



< 第 47 回 >

バイクの耐食性・耐熱性を高める独自の表面処理技術を開発 ～ナノ膜コーティング技術 "SixONY™" (シクソニィ) の展開～

ヤマハ発動機株式会社 材料技術部 高橋 尚久氏に聞く

風を切って快走するオートバイ。むき出しのエンジンから大きな曲線を描いて車体後部の排気口につながる排気管。これは、オートバイの機能およびデザイン上重要な部品であり、特にオートバイのワクワクするカッコよさを引き出すものである。しかし、オートバイ業界に於いては、この排気管が走行距離に伴って変色し、やがては赤く錆びて汚れることが悩みであった。ヤマハ発動機株式会社は、Si-O-N から成るナノスケールのセラミックコーティング膜技術 "SixXONY™" (シクソニィ) を開発し、この問題を解決した。4 万キロ走行後も、新品の輝きを保つ効果を発揮している。この技術を、二輪車・四輪車業界以外のナノテクノロジー分野の方々にも広く紹介し関心を持ってもらい応用展開を図ろうと、2016 年 1 月 27 日～29 日に東京ビッグサイトで開催された国際ナノテクノロジー総合展・技術会議に出展したところ、注目を浴びると共に、nano tech 大賞 2016 の独創賞を受賞した [1]。受賞理由は「バイクの耐食性・耐熱性を高める独自の表面処理技術を開発、自社製品に適用した技術を広く普及させようとしている点を賞す」である。



オートバイと共に高橋 尚久氏

そこで、SixONY™の開発者であるヤマハ発動機株式会社 エンジンユニットコンポーネント統括部 材料技術部 材料評価解析グループ主査^{注)} 高橋 尚久(たかはし なおひさ)氏を、静岡県磐田市のヤマハ発動機コミュニケーションプラザに訪問し、開発の動機と経緯、技術内容、本技術を中心とした今後の展開などをお伺いした。また、ヤマハ発動機株式会社全般に関しては、同席された企画・財務本部 コーポレートコミュニケーション部 広報グループ 技術広報担当主査 辻井 栄一郎(つじい えいいちろう)氏から伺った。

注) 所属は取材時のもの(現: 技術本部 研究開発統括部 イノベーション推進グループ)

.....



1. 感動創造企業 ヤマハ発動機株式会社

ヤマハ発動機株式会社(以下ヤマハ発動機)は、日本楽器製造株式会社(1897 年設立、現在 ヤマハ株式会社)の第四代社長 川上 源一氏によって、二輪車の製造・販売を目的に 1955 年に設立された。現在は、ブランドを共有し株式を互いに保有しあうが独立した企業である(図 1)。

ヤマハ発動機は「感動しなきゃ商品じゃない」と唱え、「感動創造企業」を標榜する。世界の人々に新たな感動と豊かな生活を提供することを目指し、人々の夢を知恵と情熱で実現し、常に「次の感動」を期待される企業であり続けてきたし、これからもあり続けていくとしている。

そしてグランドスローガン「Revs Your Heart」には、人々に「心躍る豊かな瞬間と最高の感動体験を。イノベーション



図 1 ヤマハ発動機株式会社の社章およびヤマハ株式会社との関係
マーク(社章)は両社とも 3 つの音又(チューニングフォーク)で技術・製造・販売を示すが、ヤマハ発動機では、音又にオートバイのホイールの意味を込めており音又が外側の円に接触しているところに独自性を出している。

ンへの情熱を胸に、ヤマハ発動機は挑戦を続けます」の意を込めている [2]。

ヤマハ発動機の製品開発には、3つの方針がある。第1は、独創的なコンセプトである。世にないもの、新しいものを産み出す。新しい乗り物として、電動アシスト自転車を開発したのはその例である。第2は卓越した技術である。小型エンジン技術は二輪車からマリンスポーツに展開した。また、空に展開して無人ヘリコプターの開発で農作業の近代化に貢献している。製造技術は高い精度のものづくりを実現する。プラスチック加工技術をボートに適用するのに加えて、プールにも適用した。第3は、洗練された躍動感である。造形美と構造美の融合を図る。クールで実用的、両方の特徴を備えた次世代の電動車椅子はその一例である。水上バイクのデザインは「わくわく」を形にした。心の動きをデザインにする。

ヤマハ発動機は、三つの技術（小型エンジン技術、車体・艇体技術、制御技術）を核にして、図2に示すような二輪車、水上オートバイ、産業用無人ヘリコプター、電動

車椅子等々の事業 [3] を日本をはじめアセアン諸国、中国・インドなどのアジア地域、欧州、北米・南米、アフリカ等において展開し、その製品は200を超える国と地域で販売されている（図2、図3）。

2015年12月31日現在、会社は、資本金：857億8,200万円、売上高：連結1兆6,154億円 単独6,590億円、従業員数：連結53,306人 単独10,440人、関連会社数約130社を擁している。



