

総論

# 最近の事例から見た 熱工学設計の勘どころ

有明工業高等専門学校 堀田 源治\*

※ほった げんじ：教授 技術士(技術部門) 九州工業大学 客員教授

## 熱工学の重要性と熱設計に 対する企業ニーズ

人類が火を手に入れたことから文明社会が始まって以来、熱はモノづくりや生活の基盤となるエネルギー源として社会のインフラとなっている。機械の設計を行う上において部品や装置の熱現象ばかりではなく、熱処理や溶接などの加工においても熱現象の原理を理解しておく必要がある。しかし、熱加工装置や熱流体機械を専門とする技術者以外にとって熱に関連した設計に苦手意識を持つ技術者は少なくないようである。それにもかかわらず熱検討を余儀なくされる機会は頻繁にあるのも現実であろう。操業の現場においては、過負

荷や劣化などによる熱的な異常現象が保全の課題となっていることは常である。熱工学の専門家が常に在籍しているとは限らない以上、熱の影響についての設計的な検討の必要性は益々高まっている。操業現場ではまた、協働ロボットの普及などMAN-MACHINEシステムにおいては安全な作業環境づくりの上からも防熱・火傷防止設備は現場支援のための設計上の配慮となる。また、機械設備の3K(高速・高精度・高信頼性)の要求は高まる一方であり、熱的影響を排除するための冷却や負圧などの所謂マイナス技術の必要性についても重要性が増している。IoTやAIなどの技術の進展により、熱の影響による知能機械設備の性能安定が特に重要視され熱工学的センスは多くの設計者にとって必須の知識領域となりつつある。筆者が教

鞭をとっている高専の物質工学科の機械工学概論の熱力学部分のアンケート結果を図1に示す。

熱工学の重要性を認識しながらも苦手意識が現れていることがわかる。しかし、熱工学に対する企業のニーズには高いものがある。日本機械学会の熱工学部門の第二回湘南ワー

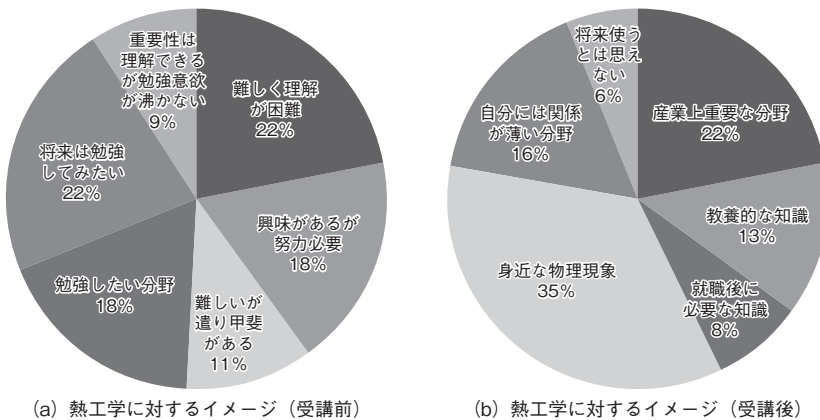


図1 熱工学に関する学生のアンケート結果

クショップにおいて黒坂<sup>1)</sup>が「企業が求める熱工学の基礎知識と能力」として製造業の中で熱工学の重要性が求められるのは次の2点であることを指摘している。(1)生産性向上：温度履歴は製品や材料の品質を決める重要な要素である。通常は製造法が経験的に決められていることが多いが生産性向上などのために、未経験の部分へ外挿する場合の失敗防止には熱工学の基礎的理解が必要である。(2)省エネルギー：製造における省エネルギーは重要な課題であるが、製造現場では生産が優先することや熱工学の専門家が省エネルギーを監視しているわけではないので、企業側にエネルギーの基本を理解している人が必要である。

そこで今回の特集においては「熱工学の再入門」という視点において伝熱の基礎的な事項や熱工学の応用で押さえておきたいポイント、そして現在の熱工学の応用・研究の最前線などの事例に触れることで熱設計においても設計力の向上を図ることを企画した。まず、上述の省エネルギー対策としての熱設計事例として、筆者の経験した加熱方式を遠赤外線式からマイクロ波式に変えることで大きな省エネルギー効果を上げた事例を紹介する<sup>2)</sup>。

## 事例：全面加熱からピンポイント加熱への変更により、75%の省エネルギーと不良率0を実現したスクリーン印刷システムの開発

### 1. はじめに

若者を中心に任意のある絵柄入りTシャツなどのデザイン衣料品はスクリーン印刷により捺印される。一時的に海外にシフトした印刷作業もデザイン～製品のクイックレスポンス化により再び国内で行われるようになった。わが国のスクリーン

