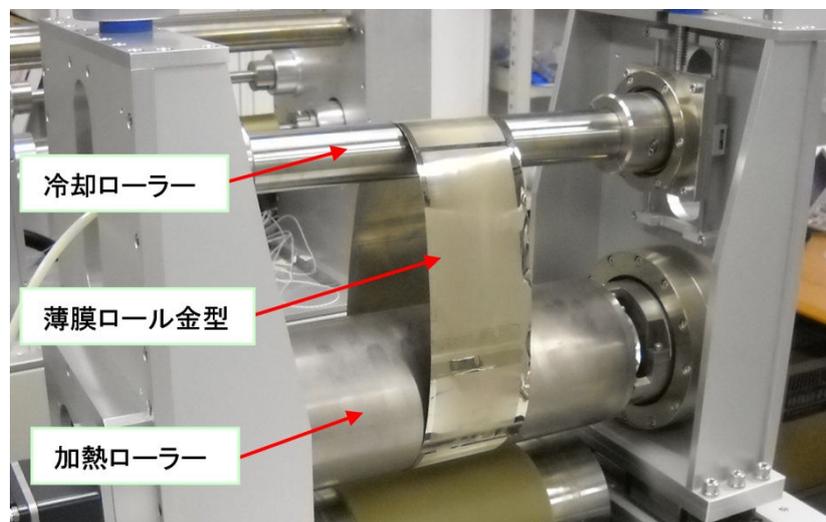


写真7 予備試験2

実験条件

- 試験用薄膜ロール金型：厚さ 0.3mm×幅 105mm×直径 250mm
- 送り速度：約 30mm/sec
- 加熱方法：中空加熱ローラーをランプヒーター (600W) にて加熱
- 冷却方法：中空冷却ローラーに冷却水を流して冷却

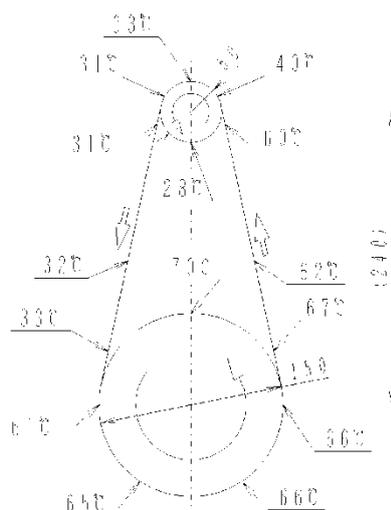


図8 薄膜ロール金型の温度分布測定結果

②装置仕様と構成

前項の予備試験の結果から、開発する転写装置は以下の仕様とした。完成した装置を写真9に示す。

仕様

- ・対応薄膜ロール金型サイズ：t0.2mm×φ250×幅300mm
- ・フッ素フィルム幅：300mm
- ・目標生産速度：1m²/min
- ・目標転写精度：90%以上
- ・転写方式：薄膜ロール金型を用いたロール型熱転写方式
- ・加熱部
 - フィルム加熱温度：MAX200℃
 - 加熱方法：中空ローラーに挿したカートリッジヒーターで加熱
 - ローラー径：φ150mm
- ・冷却部
 - フィルム冷却温度：目標70℃以下
 - 冷却方法：中空ローラーに冷却水を流して冷却
 - ローラー径：φ80mm
- ・プレス部
 - 圧力：MAX200kN 目標圧力分布±10%以内
 - プレス方法：油圧シリンダ MAX100kN×2台
 - ローラー径：φ200mm
- ・フィルム送り部
 - 速度：MAX50mm/sec
 - 方法：ブラシレスモーター+減速機+タイミングベルト

構成

- ・転写ユニット
 - プレス部・加熱冷却部・フィルム送り部付
- ・フィルム供給ユニット
- ・フィルム巻き取りユニット

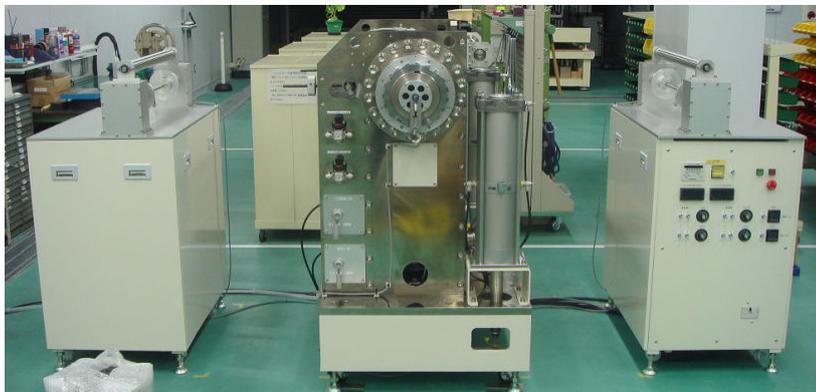


写真9 ロール転写装置

③ 装置性能

前項で完成したロール転写装置の性能を確認する試験を行った。以下に試験の結果を示す。

③-1 温度分布

良好な転写を実現するためには、加熱温度の分布が均一でなければならない。そこで、加熱ロールの温度設定器を室温、100℃、150℃にそれぞれ設定し加熱したときの、ロール表面温度を測定し、ロール温度分布を確認した。温度測定位置を図10に示す。

