

連携記事

世界最小の結晶粒を持つ 超精密加工用ステンレス鋼板

The World Finest Grained Stainless Steel Sheet for Micro-fabrication

渋谷将行
Masayuki Shibuya

新日鐵住金(株)
特殊ステンレス商品技術室
室長

1 はじめに

スマートフォンに代表される携帯型の電子機器では、高性能化と同時に可搬性を高めるための薄型化が強く要求されている。薄型化の実現には、内蔵される各種電子部品の薄型化だけでなく、これらの部品を必要最小限のはんだで薄くかつ確実に基板に接続することが重要となる。

電子部品を接続するためのはんだは、スクリーン印刷の要領で溶剤ペースト（微細なはんだ粉末とフラックスの混合物）として基板上に供給され、その版となるスクリーンマスクの精度向上が表面実装技術の重要なポイントとなっている。高い精度が求められるスクリーンマスクでは、機械的強度に優れた金属板が使用され、メタルマスクと呼ばれている¹⁾。

本稿では、メタルマスクの母材となる精密加工用ステンレス鋼板に要求される特性とその技術的背景および結晶粒の細粒化により精密加工性を改善し、最近の電子機器で求められている薄型化と信頼性向上に寄与している超精密加工用ステンレス鋼板について紹介する。

2 メタルマスク用ステンレス鋼板

メタルマスクでは、耐食性や強度に優れたSUS301やSUS304といった準安定オーステナイト系ステンレス鋼板が多用されており、板厚0.08mmから0.2mm程度のステンレス鋼板の不要部を除去することで製造されている。鋼板には、平坦で板厚精度に優れ、加工後も使用中も形状が安定していることやキズや変形に耐える強度が求められている。

実装密度が高いスマートフォン等の用途では、溶剤ペーストの供給量が少ないため、その製造で使用されるメタルマスクには厚さ0.1mm程度の比較的薄いステンレス鋼板

が用いられる。

図1にはんだ印刷用の穴が開けられ、フレームにセットされたメタルマスクの外観を、図2にレーザーによる穴加工部の拡大を示す。

2.1 メタルマスクの加工方法

メタルマスクの穴開けの加工は、鋼板を变形させないために、フォトリソ加工やレーザー加工で行われている。

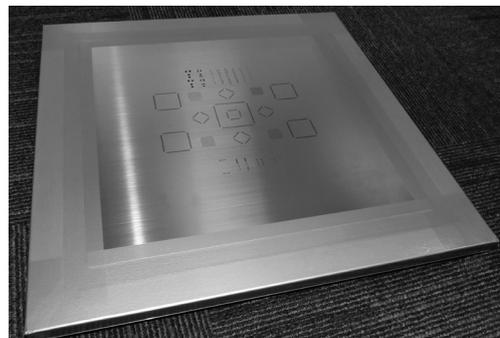


図1 メタルマスクの外観（テストパターン）

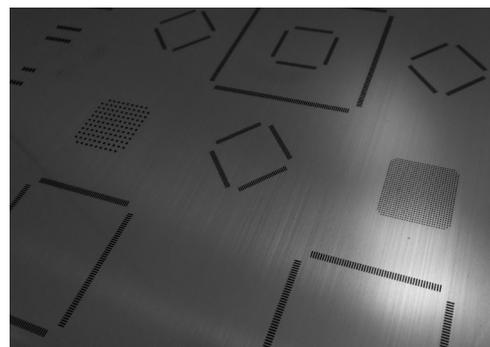


図2 レーザー加工メタルマスクの表面（テストパターン）

フォトエッチング加工とは、フォトリソグラフ技術を用いて耐食性を有する保護被膜パターンを金属板上に形成し、金属が露出した不要部を塩化第二鉄水溶液で選択的に化学溶解除去する加工法である²⁾。一方、レーザー加工とは、レーザー照射による熱エネルギーを用いて、不要部を選択的に熔融除去する加工法である。量産性ではフォトエッチング加工が優れるが、少量多品種への対応力ではレーザー加工が勝る。また、板面に対して垂直な穴を精密に加工することに関しては、直線性に優れるレーザー加工が有利であるが、フォトエッチング加工では表裏面の保護被膜のパターンを変えらることで、メタルマスクの断面形状をある程度制御することができる。最近では、フォトエッチング加工とレーザー加工を組み合わせ、制御された断面形状と垂直なレーザー加工部を持つ高機能なメタルマスクも実用化されている。

レーザー加工技術の進展により、比較的小型で高性能なレーザー加工機が普及し、高精密なメタルマスクも短時間で製造できるようになったため、レーザー加工によるメタルマスクが増加している。図3にメタルマスクの製造に使用されるレーザー加工機の外観を示す。



