

Development of High Image Clarity Steel Sheet LASERMIRROR



古川 九州男
Kusuo Furukawa
水島製鉄所 冷間圧延
部 部長



角山 浩三
Kozo Tsunoyama
鉄鋼研究所 薄板研究
部 部長・工博



今中 誠
Makoto Imanaka
鉄鋼研究所 薄板研究
部 薄板研究室 主任研
究員(掛長)



岸田 朗
Akira Kishida
千葉製鉄所 冷間圧延
部 冷延技術室 主査(部
長補)



山田 恭裕
Yasuhiro Yamada
千葉製鉄所 冷間圧延
部 第2冷間圧延課 主
任部員(掛長)



恒川 裕志
Hiroshi Tsunekawa
千葉製鉄所 管理部表
面処理管理室 主査(掛
長)

要旨

乗用車のボディの鮮映性向上にとって塗装技術とともに、鋼板の表面粗度制御も非常に重要である。従来のショットダルロールあるいは放電ダルロールによって圧延された冷延鋼板の粗度パターンは本質的にランダムであり、この中のうねり成分は塗装後も残存して鮮映性を著しく害する。

レーザーダル加工技術はパルス化したレーザー光を利用しマイクロレーターを形成する技術であり、このダル加工法によって鋼板表面のうねり成分の除去、平坦度の改善が図られ写像性を飛躍的に改善することができた。この技術に基づき開発された高鮮映性鋼板「レーザーミラー」はすでに多くの乗用車の外板として利用されている。

Synopsis:

Controlling surface roughness of cold rolled steel sheets as well as the paint coating technique itself is quite important in obtaining high image clarity of car outer panels. Surface roughness of cold rolled steel sheets is usually produced by temper rolling using roughened dull rolls which is conducted by the shot-blasting or electrodischarge texturing technique. It is, however, found that roughness patterns by these methods are substantially random and leaves behind waviness which deteriorates image clarity even after paint coating. By the application of laser textured roll which consists of numerous micro-craters formed by chopped laser beams, distinctness of image is much improved through elimination of waviness and providing a flat area on the steel surface.

Based on this understanding, high image-clarity cold rolled steel sheet **LASERMIRROR** has been developed and already applied to many passenger car outer panels.

1 緒 言

近年、乗用車はもちろん、軽乗用車、ワゴン車にいたるまで塗装後のボディの塗装仕上がり品質の良さは、自動車の総合的な品質の高さを顧客に対して直接的に視覚によって訴えることができるため重要な品質管理項目となっている。

ところで、このような塗装面の外観品質は従来、塗装技術の改善によって向上してきた。しかし、塗装表面の素地となる鋼板表面の粗度が、やはり、塗装後の表面品質に影響することも知られており、この種の研究を文献¹⁾にみることができる。ただ、この結果は、冷延鋼板のダル目付けの本来の目的である、鋼板のハンドリング性、プレス成形時の耐焼き付き性を損なうおそれがあり、塗装表面の品質との両立は困難とされてきた。

これは、従来の鋼板表面粗度の管理指標が主に平均粗さのみであることが原因と考えられる。すなわち、実際の鋼板表面粗度の特徴は単に平均粗さだけではなく、他の種々の要素を含んでおり、これ

らの中から表面粗度に関わる表面特性、例えば、鮮映性、成形性と真の相関関係にある要素を選択し管理することが必要である。これは従来の平均粗さによる鋼板表面粗度の制御では不可能なことであった。

鋼板表面粗度の構成成分の中から、塗装後の表面品質に有害なものと、その他の特性、例えば耐焼き付き性にとって有用なものを分離し、有害な粗度成分のみを排除する技術が成形性と鮮映性の両立にとって不可欠である。最近実用化したレーザーダル加工技術は鋼板の表面粗度の管理がより細かくでき、粗度プロファイルの制御まで可能となった。この技術を、塗装後の表面品質を考慮した鋼板粗度制御に応用し、製品として実用化したのが、高鮮映性鋼板レーザーミラーの開発である。

本報告では、鋼板の表面粗度と鮮映性との関係、およびこの結果に基づく鋼板の表面粗度制御技術に関して概説した。

* 昭和63年6月2日原稿受付

2 塗装鮮映性

塗装面の評価項目としては種々のものがあるが、その中でも特に塗装面での乱反射が少なく光沢性に優れていること、および写像の歪みが少ない、すなわち写像性が優れていることが重要であり、これらの光沢性と写像性をあわせて一般に鮮映性と称している。

