

合金化溶融亜鉛めっき鋼板の塗装後鮮映性に及ぼす表面形状の影響

櫻井 理孝*・稲垣 淳一*・山下 正明*

Effect of Surface Texture of Galvannealed Steel Sheet on Image Clarity after Painting

Michitaka SAKURAI, Jun-ichi INAGAKI and Masaaki YAMASHITA

Synopsis : Surface profiles at each producing step of galvannealed steel sheet and at each painting step were measured by stylus profilometer. Galvannealed steel sheet had fine unevenness with short wavelength components ($\lambda < 100 \mu\text{m}$) originated in the Fe-Zn alloying reactions, unevenness with relatively long wavelength components ($\lambda > 100 \mu\text{m}$) responded to the substrate cold rolled steel sheet. By skin-pass rolling, the amplitudes of almost all wavelength components were reduced. Unevenness of overall wavelength was reduced by painting. Fine unevenness with short wavelength ($\lambda < 100 \mu\text{m}$) disappeared completely. Unevenness with relatively long wavelength ($\lambda > 100 \mu\text{m}$) slightly remained. Good correlation between the NSIC-value, the index of image clarity, measured after middle coating and the amplitude of wavelength component from 100 to 2000 μm of galvannealed surfaces was indicated.

Key words : image clarity after painting; galvannealed steel sheet; surface texture; skin-pass rolling.

1. 緒言

塗装後の鮮映性は、自動車外板パネル用材料にとって重要な品質の1つである。塗料や塗装条件と共に、塗装が施される鋼板の表面形状（表面 Texture）は、塗装後鮮映性に大きく影響を及ぼす。冷延鋼板を対象とした研究では、表面 Texture の長波長成分の強さを表す表面うねりが、塗装後鮮映性に対する主要な制御因子であることが明らかにされており¹⁻³⁾、塗装後に良好な仕上がり外観が要求される場合には、表面うねりを制御した冷延鋼板が、使用されている。

一方、高い防錆性能への要求から、厚目付けの表面処理鋼板へのニーズが高まり、比較的安価に厚目付け化が可能であり、塗装性、溶接性、および、耐食性に優れていることなどから、合金化溶融亜鉛めっき鋼板が広く使用されるようになった。しかしながら、合金化溶融亜鉛めっき鋼板の表面 Texture は、製造条件により大きく変化し、特に、合金化処理工程において、Fe-Zn 合金化反応に起因する独特の表面 Texture が出現するため、冷延鋼板のものとは大きく異なっている⁴⁾。従って、合金化溶融亜鉛めっき鋼板の表面 Texture と塗装後鮮映性との関係については明らかになっていない。

そこで、本論文では、合金化溶融亜鉛めっき鋼板の塗装後鮮映性に及ぼす鋼板側因子とプロセス側因子の影響について議論する。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究では、ショットブラスト加工されたロールにより圧延された IF 鋼冷延鋼板をベースに Table 1 に示す条件で製造したサンプルを供試材として用いた。このうち2種類の鋼板は、連続溶融亜鉛めっきライン (CGL) において、亜鉛めっきし、合金化処理ならびに調質圧延を施した。さらに残りの鋼板については、表面 Texture に及ぼす合金化処理条件の影響を明らかにするため、CGL にて亜鉛めっきした後、実験室において、高周波誘導加熱炉により 450, 500, 550°C での恒温合金化処理を施し、調質圧延を行った。

2.2 塗装系

各サンプルに対して、一般的に自動車製造工程で用いられる方法により塗装を施した。すなわち、リン酸亜鉛処理

Table 1. Materials used in this study.

Group	No. of samples	Roughness of steel substrate	Galvannealing temperature	Skin-pass elongation
A	17	several	aprox. 500 °C in CGL	several in CGL
B	4	Ra=0.7mm	aprox. 500 °C in CGL	0, 0.5, 1.0, 1.5% in CGL
C	4	Ra=1.3mm		
D	12	Ra=1.6mm	450, 500, 550°C in laboratory	0, 0.5, 1.5, 5.0% in laboratory

Table 2. Designation and film build for the paint system.