印刷業界の主な担い手は中小、零細企業である。印刷は工程の多くに人手を必要とし、悪環境室内での繁忙な作業となっている。このため、高齢化も加わり、人材獲得が困難な状況である。一方ではカジュアル化の浸透と消費者のニーズの多様化により、デザイン衣料の需要は堅調なものとなっている。そこで印刷業界では、今後、機械化の推進と労働環境整備により合理化と生産性向上を図る必要があった。スクリーン印刷は米国製や国産の機械により作業の一部が自動化されてはいるが、作業能率やコストの点で問題を残していた。労働生産性の低さの原因を熱工学的な原因に求め、エネルギー改善を通してこの問題に対処するために、従来の赤外線乾燥をマイクロ波乾燥に変えることで問題を解決した事例について紹介する。なお、本事例は1992～1995年に福岡県北九州市の協同組合リエゾン北九州（中小企業庁知識融合開発補助事業）において実施されたものである。

### 2. スクリーン印刷の実情と問題点

#### (1)従来のスクリーン印刷技術

Tシャツへの多色スクリーン印刷の工程は図2の通りである。

従来技術は図2の③～④工程を自動化の対象としていた。従来装置は図3のごとく印刷機、乾燥機、アフタークーラ、移動式プリントテーブルから構成され、色数ぶんだけ平面配置された印刷機と乾燥機の中を、印刷プレートに固定されたTシャツの布地が通過して印刷を重ねるものである。装置での多色刷りと乾燥を終了した完成品（プリント布地）は人手により別置きの定着乾燥装置に投入されている。

#### (2)従来の印刷技術の問題点

従来からの印刷—乾燥装置には次のような問題点が指摘されていた。

①乾燥機での過熱により製品の変色、収縮、焼

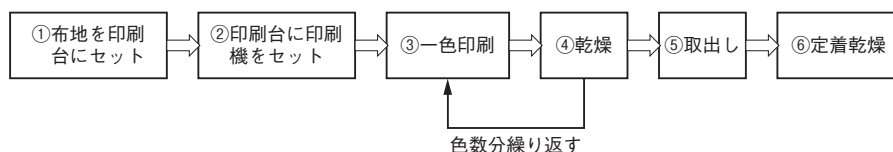


図2 多色刷りスクリーン印刷工程

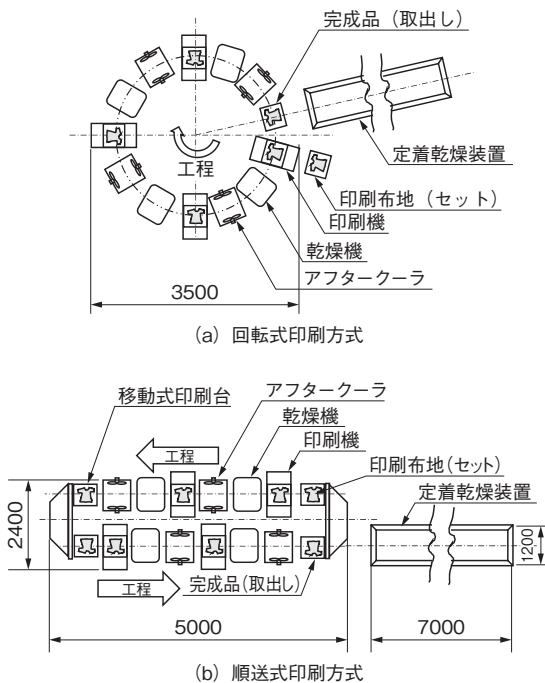


図3 従来のスクリーン印刷装置(4色刷り)

焦げが発生する

- ②印刷機上において、乾燥機からの輻射熱で固化したインキによりスクリーン版の損傷や印刷柄に傷が発生する
- ③消費電力が多く、電力料金が高む
- ④乾燥品質上冷房の使用ができないため、高温作業環境や悪臭の存在となり、作業環境が良くないものとなっている
- ⑤設備設置面積が大きく、作業室の建設コストや敷地の管理費用が大きい

要するに、スクリーン印刷のインキの乾燥のために熱は必要ではあるが僅かなインキ量に伝導する熱量と比べて布地や室内に拡散する熱量が多く、エネルギーの利用効率が非常に悪いことが最大の問題点であった。

### 3. 新構想の自動スクリーン印刷システムの開発

#### (1) 開発の目的

スクリーン印刷業者には中小企業が多い事実を考慮して、既存の構造や原理にとらわれず経済的かつ労働安全衛生上良好な自動スクリーン印刷システムを制作することで上述の問題点の解決を図

ることとした。

#### (2) 本開発装置の基本仕様

目的達成のため、今回開発する自動スクリーン印刷システムには次の仕様が要求された。

- ①工程内で品質の保証ができ、不良率が低いこと
- ②省エネルギー、省力化を追求した低コスト設備であること
- ③省スペース設備で必要床面積が少ないこと
- ④安全性が高く、作業環境に悪影響を及ぼさないこと
- ⑤印刷能力：印刷色4色(標準仕様)
- ⑥印刷タクトタイム：10秒/枚(水生ラバーインキ)

上記の仕様を満足するためには開発が必要な要素技術としては次の3点であった。

- ①乾燥対象の水分のみを選択昇温できる(インキ中の水分以外に熱を極力使わない)
- ②印刷機と乾燥機の一体化の実現
- ③作業能率改善と省スペースを実現する機器構成と配置