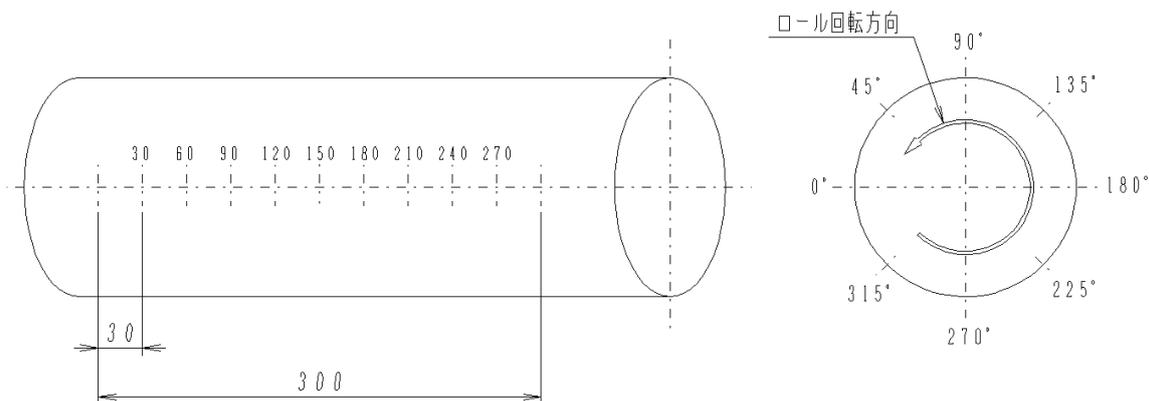


図10 温度測定位置

次に各設定温度のときのロール表面温度の測定結果を表11、12に示す。

・表11 設定温度100℃時のロール表面温度の測定結果

100℃		端からの位置 (mm)								
		30	60	90	120	150	180	210	240	270
角度 (°)	0	100.0	102.1	104.4	105.0	105.3	105.0	104.8	103.4	102.0
	45	100.1	102.2	104.5	105.1	105.3	105.2	105.0	103.4	102.5
	90	100.2	102.5	104.7	105.3	105.4	105.3	105.2	103.5	103.3
	135	100.6	102.8	105.0	105.5	105.6	105.5	105.4	103.8	103.6
	180	100.8	103.1	105.2	105.7	105.8	105.6	105.5	104.1	104.0
	225	100.7	103.0	105.1	105.6	105.8	105.6	105.3	104.0	104.0
	270	100.3	102.7	104.9	105.4	105.6	105.4	105.1	103.7	103.8
	315	100.2	102.3	104.4	105.2	105.5	105.3	104.8	103.2	102.9

・表12 設定温度150℃時のロール表面温度の測定結果

150℃		端からの位置 (mm)								
		30	60	90	120	150	180	210	240	270
角度 (°)	0	147.6	148.4	151.8	153.8	154.3	155.0	155.2	154.8	153.5
	45	147.7	148.6	151.8	153.9	154.1	155.1	155.2	154.9	153.6
	90	148.0	148.9	151.9	154.2	154.3	155.4	155.6	155.4	153.9
	135	148.6	149.4	152.2	154.6	154.9	156.0	156.0	155.8	154.4
	180	148.8	149.5	152.4	154.9	155.2	156.1	156.2	155.7	154.8
	225	148.8	149.3	152.5	154.9	155.4	156.1	156.2	155.4	154.7
	270	148.6	149.2	152.4	154.6	155.2	155.7	156.0	155.1	154.1
	315	148.2	148.9	152.1	153.8	154.8	155.3	155.5	154.8	153.7

ロール表面温度の測定結果より、各設定温度における温度分布を計算した結果下記のようになった。

設定温度 100°C のとき

・温度分布 : $102.9^{\circ}\text{C} \pm 2.8\%$ (最高温度 : 105.8°C 、最低温度 : 100.0°C)

設定温度 150°C のとき

・温度分布 : $151.9^{\circ}\text{C} \pm 2.8\%$ (最高温度 : 156.2°C 、最低温度 : 147.6°C)

温度分布の目標値 $\pm 3\%$ 以内を満足した。

③-2 圧力分布

良好な転写を実現するためには、転写圧力の分布が均一でなければならない。そこで、プレス圧力 150 kN、フィルム送り速度 50mm/sec の条件で感圧紙 (プレスケール超高压タイプ 富士フィルム製) をプレスし、転写圧力分布を確認した。