Steps	Paint and Agent		1	2	3
Phosphate	PBL-3080	Nihon Parkerizing	3.0g/m ²	3.0g/m ²	3.0g/m ²
Electro Coat	EI-2000	Kansai Paint	20μm	20μm	20μm
Sealer 1	TP-37	Kansai Paint	35μm	35μm	35μm
Polishing	-		-	-	done
Sealer 2	TP-37	Kansai Paint	-	-	35μm
Top Coat	TM-13	Kansai Paint	-	35μm	35μm
Total Film Build			55μm	90μm	125μm

による前処理を行った後、カチオン電着塗装を行い、その後、中塗り、上塗りのスプレー塗装を行った。塗装後鮮映性に及ぼす塗装条件の影響を明らかにするため、Table 2に示したような、中塗りまでの2コート塗装、通常の3コート塗装、中塗りを2回施すと共にその間に水砥ぎを行う4コート塗装の3種類の塗装を行った。

2.3 表面Textureの測定

表面Textureの測定は、小坂研究所(株)製の「触針式表面粗さ計SE-30」を用いた。

さらに、鋼板および塗装板のTextureに対する波長解析を以下の手順で行った。

まず、3次元表面粗さ計によって、X軸測定長さ8mmの断面曲線をY軸に50μmピッチで21本採取した。次に、データ点数を断面曲線1本あたり1024点とし、断面曲線を最小自乗法により水平化处理してその傾きを無くし、鋼板の表面凹凸の不規則な波形、すなわち、X軸に対して不規則な高さ変動を示す波形をフーリエ変換して、各波長ごとの波高の2乗和に分解することにより、波高分布を計算した。このようにして得られた21本の波高分布を平均化して1つの波高分布とし、各波長の波高の2乗和をパワーとして表示して、パワースペクトルを作成した。

2.4 塗装後鮮映性の評価

塗装後鮮映性の評価は、スガ試験機(株)製の「写像鮮明度測定装置NSIC型」によりNSIC値を測定した⁵⁾。なお、NSIC値は、黒板研磨ガラスを100とし、その値が100に近いほど良好な鮮映性を示すものとされている。

3. 結果および考察

3.1 表面Textureの影響

3.1.1 連続溶融亜鉛めっきプロセスにおける表面Textureの変化

Fig. 1に連続溶融亜鉛めっきプロセスにおける表面Textureの変化の典型例を示す。冷延鋼板は、微細な凹凸を伴わない、波長300~500μmの大きな凹凸を有している(Fig. 1(a))。この冷延鋼板に亜鉛めっきを施すと、比較的平坦な形状に変化する(Fig. 1(b))。次に、合金化処理を行うと、

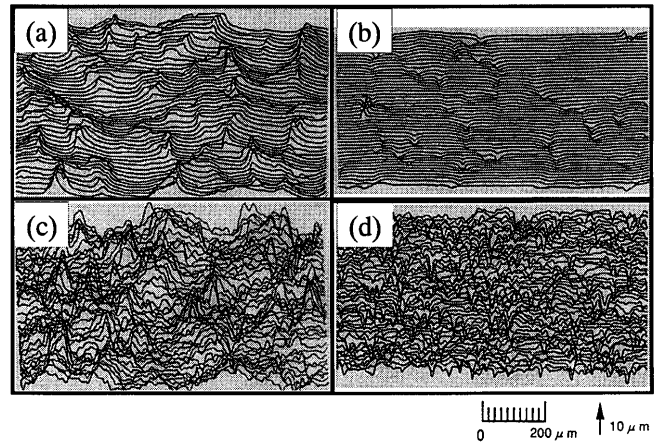


Fig. 1. Changes of surface profile during the CGL process. (a) As cold rolled, (b) as galvanized, (c) as galvanized, (d) as galvanized followed by skin-pass rolling.

