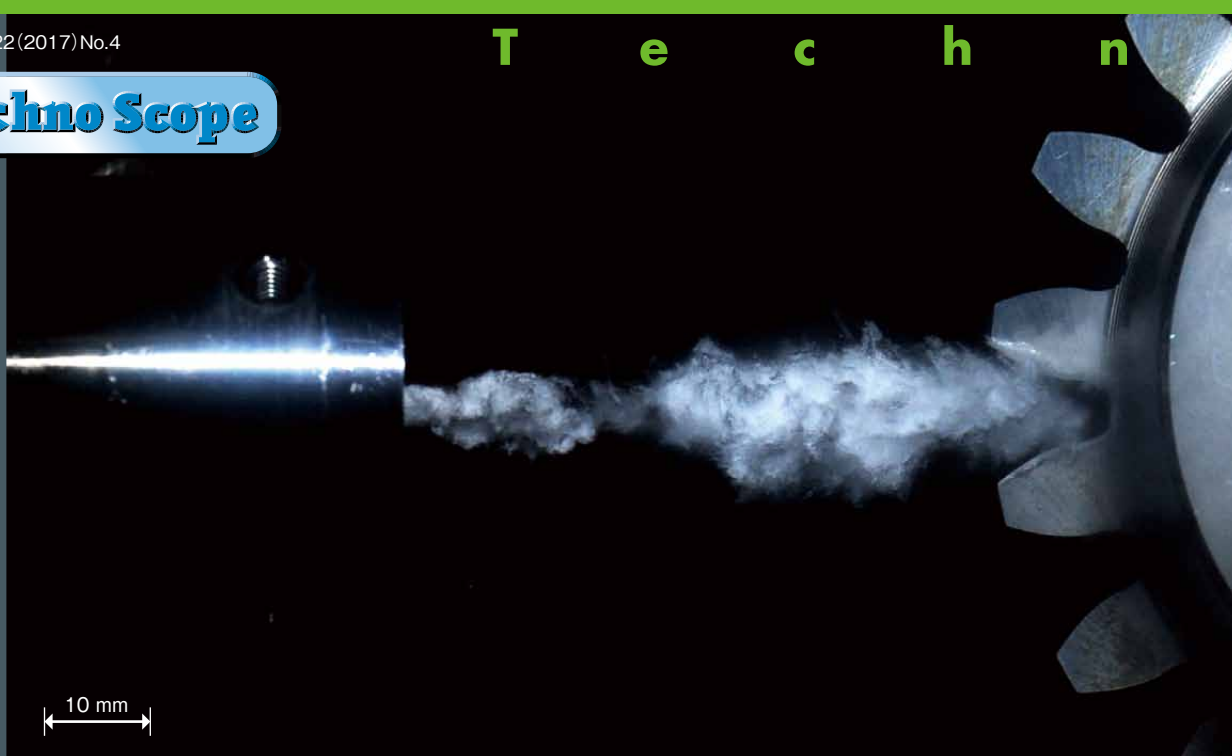




泡で鉄を強くする キャビテーションピーニング

高速の水噴流によりキャビテーションを発生させ、その際に生じる衝撃波によって、歯車表面にピーニングを施す。

金属材料の表面改質技術の一つとして、キャビテーションピーニングが期待されている。ショット（鋼球）を使用せず、化学洗浄などが不要なキャビテーションピーニングは環境への影響が小さいサステナブルな技術であり、自動車や機械部品、生体材料、水素関連機器、さらには洗浄技術としても、技術開発が行われている。

サステナブルな表面改質技術

金属表面の強度（硬度）を上げるためのさまざまな技術が開発されているが、その一つがショットピーニングである。これはショットと呼ばれる小型の鋼球を工作物表面に衝突させることにより、その衝撃力で表面に加工硬化や圧縮の残留応力を生じさせるものである。