#### 4. 技術開発による問題点への対処

##### (1) インキ中の水分のみを選択昇温できる乾燥技術

従来技術の問題点の主原因は乾燥を赤外線加熱による輻射熱に頼っていたことであった。本来インキ中の水分のみを乾燥させれば良いのであるが、布地全体を加熱せざるを得ず、輻射エネルギーは布地にも吸収されて昇温し、その熱は周囲空気に空しく伝達していた。このようなエネルギーの無駄使いに対してインキ中の水分をピンポイントで昇温できる乾燥技術を開発する必要がある。水生ラバーインキの場合、インキの被膜硬化には溶剤(水)の蒸発熱と被膜形成樹脂の架橋熱が必要である。高効率乾燥のためには供給エネルギーの大半が被膜硬化熱としてインキに吸収される必要がある。そこで種々の乾燥方法の検討の後、ハロゲンランプとマイクロ波が表1に示す特徴を持つことに注目して両者を使用した乾燥実験を行い、従来の遠赤外線加熱と比較した。この結果は表2のようになり、省エネルギーと経済性の見地からマ

表1 ハロゲンランプとマイクロ波の特徴

	ハロゲンランプ	マイクロ波
波長	0.8~2 μm	1 mm~1000 mm
発熱原理	分子の共振による発熱	水分子の振動と回転による発熱
加熱特性	熱伝導加熱	内部選択加熱
熱効率	85%	80%
被加熱対象物	誘電体・金属	誘電体

表2 加熱方法による乾燥実験結果

加熱原	セラミックスヒータ	ハロゲンランプ	マイクロ波発信器
電磁波種別	遠赤外線	近赤外線	マイクロ波
立上り時間	15分	3分	瞬時
乾燥時間	50秒	40秒	30秒
電力料金/枚	2.3円	2.3円	0.17円
布地の昇温	あり	あり	なし

マイクロ波乾燥が問題点を解決する方法として適すると判断した。特に遠・近赤外線では立ち上がりの時間がかかるために作業中は通電を継続する必要がある。これに対しマイクロ波加熱では加熱時のみの通電で良く、大きな省エネルギー効果が期待できた。次に乾燥機設計のために以下のような項目について検討を行った。①乾燥加熱方式、②プリントテーブル(印刷台)材料の選定、③適切なマイクロ波出力の決定、④マイクロ波漏洩対策。以下順を追って説明する。

(a) 乾燥加熱方式

省エネルギーと省スペースのために図4のようにアプリケーション内に布地が4段に積層し、マイクロ波の透過性を活かして積層布地の上方からマイクロ波を照射する多重同時乾燥方式を考案した。

(b) 印刷台の材料の選定

スクリーン印刷においては、印刷台にセットされた布地の上にスクリーン版をかぶせ、スクリーン版の上にインキを塗布した後、その上に印刷機のスキージ(へら)を走らせてインキを布地に押し付けて柄を印刷する仕組みである。スクリーン版は長方形の布地の一部を印刷柄形状に切り抜き、

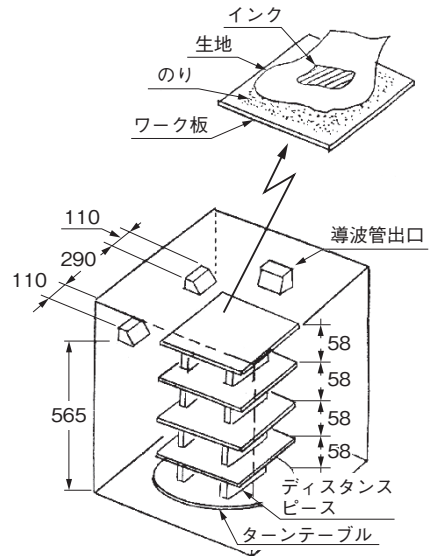


図4 4色同時乾燥式アプリケーション(乾燥室)

その部分のみをメッシュ状にしてインキが透過できるようにしてある。印刷台は布地を平面に保持する板条のテーブルであり、印刷部全面に印刷機のスキージ圧を受ける。そこで機能上、変形、劣化、損傷などがあれば印刷精度に重大な影響を及ぼす。

本事例においては、マイクロ波照射環境での使用となり、先例が無いために適正材料の選定のための実験を行った。材質には、①マイクロ波を透過できること、②マイクロ波を照射されても発熱しないこと。という特性が必要であった。そこで材料分子の極性を考慮した数種類の材料について実際にマイクロ波を照射して加熱実験を行い、変形の具合について調べた。結果は表3のようになり、結果としてポリプロピレン樹脂を選定した。

(c) 適正マイクロ波出力の決定

印刷機の仕様上の印刷能力を確保するには乾燥機で10秒以内にインキ含水率を50%にして次色の印刷を可能にする必要があった、そこでまず、試験用マイクロ波アプリケーションを使用して乾燥特性を調べる実験を行った。そして得られた図5の結果からインキ中の水分重量を求め、次式によって乾燥に必要なマイクロ波出力P [kW] を試算した。