鮮映性は、乗用車の塗装面の外観品質に直接影響する特性であり、その評価は目視による比較が最も厳しいと考えられる。目視以外の定量的な評価として、種々の鮮映性測定機が存在するが、本論文では米国のハンター・アソシエーツ・ラボラトリー (Hunter Associates Laboratory) 社製のドリゴン (DORIGON) メータによる測定値すなわち DOI (Distinctness of Image) 値を使用した。この DOI 値は、Fig. 1 に示すように、試料 S に対して入射角 30 度で光を入射し、その正反射光強度 R_s と正反射に対し ± 0.3 度での乱反射強度 $R_{0.3}$ の値をもちいて表される。この DOI 値が高いほど塗装面の鮮映性が優れているとすることができる。一般に自動車車体の外板の塗膜について、十分な高級感を呈するには、DOI 値が 95% 以上であることが望ましいとされている。

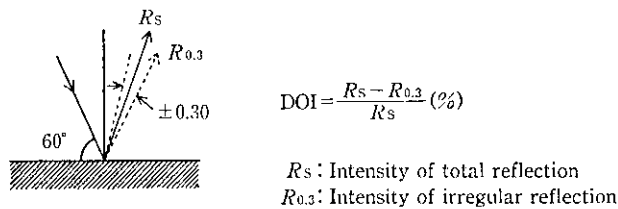


Fig. 1 Definition of DOI (Distinctness of image) value

3 冷延鋼板表面の微視的形態

3.1 鋼板表面の粗面化の目的

一般的な冷延鋼板の製造工程を Fig. 2 に示す。鋼板は冷間圧延された後、焼鈍を施して深絞り性等の材質が作り込まれ、しかる後にストレッチャーストレインの防止、形状調整そして鋼板表面粗度を調整することを目的として調質圧延される。

冷延鋼板の粗度調整は、鋼板の製造過程あるいは、その後のハンドリング性、プレス成形時の耐焼き付き性にとって必要であり、故意に冷延鋼板の表面を粗面化している。すなわち、鋼板をコイルに巻いたとき、鋼板を自動ラインでハンドリングするときあるいはプレス成形するとき、鋼板同士、鋼板と型、ハンドリング器具との接触状態が表面粗度によって影響され、適切な粗度が存在しない場合、焼き付きあるいはすべりが発生して問題となる場合がある。

ダル圧延による冷延鋼板表面の粗面化はこのような必要性から施されている。



Fig. 2 Manufacturing process of cold rolled steel sheet

3.2 ダル目付の方法

冷延鋼板の表面粗度調整は調質圧延によって行われる。すなわち、ダル加工によって表面を粗面化した調質圧延用ロールで鋼板を

圧延することによって、鋼板表面にロールのダルを転写する。圧延ロールの粗面化の方法は、従来技術としてショットブラスト法、放電加工法があるが、いずれもランダムな粗度パターンを付与する技術で大体の平均粗さを管理しているにすぎない。例えば、通常採用されているショットブラスト法においては、粗度に応じたグリッドを投射することによってロールの表面を粗面化する方法であり、粗度プロファイルのコントロールは不可能である。同様に放電加工法も、油中で放電加工を施すことによりロール表面を溶融し粗面化する方法であり、粗度プロファイルのコントロールはできない。

これに対し、最近実用化したレーザーダル加工技術においては、レーザーエネルギーを用いてロールの表面に規則的な凹凸を付与する方法であり、この技術を利用すれば、粗度プロファイルの制御も可能となる。

3.3 鋼板表面粗度の表現方法

鋼板の表面粗度を表現する指標として、従来、一般に使用されているのは、平均粗さ (R_a) あるいは最大粗さ (R_{max}) 等の基本的なパラメータである。しかし、鋼板の表面粗度と密接に関係する種々の特性、すなわちハンドリング性、焼き付き性、鮮映性等を研究する中で、粗度パラメータはより適切な指標としてその種類を増している。したがって、一つの粗度パターンの特徴を抽出するのに、1 種類のパラメータだけではなく、複数のパラメータを併用することが必要である。

また、Photo 1 に示すレーザーダルのように規則的な凹凸を呈する場合、従来の一次元走査による粗度測定では正確な粗度プロファイルの特徴の評価はできない。粗度測定の走査を二次元的に行い、粗度プロファイルを三次元的にとらえる必要がある。また、鋼板表面と型との接触状態によって変化する摺動特性あるいは鋼板表面での光の反射によって変化する鮮映性を考えるとき、鋼板表面の粗度プロファイルもやはり三次元的にその特徴を考える必要がある。レーザーダルおよびショットダルを施したスキンパスロール表面の三次元粗度測定結果の典型例を Fig. 3 に示す。図中の SR_a は三次元平均粗さを示し、 SR_z は三次元の 10 点平均粗さを示す。

例えば、同じ平均粗さでも、Fig. 4 に示すように凸部のサイズが異なる場合があり、この両者では、表面特性が異なることが予想される。この場合、PPI (Peaks per inch) あるいは中心面山直径の差として粗度パターンの特徴が抽出されるが、凸部の形状あるいはその配置の空間的な広がりも重要なパラメータとなる。