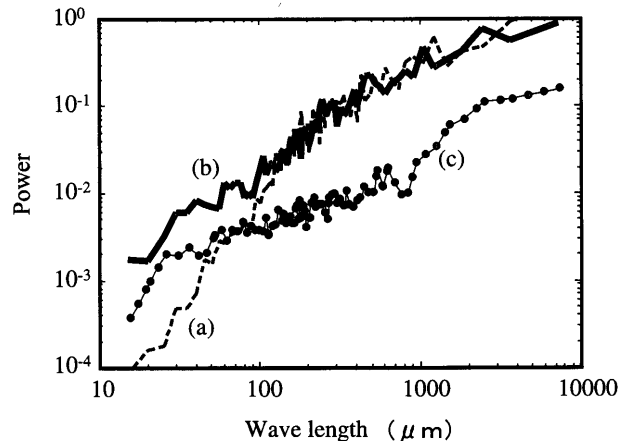


Fig. 2. Power spectrum evolution during processing of galvanized steel sheet. (a) Cold rolled steel sheet, (b) as galvanized, (c) galvanized followed by skin-pass rolling.

微細な凹凸が出現すると共に、冷延鋼板に見られた波長300~500μmの大きな凹凸が再び現れる(Fig. 1(c))。さらに、調質圧延を施すと、微細な凹凸を残しながらも、全体として平坦な形状へと変化する(Fig. 1(d))。

Fig. 2に連続溶融亜鉛めっきプロセスにおけるパワースペクトルの変化を示す。冷延鋼板上(Fig. 2(a))に溶融亜鉛めっきおよび合金化処理を行うと、波長100μm以下のパワースペクトルが増加した(Fig. 2(b))のに対し、波長100μm以上のパワースペクトルは、ほぼ同様の値を示した。この結果から、波長100μm以下の形状は、合金化処理によるFe-Zn合金結晶またはFe-Zn合金化反応に起因する表面クレーターの生成によるもので、波長100μm以上の形状は冷延鋼板の形状によるものであると考えられる。合金化処理後の鋼板を調質圧延した場合(Fig. 2(c))には、ほぼ全波長域に渡って、パワースペクトルが低下した。

以上から、合金化溶融亜鉛めっき鋼板の表面Textureは、Fig. 3に示すように、①合金化処理時のFe-Zn合金結晶生

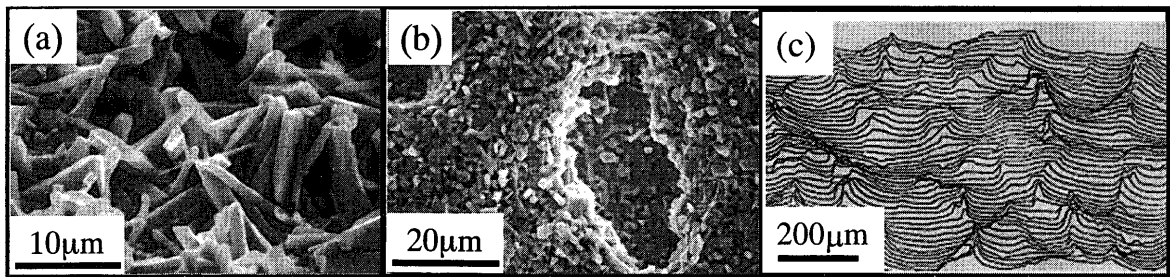


Fig. 3. Surface texture of galvanized steel sheet. Roughness width: (a) 10 µm or less, (b) 20–30 µm, (c) 300–500 µm.

