

(解説)

# 自動車車体用材料の現状と動向

## Latest Trends in Automobile Body Materials



大宮良信\*  
Yoshinobu Omiya



佐野豊和\*\*  
Toyokazu Sano



箕浦忠行\*\*\* (工博)  
Dr. Tadayuki Minoura

High strength steels and aluminum alloys are very effective materials for the weight reduction of automobile bodies. Both materials are being used much more frequently now, due to the development of new material types and application technologies. Examples include TS 980MPa steels, and even higher-strength steels, which have excellent formability, a high delayed-fracture resistance. Also included are high strength aluminum alloys with good formability and excellent crash energy absorption. Advanced application technologies for these new higher strength materials include stamping and welding. This paper reports on the latest trends involving these kinds of materials and their application technologies.

まえがき = 自動車の軽量化は、運動性能の向上だけでなく、燃費向上による地球環境問題への対応という社会的な側面から近年ますますその要求が高まっている。さらには衝突安全対策のために装着される部品によって車体重量が増加傾向にあることも、軽量化に向けた技術開発の重要性を高める一因になっている。

車体の軽量化手段としては車体構造、部品構造の見直しによる部品点数の削減や、部品そのものの重量削減が主要な方策ではあるが、一方で軽量化材料への置換はコスト面の課題は残るものの軽量化効果の大きさから今後とも期待されている。例として図1<sup>1)</sup>に自動車構成材料の重量割合の推移を示す。非鉄(主としてアルミニウム)および樹脂が年々増加し、鉄系材料、特に鋼板の比率が低下していることがわかる。しかしながら鉄系材料は現在でも主たる車体構成材料の位置付けにあり、鋼板も図2<sup>2)</sup>に示すように高強度鋼板(以下ハイテン)という軽量化材料の採用比率を年々高めているのが実状である。

本稿では自動車、主として車体の軽量化に寄与する材料開発の現状と将来動向、および軽量化材料を実用化する

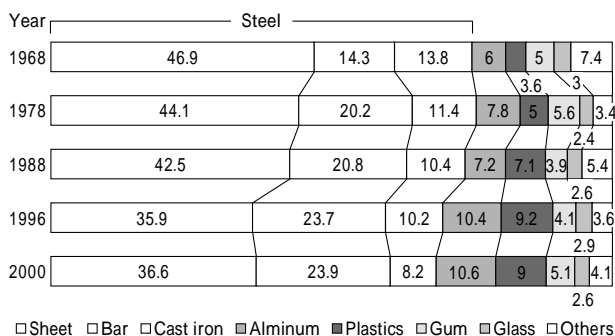


図1 自動車構成材料比の推移(トヨタ自動車㈱, マーク)<sup>1)</sup>  
Fig. 1 Transition of material ratio for automobiles  
(TOYOTA MOTOR Co., Mark)<sup>1)</sup>

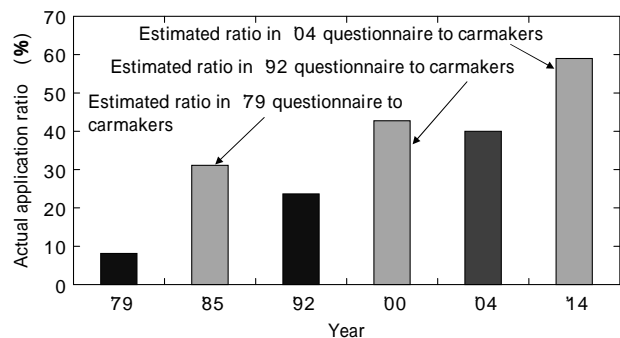


図2 高強度鋼板採用率の実績と予測の推移<sup>2)</sup>  
Fig. 2 Transition of actual and estimated application ratio of high strength sheet steels to automobile body<sup>2)</sup>

際に生じる成形や接合、塗装上の課題解決に向けた研究開発の動向について概説する。

### 1. 鉄鋼材料と加工技術

#### 1.1 高強度薄鋼板

20世紀末、安全かつ軽量高剛性な車体を低コストで開発することを目指して始まった車体用鉄鋼材料の高強度化により、現在 AHSS (advanced high strength steel) と呼ばれる加工性を従来ハイテンより高めた組織制御型ハイテンの量産化、実用化が進んだ。

