

修士論文概要書

Master's Thesis Summary

Date of submission: 01/08/2024

専攻名(専門分野) Department	経営デザイン専攻	氏 名 Name	林 修平 Hayashi Shuhei	指 導 教 員 Advisor	棟近雅彦 印 Seal
研究指導名 Research guidance	品質マネジメント 研究	学籍番号 Student ID number	5222F011-7		
研究題目 Title	ユニットハウスにおける塗装の最適条件に関する研究 A Study of the Optimal Conditions for Painting in Unit Houses				

1. 研究背景と研究目的

ユニットハウスは、工場内でつくる工業化建築物の一種であり、現地で組み立てを行うプレハブよりも工期が短く、人件費がかからないというメリットがある。また、耐震性やリユース性が高いことから、近年、ユニットハウスの需要は増加傾向にあり、さらなる需要の増加と用途の拡大が見込まれる。したがって、ユニットハウスの外観も重視されてきており、従来よりも高い外観品質が要求されている。

ユニットハウスの製造において、製品にスケやダレなどの不具合が発生しており、問題となっている。一般に、これらの問題は、膜厚のばらつきと関係していると考えられ、膜厚値が基準値よりも低いと製品にスケが、高いとダレが発生する。また、同一の被塗装物内における、色差や膜厚値の差が大きいと色むらが発生する。

塗装品質を安定させるには、膜厚と色差が均一になるような、塗装条件を見つける必要がある。塗装は、機械塗装と作業者が行う手吹き塗装があり、最適な塗装条件が不明である。そのため、製品の膜厚値や外観を確認し、塗装の調整を行うが、ロスが生じる場合もある。

本研究では、膜厚および色差を均一にする塗装条件を導出し、外観品質における不具合を低減することを目的とする。なお、ユニットハウスを製造、販売している S 社を事例とする。

2. 従来研究と研究方法

2.1. 従来研究

膜厚に関する塗装条件の研究として、奥野ら[1]の研究がある。奥野らは、現場の熟練者によって経験的に定められていた自動車ボディの塗装条件について、塗装膜厚を予測するモデル式を求めた。また、色差に関する塗装条件の研究として浅野ら[2]の研究がある。浅野らは、塗装の色相管理を最終的な目標として位置づけ、色差が一定になるような塗装条件の導出を行った。

これらの研究は、膜厚や色差という 1 つの特性値を対象としており、両者の関係については調査されていない。また、膜厚と色差を両立した塗装条件の導出方法は不明である。

2.2. 研究方法

本研究では、まず S 社における現状把握を行う。具体的には、塗装工程の調査と過去の検査で得られたデータ

の分析を行う。つぎに、色差の基準色を設定したうえで、膜厚と色差の関係を明らかにする、そして、膜厚の上限値を設定する。

その後、膜厚に影響を与える因子とその交互作用を調査する。そして、膜厚と色差を両立した塗装の最適条件の導出を行う。さいごに、これまでに実施した一連の分析手法を整理し、塗装の最適条件の導出方法を提案する。

3. 膜厚と色差を両立した塗装の最適条件の導出

3.1. 現状把握

まず、S 社の工場を調査し、膜厚と色差に影響を与えると推測される要因を検討した。そして、塗装条件ごとにそれらの要因を整理した。塗装条件とは、吹付条件、環境条件、塗料条件に分類される。調査の結果、ガン距離やガンスピードなどの 4 つの吹付条件と、塗装色や粘度などの 4 つの塗料条件、気温と湿度の 2 つの環境条件があげられた。なお、4 種類ある塗装色のうち、使用率の高いブルーとオフホワイトを本研究の対象とする。

つぎに、S 社が製造しているユニットハウスを構成する主要な部材の塗装および乾燥方法について調査した。その結果を表 1 に示す。

表 1. 各部材の塗装工程の詳細

部材	塗装方法	乾燥方法
妻フレーム	手吹き塗装	強制乾燥
屋根/床	手吹き塗装	自然乾燥
妻端パネル/軒樋	機械塗装	自然乾燥

表 1 に示すように、塗装方法は、手吹き塗装と機械塗装の 2 種類がある。また、乾燥方法は、乾燥炉に入れて乾燥させる強制乾燥と自然乾燥がある。

ここで、過去の検査で得られたデータを分析し、品質特性値の傾向を把握した。はじめに、膜厚についての分析結果について述べる。なお、S 社では下限値が定められており、塗装色ブルーにおいては 25 μ m である。

