

2017 年 6 月

## アウディにおけるボディ開発 革新、品質、そして精密性

<b>1. 自動車の軽量設計—アイデアの勝利</b>	<b>P.2</b>
自然から学習—アウディスペースフレーム (ASF) の設計原理	P.2
アウディ ライトウェイトデザイン (軽量設計) センター (ALC)	P.3
<b>2. 複数の素材のインテリジェントな組み合わせ—新型 Audi A8 のボディ</b>	<b>P.4</b>
革新的な生産方法：新型 Audi A8 のカーボンリヤパネル	P.4
顧客にも環境にも恩恵—新型 Audi A8 のための新しいボディ工場	P.5
ボディ工場—14 種類の接合方法	P.5
<b>3. ネッカーズルム工場にある新型 Audi A8 のボディ生産設備</b>	<b>P.7</b>
縦置きメンバーからルーフまで：アウディスペースフレーム (ASF) ボディの上部構造	P.7
カーボン繊維強化樹脂 (CFRP) 製のリヤパネル：最終組み立てエリアでの据え付け	P.8
これまで以上に訓練された従業員	P.8
<b>4. 初代 Audi A8 から最新の Audi R8 まで—アウディスペースフレームの開発史</b>	<b>P.9</b>
初代 Audi A8 (1994 年)	P.9
Audi A2 (1999 年)	P.9
2 世代目 Audi A8 (2002 年)	P.10
2 世代目の Audi TT (2006 年)	P.10
Audi R8 (2007)	P.10
Audi A8 (2010 年)	P.11
3 世代目の Audi TT (2014 年)	P.11
Audi R8 (2015)	P.11
Audi Q7 (2015 年)	P.12

本資料は、アウディ本社が 2017 年 4 月に実施したテックデーの資料の日本語訳です。元資料や写真は、下記の  
本国のメディアサイトでもご覧いただけます。

<https://www.audi-mediacycenter.com/en/presskits/techday-body-structure-7469>



## 1. 自動車の軽量設計—アイデアの勝利

アウディはこれまでも軽量設計の面で輝かしい成果を上げてきましたが、いままたその歴史に新たな章を書き加えようとしています。近々発売予定の次世代の Audi A8 に、4 つの素材をインテリジェントに組み合わせてボディを構成するという手法を初めて採用しました。これほど多くの種類の素材を組み合わせてボディを造るのは、アウディでも初めてです。

これにより Audi A8 は再び、自動車の軽量設計の分野でのパイオニアとしての役割を担うこととなります。その歴史は、1994 年に初代 Audi A8 が、アウディスペースフレーム (ASF) のコンセプトに基づいたオールアルミ製のモノコックボディを採用して、衝撃的なデビューを果たしたときに遡ります。

アウディは、単一の素材だけを使うという固定観念をずっと昔に捨て去りました。現在の軽量デザインでは、「正しい素材を正しい場所に正しい量だけ」という原則のもと、様々な素材をいかに合理的かつ柔軟に組み合わせて活用していくかが課題になっています。アウディの専門家は個々の素材について、どの目的に使うのが最適か、実験を通して明らかにすることでそれぞれのポテンシャルとアドバンテージを深く理解するようになっていきます。そして、「素材開発競争」の成果をすべて生産モデルに活用しているのです。

そうしたノウハウが着実に蓄えられつつあることは、次世代の Audi A8 を見れば明らかです。新しい Audi A8 のボディの骨組みは、4 つの異なる軽量設計材料から構成されています。すなわち、アルミニウム、スチール、マグネシウム、そしてカーボン繊維強化樹脂 (CFRP) の 4 つの素材を組み合わせて製作しているのです。その点で、顧客に直接的な恩恵をもたらす複合素材構造の新しいステージを切り拓いています。しかもその恩恵は、重量の面だけではありません。正確なハンドリングと好ましい音響特性を得るための基盤である振じり剛性の面でも、新型 Audi A8 は、その面で高い評価を受けていた従来モデルを 24% も上回る値を達成しているのです。

