

解説 (2)

ショットピーニングならびにショットレス
ピーニングの最新技術動向

元明治大学 当舎勝次

概要 ショットピーニングならびにショットレスピーニング分野でどのような研究・開発が行われているかを把握する目的で、ショットピーニング技術協会誌「ショットピーニング技術」で直近の3年間(通巻85号から93号)に掲載されたピーニング技術関連の報告863編や工業新聞記事などを参考に、(1)ショットピーニングの研究内容、(2)ピーニング技術、(3)被加工材、(4)評価手法および(5)報告事例の概要抜粋 についての研究・開発動向を調査した。その結果、①研究内容は44項目、②ピーニング技術は15種類、③被加工材は43種類、④評価手法は一般的な機器を除き37種類など、非常に多様なショットピーニングならびにショットレスピーニングについての研究が進められ、かつ奥深い考察が報告されていた。

キーワード: ショットピーニング, 超音波ピーニング, 微粒子ピーニング, レーザーピーニング, キャビテーションピーニング, サーフェスインテグリティ, サーフェステクスチャ

1. はじめに

自動車産業をはじめとして多くの産業界では、SDGs関連技術やIT革新技術への対応など、地球規模での大変革期にさしかっている。そこでは、部品の根本的設計変更、素材選定、加工技術や熱処理技術の変更など、さまざまな新技術開発が加速するものと思われる。さらに、社会インフラの経年変化および劣化についても解決しなければならない喫緊の課題がある¹⁾。軽薄短小・長寿命だけでなく、機能性、環境、省エネ・高効率、医療・健康、安全・安心など近年の社会的要求に加工技術で対応する場合、ショットピーニングを初めとする様々なピーニング技術の活用は賢明な選択肢の1つと考えられる。

ピーニング時の現象は、ショットなどが被加工材に衝突して図1に示すような凹み(痕)を生成する過程では断熱圧縮的な圧力が痕直下の微小部分に作用し、被加工材の結晶粒間でバランスを取りつつ変形に弱い部分が優先的にひずみ硬化する。そのため、痕ならびに降伏領域の周辺部の非加工部分からはその変形に対する反力が生じ、結果的に加工面および加工変質領域は弾性限の上昇と共に強化されて圧縮残留応力場となり、疲労強度や応力腐食割れなどに対して極めて高い特性値を示すようになる²⁾。

疲労強度、耐摩耗性、耐応力腐食割れ特性などの向上および流体抵抗減少効果などに関連するピーニング効果は、図2³⁾に示すようなサーフェステクスチャ(痕形状や表面粗さなどの表面性状)ならびにサーフェスインテグリティ(組織変化、加工硬化、圧縮残留応力など)の複合的影響に起因する。いいかえれば、様々なピーニング技術は、サーフェステクスチャとサーフェ

スインテグリティを適正に制御することで、①加工変質層の強化による疲労強度の向上、耐摩耗性の向上、耐応力腐食割れ特性の改善などの他、②コーティング前の素地調整、③加工面の特殊な表面性状による流体抵抗の減少や放熱特性の向上、④金型・工具などの鏡面研磨、⑤異種金属のライニングやかしめなど、多目的な効果を得る加工法である⁴⁾⁵⁾。しかし、ピーニング技術は様々な分野で利用されているものの、その適切な活用はまだ十分とは言い難い。

そこで、ショットピーニング技術協会誌「ショットピーニング技術」で直近の3年間(通巻85号から93号)に掲載されたピーニング技術関連の報告863編について、①研究報告内容、②ピーニング技術の種類、③被加工材、④評価手法で分類した結果と、⑤定量的に記述されていた研究概要の抜粋例とを紹介する。

なお、本稿は(公社)砥粒加工学会誌2021年2月号に投稿した内容をベースに、表の変更と一部加筆したものである。

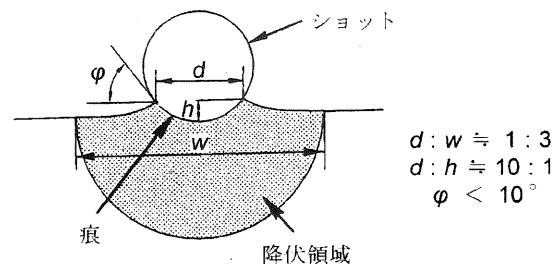


図1 ショットピーニングの痕の一例
(被加工材:中炭素鋼(S45C)焼なまし, d: 痕径,
w: 降伏領域の幅, h: 痕深さ, φ: 接触角)