鋼板表面粗度は種々の波長の波から構成されていると考えた場合、波長の長い粗さを抽出してうねり成分を定量化したパラメータ

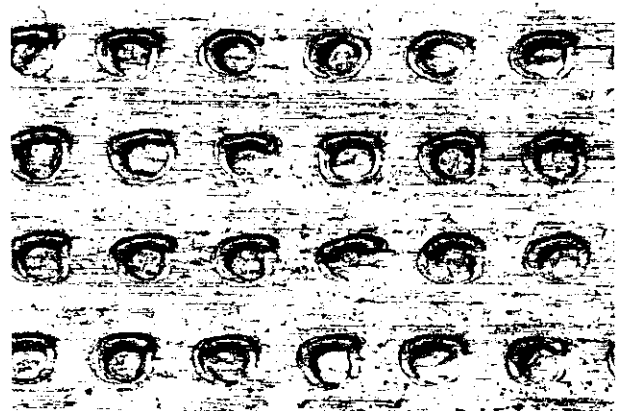
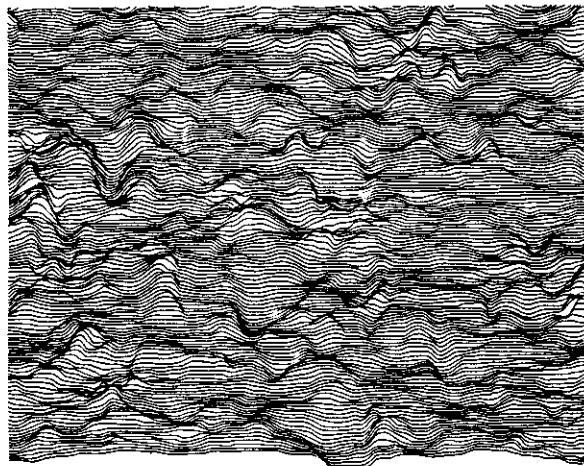
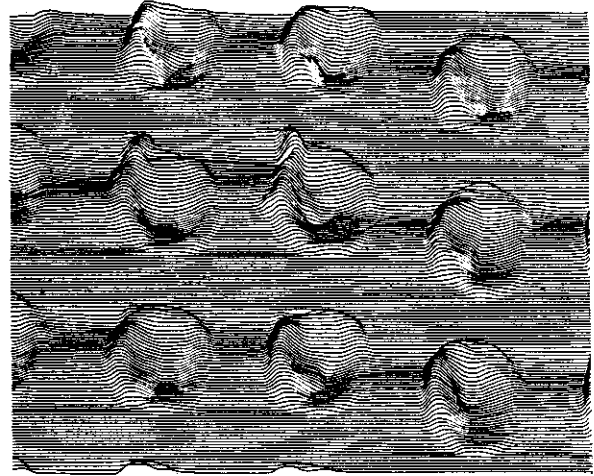


Photo 1 Surface of laser textured dull steel sheets



Shot blasted roughness
 $SR_a = 2.21 \mu\text{m}$
 $SR_z = 17.7 \mu\text{m}$



Laser-texturing roughness
 $SR_a = 1.65 \mu\text{m}$
 $SR_z = 22.2 \mu\text{m}$

Fig. 3 Comparison of three dimensional profiles between shot blasted roughness and laser texturing roughness of roll

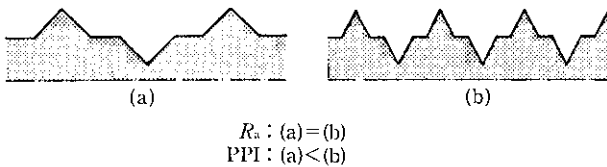


Fig. 4 Comparison of two different roughness profiles

が W_{ca} であり、表面粗度の中で平坦な部分の面積を測定したパラメータとして W_{2a} を新たに定義した。それぞれ鮮映性と密接に関連したパラメータであることが本研究によって明らかとなった。

4 鋼板表面の微視的形態と鮮映性

従来の知見において、鋼板の表面粗度と鮮映性の関係は、平均粗さ (R_a) の減少とともに鮮映性が向上する結果となっており、これは、我々の実験結果においても Fig. 5 に示すように確認されている。しかし、平均粗さは鋼板表面粗度を構成している種々の波長の粗度を平均した値であり、どの波長が塗装後の鮮映性に影響を及ぼしているかは、パラメータとして評価されていない。塗装表面の微視的構造と鮮映性との関係は、これまでの研究によってかなり明らかにされている。

一般に塗膜表面の粗度は、波長、振幅の異なる様々な波形状が混在している。その中でとくに波長は、仕上り品質に強く影響を及ぼすことが判明している。鮮映性を光沢、平滑性およびその中間特性となる wet look の3つの特性に分けるとすると、粗度波長との関係は Fig. 6 に示す対応があると言われている。塗装前の鋼板の表面粗度も様々な波長の波から構成されている。このすべての波長の波が塗装後の鮮映性に影響を及ぼすかは、高鮮映性鋼板の開発に際して重要な検討課題であり、この場合、塗装膜による鋼板の粗度変化は重要な指針を与えている。すなわち、スプレー塗装された塗料自身のフロー性および焼付時のレベリング作用によって、Fig. 7 に示すように、鋼板粗度の中の短波長の粗度成分は塗装膜に隠蔽されることが、塗装前後での粗度解析によって明らかとなった。鋼板表面粗度を構成している種々の波長成分の内塗装後の鮮映性に影響を及ぼすのは中波長成分であり、この排除が重要である。したがって、