初代の Audi A8 がデビューして以来、ASF は自動車の軽量設計の分野で、力強い牽引役になってきました。アウディは ASF のコンセプトに基づいて、これまで 100 万台以上のクルマを生産しており、素材の利用法や接合技術に関してノウハウを積みあげてきました。それにより、運動性能、効率、安全性を確保する上で強力な基盤となる、軽くて高剛性のボディを次々生み出してきたのです。

### 自然から学習—アウディスペースフレーム (ASF) の設計原理

「ASF が生まれる決定的なきっかけは、自然のなかにありました。例えばミツバチのコロニーでは、機能を果たすのに最小限の量の材料しか使われていません」と、ネッカーズルムにあるアウディライトウェイトデザイン (軽量設計) センター (ALC) の総責任者を務める Dr. ベルント ムレクージュは述べています。1990 年代の初頭、アウディの軽量設計の専門家がアルミの押し出し材と鋳造部品で構成された ASF の設計に取り組んでいるとき、彼らもそうした洞察をもとに仕事を進めていました。ルーフスキン、フロア、サイドパネルなどを含めたシートパネルも、ASF のラティス (格子) 構造の一部に組み込まれて全体の剛性を高め、荷重をとともに引き受ける役割を果たしていました。個々のコンポーネントに、その役割に応じた様々な形状と断面を与えていたのです。

オールアルミ製の ASF ボディのおかげで、第 1 世代の Audi A8 はスチールを用いた場合と比べて 40% も重量が軽くなっていました。それがきっかけで、スチールメーカーの多くも新素材開発競争に



積極的に参加してくるようになりました。以来、新開発された高張力スチールの強度はそれまでの 5 倍にもなっています。

その間、アルミを使った ASF のテクノロジーもちろん、歩みを止めていたわけではありません。より優れた素材と接合技術を求めてさらなる開発が進められていきました。それらの多くは今日、市販モデルに採用されています。そのように、設計軽量化に向けてのオーディの一貫した取り組みは、オーディブランドの顧客だけでなく、自動車産業全体に恩恵をもたらしているのです。

### **オーディ ライトウェイトデザイン（軽量設計）センター（ALC）**

ボディ開発の面でオーディが有する膨大な技術ノウハウは、ひとつの場所に集約されてきました。それは 1994 年に設立された ALC です。ここで研究、開発されたことをベースに数百もの特許が登録され、2008 年にオーディはヨーロッパ特許局から「ヨーロッパ インベンター オブ ザ イヤー」に選出されました。また「欧州 自動車ボディ アワード」も 4 度受賞するなど、クルマのボディ製造の分野で業界をリードする企業になっています。

ALC で働く約 200 人の専門家のうち、約 25 人が繊維強化樹脂（FRP）の研究に注力しています。FRP テクニカルセンターがその開発業務全体を統括しています。また ALC では、素材に関するテクノロジーだけでなく、部品の製造技術、新しい接合技術の開発、品質保証、サービスと修繕方法の開発といった、幅広い分野で研究開発が続けられています。



## 2. 複数の素材のインテリジェントな組み合わせ—新型 Audi A8 のボディ

次世代の Audi A8 においてアウディは、4 種の素材をインテリジェントに組み合わせたボディ構造を初めて採用しました。軽い車重と高いボディ剛性を兼ね備えたアウディの新しいフラッグシップモデルは、走行性能、燃費効率、安全性のいずれをも改善することに成功しています。

アウディの専門家たちは、単一の素材で軽量化を成し遂げるという固定観念をずっと昔に捨て去りました。新世代の Audi A8 においては「正しい素材を正しい場所に正しい量だけ」という原則のもと、アルミ、スチール、マグネシウム、カーボン繊維強化樹脂 (CFRP) の 4 つの軽量素材を組み合わせて使うことで、複合素材によるアウディスペースフレーム (ASF) の設計を新たなレベルへと引き上げています。