2. サーフェステクスチャとサーフェスインテグリティ

サーフェステクスチャならびにサーフェスインテグリティは、図 2 に示すように、それぞれ加工面ならびに加工層の状態を包含する概念で、1964 年に M.Field と J.F.Kahles によって提唱され、1986 年には米国の規格 ANSI B 211.1 として設定されている³⁾。

それらの項目自体は、通常の表面および表面層の特性と加工変質を表しているが、①材料の生い立ち(生産過程と加工履歴)、②加工の種類と加工条件、③被加工材に発生する加工変質層、④その材料で製作された部品・製品の性能・機能といった「素材から製品に至るまでの全ての製造工程要因が製品・部品の性能・機能に与える影響の優劣を考慮に入れる実用的な概念」³⁾である。すなわち、様々なピーニング効果について検討するには経済性まで考慮する必要があり、サーフェステクスチャとサーフェスインテグリティは重要な考え方と言える。

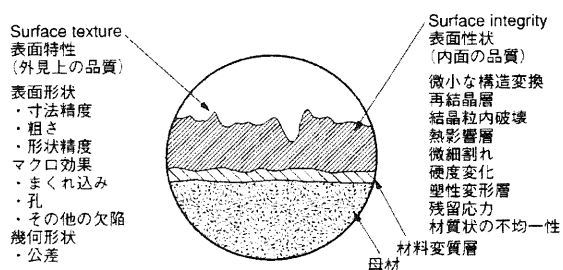


図 2 サーフェステクスチャとサーフェスインテグリティ³⁾

3. JST のデータベース調査結果

ここに示す表 1～表 4 については、通巻 85 号から 87 号までの 1 年間における多い順に整理したものであり、表中の「—」はその時点での報告事例がなかったことを意味している。

3.1 研究内容

表 1 に示すように、3 年間の調査結果において上位の順序にはほとんど変化はなく、金属疲労や加工面の評価として、残留応力、組織観察、硬さと表面粗さなどが多く、次に摩擦・摩耗、SCC などの損耗現象などの報告が多かった。3 年前の 85 号以降の 3 年間で研究内容は 19 項目も増加し、加工面の機能性や生体適合性に関する研究などが新たに報告されており、この分野の関心の高さがうかがい知れる。

なお、データベース以外としてショットピーニング技術協会誌に掲載された研究論文や解説記事にはショットピーニングによる表面欠陥の無害化についての定量的な研究報告がある⁶⁾。

3.2 様々なピーニング技術

表 2 に示すように、投射材を用いるピーニングとしてショットピーニング、超音波ピーニング、微粒子ピーニングが多く、投射材を用いないショットレスピーニングとしては、レーザーピーニング・高エネルギーピーニングとキャビテーションピーニングの報告が多かった。また、85 号以降、加工方法は 8 項目も増加しており、目的に応じたピーニング技術の開発が進んでいる。なお、「レーザーピーニング」については、「レーザピーニング」となっているものもあったが、ここでは「レーザーピーニング」に統一した。

微粒子ピーニングの研究については、国内には日本微粒子衝突表面改質技術協会⁷⁾があり、協会指導の下、研究や普及活動などが盛んに行われていることもあって日本からの報告が多い。

3.3 研究対象となっている被加工材

被加工材については、表 3 に示すように特殊鋼を含めて鋼系が最も多く、次いでステンレス鋼、アルミニウム合金、チタニウム合金が多かった。3 年前の 85 号の報告時に比べて、93 号までに 26 種類の被加工材の増加があり、ピーニング技術を新たに導入する業界の拡大が見て取れる。今回の調査では、研究の数は多くはないが、形状記憶合金、積層材、複合材が目立った。さらに、92 号以降には、ステンレス鋼の傾斜型微細構造材、ハイエントロピー合金、金属マトリックス複合材などについての報告があり、新素材に対するピーニングの影響と効果についての研究は、今後も更に増加するものと思われる。

3.4 評価手法

表 4 は、一般的な X 線応力測定装置、硬度計、表面粗さ計などを除き、85 号の時点での多い順に示したものである。

最近の傾向として、渦電流や陽電子の特性を活用した機器や、各種の電子顕微鏡、レーザー顕微鏡、原子間力顕微鏡、オージェ電子分光法などもあり実に多彩な機器が用いられている。

最近の評価機器開発の特徴は、(1)残留応力測定の時間短縮や(2)新しい要因と残留応力とを関連づけて特性を評価する方式などである。残留応力測定時間の短縮では、 $\cos \alpha$ 法⁸⁾で残留応力が精度良く測定できるようになり、部品形状や材質にも依るが測定機器がインラインに設置される事例⁹⁾も見受けられるようになってきた。

