

メタリック塗装ムラの 定量評価方法

Study on Quantitative Evaluation of Mottling
in Metallic Colors



SP 研究所
第1研究部
五十嵐浩史
Hiroshi
Igarashi



SP 研究所
第1研究部
竹内 徹
Tohru
Takeuchi

SUMMARY

In order to achieve an objective and a quantitative evaluation of mottling in metallic colors, a new equipment for a measurement has been designed by utilizing a metallic-effect measuring instrument. We have studied visualization of the mottling and Fourier transform analysis of data measured with the equipment. The measuring equipment has an optical unit through a multi-axis arm on X-Y actuator, then even a surface of curved specimen such as an automobile door can be measured automatically. The mottling of the metallic colors was visualized by mapping of the measured data so that position and a size of mottling on the specimen was specified easily. In Fourier transform analysis of the measured data, we have found that the visual evaluation is correlated with a sum of power spectrum in a certain band and is influenced by specific size of mottling that is 35-60mm in width.

要 旨

メタリック塗膜のムラをより客観的かつ定量的に評価するために、メタリック感定量評価装置を応用した計測装置を作成しメタリックムラの可視化や計測データのフーリエ解析による定量化の検討を行った。自動車ドアパーツなど曲面を有する試料を簡便に計測可能とするために、光学系ユニットとX-Y 2軸ロボットを多関節支持治具で接続し、試料表面を接触走査する装置を開発した。得られた計測データを2次元マッピングすることで、客観的にメタリック塗膜ムラを観察することが可能になり、ムラの発生位置や形状を容易に特定することができた。さらに、計測データをフーリエ変換によって解析したところ、目視官能評価は特定空間周波数領域のパワースペクトル積算値と高い相関性があり、35～60mmの大きさをもつムラ形状に影響されていることが示唆された。

1. 緒 言

自動車外装塗装におけるアルミ顔料やパール顔料（以下光輝材と称する）を配合した塗色（以下メタリック塗色と称する）はエンドユーザーのニーズが高く、上塗り塗料におけるカラーバリエーションは増加の一途をたどっている。高度な意匠性を有するメタリック塗色ではあるが、その意匠効果を発揮させるためには光輝材が塗装～乾燥工程において塗膜中で適切かつ均一に配向することがきわめて重要であり、適切な塗料設計だけでなく安定した塗装条件や塗装環境を構築することも考慮しなければならない。

実際の自動車ボディ上塗り塗装においては、様々な原因

によってメタリック塗色の色ムラ（以下メタリックムラと略す）の問題が生じているのが実状である。メタリックムラは直接的には塗膜中における光輝材の不均一な配向が主原因となっているが、実ラインや実験室での評価において「目視官能評価」による数値化が現在もお一般的である。目視官能評価はとりわけ評価者の熟練度に依存する評価値であり、塗料設計や塗装環境の最適化を図るにあたって、客観的かつ定量的な情報とはなり難い。従って、評価者に依存せずに観察できるメタリックムラの可視化や定量的評価指標を見出すことは非常に重要な課題であると言える。

本研究においては、メタリックムラの可視化とその定量評価方法を見出すことを目的として、竹内・寺沢^{1),2)}によって

開発されたメタリック感定量評価装置を応用して、自動車ドアパーツなど曲面を有するメタリック塗装被塗物から二次元計測データを得る装置を作成し、その解析手法について検討した。

2. 実験

2.1 計測装置の設計

メタリックムラは被塗物のメタリック感の不均一性としてとらえることができ、被塗物のメタリック感を二次元的に計測することによりメタリックムラの客観的かつ定量的な評価が期待できる。竹内ら^{1), 2)}が開発したレーザー式メタリック感測定装置は、メタリック塗膜特有の光学特性を利用して計測値を得るものであり、非常に簡便な光学ユニットで計測を実現しているが、被塗物の複数測定点を手動で評価する場合には位置精度や操作性に改善の余地があった。

本研究で設計した計測装置（以下「ムラ計測装置」と称する）は、レーザー式メタリック感測定装置の光学系を応用した光学ユニットを2軸ロボットによって被塗物表面を二次元走査する機構とした。「ムラ計測装置」の全体概略図を図1に示す。

