

レーザープロセッシング応用便覧
 第4章 マクロレーザープロセッシング
 第11節

「その他の表面改質・加工実用例」

杳名 宗春

4.1 はしがき

レーザーによる各種材料の表面改質・加工には表1に示すように近年いろいろな加工法が開発され、実用化されている¹⁾。

表1 各種レーザー表面改質および加工法

区 分	レーザー表面改質		利用目的	
加熱プロセス	変態焼入れ		耐摩耗性・強度の向上 疲労強度の向上	
	アニーリング		残留応力の低下、結晶成長	
	溶体化処理(脱炭素化処理)		脱炭素化、耐食性の向上	
	歪付与(曲げ加工、歪取り処理)		部材の曲げ加工、歪取り	
溶融プロセス	合金化(高Si化、高Cr化、高Ti化、浸炭、窒化、過飽和固溶体の生成)		耐摩耗性、耐食性、耐酸化性、強度、靱性などの向上、新合金の生成	
	肉盛 (=クラッディング)		合金化と同様	
	表面溶融	通常凝固	コンソリデーション	溶射層の気孔率の低減、均質化
			溶接継手止端部処理	溶接継手の疲労強度改善
			ダブル加工	鮮映性鋼板の生産
			急速凝固 (=チル処理)	耐摩耗性、耐孔食性の向上、組織の微細化、均質化
超急速凝固 (=ドレージング)		非晶質化、新合金、耐食性の向上、組織の微細化、均質化		
蒸発プロセス	磁区細分化処理		鉄損の改善	
	衝撃硬化 <i>レーザーレーシング</i>		強度の向上 <i>表面硬化</i>	
	レーザー蒸着(セラミックスの蒸着など)		合金化と同様	
化学反応プロセス	レーザー化学蒸着		薄膜の生成	
	メッキ加速処理		メッキ反応速度の向上	

ここでは表面改質のなかで、表面硬化、アモルファス化、合金化、クラッディングを除いた、その他表面改質・加工として具体的な応用例を紹介する。

4.2 レーザーアニーリング

半導体素子のSiやGeにAs,B又はPにイオンを注入すると、表面層に非結晶層や転位ループが生じ、電気的特性上問題となる。そこで、これらを均一に結晶化し、転位を少なくすることをアニーリングと呼んでいる。図1にエキシマレーザー(波長308nm)でアニーリングしたときのB(ボロン)濃度の変化を示す。アニーリングにより結晶化が促進され、欠陥クラスターや転位ループも減少する²⁾。超電導材料のNb₃Al及びNb₃(Al,Ge)でテープを作成するために焼結されたこれら

の材料を0.3~4kWのCO₂レーザーで照射することにより、微細な組織を得て、遷移温度が18.6K及び20.1Kを得た。このとき、アニーリングは650℃~800℃で100時間なされた³⁾。

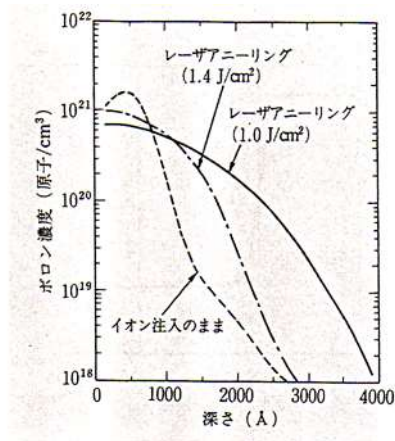


図1 T F Tの製造プロセスでのアニーリング²⁾

4. 3 レーザー溶体化処理（脱鋭敏化処理）

益本⁴⁾および中尾ら⁵⁾はオーステナイト系ステンレス鋼溶接継手の熱影響部のクロム炭化物の粒界析出による耐食性の低下を回復させるレーザー溶体化（脱鋭敏化処理, Desensitization）について報告している。劣化部分を1050℃以上に数10秒間加熱すると炭化物のマトリックスへの固溶が生じ、図2に示すように耐食性の向上が見られる。