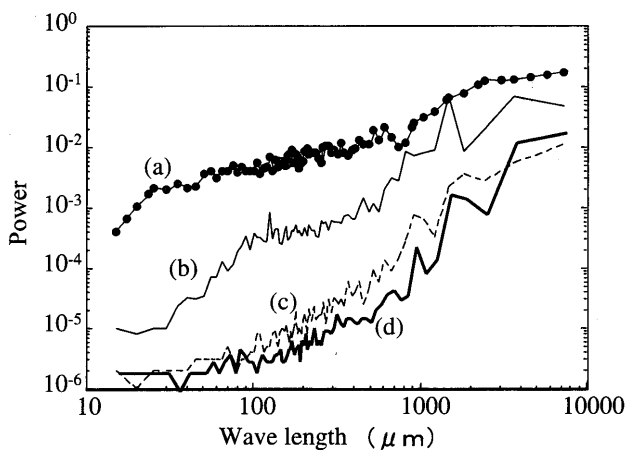


Fig. 4. Power spectrum evolution during painting. (a) Galvanized steel sheet, (b) ED-coat, (c) sealer, (d) top coat.

成による波長数µmの形状、②合金化処理時の表面クレーター生成による波長数十µmの形状、③基板の冷延鋼板の表面プロファイルによる波長100µm以上の形状、という3つの鋼板側因子に分類することができ、パワースペクトルによりそれらの変化を説明できることが明らかとなった。

3.1.2 塗装過程における表面Textureの変化

Fig. 4に塗装過程における塗膜表面の形状の変化をパワースペクトルにより示した。ED塗装、中塗り塗装、上塗り塗装と塗装を進めるに従い、ほぼ全波長域に渡ってパワースペクトルが低下した。その中でも、波長100µm以下のパワースペクトルは、中塗り塗装後および上塗り塗装後ではほぼ同じ値に収束した。従って、波長100µm以下の形状は、中塗り段階ではほぼ完全に隠蔽されたものと考えられる。一方、波長2000µm以上のパワースペクトルは、塗装により低下はするものの、その低下率は小さいことがわかる。

3.1.3 塗装後鮮映性に影響を及ぼす表面Texture

鋼板の表面Textureと塗装後鮮映性の関係を明らかにするため、合金化溶融亜鉛めっき鋼板の各波長領域ごとのパワーと2コート塗装（塗膜厚=55µm）後のNSIC値との相関係数を求めた。

製造チャンスおよび製造条件の異なるさまざまな表面Textureを有する合金化溶融亜鉛めっき鋼板を用いて、表

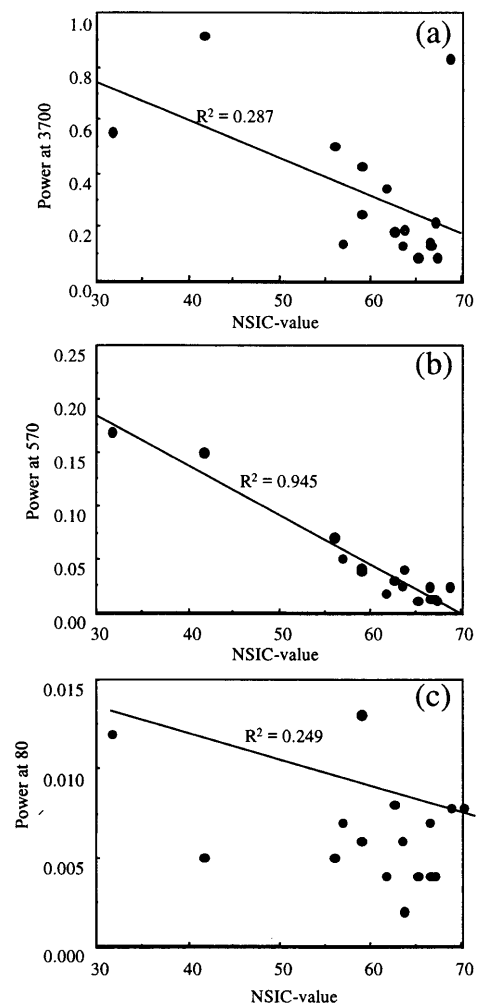


Fig. 5. Correlation between the image clarity (NSIC-value) and the power at three typical wavelength of power spectrum of galvanized steel sheet. (a) at 3700 µm, (b) at 570 µm, (c) at 80 µm.