「ムラ計測装置」においては、塗装実験で汎用的に使用される平板被塗物だけでなく、自動車ドアパーツや模擬ドアパーツの計測にも適用可能なものとした。ドアパーツ上塗り塗装面の凸形状に追従して走査できるようにするため、光学ユニットはボール状ころを介して被塗物と接触させて走査する機構とするとともに、ロボットと接続するアームを多関節化し、光学ユニットが被塗物曲面を追従して走査できる構造とした。また、光学ユニット内のセンサーは1対の発光素子/受光素子からなり、測定点接面上の法線に対して45°の位置に発光素子を配置し、同法線から他方へ35°の位置に受光素子を配置した。受光素子が正反射位置から10°ずらすことにより、クリヤー表面からの正反射光の影響を受けずにハイライト位置の受光量計測ができる機構とした。曲面追従型光学ユニットの概略図を図2に示す。

駆動系は2台の株式会社アイエイアイ製ロボシリンダRCSを直交させて使用し、X-Y動作の2軸ロボットとした。2軸ロボットの駆動制御は松下電工株式会社製シーケンサFP-0を用い、後述する集中制御回路からの信号により制御した。

集中制御電子回路は、汎用オペアンプによるインストゥルメンテーションアンプ部とMicrochip社のPICmicro[®] CPU及び汎用3端子レギュレータによる電源部で構成され、

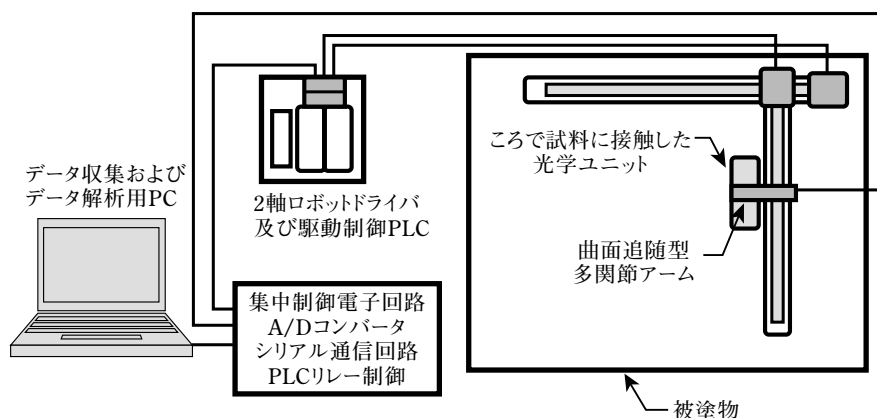


図1 メタリックムラ計測装置概略図

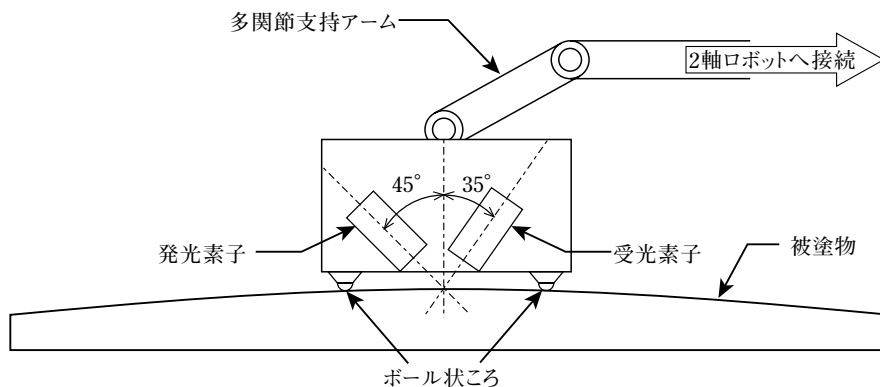


図2 曲面追従型光学ユニット概略図

PICmicro[®] CPUは増幅された光学ユニットからの電気信号のA/D変換^{*1}とデータ収集用コンピューターとのシリアル通信および2軸ロボット制御用シーケンサとの通信を行う。コンピューターには10ビットA/D変換値が送信され、デジタルデータの値が大きいほど受光素子の電圧が高く、測定点のハイライト明度が高いことを表している。下記に、主な計測条件を示す。