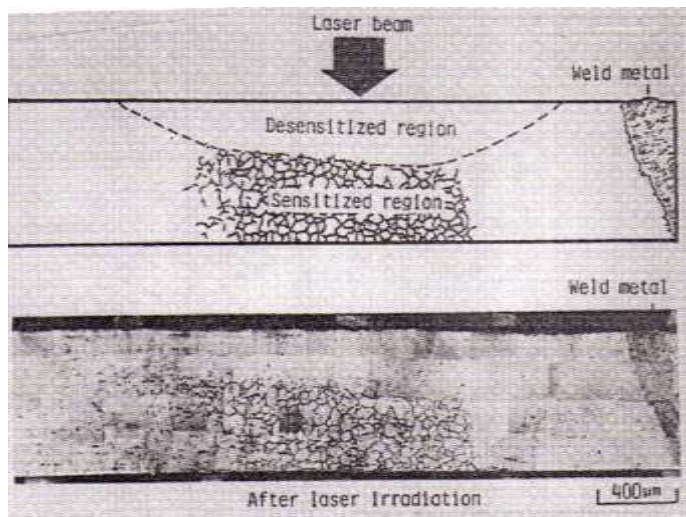


図2 レーザー溶体化によるステンレス溶接熱影響部の粒界腐食の防止
(上：模式図、下：断面写真)

4. 4 レーザー（曲げ）成形加工

金属の塑性加工は、プレス、ハンマー、圧延機、押出し機などにより機械的に外力を加えて行うのが通常である。これらの塑性加工は、エネルギー産業、重工業、自動車産業、航空宇宙産業などの金属部品製造、特に板金加工産業で幅広く用いられているが、スプリングバックや肉厚の不均一、高価なダイ(型)の製作、工具の摩耗損傷、微小部品への適用困難などの問題がある。造船や車両工業の分野では、複雑な形状の自由曲面部材があり、ガスバーナーなどによる線状加熱加工が行われている。しかし、線状加熱による鋼板の曲げ加工は、熟練技能者でのみ可能であり、その自動化については古くから数多くの研究がなされてきたが、まだ十分実用化されていない。そこで20数年前から、図3に示すようなレーザーを用いたレーザー曲げ加工法が研究開発されてきた。すでに、日本溶接協会HPL研究委員会の共同研究⁶⁾や中部大学の難波義治氏⁷⁾、MIT海洋工学科増渕興一氏と米国海軍技術研究所(Naval Research Lab.)との共同研究、名古屋大学⁸⁾、リバプール大学⁹⁾および千葉工業大学¹⁰⁾が、この研究を数年間にわたって行ってきた。

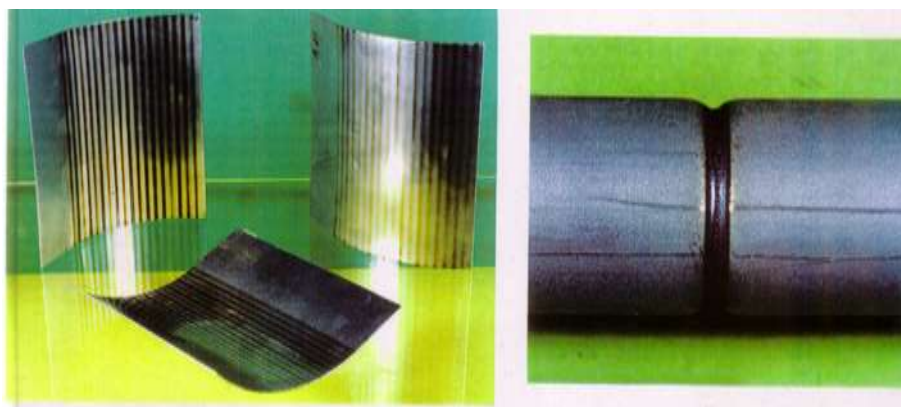


図3レーザー曲げ加工された鋼板

300WパルスYAGレーザーを用いて各種ステンレス鋼をレーザー曲げ加工した時のパス数と曲げ角度の変化を図4に示す⁸⁾。

このように材質が変化すると曲げ角度が大きく変化する。もちろん、炭素鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金、純銅など何れの金属でもレーザー曲げ加工が可能であることも確認された⁸⁾。

このレーザー成形の研究開発の結果、最近、一部実用化が始まっている。この加工には次のような特長がある：

- 1)スプリングバックや工具の摩耗がな いので、高精度の曲げ加

工が可能。

- 2)非接触の加工であるため、素材に外力や変形を与えることなく加工できる。
- 3)金型工具の長期保存に代わり、ソフトウェアとして容易に保管ができる。
- 4)数ミクロンオーダーの微細成形加工も可能である。

