

Roll to Roll

乾燥工程技術とトラブル対策

～塗膜乾燥の実務・設備を
イメージ重視で解説～

著者：浜本 伸夫／工藤 裕二郎

第1部 執筆者

AndanTEC (アンダンテック) 代表 浜本 伸夫

【経歴】

1968年 札幌生まれ

1992年 北海道大学大学院工学研究科合成化学工学専攻
修士課程修了
専門は粉体工学、微粒子の帯電量に関する研究に
従事し静電気学会の論文賞に受賞(1992年)



1992～2013年

富士フイルム株式会社

生産技術部 開発グループ塗布チームでカーテン塗布、LiB生産技術開発(3年)、足柄工場
第7製造部技術課の塗布担当としてカラー感光材料の同時重層塗布の高精度化、商品化と
トラブルシューティング(9年)、フラットパネルディスプレイ生産部 技術グループ塗布チー
ム主任技師としてワイドビューフィルム塗布生産性と品質向上を牽引(4年)、熊本工場に
駐在して技術チームリーダーとしてTACフィルム製膜機建設と顧客対応に従事(5年)。

2013～2019年

サムスン電子株式会社

総合技術院 素材研究センターFilmラボ主席研究員OLED用光学補償フィルム開発、静電噴霧
によるパターンニング工程開発、全固体電池用の固体電解質膜の生産プロセス開発に従事。

2019～2021年

農心グループ 栗村化学株式会社

工程開発チーム長として、PSAフィルム、離型フィルム、ARフィルム、LiB用パウチの品質改
善と生産性向上に従事。

2021年

米Zymergen Co. Ltd., Technical Manager

コロナ禍で日本に帰国し同社でテレワーク。バイオポリイミド開発品を日本国内の委託生
産会社で量産するプロジェクトを牽引(同社の事業撤退により離職)。

2022年～2023年

ミドリ安全株式会社 商品開発部 ジェネラルマネージャー

ニトリル手袋の開発チーム運営。マレーシアの生産会社に長期出張しつつ、組織再構築と
コーチングにより研究チームを活性化。

2023年～現在

AndanTEC代表として起業。顧客企業の技術支援、月刊誌(コンバーテック)への連載、Roll
to Roll関連のオンライン・対面セミナー人気講師として活躍中。

【専門のキーワード】

・塗布・スロットダイ ・バー塗工 ・グラビア塗工 ・乾燥・Roll to Roll ・静電気
・クリーンルーム ・トラブルシューティング ・可視化

第2部 執筆者

株式会社 熱ラボ 代表取締役 工藤 裕二郎

【経歴】

山口県出身

2008年 九州大学大学院工学府機械科学専攻 修士課程修了
専門はトライボロジー（摩擦）



2008～2021年

千代田化工建設株式会社

機械設計部にて熱・燃焼設備に関する設備設計、プラントエンジニアリング、技術コンサルティング業務をリードエンジニアとして従事。国内／海外向けのプロジェクトを多数遂行。海外向けの石油、ガス設備建設業務では、カタールに半年、オーストラリアに1年半、プラント建設・試運転のために赴任。

2021～2025年

熱技術開発株式会社

開発課課長職として、乾燥設備、燃焼設備の開発に従事。大規模試験装置の構想から設計、運用までを、プロジェクトマネージャーとして遂行。
各種測定のための試験装置も随時設計・製作し測定を実施してきた。

2025年～現在

株式会社熱ラボの代表取締役として、乾燥設備、熱設備のコンサルティング、セミナー講師、エネルギー診断等を実施。

【資格】

- ・技術士 機械部門（熱・動力エネルギー）
- ・エネルギー管理士（熱・電気）
- ・エネルギー診断プロフェッショナル認定

【専門のキーワード】

- ・乾燥 ・伝熱 ・Roll to Roll
- ・熱設備／システム ・省エネルギー

目次

はじめに	001
------	-----

第1部

第1章 Roll to Roll 工程の概要	004
------------------------	-----

1-1 フィルム製品の歴史と分類	004
1-2 塗工液の濃度	006
1-3 量産におけるRoll to Roll工程	007
1-4 実験室で活用されるバッチ方式	007
1-5 生活で経験する乾燥	009

