

氏 名 長 田 昭 平

授 与 学 位 博 士 ( 工 学 )

学 位 授 与 年 月 日 平 成 9 年 3 月 14 日

学 位 授 与 の 根 拠 法 規 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項

最 終 学 歴 昭 和 36 年 3 月

東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻修士課程修了

学 位 論 文 題 目 遠赤外線を用いた塗装乾燥法に関する研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 米山 務 東北大学教授 宮城 光信

東北大学教授 澤谷 邦男

## 論 文 内 容 要 旨

電子部品や電気機器等に用いられる塗料は、使用目的や取り扱い方法等により多種多様のものがある。この塗料の基本性能は、一般に物体を保護し、材質感を高めて美観を付与することにあるが、電気工学分野においては、これ以外に電気絶縁塗料、導電性塗料、磁性塗料、光ファイバ塗料等の特殊機能塗料があり、それらは電気的特性や磁気的特性の改善等に重要な作用を持っており、また回路素子や部品あるいは電気機器の製造工程における塗膜の不乾燥は、電気的障害を発生するだけでなく多くの弊害をもたらす。従って塗膜の硬化乾燥は重要な問題となる。これは電気分野だけでなく、他の分野あるいは生産技術に適用できる重要な要素及び意義を有している。

本研究は遠赤外線を用いた塗装乾燥技術の確立及びその応用の研究成果をまとめたものである。

まず遠赤外線の熱効果と塗装乾燥法との関連性は次のとおりである。塗装における塗膜は、硬化乾燥して物体の表面処理という重要な役割を果たし、物理的性能及び化学的性能として、電気絶縁性、導電性、静電気防止特性、熱反射性、放射線防止特性、耐薬品性、耐候性等の特徴がある。この塗膜の硬化乾燥には、乾燥方法から自然乾燥または常温乾燥及び強制乾燥があり、強制乾燥には、乾燥方式から熱風乾燥、遠赤外線乾燥、赤外線乾燥等がある。塗装乾燥にどの乾燥方式を採用するかは、通常は使用する塗料の種類、使用目的、または塗装工程等に関連させて適切に選択される。

このように塗装は、塗料の乾燥に関連する多くの要因が複雑に作用し、塗料、被塗物、塗装乾燥手段、塗装技術、作業環境、地球環境、塗装管理並びに保守、塗装に伴う経済性等の多くの問題を包含している。現行の熱風乾燥における熱源はガスや油等の燃焼熱である。この乾燥方式は、燃焼熱で熱媒体の空気を加熱した後に、その温められた空気から伝導熱で物体を加熱する間接加熱であり、対流熱により塗膜の表面から乾燥するため塗膜表皮の硬化乾燥が先行される。続いて硬化乾燥した塗膜表皮からの伝導熱によって、塗膜表皮直下の塗膜層の乾燥が進行するので、素地に近い深層の塗膜層の硬化乾燥は遅延する。従って塗膜全般の乾燥時間は長くなり、場合によって塗膜内部層の不乾燥を生じやすい。しかし、この燃焼熱風炉は、空気の伝導熱が被塗物全体に行きわたるため、立体的な被塗物の塗膜の硬化乾燥が安定に、かつ良質な塗膜形成が進行するので、現行では木材家具塗装乾燥の主流である。

遠赤外放射による放射加熱は、空間に電磁波として放出される熱の伝達方式であり、その放射エネルギーは熱媒体を必要としない直接加熱である。一般に高効率の加熱効果が得られ加熱処理時間も短縮される。この放射加熱は物質を構成する原子、あるいは分子の熱運動によって発生し、その波長帯域は $0.78\mu\text{m}$ から $1000\mu\text{m}$ であり、エネルギーの大きさは $0.01\text{eV}\sim 1\text{eV}$ である。このように赤外放射または遠赤外放射の場合、電磁波としてのエネルギーレベルは低く、化学作用も伴わないレベルである。この放射加熱は加熱効果が色相に無関係であり、また処理物に変質を与えない放射