ヒストグラムを用いて分析した結果、各塗装色について、下限規格値を下回る製品が発生していることがわかった。また、一部の部材では、平均膜厚値が 43 μ m であるのに対し、60 μ m を超えていた。

次に、色差についての分析結果について述べる。ここで、色差の分析にあたって用いた変数を表 2 に示す。

表 2. 色差の分析に用いる変数 [3]

変数	概要
ΔE^*ab	色差を示す。L*a*b色空間における2つの色(基準色とサンプル色)のユークリッド距離。
ΔL^*	明度を示す。2つの色の明度の差。
$\Delta a^*, \Delta b^*$	色相と彩度を示す。a*, b*は、色の方向を示しており、a*は赤方向、-a*は緑方向、そしてb*は黄色方向、-b*は青方向。
8° グロス値	光沢値と近似した値。60° 光沢計に近似するように設定されたもの。

表 2 にある L*a*b 色空間とは、物体の色を表すのに用いられる表色系である。また、色差とは、L*a*b 色空間における基準色とサンプル色のユークリッド距離を計算することによって導出される。S 社においては、基準色との色差 ΔE^*ab が 1.2 以内という基準がある。

分析の結果、妻フレームと妻端パネルにおける L*値の平均が、約 1.3 異なることが明らかになった。また、L 値の平均が時系列的に高くなるという傾向が明らかになった。一方で、a*値と b*値については、部材間の差は見られなかった。

3.2. 基準色の設定

S 社では、2023 年の 9 月より色相管理をはじめた。しかし、目視検査の工程において、通常の出荷基準を満たしている製品まで規格外となっていた。色差の基準値 1.2 については、日本工業規格の基準によると、出荷検査の社内規格に適用しているとされる AA 許容差に分類される[4]。したがって、現在 S 社が定めた基準色が適切でないと考えられ、基準色の再設定を行った。

基準色の設定を行うにあたって、はじめに、3.1 節の分析で明らかになった、部材間の L*値の平均の差が 1.3 あることの原因を、L8 直交配列実験で調査した。実験の概要を以下に示す。

実験方法：下塗り（熟練塗装者による手吹き塗装）
上塗り（機械塗装）
実験回数：各塗装条件で 3 つずつ、繰り返し数 2 回
因子：塗装方法、乾燥方法、シンナーの種類
使用塗料：合成樹脂塗料 ブルー
塗装物：サンプル板
特性値：膜厚値・色差

下塗り塗装では、熟練の作業者によってサビ止め塗料が塗装された。一方で、上塗り塗料では塗装色ブルーを、機械を用いて塗装した。また、部材間では、下塗りの有無と乾燥方法が異なること、また、L*値に時系列的な変化を与えた要因としてシンナーが考えられるため、上記の 3 つを実験の因子とした。

実験の結果、L*値の平均値は 34.04 で、標準偏差は 0.1357 であった。また、分散分析の結果、乾燥方法と使用シンナーが有意水準 1%で有意となった。そして、推定を行った結果、母平均の差は乾燥方法とシンナーがそれぞれ 0.07 と 0.15 となった。

上記より、乾燥方法とシンナーは、L*値に影響を与えることが明らかになった。しかし、部材間の L*値の平均の差 1.3 と比較すると、両者が L*値に与える影響は小さいと推測される。したがって、本実験では、部材間の L*値の平均が異なる原因の特定には至らなかった。

L*値に影響を与えている他の要因としては、気温と湿度があげられるが、それらの因子は現状では制御できない。そこで、基準色は過去の検査データから、異常値を

除いたものの平均値を取ることにした。その結果、基準色は、L*値が 32.04、a*値が-1.369、b*値が-6.014 となった。

3.3. 膜厚と色差の関係の分析

膜厚と色差を両立した塗装の最適条件を導出するためには、まず両者の関係を明確にする必要がある。そこで、実製品の部材 12 個を用いて、各部材で 6 ケ所、計 72 個の膜厚と色差を計測した。

膜厚と色差、色差を構成する変数の多変量連関図を作成した。明らかになったことを以下に示す。

- 膜厚と ΔL^* (明度)、 Δa^* 、 Δb^* との相関係数は、|0.85| を超えており、いずれも負の相関がある。
- 膜厚と 8° グロス値の相関係数は 0.95 であり、正の相関がある。
- 膜厚値が高いと色合いは暗く見え、色相は青緑のような色に近づく。また、光沢が増す。
- 膜厚と色差の相関係数は 0.21 であるが、散布図から 2 次関数のような関係が見られる。
- 膜厚が基準値よりも低い、または高い場合に、色差が大きくなる傾向がある。