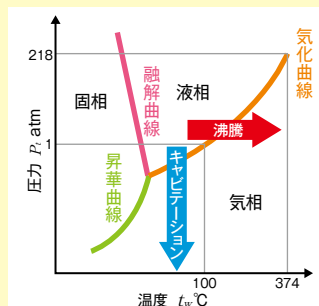
ショットピーニングは、自動車や航空機分野で現在、広く普及している技術であるが、鋼球を使用することによる課題がある。例えば、工作物表面とショットが接触するために、工作物表面にショットの一部が残存し、コンタミネーションとなることである。また、工作物とショットが異種金属の場合はコンタミネーションと工作物で電池を形成し、腐食の原因になることがあるため、ショットピーニング適用後は化学洗浄が必要になり、製造コストがかかることになる。また、粉塵が発生するため、粉塵火災や作業環境保全などの対策が必要になる。

このような課題を解決するため、ショットに金属ではなくガラス球を使用したショットピーニング技術が実用化されている。しかし、ショットピーニングに使用することで破損したガラス球は、破片が微細なために再利用が難しく、産業廃棄物となる。「ゼロ・エミッ

ション」を目ざす製造現場では採用しにくいという問題もある。

これに対して、ショットを使用しないショットレス・ピーニング技術が開発されている。ショットの代わりに水の噴流を使用するウォータージェットピーニング、レーザにより衝撃波を発生させるレーザピーニング、泡を利用したキャビテーションピーニングなどである。

●キャビテーション発生原理（水の状態図）（図1）



圧力が1 atm以下の場合、100 °C以下であっても水は気化する。室温の水のキャビテーションは1/30 atm程度で発生する。

●キャビテーションによりダメージを受けた試験片（図2）

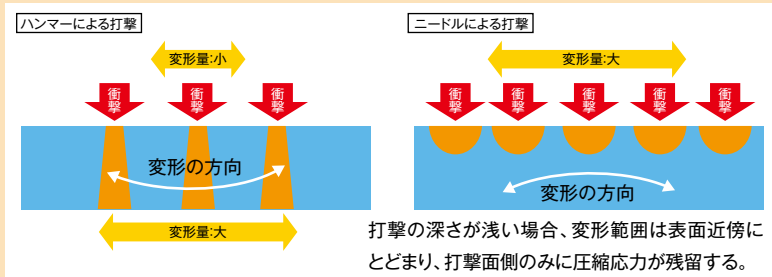


デモンストレーションのために、アルミニウム試験片にキャビテーションによるエロージョン（壊食現象）を発生させた例。

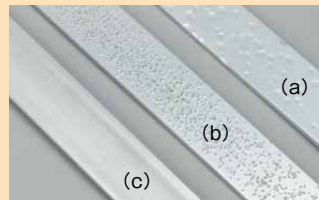
ピーニングと残留応力

ピーニングは材料表面に衝撃を与え、加工硬化により表面を改質する技術である。材料の厚さに対して、衝撃が加えられる深さと衝撃力が十分に大きい場合には、変形範囲が衝撃を加えられた面と反対側の面にまでおよぶ。例えば、ハンマーで薄い金属板に打撃を与える場合がこれに相当する。これに対して、衝撃が加えられる深さが浅い場合には、変形範囲は材料表面の極浅い部分に留まる。このため、表面には圧縮応力が残留することになる。

●打撃による衝撃の影響の模式図(図3)



●試験片に種々の衝撃を加えた場合の比較(図4)



それぞれ、(a)ハンマーにより打撃を与えた試験片、(b)ニードルにより打撃を与えた試験片(ショットピーニングに相当)、(c)キャビテーションピーニングを行った試験片である。(b)の場合も、打撃回数を増加させることで、(c)と同様の効果を得ることができる。

ウォータージェットピーニングは高圧水を使用するが、一度に処理できる面積が小さく、高圧水により材料表面が破損する恐れがある。レーザーピーニングの場合は、工作物表面に事前処理が必要な場合があり、ピーニング後にも洗浄などが必要になる。そのような問題がなく、注目されているのがキャビテーションピーニングである。(ウォータージェットピーニングとキャビテーションピーニングの詳細な比較については連携記事を参照)

