自動車用アルミニウム部品の表面処理技術 Surface treatment technology of aluminum part for cars

山口 賢之*

Masayuki YAMAGUCHI*

1. はじめに

21世紀は、1997年12月に京都で開催された気候変動枠組条約第3回締約国会議（COP3、京都会議）で採択された、先進国および市場経済移行国の温室効果ガス排出の削減目的を定めた京都議定書を始めとして、地球温暖化に対し人類一人一人がどう取り組んで行くかが重要な時代であるといえる。

そういった中で、自動車に携わるものとしても低燃費化要求は避けて通れない急務の課題となっている。巷ではハイブリッドや燃料電池のように大きくマスコミ等で取り上げられている動力源の低燃費化技術の開発も進められているが、車体の軽量化が低燃費化と動力性能の向上を両立させるのに不可欠な技術であることを忘れてはならない。この中で大幅な軽量化を実現するには、ボディ素材のスチールからアルミニウムへの材料置換が一つの有効な手段であった。

ここでは、世界初オールアルミニウムボディを実現したNSXから、スチールボディにアルミニウムパーツを組合せるアルミニウム・スチールハイブリッドボディ（以下ハイブリッドボディ）であるS2000や最新のレジェンドまでの表面処理における生産技術の観点を中心とした知見・課題および今後の展開について述べる。

2. アルミニウムボディ生産ラインの概要

当初本田技研工業(株)は栃木製作所にあった高根沢工場ではオールアルミニウムボディからハイブリッドボディまでを生産していたが、現在では鈴鹿と埼玉の製作所においてハイブリッドボディを生産している。ここでは、当初生産していたアルミニウムボディ塗装ラインの概要を図1に示す。この工場は1990年に量産開始したアルミニウムモノコックボディNSXの専用工場として立ち上がり、その後ハイブリッドボディの生産も行っていた。

基本的にこの工場は、少量生産機種の生産を行っており、投資最小を狙ったNSX立ち上がり時のラインコンセプトをベースに、その後の新機種についても最小の投資で立ち上げを実施してきた。

その後、ハイブリッドボディ機種の拡大や更なる生産性の向上を目的に鈴鹿製作所に設備移管された。また埼玉製作所にも中量生産機種となるレジェンドのハイブリッドボディ生産設備を導入してきた。

3. アルミニウム素材適用範囲の変化

当初、オールアルミニウムボディとしてNSXを立ち上げて高い品質を狙ったが、結果的にはアルミニウム材料によりコストを圧迫する結果となった。

しかしながら、軽量化による低燃費化は急務の課題であり、後回しにすることはできない。そこで、我々は軽量化とコストを高い次元で両立させるために、ハイブリッドボディの量産化へと進むことにした。この方向は今後も拡大はあっても縮小して行くことはないと考えられる。

4. アルミニウムボディの表面処理

1990年8月より発売を開始したNSXは、オールアルミニウムボディにすることにより車体を軽量化し、加速・ハンドリング性能向上と燃費改善を実現することができた。しかし、アルミニウムに特徴的な問題として、塗膜下の糸状腐食や異種金属との接触部に電位差腐食等が見られた。これらの問題を種々の表面処理技術と生産技術で解決していくことでオールアルミニウムボディからハイブリッドボディの実用化を進めることができた。

以降の章でそれぞれの代表選手ともいえるNSXとS2000の量産化検討からの知見を紹介する。

5. オールアルミニウムボディ

5.1 表面処理防錆に対する考え方

NSXのボディに使用されたアルミニウム材料の種類と主目的を表1に示す。

アルミニウムボディの防錆に対する考え方はスチールボディと何ら変わることなく、商品性を損なう表面錆や安全性を損なう機能錆を防止し、車としての寿命を長く保つことにある。

しかし、オールアルミニウムボディを開発する上での以下の問題点があった。

(1) 表面錆

- ・前処理が不十分であることから発生する塗膜密着不良
- ・チッピング等の塗膜傷およびエッジ部塗膜からの糸錆の広がり
- ・外装部品との電位差腐食による塗膜膨れ

* ホンダエンジニアリング(株) 5G (〒321-3395 栃木県芳賀郡芳賀町芳賀台6-1)。Honda Engineering Co., Ltd. 5G (6-1, Hagadai, Haga-machi, Haga-gun, Tochigi 321-3395).