3.4. 膜厚の上限値の設定

S 社では、各塗装色について、下限値は設定されているが、上限値に関しては基準値がない。そのため、工場間で膜厚に対する認識が異なる可能性がある。これは、ダレや部材間の色むらの原因であると推測される。これらの問題を解決するために、膜厚の上限値を設定する必要がある。

膜厚の上限値は、ダレと色差の 2 つを考慮した。はじめに、ダレが発生しない限界値を求めた。実施した二元配置実験の概要を以下に示す。

実験方法：熟練塗装者による手吹き塗装
実験回数：12 回
因子：ガン距離・ガンスピード
使用塗料：塗装色ブルー
塗装物：角材
特性値：膜厚値

塗装作業者は、通常よりも膜厚が厚くなるような塗装条件で塗装を行った。具体的には、塗装ガン距離を現行水準よりも 5 cm 近く、ガンスピードを遅くした。実験の結果、12 枚のサンプルのうち、10 枚がダレを引き起こし、2 枚が塗装品質に問題がなかった。2 枚のサンプルの平面における平均膜厚値は、48.1 μ m であり、これを平面におけるダレの限界値とした。

つぎに、色差の基準値 1.2 を超えない膜厚の限界値を求めるために、3.3 節で記載したデータを利用し、重回帰分析を行った。回帰式を以下に示す。なお、y を色差 ΔEab 、x を膜厚値とした。

$$y = 3.09 - 0.147x + 0.00239x^2 \quad (1)$$

自由度調整済み寄与率は、0.318 となった。また、膜厚と色差の散布図を図 1 に示す。

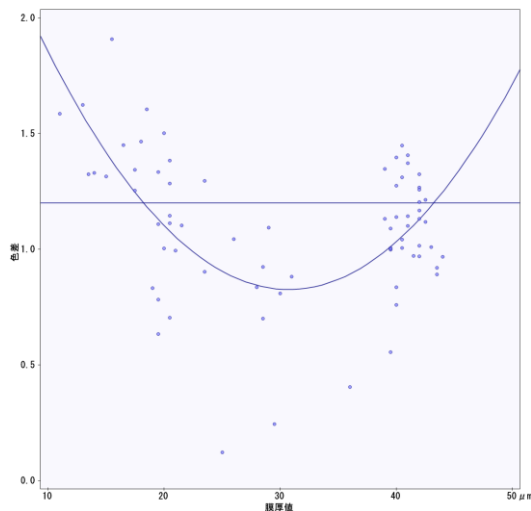


図 1. 膜厚と色差の散布図

図 1 の縦軸は色差，横軸は膜厚値 (μm) であり，色差の基準値 1.2 の規格線を示している．(1) 式の回帰式と基準値の交点を求めたところ， $43.2\mu\text{m}$ であった．これを，色差を考慮した膜厚の限界値とした．しかし，回帰式の寄与率が低く，精度に問題があると考えられるため， $43.2\mu\text{m}$ を製造工程上の目標値とした．そして，ダレを考慮した膜厚値 $48.1\mu\text{m}$ を，製造工程上の上限値とした．

3.5. 膜厚に影響を与える因子とその交互作用の調査

Hayashi et al.[5]は，膜厚に影響を与える因子は，塗装色と粘度，ガンスピード，ガン距離であることを明らかにした．しかし，交互作用があると考えられた因子については，確認ができていない．そこで，三元配置実験を行った．実験の概要を以下に示す．

実験方法：静電塗装の機械を用いて塗装
 因子：粘度，塗装色，吐出圧
 水準：2
 使用塗料：合成樹脂塗料 ブルー / オフホワイト
 塗装物：サンプル板
 特性値：膜厚値

塗装色は，ブルーとオフホワイトの 2 色で，粘度と吐出圧は最大値と最小値を設定した．実験で得られた膜厚に対して，分散分析を行った結果を，表 3 に示す．

表 3. 分散分析表(プーリング後)

要因	平方和	自由度	分散	分散比	検定
(A) 粘度	187.695	1	187.695	31.312	**
(B) 塗装色	625.695	1	625.695	104.380	**
AB	126.008	1	126.008	21.021	**
誤差	167.844	28	5.994		
計	1107.242	31			

[*:1%有意 **:5%有意]