泡で衝撃波を発生させる キャビテーションピーニング

キャビテーションとは、高速の流体中の圧力差により短時間に泡の発生と消滅が起きる物理現象であり、空洞現象とも呼ばれる。その原理はベルヌーイの定理

$$\text{運動エネルギー} + \text{圧力エネルギー} + \text{位置エネルギー} = \text{一定}$$

で説明される。液体が高速で移動する時に液体の一部分が極短時間飽和蒸気圧より低くなり、液体が沸騰あるいは溶存気体が遊離することにより小さな気泡が多数生じる。

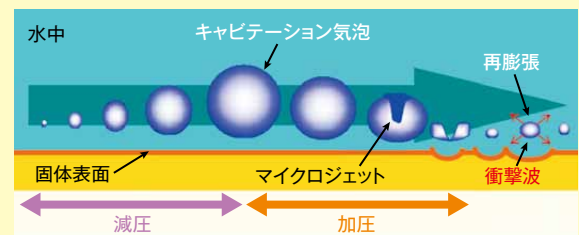
従来、キャビテーションは船舶のプロペラや船体を破損させるなど、対応すべき課題であった。これをピーニングに適用したものがキャビテーションピーニングである。

キャビテーションピーニングの原理は、次のように考えられている(図5)。高速で噴射された水流によりキャビテーションが

生じ、多数の微細な泡が発生する。このキャビテーション気泡が膨張し、縮小する際に泡の一部が崩壊してマイクロジェットを生じる。さらに、気泡の縮小は高速なので、気泡は過剰に縮小する。そのため、縮小した気泡の再膨張が生じる。これらによって発生した衝撃波が材料表面に作用する。

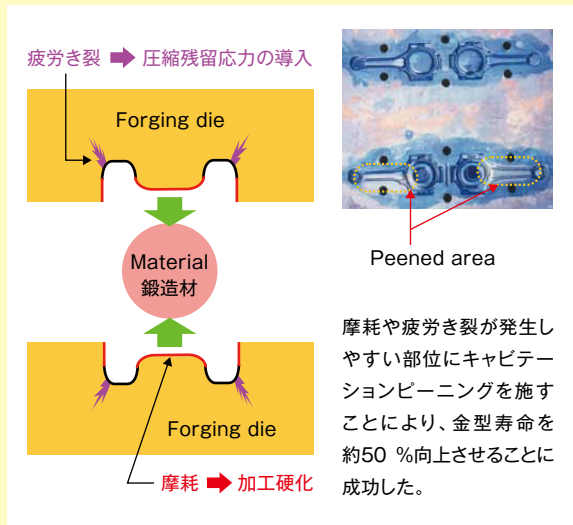
キャビテーションピーニングには、ほかのピーニング手法にはない、さまざまなメリットがある。まず、ショットを使用せず、水だけで処理を行えるため、処理後の洗浄が不要で、コンタミネーションフリーを実現できる。粉塵や廃棄物の発生が無い、ゼロ・エミッションの達成も可能である。また、狭隙部や曲がり管内など、ショットやレーザー、ウォータージェットが届きにくい場所でも処理することが可能である。

●キャビテーションピーニングの原理(図5)

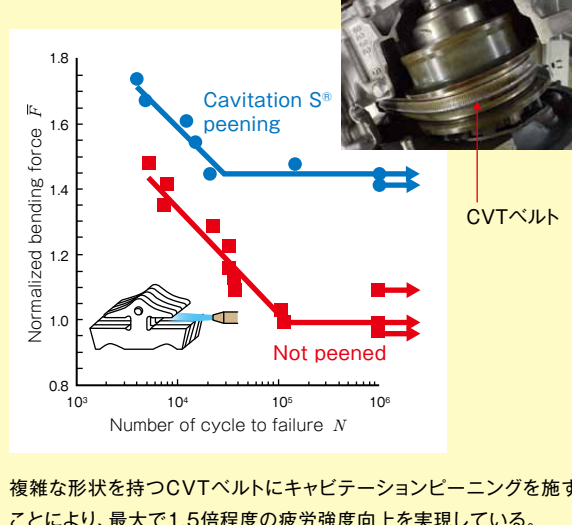


溶存気体などが核となり、キャビテーション気泡が発生する。膨張した気泡は流速の低下とともに縮小し始める。このとき泡の一部が急速に崩壊し、マイクロジェットを生成し、衝撃波を生じる。また、高速で縮小した泡は、その反動で再膨張する。このときにも衝撃波が生じると推測されている。