加熱は、人体あるいは生体への負担や刺激感は少なく、かつ、この放射加熱による温度効果は温和であるため、生体に対する理学療法効果は大きい等の特徴がある。なお電気エネルギーを用いる赤外または遠赤外放射源は、燃焼熱による排気ガス、すす等がないため、公害性のない衛生的な清浄加熱であり、また火災に対する安全性が高い特徴がある。

遠赤外線は物体に照射されると、特定の波長あるいは波長帯域において放射エネルギーの吸収特性すなわち赤外活性を示し、その物体を加熱する作用がある。この遠赤外線が赤外活性の塗膜面に照射される場合、塗膜の深層から表層に向かって硬化乾燥が短時間で進行される。しかし遠赤外線の直進性から、それが照射される被塗物の塗膜の硬化乾燥に限定されるので、電磁波の直進性や反射特性を応用して、遠赤外線を炉内で乱反射させ、被塗物の全方向から照射する仕組みとし、さらに温度センサを用いて遠赤外線源から放出される熱を炉内で電氣的に定温度に制御する。このようにすれば立体の被塗物の塗膜硬化乾燥が可能になると考え、その遠赤外線乾燥炉の研究開発を行った。

遠赤外線を用いた水性塗装乾燥では、赤外線または遠赤外線乾燥炉の設計製作、その温度特性の実測、水性塗装乾燥の実験等について取り扱っている。新規に設計製作した赤外線乾燥炉を使用した水性塗料を用いた塗装乾燥実験結果では、ある程度の塗膜の硬化乾燥は進行するが、赤外線加熱乾燥だけでは塗膜の硬化乾燥は得られない。有機溶剤型塗料を使用する予備実験または木工部品による赤外線加熱乾燥実験結果でも塗膜は不乾燥である。しかし、この強制乾燥後、自然冷却または強制冷却により、塗膜の硬化乾燥が得られることを本研究で確認した。次に遠赤外線乾燥炉を用いた水性塗料による木材塗装乾燥実験結果は、塗膜の効果乾燥が乾燥炉の温度を60℃、加熱源から被塗物までの距離を0.5mとした場合、周囲条件に無関係に塗料の性質を損なわないで3分～5分の乾燥時間で仕上がり状態の良好な塗膜が得られる。従って塗膜の乾燥時間は、自然乾燥または熱風乾燥による強制加熱乾燥に比べて数分の1ないし数10分の1である。

遠赤外線を用いた木工家具の乾燥法では、木工家具塗装乾燥炉の設計製作、予備実験、塗装乾燥実験等に関して取り扱っている。木工家具塗装乾燥用の遠赤外線乾燥炉は、簡易型遠赤外線乾燥炉を発展させて得ている。簡易型遠赤外線乾燥炉は小型の箱型であるが、木工家具用乾燥炉はトンネル状とし、コンベヤ式で連続乾燥ができる仕組みである。乾燥炉は遠赤外線を炉内で乱反射させ、かつ遠赤外線発生源からの熱を温度制御する。ここに炉長を第1工程～第3工程のように3区分し、区分順序に従って低温、中温、高温となるように温度勾配をつけた強制加熱乾燥の3工程としている。次の第4工程は強制冷却工程としている。この冷却工程は、冷却用ファン数を順次増やして送風量を段階的に多くし、急激な強風冷却による塗膜にひずみのないように冷却効果を順次強くする冷却勾配をつけている。このように強制加熱乾燥の3工程と強制冷却工程との4工程で塗装乾燥工程の1サイクルを完了する。遠赤外線を用いた木工家具用塗装乾燥炉を使用する塗膜の硬化乾燥実験は、ウレタン樹脂塗料の場合は1サイクルで、ポリエステル樹脂塗料の場合は3サイクルで、それぞれ硬化乾燥ないし完全乾燥が得られる。いずれも強制乾燥直後から1時間程度の自然放置後、塗膜の硬化乾燥過程のすべてを完了できる。なお現行の赤外線乾燥炉では、ウレタン樹脂塗料の1サイクルの強制乾燥後、3時間ないし15時間程度の冷却時間、ポリエステル樹脂塗料の場合は3サイクルの強制乾燥後、15時間ないし数日から1週間程度の冷却期間を必要としている。