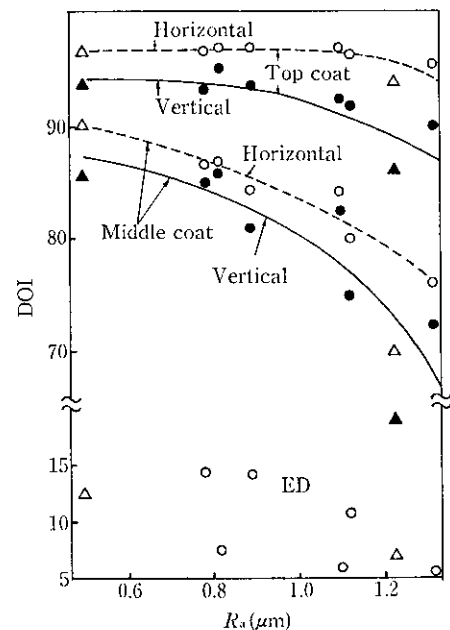


Fig. 5 Relationship between average roughness (R_a) and image clarity (DOI value)

	Clarity		
	Gloss	Wet look	Flatness
Wave length	$\leq 40 \mu\text{m}$	$40 \sim 200 \mu\text{m}$	$\geq 200 \mu\text{m}$
Surface model			

Fig. 6 Wavelengths of surface roughness and image clarity

Fig. 5 に示した平均粗さと鮮映性との関係は、真の関係ではなく、中波長成分の低下を介しての改善であると考えられる。Fig. 8 には中波長の粗度成分を測定したパラメータ W_{ca} と鮮映性との関係を示す。両者の間には強い相関があることがわかる。

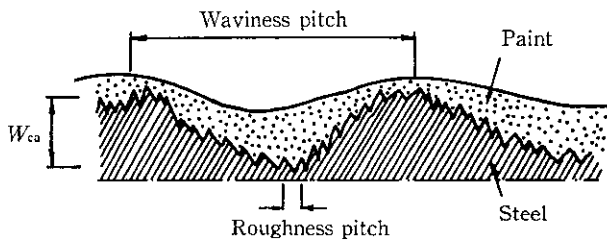
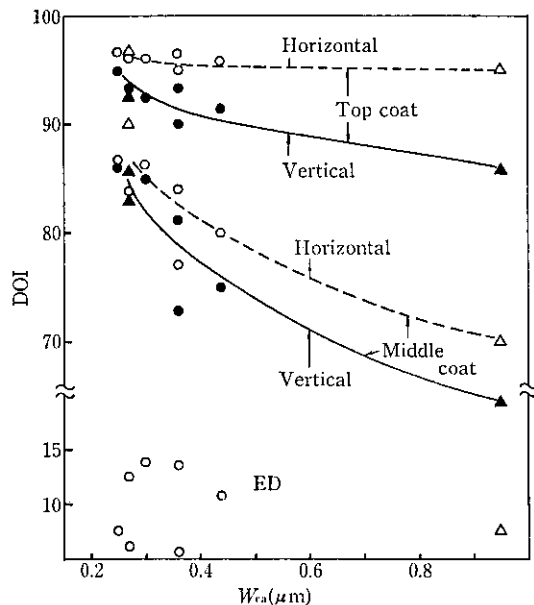
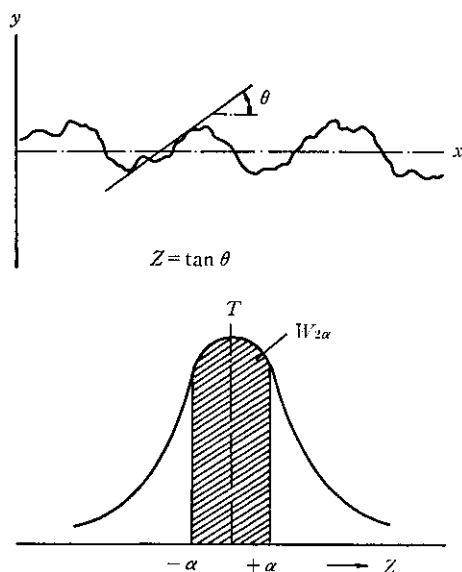
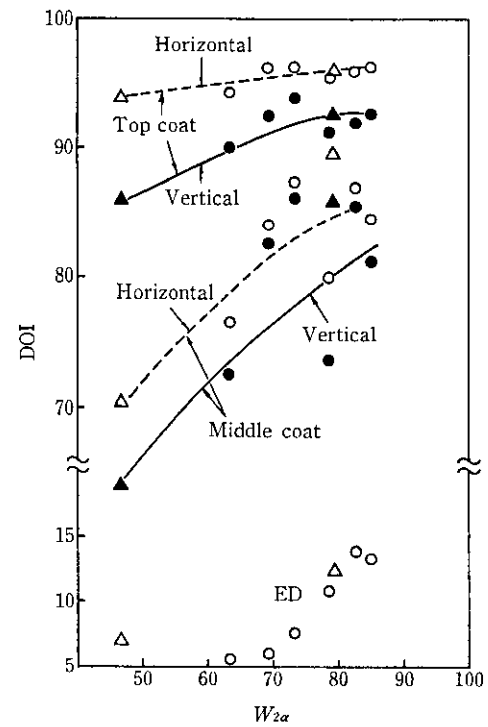
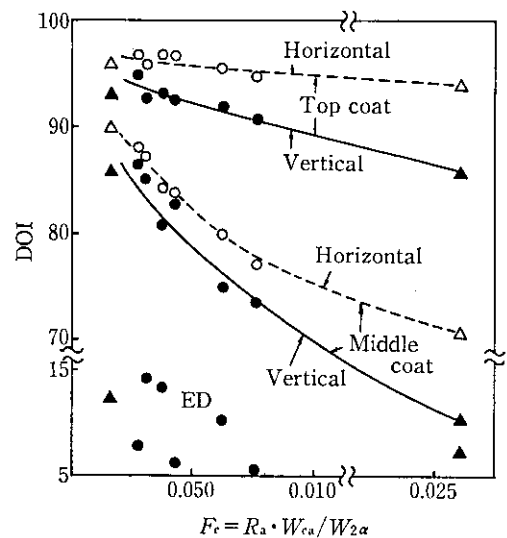