第2章 乾燥設備と溶媒の寄与	013
----------------	-----

2-1 乾燥の3要素	013
2-2 種々の乾燥方式	015
2-3 乾燥風の供給方法（並列と直列）	019
2-4 溶媒の寄与（水と他の溶媒の比較）	020
2-5 膜面温度と乾燥速	022
2-6 空気線図	022
2-7 飽和蒸気圧の温度依存性	024
2-8 等エンタルピー線（断熱冷却線）	026
2-9 比熱	027
2-10 蒸発潜熱	027
2-11 ルイス数（物質と熱の拡散）	029
2-12 有機溶剤系のガス濃度：爆発下限界（Lower Explosive Limit）基準	031

第3章 定率期間と減率期間	035
---------------	-----

3-1 限界含水率	035
3-2 膜内の溶媒分布	036
3-3 2成分系の減率乾燥	037
3-4 有機溶剤系の乾燥における湿度の影響	039
3-5 共沸混合物の乾燥	039

第4章 減率乾燥速度	041
4-1 仮想時間と乾燥係数	041
4-2 乾燥係数法	042
4-3 限界含水率の実測方法	043
第5章 乾燥計算	045
第6章 乾燥設備	049
6-1 品質・省エネ・投資を考慮した設計（予熱・加熱・絶乾・冷却）	049
6-2 揮発溶媒の処理（RTO）	050
6-3 揮発溶媒の処理（溶剤回収）	050
第7章 裏面伝熱による乾燥	053
7-1 裏面加熱の昇温助走時間	053
7-2 実験室のホットプレート乾燥	055
7-3 接触熱抵抗	055
7-4 ホットプレート乾燥の計算例	058
第8章 調湿（膜中の残留溶媒の調整）	063
8-1 平衡含水率	063
8-2 調湿時間の支配因子	064
第9章 乾燥起因の面状トラブルと対策	069
9-1 発泡トラブルと対策	069
9-2 白化現象の原因と対策	070
9-3 分散系の乾燥（偏析・沈降・凝集）	071
9-4 LIB電極乾燥時のバインダーと導電助剤の偏析	074
9-5 ベナールセル（ゆず肌）	074
9-6 ハジキ	076
9-7 レベリング	077
9-8 密度流	078
9-9 ゾーン間の干渉と圧力バランス	079

第 10 章 赤外線乾燥とレーザー乾燥	083
10-1 赤外線の種類と放射エネルギー（遠赤外・中赤外・近赤外）	083
10-2 熱風との比較	084
10-3 波長制御によるヒーター昇温の抑制策	084
10-4 レーザー乾燥	086
第 11 章 まとめと Roll to Roll 解析ツール	089

第 2 部

第 1 章 乾燥の基本	092
1-1 身の回りの乾燥現象	092
1-2 Roll to Roll の乾燥	092
1-3 乾燥に影響を与える因子	093
1-3-1 外的要因	093
1-3-2 内的要因	094
1-4 乾燥における空気線図と潜熱	095
1-5 乾燥特性曲線と予熱・恒率乾燥・減率乾燥期間	096
1-5-1 乾燥特性曲線とは?	096
1-5-2 予熱期間	097
1-5-3 恒率乾燥期間	097
1-5-4 減率乾燥期間	097
1-6 減率乾燥	098
第 2 章 伝熱の基礎	101
2-1 伝熱の3形態	101
2-1-1 熱伝導	101
2-1-2 熱伝達	101
2-1-3 熱放射	102
2-2 熱伝導	102
2-3 熱伝達	103
2-4 熱放射	103
2-4-1 熱放射の基本原理	104
2-4-2 二物体間の放射伝熱	105
2-5 伝熱に関わる無次元数	106

