

(論文)

リジグマークの定量評価技術

Quantitative Evaluation Technique for Ridging Marks



市川武志

Takeshi ICHIKAWA

In general, ridging marks, one of the defects found on the surfaces of aluminum alloy sheets, are sensory evaluated by visual check. This evaluation, however, suffers from large variations and is difficult to adapt for quantitative measurement. To resolve this issue, a technique, utilizing Fourier analysis, has been developed for evaluating ridging marks quantitatively and easily. The surface roughness of a deformed sheet has been analyzed, and as a result, it has been confirmed that a surface exhibiting strong ridging marks has a prominently strong wave component at a wave-length of 1 to 5mm in the rolling direction. On the basis of this knowledge, the ratio of average surface roughness to the intensity of directional pattern along the rolling direction has been assumed to be an indicator of ridging marks, which has turned out to be consistent with the trend of visual evaluation. It has also been shown that the evaluation can be performed by image capture using a camera, instead of roughness measurement.

まえがき = 近年、乗用車に対する燃費規制の厳格化を背景として車体の軽量化ニーズが高まっており、とりわけ大幅な軽量化を実現できるアルミニウム合金の活用への期待は大きい。なかでも、6000系アルミニウム合金板は、耐食性、成形性が比較的高く、しかも焼付塗装後に強度が向上する特性を有するため、ボンネットやサイドドア、ルーフなどの車体外板部品の素材として採用が拡大しつつある。

しかしながら、一部の6000系合金板は、強い引張変形を受けると圧延方向に沿って筋状の模様が表面に現れる。こうした現象はリジグマークもしくはローピングと呼ばれ、高い外観品質を要求される車体外板部品においては品質不良と見なされる。リジグマークは特定方位の結晶組織が帯状に集積することで生じるとされており^{1)~4)}、熱処理条件の適正化によるリジグマーク抑制の検討が進められている。いっぽうで、リジグマークは目視による官能評価で判定されるのが一般的であり、見る人や環境によって判定が左右される。このため、詳細な判定が困難で、上記の検討を妨げている。また、生産現場の品質管理においても同様の課題を抱えていることもあり、リジグマークの定量的な評価方法の確立が求められる。

リジグマークは表面の荒れが筋模様を形成しているか否かで判定され、表面粗さの大きさとは必ずしも関係がないため、Raなどの一般的な表面形態パラメータでは表現できない。A.Guillotinらは、砥石掛けした板表面の画像に対して周波数解析を行い、リジグマークとそれ以外の表面粗さ要素を分解して両者の大きさの比からリジグマークを定量的に表現できることを示した⁵⁾。

またC.Schäferらは、3次元表面粗さ測定機を用いて測定した表面粗さを周波数解析し、同様にリジグマークを評価できることを示した⁶⁾。

本稿では、これまであまり議論されていなかった、リジグマークを特徴づける筋模様の波長や方向を明らかにしたうえで、リジグマークを高い精度で数値化できることを示した。また、上記の手法をより簡素な設備によって実現させることを目標とし、非破壊的かつ簡便な測定手法を新たに提案した。

1. 試験条件

1.1 試料

本試験では、リジグマークの発生程度が異なる8種のAA6022アルミニウム合金板を試料として用いた。対象の板は、板厚がいずれも1.0mmで、200×40mmに切断したうえで圧延方向(RD)に直交する方向(TD)へ引っ張り、15%のひずみを与えた。その後、リジグマークの程度を目視評価で3段階(良好: Good, 中間: Marginal, 不良: Poor)に分類した。目視評価の結果、良好評価の試料は2種、中間評価の3種、不良評価の試料は3種だった。以下、良好評価の試料をG1およびG2、中間評価の試料をM1、M2およびM3、不良評価の試料をP1、P2およびP3と表記する。なお、M2などの表記における数字が大きい試料ほど、同一評価段階内ではリジグマークが小さいことを意味する。

1.2 表面形態の測定手法

1.2.1 3次元表面形状の測定

3次元表面粗さ測定機Contour-GTを用いて試料の表面形状を測定した。測定範囲は30mm四方、測定点ピッ

チは14 μ mとし、試料一つあたり3か所測定した。取得した表面形状は、リジグマークと関係ない粗さ要素を除くため、ガウシアンフィルタを適用した。ガウシアンフィルタのカットオフ値は、長波長側を5mm、短波長側を0.5mmとした。最後に、ガウシアンフィルタの効果が小さい外周部を除き、内側の26mm四方のみを分析データとして用いた。