●金型の表面改質(モデル図)(図6)



●CVTへの適用例(図7)



期待される多彩な応用分野

キャビテーションピーニングの適用範囲は広く、幅広い分野において研究開発が行われている。

適用分野の例として、金型やローラ、歯車などの表面改質が挙げられる。複雑な形状でも表面改質が可能なキャビテーションピーニングを適用することにより、狭隘部でも確実なピーニングを行うことができる。

一例として、金型へのキャビテーションピーニングの例を挙げる(図6)。複雑な形状を形成する金型はその表面に大きな荷重がかかるために、摩耗や疲労き裂が発生し、定期的に補修あるいは交換が必要になる。この摩耗や疲労き裂が発生しや

すい部位にキャビテーションピーニングを施すことにより、金型寿命を約50%向上させることに成功している。

自動車のCVT(Continuously Variable Transmission: 無段変速機)に使用されている鋼製のベルトへの適用を研究した例もある(図7)。CVTは入力側プーリーと出力側プーリーの直径を変化させることで連続的な変速を実現している。鋼製ベルトはそれぞれのプーリーとの摩擦により駆動力を伝えるため、耐摩耗性と強度が要求される。そのため、特殊な形状の鋼片を数百枚重ね合わせた形状が採用されている。複雑な形状のため、ショットピーニングなどの適用は難しいが、キャビテーションピーニングを行うことにより、最大で1.5倍程度の疲労強度を向上できることが明らかになっている。

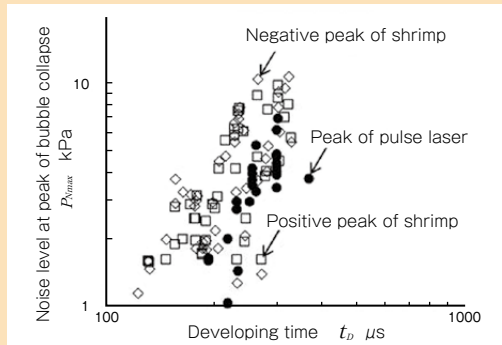
自然界でも活用されるキャビテーション

自然界では、テッポウエビがキャビテーションによる衝撃波を獲物の捕獲や身を守るために利用している。

テッポウエビは日本各地に分布し、第一歩脚の大きさが左右で異なるという特徴を持つ。大きな方のハサミを素早く開閉することで、キャビテーションの原理を用いて、破裂音が発生させ、敵を威嚇したり、獲物を気絶させたりすることが知られている。近年のパルスレーザにより発生するキャビテーションとの比較研究では、発生する気泡の形状が異なるものの、気泡の発達・崩壊時間と音圧については、類似性が見られるとの報告がある。



●テッポウエビとレーザによるキャビテーション音圧の比較(図8)



気泡の発達・崩壊時間 t_d は気泡の直径とほぼ比例する。気泡サイズが同等の場合、エビによる音圧 P_N が大きくなる傾向がある。パルスレーザの場合には気泡内温度が上昇し、内部に発生した蒸気によるクッション効果のためと推測される。

鋼板製造設備に導入されているキャビテーションピーニング(キャビテーションブラスト)

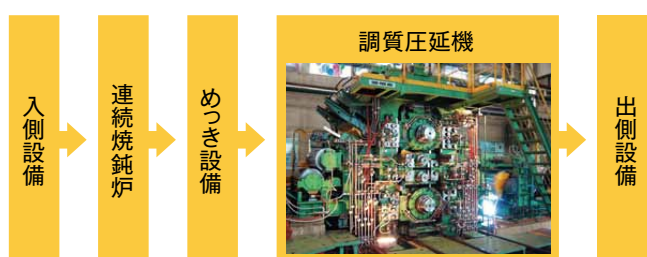
キャビテーションピーニングの展開例として、連続溶融亜鉛めっき鋼板ライン(CGL: Hot Dip Continuous Galvanizing Line)への導入例を紹介する。