表 3 より，粘度と塗装色，それらの交互作用が有意水準 1% で有意であることがわかる．粘度と塗装色には交互作用があり，膜厚に影響を与えていることがわかった．

また，有意となった因子を用いて推定を行った結果，塗装色ブルーは，粘度の水準による推定値の変化が，約 $1\mu\text{m}$ であった．一方で，塗装色オフホワイトは，粘度の水準による変化が，約 $9\mu\text{m}$ であった．これらのことから，

オフホワイトの方が，粘度の水準が膜厚に大きな影響を与えることがわかった．

3.6. 機械塗装における塗装の最適条件の導出

3.6.1. 塗装色オフホワイトにおける最適条件の導出

Hayashi et al.[5]は，塗装色オフホワイトにおいて，膜厚の基準値を満たす条件を明らかにしていない．そこで， L_9 直交配列表を用いた実験を実施した．実験の概要を以下に示す．

実験方法：静電塗装の機械を用いて塗装
 因子：粘度(A)，ガン距離(B)，ガンスピード(C)
 水準：3
 使用塗料：合成樹脂塗料 オフホワイト
 塗装物：サンプル板
 特性値：膜厚値

それぞれの因子の水準は，実際の製造工程で用いられている最小と最大，平均の値を選択した．膜厚に関して分散分析を行った結果，いずれの因子も有意となった．また，推定を行った結果，塗装色オフホワイトにおける基準値を満たす条件は， $A_3B_1C_1$ となった．

また，色差に関しても同様に，分散分析を行った．その結果，いずれの因子も有意水準 1% で有意となった．粘度は，高ければ高い方が，色差が小さくなることがわかった．そして，有意となった因子の推定を行った結果，色差の基準値の範囲に収まる条件が 11 個あった．色差は小さければ小さいほど望ましいため，その値が最小である条件として， $A_3B_1C_1$ を得た．

上記より，膜厚と色差それぞれの基準値を満たす塗装条件が一致したため，塗装色オフホワイトの最適条件は， $A_3B_1C_1$ である．これは，現行水準と同様となった．

3.6.2. 塗装色ブルーにおける最適条件の導出

Hayashi et al.[5]は，粘度とガンスピード，ガン距離の 3 つ因子を取り上げた実験で，現行水準と異なる最適条件を求めている．しかし，この実験はサンプル板に塗装を行っており，実製品と大きさや形状が異なる．

そこで，製造ラインへ導入するために，実製品への塗装実験を行った．実験の概要は，以下の通りである．

実験方法：静電塗装の機械を用いて塗装
 実験回数：4 回（一度に 3 枚を塗装）
 因子：粘度，ガンスピード，ガン距離
 使用塗料：合成樹脂塗料ブルー
 塗装物：妻端パネル
 特性値：膜厚値・色差

実験のデータを分析した結果，表面のいずれにおいても，膜厚の平均値が $40.9\mu\text{m}$ となり，上限値を上回るものはなかった．一方で，色差の平均値は 1.09 となり，規格外の製品が約 3 割あった．その主な原因として，塗装物の高さを考慮していなかったことがあげられる．

そこで，色差が小さくなるように前回実験よりもガン速度を速くし，新たに実験を実施した．その結果，膜厚の平均値は， $42.3\mu\text{m}$ となり，上限値を超えるものはなかった．また，色差の平均値も 0.295 となり，基準値を上回るものはなかった．上記より，膜厚と色差を両立した塗装の最適条件を導出することができた．

3.7. 塗装の最適条件の導出手順

3.6節までの検討をふまえて、塗装の最適条件の導出方法を以下に提案する。

Step1. 現状把握

塗装工程を調査し、膜厚と色差に影響を与えると推測される要因を検討する。また、過去の検査データを分析し、特徴や時系列的な変化を把握する。

Step2. 特性値の基準の確認

膜厚の規格値や、色差の基準値が妥当であるかどうかを、Step1の分析結果を参照し、確認する。

Step3. 膜厚と色差の関係の把握

膜厚と色差の対応したデータを分析し、膜厚と色差、色差を構成する要素との関係を明らかにする。

Step4. 膜厚と色差に影響を与える因子とその交互作用の調査

Step1 であげられた要因をもとに実験を実施し、膜厚や色差に影響を与えている因子を明らかにする。

Step5. 塗装の最適条件の導出

Step4 で明らかになった膜厚や色差に影響を与える因子について複数の水準をとり、実験を実施する。分散分析で有意となった因子を用いて平均値を推定し、膜厚の基準値の範囲内かつ色差が最も小さくなるような条件を導出する。