第3章 乾燥設備	109
3-1 熱風乾燥	109
3-1-1 衝突噴流の基礎	109
3-1-2 ノズルの種類	111
3-1-2-1 ジェットノズル（二次元ノズル）	111
3-1-2-2 多孔板ノズル	111
3-1-2-3 フローターノズル	112
3-1-2-4 平行流ノズル	112
3-1-3 乾燥炉内搬送方式	113
3-1-3-1 ロールサポート方式（テンション搬送）	113
3-1-3-2 フローティング方式（浮上搬送）	113
3-1-4 乾燥計算	115
3-1-4-1 入熱量の算出	115
3-1-4-2 出熱量の算出	116
3-1-5 各種設計パラメータの乾燥速度への影響	121
3-1-5-1 熱風速度の影響	121
3-1-5-2 ノズルピッチの影響	122
3-1-5-3 スリット幅の影響	122
3-1-5-4 ノズル高さの影響	123
3-1-6 熱伝達率を測定してみよう	123
3-1-6-1 定常法	123
3-1-6-2 非定常法	124
3-1-6-3 物質伝達法（ナフタリン昇華）	125
3-1-7 熱風の熱源設備	125
3-1-7-1 蒸気ヒーター	125
3-1-7-2 熱媒油ヒーター	126
3-1-7-3 電気ヒーター	126
3-1-7-4 ガスバーナ	126
3-1-7-5 ヒートポンプ	126
3-2 電磁波を使った乾燥	126
3-2-1 赤外線乾燥	127
3-2-1-1 ハロゲンヒーター (近赤外線：波長 $0.78\sim 1.7\mu\text{m}$ （熱源温度範囲 $2000\sim 3000^{\circ}\text{C}$ ）)	127
3-2-1-2 カーボンヒーター (中赤外線：波長 $1.7\sim 3\mu\text{m}$ （熱源温度範囲 $900^{\circ}\text{C}\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ）)	128
3-2-1-3 セラミックヒーター (遠赤外線：波長 $3\sim 10\mu\text{m}$ （熱源温度範囲 $400\sim 800^{\circ}\text{C}$ ）)	128

3-2-1-4	赤外線を選択吸収性	129
3-2-1-5	赤外線波長制御乾燥	131
3-2-2	誘電加熱	132
3-3	誘導加熱	133
第4章	乾燥設備の省エネルギー	135
4-1	乾燥排気の循環利用	135
4-2	乾燥排気の廃熱回収	137
4-3	乾燥炉からの吸込み／吹出し空気量の減少	137
4-4	揮発溶剤の熱利用	138
4-4-1	局所排気内VOCの熱利用	138
4-4-2	熱効率の良いVOC焼却設備の利用	138
4-4-3	排気内VOC濃度の上昇	139
4-5	水性溶剤の使用	140
第5章	乾燥に関するトラブルシューティング	145
5-1	乾燥ムラ	145
5-1-1	乾燥ムラの主な原因	145
5-1-2	乾燥温度不均一	146
5-1-3	熱風速度不均一	146
5-1-4	熱風の基材衝突後の戻り速度不均一	147
5-2	バタつき	148
5-3	しわ発生	148
5-4	バインダーマイグレーション	149
5-4-1	発生メカニズム	150
5-4-2	バインダーマイグレーションの影響	151
5-4-3	対策・防止法	151
おわりに		153

はじめに

フィルムの開発や製造に携わると、塗工や乾燥の知識が必要になるが、初学者に丁度良い手引きは少ない。私自身、1990年代に就職してから塗工開発とフィルム製造に従事したが、課題解決のために情報を漁っても、論文は学術的すぎ、現場情報はノウハウ的で、勘所を掴むのに苦労した。この本はRoll to Roll工程に関わる方々の課題遂行をサポートするためにイメージ作りを重視して執筆した。塗工については、既に「機能性フィルムにおける基礎・最新動向とスロット塗工技術」、「Roll to Roll塗工技術とスケールアップ」を発刊しており、第3弾として乾燥関連の「理論とノウハウ」をまとめた。概ねの現象を図やグラフでイメージできれば、数式を追う必要はない。なお、筆者は乾燥設備ありきで塗膜乾燥に携わってきたので、乾燥装置の設計や機械的観点を語りつくせない。設備関係は、第2部で乾燥設備の専門家である株式会社熱ラボの工藤裕二郎氏の内容を参考にして頂きたい。

理論と現場の実践力を網羅した塗工乾燥技術が広まれば、機能性フィルム業界の発展にもつながる。本書を読まれた皆様がRoll to Roll製造技術を高めて、新しい機能性フィルムの開発や製品の品質向上をされる事をお祈りする。

令和7年吉日 AndanTEC 浜本伸夫

第 1 部

Roll to Roll 工程における
乾燥技術 基礎編

第1章 Roll to Roll工程の概要

世の中は塗工フィルム製品で溢れている。どんな既製品であれ始めは開発品であり、スケールアップの後に製品化されて我々の手元に届く。開発品は素材研究者が中心となり幾多の素材を試行した結果、絞り込まれた候補の素材サンプルをスケールアップして量産するに至る（図1-1）。実験室で名刺〜A4程度のサンプルを作製する時は、手塗りの塗膜を自然乾燥させたり、ホットプレートで加熱したり、オーブンにまとめて入れたりするが、量産時には帯状のフィルムに連続塗工するRoll To Roll方式では熱風で乾かすために出来上がり膜質が実験サンプルを再現しないことが多い。スケールアップを成功させるには、量産の乾燥現象を把握する必要がある。

