紹介　100年塗料を目指して

塗料のイノベーション

【QR 1】
←塗料革命

塗料革命

ステンレス金属粉を使用した耐用年数30年塗料/100年塗料(開発品)の紹介

浜 口 真 佐 樹*

1　はじめに

『塗料革命』は下記(1) (2) (3)を合わせたものを称している。

(1)東洋アルミニウム社の高耐久性・金属塗料ステンシェル®（ステンレス粉含有）（30年塗料）

(2)産総研・開発のオール無機塗料（劣化する樹脂を含まない）（100年塗料：開発品）

(3)産総研・開発のオール無機・機能性塗料，センサー塗料（研究品）

今回は(1) (2)を紹介する。

(1)の東洋アルミニウム社の「高耐久性金属塗料」は，製鉄会社が長年研究してきたステンレス・フレーク金属粉を主原料にして，錆びない，高耐久性の塗料（30年塗料）で，30年以上の実績を持つものである。しかし，金属粉含有の分だけ，単価が従来のペンキ塗料より３倍近く高いため，海洋土木などの分野で著名でない塗料である。

海洋土木，港湾施設，土木工学・建築工学の塗料の耐用年数に対するコモンセンス（共通認識）

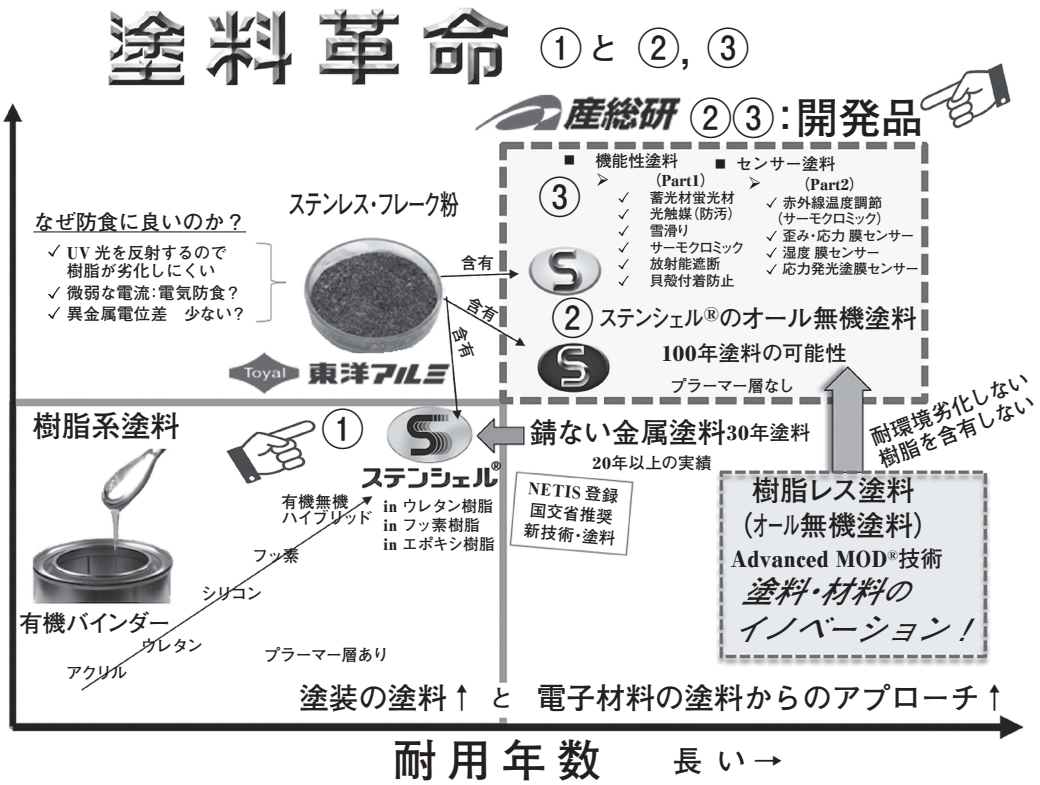


図１　『塗料革命』の現行品と開発品

＊ Masaki Hamaguchi　㈱緑マーク　技術･事業 顧問　東洋アルミニウム㈱　技術顧問

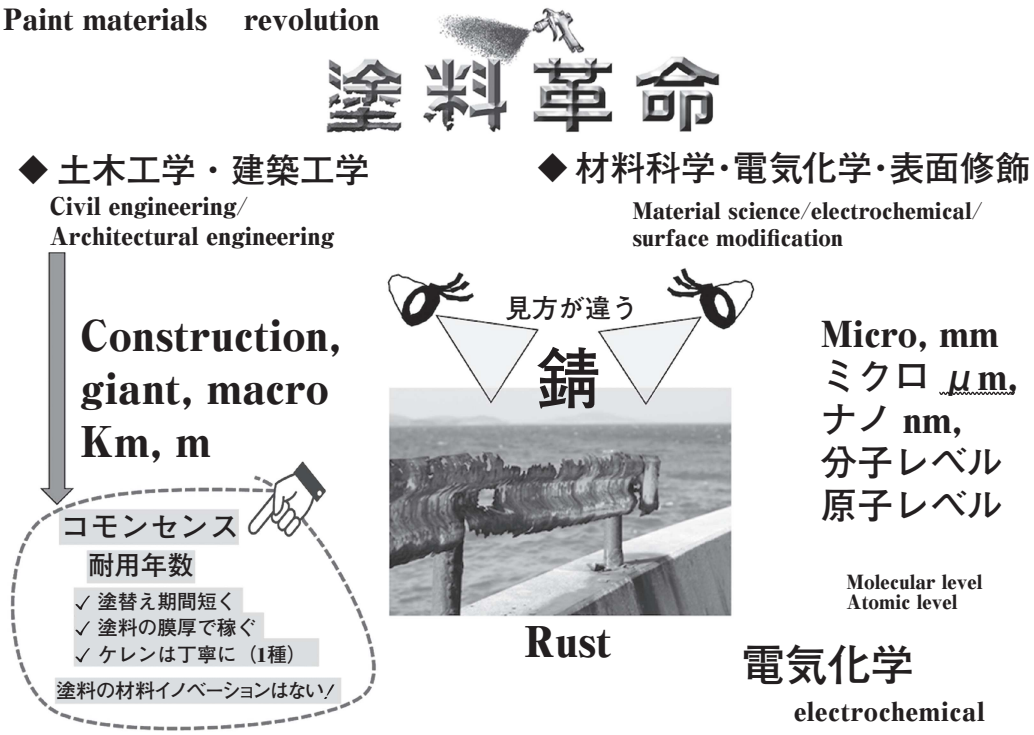


図２　錆に対するコモンセンスと見方の違い

は，主に以下の３つである。

✓　塗替え期間短く

✓　塗料の膜厚で稼ぐ

✓　ケレンは丁寧に（１種）

上記のコモンセンスは，次世代塗料の市場への参入の障壁にもなりうる。

また「塗料・材料のイノベーションはない」という別のコモンセンスがある中，⑵⑶を，2021年末より産総研，及び技術移転先の企業においてオール無機塗料（劣化する樹脂を含まない）（100年塗料の可能性あり）と，オール無機・機能性塗料/センサー塗料の研究がなされてきた。2022年中旬にオール無機塗料とオール無機・機能性塗料/センサ塗料の一部の試作に成功した。

ステンレス・フレーク金属粉含有が，腐食耐用年数の長期化に大きく貢献している要因と考えられる。

2　オール無機金属塗料（3G，4G）

オール無機金属塗料は，30年塗料の東洋アルミニウム社の現行ステンシェル®の「ウレタン」バインダー樹脂や「エポキシ」バインダー樹脂の有機高分子樹脂の入っていない進化版塗料である。

通常，水ガラス，ゾルゲルガラス塗料，ハイブリッド有機無機塗料は単体だと塗膜が厚くなれば膜中にクラックが発生しやすくなる。開発品のオール無機金属塗料は，塗膜を厚くする事ができるのを特徴としていて，塗膜を厚くしても（１回塗り100μm厚でも）クラックのない塗料である。これはオール無機金属塗料にステンレス・フレーク金属粉を含有することで，膜中の応力緩和（クラック防止）と塗膜強度の向上にステンレス・フレーク金属粉が寄与していると考えられる。このステンレス・フレーク金属粉の寄与は，現行の樹脂系ステンシェル®でも同様である。