Fig. 7 Model of smoothing effect of paint layer

Fig. 8 Relationship between waviness (W_{ca}) and image clarity (DOI value)

α : Divided width of inclination angle
 Z : Inclination
 $W_{2\alpha}$: Total of T when $|Z| \leq 2\alpha$

Fig. 9 Definition of flat area fraction ($W_{2\alpha}$)Fig. 10 Relationship between flat area fraction ($W_{2\alpha}$) and image clarity (DOI value)Fig. 11 Relationship between parameter F_e and image clarity

塗膜によって平滑化しやすい鋼板の表面粗度として中波長粗度成分の除去が効果があることが明らかとなったが、鋼板の表面粗度の中に占める平滑部の割合が大きければ、やはり塗装後も平滑性が向上し鮮映性が改善されると考えられる。鋼板の表面粗度測定結果から Fig. 9 に示す平坦度面積率 $W_{2\alpha}$ を測定し鮮映性との関係をしらべた。結果を Fig. 10 に示す。中波長粗度成分と同様に鮮映性との強い相関が認められ、両者が鮮映性に影響を及ぼすと考えられる。

W_{ca} と $W_{2\alpha}$ および平均粗さの 3 者をまとめ、一つのパラメータ F_e 値を定義した。

$$F_e = R_a W_{ca} / W_{2\alpha}$$

この値と鮮映性との関係を Fig. 11 に示す。種々の鋼板の塗装後の鮮映性と F_e 値は強い相関が認められた。

5 従来ダル加工技術でのうねり発生原因と塗装後の影響

従来ダル加工技術による鋼板表面粗度には種々の波長の粗度成分が混在し、とくに中波長以上の粗度成分（うねり成分）が鮮映性に悪影響を及ぼしていると考えられる。一般的なダル加工法であるショットブラスト法は、ランダムな粗度をロール表面に付与しスキンパス圧延によって鋼板に転写する技術である。マクロに粗度を見れば均一と考えられるが、局部的には不均一な粗度でうねりを構成している。この原因は、プロセスがランダムであるがゆえに避けられないゆらぎによる粗度加工の不均一性が短いスパンで顕在化するためである。

この状態をコンピュータシミュレーションで再現した結果を Fig. 12 に示す。実際の粒度分布にしたがって異なる大きさのグリッドを乱数表により、ランダムにロール表面に衝突させ、グリッドの大きさに対応したダメージファクターでロールが加工されるとして計算した結果である。投射粒子数が多くなるほど、つまり、ショットブラスト加工時間が長くなるほど、うねりが多くなる。つまり、このシミュレーション結果は、完全にランダムに投射しても、グリッドに粒径の分布がある時には統計的なゆらぎによってうねりが発生することを示唆している。他の原因として、ロール自身の材質特性を挙げることができる。