本書では、開発と量産の両方で活用される乾燥方式を解説する。新製品の開発や現製品の安定化・生産性向上などの課題遂行に役立てて頂ければ幸いである。

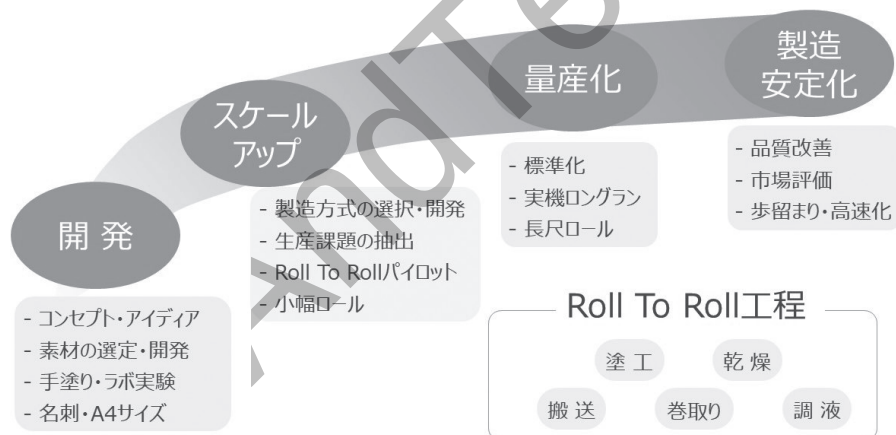


図1-1 フィルム製品の開発とスケールアップ

1-1 フィルム製品の歴史と分類

工業的にRoll To Roll生産が始まったのは19世紀の映画フィルムに遡る（図1-2）。戦後の高度成長期には感熱紙やトレットペーパーのようなロール紙、電子化が進むとMLCC、1980年代にはデジタル時代が幕明け、ノートPC、リチウムイオン電池、今世紀には液晶TVやスマホが出現し、各製品の要所でフィルム部材が利用されるようになった。

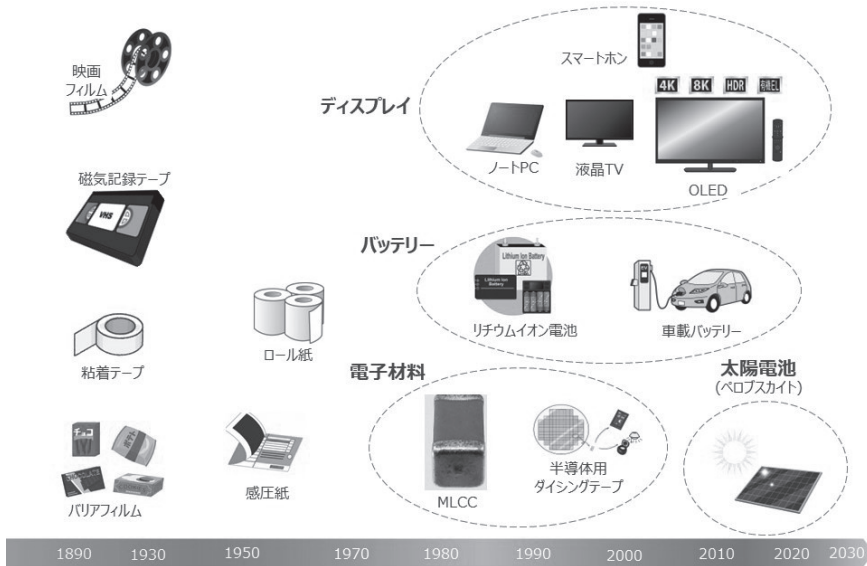


図1-2 フィルム製品の歴史

製品毎にフィルム部材の使われ方は様々で、例えば液晶TVならば幾多ものフィルムを積層して光学性能を付与し、リチウムイオン電池では電極部材そのものがエネルギーを蓄積～放出する主役、MLCCの基材は生産過程で使用されるが最終製品には含まれない（図1-3）。