遠赤外線を用いた金属面の乾燥法では、金属面塗装乾燥用の可搬型遠赤外線乾燥炉の設計製作、各種塗装実験結果等に関して取り扱っている。金属面塗装用に設計製作した遠赤外線乾燥炉を使用する塗膜の硬化乾燥実験結果は、有機溶剤型塗料あるいは水性塗料に無関係に硬化乾燥または完全乾燥の塗膜が短時間で得られた。金属面塗装乾燥は、被塗物本体の予備加熱後に塗膜の硬化乾燥が行われるとされているが、本実験結果では、稼働状態の乾燥炉に塗装ブースで塗料を付着させ、セッティングの完了した被塗物を装荷して塗膜の硬化乾燥が直ちに得られる。遠赤外線の特長波長での放射エネルギーの吸収特性は、その局部加熱効果や塗膜の内部から加熱効果が作用して硬化乾燥が進行すること等から被塗物の予備加熱なしで塗膜の硬化乾燥が行われるものと考えられる。その検証実験は、炉内の温度が40℃～50℃程度の焼付け塗装乾燥の場合、塗膜の硬化乾燥は15分～20分の短時間で得られる。特に金属面塗装用の水性塗料は、乾燥炉内温度を60℃とした場合、塗膜の硬化乾燥は短時間の3分程度で得られ、かつ塗膜の硬化乾燥状態も良好である。

遠赤外線を用いたカシュー塗装乾燥法では、専用の乾燥炉の研究開発及びそれを使用したカシュー塗装乾燥の実験結果に関して取り扱っている。漆やカシュー塗料の塗膜の硬化乾燥には、空気流のない定温度で定湿度制御室を必要とする。現行では経験と勘による「漆風呂」と称される特殊な乾燥炉を使用して、空気中の酸素との酸化重合に基づく漆の硬化乾燥を得ている。そこで本研究では、まず遠赤外線を用いて空気流のない定温度、定湿度制御室の研究開発を行っ

ている。乾燥炉の低温度制御は、2章～4章で取り扱った方法においてファンを作動させない場合である。炉内を定湿度に保持するには、炉底面に水槽を設置し、その上側に複数枚に分割された短冊状アルミ製シャッタを具備させて、湿度センサからの電気信号で設定湿度に対応してアルミ製シャッタをパルスモータで駆動して開閉する。ここに遠赤外線の水蒸気発生は水蒸気を発生、拡散させ、また遠赤外線が水面照射しない場合は水蒸気の発生を抑制させて炉内を定湿度に制御している。これから空気流のない定温度で定湿度に制御される遠赤外線乾燥炉を得ている。この新規に研究開発した遠赤外線を用いた空気流のない定温度、定湿度制御室は他に例を見ない。この乾燥炉をカシュー塗料の塗膜の硬化乾燥用に使用した結果、下地塗装では約1時間で塗膜の硬化乾燥が得られた。現行のそれは24時間以上であり、処理時間は24分の1に短縮される。また溶剤の希釈の割合を少なくした中塗工程や上塗工程でも、それぞれ1日で塗膜の硬化乾燥が得られ、塗膜の硬化乾燥時間は従来に比べて2分の1以下である。

本研究で取り扱っている遠赤外線乾燥炉は、全体に共通して炉内温度を制御していることから、消費電力は現行の温度制御をしてない赤外線または遠赤外線乾燥炉に比べて少ない。炉内を定温度に制御すると、塗膜の硬化乾燥が一様に進行し、高品質の塗膜が得られ、短時間で稼働状態となる等の特徴がある。