2. ヤマハ発動機の二輪車(オートバイ)：五感に新たな感動をもたらす創業以来の乗物

2.1 オートバイにおける排気管は感動の一つ

「感動創造企業」を掲げるヤマハ発動機の製品は、環境と調和することは言うまでもないが、色、音、振動等の

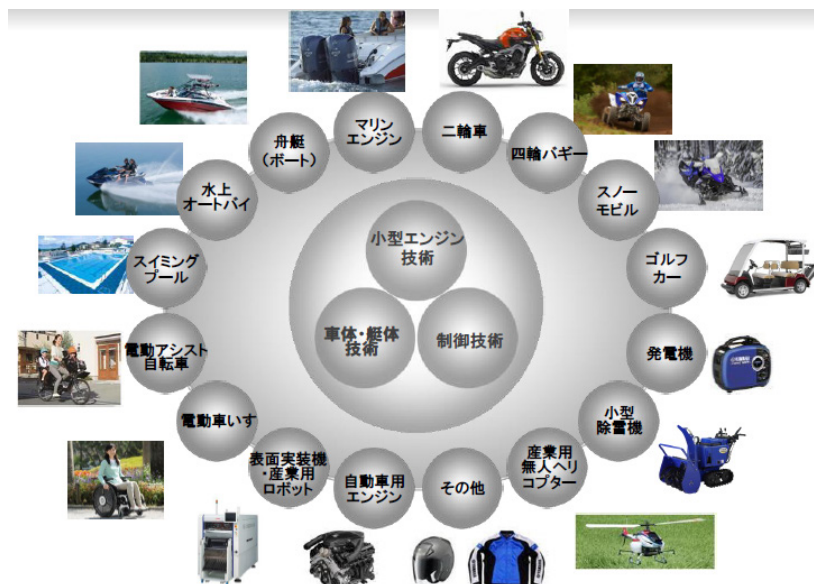


図2 核となる3つの技術と製品・事業展開

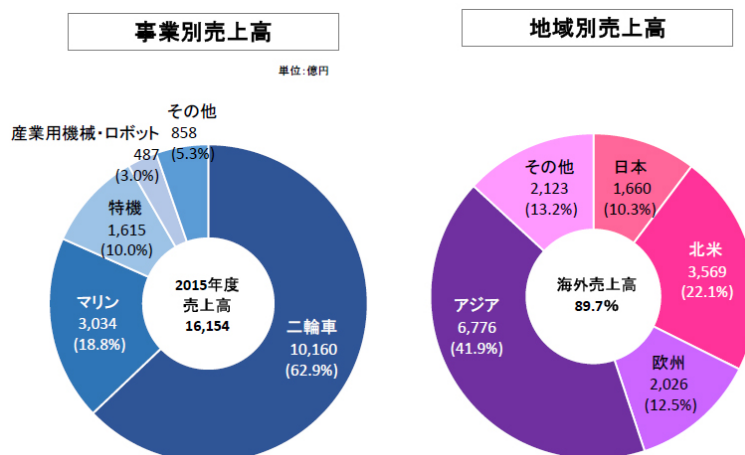


図3 2015年度の事業別売上高、地域別売上高

感覚を大切にする。創業製品であるオートバイにおいて、排気管はエンジンと同様外側にあって大きく目に付く部品である。見える部品は常にきれいでなければならない。使い込みによって変色したり錆で汚れることは好ましくない。排気管は、消音、排ガス浄化、エンジン出力の調整などの役割を担うだけでなく、二輪車のデザイン上も重要な部分である。

2.2 排気管に求められていることと現状および対策

図4(a)にヤマハ発動機の40年近くのロングセラーモデルであるSR400の古いタイプの新車を示す。エンジンと共に排気管が大きく見え、オートバイの意匠にとって重要であることがわかる。排気管はエンジンに近い部分（エキゾーストパイプ、略して“エキパイ”と呼ばれる）と後方のマフラー部分（排ガス処理触媒及びサイレンサーが入っており太くなっている）から構成されている。高温の排気ガスに曝されるのはエキパイの部分であり、排ガスの温度は厳しい環境基準に適合するために新型モデルではますます高温になってきた経緯がある。一般のエキパイは、機械構造用炭素鋼（普通鋼管 STKM）管の表面に美観を高めるために装飾クロムめっきが施されてお

り、きれいな光沢を放っている。しかし、短期間走行するだけで図の(b)に見られるようにエンジン近くのより高温側に酸化膜の形成による干渉色の金色や青色が出てくる。きれいな変色のうちはまだ良いが、酸化皮膜が厚くなると、その後走行距離が伸びるにつれて図の(c)に見られるように赤錆が発錆しやすくなる。この対策として、SR400ではエキパイ部分を3重管構造にして、見える外側の管の温度を下げ酸化を防止するようにしてきたが完全ではなかった。他のモデルでは、パイプ材質をステンレス鋼にしている場合もあるが、変色、錆の発生を完全に抑えることは出来なかった。

そこで、有害な物質を出さず、コストアップを極力抑えたクリーンで新たな製法でこの問題を解決することを検討し、開発されたのが本稿の主題であるナノ膜コーティング技術“SixONy™”（シクソニィ）であり、それを採用した新しいSR400（2010年モデル）を図5に示す。25,000km走行後も色やけ、錆の発生は見られない(図6)。また、3重管は不必要となり、2重管にすることによって、曲げ加工がシンプルになりかつ20%の重量軽減ができ、耐熱・耐食のみならずコスト的にもメリットが出ている。