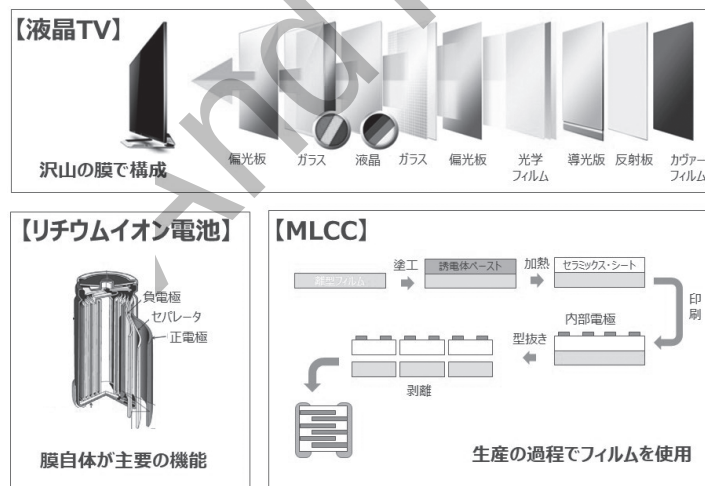


図1-3 フィルム部材の使われ方

これらのフィルム膜を大きく分類すると厚みと層数で整理される（図1-4）。単層の薄塗りは離型フィルムやプライマー、単層の厚塗りは電池の電極や粘着フィルム、ハードコートや光学補償フィルムは重層で、更に厚塗りとなると写真感光材料やMLCCとなろう。

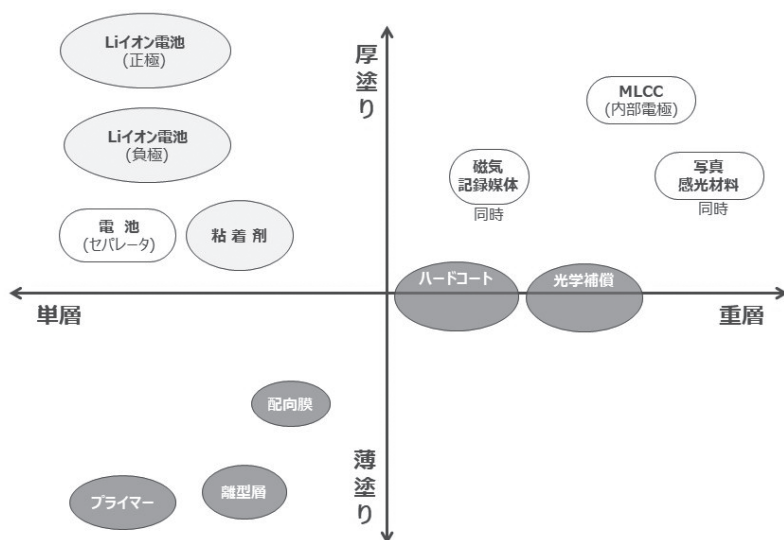


図1-4 塗工膜の分類

1-2 塗工液の濃度

一般に塗工液は溶媒に溶かして塗って乾かすので、塗る膜は完成する膜よりも厚い。塗工時の乾燥前の厚みを「Wet厚み」、乾燥後は「Dry厚み」と区別する。完成品のDry厚みを与えるWet厚みは濃度次第で如何様にもなる。大抵、実験室で希薄な低粘液を塗り、量産検討の時に乾燥しやすくなるよう濃縮するので高粘になる（図1-5）。

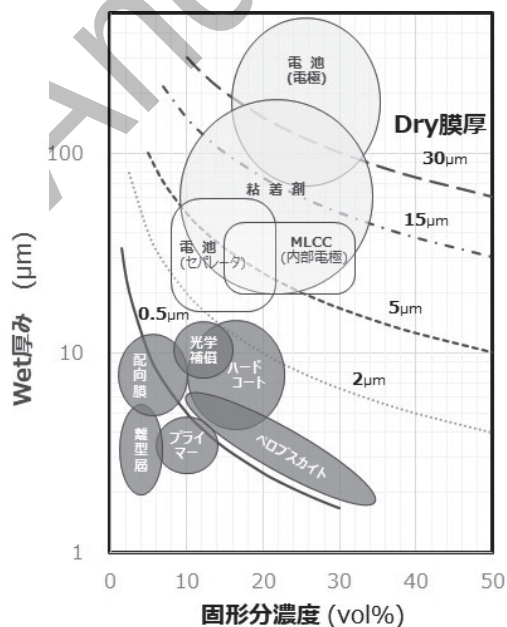


図1-5 固形分濃度とWet厚み

1-3 量産におけるRoll To Roll工程

大量に製品を量産する際は、帯状フィルムを連続的に巻き出して塗工～乾燥～硬化の後に、完成した塗膜付きフィルムを巻取るRoll to Roll工程で生産される（図1-6）。機能性フィルムに携わる研究者や技術者は図1-7に示すような局面で対象となる塗膜の塗工・乾燥現象に対峙する事になる。