4. 考察

4.1. 本研究の意義

塗装には、塗装物の保護と美観の確保という二つの目的があり、膜厚と色差という 2 つの特性値を考慮する必要がある。そのため、外観品質を安定させるためには、膜厚と色差を両立させた最適な塗装条件で製品を塗装する必要がある。しかし、2 つの特性値を考慮した塗装条件については、あまり研究されておらず、S 社においても、最適な塗装条件が不明であった。

そこで、本研究では、膜厚と色差の関係を明らかにした。膜厚と色差には 2 次関数のような関係が見られ、膜厚が基準値よりも低い、または高い場合に色差は基準値を超えてしまう。そこで、膜厚値に上限値を設定することで、両者を基準値の範囲内に収めた。これにより、2 つの特性を考慮した塗装の最適条件を導出できた。

4.2. 色差の基準色の設定

色差の基準色について、S 社では導出方法が明確になっておらず、適切でない基準色が設定されていた。そこで、色差を構成する要素の一つである L*値に着目し、影響を与える因子を明らかにした。しかし、根本原因の特定には至らず、検査データをもとに、異常値を除いた平均値を基準色とした。

今後は、まず、設定した基準色が妥当であるかを、官能検査を実施し確認すべきである。つぎに、L*値に影響を与える因子を明らかにする必要がある。現段階で、他に考えられる因子としては、気温、湿度、塗料の粘度があげられる。粘度は色差に与える影響が大きいため、部材間で統一した方がよいと考えられる。

4.3. 膜厚の基準値の設定

膜厚の基準値について、S 社では下限値は定められているものの、上限値については設定されていなかった。そこで、本研究では、ダレと色差を考慮した膜厚の上限値を導出した。これにより、膜厚の規格値に範囲が定められ、適切な品質管理を行うことが可能になった。この管理を徹底することによって、ダレや部材間の色むらの不具合低減が見込まれる。

一方で、色差の許容限界値については、回帰式の寄与率は 0.318 となり、精度に課題が残った。対策として、分析するデータ数を増やす必要があり、膜厚と色差の対応したデータが取得できるような検査体制を構築すべきである。

4.4. S 社における品質管理体制の構築

今後、S 社における塗装の品質管理を進めるうえで、外部環境の気温と湿度は最も重要な要素といえる。S 社の塗装設備では、工場内の温度・湿度を一定にすることは難しい。その対策として、気温によって使用するシンナーの種類を変更しているが、不十分である可能性が高い。したがって、塗装条件を塗装時の外部環境に応じて変更すべきあると考えられる。

しかし、現状では、気温、湿度が膜厚と色差にどの程度影響を与えているのか不明である。そのため、塗装時において、それらのデータを収集し分析する必要がある。そして、気温、湿度が膜厚、色差に与える影響や、シンナーなどの他の因子との交互作用を調査すべきである。

5. 結論と今後の課題

本研究では、膜厚と色差の関係を明確にし、膜厚および色差を均一にさせる塗装の最適条件を導出した。また、膜厚に対する上限値と、色差の基準色を定めた。これにより、S 社の製品の塗装品質が担保されるとともに、その品質が向上すると考えられる。

今後の課題としては、気温・湿度などの外部環境を考慮した塗装の最適条件の導出が挙げられる。また、導出した膜厚の上限値や色差の基準色を、製造ラインへ導入した際に、不具合が起きないかを確認する必要がある。

参考文献

- [1] 奥野忠一、片山善三郎、上郡長昭、伊東哲二、入倉則夫、藤原信夫(2005)：「工業における多変量データの解析」、日科技連出版社
- [2] 浅野浩、上池斎(1966)，“メタリックの色相におよぼす諸条件の影響とその管理に関する二、三の試みについて”，「色材協会誌」，Vol.39，5号，pp.231-236
- [3] コニカミノルタグループホームページ(最終閲覧日：2023/07/25)：
<https://www.konicaminolta.jp/instruments/knowledge/color/section2/02.html>
- [4] 日本色彩研究所編(1988)，“カラーマッチングの基礎から応用まで”，色研講座テキスト，p47
- [5] Shuhei Hayashi et al.(2023)：“A Study of the Optimal Conditions for Painting in Unit Houses”，CONGRESS BOOK THE 21ST ANQ CONGRESS，pp.110-113