新しい要因による加工変質層の評価としては、①照射後の陽電子の材料内部における減衰状況の研究が進み、格子欠陥や分子間空隙を高感度に検出できる

表3 研究対象の被加工材

機関連通巻	各種鋼	ステンレス鋼	アルミニウム合金	チタン・チタニウム合金	マグネシウム合金	純ニッケル・ニッケル合金	CrNiMo鋼・低合金鋼	純銅・銅合金	部分安定ジルコニア	形状記憶合金	純鉄	クロム鋼	構造用セラミックス	窒化ケイ素・炭化ケイ素複合材	ジルコニア系非晶質金属	窒化ケイ素	3D積層材	NI系超合金	非金属	コバルト含有合金	SiC-W/AI複合材	生体	グラフエン強化AI複合材	球状黒鉛鑄鉄	DLCコーティング材	亜鉛合金	ジルコニア	超硬合金	強化AlMgSi複合材	CNT複合材	アルミニウム・リチウム積層材	パナジウム含有合金	アルミナケイ素複合材	クロム含有合金	サーメット	傾斜微細構造(AI, Si, S, U, S)	FeCrNiMnCo高エントロピー合金	ケイ素含有合金	銅含有合金	鑄鉄	AI・亜鉛コーティング材	金属マトリックス複合材	その他		
85号	16	9	10	12	4	0	2	1	3	1	1	1	0	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	
86号	29	23	14	13	3	6	3	3	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16
87号	51	7	17	9	6	4	2	1	1	2	1	0	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	
88号	39	15	8	5	1	4	3	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7		
89号	24	13	14	10	1	4	8	0	1	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10		
90号	22	13	12	15	5	4	2	3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	3	0	1	0	0	0	1	1	0	2	1	0	0	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7		
91号	43	21	12	7	1	5	5	1	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	7		
92号	34	11	22	9	5	4	2	2	0	0	1	0	0	0	1	0	3	1	0	1	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	3	1	1	1	1	-	-	-	7		
93号	35	23	9	10	3	2	3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	1	3			

表4 加工面ならびに加工層の評価手法

機関連通巻	FEM・モデリング	電子顕微鏡(走査型、透過型)	X線解析	光学顕微鏡	画像処理	渦電流	陽電子消滅法	超音波センサ	電子後方散乱回折法	高速走査熱量計	示差走査熱量計	エネルギー分散X線分光法	ナノインデンテーション試験	エネルギー分散X線分光法	X線光電子分光計	電気化学インピーダンススペクトル	Kelvinプローブ力顕微鏡	レーザ顕微鏡	圧力測定フィルム	圧力画像解析システム	デジタル画像相関法	非線形Rayleigh波	中性子応力測定	白色干渉計	トリチウムトレーサ法	アルメンシステム	高周波二重モードHALLEインピーダンス	原子間力顕微鏡	バルクハウゼンノイズ測定器	蛍光顕微鏡	三次元測定機	AESセンサー	表面自由エネルギー	応力拡大係数	表面ポルタ電位測定	磁気特性測定	孔食臨界電位測定				
85号	8	3	1	1	0	1	0	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86号	24	12	2	1	2	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87号	12	4	4	3	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
88号	10	7	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
89号	11	3	4	3	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
90号	7	16	4	0	0	1	0	0	3	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
91号	18	7	0	3	1	0	1	0	1	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
92号	15	11	3	7	2	1	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	-	-	-	-	-	-	-			
93号	11	10	2	1	1	0	1	1	2	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	1	1	1		

表5 (1/3) 研究で用いられたショットピーニング加工の種類, 投射材, 被加工材, 概要(抜粋)
通巻91号~93号 (JST データベース; 2019. 8~2020. 7)