さきがけとなったのは DP (dual phase) 型 590MPa 級合金化溶融亜鉛めっき鋼<sup>3)4)</sup> である。耐食性のほか、優れた伸び、良好な溶接性、動的強度特性に加え、この頃より材料開発のキーワードとなったグローバル調達性を兼ね備えた材料として車体骨格部品を中心に 440MPa 級鋼からの切替えが進み、国内外の自動車メーカーで大量に採用されている。DP 型合金化溶融亜鉛めっき鋼は、ロッカー部品などへの適用に際して一層の高強度化が求められ、780MPa 級鋼、980MPa 級鋼を相次いで開発<sup>5)-9)</sup>、

\*鉄鋼部門 加古川製鉄所 技術研究センター \*\*鉄鋼部門 薄板商品技術部 \*\*\*アルミ・鋼カンパニー 技術部

商品化した。最近、特殊な表面調整技術により合金化溶融亜鉛めっき化と従来鋼比 1.3 倍の伸びを達成した超高伸びタイプ 590~980MPa 鋼を開発した<sup>10)</sup> が、これによって合金化溶融亜鉛めっきハイテンの適用を検討できる自動車部品の拡大が期待される。

冷延鋼板においては 1980 年代より 980MPa 級鋼がドアガードバーやバンパビームなどの安全部材用途で実用化され、1990 年代始めに 1,180~1,270MPa 鋼が、1990 年代半ばには 1,470MPa 級鋼が一部実用化されるなど、高強度化の動きは比較的速かった。しかし他の部品への展開は遅く、シート骨格部品およびセンタピラーリンフォースなどの車体骨格部品に 980MPa 級鋼が適用されたのは 21 世紀に入ってからである。

当初、伸びの向上を目指して開発された冷延 980MPa 級鋼は、適用部品の拡大に伴い、それぞれの部品の要求特性に応じた加工性能が求められるようになり、既に 1990 年代初めには均一伸びが大きく張出し性に優れた絞りタイプ、局部伸びが大きく伸びフランジ性や曲げ性に優れた曲げタイプ、そして伸びと伸びフランジ性をバランス良く兼ね備えたバランスタイプの 3 タイプが造り分けられた<sup>11)~14)</sup>。最近、各鉄鋼メーカーともシート骨格部品用途向けを中心に加工性能の異なるメニューを開発するようになってきたが、開発ターゲットはバランスタイプの加工特性のさらなる改善に絞られてきた感がある。軟質なフェライト相と硬質なマルテンサイト相の複合組織からなる DP 鋼において、トレードオフの関係にある伸びと伸びフランジ性を高い次元で両立させるため、二相の硬度差の低減や不均一組織の解消などのさまざまな組織制御が試みられている。

また最近では、耐遅れ破壊性が良く 1,270~1,470MPa 級鋼で開発が進められてきたベイニティックフェライトを母相とし、ラス状にオーステナイト組織を含む鋼板 (TBF 鋼板: TRIP aided bainitic ferrite 鋼板)<sup>15)~17)</sup> を用いて比較的容易に超高伸びの 980MPa 鋼や高延性と高伸びフランジ性を有する 980MPa 鋼を製造できる可能性が見出されている<sup>18)</sup> が、こうした技術開発競争を通じて今後さらに優れたハイテン材料の開発が期待される。

一方、急速に自動車部品へのハイテン適用が進む現在、単に高強度で高加工性を追及するだけでなく、溶接性や塗装性などの実用特性の向上、材料特性のバラツキ低減などの開発ニーズが強まっている。このことはもはやハイテンが特殊な材料ではなく、一般材と同じように製造でき、使用できる材料として完成度を高めるべき時代に入ったことを意味している。実用特性に関しては従来から量産品を用いた調査が行われ、材料設計の指針が提案されてきた。しかし最近では初期段階から実用特性の向上、改善を目的としたハイテンの開発が試みられている。

スポット溶接に関しては継手強度の安定確保のため自動車メーカーからも低炭素鋼化などの要望が出されており<sup>19)</sup>、各鉄鋼メーカーで対応できるメニュー化を進める動きが活発化している。塗装前の下地処理として行う化成処理性能については、1990 年代までに主として軟鋼板