アウディが課題としてきたのは、顧客に直接恩恵をもたらす新素材テクノロジーとそれを応用したボディの設計を生産車に採用していくことでした。それは単に重量の面だけでなく、次世代 Audi A8 は振じり剛性 (正確なハンドリングと好ましい音響特性を得る上で最も重要な目安となる) の面でも定評のあった従来型の値を 24%も凌駕しています。

### 革新的な生産方法：新型 Audi A8 のカーボンリヤパネル

サイズの面でいえば、新型 Audi A8 の乗員セルのなかでもっとも大きなコンポーネントは卓越した強度と振じり剛性を誇る CFRP 製リヤパネルです。これがクルマ全体の振じり剛性の 33%に貢献しています。縦横方向の応力及び剪断力を適切に吸収するために、場所によって 6 から 19 のカーボン繊維を折り重ねて、応力を最適化したレイアウトを完成させています。個々のカーボン繊維層は 50mm 幅のテープから成っており、完成した多層パネルのなかに、望み通りの繊維の角度で繊維をあまりトリミングすることなく、据えることが可能になっています。

この目的のために特別に開発された革新的製法「ダイレクトファイバーレイヤーリング (直接繊維多層化)」により、これまで CFRP コンポーネントを製造する上で必要とされていた中間作業を完全に省くことができるようになりました。もうひとつの新開発された製法を用いることで、多層パネルをエポキシ樹脂に浸して数分のうちに、乾燥処理することが可能になっています。

また、新型 Audi A8 の乗員セルでは、熱間成形スチールのパーツも多用されて高強度に貢献しています。フロントバルクヘッドのロワセクション、サイドシル、B ピラー、及びルーフラインのフロントセクションにこの素材が使われています。それらに使用されているシートメタルは、テーラリング (専用化) のテクノロジーにより部分によって厚さが異なっており、また部分的に熱処理を施されたものもあります。それにより重量を減らしつつ、とりわけ安全に関わる車体の部分では高い強度を確保しています。

新型 Audi A8 のボディで、58%というもっとも大きな割合を占めるのがアルミ製パーツです。これには ASF 設計を特徴づけるエレメントである鋳造ノード、押し出し材、及びシートメタルの 3 種類が含まれています。ここでも近年の素材開発競争の成果が反映されています。例えば、新しい熱処理されたアルミ合金は、230 MPa (メガパスカル) を超える引張り強度を誇ります。引張り強度テストでの破壊強度も 180MPa 以上を記録し、アルミ合金の押し出し材の場合には 280~320 MPa を超える値も確認されました。いずれも、過去のものとは比べて大幅に改善された値です。



インテリジェントな素材ミックスの締めくくりとなるのがマグネシウム製のストラットブレースです。従来モデルと比較すると、この部分で重量が 28%も削減されています。アルミ製のボルトを用いてストラットタワーダームと固く接合しており、ボディ全体の高い振じり剛性向上に大きく貢献しています。万が一クルマが正面衝突した場合、その衝撃はフロントエンドに設置された 3 つのインパクトバッファーに分散されます。

### 顧客にも環境にも恩恵—新型 Audi A8 のための新しいボディ工場

アウディは、新世代の Audi A8 のためにスペースフレームを全面的に再設計しただけでなく、ネッカーズルムに新しい生産設備まで建設しました。41m の高さを持つ新しいボディ工場を建設するのに、あわせて 14,400t ものスチールが使われました。これは、バリのエッフェル塔を造るのに用いられた量の倍にあたります。

1994 年、オールアルミのモノコックボディをもってデビューした初代 Audi A8 のおかげで、ASF は自動車の世界で大きな存在感を持つようになりました。以来アウディは ASF の設計原理に則ったクルマを 100 万台以上生産しており、素材の活用や接合技術に関し、独自のノウハウを積みあげてきています。それにより、運動性能、効率、安全性を確保する上で強力な基盤となる軽くて高剛性のボディを作り出すことが可能になっているのです。

### ボディ工場—14 種類の接合方法

素材のミックスを進めると同時に、アウディは生産技術の革新にも力を注いできました。今日、新型 Audi A8 の複合素材によるボディを組み立てるのに、ローラーヘミング、グリップパンチリベット工法、世界初の試みであるアルミのリモートレーザー溶接を含めた 14 の異なる接合方法を導入しています。