1.2.2 連続写真撮影による表面形状測定

上記の表面形状測定に加え、より簡便な装置によるリジグマークの評価を実現するため、カメラ撮影による表面形状の測定を試みた。引張変形後の試料を塗装し、蛍光灯にかざした状態での外観写真を図1に示す。反射光の強い領域(図左側)の外周部に筋状の模様を確認できるが、その領域は狭く、リジグマークの評価に十分な広さとはいえない。

リジグマークは非常に浅い凹凸形状から成っており、反射光が板表面に対して特定の角度を成す場合のみ視認できるため、1回の撮影で広域の表面形態を得ることは難しい。そこで、図2に示すようにカメラと光源を固定し、試料を移動させながら撮影することによって複数部位の外観写真を得た。この撮影方法によって、領域の異なるリジグマーク模様が連続的に多数得られるため、それらの画像を合成することによって広範囲のリジグマーク撮影写真を得た。以降、得られた画像を連続撮影画像と呼ぶ。

1.3 フーリエ変換

3次元座標データ群や2次元画像にフーリエ変換を適用することにより、入力データを波長および方向の異なる複数の三角波画像に分解することが可能となる。一例として、図3(a)の2次元画像にフーリエ解析を行い、短波長成分を除去して出力すると、図3(b)のような長波長成分のみ抽出した画像が得られる。また、横方向

Ridging patterns to appear only in this area

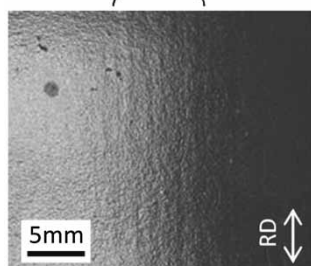


図1 リジグマークが発生した表面の外観写真
Fig.1 Photo of surface with ridging patterns

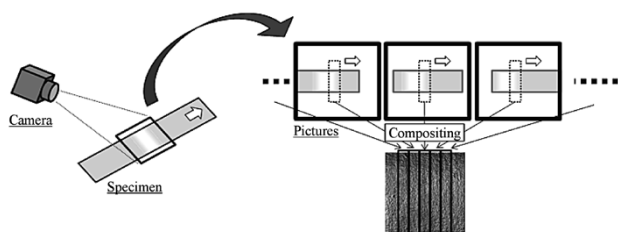


図2 外観写真の撮影および合成手順
Fig.2 Schematic illustration for composite pictures

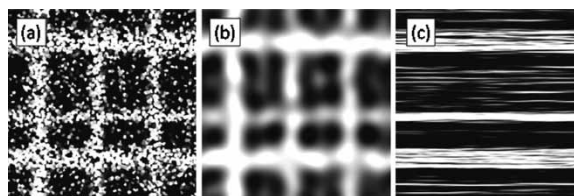


図3 フーリエ変換例 (a) 元画像, (b) 長波長成分のみ抽出した画像, (c) 縦方向に走る波形成分のみ抽出した画像

Fig.3 Examples of Fourier transformation (a) Input image, (b) Long wavelength component of image, (c) Vertical wave component of image

に走る波形成分を除去し、図3(c)のように縦方向へ走る波形成分のみを強調させることも可能である。

取得した表面形態データに対してこうした分析を行うことによってリジグマークを抽出し、その強度を評価した。

2. 試験結果

2.1 3次元粗さ測定結果

3次元表面粗さ測定機を用いて取得した試料の表面形状を図4に示す。不良評価である試料P1には、TD方向に向かって山部と谷部が連続する波形状(圧延方向に沿った筋模様)が確認できる。いっぽう、中間評価の試料M3はP1よりも筋模様が薄くなっており、さらに、良好評価の試料G3は筋模様がほぼ確認できず、凹凸がランダムに分布している。