試験後の感圧紙の写真を写真 13 に示す。

目視で確認すると均一に圧力がかかっている様子がわかる。

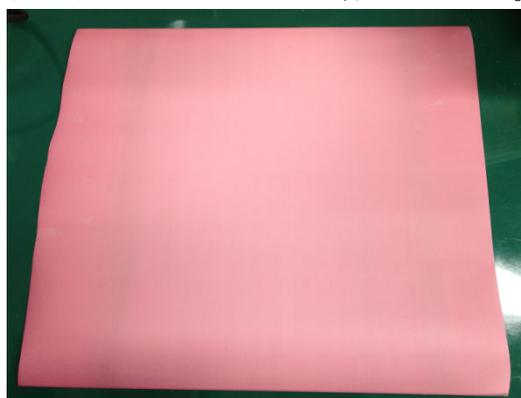


写真 13 試験後の感圧紙

次に感圧紙の変色した濃度から転写圧力を測定した。転写圧力測定位置を図 14 に示す。各測定位置における転写圧力の測定結果を表 15 に示す。

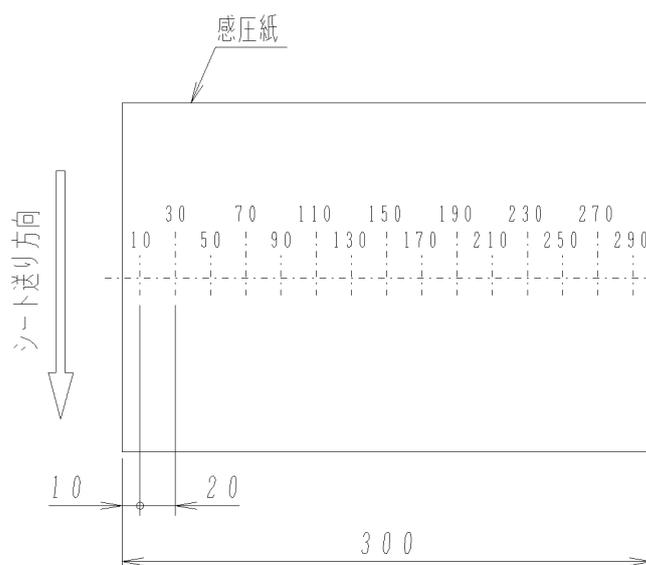


図 14 転写圧力測定位置

表 15 プレス圧力 150 kN、フィルム送り速度 50mm/sec のときの転写圧力測定結果

測定位置(mm)	転写圧力(MPa)
10	170.5
30	157.1
50	151.4
70	148.1
90	145.4
110	146.1
130	146.8
150	147.7
170	147.5
190	149.9
210	155.4
230	155.9
250	165.4
270	168.5
290	172.6

転写圧力測定結果より、転写圧力分布を計算した結果下記のようになった。

・圧力分布：159.0MPa±8.6%（最高圧力：172.6MPa、最低圧力：145.4MPa）

上記の結果は転写圧力分布の目標値±10%以内を満足している。

③-3 加熱冷却性能

製作した新型ロール転写装置にはパターン転写性を向上させるために転写サイクルに冷却機構が備わっている。また、生産性を上げるために薄膜ロール金型を短いサイクルで加熱・冷却しなければならない。そこで、装置に薄膜ロール金型を取り付けて、薄膜ロール金型の加熱冷却性能を確認した。温度測定位置を写真 16 に示す。

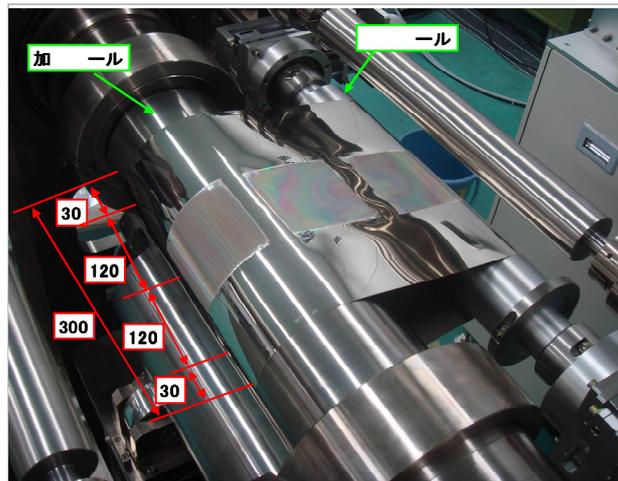


写真 16 薄膜ロール金型表面温度測定位置

次に各設定温度のときの薄膜ロール金型表面温度の測定結果を表 17、18 に示す。

・表 17 設定温度 100°C時の薄膜ロール金型表面温度の測定結果

フィルム	度	加 度 値 100°C	端からの 位置 (mm)		
			30	150	270
10mm	加	ール 度(°C)	100.4	102.6	99.9
		ール 度(°C)	24.5	25	23.8
50mm	加	ール 度(°C)	101.1	102.1	98.8
		ール 度(°C)	36.6	40.3	41.3

・表 18 設定温度 150°C時の薄膜ロール金型表面温度の測定結果

フィルム	度	加 度 値 150°C	端からの 位置 (mm)		
			30	150	270
10mm	加	ール 度(°C)	149.3	149.8	145.6
		ール 度(°C)	35.8	36.2	36.8
50mm	加	ール 度(°C)	150.3	151.5	149.8
		ール 度(°C)	58	63	61.2

本研究の成果まとめ

高精度転写に必須である、温度分布 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 、圧力分布 $\pm 10\%$ 及び離型温度 70°C 以下の性能を有した転写装置を開発することができた。

2.1-2 薄膜ロール金型の研究開発

(若狭電機産業株式会社、ダイキン工業株式会社、明昌機工株式会社)

本研究テーマの概要

本テーマにおいては、薄膜ロール金型の厚みの均一性が生産性や転写精度に大きく影響を及ぼすため、その均一性が金型厚さに対して 10%以内におさえた薄膜ロール金型を作製する。金型厚さの均一性を確保するために、シート状マスター型の転写精度の向上とニッケル電鍍条件の最適化を行う。

シート状マスター型の精度の向上については、転写性に優れた UV 硬化性樹脂を使用したステップ&リピート方式のシート状マスター製作装置（装置名：ロールフィルムマスター製作装置）を設計製作し、転写条件の最適化を行うことで、高精度なシート状マスター型を作製する。