- ・試料の走査：矩形動作
- ・駆動速度：各軸とも250mm/秒
- ・掃引範囲：250mm×380mm
- ・測定ピッチ：5mm×5mm
(全測定点=3900点)
- ・光学ユニット部：株式会社キーエンス製
半導体レーザーセンサー
(波長：780nm)
- ・取得データ形式：10ビットA/D変換値
(0~1023の値)

2.2 計測評価用塗板の作成

評価に用いるメタリック塗装試料は関西ペイント株式会社製塗料を用いて以下の要領で作成した。

リン酸亜鉛処理を施した0.8mm厚×300mm×450mm平板状銅板または0.8mm厚×550mm×850mmの湾曲板(曲率半径はおよそ2000mm。以下上記を模擬パーツと称する)に対し、電着塗装(乾燥膜厚20 μ m。以下同様)、ポリエステル/メラミン中塗り塗装(35 μ m)したものをメタリック塗装用下地板とした。上記下地板に対して、アルミ顔料を15phr配合した水性ベースコートエアスプレーガンまたは静電ベル塗装機を用いて塗装した後、80℃×10分のプレヒートを行った後、アクリル樹脂クリヤー塗装(40 μ m)し、140℃×30分焼き付けたものを評価試料とした。

2.3 試料の目視官能評価

試料の目視官能評価は、メタリックムラ評価に熟練した塗装技術者3名が実験室内でセリック株式会社製人工太陽照明灯XC-500を使用して行った。最も優れるランクを5.0とし最も劣るレベルを1.0として数値化を行った。数値化に際しては、小数点以下第1位まで評点をつけた。

3. 結果および考察

3.1 メタリックムラの2次元マッピング

「ムラ計測装置」で、メタリック塗膜を計測し2次元マッピングした例を示す。以下、2次元マッピング図においては本装置のA/D変換^{*1}より得られたデジタル値を用い、値の大小は受光センサーの計測値の大小(受光強度)を表し、ハイライト位置の明暗度合いを示している。

3.1.1 エアスプレー塗装試料の観察

まず「ムラ計測装置」のメタリックムラ検出能力を大まかに把握するために、エアスプレー塗装によって意図的にメタリックムラを生じさせた平板状試料を作成して計測を行った。その計測データを2次元マッピングした例を図3~6に示した。

図3、4に示した試料は一般的な技術者でも十分にメタリックムラを目視で認識できるレベルの試料であるが、本装置の計測においても縞状のムラやスポット状のムラが明確に捉えることができた。図5、6に使用した試料は塗装作業性評価経験者でなければ、メタリックムラの識別が困難なレベルの試料であるが、図5では左右のメタリック感相違(明度の差)や図6では部分的に明度の低い領域が観察され、メタリック感の不均一を明確に捕らえることができた。