ローラーヘミング（ローラー装置を使った縁曲げ）は、新型 Audi A8 のフロント、リヤドア回り全体で採用されています。このテクニックの導入により可能となった設計のおかげでクルマの乗り降りが一層快適になり、運転する上で重要な A ピラーまわりのドライバー視界も改善されました。また、ドアのオープニング部分で、従来モデルに比べて最大 36mm 寸法を拡げるという成果も得られています。

サイドウォールフレームをその場所に固定するためのグリップパンチリベット工法はローラーヘミングのプロセスに伴うもので、後者は構造接着剤によるサポートも受けています。こうした新しい接合テクノロジーが開発され、この箇所に採用できるようになったおかげで、新型 Audi A8 の複合素材コンセプトの実現が可能となり、また、アルミ製サイドウォールフレームを、B ピラー、ルーフライン、及びフランジの薄いシル部分の熱間成形された高張力スチールシートと結合できるようになりました。

アルミのリモートレーザー溶接はほかのどのプレミアムカーメーカーも試みていない、アウディが開発した新しい接合技術です。溶接角に対しレーザービームを正確にポジショニングすることで、熱のインプットを正確に制御できるようになり、高熱による破損（ホットクラッキング）のリスクが大幅に減りました。結合されるパーツ間のギャップの大きさも即座に判断され、工程制御の仕組みにより効率よく埋めることができます。レーザービームは送り速度が高く、それに反してエネルギー消費は少ないため、CO2 排出量も 25%削減されています。



この新しい工法により、モデル生産におけるコストが 95%も削減されています。理由は、この製法を使うことで、従来のレーザー溶接で必要とされた、コストのかかる工程管理が必要なくなったからです。

新型 Audi A8 のリヤの部分（ウォータードレインチャンネルの部分）には、従来型の CMT（コールドメタルトランスファー）工法に基づいたアルミ MIG（メタルイナート＝不活性ガス）溶接の発展型にあたる溶接方法が使われています。ここで開発テーマとなったのは、主として不活性ガスノズルの設置方法です。その結果、工程速度を最大 50mm/s スピードアップできるようになったのと同時に、溶接の仕上がりも非常にきれいなものになりました。従来型の MIG 溶接法と比較すると、ボディ工場における同様の作業に対し、スピードが 3 倍になっています。今回の改善により、熱の発生量も大幅に減っており、それにより、パーツが変形するリスクも減りました。溶接ワイヤーがパーツに正確な角度で当たるよう、この工法は溶接線を自動的に検知してトレースするシステムと連携して作業を進めます。

アルミのレジスタンススポット溶接（RSW）は、非常に用途の広い接合方式です。ここでもまた、アルミを扱う作業の要求に適う制御テクノロジーと融合した高性能な工場テクノロジーが工程の安定性と溶接結果の再現性の向上に寄与しています。電極パワーを高めた溶接トングを使用することで、銅製の電極とアルミパーツの望ましくない癒着も減らしています。

アウディのボディ工場ですでに使われてきたレーザー溶接は、新型 Audi A8 では、ルーフをサイドウォールに接合する工程に使用され、事実上継ぎ目のない接合を実現しています。





### 3. ネッカーズルム工場にある新型 Audi A8 のボディ生産設備

アウディはネッカーズルム工場内に建設した先進テクノロジー満載の新しい生産設備で、新型 Audi A8 のスペースフレームを製造しています。工場内の高度に自動化された生産の流れは非常に複雑ですが、同時に効率的でもあります。

A8 のボディ工場は、全体がエネルギー効率と資源保護にプライオリティを置いて設計されています。新しいスポット溶接のトングは、電気モーターにより電力を得ており、従来のもものと比べて 35kg 重量が削減されています。結果、電力消費の少ない小型ロボットを大規模に導入できるようになりました。ホールの照明には LED を使い、さらにベンチレーションと設備の稼働を必要に応じてシャットダウンするインテリジェントな運営方式により、エネルギー消費を最小化しています。