JSTデータベース整理番号, 表題, ピーニング加工の種類, 投射材, 被加工材, 概要(抜粋)	(通巻91号~93号)
通巻: データベース番号	表題
投射材・加工方法, 被加工材	概要(抜粋)
91号: 19A1557106	HQ805の硬さと疲労強度に及ぼすショットピーニング処理の影響
ショットピーニング, 高品質805機械鋼	加工条件(ショット; 直径0.6mm, HRC硬さ40~50HRCの鋼球, 噴射圧力; 7bar, ノズルからの距離100mm, 投射時間; 10, 20, 30min). 硬さ測定: 微小Vickers硬度試験法, 表面粗さ: Surfcom形状測定機120A, 疲労強度: 回転曲げ試験機, 表面形態観察: SEM. ショットピーニングにより硬さは327から481HVNに増加し, 疲労強度は401MPaから518MPaまで29.5%増加した.
91号: 19A1460709	整形外科用プレートとスクリューの機械的性質に及ぼす微細ショットピーニングの影響
微粒子(シリカ), SUS316, Ti-6Al4V, Ti-7Nb	加工条件(微粒子; 40, 80 μ m, 窒素雰囲気中, 噴射圧力; 0.5MPa). 投射材サイズ80 μ m時, Ti6Al4Vプレートは曲げ強度が11%増加, 表面硬さが40%の増加. スクリューは骨からの引きだし強度が76%以上増加した.
91号: 19A1296406	ナイロン歯車工具によるラッピングがショットピーニング浸炭歯車の耐久限に及ぼす効果
ショットピーニングとナイロン歯車, 浸炭鋼歯車	ショットピーニングとラッピング技術. ショットピーニング後の表面硬さと圧縮残留応力はラッピング後も維持. ショットピーニング後約5 μ mRzであった歯形方向歯面粗さは, ラッピングによって約1 μ m Rzにまで低減. 歯車運転試験の結果, ラッピングにより耐久限はピッチ点での最大ヘルツ応力 $\sigma_H=2200$ MPaで, 疲労寿命は約10%向上した.
91号: 19A1628707	Al-7Si-0.3Mg合金の疲労特性に及ぼす微粒子ショットピーニング処理の影響
微粒子, Al-7Si-0.3Mg合金	投射材: 2種類の微細粒子. 測定項目: 微細構造形態, 表面粗さ, 残留応力分布. 試験機器: 回転曲げ疲労試験機, 走査電子顕微鏡(SEM)(疲労破面を観察). レプリカ法を用いてき裂発生と伝搬挙動を調べた. 結果は, 微粒子ピーニング(FPSP)が材料の表面層に残留応力を導入し, 表面微細構造を微細化し, また表面粗さを変化させることを示した. 低応力振幅レベルでは, FPSPは疲労寿命を著しく改善できる. 5×10^7 サイクルで, FPSPした試験片の疲労強度は, 非ピーニング試験片と比較して33%増加した. FPSPによりき裂発生サイトは内部に移動. この処理により材料の閾値応力拡大係数の範囲は著しく改善できる. 疲労強度に及ぼす影響は, 改良Murakami方程式によって, よく評価することができた.
91号: 19A1942959	Ti-2AlNb金属間化合物合金の疲労性能に及ぼすショットピーニングの影響
微粒子(ガラス), Ti-2AlNb	微粒子ピーニングによる疲労強度に及ぼす影響検討. 微粒子ピーニングにより圧縮残留応力最大値は322MPa. 回転曲げ疲労試験の結果, 高サイクル疲労寿命は25倍以上向上, 疲労耐久性限界は170MPaから360MPaに増加. 疲労き裂発生位置は, 未加工材の場合は表面, 微粒子ピーニング材の場合表面強化層の下であった.
91号: 19A2232291	SAE5160鋼の疲労強度に及ぼすショットピーニング過程の影響
ショットピーニング, SAE5160鋼	カバレージとピーニング強度の影響を検討. 疲労試験はインストロン8872サーボ油圧機の3点曲げ試験機を使用し, ASTM E8に基づいて, 負荷応力は降伏応力の0.8, 0.7, 0.6倍, 周期は10Hzで行った. その結果, 疲労強度の最大増加率は, フルカバレージの場合94%であった. ピーニング強度とピーニング強度の相関は認められなかったが, 最終抵抗の増加とピーニング強度の増加との相関は高かった. ショットピーニング後のビッカース硬さは3%増加した.
91号: 19A2108747	超音波ショットピーニングによるTi-13Nb-13Zr合金の疲労寿命の向上
超音波ショットピーニング, 生物医学用Niフリー高窒素ステンレス鋼(18Cr-21Mn-0.65N)	表面層の微細構造の改質, 硬さ, 表面粗さに及ぼす影響検討. 鋼球ショット直径2mmおよび3mm, 加工時間2および8分間, 周波数20KHzで超音波ショットピーニング(USP). UPS処理により結晶サイズが36 \pm 6 μ mから13~18nmのナノ結晶粒に変態した. USP処理により生じた変形層, 硬さ, 表面粗さはUSPのショット直径と加工時間の増加と共に増加した. 微細構造を光学顕微鏡, SEM, XRDおよびTEM技術を用いて特性化した.
92号: 19A2902177	TA2表面上の窒化チタン膜の耐摩耗性に及ぼす高エネルギーショットピーニングの影響
高エネルギーショットピーニング(HESP), 純チタンTA2, 窒化チタン蒸着TA2材	パルスマグネトロンスパッタリングにより窒化チタン膜を蒸着. 窒化チタン薄膜の形態と結晶構造は走査電子顕微鏡(SEM)とX線回折(XRD)によって分析. 窒化チタン膜の膜-基板接着の硬度および弾性率は, 引っ掻き試験機およびナノインデンテーション試験機によって測定し, 窒化チタン膜の耐摩耗性は微小摩擦試験機で測定. HESPにより処理したTA2表面は多数の欠陥と高い化学活性を示し, スパッタリング過程でTiとNプラズマを迅速に捕捉固定し, 不均一核成を誘起し, 窒化チタン膜の結晶粒サイズの微細化とより厚く緻密な膜をもたらした. 30minのHESP処理により, 膜-基板接着は元のTA2の20.1Nから39.2Nに増加し, 窒化チタン膜のナノ硬度は元のTA2の14.0GPaから29.7GPaに増加した. HESP処理は摩擦係数を安定化し, 窒化チタン薄膜の耐摩耗性を改善した. 30min HESP処理した窒化チタン膜の比摩耗速度は, 元のTA2に対する0.061mm ³ /Nから, 0.029mm ³ /Nに減少した.