面Textureの解析を行うと共に2コート塗装後のNSIC値を測定した。まず、解析した波長領域15から8000µmを23分割し、それぞれの波長領域でパワーを算出した。次に、2コート塗装後のNSIC値に対し、それぞれの波長領域のパワーをプロットし、相関係数を求めた。Fig. 5(a), (b), (c)にそれぞれ、波長3700µm, 570µm, 80µmの例を示した。(a), (c)のプロットに比べ、(b)のプロットにおいて相関係数が高いことがわかる。

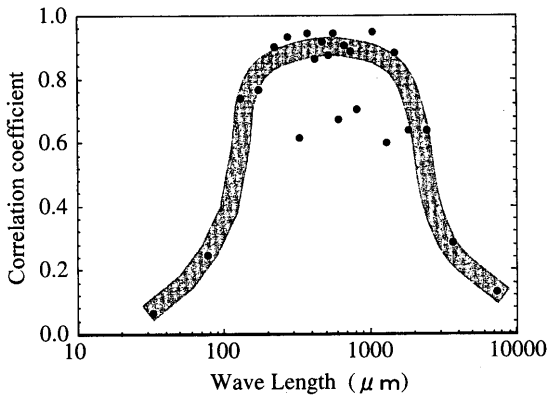


Fig. 6. Correlation between image clarity (NSIC-value) and the power at every wavelength of power spectrum on the surface of galvanized steel sheet.

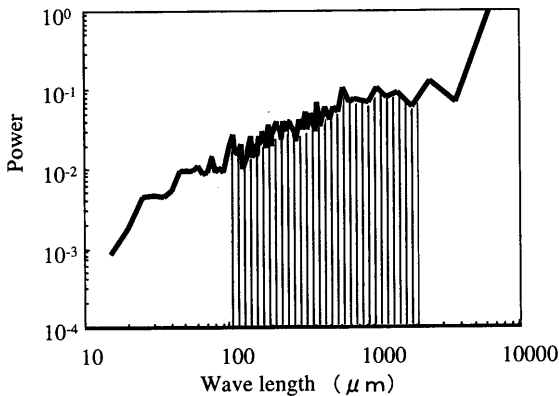


Fig. 7. Definition of the image clarity index.

このようにして求めた、各波長における相関係数を波長ごとにプロットすると Fig. 6 が得られる。これより、合金化溶融亜鉛めっき鋼板の波長 $100\ \mu\text{m}$ 以上 $2000\ \mu\text{m}$ 以下のパワーと、塗装後鮮映性の相関が強いことがわかる。

以上の検討から、合金化溶融亜鉛めっき鋼板の Fe-Zn 合金結晶および表面クレターの生成に起因する波長 $100\ \mu\text{m}$ 以下の形状は、塗装後鮮映性にほとんど影響しないことがわかる。

そこで、Fig. 7 に示すように、合金化溶融亜鉛めっき鋼板の波長 $100\ \mu\text{m}$ 以上 $2000\ \mu\text{m}$ 以下のパワーを積分したものを鮮映性指標 (Image Clarity Index) と定義した。

Fig. 8 に Image Clarity Index と塗装後 NSIC 値の関係を示す。NSIC 値は、Image Clarity Index の減少および塗膜厚の増加と共に増加し、塗装後鮮映性が良好となった。このように、Image Clarity Index を用いることにより塗装後鮮映性に対する、鋼板側因子の影響が明確になった。

3.2 塗装後鮮映性に及ぼす合金化溶融亜鉛めっき鋼板製造条件の影響

3.2.1 めっき下地冷延鋼板の粗さの影響

Fig. 9 は、塗装後鮮映性に及ぼす、めっき前の冷延鋼板の表面粗さならびに合金化処理後の調質圧伸延長率の影響を示したものである。平均粗さ (Ra) が小さい基板を用いた