次章以下、“SixONy™”の開発経過、特性、オートバイ以外への応用展開について紹介する。



(a) 旧モデル SR400 新車（排気管：装飾 Cr めっき、ナノ膜コーティング無し）



(b) 8,250km 走行後（変色）



(c) 22,000km 走行後（発錆）

図4 自動二輪車の課題

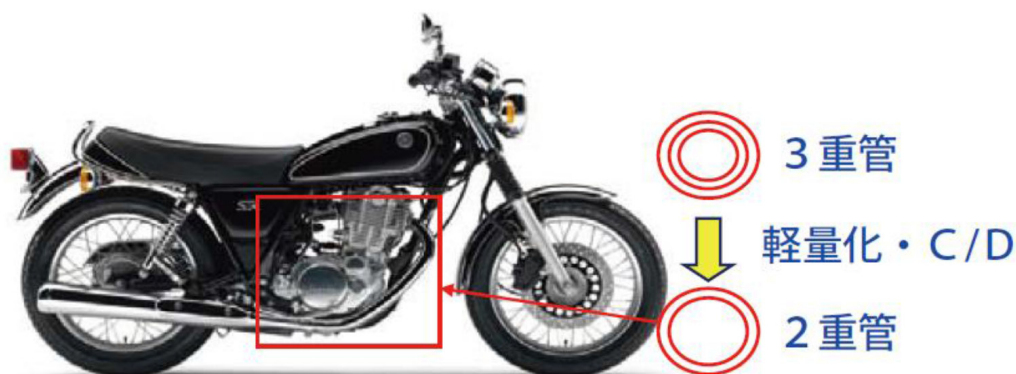


図5 ナノ膜コーティング SixONy™ の排気管を採用した SR400 (2010 年モデル)



図6 約 25,000km 走行後の SixONy™ 排気管 (SR400) 変色・錆の発生なし



3. ナノ膜コーティング技術 "SixONy™" (シクソニィ) の開発

高橋氏の所属する材料技術部は、ある材料では溶接がうまくいかないが何故か、部品が破損するが原因は何か、これを解決するにはどうすべきかといった調査解析を行っている。また海外生産において現地調達する材料や部品の、品質調査・強度評価・解決策の提示などもメインの業務である。その中で、“マフラー焼け（エキパイ部分での焼けが多いが慣用的にこう呼ぶ）”は慢性的な課題であり、“材料面から何とかならないか”との相談を受けたことからこのテーマ（SixONy™ 開発）は始まった。高橋氏にとっては、現場での調査・評価を行いながらの研究開発であり、中断することが多かったが根気よく継続してやってきた。

3.1 従来技術の評価から新組成 Si-O-N の発見 [4]

まず初めに、エキパイの表面に耐酸化性のある被膜を形成することを検討した。溶射、ゾルゲル、珪瑯等いろ

いろなものを検討したが、耐熱、耐食、透明性、色調等をすべて満足するものは無かった（表 1）。溶射は外観が別のものになってしまう。珪瑯はきれいだが、走行中に水がかかって急冷されるとひび割れてしまう。

そこで、耐酸化性がありかつ酸素や水を透過させないバリア性のある薄膜を表面に形成すればよいのではないかと考えた。水蒸気や酸素のバリア膜として食品用ラップフィルムにシリカの膜が被覆されているのをヒントに、ゾルゲル法で SiO_2 系の膜形成を試みた。テトラエトキシシラン ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$)、エタノール ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)、水 (H_2O)、塩酸 (HCl) を混合した液を調整し、それに排気管をディップし、引き上げ乾燥することでゲルフィルムを付着させ、その後 $500^\circ\text{C} \times 10$ 分間の焼成処理を行うことで約 $1\mu\text{m}$ の SiO_2 被膜を形成した [5]。 400°C 程度に加熱しても変色しない良好な膜がたまたまできた。マフラー焼けの無い膜ができることがわかり、この膜組成の周辺に答えがあることを確信したが、再現することは無かった。良好であった膜を詳細に調べたところ、膜組成は $\text{Si-O}_x\text{-N}_y$ の組成になっていることが分かり（N は空気中から混入と推定）、以後この組成に絞り込んで検討を進めた。

表 1 各種耐熱コーティングの特徴

方法	組成	膜厚 (μm)	耐熱温度 ($^{\circ}\text{C}$) ※ 1)	外観性			耐熱性※ 2)		耐食性 ※ 3)
				光沢	透明性	色調	変色	剥離	
① 溶射	セラミック系	200-2000	2000	×	×	×	○	○	○
② 耐熱塗装	セラミック系	100-500	1200	×	×	×	○	△	○
③ ゾル-ゲル法	SiO_2	0.1-0.5	400	○	×	×	×	○	×
④ ゾル-ゲル法	ZrO_2	0.1-0.5	500	○	×	×	×	○	×
⑤ PVD：イオンプレーティング	SiO_2	0.05-1.0	400	○	○	○	×	○	—
⑥ PVD：イオンプレーティング	TiN 、 TiAlN	0.5-2.0	400	○	×	×	×	○	—
⑦ PVD：イオンプレーティング	CrN 、 CrAlN	0.5-2.0	700	×	×	×	×	○	—
⑧ PVD：スパッタリング	TiO_2	0.05-1.0	400	○	×	○	×	○	—
⑨ PVD：スパッタリング	Al_2O_3	0.05-1.0	600	○	○	○	×	○	—
⑩ PVD：スパッタリング	SiO_2 、 SiN	0.05-1.0	400	○	○	○	×	○	×

※ 1) 耐熱限界温度 (メーカーカタログ値)

2) 耐熱性評価: $500^{\circ}\text{C} \times 24\text{hr}$ 大気炉中連続加熱⇒空冷3) 耐食性: CASS 試験 $16\text{hr} \times 5$ サイクルで R.N9.0 以上

評価記号: ○良好、△まあまあ、×不良

3.2 製法の探索：大型対象物も適用可能な反応性スパッタリング装置の開発 [6]

ゾルゲル法では、大きなしかも曲がった形状の排気管に均一な膜を形成することは難しい。色ムラができてしまう。また、 400°C では問題なかったが 400°C 以上では変色し酸化が進んだ。これは、ゾルゲル法では、焼成中にシリコンと結合していた有機系化合物の気化や分解が生じるため、得られる酸化シリコン膜には微細な空隙が形成されており、ガスに対するバリア性が低下しているためと考えられる。