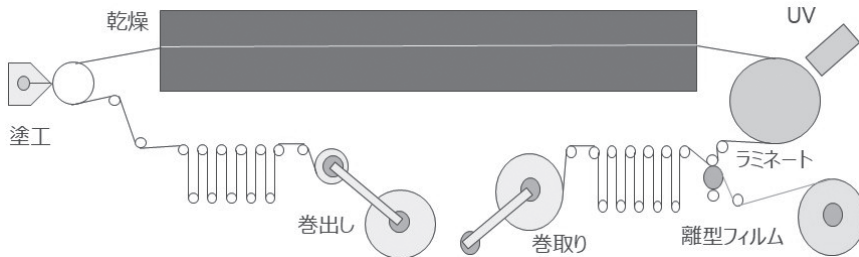


図1-6 一般的なRoll To Roll工程

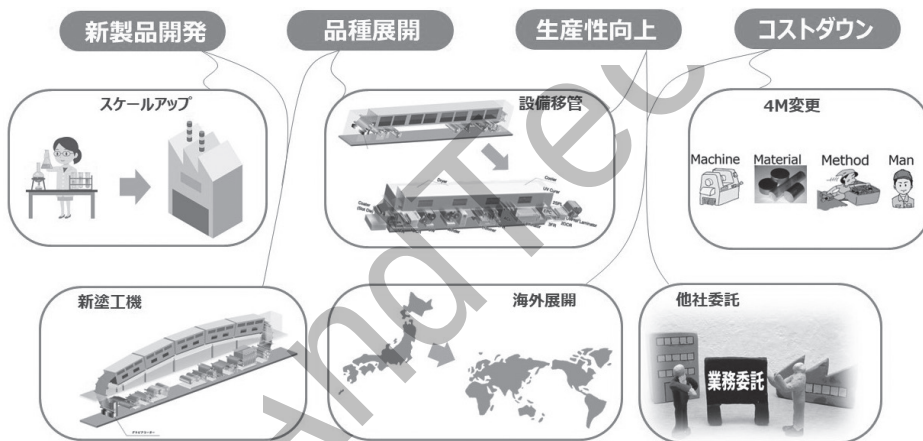


図1-7 フィルム事業に携わる技術者・研究者のタスク

1-4 実験室で活用されるバッチ方式

素材の開発段階では名刺サイズやA4サイズで塗工したサンプルで評価される¹⁾。実験室ではスピン塗工やバー塗工で簡易に成膜する（図1-8）。例えばペロブスカイト太陽電池では数千回転でスピン塗工するが（図1-9）、小さい扇風機でもあり数m/sの風を巻き込んで若干の乾燥も伴っている²⁾。乾燥を語るにあたり、風速の感覚を身に着けると現象をイメージしやすくなる。概ね「鼻息（0.3～0.5m/s）」、「そよ風（1～3m/s）」のイメージで、それ以上の風は気象庁の「風の強さに関する用語」によれば³⁾、「やや強い風（10～15m/s）；風に向かって歩きにくい」、「強い風（15～20m/s）；風に向かって歩けない」、「非常に強い風（20～30m/s）；立ってられない」、「猛烈な風（30m/s～）；走ってるトラックが倒れる」、となる（；以降は筆者注）。