工場には約 500 のロボット、90 の接着装置、60 のタッピングネジを締める装置、270 のリベット打ち込みシステム、及び 90 のレジスタンススポット溶接トングが備わっています。多くのロボットが複数の工程を受け持っており、一定のインターバルで特定の作業を実行するために、グリッピングアームや接着ガンにツールを持ち替えます。

パリのエッフェル塔を建設するのに必要とされた量の 2 倍にあたる合計 14,400t のスチールと、トラック 16,000 台分を超えるコンクリートをはじめとする大量の資材を費やし、まったく新しい生産サイトとして、次世代の Audi A8 のためのボディ工場が誕生することになりました。真上から見ると、2 つの直接隣接した建物が二等辺三角形を形成しているように見えます。

41m の高さを持った新しい建物は 3 つの階で構成されており、それぞれの階はサッカー場 7 つ分の広さ相当する 5 万 m<sup>2</sup> の床面積を備えています。支える柱により、それぞれの階の床スペースは 500m 幅のセクションに分割されています。あるホールの下には工場の鉄道積載用の駅が設置され、線路の上には長さ 36 m のハリが幾つも伸びています。工場のなかでもっとも大きな負荷がかかっている柱は、Audi A8 モデル 1,800 台分に相当する重みを支えています。建設中は、17 のクレーンが同時に働いたこともありました。そのなかには、それぞれ 600t の荷物を持ち上げられるヨーロッパ最大のクレーンも 2 台含まれていました。

#### 縦置きメンバーからルーフまで：アウディスペースフレーム (ASF) ボディの上部構造

ASF ボディの上屋構造（スーパーストラクチャー）は、縦置きメンバーを含めた下方の溶接されたアッセンブリーパーツから始まります。それらがフロントとリヤのボディモジュールのベースを形成しています。リヤのボディモジュールは、建物の別の階で作られています。2 つのアッセンブリーパーツは、次の工程でフロアパネルに接続されます。

乗員セルは、このアンダーボディの上に構築されます。最初は A、B、C の各ピラーで、次に内側と外側のサイドパネル、最後にルーフという順番に設置されていきます。ここで大きな進歩をみせているのが、高い組み付け精度を実現したフレーミングステーションの設計で、そこでは溶接するために、各パーツが極めて精密に位置決めされています。ここでの作業が終わるとボディシェルはコンベヤーで隣の建物に運ばれ、そこで事前に生産されたドアやリッド類が取り付けられます。そしてその下の階の最終ラインを通過してから、隣接するペイントショップ（塗装工場）に送られます。電気泳動式



の塗装工程を施した後、ASF のボディは 200℃のオーブンで乾燥されますが、そのときにアルミ合金は最終的な強度を獲得します。

ライン沿いに設置されたレーザー測定機器により、ASF ボディを生産中に 20 か所のステーションで寸法精度をチェックしています。最初のステーションではリヤモジュールを検査し、最後のステーションでは完成した上屋全体を調べます。そうした検査に加えて、アウディの品質保証チームがこれらのコンポーネント、サブアッセンブリーパーツ、さらに完成したボディまでを対象に、抜き取り検査を実施しています。その目的のため、新しい検査センターが生産ラインの隣に開設されています。

品質保証チームが使う検査ツールは、触覚及び光学センサーにより働く 2 つのコーディネイト測定装置、超高解像度の光学測定セル、超音波画像化システム、及び大型コンピューター断層写真撮影装置 (CT) などです。超音波画像化システムと CT のおかげで、ボディの多くの接合部分を分解することなく検査できるようになりました。さらに伝統的な破壊テストと表面評価検査も、彼らのメニューに含まれています。

### **カーボン繊維強化樹脂 (CFRP) 製のリヤパネル：最終組み立てエリアでの据え付け**

CFRP 製のリヤパネルは、最終組み立てラインに於いて、スピーカー、リヤルーバー、3 点式シートベルトやセンターアームレストといったサブアッセンブリーパーツやコンポーネントをあらかじめすべて装着した状態でクルマに据え付けます。