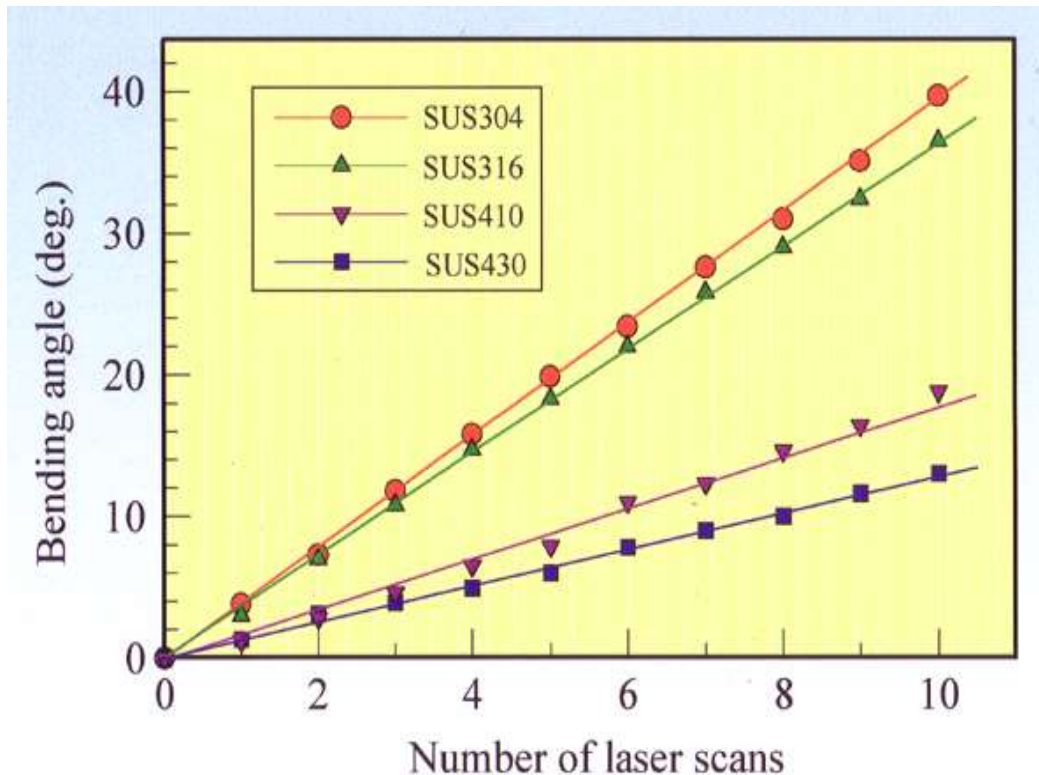


図4 各種ステンレス鋼板のレーザー曲げ加工におけるパス数と曲げ角度の関係例⁸⁾

これらの特長から、レーザーを用いた非接触成形加工法は、従来の方法では困難であった数十～数百ミクロンの部材についても微細な塑性加工が可能となりマイクロマーシニング分野での応用も可能であると思われる。造船業では船の曲げ外板が¹¹⁾、自動車産業ではワイパーの曲げ加工に¹²⁾、重工業ではパイプの曲げ加工にレーザー曲げ加工を応用しようと開発がなされた。図5はパイプの曲げ加工の実用例を示す¹³⁾。