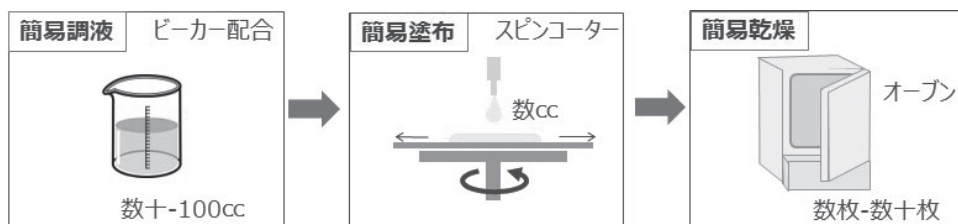


図1-8 実験室のサンプル作成

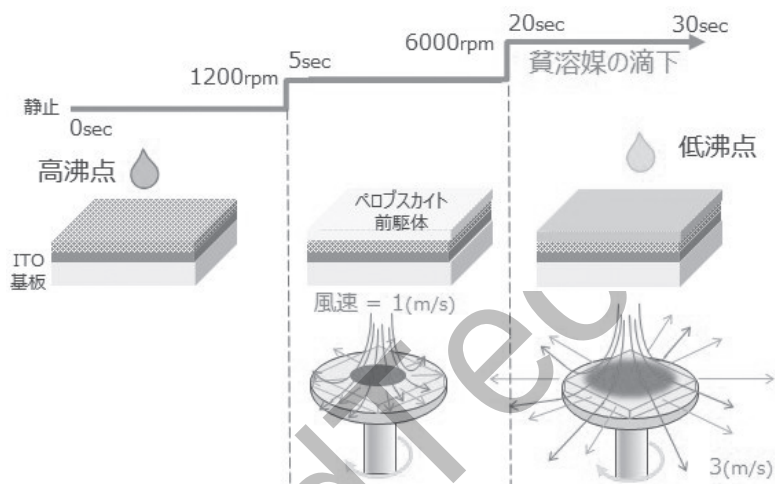


図1-9 ペロブスカイト太陽電池の実験サンプル

例えば、スピン塗工の8000rpmでは約5m/sに及び、多少の乾燥に寄与し得る程度の風である。この風を25℃でガス濃度3%LELで与えた場合、20秒で数 g/m^2 の溶媒が乾く見積もりで、膜質を考慮する際に無視できない量が乾いている事になる（図1-10）。

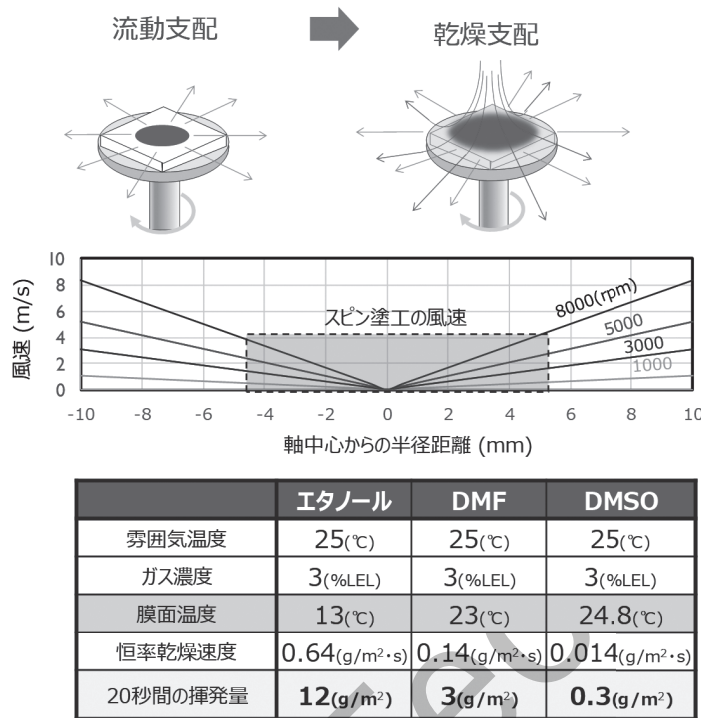


図1-10 スピンドウ時の乾燥(試算)

1-5 生活で経験する乾燥

乾燥を真正面から学ぼうと参考書を開くと、微分方程式と行列式の羅列に閉口するが、日々の生活で経験する乾燥は実にシンプルである(図1-11)。「真夏に洗濯物を外干すると数時間で乾くが、部屋干しすると湿っぽい」、「自分の髪を乾かす時間は大体わかる」、「風呂上がりにお湯を直ぐ拭かないと湯冷めする」等、誰しも感覚であろう。さらに設備面でも「洗濯物が多いほど、乾くまで時間がかかる」、「食洗器のヒーターを使わなくても時間をかければ自然に乾く」という事は概ねイメージできよう。液起因の現象では、「アルコール消毒は直ぐ乾きヒヤッとする」、「料理油も加熱すれば揮発して換気扇にこびりつく」、二日目に美味しいカレーも「沸騰しないように弱火で煮込み、水分が蒸発してルーが濃くなりトロトロのカレーになるから」であり乾燥現象である(図1-12)。