ニッケル電鍍条件の最適化については、めっき液の濃度分布を均一化する機構の追加やめっき液温度制御の高精度化等の電鍍装置の改善及びめっき温度、電流値や濃度等の電鍍パラメーターの最適値評価を行う。

シート状マスター型の転写精度の向上とニッケル電鍍条件の最適化を行うことにより、口径 250mm・幅 300mm、金型厚さが 200 μm の厚さ均一性を 10%以内におさえた薄膜ロール金型を作製する。

研究内容と成果

①マスター金型の製作

図 19 に示すように、集光フィルムのパターンの元となるレジスト原盤、および金型製作を行った。その結果、直径 6 μm 、深さ 6 μm のハニカム構造からなるマイクロレンズが得られた。これを基にして、ニッケル蒸着によりマイクロレンズ状の金型を作製した。

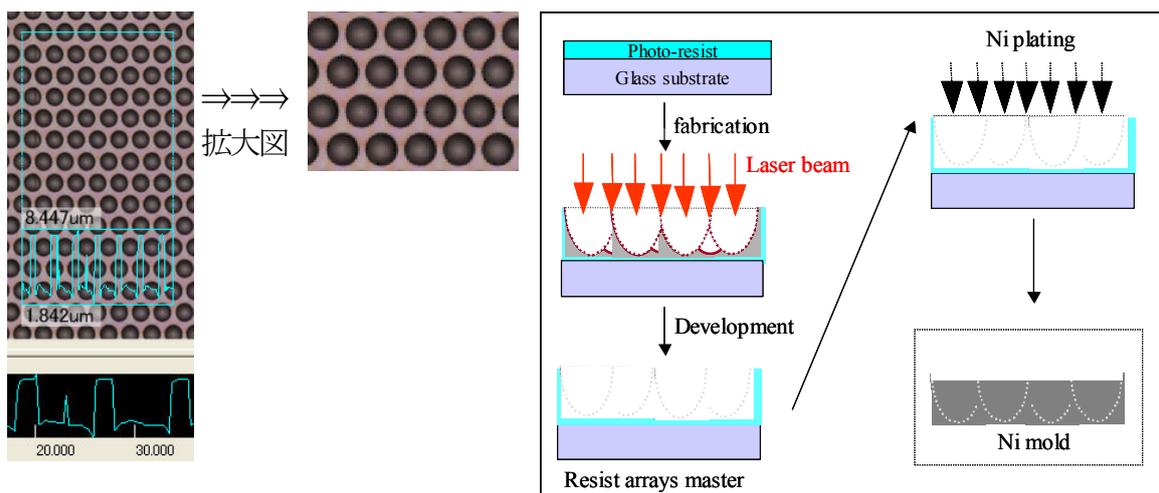


図 19 パターンの製作（レジスト原盤の製作～金型）

②シート状マスターの製作

図 20 に示すとおり薄膜ロール金型の製作には、その元となるシート状マスターが必要である。今回開発する装置に搭載される大面積用の薄膜ロール金型を製作するには、400×780mmのシート状マスターが必要である。

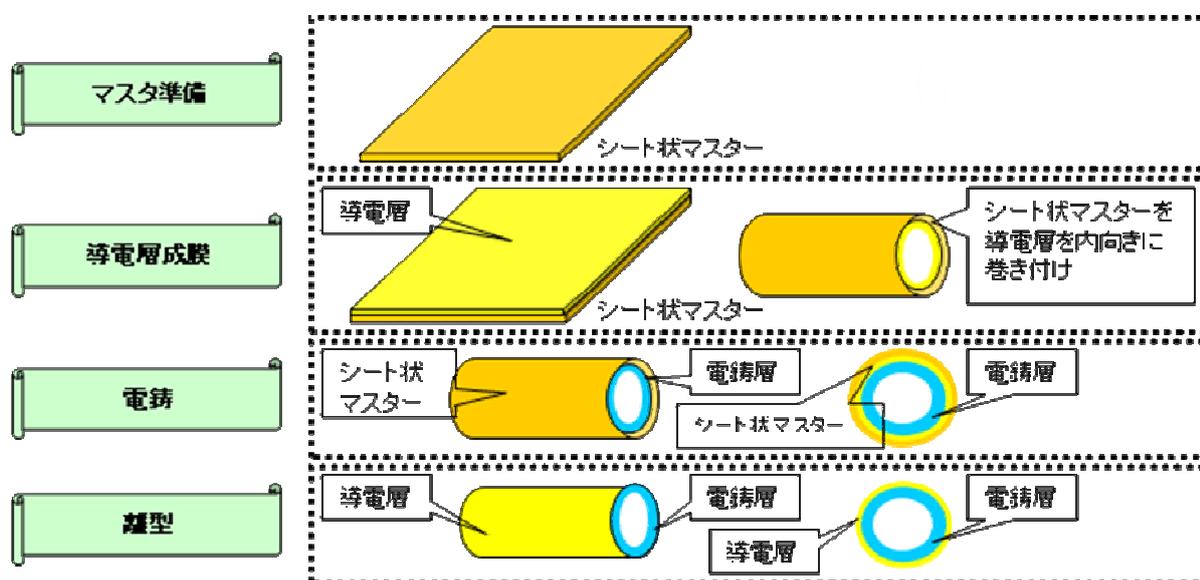


図 20 薄膜ロール金型の製作方法

シート状マスターの電鍍で実績のある材質は、ポリカーボネイトやアクリルがあり、いずれも熱可塑性樹脂で、成型は熱式転写で行われる。そこで、平行平板型転写装置 (写真 21) を用いてマスター金型をポリカーボネイトシートに連続転写することでシート状マスターの製作を行った。製作したポリカ製シート状マスターを写真 22 に示す。転写条件は、170°C加熱 → 120~130kN (□10mm) でプレス → 30 秒で冷却 → 離型とした。プレス部周りに若干の歪みが発生したが、それから製作する薄膜ロール金型を十分評価できる程度の完成度であった。