そこで、PVD (Physical Vapor Deposition, 真空蒸着などの物理的气相堆積) 法を検討することにした。従来、スパッタリング法などの蒸着法を用いた薄膜形成は、半導体装置のようなスケールの小さなものに対しては行われていたが、排気管のようなスケールの大きなものに対しては、蒸着装置内の真空度を確保することの困難性などから工業的に行われることはなかった。高橋氏は、このような技術常識にとらわれることなく検討を積み重ねることによって以下の技術を確立した。

図 7 に示すような大型の DC マグネトロンスパッタリング装置を設計・製作した (チャンバの内径: $1,000\text{mm}$ 以上, 高さ: $1,200\text{mm}$ 以上の円柱形状) [6]。図の (a) および (b) に示すように、金属管 5 を上下に 2 つ懸架して保持するホルダ 24 を複数備えている。各ホルダ 24 は、回転軸 23 を中心に自転しながらチャンバ 21 内で公転する。ホルダ 24 が回転する軌道の外側には、複数の Si ターゲット 22 が設けられている。この装置を用い、立体的な形状を有する金属管 5 の外側全体に均一な厚さのセラミックス膜 10 を形成することができる。成膜の手順は、例えばクロムめっきが施された金属管 (STKM) を、マグネトロンスパッタリング装置のチャンバに配置し、 $3 \times 10^{-3}\text{Pa}$ の真空度に到達するまで排気し、その後 100sccm (standard cc/min) の流量でチャンバ内にアルゴンを導入し、 $3 \times 10^{-1}\text{Pa}$ の圧力を保ちながら、 800V , 5A (4KW) のパワーを投入して 10 分間逆スパッタを行い、金属管表面の自然

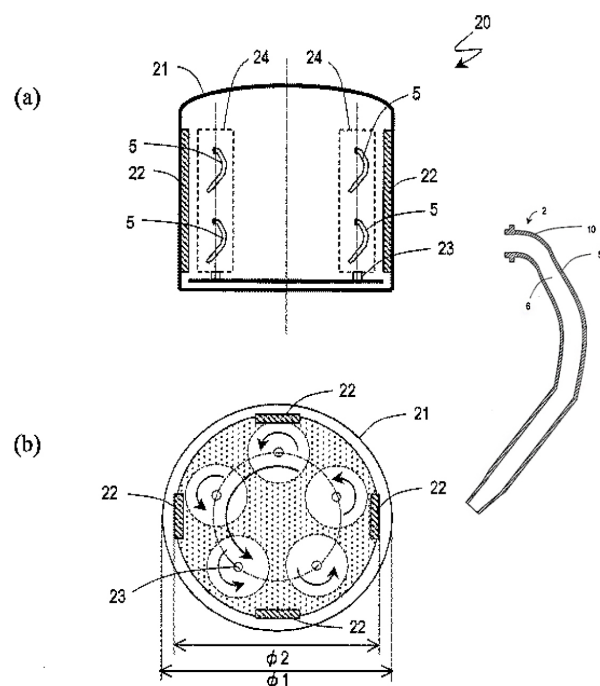


図 7 DC 反応性スパッタリング装置

酸化膜を除去する。その後、シリコンをターゲットとし、チャンバに窒素および酸素を導入し、 $3 \times 10^{-1}\text{Pa}$ の圧力を保ちながら、 800V , 5A (4KW) のパワーを投入して 5 分間スパッタを行い、金属管表面に厚さ 50nm の窒化酸化シリコン膜 (SixONy™) を形成出来る。以上から分かるようにスパッタされた Si に酸素、窒素を反応させて SixONy™ 被膜を形成するいわゆる反応性スパッタリングである (図 8)。

装置をこのように大型化し、かつプロセスの最適化を図り、真空に引くのに 10 分、トータル 50 分以内に 1 バッチが完結できるようにした。成膜温度も 50°C 以下と低いので加熱に時間を要せず又冷却時間も必要なく、すぐにワークを取り出して後工程にかかることができる。加熱時間も冷却時間も不要であり、生産効率が高い。

3.3 膜組成の最適化 [6]

SixONy™ 膜の O, N の組成をいろいろ変えてみた。酸素含有率および窒素含有率を特定の範囲内とすることにより、変色を防止する効果を格段に向上できることがわかった。

図 9 は、スパッタリング装置内に導入する酸素と窒素の比率を変えた場合の変色防止効果を、また図 10 は、SixONy™ 膜中の酸素および窒素の含有率と変色防止効果を示したものである。なお、SixONy™ 膜は SUS304 表面に形成したものである。変色は、試験片を大気中で $500^{\circ}\text{C} \times 24$ 時間加熱放置した場合の色の变化を、 $L^*a^*b^*$ 表色系における“色差 ΔE^* ”で示したものであり、2 以下が変色防止効果良好であることを示す。

図 9 に示すように、窒素ガスの濃度が 90% を下回ると（つまり酸素ガスの濃度が 10% を上回ると）、急激に ΔE^* が大きくなって好ましくない。このことは酸素を除くために高真空にすることの必要性がないことを意味し、排気時間の短縮化につながる。

図 10 (a) は SixONy™ 膜中の酸素含有率が 25% を超えると、図 10 (b) は窒素含有率が 15% 以下になると急激に ΔE^* が大きくなって好ましくないことを示している。