本研究は遠赤外線の特性や特徴を応用して、物体の表面処理としての塗装乾燥技術の確立、塗装乾燥一般に関する実験研究である。遠赤外線を用いた箱型乾燥炉、コンベヤ式大型乾燥炉、漆乾燥炉に関して新規に研究開発及び設計製作し、これらを用いて塗料別、被塗物の種類別による塗装乾燥技術を確立した。特に遠赤外線は水性塗料の塗料の硬化乾燥に短時間で有効に作用することも確認した。

## 審査結果の要旨

塗装には物体の表面を保護し、美観を付与するという一般的用途の他に、絶縁塗装、導電塗装、磁性塗装などに見られるような特殊用途もあり、電気工学の分野においても重要である。塗装の利用が多岐になるにつれ、良質な塗膜が求められ、高度な塗装乾燥処理技術の確立が不可欠となってきた。このことを念頭に、著者は含水物に対し顕著な加熱作用を示す波長 $3\ \mu\text{m}$ ～ $30\ \mu\text{m}$ の遠赤外線を塗装乾燥に応用することを考えて研究に着手し、効率のよい乾燥炉を試作すると共に、各種の制御装置を導入するなどして、炉内雰囲気的最適化、塗装の膜質向上、乾燥時間の短縮、省電力化などに努め、新しい塗装乾燥技術の開発に成功した。本論文はその成果をまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、水が遠赤外線エネルギーをよく吸収することに着目し、この現象を水性塗装乾燥に応用することについて述べている。従来、平面状被塗物に限られていた遠赤外線乾燥法を立体状被塗物にも適用できるように、乾燥炉内に遠赤外線の乱反射機構を設け、更に温度制御機構と空気還流用ファンを巧みに併用して炉内温度分布を一様にし、塗装1工程当たり3分程度と従来の方法に比べて約 $1/10$ という極めて短時間に、良質な塗膜が完成することを示しているが、これは実用上有用な成果である。

第3章は有機溶媒塗料を使用した木工家具塗装の遠赤外線硬化乾燥法について述べており、乾燥炉は第2章で開発したものを基に遮熱効果、防塵効果などを配慮して更に改良している。実験条件を種々設定し、乾燥に要する時間を測定しており、ウレタン樹脂塗料で16分、また塗膜の硬化乾燥が困難なポリエステル樹脂塗料でも48分という短時間で良質な塗膜が得られたが、これは波長 $3\ \mu\text{m}$ 以下の赤外線を用いた乾燥方式に比べて $1/12$ 以下という短時間である。

第4章では、金属面の焼き付け塗装について述べている。屋外に設置される電気設備などの保護用金属函の再塗装を念頭に簡易な可搬型遠赤外線乾燥炉を開発し、これを基に多様な条件下で実験を行い、従来の自然乾燥法では数時間から数日を要した乾燥時間が、水性塗料ではわずか3分、ポリウレタン樹脂塗料でも20分と大幅に短縮できること、また消費電力についても定常稼働時には始動時の20%の電力で十分であることを見出している。これは優れた成果である。

第5章ではカシュー塗装の乾燥法について述べている。カシュー塗装の場合、炉内の雰囲気として、一定温度に加えて一定湿度も必要であり、空気流も微妙に制御しなければならない。このような乾燥炉を炉底に水槽を設けて実現し、最適乾燥条件を検討している。その結果、例えば、炉内温度を $30^{\circ}\text{C}$ および $35^{\circ}\text{C}$ に設定した場合、最適湿度はそれぞれ70%および50%であることを見出し、この湿度を変えると十分な塗膜の硬化乾燥が得られない場合もあり、そのため適切な湿度制御が必要であることを指摘している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、塗装の乾燥処理に遠赤外線が有効であることに着目し、各種の塗料に適した遠赤外線塗装乾燥炉をそれぞれ設計、開発し、最適な炉内雰囲気を見出すと共に、塗装の膜質はもとより、乾燥時間の短縮や省電力化についても検討を加えたもので、電気工学並びに赤外線応用工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。