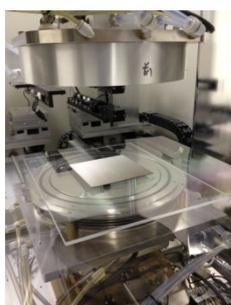


写真 21 平行平板型転写装置



写真 22 ポリカ製シート状マスター

熱式連続転写方式では、シートに歪みが生じ、密にパターンを転写していくことは非常に困難である。そこで、熱変形のない UV 式での連続転写方式でシート状マスターの製作を試みた。

大面積転写のシート状マスターの製作には、PDMS モールド・UV 硬化樹脂を用いた検討を行った。製作の流れを次に示す。

・製作の流れ

(1) マスター金型から PDMS モールドの作製

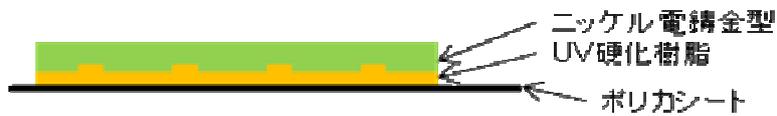


マスター金型の作製可能寸法は 150mm×150mm

(2) PDMS モールドで UV 硬化樹脂に転写



(3) UV 硬化樹脂パターンにニッケル電鍍

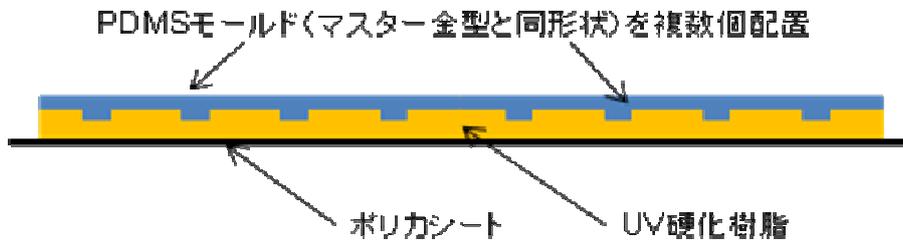


(4) ニッケル電鍍金型から PDMS モールドの作製



マスター金型と同形状の PDMS モールドを複数個作製

(5) 複数個の PDMS モールドを UV 硬化樹脂に転写



小面積のマスター金型から大面積シート状マスターを製作

UV 式連続転写方式にすることで、熱方式で生じたシートの歪みは無く、継ぎ目の無いシート状マスターを製作することができた (写真 23)。



写真 23 シート状マスター

③薄膜ロール金型の製作

今回の研究の目標として薄膜ロール金型の膜厚均一性を金型厚みに対して 5%以内に押さえたものを目指した。前項で製作したポリカーボネイト製シート状マスターから薄膜ロール金型を作製した。

まず初期の薄膜ロール金型の試作で出来上がった幅 380mm の薄膜ロール金型 (写真 26) の膜厚分布は表 24 の通りとなった。測定位置は図 27 に示す。

幅からの 距離	①		②		③		④		⑤		⑥	
	10度	(um)	65度	(um)	135度	(um)	210度	(um)	285度	(um)	350度	(um)
20	①-1	226	②-1	225	③-1	224	④-1	231	⑤-1	233	⑥-1	238
30	①-2	235	②-2	224	③-2	230	④-2	231	⑤-2	230	⑥-2	235
40	①-3	233	②-3	221	③-3	235	④-3	232	⑤-3	224	⑥-3	238
60	①-4	239	②-4	236	③-4	239	④-4	234	⑤-4	234	⑥-4	239
100	①-5	236	②-5	238	③-5	236	④-5	237	⑤-5	222	⑥-5	236
150	①-6	243	②-6	230	③-6	241	④-6	246	⑤-6	242	⑥-6	243
200	①-7	233	②-7	224	③-7	228	④-7	229	⑤-7	217	⑥-7	235
250	①-8	225	②-8	218	③-8	224	④-8	215	⑤-8	211	⑥-8	223
300	①-9	214	②-9	208	③-9	211	④-9	193	⑤-9	190	⑥-9	215
340	①-10	186	②-10	198	③-10	187	④-10	188	⑤-10	173	⑥-10	187
350	①-11	156	②-11	154	③-11	156	④-11	154	⑤-11	143	⑥-11	168
360	①-12	145	②-12	139	③-12	131	④-12	133	⑤-12	130	⑥-12	142

表 24 初期の薄膜ロール金型の膜厚計測結果

薄膜ロール金型の幅方向の両端部で 100um 程度の誤差が発生していた。この結果から膜厚分布のムラを低減するために装置側の改善が必要と判断し実施した。

その結果最終的に出来上がった幅 380mm の薄膜ロール金型の膜厚分布は以下の表 25 の通りとなった。両端部の 30mm ほどにはまだ若干の膜厚ばらつきがあるが、その内側部分の膜厚は目標としていた 5%の膜厚ムラ以内に納めることができた。