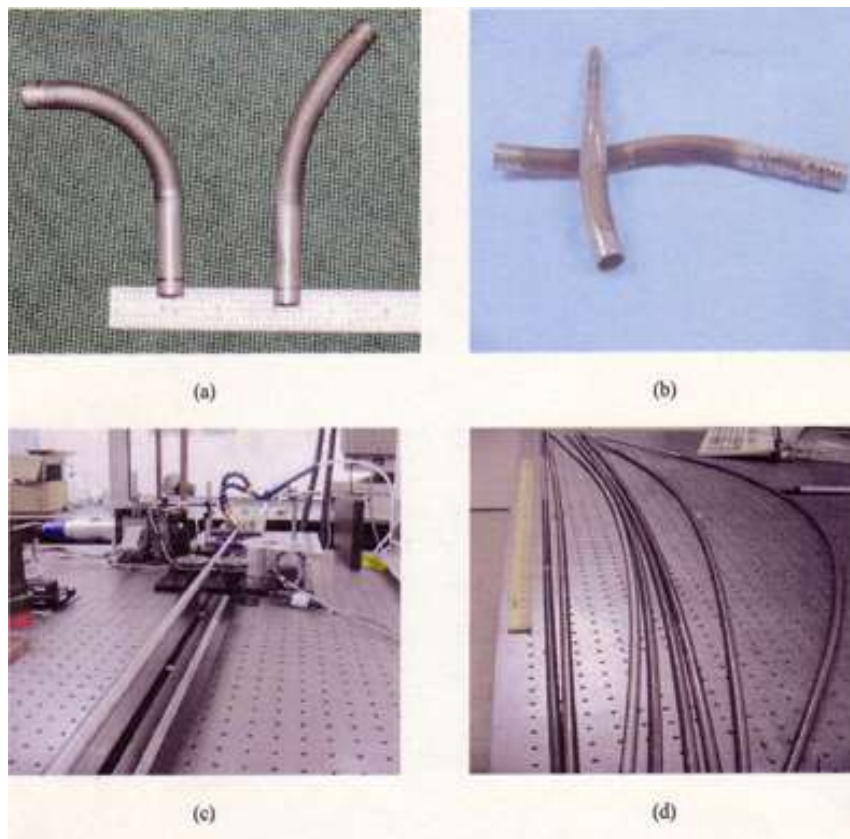


図5 精密なパイプのレーザー曲げ加工システム¹³⁾

4. 5 レーザ表面溶融

レーザー表面溶融（Laser Surface Melting）は溶加材も用いないで、材料表面を直接レーザーで溶融・凝固させると、金属組織や結晶粒の大きさが変わり、いろいろな効果が生まれる。図6には溶融後の冷却速度の違いと得られる金属組織を示す。急速凝固になると微細な樹枝状晶得られ、さらに速い冷却速度の超急速凝固では過飽和凝固組織やアモルファス（非結晶質）金属が得られる。

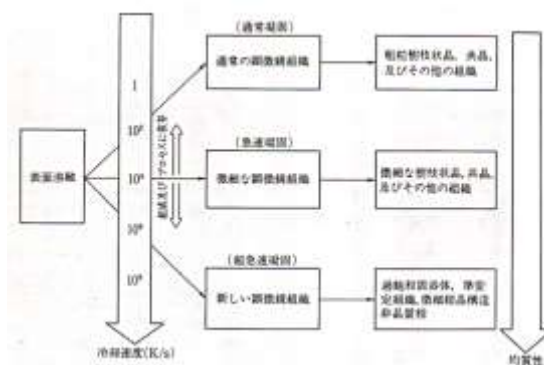


図6 溶融後の冷却速度の違いと得られる金属組織¹⁴⁾

後者をとくにレーザーグレージング (Laser Glazing) と呼んでいる。ステンレス鋼の表面溶融では耐食性や耐酸化性が向上することの確認されている。鋳鉄部品の表面溶融 (チル処理) により、レデブライト組織 (=オーステナイトとセメントタイトの共晶組織) に変態させ、耐摩耗性の著しい向上が図られ、実用化されている。この他に溶融プロセスとして、溶射層の気孔率の低減と均質化を図るレーザーコンソリデーション、自動車用鮮映性鋼板を生産するための圧延ローラーのダル加工、溶接継手の疲労強度改善のための止端部溶融処理などが検討されている。自動車用の鮮映性鋼板を生産するために圧延ローラーの表面に1ローラー当たり約8億点のディンプル (窪み) をダル加工する必要があるが、図7のようにレーザーダル加工を我が国では実用化している。

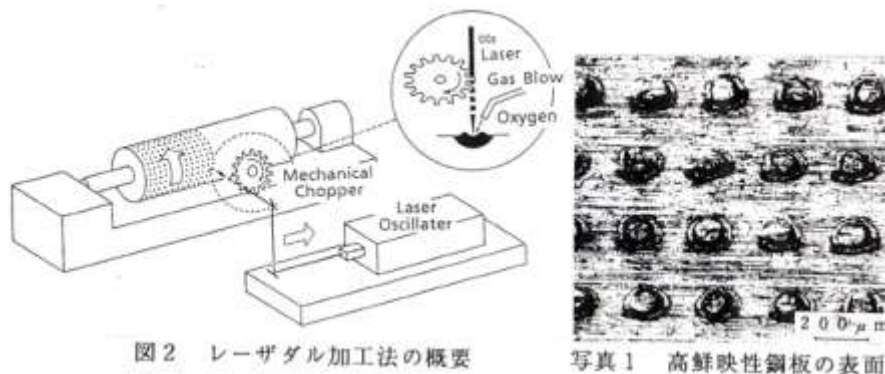


図7 圧延ローラーのレーザーダル加工¹⁵⁾

また、建材産業では石材やコンクリートのレーザ表面溶融処理により図9に示すような着色したタイルを作り、衣装建材としている¹⁶⁾。着色は表面溶融時に金属粉体を添加することにより可能としている。