ステンレス・フレーク金属粉は，それを使用するだけでペンキの価格が３倍近く高くなる。しかしそれは，30年塗料でも100年塗料でも耐用年数の長期化やLCC（ライフ・サイクル・コスト）ベースのトータルコストダウンに貢献する重要原料であり，かつそれが必要コストと見なしている。⑵のオール無機塗料（劣化する樹脂を含まない）は，焼付（180℃）タイプ（3G：仮称）と，常温硬化タイプ（4G：仮称）があり，4Gは現行のペンキ塗料と同等の使い方が期待できる。

3G，4Gともに前述の現行のステンシェル®高

耐久性・金属塗料と同様にステンレス・フレーク金属粉を主材料にしている。ステンレス・フレーク金属粉の錆に対する効果は，学術的にはまだ充分解明できていないが，現行のステンシェル® の30年塗料としての実績が効果を示している。

●電子顕微鏡（SEM）の断面写真

一方，産総研の開発品である，オール無機塗料は有機金属[1]（金属石鹸など）分解法[2]（MOD）という技術で結着される。この結着・分子間結合力のメカニズムは，始まったばかりの学問で，メカニズムは十分に解明できていない（解明研究が始まっている）。

オール無機金属塗料の電子顕微鏡（SEM）の断面写真を撮りやすくするため，PET（ポリエチレンテレフタレート）基板に塗布している。

図 3 はステンレス・フレーク金属粉を主材料にした常温硬化タイプ4G のオール無機金属塗料の電子顕微鏡（SEM）の断面写真と，**図 4** は断面のＣ（カーボン＝有機物）マッピング写真である。カラー写真ではＣ原子は赤いドットで表されている。塗膜断面には赤いドットが観察されない（塗膜断面には樹脂有機物は含有されていないことを示している）。オール無機金属塗料の一つの証明で，ステンレス（SUS）金属フレークとアモルファス状のシリカのみが観察される【QR１】。のビデオ中に SEM カラー写真（図３）と断面のＣ（カーボン＝有機物）マッピングカラー写真（図４）を見ることができる。また，常温硬化タイプ4G の鋼板上のオール無機金属塗料と畜光剤塗料，焼付（180℃）タイプ3G のオール無機金属塗料と畜光剤塗料も【QR１】で見ることができる。

3　電子材料の塗料からのアプローチ

従来の有機金属[1] 分解法[2]（MOD＝Metal Organic Decomposition）は，スピンコートなどの薄膜塗布手法のみで，ペンキ塗料のように厚く塗布する手法は存在しなかった。また有機金属分解法の分解する手段は，エネルギーの高い光（エキシマレーザー光）による分解か，200℃近い温度をかける熱・分解法の手段しかなかった。

常温で厚く塗布できる MOD 法を Advanced MOD® と呼んで区別する（日本発の技術）。

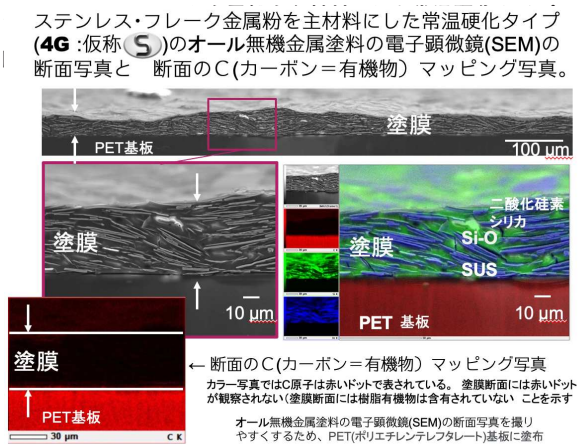


図 3　4G のオール無機金属塗料の SEM の断面写真

図 4　断面のカーボン（＝有機物）マッピング

Advanced MOD® は，電子材料用の塗料インクの技術経験から開発されたもので，塗装のペンキ塗料とは，事業・ビジネススタイル，技術・品質管理などのカルチャーが違う。