溶融亜鉛めっき鋼板は、トタンなどの建材用や家電、自動車など多彩な分野で利用されている。CGLでは受け入れた鋼板をパイオフリール(巻き戻し装置)、表面洗浄、焼鈍などの処理が施された後に、めっき槽で亜鉛めっきが施される。その後、鋼板の平坦度修正、表面粗さや光沢を調整し、ストレッチャーストレイン(プレス時に筋状の模様が生じる現象)などを防ぐために、調質圧延機にかけられる。また、調質圧延機では、塗装性やプレス性の向上のため、圧延ロール表面の粗度を鋼板に転写し、板表面粗度を制御している。その後、亜鉛めっきされた鋼板は出側設備でコイル状に巻かれるなどして出荷され、一連の作業は連続して行われる。

調質圧延機の圧延ロールには、亜鉛などが付着するために定期的に洗浄する必要があった。また、その際にロール表面の粗度を損なわないことが重要であった。

従来は、ブラシによる洗浄や高圧水スプレーを使用した洗浄が行われていたが、表面に異物が残留したり、ロール表面を損耗したりするなどの課題があった。しかし、洗浄にキャビテーションピーニングを応用したキャビテーションブラストを適用することにより、ロール表面の表面粗さを確保しながら、必要十分な洗浄を行うことに成功した。

●連続溶融亜鉛めっき製造ラインの模式図(図9)



原料となる鋼板は、入側設備、連続焼鈍炉、めっき設備を経て、調質圧延機で板表面粗度が与えられる。キャビテーションピーニング(キャビテーションブラスト)は調質圧延機のワークロールの洗浄に用いられている。

(写真提供: 新日鉄住金エンジニアリング(株))

また、興味深い分野として、生体材料への適用が挙げられる。コンタミネーションフリーであることや、処理後の洗浄などが不要である点は、生体材料にも適している。人工関節などに用いられるチタン材料には耐摩耗性が求められるため、十分な硬度が必要になるが、ヤング率は骨と同等であることが望ましいとされる。そのため、キャビテーションピーニングにより、人工関節表面の硬度を強化することで、生体への負担を減らし、耐摩耗性を向上させた人工関節の開発が行われている。

ピーニングの際にショットなどを使用せず、ピーニング前後の処理が不要という特徴があるため、プラント予防保全技術としても注目されている。設備の老朽化対策は工場などでも課題になっており、特に24時間操業が多い化学プラントでは、安全な保全工法が求められていた。ウォータージェットピーニングと比較して対象物を損傷する恐れのないキャビテーションピーニングは、プラントの機器や配管などに生じる応力腐食割れの予防保全対策として期待されている。

さらに、キャビテーションピーニングの洗浄効果に着目し、圧延ローラの洗浄への適用(コラム参照)や、口腔内洗浄用器具の開発が研究されている。

そのほか、洗浄機能を生かした分野としては、半導体などの製造プロセスでシリコンウエハに侵入した不純物を素子活性

領域外に捕捉し、その悪影響を抑えるゲッターリング処理にキャビテーションピーニングを適用し、デバイスの信頼性向上を目指す研究も行われている。

最近では、水素関連機器の水素脆化を解決する方法として、キャビテーションピーニングが期待されている。これは、キャビテーションピーニングによって材料表面層に耐水素脆化層(圧縮残留応力導入層)を形成することにより、外部からの水素侵入量の低減を図るとともに亀裂先端への水素凝集を抑止しようとするものである。すでに、水素構造用材料として認可されているオーステナイト系ステンレス鋼JIS SUS316Lを用いた耐水素脆化層導入による水素脆化抑止効果の研究が進められている。(詳細は連携記事を参照)

多彩な分野への適用が期待されるキャビテーションピーニングであるが、国際的な技術基準は策定されていない。現在、日本が中心となってキャビテーションピーニングの処理条件やノズル形状の規格化などが進められている。さまざまなメリットを持つキャビテーションピーニングはサステナブルな社会の実現に寄与していくことが期待される。

●取材協力 東北大学大学院・祖山均教授
●文 石田亮一