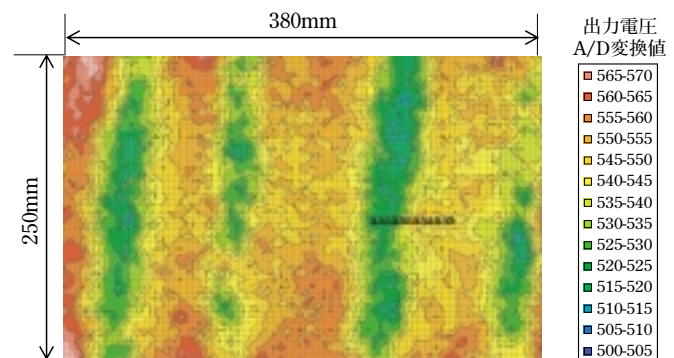


図3 メタリックムラ計測データの2次元マッピング例一

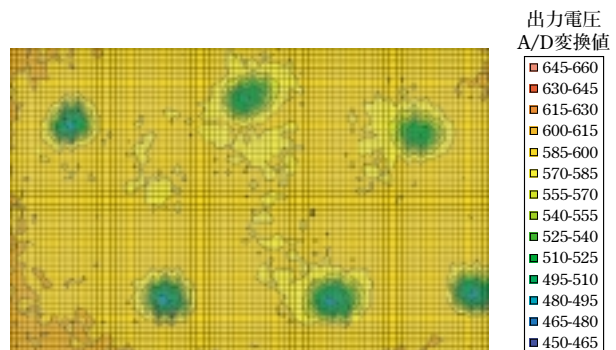


図4 メタリックムラ計測データの2次元マッピング例二

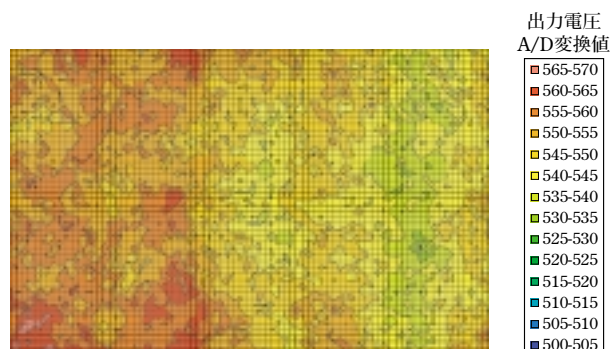


図5 メタリックムラ計測データの2次元マッピング例三

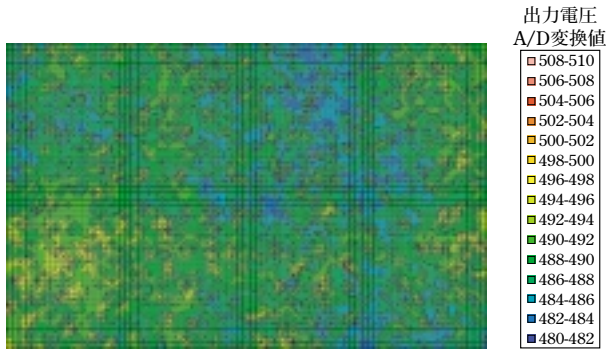


図6 メタリックムラ計測データの2次元マッピング例-4

3.1.2 静電ベル塗装試料の観察

表1に示した塗装条件で、レシプロケーターにより静電ベル塗装した平板状試料の計測例を図7~9に示した。

表1 静電ベル塗装条件

条件-1 (図7)	標準塗装条件	乾燥膜厚15 μ m
条件-2 (図8)	吐出量低減 塗り重ね回数増大	乾燥膜厚15 μ m
条件-3 (図9)	吐出量増大 塗り重ね回数低減	乾燥膜厚15 μ m

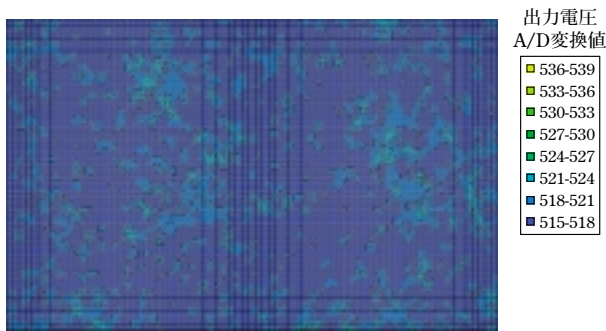


図7 塗装条件-1作成試料の計測結果

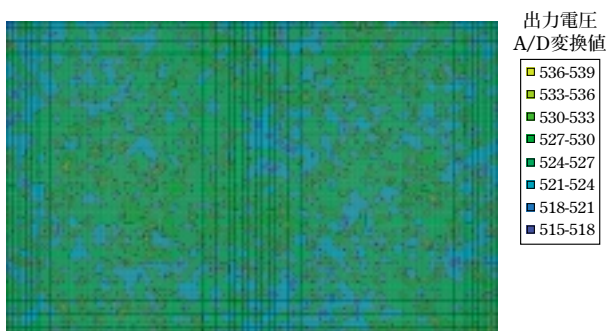


図8 塗装条件-2作成試料の計測結果

本項で用いた試料は高い熟練度を持った技術者でなければメタリックムラを識別することが困難なレベルの試料である。図7の標準塗装条件試料では、測定値(A/D変換値)は515~521でおおむね均一な明度であり、図8では全体的に計測値が高くハイライト明度が高いが、部分的に明度の低い部分がありメタリックムラが顕在化していることが判別できた。同様にして図9ではいわゆる縦縞状のパターンムラが生じていることを明確に捕らえることができた。