以上より、SixONy™ 膜中の酸素含有率を 25 質量% 以下、窒素含有率を 15 質量% 以上とすることによって良好な耐熱・変色防止効果が得られることが分かる。（もっと好ましいのは、酸素含有率を 5 質量% 以下、窒素含有率を 40 質量% 以上）。これは、高温加熱の際、窒化酸化シリコン膜中のシリコンが外部の酸素と結合するとともに元々結合していた酸素を金属管側に放出するという現象が起こっており、酸素含有率が低いほど、つまり窒素含有率が高いほどこの現象が起こりにくいということが少なくともその一因であると推測される。

3.4 使用可能な基材材質：SUS から低融点の PET フィルムまで可能

金属管基材材質としては、機械構造用炭素鋼（STKM）やステンレス鋼（SUS）、チタン、チタン合金などを用いることができる。表面の金属光沢や装飾性を高めるために、バフ研磨が行われていたり、表面に装飾クロムめっきが施されている。また、スパッタリング時の基板温度が 50°C 以下と低いので、PET フィルムやその他の樹脂表面への成膜も可能であり、用途はエキパイ以外にも広い展開が期待できる。

3.5 基材の表面粗さ [6]

金属管の表面は、図 11 に示すように、セラミックス（SixONy™）膜 10 の厚さ（波線の厚さ）に比べて大きな表面粗さを有していることが好ましい。具体的には、コー

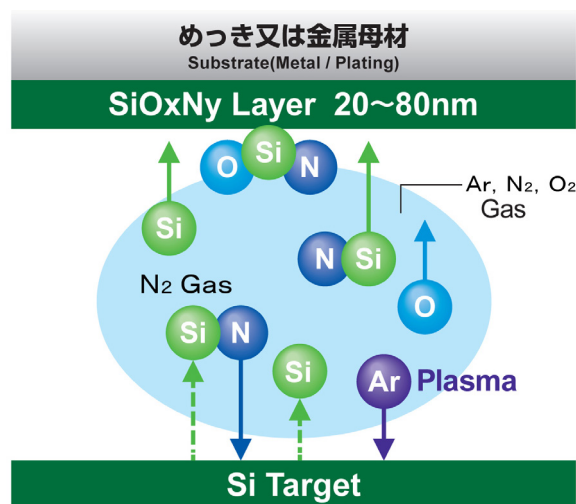


図 8 DC マグネトロン反応性スパッタリング法による SixONy™ 被膜の生成

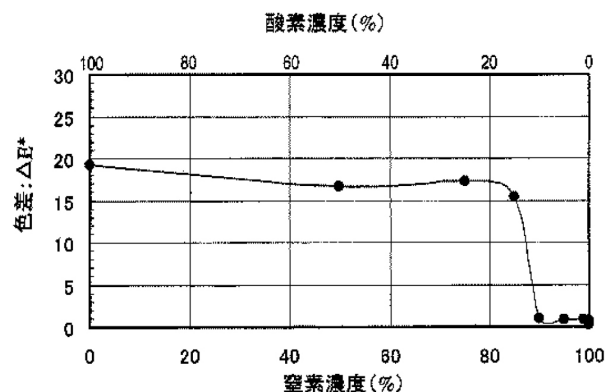
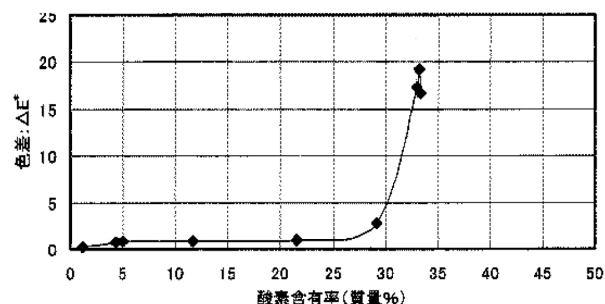


図 9 スパッタリング装置内に導入する酸素と窒素の比率を変えた場合の変色防止効果

(a) 酸素含有率の効果



(b) 窒素含有率の効果

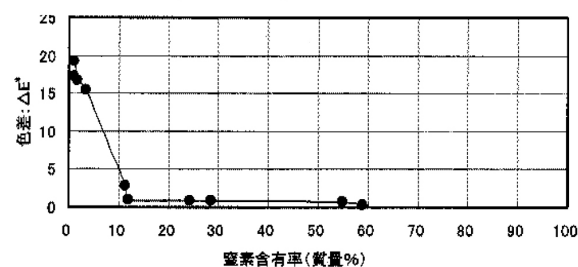


図 10 SUS304 上に形成した SixONy™ 膜の組成と耐熱・変色防止効果

ティング基材である金属管 5 の表面の平均粗さ Ra は、 $0.4\mu\text{m}$ 以上であることが好ましい。平均粗さが $0.4\mu\text{m}$ よりも小さい場合、可視光が金属管の表面で反射する際、隣り合う溝から反射した波面間の光路差が波長の整数倍のときに強め合って回折光が見られるようになり、排気管の美観を損ねる可能性がある。また、平均粗さが小さくなり、金属管 5 の表面が平滑になると、セラミックス膜 10 の密着性が低下する可能性がある。金属管 5 表面の平均粗さ Ra の値に上限は特にないが、Ra が $3.2\mu\text{m}$ 以上になると光の反射率が低下し、商品性や美観を損なうの