図 5 は，600～1400℃の焼成をしないで膜付けする，金属/セラミックの製膜方法を横軸に，縦軸に塗布厚・膜厚を示した。メッキ法や蒸着法は，非・焼成のオール無機膜が形成されるが，厚く塗布するのは困難である。ペンキの様な塗料は無機物を樹脂バインダに混練すれば厚く塗布できるが環境劣化する樹脂は膜中に残る。

産総研開発のオール無機・機能性塗料とセンサー塗料(3)は，詳細は今回割愛する。

それら(3)は近年メッキ法や蒸着法といった薄膜

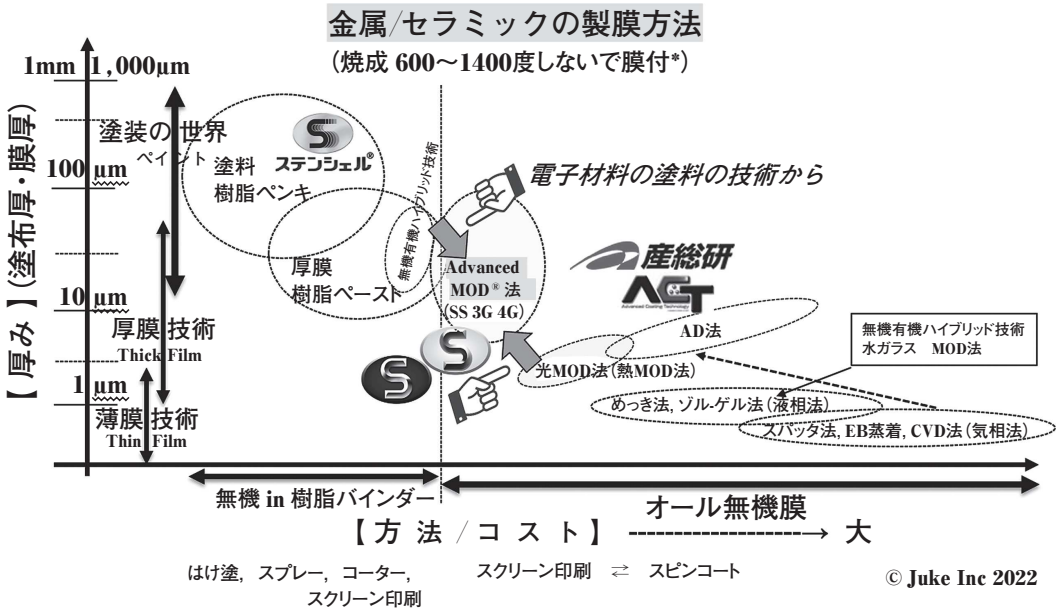


図 5　600 ～ 1400℃で焼成しないで膜付する金属/セラミックの製膜方法と塗布・膜厚

技術で研究されてきた，「無機機能」材料の機能性（蓄光，光触媒，放射能遮蔽，サーモクロミック）や，センサー能力性（応力発光など）を，オール無機塗料に応用した塗料である。

> 有機金属化学①（organometallic chemistry）とは金属と炭素との化学結合を含む化合物である有機金属化合物を研究する学問。有機金属化学は無機化学と有機化学とが融合した領域である。
> 有機金属分解（MOD）法②（熱分解 MOD と光分解 MOD の２つ）金属元素を含む有機化合物を主成分とする溶液（前駆体溶液）を印刷塗布し，乾燥・焼成などの熱（またはそれと同等の，光（UV）処理を施すことで金属や酸化物を形成する方法。
>
> 酸化物（セラミック，金属）の薄膜塗布技術の製膜方法として，スパッタ法，EB 蒸着，CVD 法などがあり，産業分野で応用されている。化学的な手法を用いる MOD 法がある。MOD 法は薄膜塗布技術に限定されてきた。

図 6 は，塗装の塗料（ペンキ）と電子材料の塗料（ペースト）の比較表である。両方の塗料は見た目は，ともにペンキ状であるが，事業・ビジネススタイル，技術・品質管理などのカルチャーが違う。

電子材料の塗料は，スマホの各種電子部品，太陽電池のセルの電極，自動車や飛行機，宇宙船の電装部品など，信頼性が求められる回路などに使用されている。信頼性の加速試験，破壊試験は数値化されている。

4　釉薬（オール無機塗料）の歴史

スマホの各種電子部品，太陽電池のセルの電極，自動車や飛行機，宇宙船の電装部品など信頼性が求められる回路などに使用されている電子材料の塗料（厚膜ペースト）の元祖は陶器の釉薬（うわぐすり）の塗料技術である。

一方，塗装の塗料（ペンキ）の元祖は漆塗りといえる。日本には9,000年前の地層から発見された漆塗りの副葬品が世界最古の漆塗り**図 7** で，ウルシからとれる樹液を塗料にして作った漆が日本古代の塗料である。ラッカーの１種である漆から，硝化綿（ニトロセルロース）ラッカー，さらに，プラスチック人工合成のアクリル樹脂ラッカーが約90年前に誕生し，現在に至っている。

陶器の釉薬と漆塗りの塗料は塗料の２大系統で前者はオール無機塗料の代表格で，焼成（500～1400℃）することで有機樹脂などが「脱バイ」され（バインダーが飛び，燃え去り，抜けること）オール無機膜が残る。漆塗りの塗料は現在の樹脂