従業員は、特別な梃子を使ってリヤウインドウをはめる前のボディの隙間から、リヤパネルを車内に引き込みます。接触面の腐食を防ぐための 2 ピースの構造用接着剤が手作業で打ち込まれるリベットとともに、リヤパネルを金属製コンポーネントに接合するために使われます。

### **これまで以上に訓練された従業員**

高度に自動化された新型 Audi A8 のボディショップでは、約 500 人の従業員が 3 シフトで働いています。彼らのほとんどは自動化された区域でロボットとともに仕事をしていますが、なかにはアドオンパーツを装着する工程や仕上げの工程で、手作業を行っている従業員もいます。

多くの部分をアップグレードした新型モデルの生産をスムーズに立ち上げるために、アウディは従業員トレーニングの方法を見直しました。トレーニングはモデルの量産開始のかなり前から開始し、実地の作業を含めた実践的学習を主体とした特別なコースと事前説明の機会を用意しています。必要となる資格や関係するテクノロジーに応じて、自動化に関するコースは 10 日間にわたって行われます。

フォルクスワーゲン グループのほかの場所では見られない、従業員訓練の新しい要素および特別な趣向はフィニッシングブースです。ここでは、非常に繊細さが求められるアルミ材料を使っての作業をトレーニングの課題にしています。





## 4. 初代 Audi A8 から最新の Audi R8 まで —アウディスペースフレームの開発史

軽量設計は、長年に渡ってアウディブランド躍進の原動力になってきました。アウディは 1994 年以来、アウディスペースフレーム (ASF) のボディを用いたクルマを作り続けてきました。その間、様々なクルマのコンセプトに応じてテクノロジーを適切にアレンジし、また改善して、今日、最新のステージとして複合素材を使った ASF を実現するまでに至っています。

### 初代 Audi A8 (1994 年)

第 1 世代の Audi A8 のために、アウディはアルミを材料として、それに合った設計を考案することで、まったく新しいタイプのモノコックボディを発明することになりました。1982 年にスタートした開発作業を通じ、40 件の特許が申請されています。生産仕様に先行する形で、“ASF”という名のテクニカルスタディモデルが発表され、1993 年のフランクフルト モーターショーでセンセーションを巻き起こしました。そのペイントされていないアルミ製の磨かれたボディは、銀のごとく輝いていました。

翌 1994 年に発表された Audi A8 のアルミ製モノコックボディは、重量が 249kg しかありませんでした。それは今でも採用され続けている ASF の設計に基づいたもので、多くが複合閉断面を持つ押し出し材と複雑な形状を持った鋳造パーツで、ラティス (格子) 構造が形成されていました。アルミパネルも、その構造の剛性を高める役割を果たしていました。334 の構成パーツのうち、数の上ではアルミパネルが一番多く、全体の 71%と、押し出し材や鋳造パーツを大きく上回っていました。ネッカーズルム工場での組み立ての約 75%は手作業で行われていました。

### Audi A2 (1999 年)

Audi A2 は ASF デザインを採用した 2 番目のアウディモデルであり、その驚くべきボディの軽さで注目を集めました。ベース仕様の車両重量 (ドライバーなし) は 895kg しかなく、3ℓ/100km の超低燃費を記録した A2 1.2 TDI の重量はわずか 825kg でした。この数字の背景には ASF があり、アルミ製の付加パーツを含めたボディ重量は 153kg に過ぎませんでした。

Audi A2 は Audi A8 よりも大量に生産することを想定して、日産 360 台の計画が立てられました。その ASF ボディは、Audi A8 のボディよりも構造がシンプルになっています。構成パーツの数は 225 に減らされ、B ピラーには初めて、単体の大きな鋳造パーツが採用されていました。Audi A8 の場合は同じ場所を 8 つのパーツで構成していたのです。また、ルーファインの骨格を造るのにハイドロフォーミングの手法が使われ、そのコンポーネントは部分によって断面が幾度も変わる設計になっていました。アンダーボディフレームは、アルミの押し出し材を溶接により組み合わせて構成していました。