2.2 連続写真撮影による表面形状測定結果

連続写真撮影法によって得た試料表面の連続撮影画像を図5(a)に示す。また、同一の位置で3次元表面粗さ測定機を用いて測定した表面形状、および表面形状から算出したTD方向に対する傾斜度分布をそれぞれ図5(b)、図5(c)に示す。TD方向に対する傾斜度とは、図5下部に示すように、測定した表面形状をRD方向に直交する平面で切断し、得られる断面における表面形状曲線に対する接線とTD方向軸が成す角度を指す。図5(c)の傾斜度分布は、図5(b)の粗さ分布を傾斜度に変換したものである。

連続撮影画像(図5(a))も表面形状(図5(b))と同様、不良評価の試料P1に筋模様が確認できる。また、連続撮影画像はTD方向に対する傾斜度分布(図5(c))と見た目がよく似ている。撮影画像は、対象の表面に映る光源からの反射光の強さを表したものであり、反射光の強さは、光源およびカメラの位置、表面形状の傾斜角で決まる。したがって、連続撮影画像は表面の傾斜度分布を表現したものと見える。

2.3 フーリエ変換を用いた表面形状の分析

リジグマークを波形の集合と見なすことによって表面形状に対するフーリエ変換を行い、リジグマークを表すと考えられるTD方向に走る波形成分を抽出した。試料P1およびG3の表面形状、その表面形状からTD方向に走る波形成分のみを抜き出した画像、およびTD方向以外の成分の画像を図6に示す。リジグマークの顕著な試料P1のTD方向に走る波形成分は、試料G3と比べてコントラストが強く、長い波長を有することが分かっ

た。そして、TD、RDおよび45°方向に走る波形成分の強度-波長関係を図7に示す。試料P1では、波長1~5mmでTD方向に走る波形の強度がとくに強いことか

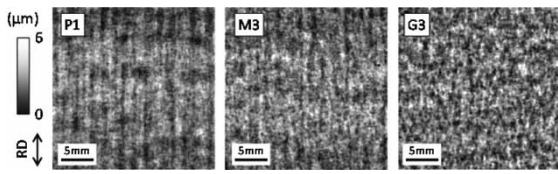


図4 3次元表面粗さ測定機で測定した表面形状

Fig. 4 Surface profile maps measured with three-dimensional surface coarseness measuring device

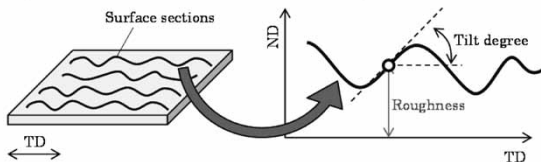
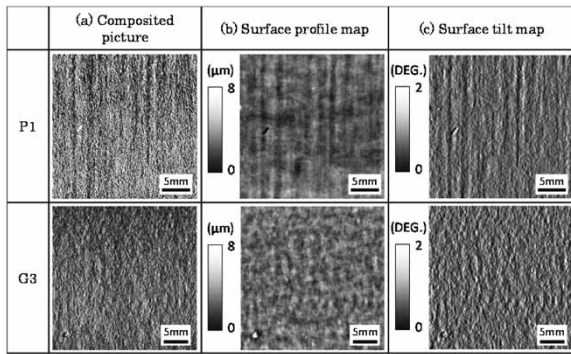


図5 試料表面の (a) 連続撮影画像、(b) 表面形状、および (c) TD方向に対する傾斜度分布

Fig. 5 (a) Composite picture of surface, (b) surface roughness map and (c) tilt degree of surface profile sections cut by perpendicular plane to RD

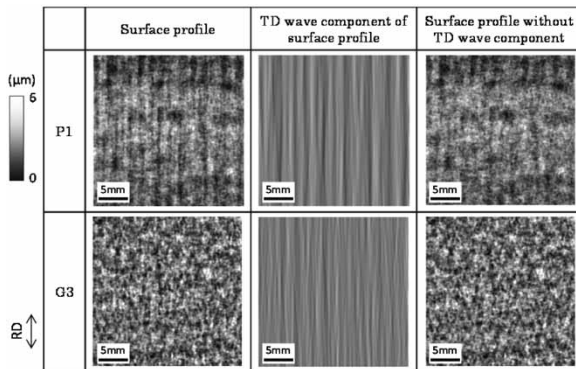


図6 試料P1の表面形状、そのTD方向の波形成分、およびTD方向以外波形成分

Fig. 6 Surface profile map, TD wave component of surface profile, and surface profile without TD wave component