を用いて調査された例はあるが、合金元素を多量に含む冷延ハイテンについて調査された例は少ない。近年、鋼板表面の生成物や粒界クラックの制御により改善する技術<sup>20)21)</sup>が見出され、成分設計の自由度が高まることが期待される。ハイテンの引張強度特性のバラツキは部品加工時の寸法精度への影響が大きく、その低減が求められている。現時点では成分および製造条件管理範囲の狭小化での対応が主であるが、将来課題として成分元素量や温度条件などに対する感受性の緩やかな材料設計を検討する必要がある。

熱間プレスあるいは部分焼入れは、精度の高い高強度部材を容易に得ることができる技術として注目され採用例も増えつつある。しかし、熱間プレスにおいては生産性や後加工の問題、部分焼入れにおいては熱処理ひずみの問題など解決すべき課題が残されており<sup>22)</sup>、適用拡大に向けていっそうの技術開発が期待される。

## 1.2 加工技術

ハイテンは十分な材料強度が容易に得られ、廃車後のリサイクルシステムが確立されていることから車体への適用が進んでいる。しかし、材料の高強度化は、割れで定まる成形限界の低下以外に、成形後の弾性回復に起因する寸法精度不良など、成形上多くの解決すべき課題が残されている。

近年、980MPa 以上のハイテンがボディ骨格部品に適用されるようになり、部品形状のストレート化や工法としての曲げ(フォーム)化が進められている<sup>23)</sup>。しかしながらハイテン適用時の大きな課題は依然として寸法精度不良であり、加工技術においてはその対策技術を中心に検討がなされている。寸法精度不良には曲げ角度が変化する、壁が反るといった二次元不良や、部品全体がねじれるなどの三次元不良がある。基本的には「見込み」と呼ばれる、金型に実際の部品形状とは異なる形状を付与し、弾性回復の後に正規形状(寸法)となるようにする技術が使われているが、積極的に成形下死点における材料の内部応力を制御しようという対策技術<sup>24)</sup>も提案され、徐々に実用化され始めている。

また成形装置では、9,800kN を超える大型のサーボプレスが使用され始め、ハイテンの適用拡大への貢献が期待されている。従来のプレス加工技術と異なった分野では、チューブハイドロフォーミング<sup>25)</sup>やシートハイドロフォーミング<sup>26)</sup>技術が検討され、エンジンクレードルなどのモジュール単位での軽量化に役立っている。さらには、ロールフォーミング部品を従来のバンパなどの強度部品としてではなく、ボディ骨格に適用<sup>27)</sup>しようとする提案もある。これらの加工技術が素材技術としてのテラードブランクや潤滑鋼板などとあいまってさらなるハイテンの実用化を促しつつある。

一方、上記の加工技術に不可欠な技術として成形シミュレーション技術が上げられる。割れ問題はもとより、寸法精度に関しても二次元不良ではかなりの精度で合うところまで来ているとの報告が多い。近年ではシミュレーション技術の適用事例も拡大する傾向にあり、面ひずみ<sup>28)</sup>やしわ、張り剛性<sup>29)</sup>や耐デント性<sup>30)</sup>、ハイドロフ

オーミング<sup>31)</sup>の領域でも活用され、結果は生産技術にフィードバックされている。しかし、三次元寸法精度問題や応力、ひずみなどの定量的な取扱いにはまだ課題も多く、今後、材料モデルの高度化<sup>32)</sup>、非線形摩擦モデル<sup>33)</sup>、パウシンガー効果<sup>34)</sup>、金型の弾性解析<sup>35)</sup>などさらなる検討が望まれる。