受付日：平成18年12月19日 受理日：平成18年3月27日

図1 アルミニウムボディ塗装ライン

表1 アルミニウム材料種と目的

ボディ部位	材料の種類	主目的
パネルアウト	6000系	高成形性・高耐食性
パネルインナ	5052-O	高成形性・高耐食性
骨格	5182-O	高強度・高溶接性
サイドシル	6000系	高押出性・高溶接性

(2) 機能錆

- ・異種金属締結部廻りの電位差腐食
- ・板合せ部の孔食

我々はこれらの問題点を解決して行くことによって、オールアルミニウムボディの実用化を可能とした。

5.2 前処理システム

通常アルミニウムの前処理には陽極酸化法や化成皮膜法が用いられるが、ドアヒンジ等の鉄部品を締結されたアルミニウムボディには陽極酸化法は適さないと考えたため、化成皮膜法を選択した。

当時、化成皮膜法としては従来スチールボディに用いられていた方法を始めとして数種あったことと、アルミニウム材料も最適なものを選択するとの目的から、処理法については、りん酸亜鉛法、りん酸クロメート法、クロム酸クロメート法、およびノクロム法を検討した。また、部材としては5000系および6000系アルミニウム合金で比較した。その結果を表2に示す

この結果によりクロム酸クロメート法が最も有効であると

判断した^{1),2)}(図2、図3)。

6. ハイブリッドボディ

6.1 コストバリューある軽量化

NSXで採用したオールアルミニウムボディにおいて大幅な車体の軽量化を達成することで、動力性能・操縦安定性のもとより燃費向上による環境改善に対して高い貢献ができた。残念ながらその反面かなりのコスト上昇となり、適用できる車種が極めて限られることとなった。しかし、環境改善等の目的のためには、ボディの軽量化は不可避であり、そのためのアルミニウム化を少しでも大量生産車種にコスト上昇を抑えながら、かつ軽量化効果を生み出せる部位に適用するハイブリッドボディを展開することにした。

そこで、NSXの量産実績をふまえ、ハイブリッドボディ表面処理生産技術を開発したので、以下に述べることとする。

6.2 表面処理方法の選択

アルミニウムボディの表面処理については、5.2で述べたようにクロム酸クロメート処理が最も有効であることがわかっているが、スチールとの同時処理を考えると、ライン汎用性も含めて、りん酸亜鉛処理が優れていると言える。しかし、従来のスチールだけの処理方法のままではアルミニウムの耐食性に関して、りん酸亜鉛処理はクロム酸クロメート処理に劣っている。

そこで、アルミニウム・スチール同時処理可能なりん酸亜鉛処理による耐食性向上を検討した。

6.3 混合りん酸亜鉛処理

我々が採用している6000系アルミニウム合金について、り

8

表2 化成皮膜法に対する塗膜性能

アルミニウム素材	5000系アルミニウム合金				6000系アルミニウム合金				テスト評価内容
	りん酸亜鉛	りん酸クロメート	クロム酸クロメート	ノンクロム	りん酸亜鉛	りん酸クロメート	クロム酸クロメート	ノンクロム	
塗膜	圧膜カチオン電着 + 中塗り + 上塗り								
テスト項目									
①耐水性	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	基盤目カット部をテープ剥離したときの塗膜残存状況
②耐湿性	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
③耐塩温水性	○	○	○	×	○	○	◎	×	カット部からの錆広がり
④耐糸錆性	×	○	◎	○	×	×	×	×	
⑤塩水噴霧試験	◎	◎	◎	◎	×	×	○	×	
⑥複合腐食試験	◎	○	◎	○	○	×	○	×	

主要元素	Cu	Mg	Si	Fe	Mn
5000系アルミニウム合金	0.15以下	4.0~5.0	0.2以下	0.35以下	0.2~0.5
6000系アルミニウム合金	0.27	0.45	1.70	0.17	0.17

図2 オールアルミニウムボディのNSX

図3 NSX

ん酸亜鉛皮膜付着量と糸錆長さの関係を図4に示す。

これより、皮膜付着量が1.0g/m²以上であればクロム酸クロメート皮膜と同等の性能を有することがわかる。

スチール上の皮膜析出反応は次式に示した通りである。

図4 りん酸亜鉛皮膜付着量と糸錆長さ

鋼板用のりん酸亜鉛処理液をそのまま用いてもアルミニウムはエッチングされにくいために、りん酸亜鉛皮膜の析出反応は起こりにくい。

そこでふっ素イオンを添加することでアルミニウムのエッチングを促進し、りん酸亜鉛皮膜を析出しやすくした。

(5) アルミニウム表面エッチング

ただし、アルミニウムイオンが蓄積すると表面処理効果を阻害してしまうので、スラッジ化させる必要がある。

(6) アルミニウムイオンのスラッジ化

図5 全量ろ過システム外観

また、濃度管理だけではふっ素イオンとアルミニウムイオンのスラリーが浴液中に充満する。このスラリーは、浴液内を浮遊し、ボディを処理する際外観品質に悪い影響を与えるので、逐次除去しなければならない。通常のスラリーはその重さにより沈殿スラッジ化させることができるため、濃縮除去ろ過が容易であるが、この系では濃縮させること自体が容易でないため、全量ろ過システムを採用した。