図3 メタルマスク用レーザー加工機の外観

2.2 形状矯正と残留応力

メタルマスク用のステンレス鋼板には、平坦で残留応力が小さく、パターン加工後の変形量が小さいことが求められる。

メタルマスク用のステンレス鋼板では、圧延で平坦な形状を確保すると共に、調質圧延後にテンションレベラ（以下T/L）等の形状矯正装置を使用して、さらに平坦な形状に矯正される。T/L矯正は板材の平坦化に大きな効果を発揮するが、材料内部に残留応力が蓄積されるという問題がある。後加工でステンレス鋼板の一部が除去されたり、レーザーの熱で部分的に応力が解放されると、残留応力のバランスが崩れて製品が反ったりねじれたりすることがある。特に板材の片面側だけを除去する加工（ハーフエッチング加工）がなされた場合には、板が大きく反るという問題がある。そこで、T/L矯正後には、残留応力の除去・緩和を目的としてストレス・レリーフ（以下S/R）処理と呼ばれる比較的低温での熱処理が実施される。残留応力の除去には高温でのS/R処理が有利だが、処理温度が高いと材料が軟化するため、適切な熱処理条件が選択される。

図4に調質圧延材とT/L処理のままの材料およびT/L処理後にS/R処理を実施した試験片（10mm×100mm）をハーフエッチング加工したときのエッチング溶解量と反り量の関係を示す。エッチングにより材料の片面側から表面層を除去していくと、板厚方向の応力バランスが崩れて反りが発生する。

T/L処理材のハーフエッチング加工後の反りは極めて大きく、丸くなっていることが確認できる。しかしT/L処理材にS/R処理を実施したS/R処理材では、反り量が大幅に低減し、圧延まま材よりも平坦になっている。

このように、T/L矯正と適切なS/R処理を組み合わせることによって、平坦で残留応力の小さい高強度の鋼板が実現でき、精密加工用材料として使用されている。

3 結晶粒の微細化

一般的なステンレス鋼の結晶粒径は20 μ m程度であり、マイクロメートル単位の精密加工を実施する際には結晶粒径が加

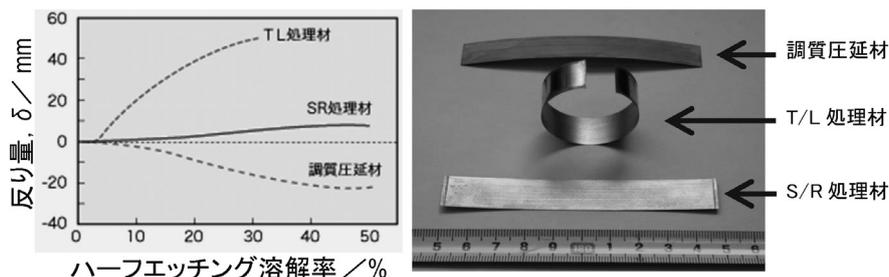


図4 ハーフエッチング後の反り量の調査結果

工の仕上りに影響を及ぼすことがある。化学的に溶解するエッチング加工では、材料の溶解速度が結晶粒内と結晶粒界で異なるため、加工後のエッチング面の仕上りは結晶粒径の影響を受ける。また、レーザー加工においても、結晶粒界の方が結晶粒内よりも融点が低く優先的に溶解するため³⁾、レーザー加工後の仕上りは結晶粒径の影響を受ける。従って、結晶粒の微細化は、エッチング加工とレーザー加工の両方において加工面の平滑化に有効であり、より精密な微細加工を可能とする⁴⁾。

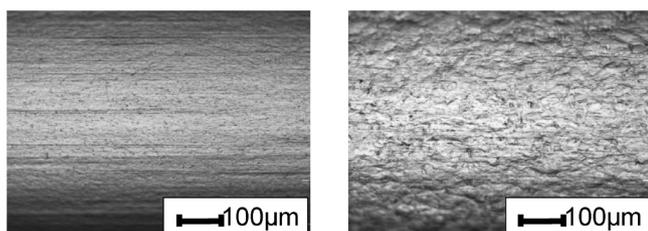
3.1 結晶粒の微細化技術

準安定オーステナイト系ステンレス鋼は、冷間圧延で生成した加工誘起マルテンサイトを比較的低温でオーステナイト組織に逆変態させることにより結晶粒の微細化が可能である⁵⁾。また、微量のニオブ(Nb)添加も有効である。ニオブ添加は、低温熱処理の際に、有害なクロム炭化物(Cr₂₃C₆)の析出を防止するだけでなく、ニオブの炭窒化物(Nb(C,N))が微細に析出することで粒界をピン止めし、結晶粒の成長を抑制する⁶⁾。