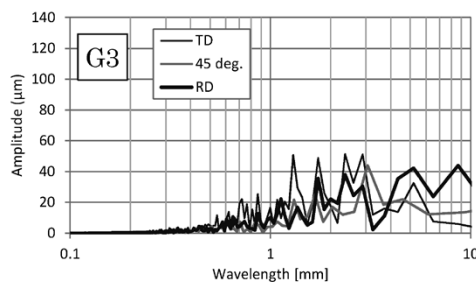
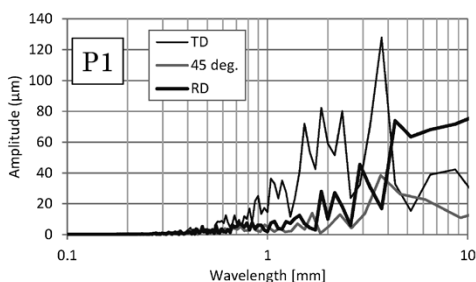


図7 TD、RDおよび45°方向に走る波形成分の強度-波長関係

Fig. 7 Relationship between amplitude and wavelength of wave components along TD, RD and diagonal direction

ら、これがリジングマークと認識される波長成分であると考えられる。

つぎに、表面形状から波長1~5mm以外の波形成分を除去したうえで、波形成分をRD方向に対する角度ごとに分類し、それぞれに含まれる波形成分の振幅を合算した。波形方向ごとの波形成分の合算振幅強度分布を図8に示す。試料P1はRD方向の波形成分に強度が集中しており、リジングマークの特徴が強く表れている。これに対して試料G3は平均的な方位分布を示している。すなわち、方位分布の集中度からリジングマークの程度が表現できる。

各試料における方位分布の全体平均強度、およびピーク周辺5度の平均強度(以降、ピーク強度と呼ぶ)を図9に示す。不良評価の試料P1、P2は全体平均強度に対してピーク強度が突出して高い。これに対して中間評価の試料M3は、試料P1、P2に近いピーク強度を有しているが、全体平均強度も高い。これは、TD方向に走る波形成分がそのほかの方向の波形成分に隠れて目立たなくなっていることを示している。良好評価の試料G1~G3はピーク強度と平均強度の差は小さく、ほぼ等方的な形状といえる。

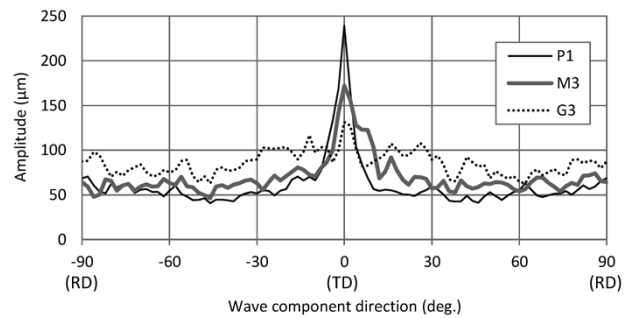


図8 表面粗さに含まれる波形成分の強度-方向関係(波長1~5mmの波形成分のみ)

Fig. 8 Relationship between intensities of pattern and directions of wave components (wavelength: 1-5mm)

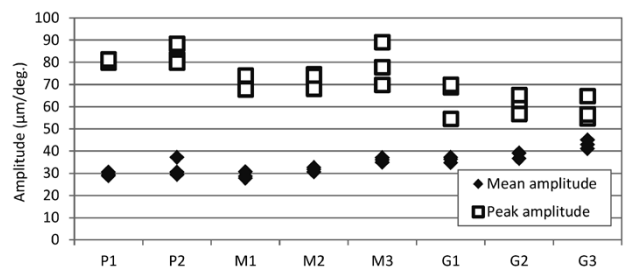


図9 各試料の全体平均強度とピーク強度

Fig. 9 Mean and peak amplitudes of specimens

リジグマークの強さを一つの値で数値化するため、ピーク強度を平均強度で除した値を指標値とした。各試料の指標値を図10に示す。指標値の傾向は、目視による評価と一致することが分かった。