このシステムの外観は図5に示しているが、そのろ過システムは、図6に表したように、フィルタの目詰まり等でろ過効率が低下すると自動的に逆洗をし、長期間ろ過効果を持続させるようにしている。

これによって、量産性を有するアルミニウム表面処理システムができた。

また、アルミニウムとスチールの同時処理をクロム酸クロメートで実施した場合は、アルミニウム部の表面にごくわずかではあるが電気抵抗が高い層が生じ、スチールと比較して電着の付きが悪い（膜厚が低減する）ことがわかった。この問題も、りん酸亜鉛処理を用いることで解決したことを報告しておく。

6.4 密着性と防錆性

前項で述べたように、ふっ素イオンの添加と全量ろ過により耐食性表面処理ができるようになったが、このふっ素イオン濃度が高すぎると塗膜の密着性が低下すること知られている。これは、アルミニウム材の表面に付着したふっ素化合物が塗膜の密着性を阻害するためと考えられている。密着性を向上するために、りん酸亜鉛処理の後工程でクロムリンスを実施し、ふっ素化合物を除去する必要がある。図7にクロムリンス後処理を施さない場合と施した場合の、耐水二次密着性試験結果を示す。クロムリンス後処理により、耐水二次密着性が改善されているのがわかる。

また、ふっ素イオンを添加しても、アルミニウム材の研削面では、研削溝の部分が十分に皮膜で被覆されにくく、その

図6 ろ過・逆洗システム

クロムリンス有	クロムリンス無

図7 クロムリンス有無での耐水二次密着結果

結果、研削面は耐糸錆性が低下するという問題が生じる。これに対して、電着塗料中にクロム系防食顔料を添加すると耐糸錆性が改善されることが知られている。図8に、クロム系防食顔料の効果を示す。

図8 クロム系顔料有無による糸錆長さ

以上のように、従来のアルミニウム・鋼板混合処理用りん酸亜鉛処理は、塗膜の密着性や耐糸錆性を良好に保つために、第1ステップとして工程中にクロムを含有した材料にて防錆性を確保した。

6.5 防錆性能を低下させずにクロムフリー化

一方、クロムを含む表面処理は環境に対する悪影響が懸念されることや、排水処理コストが増加することから、その次のステップとしてクロムフリー化に取り組んだ。現に6価クロムについては2006年7月からはEUのRoHS指令（特定有害物質使用禁止指令）でさらに規制が強まり、2007年7月からはELV規制（使用済み自動車 End of Life Vehicle）で使用禁止になることが決まっている。

クロムを使用せずに同等の防錆性能を発揮させる糸口として、りん酸亜鉛析出の化学反応をより活性化させる方向で取り組んでいった。その反応促進剤として、りん酸亜鉛処理液にふっ素および鉄錯体化合物を添加する方法を開発し、塗装工程よりクロムを含む材料を廃止することができたので以下に述べる。

クロムリンス後処理や電着塗料中のクロム系防食顔料を使用せずにアルミニウム材の塗装後耐食性を確保するためには、りん酸亜鉛処理液の反応性を高めることにより、ち密で均一なりん酸亜鉛皮膜を形成し被覆性（素材表面をりん酸亜鉛皮膜が被覆する割合）を向上させることが必要である。一般に、酸性液中のアルミニウムのエッチング促進剤として、また、鋼板表面にち密で均一なりん酸亜鉛皮膜を形成させるために、鉄イオン（ Fe^{3+} ）の効果が知られている^{3),4)}。

しかし、鉄イオンはりん酸鉄としてスラッジ化するために錯体化することで反応性の向上を図った結果、次の成果が得られることがわかった。

(1) 鉄錯体化合物の添加により、りん酸亜鉛の析出反応が促進され、アルミニウム材に対するりん酸亜鉛皮膜の被覆性が向上した。従来りん酸亜鉛皮膜が析出しにくかった研削部にも、りん酸亜鉛皮膜を析出させることが可能になった。

(2) この結果、塗膜密着性に悪影響を与える Al-F 化合物の析出を抑制することができ、クロムリンス後処理がなくても十分な耐水二次密着性が確保できることがわかった。また、従来の処理と比較して耐糸錆性も向上した。