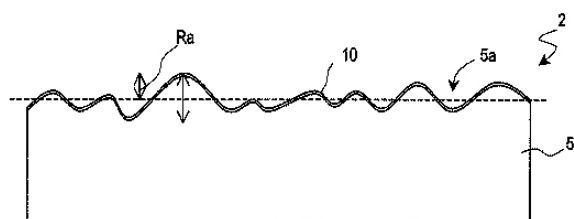


図 11 基材の表面粗さ

で好ましくない。

このように、可視光による回折光が生じる表面の粗さの範囲よりも大きな表面粗さを有する金属管の表面に、可視光による干渉縞が生じる厚さの範囲よりも小さな厚さ（ 30nm 以下）を有するセラミックス膜を形成する。それによって、高温の排気ガスが通過しても、表面の酸化、あるいは変色が生じることがなく、また、密着性に優れ、干渉縞の発生のない均一な金属光沢を有する排気管を得ることができる。



4. "SixONy™" (シクソニィ) の諸特性 [4]

"SixONy™" は、 700°C までの耐熱性、優れた耐食性、酸素・水分・塩素等に対する優れたバリア効果、無色透明から金 / 青 / 桃 / 紫等多彩な発色、耐熱性の高い無色透明・絶縁膜などの特徴を持っている（表 2、図 12）。以下、これらの代表的なものを紹介する。

表 2 SixONy™ 膜の特徴

項目	特徴
耐熱性	～ 700°C （ $500^\circ\text{C} \times 24\text{hr}$ 変色なし）
耐食性	CASS 試験 ^{※1} 16hr $\times$ 5 サイクルで $\text{RN}^{\text{※2}} = 9.0$ 以上 耐酸性・耐弱アルカリ性
耐ヒートショック性	500°C の状態に水をかけても破膜しない
耐摩耗性	基板の硬さの 1.2 倍以上、傷つきにくい
優れたガスバリア性	酸素、窒素、水蒸気、塩素、水等を透過しない
被膜硬度	コーティングにより基材硬さ向上
色調	耐熱性の高い無色透明膜を実現 屈折率と膜厚を制御して多彩（金/青/桃/紫等）な発色
電気抵抗性・熱伝導性	高い
広い基板選択性	金属以外の PET やその他の樹脂上にも成膜可能
コスト	装飾メッキより安価
生産性	処理温度は 50°C 以下、超高真空を必要としない

※1：Copper. Accelerated Acetic Acid Salt Spray, 加速腐食試験の 1 つ

※2：Rating Number, 腐食の程度を腐食面積率により表す指標。腐食発生なし：10, 全面腐食：0

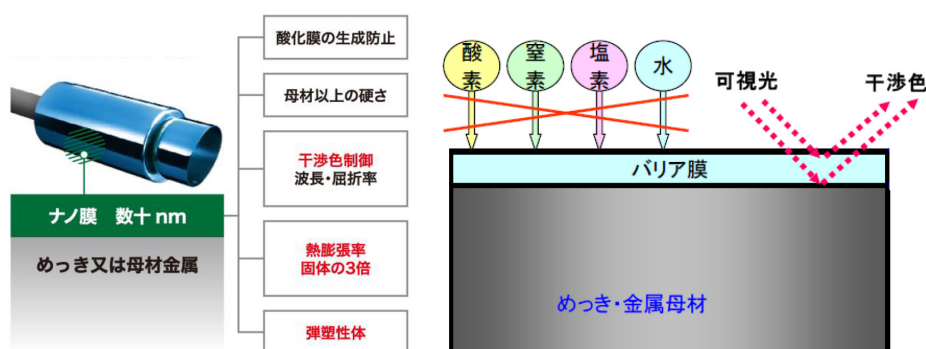


図 12 被膜特性

4.1 耐熱性・耐酸化性 [4]

図 13 に試験結果の一例を示す。試験片は装飾クロムめっき鋼板を用い、SixONy™ 膜のコーティング有無について、高温加熱試験および発錆試験、防錆油塗布加熱試験を実施して結果である。コーティング無し品は加熱後黄色に変色し、その後の発錆試験では赤錆が発生している。SixONy™ 膜 20nm のコーティング品は熱による変色はなく、錆も発生していない (図 13 (a))。また、防錆油を塗布後に加熱しても、コーティング品は油の跡は残らない (図 13 (b))。

4.2 膜厚と色 [7][8]

SixONy™ 膜の厚さは、5nm 以上 300nm 以下であることが好ましい。5nm より薄い場合、金属管を均一に覆う

よう SixONy™ 膜を形成することが難しくなり、また十分なガスバリア性を確保することができないため、金属管の表面の酸化や変色を完全に防ぐことが難しくなる。一方、300nm よりも厚くなると、SixONy™ 膜を形成するために要する時間が長くなり、生産性が低下するため、好ましくない。また、300nm よりも厚い場合や、SixONy™ 膜が完全に均一な厚さを有しない場合、虹色のような干渉色が見られやすく、外観の装飾性が低下する。生産性の観点からは、SixONy™ 膜の厚さは、50nm 以下であることが好ましい。SixONy™ 膜の厚さが 5nm から 30nm の範囲であれば、干渉色が発生しない無色透明な膜が得られる。

また、図 14 に示すように膜厚を変えることによって様々な色を発色することができる。色は干渉色なので、膜厚を変えて無色透明から金色、青色を量産している。今はもっと濃い目の色を出せる開発も手がけている。