これらの機構を利用して細粒化したSUS301L系のばね材が、自動車のヘッドガスケット用材料として開発されている^{7,8)}。細粒材の適用は、機械的強度を改善するだけでなく、成形加工後の表面の肌荒れを防止して(図5) 疲労破壊の起点生成を防止するため、30%以上の疲労強度の改善を実現した。

3.2 細粒材の精密加工への適用

こうした細粒化技術と精密加工用材のS/R処理技術を組み合わせることにより、従来以上に精密加工に適したメタルマスク用材料が開発・実用化されている。



開発材 (NAR-301LHS1) 汎用材 (SUS301H)
図5 曲げ加工後の表面観察 (135度, R = 1mm, t = 0.2mm)

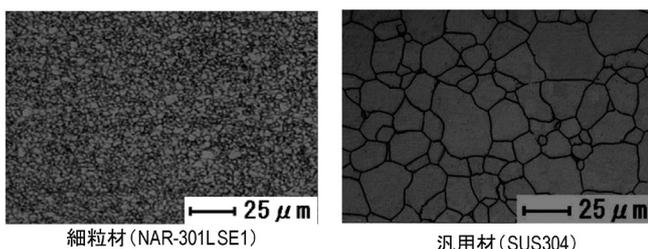


図6 断面ミクロ組織の光学顕微鏡写真

図6に結晶粒を微細化した精密加工用材料 (NSSMC-NAR-301L SE1; 以下SE1) と一般的なSUS304の焼鈍後の断面ミクロ観察結果を示す。一般的な材料の結晶粒径は20µm程度だが、SE1では1~2µm程度まで微細化されている。

図7にはSE1とSUS304のエッチング加工後のSEM観察結果を示す。通常のSUS304ではエッチング加工面が荒れているのに対して、SE1では細粒化の効果によって平滑なエッチング面が得られている。この平滑化の効果により、加工精度が向上するだけでなく、エッチング加工後に実施されていた電解研磨の工程が省略されるケースもある。

結晶粒の微細化は、レーザー加工性の改善にも寄与することが確認されている。

図8に結晶粒径が異なる材料のレーザー加工面を示す。エッチング加工と同様に、母材の結晶粒の微細化によってレーザー加工面が平滑になっていることが確認できる。細粒材では粒界密度が高いため、適切なレーザー加工条件の選択により、狙い通りのレーザーカットが可能となると共に加工時間の短縮も実現できる。