図9 表面処理不良発生メカニズム

(3) これらの結果、電着塗料中にクロム系防食顔料を添加しなくても十分な耐糸錆性が確保できることがわかった。

以上の内容により第2ステップとしてクロムフリー表面処理システムを開発することができた⁵⁾。

6.6 アルミニウム・スチール接触部防錆処理不良対策

前章の方法で、アルミニウム・スチールともに十分な表面処理効果が得られることがわかったが、それらを接触した場合、言い換えれば電氣的に導通させたまま同時に処理をさせようとする、図9に表したメカニズムによりアルミニウム側ではりん酸亜鉛の析出に必要な H^+ の発生が阻害され皮膜はほとんど生成せず、一方スチール側では H_2 の発生でりん酸亜鉛は析出するが、活性面が露出されにくいために析出したりん酸亜鉛はスラッジとして沈降してしまい、十分な皮膜が得られなくなってしまう。

これは合金化溶融亜鉛めっきされているスチールとアルミニウムの接触の場合では、スチール側はりん酸亜鉛皮膜が形成されるものの、やはりアルミニウム側は皮膜をほとんど生成できない。

これらの事象を解決するためには、現状アルミニウムとスチールの接触部をなくす、すなわち絶縁しなければならないことがわかった。

したがって、表面処理工程前に図10に示すような絶縁処置をしておかなければならないが、次工程の電着塗装においては、通常ボディハンガーでアースをとっているため、絶縁状態にある素材（S2000の場合アルミニウムフード）の導通を電着工程投入前に実施する必要がある。

図10 アルミニウムとスチールの絶縁例

図11 ハイブリッドボディのレジェンド

図12 レジェンド

これは、現在生産されている比較的少・中量生産機種の場合、生産時は大きな課題とはいえないかもしれないが、大量生産においては大きな課題になってくる。

しかし、課題はあるもののレベルの高い同時表面処理技術を確立できたことで、S2000（図11）やレジェンド（図12）のようなハイブリッド車の量産が可能となった。

また、表面処理材料の改良による皮膜形成能力の向上も図られてきており、やがて絶縁処置も不要になる日は近いと考えられる。

7. 軽量化新素材に対する新製法の変遷

7.1 高温成形のための酸洗処理

S2000については、今まで述べてきた表面処理のほかに、さらに別の表面処理技術が適用されている。

それは、車体本体ではなくオプションとして用意されているハードトップルーフに関してのものである。このハードトップは車体本体の軽量化に対する影響を最小限とし、かつコストも最小限にするため一体成形を採用した⁶⁾。

そのために、

①高速で成形が可能であること

②商品性要件（材料強度、外観品質等）を満足すること
 などから、展性の高い5000系のアルミニウムを素材として材料開発をしたが、高温高压成形条件において、表面に酸化皮

1. 接着強度の低下(構造用接着材/マスキングシーラー)

正常な剥離状態
(接着材の凝集破壊) 酸化皮膜界面での剥離
(接着強度要件未達)

2. 塗装密着性能の低下(耐衝撃/屈曲性)

-20℃の屈曲試験にて塗膜剥離

-20℃の衝撃試験にて塗膜剥離

3. 耐食性の低下(耐系錆び性)

化成処理性低下により耐系錆び要件未達

図13 高温高压成形における塗膜性能の低下

図14 レジェンドのトランクリッド

膜の生成が見られた。

この酸化皮膜を生成したままでは、図13に示したように諸性能が低下してしまうために、除去する必要があることがわかった。

そこで、成形後にりん酸系溶液での酸化皮膜除去処理工程を設定し良好なりん酸亜鉛皮膜の析出を実現した。

7.2 高温成形高速化による酸洗フリー化

しかし、ハードトップよりはるかに生産量の多いレジェンドのフェンダとトランク（図14）のアルミニウム化を実現するためには、さらなる高速な高温高压成形が必要とされた。それを試行錯誤の上、プレス材の予熱条件・成形条件とモデル形状それぞれの最適化を図った結果⁷⁾、予熱サイクルの短縮化とともに酸化皮膜成長の抑制も同時に達成され、酸洗フリー化をも実現することができた⁸⁾。