幅からの 距離	①		②		③		④		⑤		⑥		⑦	
	10度	(um)	45度	(um)	115度	(um)	170度	(um)	230度	(um)	315度	(um)	350度	(um)
20	①-1	223	②-1	239	③-1	241	④-1	229	⑤-1	227	⑥-1	236	⑦-1	226
30	①-2	220	②-2	223	③-2	229	④-2	219	⑤-2	217	⑥-2	225	⑦-2	221
40	①-3	216	②-3	214	③-3	217	④-3	214	⑤-3	213	⑥-3	215	⑦-3	215
60	①-4	217	②-4	203	③-4	206	④-4	202	⑤-4	203	⑥-4	211	⑦-4	217
100	①-5	216	②-5	202	③-5	205	④-5	205	⑤-5	210	⑥-5	207	⑦-5	214
150	①-6	211	②-6	205	③-6	205	④-6	201	⑤-6	206	⑥-6	206	⑦-6	213
200	①-7	213	②-7	208	③-7	207	④-7	209	⑤-7	205	⑥-7	205	⑦-7	217
250	①-8	216	②-8	203	③-8	209	④-8	207	⑤-8	203	⑥-8	204	⑦-8	212
300	①-9	215	②-9	203	③-9	201	④-9	195	⑤-9	201	⑥-9	209	⑦-9	208
340	①-10	205	②-10	199	③-10	195	④-10	194	⑤-10	198	⑥-10	201	⑦-10	203
350	①-11	182	②-11	187	③-11	176	④-11	177	⑤-11	175	⑥-11	179	⑦-11	189
360	①-12	189	②-12	190	③-12	180	④-12	187	⑤-12	193	⑥-12	185	⑦-12	189

表 25 電鍍装置改造後の薄膜ロール金型の膜厚計測結果

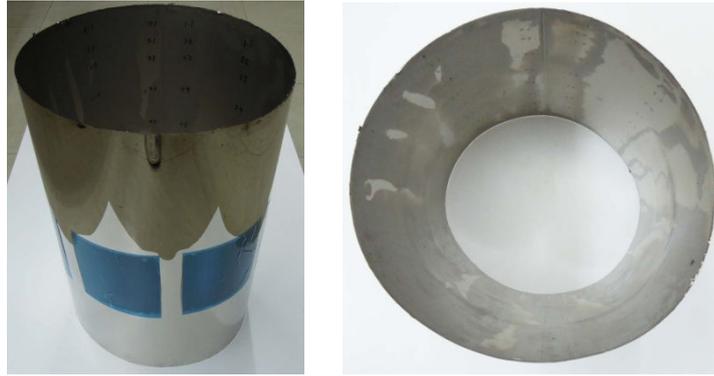


写真 26 薄膜ロール金型

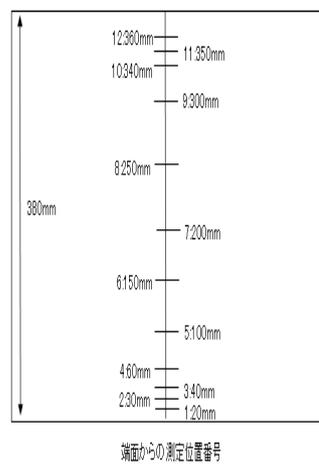
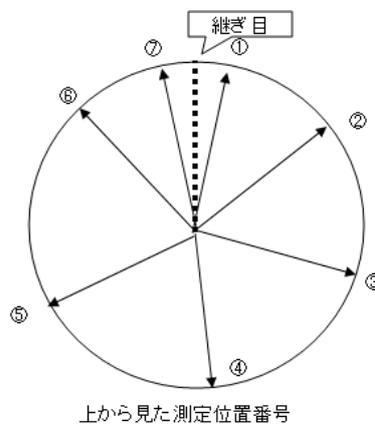


図 27 ロール金型測定位置

本研究の成果まとめ

1. 小面積マスター金型より、大面積シートマスターを作製することができた。
2. 電鋳装置を改良及び電鋳条件を最適化することで、板厚均一性が 10%以内の薄膜ロール金型を製作することができた。

2.2 転写精度の向上

(明昌機工株式会社、ダイキン工業株式会社)

転写精度は、加熱温度、送り速度、プレス圧力、冷却温度等のプロセス条件と、プレス時の圧力分布や加熱冷却時の温度分布等の装置や金型が持つ性能で決定する。

圧力及び温度分布の均一性を向上させ、プロセス条件の最適化し、パターン転写率 90%以上の転写精度を達成する。

2.2-1 ロール転写条件（温度、圧力、速度）の最適化

(明昌機工株式会社、ダイキン工業株式会社)

本研究テーマの概要

開発した冷却機構付き熱式ロール転写装置と薄膜ローラー金型でフッ素系太陽集光フィルムを製作する。ローラー加熱温度、フィルム送り速度、プレス圧力、ローラー冷却温度、フィルムテンション力の各パラメーターの変更による転写率の変化と生産性を評価し、プロセス条件を最適化し、90%以上の転写率を達成する。

研究内容と成果

①転写結果

1m²/min の生産速度を達成すべく、幅 50mm のフッ素フィルムに送り速度 50mm/s 一定で、金型温度、フィルム温度及びプレス力のパラメーターを変更して転写を行った。表 29 にその結果を示す。金型のパターン深さは 6μm であり、転写したはパターン深さが 5.4μm 以上であれば 90%以上の転写率で転写されたことになる。