図9レーザ表面溶融で着色したセメント質材¹⁶⁾

4. 6 レーザーピーニング

図10に示すように短パルス高ピーク出力レーザーを用いて金属材料表面を瞬時にプラズマ化（5000℃以上の加熱で）し、そのプラズマの爆発的生成により、約5 GPaの衝撃波が起こり、これが材料表面に図11に示すような微小な窪み（ディンプル）を形成する。とくに材料表面に水の層があれば、衝撃波が水に閉じこめられ、材料表面に深さが約10μmの窪みが生じる。

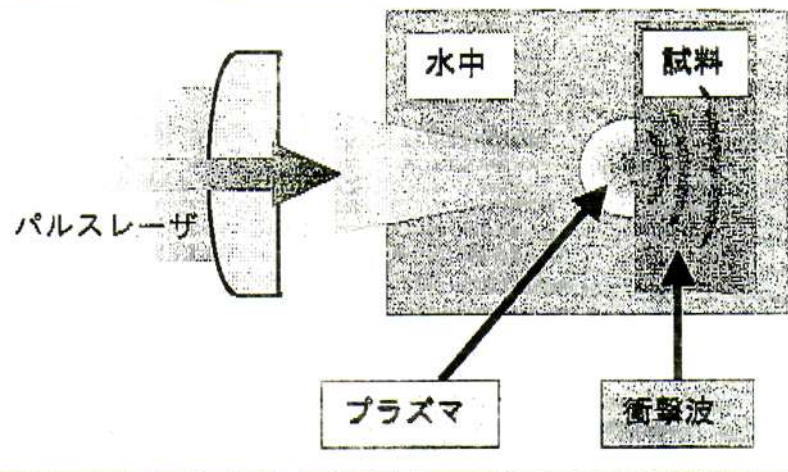


図10 レーザーピーニングの原理図¹⁶⁾

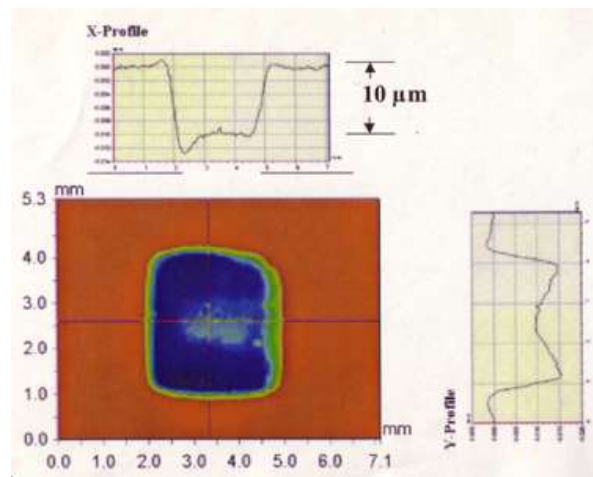


図11 レーザーピーニングによるディンプル¹⁷⁾

この窪みの周辺は圧縮の残留応力が生じる。これを無数に形成すると、図11に示すように表面から約1mmの深さまで、圧縮の残留応力が生じ、これが金属材料に次のような良い効果を及ぼす。

- 1) 疲労亀裂の進展を拘束する。疲労強度の向上
- 2) 応力腐食割れを防止する。
- 3) 強度および硬さの向上

4) 耐摩耗性の向上

図12に示すように金属の疲労強度が従来法のショットピーニングに比べ、約10倍寿命が長くなる。これを利用して、現在、米国では図13に示すよう軍用機のみならず、商用機のジェットエンジンの圧縮機の応力集中部に適用している¹⁷⁾。