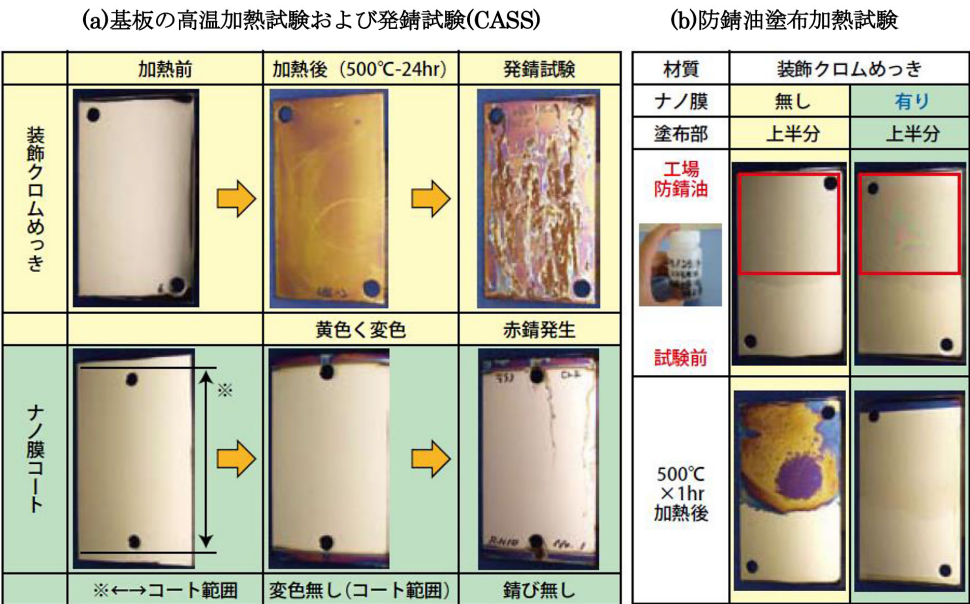


図 13 基板の高温加熱試験結果



図 14 SixONy™ の膜厚の違いによる様々な発色

4.3 宝石の輝きを持つ SixONy™ 膜コーティング 排気管の耐熱性

厚さ 80nm の SixONy™ 膜コーティングによって青色の宝石の輝を持つ排気管が得られる(図 15(a)). 図 15(b, c, d) は, この青色に着色したエキゾーストパイプ(エキパイ)の高温加熱試験の様子を示したものである. エンジン全開によりエキパイは赤熱され(図 b), 冷却途中も赤味が残っているが(図 c), 冷却後は元の青色に着色したエキパイに戻っている(図 d).

アフターパーツでは, チタンカラーのような装飾部品が多く見られるが, 使用中に熱変色してしまい, きれいな商品性を維持することは難しい. しかし, SixONy™ 膜による着色ではこのように熱変色が生じないため, いつまでもきれいな色を維持できる.



視覚で得られる感動!

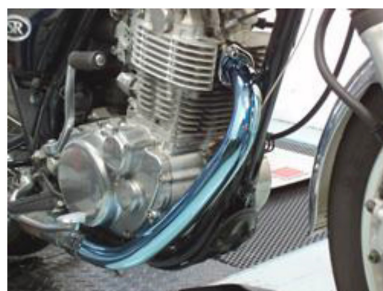
(a) 宝石の輝きを持つ排気管



(b) 加熱試験中の様子 (真っ赤なエキパイ)



(c) 冷却途中のエキパイ (赤みが残っている)



(d) 冷却後の外観

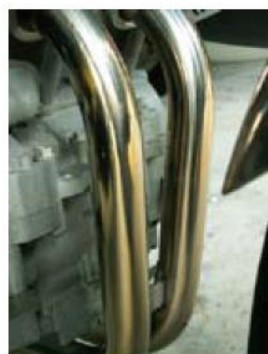
図 15 宝石の輝きを持つ青色エキゾーストパイプの高温加熱試験結果



5. 社内モニター結果および市場からの 反響

コーティングされた SixONy™ 膜の長期に渡る性能評価のため, テストコースでの走行耐久試験の他に, 通勤車両による社内モニター走行を実施した. 5 車種 14 台の車両の排気管に成膜を施し 2 年間継続した. 走行距離は 10 万 km におよび良好な結果を得た(図 16: 途中経過). 実感できた効果は, 図 16 に記述したように “①変色しない” から “⑦洗浄で汚れが消える” までの 7 項目あり, 高い満足度のモニター結果であった.

透明ナノ膜 SixONy™ を搭載したオートバイは, 2007 年に実用化・量産を開始した. SixONy™ をコーティングしただけで色も形状も変わらないので同じ価格帯での販



実感できた効果

- ①変色しない
- ②錆ない
- ③傷付きにくい
- ④光沢がある
- ⑤洗浄しやすい
- ⑥泥が付きにくい
- ⑦洗浄で汚れが消える

図 16 約 4 万キロ走行車両 (TMD-900: 変色・錆の発生なし), および実感できた効果

売となった。積極的な宣伝はしなかったのですが、お客様にとっても見た目に変わりが無くあまり話題にはならなかった。ところが、発売後半年過ぎたころから、ネット上で「ヤマハのエキパイ（エキゾーストパイプ、排気管）は、いつものように変色したり錆びたりしない」「どうもナノ膜コーティングをしているらしい」と話題になり始めた。そして、「僕のエキパイをコーティングしてくれないか」との要求も出てくるようになった。もちろんお断りしている。