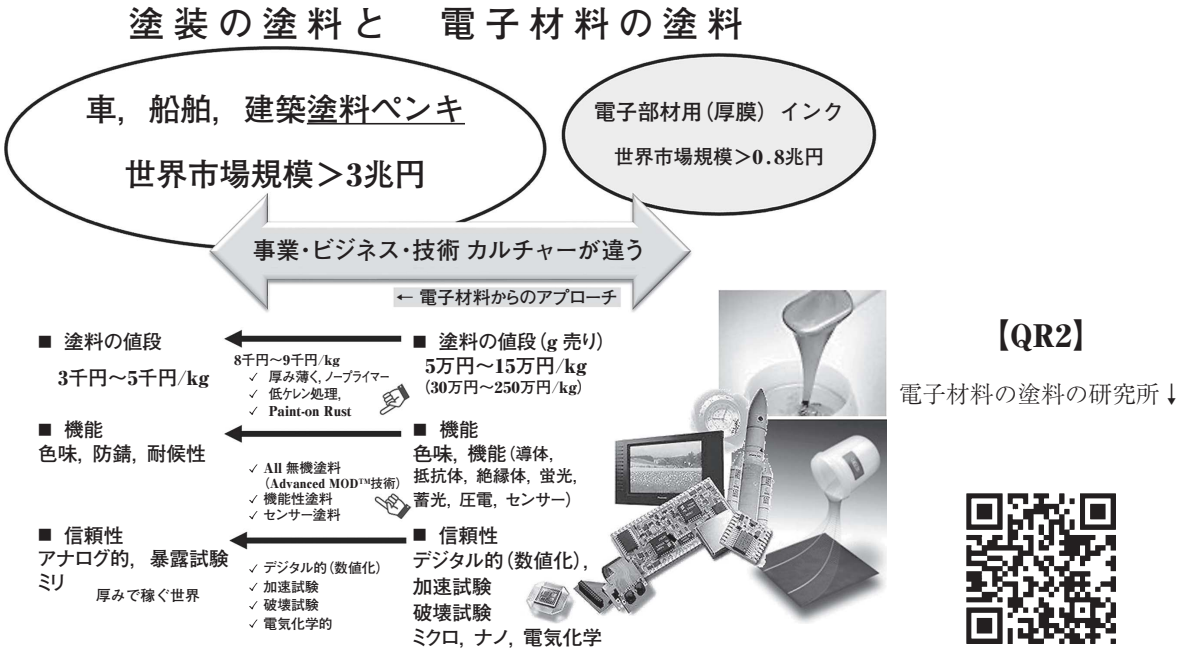


図 6　塗装の塗料と電子材料の塗料の違い，信頼性の違い

図 7　世界最古の漆塗り

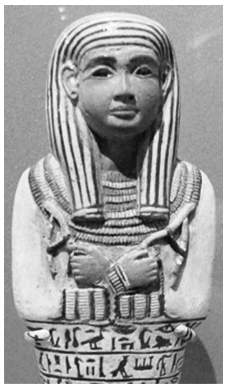


図 8　フィイアンス焼き

図 9　300 年前の伊万里焼

系ペンキに到り，焼成する必要がないぶん，塗膜中に環境劣化する有機樹脂が残る。

釉薬は紀元前４千年紀に石材に初めて登場し，古代エジプト・フィイアンス焼き**図 8** に釉薬が発見されている。日本の古墳時代の須恵器，中世の瀬戸焼，江戸時代の伊万里焼など焼成タイプの釉薬は，いにしえより使用されてきて，食器の装飾釉薬として描かれている。電子材料用の焼成タイプ塗料はこれらが元祖で，100年以上前の伊万里焼**図 9** などは劣化がなく存在しているのはオール無機塗料であるからである。

5　信頼性を 100 年かけて証明するのか？

塗料の耐用年数100年の信頼性を，100年かけて評価・実証するのは，人間の寿命を考えると困難である。釉薬のオール無機塗料は歴史が証明しているが，これから100年塗料を採用するリスクを考えると，100年の信頼性を２～３年で検証できる信頼性のテストをサイエンスとして確立することが重要である。

電子材料用の塗料の技術，製造，信頼性のカルチャーを100年の耐用年数求められるペンキの塗料（3G，4G）に持ち込むべきと考える。

電子材料用の塗料とペンキの塗料は，同じ塗料でも技術，製造，信頼性のカルチャーは全く違う。図６参照。

電子材料の塗料は，自動車の電装部品に使われ，万一信頼性が低いと，人命に関わるので，信頼性試験，加速度破壊試験は厳しい条件下で行われている。

現行ステンシェル® は耐候テストでは９年の錆の加速度試験でもびくともしないが（市場では30年の実績：**図21**），密着強度の信頼性試験は，目視のみで数値化されていない（ペンキの塗料はみな同様である）。

一方電子材料用塗料の基板への密着強度は引っ張り試験などで検証され，初期とエージング・加速度試験後は数値化して耐用年数を推定している。

6　ステンレス　ハイ・エンド・モデルの薄厚フレーク粉とアワビの貝殻

世界的に広く使われているステンレスは「SUS 304」と呼ばれている。このSUS 304よりも耐食性が高い素材が「SUS 316」で，SUS 304には含まれていない「モリブデン」という成分を含んでいる。このモリブデンによって不働態皮膜（錆びにくい特性/別名：酸化被膜）がより厚くなり，耐食性が向上する。ステンシェル®，3G，4Gで使われているステンレス粉は，『SUS 316 L』である。

SUS 316 Lはステンレス材のハイ・エンド・モデルで，SUS 316に含まれる炭素の量を低くしたローカーボンタイプのステンレスである。

この球形SUS 316 L粉**図10**を東洋アルミニウム社のコア技術である金属フレーク化技術で球状粉をフレーク状粉（SUS 316 Lフレーク粉と呼べる）にしたもの**図11**を塗料の主原料としている。

フレーク粉は長径約30μm厚さ0.1μm（0.3～0.5μm）と薄く，長径/厚さのアスペクト比が100以上と高いため平行に層状に並びやすい。このため，水，酸素，塩水，紫外線の遮断を防げるラビリンス（迷路）効果に有効な構造になっている。