この Audi A2 のボディでも、シートアルミが全体の 81%と最大の割合を占めていました。ここでは、リベット打ち込み、MIG 溶接、そして新しいレーザー溶接の 3 つの接合方法が主に使われ、作業の 80%程度が自動化されていました。



## 2 世代目 Audi A8 (2002 年)

第 2 世代の Audi A8 において、アウディのエンジニアは熟成を進めたアウディスペースフレームの静的振じり剛性を 61%も改善する一方で、初代に対し、構成部品数を減らすことに成功していました。2 代目 Audi A8 の ASF ボディの重量は 220kg で、当時のスチール製のライバルと比べて 40%も軽量化に仕上がっていました。

アウディはまた、大型鋳造部品についても大胆な改善を図りました。ASF のなかに占めるその割合は、重量比で初代の 22%から 31%に増やされ、そのなかには、A ピラーのドアヒンジマウントといった、新しい機能を与えられたものも含まれていました。Audi A2 同様に、A ピラーからリヤエンドに至る大型のサイドウォールフレームは、単一の大きく引き延ばされたアルミシートで製作されていました。Audi A2 よりもはるかに大きい Audi A8 において、これも野心的な試みでした。

接合技術もより洗練されたものになり、レーザーハイブリッド溶接といった新しいテクノロジーが活用されるようになりました。強度に特別優れ、歪みが少なく、ギャップを埋める性能にも優れ、しかも作業スピードが速いレーザーハイブリッド溶接はルーフをサイドウォールフレームと接合する工程など、歪みが生じやすい大型パーツどうしの結合にとりわけ適していました。

## 2 世代目の Audi TT (2006 年)

第 2 世代の Audi TT で、アウディはマルチマテリアル（複合素材型）ASF という非常に革新的な設計を具現化しました。この Audi TT では、フロントボディモジュール、ミドルフロア、及びスーパーストラクチャー（上屋部分）がそれぞれアルミ製になっていて、結果として車両重量の 68%をアルミが占めるようになっていました。

その一方で、フロアアッセンブリーのリヤセクション、リヤエンド、バルクヘッド（ロードスターの場合）にはスチールが使われていました。重量配分を最適化するために、ドアとテールゲートも同じくスチール製でした。

オールスチールボディの初代 Audi TT と比べると、この新しい手法により、仕様によっては最大 90 kgも重量が軽減されていました。さらに、前後の重量配分が最適化され、振じり剛性も大幅に改善されたことで、スポーツカーらしいダイナミックなハンドリング性能が得られるようになりました。Audi TT Coupé の ASF ボディの重量はわずか 206kg で、アルミ素材の内訳はシートパネルが 63kg、鋳造品が 45kg、押し出し材が 32kg でした。

## Audi R8 (2007 年)

アウディは初代の Audi R8 において、ASF のコンセプトを初めて高性能スポーツカーに移植しました。結果はそれ自体が語っています。Audi R8 Coupé のボディ重量は、わずか 206kg でした。スポーツカー用の ASF では、押し出し材のフレームが主体で全体の約 70%を占めていました。鋳造部品の割合は 8%で、残りの 22%がアルミシートです。

Audi R8 の ASF にはまた、新しい超軽量素材も使われていました。マグネシウムで作られたエンジンコンパート内のリヤクロスメンバーは、リヤモジュール上部の剛性を確保する役割を果たしていました。Audi R8 Spyder では、リヤのサイドウォールとフードコンパートメントカバー（いずれも応力を受けるコンポーネント）にカーボン繊維強化樹脂（CFRP）が採用されていました。

### **Audi A8 (2010 年)**

第 3 世代の Audi A8 でも注目すべき進化がみられました。243 のパーツで構成される ASF に、13 種類のグレードの異なるアルミが使われていたのです。B ピラーには、きわめて強度の高い熱間成形スチールが使われていました。標準のホイールベース長を備えた Audi A8 Sedan のボディ重量はわずか 231kg でした。