レーザー加工面の粗度が大きいと、寸法精度が低下するだ

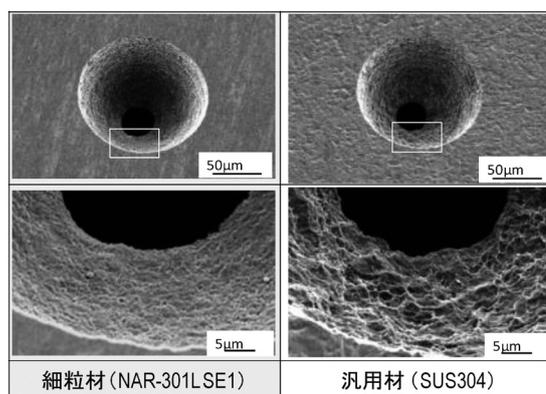


図7 エッチング加工面のSEM写真

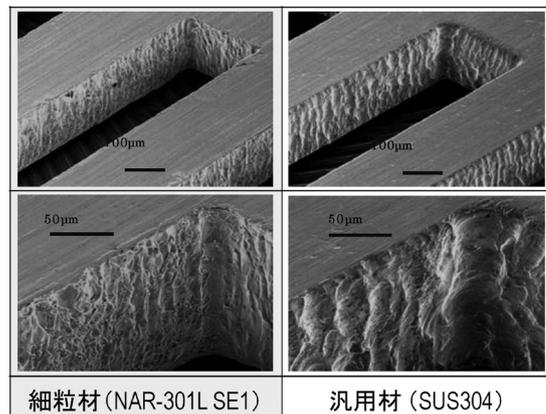


図8 レーザー加工面のSEM写真

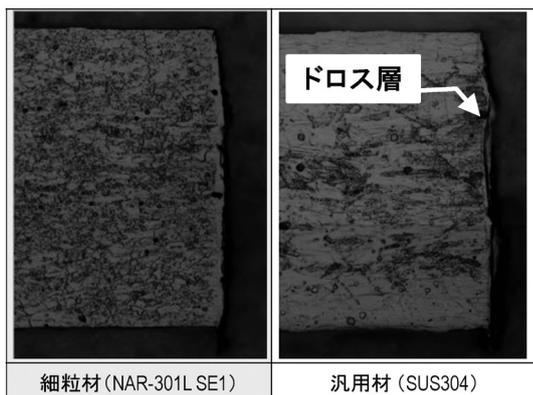


図9 レーザー加工部の断面マイクロ写真

けでなく、はんだ印刷を実施した際に異物や溶剤ペーストが付着しやすくなるため、操業安定性が損なわれるという問題もある。

図9はレーザー加工部の断面マイクロ観察結果である。加工面には、ドロスと呼ばれる加工熱により溶融・凝固した加工影響層が認められるが、結晶粒の微細化により、確認されるドロス層の厚みが薄くなっている。厚いドロス層は、後述の加工バリの原因となるため、薄いことが好ましい。

図10にはレーザー加工で生じた加工バリを示す。エッチング加工ではバリは発生しないが、レーザー加工では溶融した金属が溶け落ちる際にメタルマスクに付着して、このようなバリを形成することがある。

バリはメタルマスクとして使用する際に、スキージ（溶剤ペーストを刷り込むための“へら”）の円滑な動きを妨げる等の問題があるため、化学研磨や電解研磨によって除去されている。大きなバリが発生するとバリを溶解除去するための処理時間が長くなり、長時間の研磨によって開口部の寸法が変化してしまう等の問題があるため、加工時のバリの発生を抑制することが重要である。

4 SUS304の成分規格を満足する細粒化材

SUS301L系のステンレス鋼は結晶粒の微細化に適しており優れた特性が得られるが、最も一般的に使用されているステンレス鋼はSUS304であり、使用中のSUS304からSUS301L系への材料変更が容易ではないケースがある⁹⁾。

SUS304はオーステナイト組織の安定度が高いため、そのままでは前述の細粒化機構を十分に活用することが困難である。そこで、SUS304の成分規格範囲内で、炭素やマンガンといったオーステナイト安定化元素をできるだけ減らし、粒成

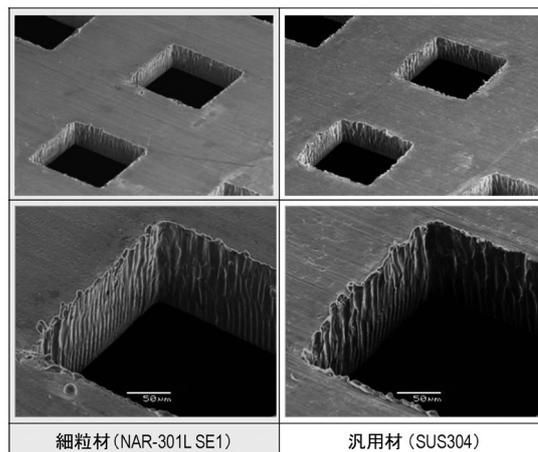


図10 レーザー加工部（加工裏面）のSEM写真

長を防止するニオブを添加した新しい成分系を採用し、製造工程を詳細に見直すことによって結晶粒を2 μm 程度まで微細化した材料が開発された。

細粒化による優れた特性を持つSUS304の実現により、既存鋼からの材料変更が容易となり、その採用が広がっている。

5 今後の展望

結晶粒の微細化は、延性低下の少ない材料強化法として古くから活用されてきたが、精密加工性の改善といった新しい機能が確認されて、その適用先は拡大している。

今後も高機能を実現する有力な技術の一つとして、結晶粒細粒化材の活用方法を検討していく。

参考文献

- 1) 渋谷将行：コンバーテック, 40 (2012) 7, 75.
- 2) 渋谷将行：まてりあ, 34 (1995) 9, 1068.
- 3) T.E.Hsieh and R.W.Balluffi：Acta Metall., 37 (1989) 6, 1637.
- 4) 澤田正美, 喜多勇人, 渋谷将行, 藤澤一芳：新日鐵住金技報, 396 (2013), 85.
- 5) 高木節雄, 谷本征司, 富村宏紀, 徳永洋一：鉄と鋼, 74 (1988) 6, 1052.
- 6) 鉄鋼と合金元素(上), 日本學術振興會編, (1971), 1115.
- 7) 桂井隆：Honda R&D Technical Review, 12 (2000), 151.
- 8) 安達和彦, 渋谷将行, 桂井隆：まてりあ, 47 (2008) 1, 36.
- 9) 藤澤一芳：素形材, 53 (2012) 1, 33.

(2015年5月29日受付)