図12，**13**のように塗膜中のハイ・エンド・ステンレス・フレーク粉の多層が迷路のようになり，

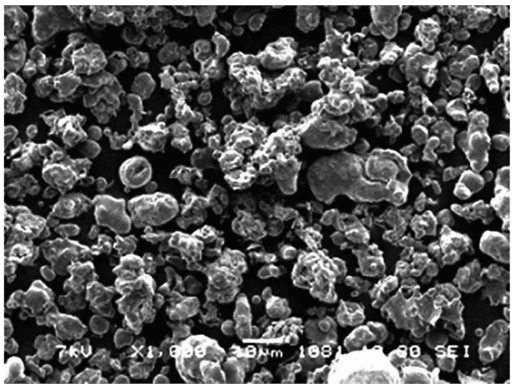


図 10　SUS 316 L 球状粉

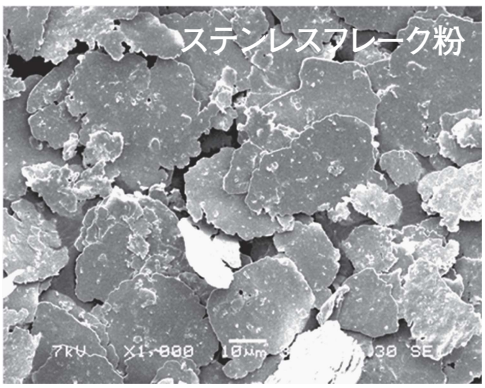


図 11　SUS 316 L フレーク粉

図 12　ステンシェル® 断面写真

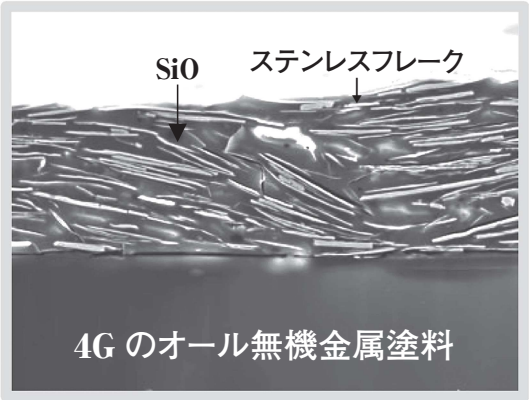


図 13　4G オール無機塗料　断面写真

外部からの水分，塩分，紫外線の侵入を防げる構造になっている。

ステンシェル® の名前の由来になっている「ステンレス」+「シェル」の Shell（貝殻）は特に強靭なアワビの貝殻にちなんでいる。

硬くて，熱にも強いセラミックスは，割れやすいのが最大の弱点である。アワビの貝殻も自然に形成されたセラミックス（炭酸カルシウム）でできている。落としたくらいでは絶対に割れず，ハンマーでたたいてもなかなか壊れないほどである。貝殻内側の虹色の光沢面が「真珠層」とよばれる。

厚さ1μm 以下の薄い板状の（炭酸カルシウムのアラゴナイト結晶）を積み重ねた「ナノ積層構造」が強靭な貝殻を形成している。

ステンシェル®，3G，4G で使われている厚さ1μm 以下の薄いステンレス粉が同様の「ナノ積層構造」をとるため，可撓性（応力緩和）があり，かつ膜硬度の高い塗膜を形成する。このことで，耐チッピング性の高い塗膜であるため沿岸構造物・砂塵に適した塗料となる。

7　耐用年数・長期化のコスト低減

現行ステンシェル® の塗装実績例に，水力発電の水圧鉄管（外面と内面塗装）がある。水力発電所は，山間部にあるイメージだが，１件は山間部，１件は沿岸部の２件の実績例がある。

図16に示す沿岸の富士川第二発電所は，東名高速道路・蒲原トンネルの南側斜面で，駿河湾の蒲原海岸から約650m，潮風の吹き曝し立地の鉄管である。

それまで従来のエポキシ塗料やウレタン塗料で，６年毎に塗替え補修を行ってきた構造物を2016年にステンシェル® 塗料で塗り替えた。従来の塗替え期にあたる６年目の2022年も腐食や劣化がなく健全な塗膜状態である（**図17**）。

従来の塗料で，６年サイクルで補修していた構造物を，ステンシェル® 塗料で15年サイクル補修にした場合の耐用年数長期化モデルの例を LCC（ライフサイクルコスト）チャートにし，30年の LCC コスト比較をした（**図18**）。塗料（ペンキ）