金型温度：180℃、フィルム温度：80℃、プレス力：30kN 以上、(送り速度 50mm/s)」の条件であれば、90%以上の転写率で転写可能であるが、離型ポイントでの冷却が不十分なためフィルムにシワが発生している。金型温度を高い場合、冷却ローラーでの冷却能力不足により離型温度が高くなる。離型温度が 50℃以上ある場合、転写フィルムにシワが生じる。金型の加熱温度（ローラー温度）が 100℃以下であれば、離型温度が 40℃以下となり、フィルムシワは発生しなくなった。詳細はここでは省略とするが、金型温度：100℃、所定のフィルム温度及びプレス力、送り速度 50mm/s」で、シワ無く転写率 90%で転写することができた。

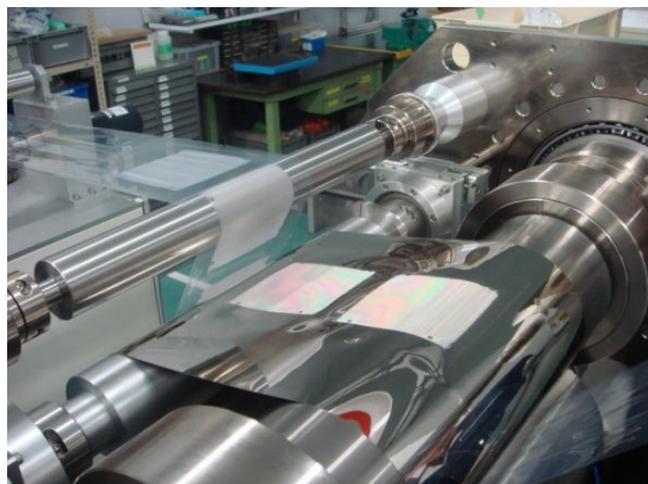
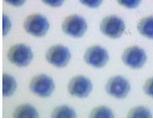
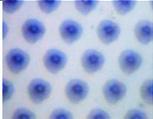


写真 28 熱式ロール転写

表 29 転写条件と結果

条件	離型時温度	パターン深	形状	しわの有無
金型：160℃ フィルム：80℃ プレス力：20kN	50～60℃	約5μm		 有り
金型：160℃ フィルム：80℃ プレス力：40kN	50～60℃	約5μm		 有り
金型：180℃ フィルム：80℃ プレス力：20kN	60～70℃	約4.5μm		 有り
金型：180℃ フィルム：80℃ プレス力：40kN	60～70℃	約5.5μm		 有り
金型：200℃ フィルム：80℃ プレス力：20kN	70～80℃	約4μm		 有り
金型：200℃ フィルム：80℃ プレス力：40kN	70～80℃	約5.5μm		 有り
金型：200℃ フィルム：80℃ プレス力：60kN	70～80℃	約5.5μm		 有り
金型：50℃	25～30℃	約5μm		 無し
金型：100℃	35～40℃	約5.5μm		 無し

本研究の成果まとめ

1. 金型温度（ロール温度）100℃、所定のフィルム温度及びプレス力、送り速度 50mm/s（フィルム生産速度 1m²/min に相当）の転写条件で、90%の転写率で成型することができた。

2.3 フッ素集光フィルムの評価

(ダイキン工業株式会社)

高度化した連続加工法で得られたフッ素系太陽電池用集光フィルムを多結晶系太陽電池表面へ貼り付け、屋外での実曝発電を実施する。フッ素集光フィルムの性能評価において、従来ソーラーシミュレーターでの評価があるが、垂直入射光による発電特性や、理想的直達光での評価となるため現実的ではない。実際の発電特性では、曇天時での発電や朝夕（春夏秋冬）等の斜め太陽光入射が基本となるため、今回実曝発電試験を採用するものである。

従来の結晶系太陽電池に比べて「5%以上の発電効率向上」を確保し、集光フィルムの技術的価値をアドバイザーの助言を求め、開発にフィードバックさせる。

2.3-1 実曝発電試験

(ダイキン工業株式会社)

集光フィルムを市販の太陽電池モジュール（多結晶系、40cm 角）表面に貼り付け、ブラックモジュールと比較しながら屋外での太陽光発電の実曝発電試験を行なう。実曝発電試験は南向き、斜め 30 度に傾けてその発電特性の比較を実施評価し、5%以上の発電効率向上があることを確認する。

研究内容と成果

今回、ロール式熱転写にて得られたフッ素集光フィルムを下図 30 に示すように、太陽電池モジュール表面への貼り付け、ソーラーシミュレーター（90° 入射光）、および屋外に暴露し太陽電池の発電特性を評価した。

その結果、今回の連続ロール転写フィルムは平板式同様、発電量（Isc 増加）が増加する結果となることを確認した。

(ラミネート条件)

真空 5min

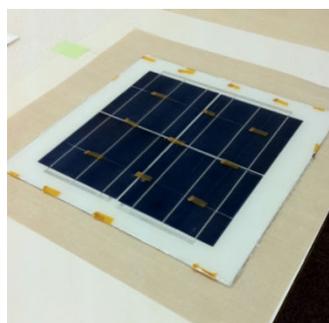
プレス 0.5min

大気圧プレス 135°C×25min

封止材 EVA_200um 厚（サンビック社）

貼付前 → 貼付後

- | | |
|---------------------|--------------------------------------|
| 1) 従来：平板式フィルム付モジュール | : Isc[A] 8.942 → 9.180 (2.7% Isc 増加) |
| 2) 今回：フィルム付モジュール | : Isc[A] 8.922 → 9.050 (1.4% Isc 増加) |