表 5 (2/3)

92号:20A0068615	4PCPs法によるショットピーニングしたSiCP/AA6061複合材料の電気抵抗率に及ぼす表面特性の影響
ショットピーニング, 攪拌鋳造法により作製した SiCP/AA6061複合材	鋳造後の複合材料の微細構造は光学顕微鏡で調べ、表面特性と電気抵抗率はそれぞれX線回折(XRD)と4点共線プローブ(4PCPs)法によって分析。その結果、ショットピーニング時間の増加に伴い、結晶粒サイズは減少し、半価幅(FWHM)は増加する。140sピーニング後結晶粒微細化(33.7nm)とFWHM広がり(0.290)は、電気抵抗率(0.09Ωcm)を低下させた。
92号:20A0017630	ショットピーニング処理したMg-8Gd-3Y合金の表面層マイクロ組織と摩耗特性の改善
ショットピーニング, Mg-8Gd-3Y合金	結晶粒サイズはピーニング強度の増加とともに減少し、ピーニング強度が0.46mmNに達したとき、ナノ粒子が得られた。ナノ粒子の形成は主に転位の活性と動的回転再結晶の発生に起因した。最大圧縮残留応力値は0.46mmNのピーニング強度下で-174MPaに達した。さらに、ショットピーニングにより微細構造の改良、微小硬さ、耐摩耗性が顕著に促進され、0.13, 0.23, 0.46mmNの処理により平均摩耗量はそれぞれ9.47%, 36.26%および40.70%減少した。
92号:20A0206134	直接金属レーザー焼結AlSi10Mg部品の表面特性に及ぼす後処理効果
研磨材ブラスト, ショットピーニング, ポリシング, AlSi10Mg合金	測定項目:2Dおよび3D表面粗さ, 密度および硬さ。ボール・オン・ディスク摩耗試験:クリーン潤滑剤としてパーム油と大豆油を用いて10N負荷の下で実施。その結果, 表面硬さは, 研磨材ブラスト面では187HV, ショットピーニングでは178HV, ポリシングでは124HVであった。平均表面粗さRaは, 研磨材ブラスト面では18.71μm, ショットピーニング面では5.39μm, ポリシング面では1.39μmであった。最小摩耗速度は, パーム油を用いたショットピーニング表面に対して $3.88 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{Nm}$, 最大値はMO潤滑による研磨表面で $7.92 \times 10^{-4} \text{mm}^3/\text{Nm}$ であった。パーム油と大豆油は, すべての表面に対して石油ベースの市販の機械油より優れた潤滑特性を示した。
92号:20A0123763	選択的レーザー融解(SLM)により作製したインコネル718合金部品の後処理:表面トポグラフィ, 多孔性, 硬さおよび残留応力に及ぼす機械的表面処理の影響
バレル仕上げ(BF), ショットピーニング(SP), 超音波ショットピーニング(USP), 超音波衝撃処理(UIT), インコネル718合金(タービン翼部品用)	SLMで作製した状態と比較して, 処理後の試料の表面粗さ(Sa=5.27μm)は, SP処理したものを除いてBF, USPおよびUITプロセス後にそれぞれ20.6%, 26.2%および57.4%減少。SzパラメータはSP処理したものを除いてすべての処理したSLM構築試料で減少。各処理後, SLM材(~390HV 0.025)の表面微小硬さは, BF(14.2%), USP(23.8%), UIT(50%)およびSP(66.5%)処理後に増加し, 最も深い硬化層はUITとSP処理後に形成された。