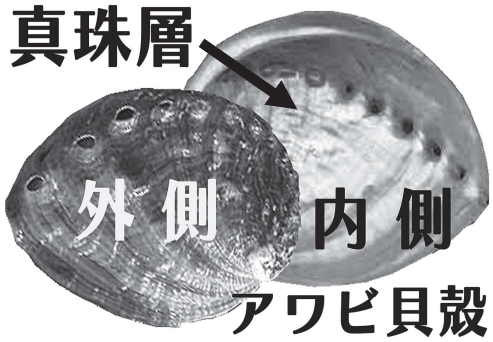


図 14　アワビ貝殻　内側の真珠層

図 15　真珠層のアラゴナイト結晶

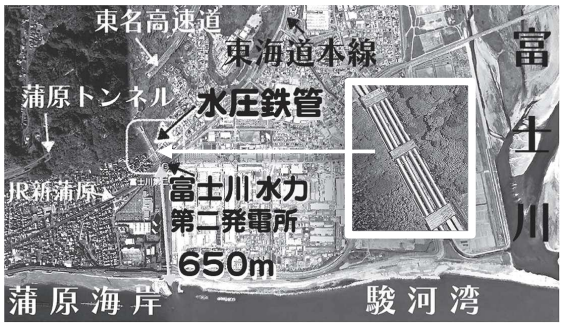


図 16　沿岸の水力発電所の地図

図 17　水圧鉄管の塗装前と後

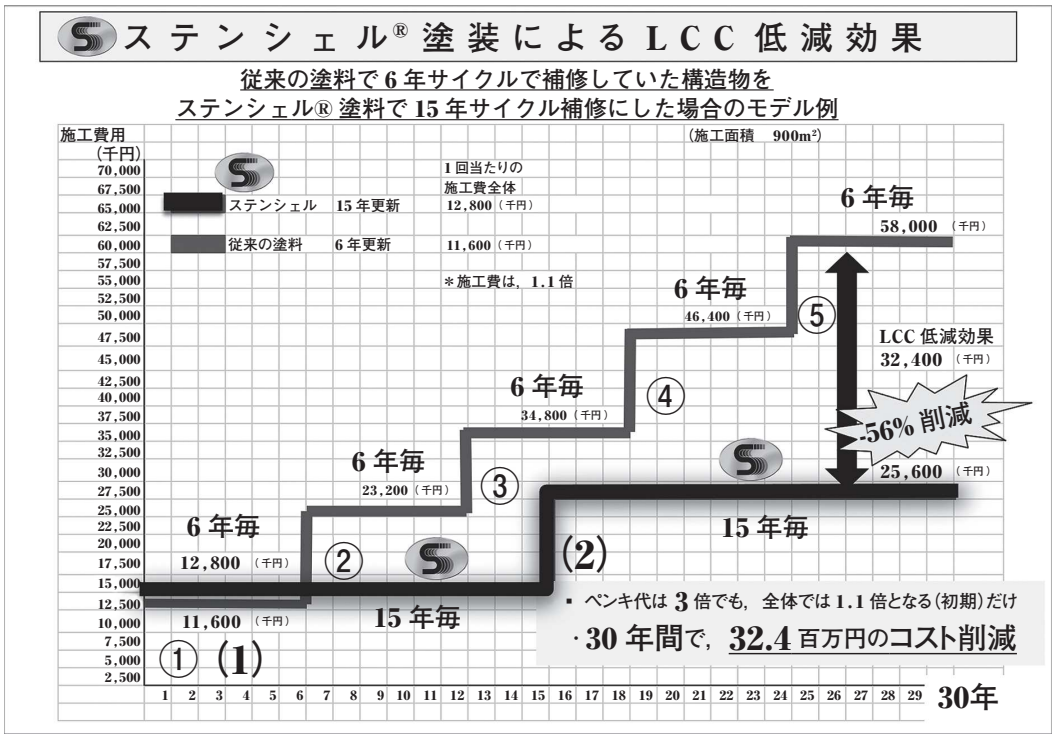


図18　LCCコスト比較(1)低減モデル

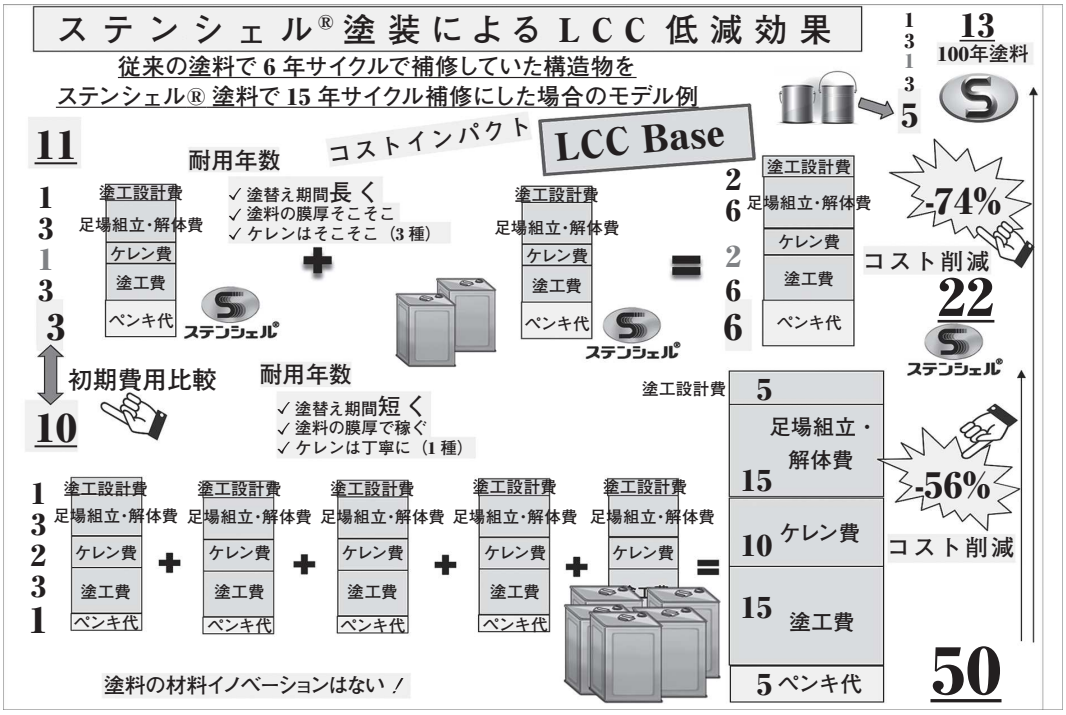


図19　LCCコスト比較(2)ペンキ代

図 20　沿岸部のドラム槽の塗装（1991 年）

図 21　ドラム槽の塗装（30 年経過）

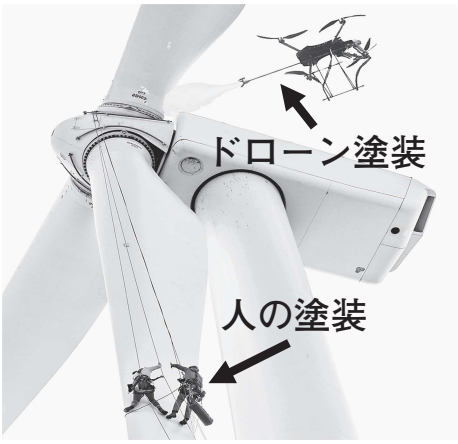


図 22　ドローン塗装（イメージ図）

【QR 3】
ドローン塗装の開発
紹介ビデオ（海外）
（7分）

代は単価で3倍高くても，全体の1回の総補修代では1.1倍となる仮定である。30年間で，約56％のLCCコスト削減となる（図18）。**図19**は，一般的なLCCコスト・チャートの必要コストを項目別に“まるめて”コスト指数にしたものである。ステンシェル® 塗料のように耐用年数長期化に寄与する必需経費である，ハイエンド・ステンレス・フレーク原料を使っても30年LCCコストの多大な削減に繋がる。