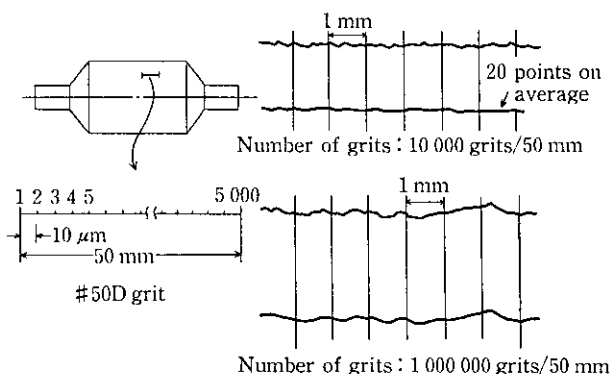


Fig. 12 Computer simulation on the generation of waviness by random shot-blasting

ロールは鋳造後の凝固時に樹脂状晶を形成し、鍛造時にこれが回転して、特有のデンドライト模様ができる。この模様のピッチは、数百 μm であり、模様に沿って硬度の差が生じる。このことが、ショットブラストのような塑性加工に対しては塑性加工能の差としてあらわれ、数百 μm ピッチのうねりを発生させる。ショットブラストではこの二つの現象によってうねりが発生するものと考えられる。このようなうねり成分の発生はダル加工原理の本質的な問題であって、その除去は不可能である。放電ダル加工においてもランダムな加工法であることにおいては共通であり、うねりの存在は避けられない。

鮮映性の改善に効果のある平坦度面積率の制御についても、ランダムなプロセスでは不可能であり、ショットダル加工前のロールのブライต์面がダル加工後も残ることはない。このような中波長以上の粗度成分は、塗装後も平滑化することができずに塗装面の粗度として残り、塗装後の鮮映性に悪影響を及ぼす。

6 レーザーによるロール粗面化法とその特徴

レーザーダルは従来のダル加工技術と異なり、制御された規則的な凹凸をロール表面に付与する加工法であり、ランダムプロセスであるショットダル加工技術とは本質的に異なる。レーザーダル加工機の概要を Fig. 13 に示す。ダル加工には CO_2 レーザー（赤外線レーザー）を使用し、レーザービームをチョッパーでパルスビームに変換した後レンズを通して回転しているロール表面に集光する。ロール表面の集光部は瞬間的に加熱溶融し、ブールを作る。レーザービームの斜め横から吹き付けるアシストガス（酸素）の圧力によって、溶融ブールは凹状に形成される。この時間は数 ms の短い時間である。その後、ロール母材により急速に冷却されロール表面には周囲にフランジを持ったマイクロクレータが形成される (Photo 1)。

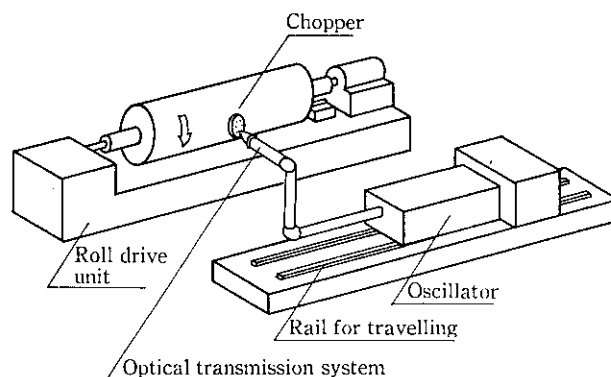
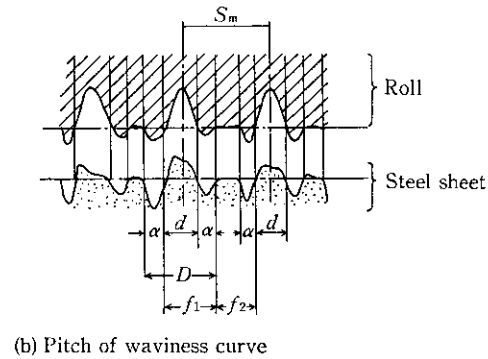
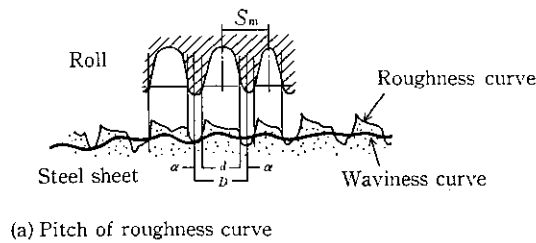


Fig. 13 The schematic illustration of the laser texturing facility

レーザーダルはこのマイクロクレータが無数に配列した凹凸から構成されており、ロールの回転数とチョッピング周波数、レーザー出力をコントロールすることによって、ロール表面に任意の大きさのクレータを、任意のピッチで規則的に配列することができる。この結果、レーザーダルにおいては、粗度 (R_a , R_z), PPI, うねり波長を完全に制御できる。すなわち、レーザーダルを構成している粗度波長は、Fig. 14 に示すように、クレータ径 (D), 間隔 (S_m) によって決まり、これ以外の粗度波長は原理的に発生しない。すなわち、レーザーダル加工技術を応用すれば、鋼板の表面粗度プロフィールを塗装鮮映性に有害な波長成分が発生しないように設計し、制御できる。