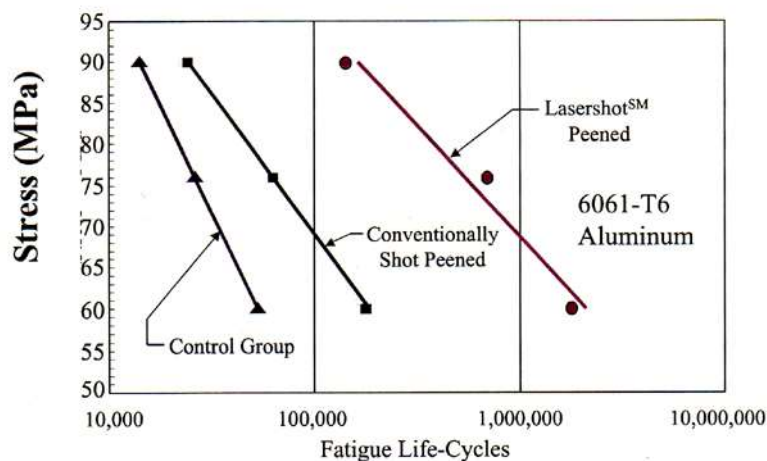


図12レーザーピーニングによる疲労強度の向上¹⁷⁾



図13 旅客機のジェットエンジンへのレーザーピーニングの適用¹⁷⁾

また、我が国では原子力発電プラントの反応容器のシュラウド部に図14に示すようにレーザーピーニングを実用化している¹⁸⁾。最近では、光ファイバーで水中までレーザーを伝送するシステムが開発され、1日3交代制で多くの原子力発電プラントに適用されている。このほか高ピーク出力のパルスレーザーで比較的軟らかい金属の表面に油、水あるいは石英をぬり、この表面を照射するとその衝撃波で金属表面に塑性変形を与え、その時の加工硬化により、金属材料表面を硬化させ、疲労強度や耐摩耗性を高めることができる。

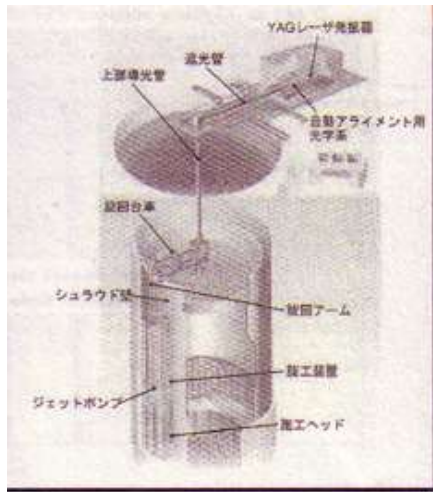


図14 原子力発電プラントへのレーザーピーニングの適用¹⁸⁾

4. 7 レーザ磁区細分化 (Magnetic Domain Refining)

モーターのコアである電磁鋼板の表面に油や水をぬり、この表面を高エネルギー密度のパルスレーザーを照射する

と電磁鋼板の磁区（ドメイン）を微細にすると同時にある方向に整列させることができる。これにより、基板表面を塑性変形させ、鋼板の磁区を微細化でき、図15に示すように鉄損（コアによるエネルギーロス）を約10%低下できる¹⁹⁾。

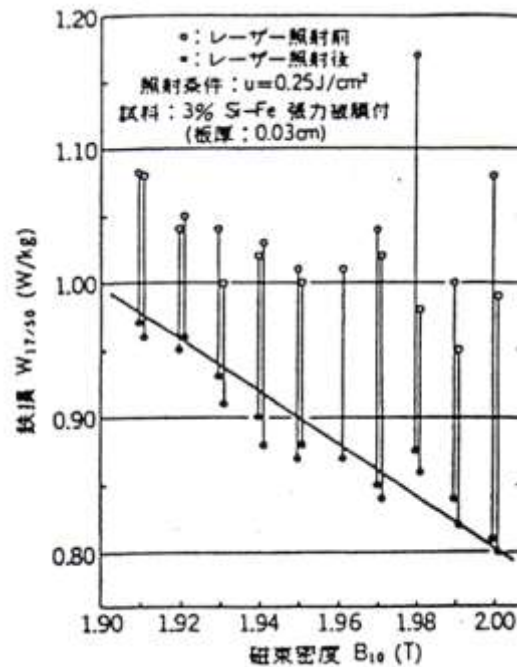


図15 レーザ磁区細分化処理による鉄損の変化

これを磁区細分化処理と言い、すでに我国の製鉄所でこの処理を施した鋼板が生産・市販されている。

4. 8 レーザー着色

ステンレス鋼の着色にレーザーを用いる方法も開発された。硝酸系溶液に漬けた鋼をパルスレーザー照射し、酸化被膜を生成させる。色の変化は酸化薄膜の厚みで決まるが、この膜厚をレーザー照射条件で制御することにより、青、金、緑など7色に着色できる方法で、CADとの組合せで色模様を出すこともでき、経済性も高い。

これらの他に、レーザー加速メッキ法やレーザーリソグラフィーによる高分子膜の生成、塩酸の合成などレーザーによる化学反応生成物の生成がある。