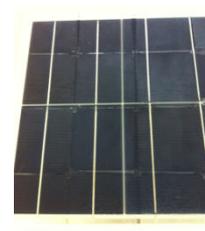
熱ラミネート前



ラミネート後



従来：平板式



今回：ロール式

集光フィルム付PVモジュール

図 30 フッ素集光フィルムの熱ラミネート

次に、得られた集光フィルム付PVモジュールを屋外に暴露して、太陽電池の発電特性を評価した（図31）。

その結果、2013/3/20 は曇りの天気であったが、拡散光に基づく集光効果により「平均10%以上：系列2」（表32）の出力増加が見られた。また、2013/3/21 は晴れの天気であったが、直達光による朝夕の集光効果により「朝夕10%以上：系列2」（表33）の出力増加が見られた（なお、系列1は日射量[kW]を示す）。

以上のことから、目標とする5%以上の発電量の効率向上を確認した。

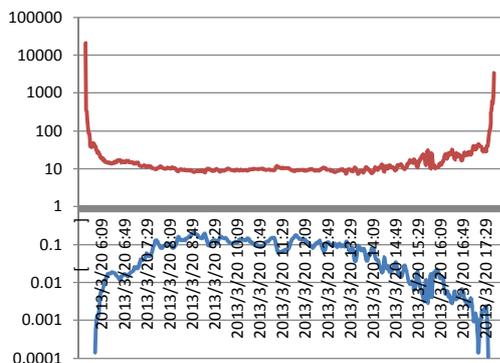


表32 2013/3/20 曇り
(平均10%以上の出力)

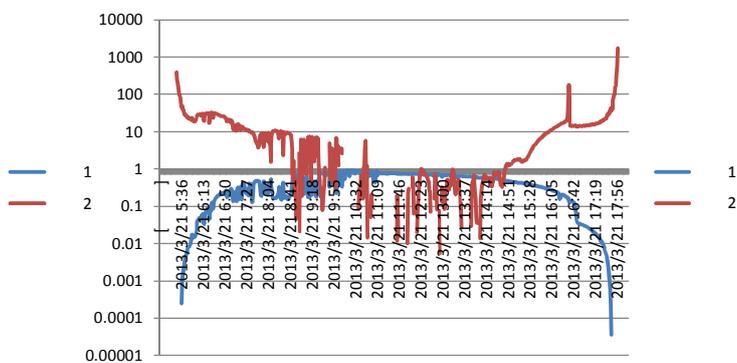


表33 2013/3/21 晴れ
(朝夕10%以上の出力)



図31 太陽電池の発電特性評価

本研究の成果まとめ

1. ロール転写装置で製作した集光フィルムの効果により、太陽電池の発電特性が曇天時において太陽電池モジュール単体より10%以上の発電効率を得られた。
2. 晴天時においては、集光フィルムによって朝夕の斜入射光を効率よく集光することができ、太陽電池モジュール単体より10%以上の発電効率を得られた。
3. ロール転写装置で製作した集光フィルムの効果により、目標とする5%以上の発電量の効率向上を達成できた。

第3章 全体総括

・全体総括

設計開発した薄膜ロール金型を用いた冷却機構付き熱式ロール転写装置は、従来のロール式の高い生産性（大面積転写及び高速性）に加え、離型前に冷却プロセスを付加することで高精度な転写が実現できた。ロール金型を薄膜にすることで金型自体の熱容量が小さくなり加熱及び冷却の繰り返しサイクルを短時間で行うことが可能となった。

・残された課題

目標の $1\text{m}^2/\text{min}$ 以上フィルムの生産速度と、転写率 90%以上の転写精度でのフィルム転写を行う課題についてはほぼ達成できたが、安定して大量に太陽光集光フィルムを生産する上で様々な課題が浮上してきた。一つ目は薄膜ロール金型の耐久性、二つ目は熱影響によるフィルムシワの発生、そして 3 つ目は薄膜ロール金型の蛇行である。25 年度は、この 3 つの課題を克服すべく研究開発を行ってきた。フィルムシワの発生については、転写条件の最適化とフィルムの搬送機構の改修で、薄膜ロール金型の蛇行については、蛇行調整機構の追加で解決することができた。薄膜ロール金型の耐久性については、金型の材質を純ニッケルから電鍍浴種を変更し高硬度にすることで大幅に向上させることができた。しかし、数時間の成型運転で金型が破断する問題が生じ、現在も解決できないでいる。金型製作時にできる繋ぎ目から破断が生じているが、純ニッケルの金型も同様に繋ぎ目があるが、破断は生じなかった。高硬度の金型は延弾性がほぼ無いため脆く破断しやすいものと考えられる。今後は、その中間の硬度で金型を製作し、耐久性を評価していく予定である。

・今後の展望

今後も、本開発プロセスを用いた太陽光集光フィルムの高精度化及び高スループット化技術のフラッシュアップを継続し、市場動向に合わせた製品開発を行っていく。

さらに、太陽光集光フィルムのみに限らず、微細パターンを付加した機能性フッ素フィルムの工業的用途への展開を模索し、市場開発と広範囲な実用化に努める。