7 レーザーミラー鋼板

レーザーダル加工技術を応用した鋼板として、高鮮映性鋼板「レーザーミラー」を実用化した。従来のショットダル鋼板およびレーザーミラー鋼板の典型的な三次元粗度測定結果および三次元うねり曲線（高域カットオフ値 0.8 mm, 低域カットオフ値 8 mm）をあわせて Fig. 15 に示す。ショットブラストダル鋼板では粗度曲線がランダムで、うねり曲線もかなり明確に認められる。それに対してレーザーミラー鋼板ではうねりがほぼ消えているのがわかる。同様の試料について粗度測定結果の周波数解析によって、鋼板粗度を構成している波長成分を解析した結果を Fig. 16 に示す。鮮映性に有害と考えられる中波長成分の割合が他のショットダル鋼板と比較して低いことがわかる。実際に塗装をほどし、塗装面の鮮映性を DOI



$$f_1 = D - \alpha = D - \left(\frac{D-d}{2} \right) = \frac{D+d}{2} \approx D$$

$$f_2 = S_m - (d + \alpha) = S_m - \left(d + \frac{D-d}{2} \right)$$

$$= S_m - \frac{D+d}{2} \approx S_m - D$$

Fig. 14 Waviness wavelength control by laser texturing dull process

値で比較した結果を Fig. 17 に示す。平均粗さでまとめた場合、同じ平均粗さでも、その中に占める中波長成分が低いこと、さらに平坦度面積率が高いことによって、レーザーミラー鋼板の塗装後のDIO値は従来ショットダル鋼板より4~5ポイント高くなっている。Photo 2 はレーザーミラー鋼板の写像性を従来鋼板の場合と比較するため塗装後の表面に風景を写した結果である。塗装表面の写像のエッジ部分は明らかにレーザーミラーの方がシャープであり歪みが少ないことがわかる。

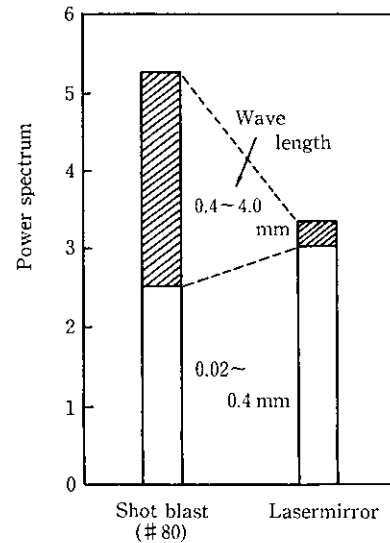


Fig. 16 Frequency components in surface roughness of LASERMIRROR and shot-blasted dull steel sheets

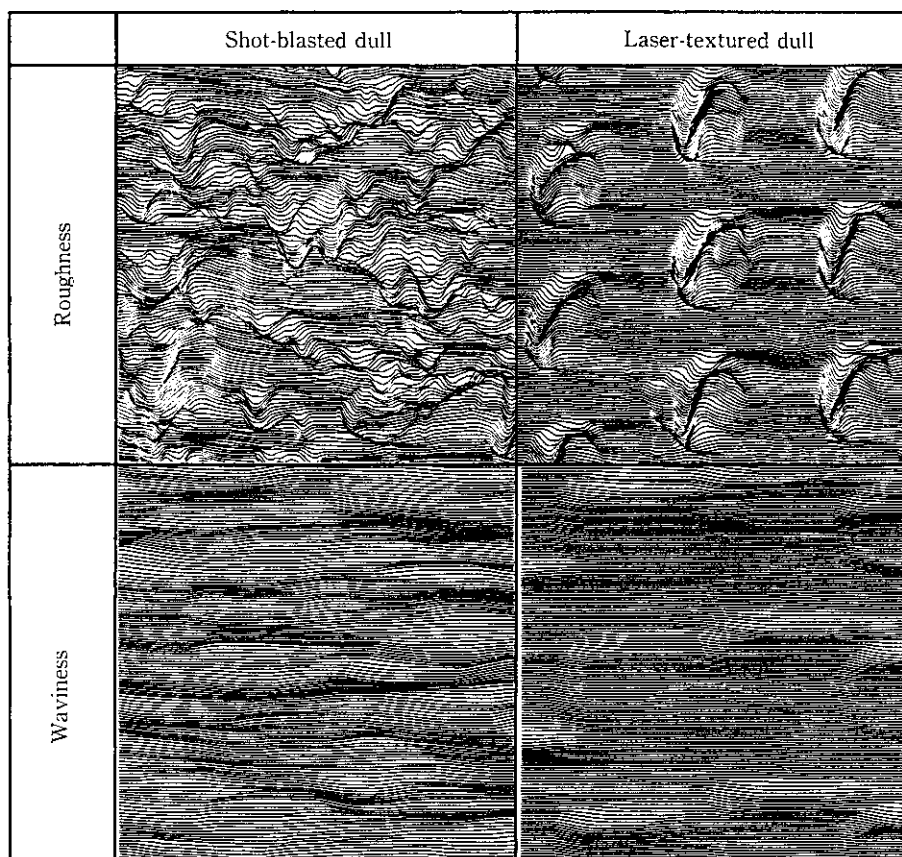
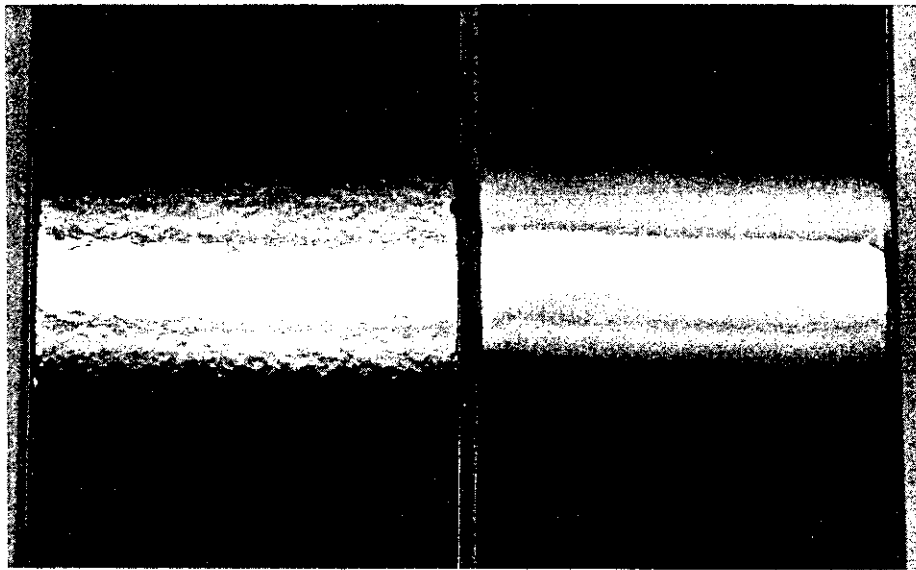