SLM材の残留空隙率は, BF, SP, USPおよびUIT処理後, それぞれ23.1%, 40.6%, 55%および84%減少した。UIT処理は空隙率を0.118%に著しく減少させ緻密な表面下層を形成した。全ての処理により, SLMで作られた試験片の引張残留応力は圧縮残留応力(510.7MPaから-201.4MPa)に変化させた。硬化, 緻密化および圧縮残留応力層の深さは, BF後の80μmからUSP後は140μm, SPおよびUIT後は180μmとなり, 処理表面の蓄積エネルギーおよび変形範囲と相関関係が認められた。
92号:20A0353207	ショットピーニングのショット距離とショット角の修正による模擬体液中の316L生体材料の耐食性
ショットピーニング, 316L生体材	ショットピーニングパラメータ:ノズルからターゲットまでの距離(6, 8, 10, 12cm), 投射角(30°, 60°, 90°), 噴射圧力(7kg/cm ²), 加工時間(20分), 鋼球S-170(直径0.6mm)。模擬体液(SBF)を, ヒト血漿にほぼ等しいイオン濃度の腐食媒体として用い, 腐食試験をversaSTATを用いて, データをVersaStudioによって分析。投射角が大きいほどまた投射距離に近いほど, 腐食速度は低くなった。最高ピーニング効果は最も近い投射距離(60mm)と最大の投射角度(90°)の時得られ, 腐食速度を0.8617mpyから0.1096mpyまで減少させた。
92号:20A0421229	ショットピーニング処理によるCu35%Zn表面の耐食性の向上
ショットピーニング, Cu35%Zn	Cu35%Zn材に対するショットピーニングの影響。ショットピーニング条件:(ショット;0.5mm, 50HRC, ノズルとの距離;100mm, 加工時間;4, 6, 8min, 噴射圧力;7, 8, 9bar)。ASTM G5-94規格による3.5%NaCl腐食試験実施。最高ピーニング効果は, 噴射圧力8barの時, 耐食性は0.028mpyまで向上し, 未加工材に対して2.8倍であった。
92号:20A0406726	表面ナノ構造化による生物医学Ti-13Nb-13Zr合金のLCF寿命改善
超音波ショットピーニング, Ti-13Nb-13Zr合金	USP加工条件(ステンレス鋼球・直径3mm, 加工時間2, 4, 6min, 周波数20kHz)。その結果, USP処理により相変化はないが, ナノ結晶は生成。表面硬度は15%~20%増加し, 内部に向かって徐々に減少。USP処理を受けた全ての試験片のLCF寿命はかなり増加し, 最高寿命は4分間処理において得られ, ±0.70%の全ひずみ振幅においてほぼ3倍強化された。
93号:20A0622294	アルミニウム合金の疲労強度と欠陥許容性に及ぼすレーザーピーニングの影響
レーザーピーニング(LP), 7075-T651アルミニウム合金	LP材およびSP材とも疲労強度は増加し, 0.4および0.1mm未満の深さの半円スリットはそれぞれ無害化された。見かけの閾値応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は, LPとSPにより, それぞれ約5倍と2倍に増加した。 $\Delta K_{th,ap}$ の増加は, ピーニングによって付与された圧縮残留応力による。LP材のKitagawa-Takahashi図に示すように, アルミニウム合金の欠陥耐性がLPにより改善される。