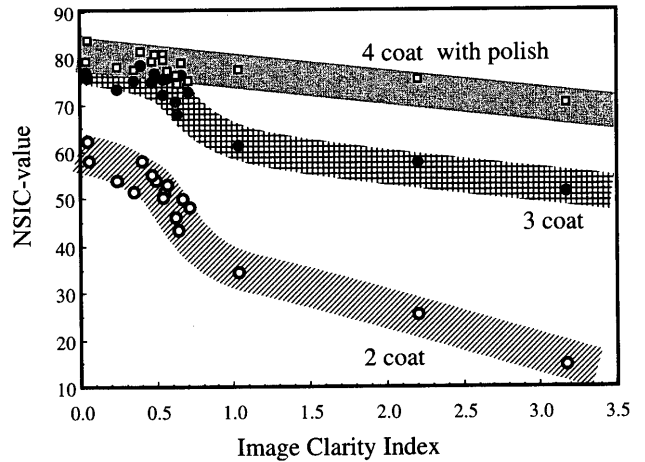


Fig. 8. Effect of the image clarity index and painting conditions on image clarity (NSIC-value) after painting.

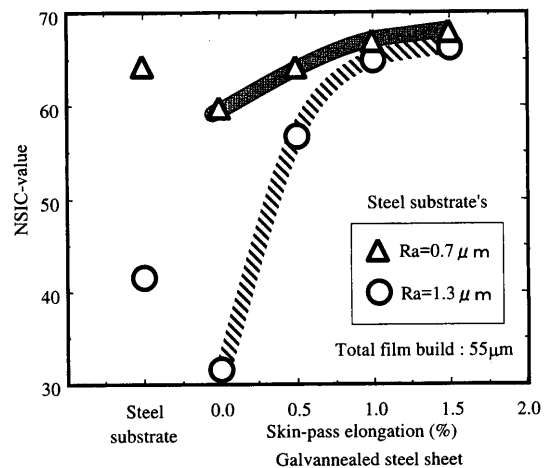


Fig. 9. Effect of steel substrate and skin-pass elongation of galvanized steel sheet on image clarity (NSIC-value) after painting.

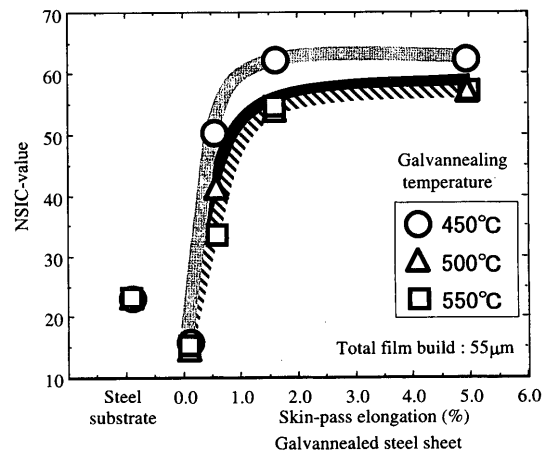


Fig. 10. Effect of galvannealing temperature and skin-pass elongation of galvanized steel sheet on image clarity (NSIC-value) after painting.

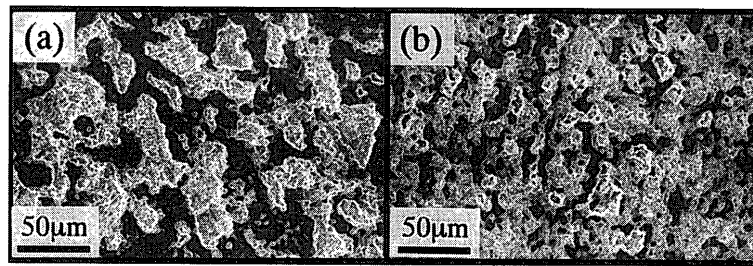


Fig. 11. Effect of Fe-Zn phase of coating layer on surface texture of galvanized steel sheet after skin-pass rolling. (a) ζ -phase, (b) δ_1 -phase.