Fig. 15 Three dimensional surface roughness and waviness of LASERMIRROR and shot-blasted dull steel sheets



Shot blasted dull sheet

Lasermirror

Photo 2 Comparison of reflected images on finished after coating between LASERMIRROR and shot-blasted dull steel sheets

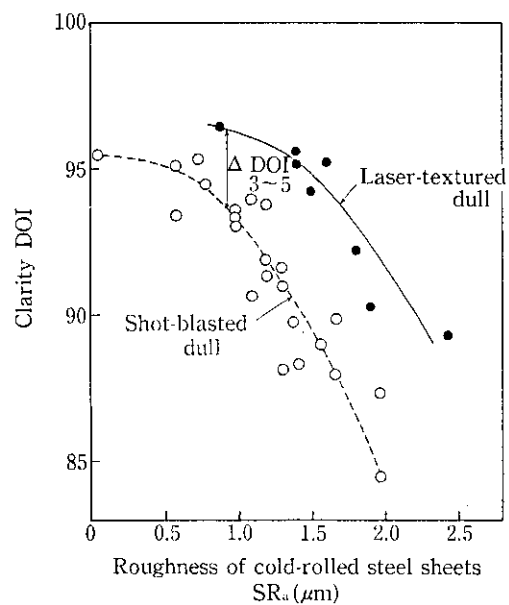


Fig. 17 Comparison of image clarity between LASERMIRROR and shot-blasted dull steel sheet surface painted 3 coat

8 結 言

レーザーダル加工技術を応用し、鋼板の表面粗度プロファイルを制御することによって、高鮮映性鋼板「レーザーミラー」を開発した。この結果は以下のとおりである。

- (1) 冷延鋼板の微視的表面構造を規定する要因の中で、粗さの中波長以上の成分と平坦度面積率が塗装後の鮮映性に大きな影響力を持つことが明らかになった。
- (2) これらの指標を粗さと独立に制御できるレーザーダル加工技術を応用して、塗装後鮮映性を向上させるために最適な表面構造を有する高鮮映性鋼板、レーザーミラーを開発した。
- (3) レーザーミラーは、従来鋼板と比較して、塗装後の鮮映性(DOI値)は約3~5ポイント高い値が得られた。

参 考 文 献

- 1) 古川武司, 谷本義雄: 塗装工学, 19 (1984), 284
- 2) T. G. Nilan, B. M. Perfetti and B. J. Scialabba: SAE Tech, Paper Ser, No. 800208 (1980)
- 3) 薄鋼板成形技術研究会編: プレス成形難易ハンドブック, (1987), 239, [日刊工業新聞]
- 4) J. Crahay and A. Bragard: Proc. 12th IDDRG Congress, (1982), 153
- 5) 藤原輝男: 自動車技術, 41 (1987), 601