表 5 (3/3)

93号:20A0670178	Ti-6Al-4V合金の疲労寿命向上のための超音波ショットピーニングの持続時間の最適化
超音波ショットピーニング(USP), Ti-6Al-4V合金	超音波ショットピーニング(USP)を用いて表面ナノ構造を生成したTi-6Al-4V合金に対する引張強さと低サイクル疲労(LCF)挙動への影響について検討。USP加工条件(加工機;Stressvoyer, 周波数20kHz, 直径3mmの鋼球, 2.5, 5.0, 7, 5min)。加工後熱処理は400℃, 1時間。加工材の降伏応力と引張強さは増加するが, 延性はわずかに低下。疲労試験(LCF)は, $1 \times 10^{-3}/s$ の一定ひずみ速度で, 0.95, 0.85, 0.75および0.65%の異なる全ひずみ振幅($\pm \Delta \epsilon_{1/2}$)で行った。 $\Delta \epsilon_{1/2} = \pm 0.65\%$ においてUSP加工材のLCF寿命は, 非加工材の約4倍に増加したが, 熱処理を行ったものは減少した。
93号:20A0806276	既存鋼橋の溶接継手へのショットピーニングの適用
循環式グリットブラスト, 循環式ショットピーニング, 再塗装中の鋼橋	既存の鋼橋において鉛とポリ塩素化ビフェニルを含む既存の塗料の除去からの環境保護を主目的とした鋼グリットと鋼ショットの両方を用いた橋サイトでの循環ブラスト技術。本研究では, パイロット既設鋼橋の再塗装時に鋼丸棒を溶接継手に用いる循環ブラスト技術を用いてショットピーニングの適用を検討。パイロット橋の溶接部近傍の残留応力をX線回折法によって測定。測定結果は, ショットピーニングにより100 μm の深さで, 350MPa以上の圧縮残留応力を導入でき, 圧縮残留応力層の深さは400~500 μm であった。さらに, 同種鋼の試験片でもパイロット橋の結果と良く一致し, このショットピーニング工法が既存の鋼橋の溶接継手の疲労強度を強化できることを示した。
93号:20A0763620	CP-Tiの微細構造, 腐食挙動および細胞応答に及ぼす超音波ショットピーニング時間の影響
超音波ショットピーニング, 市販純チタン(cp-Ti)	USP加工条件(加工時間;0~120s)。表面領域の微細構造変化, 細胞生存性および腐食挙動について検討。細胞生存率はUSPの60~120秒後にかかり増加し, 加工時間が90sで最大値を示した。また, 不動化傾向は, 90sまでのピーニング期間で改善されたが, それ以上の加工時間では減少した。USPの有益な効果は, 表面領域におけるナノ構造化とより高い正電位の増加に起因する可能性がある。透過型電子顕微鏡(TEM)による表面層の観察により転位のもつれと亜結晶構造の生成を明らかにした。また, 被加工材ではより良い細胞増殖を示すより高い表面ボルタ電位が観察された。
93号:20A1129772	レーザーピーニングを受けた小孔を有するAISI304ステンレス鋼丸棒の疲労寿命の調査
レーザーピーニング(LSP), AISI304ステンレス鋼	微小穴を持つAISI304ステンレス鋼丸棒にLSPを行い, 表面形態の観察, 残留応力測定, 引張疲労試験を実施。破壊マイクロボグラフィを走査電子顕微鏡を用いて検出。その結果, 微小くぼみが犠牲層で被覆されたピーニング棒の表面に現れることを示した。レーザーで直接照射した棒の表面をアブレーションし, 照射領域に引張残留応力を発生させた。LSP材の疲労寿命は, 犠牲層の有無により, 未加工材と比較して, それぞれ1.2および1.1倍であった。疲労き裂発生位置は, LSPの後, 穴端部から棒の壁に移動した。加工材の平均ストライエーション間隔は最も狭く, 未加工材のそれは最も広かった。さらに, 加工材の疲労破壊領域上のデインブルのサイズと深さは最大で最も深く, 塑性変形に密接に関連している。
93号:20A1121331	マイクロショットピーニング後のフェライト-パーライト鋼の超高サイクル疲労特性
マイクロショットピーニング, 合金化フェライト-パーライト鋼	合金化フェライト-パーライト鋼の疲労強度に対する高速度鋼製マイクロショットによるピーニングの影響を検討。試験片は平滑材と切欠き材を用い高サイクル疲労試験を行った。平滑表面と切欠き表面を持つ試験片の疲労強度はショットピーニング後にそれぞれ22%と27%増加した。き裂成長の観察により, マイクロショットピーニングはき裂伝搬を妨げることを明らかにした。
93号:20A1208918	二相ステンレス鋼の表面特性の強化に及ぼすダブルショットピーニングの影響
ダブルショットピーニング(DSP), 二相ステンレス鋼2205	DSP材はシングルショットピーニング(SSP)材より表面トポグラフィが著しく改善。さらに, DSP材の表面は, SSP材のものと比較して多数のマイクロ痕が観察された。DSPの表面観察により, 激しい塑性変形と結晶粒微細化が認められた。また, ピーニングの影響はフェライト(α)相よりオーステナイト(γ)相の方が大きかった。表面層の加工硬化は, SSPにより平均表面で59%増加させ, DSPにより139%増加させた。ピーニング面のX線回折分析により高度に転位した表面結晶粒の存在が明らかとなった。
93号:20A1319127	ショットピーニングと放電加工により作製されたWCインサート工具の摩耗
ショットピーニング, 放電加工(EDM), 超硬合金(WC)	SP加工面の大きな表面粗さと高い圧縮残留応力が, 工具と切屑との接触面積の減少と摩擦の低減によって, 耐摩耗性と工具寿命を約30%増加させた。EDMにより発生した表面の引張残留応力は工具のチッピングをもたらす, 切削抵抗が低い場合でもEDM材の工具寿命は80%以上減少した。切削試験結果, SPによる表面改質によりWCインサートの高い工具寿命性能をもたらした。