3.2 メタリックムラの定量化

このようなメタリックムラを定量化するために、塗装条件やメタリック塗料の粘性を変動させた33種類の模擬パーツ塗装試料を作成した。図10に用いた試料の目視官能評価分布を示した。

3.2.1 フーリエ変換によるメタリックムラ解析

全模擬パーツ試料を「ムラ計測装置」で計測して得られる250mm×380mm走査データの中から、任意の250mm×250mmのデータをフーリエ変換しパワースペクトル^{*2}(以下平均パワースペクトルまたは平均PSと称する)を求めた。平均パワースペクトルは、任意の走査方向についてすべてのデータ列の1次元フーリエ変換を行い、得られた各列のパワースペクトルについて空間周波数^{*3}ごとに平均値を求

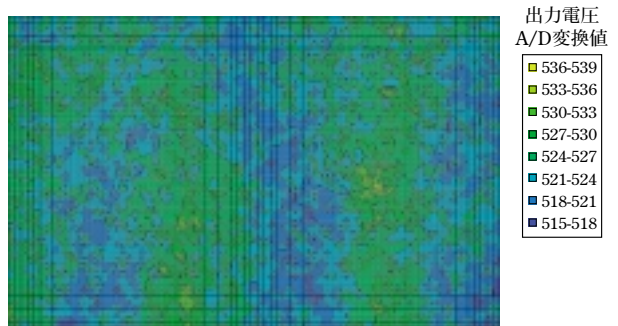


図9 塗装条件-3作成試料の計測結果

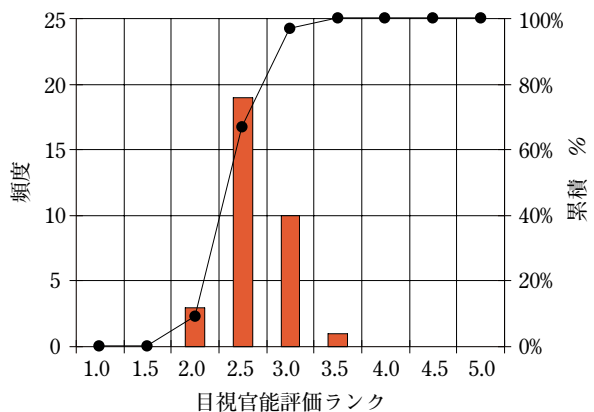


図10 評価試料の目視官能評価分布図

めて得られたものである。図11に代表的な目視官能評価値の試料について平均パワースペクトルを示した。

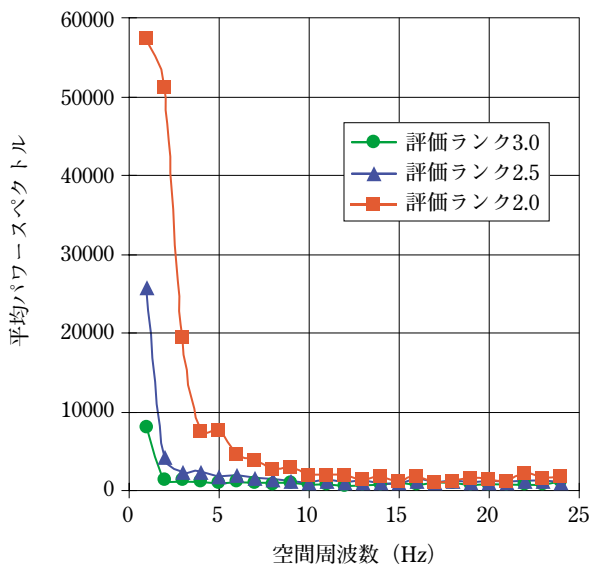


図11 代表的試料の平均パワースペクトル

図11から明らかなように、メタリックムラ目視官能評価値は10 Hz以上の高い空間周波数領域でのパワースペクトルの差異は殆ど認められず、比較的低い空間周波数領域のパワースペクトルと負の相関をしていることがわかった。