2.4 フーリエ変換を用いた連続撮影画像の分析

2.3節と同様の分析を連続撮影画像に対して行った。得られた波形成分の強度－波形方向の分布を図11に、リジグマーク指標値を図12に示す。いずれも目視評価と同じ傾向を示しており、外観画像でも表面形状と同様に評価が可能であることを確認した。

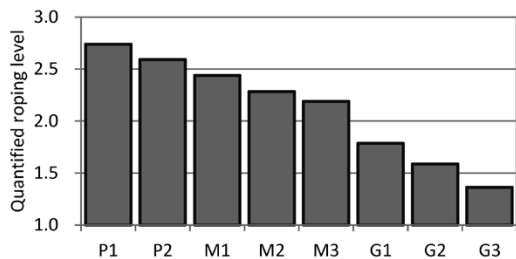


図10 各試料のリジグマーク指標値
Fig.10 Quantified ridging level of specimens

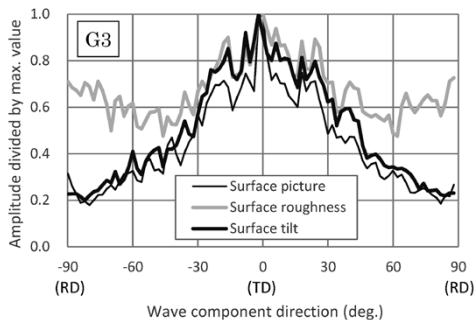
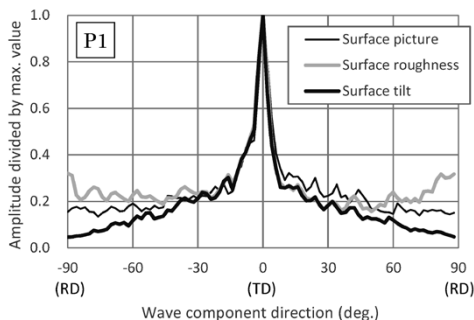


図11 連続撮影画像、表面形状およびTD方向傾斜分布に含まれる波形成分の強度－波形方向分布

Fig.11 Distribution of normalized amplitude of surface appearance picture, surface profile and surface tilt as a function of component direction

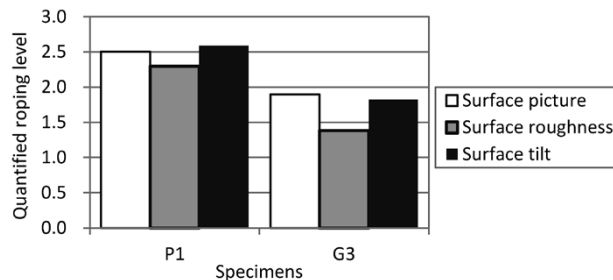


図12 リジグマーク指標値

Fig.12 Quantified ridging level evaluated by different input image to Fourier transform

むすび＝変形させた6000系アルミニウム合金板の表面形状を3次元表面粗さ測定機で測定し、これに対してフーリエ変換を活用した独自の手法を用い、リジグマークと認識される波形成分の抽出および分析評価を行った。その結果、1～5mm程度の波長でTD方向に走る波形成分を強く含む表面形状ほどリジグマークとして強く認識されることを確認した。この知見をもとに、TD方向に走る波形成分の強度と全波形成分の平均強度との比をリジグマーク強さの指標として提案した。この指標は、目視評価の傾向と一致した。さらに、この評価手法は、表面形状だけでなく表面外観を撮影した画像に対しても有効であり、3次元表面粗さ測定機のように複雑な装置を用いることなく評価できることを示した。

参考文献

- 1) H. Jin et al. Mat. Sci. and Tech. 2005, Vol.21, No.4, p.419-428.
- 2) 高木康夫ほか. 軽金属学会第116回春期大会講演概要. 2009, p.127-128.
- 3) 小西晴之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.2, p.39-42.
- 4) 池田賢一ほか. 軽金属. 2014, Vol.64, No.8, p.353-360.
- 5) A. Guillotin et al. Mater. Charact. 2010, Vol.61, p.1119-1125.
- 6) C. Schäfer et al. Int. J. Mater. Res. 2015, Vol.3, p.248-257.