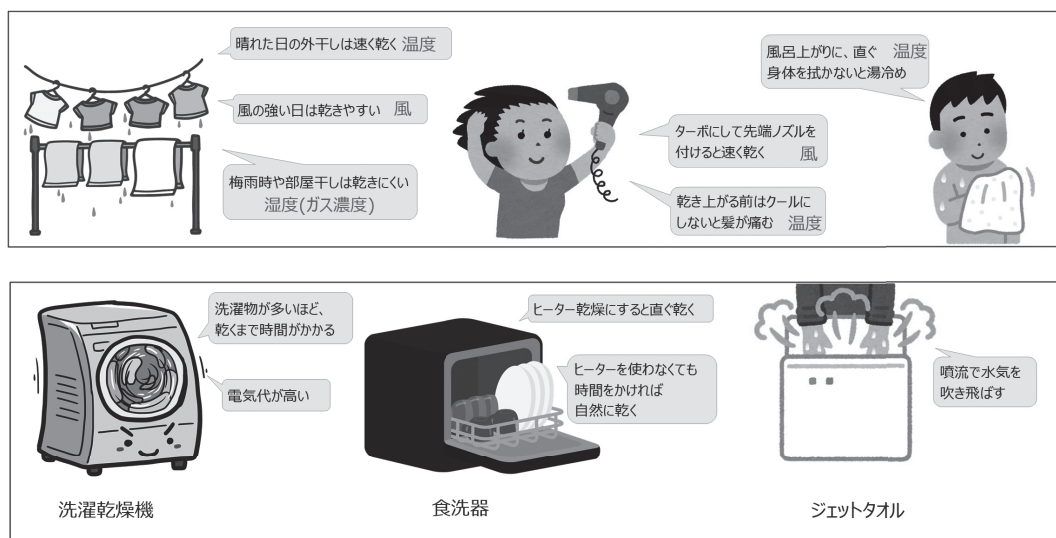


図1-11 日々の生活で経験する乾燥

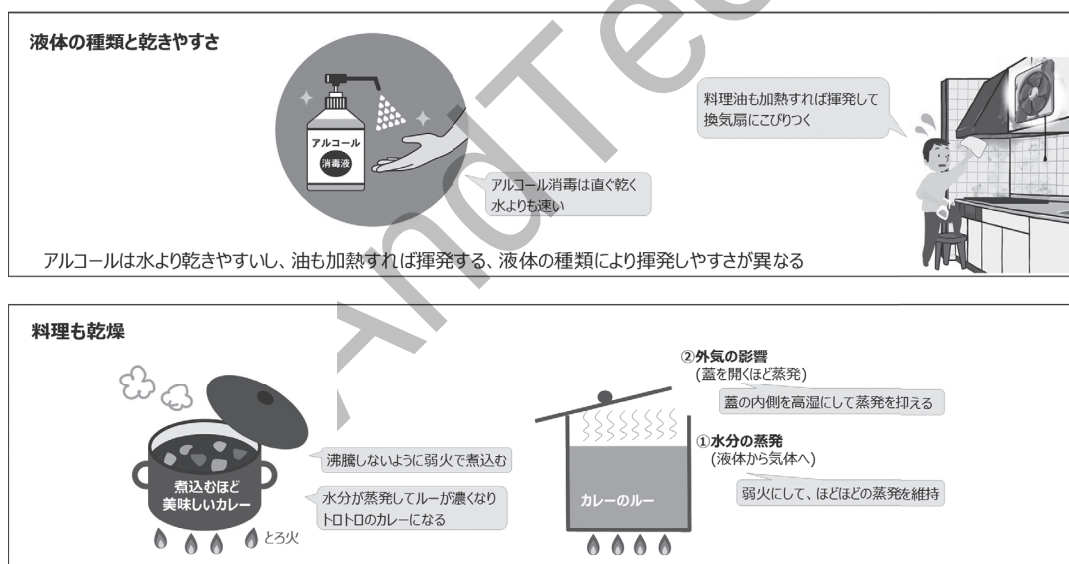


図1-12 生活の中の乾燥機器

Roll to Roll 工程とは一見かけ離れているが、乾燥現象として共通するので、身近な現象と結び付けて考えると理解しやすいであろう。

参考文献

- 1) 浜本伸夫、「理論と現場の融合でRTRプロセスの改善を目指す (9) 手塗工～浸漬塗工」、コンバーテック2022.12、p34-37(2022)
- 2) 宮坂力、「ペロブスカイト太陽電池(日本化学会編)」、共立出版(2024.1.25)
- 3) 気象庁ウェブサイト、「風の強さに関する用語」
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yougo_hp/kaze.html (2025/10/11確認)