そこで、全試料の各空間周波数における平均パワースペクトルと目視官能評価値の相関係数を求めた。図12に低空間周波数領域の平均パワースペクトルと相関係数の関係を示した。

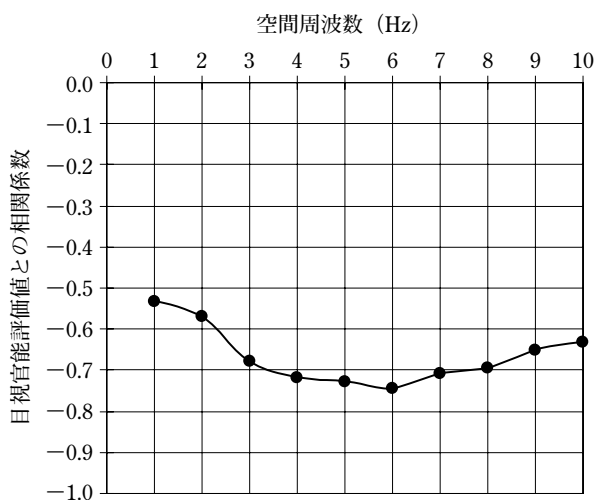


図12 平均パワースペクトルと目視官能評価の相関性

低空間周波数の中でも4~7 Hzの領域で目視官能評価ランクと平均PSの負の相関が高いことがわかった。さらに、図13には全試料の目視官能評価値と4~7 Hzの平均パワースペクトル積算値との関係を示した。図13における一次回帰相関係数は-0.748であり、対数回帰相関係数(平均PS積算値の対数との相関)は-0.799であった。以上の結果から、特定空間周波数領域の平均パワースペクトル積算値でメタリックムラ目視官能評価を定量的に表すことができることが示唆された。また、目視官能評価に影響している空間周波数領域(4~7 Hz)は、250 mm四方のデータから導かれた特性なので、その波長は約35~60 mmであり、この大きさの明暗ピッチが大きく影響しているといえる。

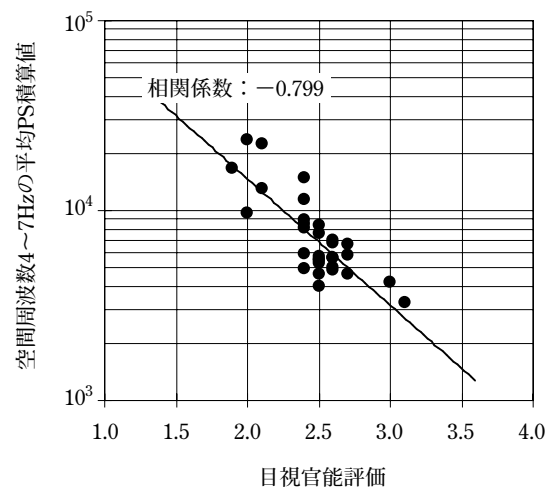


図13 平均パワースペクトル積算値と目視官能評価の関係

3.2.2 2次元フーリエ変換による解析

3.2.1項では、1次元フーリエ変換による平均パワースペクトルで解析を行ったが、2次元計測データを全方位に対して解析するために2次元フーリエ変換による解析を試みた。図14に2次元フーリエ変換を行って得られた2次元パワースペクトル(以下2次元PSと称する。)のうち4~7 Hzの2次元パワースペクトル積算値と目視官能評価の関係を示す。図14における対数回帰相関係数は-0.707であり、比較的高い負の相関を示したが前述の平均パワースペクトルから得られた結果より相関性が低下している。

相関性が低下した原因としては以下の2点が考えられる。第1には、任意の軸に依存した1次元平均パワースペクトル積算値に対して、2次元パワースペクトル積算値は軸の情報を持たないため、一方の軸上に縞状のメタリックムラがある場合などは、2次元フーリエ変換による評価は不向きである。第2には、模擬パーツや実車ドアパーツは湾曲した大型被塗物であるために、塗装時の塗装機軌跡の影響が特定の方向に生じたり、目視官能評価を行う際に特定の方向に依存した評価が行われている可能性が高い。従って、