また、2014年のことであるが、名古屋で「人と車のテクノロジー展」が開かれ、公益社団法人自動車技術会から各社の持っている“オンリーワン技術”を出展するようにとの要請があった。ヤマハ発動機では、このナノ膜コーティング技術を出したところ、二輪業界、四輪業界以外にも多くの問い合わせが来た。そこで、今年はより広い分野に渡る展示会であるナノテクノロジー展に出展（実はこの時点で本技術を“SixONy™”シクソニィと命名）したところ、図らずも独創賞をいただいた。そして、エキパイだけではなくナノテクノロジーという観点から多くの問い合わせが来てうれしい悲鳴を上げているところであるとのことである。また、ヤマハ発動機は2016年の5月31日から6月2日までの3日間、ドイツのシュツトガルトで開催された「O&S 国際表面処理 & コーティン

グ専門見本市」（主催：ドイツメッセ株式会社）においても、「SixONy™」の技術展示を行ったところ、多くの国々の多くの企業から興味をもたれており、対応を検討している [9]。



6. 商品への適用状況

2007年に「FZ1/FZ1 FAZER」で実用化して以来、「SR400」（2010年型以降）、「MT-09」（図17）などに採用されているナノ膜コーティングであるが、その技術はキッチン用品売り場でも目にすることができる。ある会社がカクテルシェーカー（図18）に応用し話題を呼んでいる [8]。金色にコーティングしたカクテルシェーカーを、2015年に百貨店で公開したところ今世界中から引き合いが来ているとのことである。高級感の色もよいが、親水性（接触角<30度）で、高級・高価なお酒を残すことなくきれいに流すことができ具合がよいと評判になっている（ちなみに、ステンレス製のシェーカーは撥水性である）。その他、食器・キッチン関係から自動車用外装パーツまで、「SixONy™」ナノ膜コーティング技術はさまざまな発展性を秘めている。マリン部品への展開も考え進めている。



図17 「SixONy™」ナノ膜コーティング技術によるエキゾーストパイプ採用の「MT-09 TRACER」

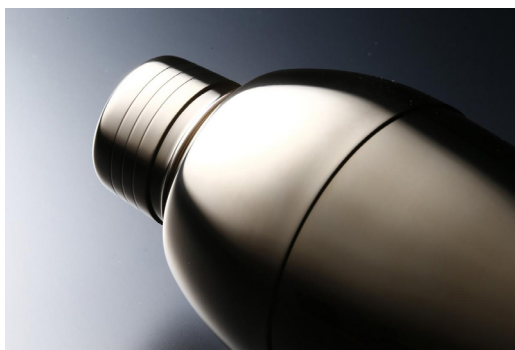


図18 「SixONy™」ナノ膜コーティング技術による他社製市販カクテルシェーカー



7. おわりに

SixONY™ 膜は、今まで述べてきたように耐熱性・耐食性・耐傷性に優れ、かつ基材への密着性がよく基材の伸びぢぢみに追従し、外表面からの急冷（サーマルショック）にも耐えるすばらしい特性を持っている（一種の超高耐熱性ゴムのような性質を持ったセラミック薄膜である）。さらに、熱伝導性がよくかつ電気絶縁性（抵抗率 $10^{11} \sim 10^{14} \Omega \text{cm}$ ）もよいことからヒートシンクへの応用も期待されている。「ナノテクノロジープラットフォーム [10]」などの先端的研究支援事業の諸機能・諸設備を活用して、発現メカニズムをより詳細に解明するとともに、新たな特性を明らかにし、既に寄せられている要求およびこれからも寄せられてくるさまざまな高度な要求に応えていけるようにしたい」と高橋氏は話された。

ヤマハ発動機が、ナノテクプラットフォームとの協力研究等により、基本的なまた新たな諸性質やその発生のメカニズム等が明らかになり、そしてより広く多くのニーズや課題に対し、ヤマハ発動機と顧客とが連携し多くのイノベティブな“SixONY™”の応用製品が生まれることを期待したい。



参考文献

本文中の図表は、全てヤマハ発動機株式会社より提供されたものである。

- [1] nano tech 大賞 2016 独創賞, <http://www.nanotechexpo.jp/main/award2016.html>
- [2] ヤマハ発動機株式会社ホームページ, <http://www.yamaha-motor.co.jp/>

- [3] ヤマハ発動機の商品展開系譜, <http://aichihatsumei.oos.jp/wp-content/uploads/2015/09/b02efa98feaf401fe4ecb2f0a0764bdf.pdf>
- [4] 高橋尚久, 村越 功, 「耐熱・耐食性に優れたナノ膜コーティング技術開発」, Yamaha Motor Technical Review, No. 46, pp.4-11, (2010), <http://global.yamaha-motor.com/jp/profile/technical/publish/no46/pdf/gso2.pdf>
- [5] 高橋尚久, 金子裕治 (ヤマハ発動機株式会社): 「内燃機関の排気管」, 特開 2002-332838, 公開日 2002.11.22
- [6] 高橋尚久 (ヤマハ発動機株式会社): 「内燃機関用排気管およびそれを備えた内燃機関並びに輸送機器」, 特開 2007-100693 (特許第 4521382 号), 公開日 2007.04.19
- [7] ヤマハ発動機: 「宝石の輝き SixONY シクソニィ™」 ナノ膜コーティング技術, <http://www.yamaha-motor.co.jp/sixony/>
- [8] 技術の広がり「ナノ膜コーティング」とシャボン玉との関係, <http://global.yamaha-motor.com/jp/profile/technology/spread/005/>
- [9] ドイツで開かれる表面処理 & コーティング専門見本市に出展 ナノ膜コーティング技術「SixONY™」について 2016 年 5 月 17 日発表, <http://global.yamaha-motor.com/jp/news/2016/0517/sixony.html>
- [10] 文部科学省「ナノテクノロジープラットフォーム事業」: <http://nanonet.mext.go.jp/>

(真辺 俊勝)