●30年塗料のエビデンス

初期ステンレス・フレーク粉塗料の沿岸エリアに立地する製鉄所・コークス炉のベンゼン回収ドラム槽への塗装（1991年塗装）。

30年（2021年）経過後，汚れはあるものの，大きな塗膜劣化はない。塩害による主要部の錆発生も見られない（30年塗料の実証・実績）（**図20**，**21**）。

8　ドローンによる塗装

現行のステンシェル® 塗料，または，オール無機防錆塗料は洋上発電の長寿命化にも貢献できると考える。洋上発電のタービン，支柱（海上，海中）の塗装塗替えコストは発電コストに組み込まれ，利益バランスに大きく左右すると思われる。また足場の組立・解体のいらないドローン塗装などの，将来構想も特に洋上発電で重要になってくると考える。

海外ではドローン塗装・クリーニングなどの開発が始まっている【QR 3】。

【QR 4】
ステンシェル®
紹介ビデオ(1)
（5分）

【QR 5】
ステンシェル®
紹介ビデオ(2)
（10分）TV 番組

【QR 6】
ステンシェル®
スプレー塗装
ビデオ(3)

【QR 7】
ステンシェル®
紹介：東洋アル
ミの Web サイト

【QR 8】
ステンシェル®
紹介（みんなの
試作広場）

【QR 9】
ステンシェル®
推奨塗装仕様書
ダウンロード・URL
（2022年 3 月版）

【QR10】
ステンシェル®
沿岸部・構造物への塗装採用実績
集：スライドショーの動画（5分）

図 23　アンローダへの部分塗装（苫小牧）

図 24　腐食によるスキーツアーバス事故

図 25　バス車体下部　融雪剤腐食

9　高耐久性・金属塗料ステンシェル®（30 年塗料）

ステンシェル® 塗料は，耐腐食性に優れた錆止め塗料である。酸，アルカリ，塩分など腐食成分に強い防錆力を持つ微細なステンレスフレークを含んだ樹脂膜を塗布することで，傷や腐食因子を遮断し，錆の発生を押さえ，長期にわたり素材を守る。樹脂と強力に親和・接着したステンレスフレークの積層構造・塗膜が，従来の重防食塗料と比較して優れた耐候性，耐食性，耐薬品性を発揮する。

10　ステンシェル® の実績

高耐久性・ステンレス金属塗料ステンシェル® の沿岸部・構造物への塗装採用実績集は下記 QR コードよりスライドショー・ビデオが（5分）見れる【QR10】（スライドショーの動画再生を一時停止にすればスライドは読める）。

●日本軽金属㈱苫小牧製造所港湾設備塗替え（アンローダー部分塗装，海上ベルトコンベア，ボーラード，バースのピット部）

●日本軽金属㈱蒲原製造所，富士川・第二水力発電所（沿岸部）水圧鉄管・塗替え（内側・外側）図16，図17参照

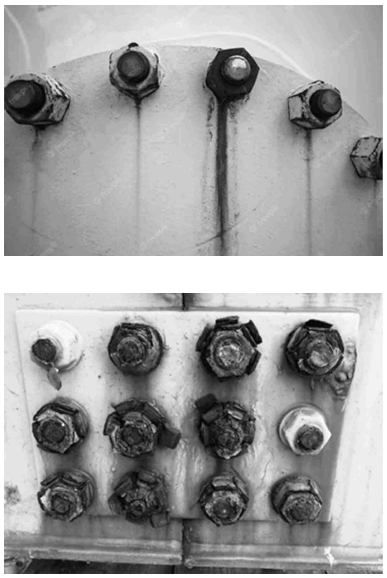


図 26　錆びたボルト

図 27　錆びないステンシェル® 塗装ボルト

仕様	30サイクル（240時間）	120サイクル（960時間）	210サイクル（1680時間）
ステンシェル® ボルト	赤錆発生無し	赤錆発生無し	赤錆発生無し
溶融亜鉛めっき ボルト（HDZ35）	わずかに赤錆発生	赤錆拡大	全体が赤錆へ
他社製 防錆塗装ボルト（素材は HDZ35）	赤錆発生無し	わずかに赤錆発生	少しずつ赤錆拡大

図 28　複合サイクル試験（JIS K 5600-7-9）のテスト結果

●太平洋セメント㈱東京 SS 他沿岸部プラント設備塗替え
● ENEOS ㈱水島製油所，沿岸部プラント設備塗替え　　他　多数

※ステンシェル® は国土交通省新技術情報提供システム NETIS 登録番号を取得している新技術塗料である。

国土交通省 新技術情報提供システム
ステンシェル®　NETIS登録番号
KKK-170005

11　雪国の車両の床下塗装

軽井沢のスキーツアーバス事故はブレーキの腐食だと言われている（**図24**）。

トラック・バス・列車の下回り塗装は融雪剤，氷結などで北海道地区，雪国ではシビアーである（**図25**）。1年持つ塗料がなく困っているのが現状である。高耐久性・ステンレス金属塗料ステンシェル® は，これらの用途にも問い合わせがあり，テスト塗工が始まっている。雪国のクレー車の床下も同様である。

命に関る，安心で安全な社会のために高耐久性・防錆塗料は必要になるであろう。

12　ボルトへの塗装

ボルトなどの錆が発生しやすいパーツへの高耐久性・ステンレス金属塗料ステンシェル® の実績も大きい。腐食を防ぐ主な手段は溶融亜鉛めっきが挙げられるが，沿岸地域や温泉地では，それでもボルトの錆びが発生しやすい。一方，下図のようにステンシェル® を塗装したボルトは，海塩粒子や化学物質による腐食を長期間にわたって抑制する。

13　ステンシェル® の推奨システム

高耐久性・ステンレス金属塗料ステンシェル® の沿岸部・構造物への塗装の推奨は，**港湾施設の点検・保守技術ガイドブック（2022年版）2022年4月**
一般財団法人　港湾空港総合技術センター
（P70，P71）を参照。