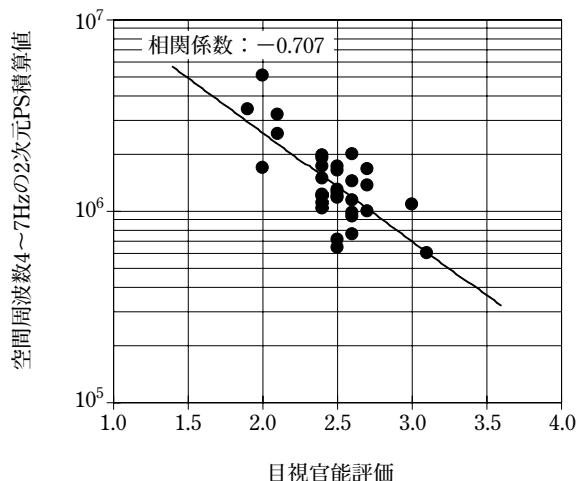


図14 2次元パワースペクトル積算値と目視官能評価の関係

パワースペクトルによるメタリックムラの評価は、2次元マッピング図によるムラ形状や発生位置を考慮した上で行う必要があると考える。

3.2.3 2次元逆フーリエ変換による2次元マッピング

複素フーリエ変換を行った場合は、実数部と虚数部の変換値から容易に逆フーリエ変換を行うことができる。ここでは、メタリックムラ目視官能評価の影響が少ない空間周波数領域を除いた逆フーリエ変換を行い、フーリエ変換及び逆フーリエ変換によるフィルタリング^{*4}効果について検討した。図11で用いた試料のうち、評価ランク2.0及び3.0の試料について2次元フーリエ変換を行い、空間周波数4~7Hz以外のデータをゼロとして2次元逆フーリエ変換を行った。図15、16にフィルタリングして得られたデータの鳥瞰図を示した。鳥瞰図の数値軸は、250mm四方の実測データから算術的に4~7Hzの成分を抽出した計測値であ

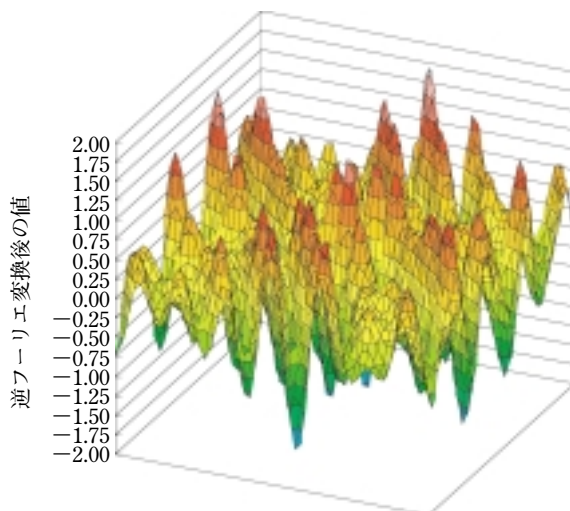


図15 フィルタリングデータの鳥瞰図(評価ランク2.0)

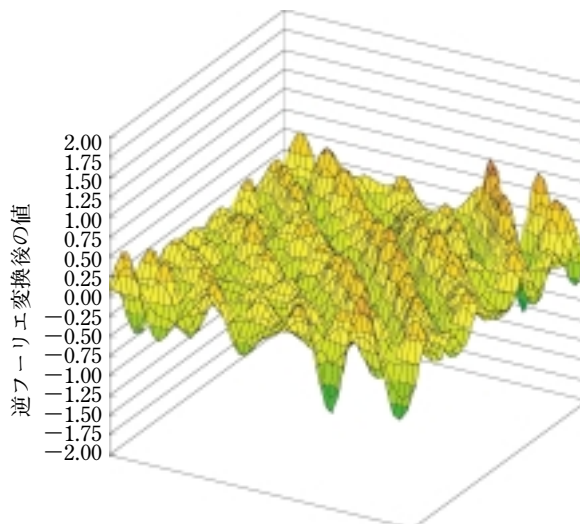


図16 フィルタリングデータの鳥瞰図(評価ランク3.0)