場合には、調質圧延の伸長率によらず塗装後鮮映性は良好である。一方、より高い伸長率にて調質圧延した場合には、めっき前基板の影響は小さくなり、平均粗さが高い基板を用いた場合でも塗装後鮮映性は、良好となった。

3.2.2 合金化処理温度の影響

Fig.10に、塗装後鮮映性に及ぼす、合金化処理温度ならびに合金化処理後の調質圧延伸長率の影響を示した。450°Cで合金化処理を行った場合には、めっき皮膜表層には柱状の ζ 相が生成した。そして、500, 550°Cで合金化処理を行った場合には、めっき皮膜表層には主に δ_1 相が存在した。

調質圧延をする前の鋼板のNSIC値は、合金化処理温度によらずほぼ一定の値を示した。これは、合金化処理時に生成するFe-Zn合金結晶の違いは、100 μm 以下の短い波長の成分であり、塗装後鮮映性には影響しないという前述の結果と一致している。しかしながら、調質圧延を施した場合には、450°Cで合金化処理したサンプルのNSIC値は、500, 550°Cで合金化処理したサンプルに比べ高い値を示し、塗装後鮮映性が良好であった。さらに、それらのImage Clarity Indexは、より小さいことが確認できた。以上のことは、めっき皮膜に生成したFe-Zn合金結晶の種類によって、調質圧延の際の平坦化挙動に違いがあることを示唆している。Fig.11に同一の伸長率(0.5%)で調質圧延を行った場合の表面Textureに及ぼすめっき皮膜の影響を示した。表層が ζ 相主体の皮膜の場合、調質圧延により平滑化された平坦部面積率が、表層が δ_1 相主体の皮膜の場合に比べ大きいことがわかる。これは、 ζ 相が δ_1 相に比べ軟らかいことにより、調質圧延時の平坦化挙動に差を生じたものと考えられる。

4. 結論

(1) 合金化溶融亜鉛めっき鋼板の表面Textureは、①合

金化処理時のFe-Zn合金結晶生成による波長数 μm の形状、②合金化処理時の表面クレーター生成による波長数十 μm の形状、③基板の冷延鋼板の表面プロファイルによる波長100 μm 以上の形状、という3つの鋼板側因子に分類することができ、パワースペクトルによりそれらの変化を説明できることが明らかとなった。

(2) 塗装後鮮映性と合金化溶融亜鉛めっき鋼板の波長100 μm 以上2000 μm 以下のパワーを積分した鮮映性指標(Image Clarity Index)には良好な相関関係が認められ、Image Clarity Indexを用いることにより塗装後鮮映性に対する、鋼板側因子の影響が明確になった。

(3) 合金化溶融亜鉛めっき鋼板の、100 μm 以下の短い波長の微小な凹凸は、塗装後には、完全に消滅するため、合金化処理時に生成するFe-Zn合金結晶や表面クレーターの違いは、塗装後鮮映性に影響しないことが明らかになった。

(4) 一方、合金化処理後の鋼板を調質圧延すると、ほぼ全波長域に渡って、パワースペクトルが低下するが、めっき皮膜表層が ζ 相主体の結晶を有する場合には、より容易に表面が平坦化されるため、塗装後鮮映性が良好となることが判明した。

文 献

- 1) G.Monfort, J.Defourny and A.Bragard: Controlling Sheet Metal Forming Process, 15th Biennial Cong. Int. Deep Drawing Research Group, ASM Int., Materials Park, OH, (1988), 91.
- 2) M.Imanaka, T.Fujiwara, T.Furubayashi, T.Obara, K.Tunoyama and K.Furukawa: Controlling Sheet Metal Forming Process, 15th Biennial Cong. Int. Deep Drawing Research Group, ASM Int., Materials Park, OH, (1988), 109.
- 3) A.F.Bastawros, J.G.Spee, G.Zerafa and R.P.Krupitze: SAE Tech. Pap. Ser., #930032, (1993).
- 4) A.Nishimoto, J.Inagaki and M.Morita: Int. Deep Drawing Research Group Working Group Meeting, Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, (1991).
- 5) M.Morita: *Tetsu-to-Hagané*, 77 (1991), 1075.