その 3 世代目 Audi A8 の ASF の素材構成は、35%がアルミ鋳造部品で、35%がアルミシート、22%がアルミ押し出し材で、残りの 8%がスチールです。鋳造パーツの大半は改良を進めた合金製で、真空鋳造法により製造されていました。真空鋳造法で作られたパーツは高い力学的特性を持ちますが、同時に柔軟性や接合性にも優れています。より高い強度が求められるコンポーネントについては強度を最大 25%高めつつ、素材の厚さと重量を最大 20%減らして対応していました。

### **3 世代目の Audi TT (2014 年)**

複合素材を採用した現行の Audi TT 及び Audi TT Roadster のボディは、ASF の新しい進化の段階を表しています。フロントエンドととりわけパッセンジャーコンパートメントのフロア部分には、多くの熱間成形スチールパーツが使用されており、その特別高い強度により、板厚を比較的薄くしても機能するため、結果として軽量に仕上がっています。アウディは 2 世代続けて、Audi TT の車両重量を大幅に減らしながら、振じり剛性を向上させることに成功しました。

乗員セルの上屋部分を構成しているのは、典型的な ASF のアルミによるラティス構造です。Audi TT Coupé には 4 か所にアルミの鋳造によるノード（塊パーツ）が使われており、2 つが A ピラーに、残り 2 つがリヤウインドウ上部に設置されています。アウタースキンを含めてもボディ重量は 276kg に過ぎません。

### **Audi R8 (2015 年)**

新しい Audi R8 シリーズで、アウディはふたたび ASF の重量を削減してみせました。今回は Audi R8 Coupé で 200kg まで減らしています。この快挙の主な要因となっているのは、アルミと CFRP を組み合わせた新しい試みです。リヤウォール、センタートンネル、3 ピースの B ピラーといった CFRP のコンポーネントは、高度に効率的なレジトランスファーモールディング（RTM）工法を用いて生産されています。

乾いたファイバーマットと部分補強材は、最初に拵げられて形を整えられ、それから熱せられたツールのなかに挿入されます。それにフタをした後、液体のエポキシ樹脂を型の中に噴射注入して、ファイバーマットを完全に浸します。高温高圧のもとで乾燥処理をします。CFRP パーツは ASF の主要な骨組みを構成し、重量でもボディ全体の 13%を占めています。実のところ、それらには多くの異なる役割が与えられており、そのためひとつひとつが、繊維の階層や織り方が異なった造りになっています。

新型 Audi R8 のフロント及びリヤボディモジュールは、鋳造パーツ、押し出し材、シートなどのアルミパーツで構成されています。ASF 全体での割合はアルミ鋳造ノードが 21%、アルミ押し出し材が 47%、アルミシートが 12%となっています（Audi R8 Coupé の値）。残り 7%はその他の素材及び接合具で、ドアとリッドを含むアウタースキンもすべてアルミ製です。



### **Audi Q7 (2015 年)**

現行世代の Audi Q7 は、第 2 世代のモジュラーロングチューディナルプラットフォーム (MLB evo) に基づいて開発された最初のオーディモデルです。その車両重量は旧世代と比べて最大 325kg も軽くなっており、ここでもボディの軽量化が大きな役割を果たしています。新型 Audi Q7 のボディは、熱間成形スチールパーツとアルミを多用した複合構造になっており、単体で旧型に対し 71kg の重量を削減しています。さらにボディのアドオンパーツについても軽量化が進められて、そこでも 24kg の重量が削られています。

乗員セルに超高強度の熱間成形スチールパーツが使われる一方で、ボディ全体の 41%をアルミが占めています。エンジンコンパートメントのストラットタワードームやサイドシル、縦置きメンバーの接合部分などにはアルミの鋳造パーツを用い、フロントとリヤの縦置きメンバーにはアルミ押し出し材を使用しました。

また、フロアの大部分、リヤホイールアーチ、ルーフ、サイドウォールフレームにはアルミシートを使っており、ドア、フロントフェンダー、エンジンフード、テールゲートも、すべてアルミ製です。

以上