り、値の大小は明度の大小に相当する。評価の劣る試料は明らかに大きな振幅を有しており、測定面内に明暗のムラが存在していることがわかった。さらに各データの標準偏差は、評価ランク2.0において0.573、評価ランク3.0においては0.248であり、評価ランクの低い試料は測定面内のデータの変動が大きいことがわかった。以上のことから、逆フーリエ変換によるフィルタリングから得られる図の観察や基本的な統計量からメタリックムラを客観的かつ定量的に評価できることが示唆された。

4. 結論

メタリックムラの評価は熟練度の高い技術者による目視官能評価に依存していたが、試料から客観的かつ定量的情報を得るために、レーザー式メタリック感測定装置を応用した「ムラ計測装置」を設計した。「ムラ計測装置」から得られるデータから、2次元マッピング図を作成することによって、客観性のある可視化が可能であることが見出せた。

1次元フーリエ変換から得られる平均パワースペクトルから、低空間周波数領域が目視官能評価と高い相関性を持ち、特に35mm~60mmのピッチを持つムラが目視官能評価に強い影響を及ぼしていることが明らかとなった。

2次元フーリエ変換による解析では、試料の形状などによる影響や塗装時の軌跡の方向に起因して、評価する軸方向も重要な因子であることが示唆された。さらに、特定空間周波数領域を抽出した2次元逆フーリエ変換を行うことにより、試料のメタリックムラを強調した図が得られ、その標準偏差で定量的な評価ができることも示唆された。

【用語の説明】

*1 A/D変換

アナログ/デジタル変換の略。一般的には、素子が出力する電圧をデジタルデータに変換する動作を行う電子回路を指す。CDやDVDなどのデジタル家電のみならず、一般家電製品にも多く利用され、機器動作状態の確認や動作制御には重要な役割を果たしている。デジタルデータへ変換するときの分解能はビット数で表され、高いビット数ほど高分解能で変換ができる。たとえば、10ビットのA/D変換では出力されるデジタルデータは0～1023の間の値をとり、1～5Vの電圧を変換した場合は約1mVの分解能をもつことになる。

*2 パワースペクトル

フーリエ変換によって得られる各空間周波数^{*3}のフーリエ係数の二乗和の平方根であり、値が大きいものほど該当する周波数成分が多いことを示す。また、横軸に空間周波数をとり縦軸にパワースペクトルをとったグラフ自体をパワースペクトルと称する場合もある。

*3 空間周波数

連続する波形データをフーリエ変換すると、周波数ごとの正弦波/余弦波の和であるフーリエ級数が得られ、その周波数を空間周波数と称する。本報での計測のように、一定間隔長さごとの計測データである場合は、計測長さと同じ長さの波長成分が1Hzとなる。よって、計測長さを空間周波数で除した値が波長となる。例えば計測長さ250mmのデータをフーリエ変換して得られる10Hzのパワースペクトルは、波長が25mmの成分のパワースペクトルである。また、音声データのように一定時間ごとに計測されたデータの場合は、1秒間のサンプリングデータであれば空間周波数は実際の音の周波数と同じになる。

*4 フィルタリング

データに含まれるノイズや不要な成分を取り除く作業を指す。一般的に、計測データや音声/画像などのデジタルデータは、データを加工する際に不要なデータを含んでいる場合が多く、多くの場合それらの成分を取り除いて用いる。電子回路などによる処理方法と数値演算による手法に大別されるが、本報では後者を適用している。具体的には、元のデータをフーリエ変換などによって変換した後、不要なデータを除いて逆変換することで実現される。コンピューター上で使われる音声や画像データが代表的なものであり、人が殆ど認識できない成分を除去するフィルタリングによりデータの圧縮を実現している。現在では、コンピューター上での計算をせずにIC内部で高速に演算できるようになり、ハードディスクレコーダーやDVDレコーダーなどの民生家電製品でも多く使用されている。

参考文献

- 1) 竹内 徹、寺沢秀夫：第10回塗料・塗装技術総合研究発表会要旨集，42（1992）
- 2) 竹内 徹、寺沢秀夫：塗料の研究，117，67（1989）