4. ピーニング技術の可能性

表 4 に示したように、ピーニング技術は、サーフェステクスチャを制御することで放熱特性や流体抵抗の減少効果が得られるため摺動部品の低摩擦・低摩耗部品へ応用も広がりつつあり、輸送管やヒートパイプ・ヒートポンプ用部材の加工としても大きな可能性がある。

さらに、近年、社会インフラの安全・安心の観点から、既設鋼橋でも施工可能で環境に配慮した循環式ショットピーニングが開発されている^{1),13)}。

また、健康・医療の分野では、昨年(2020年)の2月4日の日刊工業新聞第12面の記事に微粒子ピーニングによるマイクロディンプル処理により黄色ブドウ球菌が大幅に減少したとの記事があった。原因の解明には至っていないが大腸菌も減らせることが昨年(2020年)の記事に報告されており、今後の医療分野でも活用できると期待されている。

5. ショットピーニング関連のJIS規格

上述したように、環境保全の観点から長寿命で廃棄物の少ないショットピーニングが開発されている中で、ショットピーニング用ショットの規格化が喫緊の課題であった。これについては、JIS G 0951「鋼構造物技術への循環式ショットピーニング用ショット」として、2020年9月23日に発行されている。

6. おわりに

厳しい社会情勢の中、機械工業分野では、今後も厳しい開発競争が続くものと思われる。本稿で紹介したものだけでなく、参考文献にある専門メーカー^{14)~21)}のホームページなどもご参照頂くことをお勧めする。また、(公社)砥粒加工学会誌2月号は、ピーニング技術の特集号となっている。併せてお読みいただきたい。本解説が皆様の仕事の一助となれば幸甚である。

7. 参考文献

1. ヤマダイソフテクノス(株)ホームページ：
<http://eco-yamadapeint.co.jp>

2. ショットピーニング技術協会編：金属疲労とショットピーニング，大河出版（2018）pp.7-15.
3. 高沢孝哉：Surface Integrity，精密工学会誌，55，10（1989）1772.
4. 当舎勝次：サーフェス・インテグリティ，図解 砥粒加工技術のすべて，工業調査会，（2006）200.
5. 原田泰典：ショットピーニングの接合への適用，塑性と加工，49，567（2008）281.
6. 高橋宏治：ピーニングによる表面欠陥を有する材料の疲労強度向上と表面欠陥の無害化，ショットピーニング技術，30，3（2018）6.
7. (株)経田鉄工ホームページ：<http://www.kyodatekko.co.jp/>
8. パルステック工業(株)ホームページ：
http://www.pulstec.co.jp/pr/xray/pr_x01.html#02.
9. 新東工業(株)ホームページ
<https://www.sinto.co.jp/product/surface/technology/sightia/index.html>
10. 小栗和幸ほか：ピーニングを施したアルミニウム合金の陽電子消滅法及び残留応力による評価，ショットピーニング技術，31，1（2019）9.
11. 山脇正人：陽電子寿命を用いた欠陥測定装置の開発，ISOTOPE NEWS，5，709，（2013）15.
12. 東洋精鋼(株)ホームページ：
<http://www.toyoseiko.co.jp/product/index.html>
13. (一社)日本鋼構造物循環式ブラスト技術協会ホームページ：<http://www.jscb-eco.jp>.
14. (株)不二製作所：<https://www.fujimfg.co.jp/>
15. 伊藤機工(株)：<http://itoh-kikoh.co.jp/>
16. IKKショット：<https://www.ikkshot.com/>
17. (株)ニッチュー：
<https://www.blast.co.jp/index.php/top>
18. マコー(株)：<http://www.macoho.co.jp/>
19. 不二機販(株)：<http://www.fujikihan.co.jp/>
20. (株)リガク：
<https://www1.rigaku.com/ja/products/xrd>
21. 東洋研磨材工業(株)：<http://www.toyo-kenmazai-kogyo.jp/>

筆者紹介	当舎 勝次 (とうしゃ かつじ)
	1967年 明治大学大学院修士課程に入学後ショットピーニングの研究に従事.
	2015年 明治大学理工学部機械工学科において、定年退職までショットピーニングならびにグリットブラストに関する研究に従事.
	1990年 第4回ショットピーニング国際会議 (東京・池袋) 幹事.
	2008年 第10回ショットピーニング国際会議 (東京・御茶ノ水) 議長.
	1999年よりショットピーニング国際委員 現在に至る. 2007年よりショットピーニング技術協会会長 現在に至る.