## 2. アルミニウム材料と加工技術

自動車のアルミニウム材（以下アルミ材）使用量は、毎年着実に伸びている<sup>1)</sup>。2005年度の日本国内のアルミ出荷総量は411万トンであるが、そのうち38%の157万トンが自動車関係に使われている（図3<sup>36)</sup>、<sup>37)</sup>）。アルミ材使用の主な目的は自動車軽量化であるが、アルミ材の持つ高い熱伝導率や複雑加工の容易性からアルミ鋳物、ダイカスト品が主にエンジン関係部品、ホイールに使用されており、アルミ使用量の約80%を占めるに至っている。板材、押出材は、その約50%が熱交換器材として使用されている。一方、図4<sup>36)</sup>に示されるように、自動車車体へアルミ材が広く使用されるようになったのは、比較的最近であるが（量産車種へのアルミパネル材の採用は、1985年のマツダ<sup>38)</sup>のRX-7フォードが最初）、今後さらなる自動車軽量化を図るためには、自動車車体へのアルミ材の適用拡大が考え得る一方法である。自動車車体には展伸材の使用が主であるが、その利用拡大を実現するためには、新たな材料および加工技術の開発が不可欠である。ここでは、自動車車体用アルミ材（足回り材は含み、エンジン駆動系、熱交換器、ホイールは含まない）に絞り、技術開発の現状とその動向を述べる。

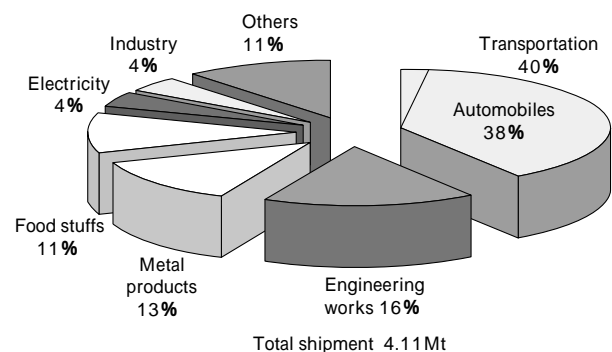


図3 用途別アルミ需要量比率（日本，2005年）

Fig. 3 Aluminum demand ratio according to application (in Japan, 2005)

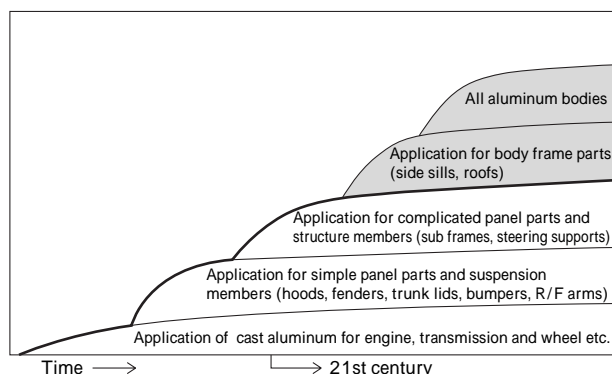


図4 自動車へのアルミ材適用の変遷

Fig. 4 Change of aluminum application for automobiles

### 2.1 パネル部材へのアルミ材の適用

パネル部材用アルミ合金としては、現在5000系（Al-Mg系）、6000系（Al-Mg-Si系）が主に使用されている。5000系合金は、成形性を確保しストレッチャストレンマークを抑制する合金の開発が進められ今日に至っている。6000系合金は、成形性の向上と塗装条件に適合したベークハード性を確保する合金の開発が行われ今日に至っている。アルミ材は、鋼材に比較して成形性が劣る（伸び、 $r$ 値、 $n$ 値、弾性率、強度などで不利）ものの、成形シミュレーションなどを活用しアルミ材に適合した成形条件を選定することにより、一般のデザインにもアルミ材を適用できるレベルに達している。今後難易度の高いデザインに対応し、フードやドアなどの後付け部品以外の車体へのアルミ化を促進し、かつコストを抑える技術開発が望まれる。それを受けた主な技術開発の現状を以下に記述する。

#### 2.1.1 成形性の向上

現状のプレス成形では非常に形状の厳しい部位に対して、アルミ合金の高温域での高い延性を利用した高温ブロー成形の量産車への実用化が図られ、本田技研工業<sup>38)</sup>のレジェンドのフロントフェンダとトランクリッドに採用されている。またブランクの周辺部を加熱して部分的に材料強度を変えることによる成形性向上に関する研究も行われている<sup>39)</sup>。一方、常温のプレスにおいても余肉の形状最適化および分割可動により、ブランクにかかる張力を均一化して成形性を向上させる開発が行われ実物大での試験まで実施されている（図5<sup>40)</sup>）。