8. アルミニウム素材の塗装外観

車体の塗装は静電塗装（塗料に電圧を印可して静電気力で塗着させる方法）で行われる場合が多い。

また、わずかな塗装条件の違いで仕上がり外観に大きな影響が出やすいものである。

特に素材がアルミニウム・スチールのハイブリッドボディとなると、測定温度にもよるが、アルミニウムはスチールに

8

表3 アルミニウムとスチールでの発色の差

	ΔE	ΔL	Δa	Δb
15°	◎	◎	◎	◎
45°	○	○	○	◎
110°	○	○	◎	○

比べて電気抵抗はおよそ4分の1であるために、素材の差による電気抵抗値の違いが、静電塗着状態の差を生じ外観品質、特に発色に影響を与える恐れがあった。

また、素材差による表面硬度の違いから、傷のつきやすさ、傷の深さ等の差が、やはり外観品質、特に平滑性に影響するのではないかと考えた。

そこで我々が実際に静電塗装テストにおいて、発色に差があるかどうかを確認した結果を表3に示す。目視に近い色評価をするために光源正反射光に対して光源側に15/45/110°の3角度での反射光を分光測定している。

この結果を見ると、基本的には量産ラインのばらつきの範囲内であり、当初心配していた素材での静電塗着状態の違いによる発色の差への影響はないと判断できた。

しかし、素材の表面硬度の違いは、溶接での仕上げ研削の際により深く削れてしまい、量産工程での同時研削プロセスでは、スチール系品質出しのための研削条件でアルミニウムを研削してしまい、傷のつき方が激しくなってしまう。そのために、平滑性を阻害する表面粗度になってしまう場合があり、該当工程での作業は、スチールボディに比較して、慎重な作業が求められる。図15に表面粗度データを示す。

さらにレジェンドでは、極めて精度の高い成形性と図16で表している塗膜構成の適正化によって従来にない超高外観を実現することができた。

9. ま と め

過去15年間にわたって、アルミニウムの表面処理に関して、以上のような着想で課題の対応をしてきた結果、我々は、高品質のオールアルミニウムボディからハイブリッドボディまで自由に生産できるようになった。コスト面からハイブリッド機種が中心になってきているが、オールアルミニウムボディの生産技術は、今でもインサイトに流用され、世界でも類を見ない低燃費自動車を生み出している(図17)。

1章でも述べたが、今後自動車に求められる軽量化の近道として考えられるのは、アルミニウム素材等のスチールに取って代わられる素材である。しかしながら、軽量化を迫るのみで、いたずらにコストを上昇させてしまうようでは、売り手側の都合だけで、買い手側、すなわちお客様に迷惑をかけてしまうことになる。したがって、我々自動車を製造する側も、いかにコストを上げずに軽量化していけるかを常に模索しながら進んでいる。

かつて、バブルと呼ばれた時代は、付加価値があれば価格が上昇していてもニーズがあり、世の中に浸透していった。しかし、もはやそのような安易な技術開発は許されない状況にあり、同じコスト、可能であれば更に安いコストでより高

図15 アルミニウムとスチールの表面粗度

図16 レジェンドの超高外観塗装

図17 オールアルミニウムボディ（一部樹脂外板）のインサイト

い付加価値が求められている。

近い将来にアルミニウムをボディに適用する場合に、今回述べさせていただいた課題を少しでもなくすることができる、生産技術でのコスト上昇を招かない軽量素材の出現を心から待ち望んでいる。

表面処理材料ではすでに開発が始まっているが、素材を選ばない防錆処理技術の実現なども待たれている。

今後の技術の進化で、素材と表面処理材料・工程のコラボレーションでよりリーズナブルな価格展開・競争力を持つ製品を具現化することができると信じている。

参 考 文 献

- 1) 小松泰典，鈴木英治，宮崎勝男，西野俊哉：NSX 用オールアルミニウムボディの表面処理・塗装技術，Honda R&D Technical Review, Vol. 3 (1991)。
- 2) 小松泰典，鈴木英治，宮崎勝男，西野俊哉：NSX 用オールアルミニウムボディの表面処理・防錆技術，自動車技術会，Vol. 45, No. 6 (1991)。
- 3) 山添勝芳，池田 哲，安原清忠：特開昭 61-106783 (1986)。
- 4) 小浦延幸，関口 攻：AC インピーダンス法を用いた酸性浴中の Al の化学エッチング機構の解析，表面技術，**43** (1992)，205-210。
- 5) 西野俊哉，和泉浩一郎：アルミニウムボデーのためのクロムフリー表面処理システムの開発，Honda R&D Technical Review Vol. 13 (2001)。
- 6) 横山 鎮，渡辺二郎，奥中啓之，宮岡博也：アルミ合金超塑性材の自動車・二輪車への適用と今後の展開，素形材，11 月号 (2000)。
- 7) 木山 啓，丸山 学，中尾敬一郎，中川義明：第 55 回塑性加工連合講演論文集，(2004)，217。
- 8) 齋藤和也，横山 鎮，廻 秀夫，渡邊二郎：第 70 回型技術セミナー，型技術協会，(2005)，1。