14　まとめ

通常のペンキは，色味・発色で差別化する，また樹脂のグレード（アクリル，テフロン，エポキシ樹脂）で差別化している。それとは別に，30年塗料であろうが100年塗料であろうが，耐用年数の長寿命化は1つの『長寿命』というファンクション（機能）である。蓄光塗料やサーモクロミック（赤外線透過コントロール）塗料，応力発光塗料といった機能性のある塗料には，その機能を持たせる『機能材（蓄光材や酸化バナジウムなど）』が塗料中に不可欠である。耐用年数長寿命化を1つの機能ととらえると，ステンシェル®，3G，4Gは「長寿命化」という機能の機能性塗料と言える。

それらに使われるステンレス材ハイ・エンド・モデルSUS 316 Lの厚さ1μm以下の薄厚フレーク粉そのものが，重要不可欠な『機能材』である。

開発中の3G，4Gの塗料も，また重要不可欠な『機能材』であるステンレス材ハイ・エンド・モデルSUS 316 Lの厚さ1μm以下の薄厚フレーク粉が使われており，現行ステンシェル® から劣化する樹脂成分を抜いたオール無機塗料である。現行ステンシェル® のステンレス・フレーク材が劣化する樹脂分をプロテクトする機能を持っているために，初代ステンレス・フレーク入り塗料が現場で，今でも30年の耐用年数を更新中である（40年50年耐用年数の可能性もある）。

3G，4Gは100年塗料の信頼性が確認がされれば，100年塗料として可能性の高い技術である。

15　その他参照

●東洋アルミニウム株式会社について

アルミニウム製品の製造・販売を主要事業とするメーカー。前身は1931年に創業。アルミニウム箔やアルミニウム板・アルミニウムペーストなど，創業以来90年にわたってアルミニウムの可能性を追求している。また，近年は日用品やフィルムなど，アルミニウムメーカーの枠を超えた今までにない製品開発に取り組んでいる。

アルミニウム粉のフレーク化製造技術が，ステンシェル® のステンレス粉フレーク化技術に多大な貢献をしている。

【QR11】
東洋アルミニウム
早分かり Web

【QR12】
東洋アルミニウム
会社紹介動画

●国立研究開発法人　産業技術総合研究所（産総研）について

【QR13】
産総研
ホームページ Top

【QR14】
AIST 紹介動画
（4分）

●本製品（現行・ステンシェル® 塗料）関する
問合せ先　東洋アルミニウム㈱
　　新事業創造部・ステンシェル® 担当
電話番号　大阪：06-6245-4162（直通）
　　06-6271-3151（代表）
　　東京：03-5501-0776（直通）
　　03-5501-0777（代表）
Web 問 合 わ せ：https://www4.nikkeikin.co.jp/ssl/Toyalquesdb.nsf/ques_Product?OpenForm
（コメント欄にステンシェルについてとご記入下さい）

【QR15】
東洋アルミニウム
問合わせフォーム Web

国土交通省
新技術情報提供システム
ステンシェル®　NETIS登録番号
KKK-170005

強靭塗料

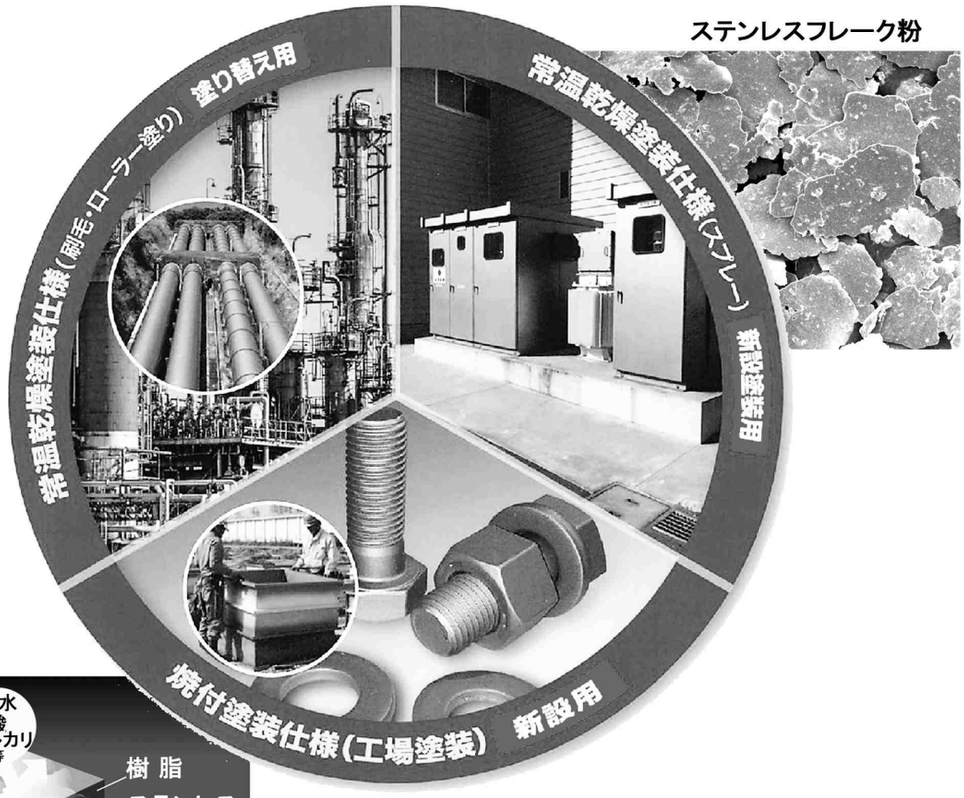
ステンシェル®塗料

（ ステンレスフレーク含有塗料 ）

優れた耐久性と高い防錆力

クレーン(新設塗装・塗替)・ボラード・水門・鉄管・橋梁・キュービクル・車両床下・ボルトなど
長期の耐食性と耐久性を求められる湾岸・沿岸・雪国の場所に有効です。

ステンレスフレーク粉



Toyal
東洋アルミ

ステンシェル®
紹介動画

ステンシェル®
カタログ

東洋アルミウム株式会社
https://www.toyal.co.jp/
[新事業創造部]
● 大阪〒541-0056 大阪市中央区久太郎町三丁目6番8号
TEL: 06-6245-4162(直通)
● 東京〒1051-0004 東京都港区新橋一丁目1番13号
TEL: 03-5501-0776(直通)