ヘム加工に関しては、材料の組織制御による改善やヘム加工工程の改善を通してその成形性を確保する研究開発が進められている<sup>41)</sup>。孔あけ加工時の伸びフランジ性についても金属組織の影響が調べられ、材料開発にフィードバックされている<sup>42)</sup>。そのほか成形性の向上に関し、高速高精度プレス技術（サーボプレス）、金型潤滑剤、自動車大型パネル用金型ブランクホルダ変形解析、FEMスプリングバック解析など多岐にわたって多くの

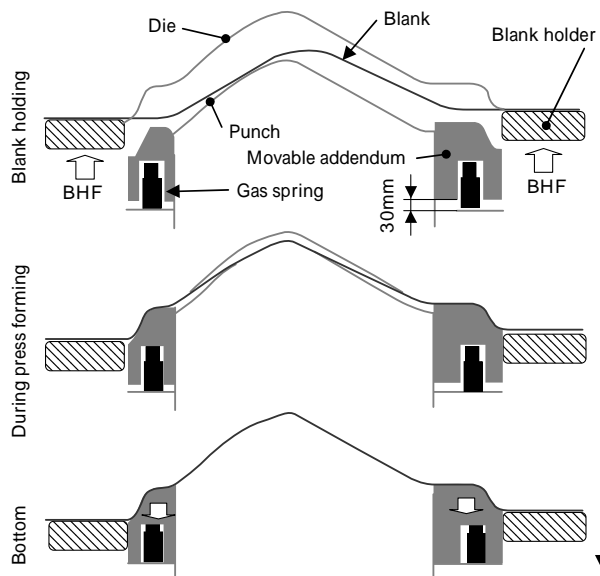


図5 分割可動金型プレス工程

Fig. 5 Schematic of forming process by using movable addendum



研究開発が進められており、今後の進展が期待される<sup>43)</sup>。

## 2.1.2 ホワイトボディへの展開

現在のホワイトボディの主流は鋼製のモノコック一体構造であり、アルミ材料が最も使われにくい領域であった(オールアルミ車は除く)。最近の異種金属接合技術の発展から、塗装時におけるアルミ材と鋼材との熱膨張差に起因するひずみの解析的検討による防止策の提案により、量産車でのアルミルーフ採用が実現した<sup>44)</sup><sup>45)</sup>。今後異種金属接合技術のさらなる開発とアルミ材の特長を生かした構造提案により、ホワイトボディへのアルミ材の適用拡大が期待される。

## 2.1.3 低コスト化

低コスト化は長年にわたる課題であるが、生産技術の簡素化およびリサイクル技術の推進とシステムの確立により進むものと考えられる。特にリサイクルシステムは素材メーカーと自動車業界との協力の下、達成される課題である。

(本号“自動車パネルのアルミ化動向”参照)

## 2.2 安全部材へのアルミ材の適用

バンパビームやドアガードバーという自動車の安全性を受け持つ部材は、安全基準の高まりから要求性能は年々厳しくなっている。一方、車体軽量化(特にバンパビームは、操縦安定性の面で軽量化ニーズが高い)の観点から技術開発が進んでいる分野でもある。現在、ビーム形状で複雑な断面構造が製造可能なことから、押出材の適用が拡大している。材料面では6000系から7000系の高強度材が開発されてきている。材料開発は今後も高強度、高エネルギー吸収という観点から進むが、一方で構造設計の面でも大きな進歩が見られる。コンピュータシミュレーション技術を駆使して、バンパビーム単体ではなく、ボディとの結合部材であるステイ、さらにはボディの一部であるフロントサイドメンバまで含んだシステムとしての構造設計を提案できるようになっている。生産技術の面では、アルミ材の特性を利用した電磁成形技術<sup>46)</sup>の適用が、注目されている。すでに一部車種に電磁成形で加工されたステイが適用されており、今後の展開が期待される。

(本号“自動車衝撃吸収用アルミニウム合金押出製品の開発動向”参照)

## 2.3 足回り部材へのアルミ材の適用

アルミ鍛造サスペンション生産量の増加は、他のアルミ化部材の生産量増加に比較して非常に大きい。軽量化はもちろん、それによる操縦安定性、乗り心地の向上への寄与も大きな要素である。材料では主に6000系合金が用いられるが、靱性、耐食性を保持し、高強度化を実現する材料および製造プロセスの開発が行われており、6061材に比較して引張強度、耐力比で40%向上させた合金も開発されている<sup>47)</sup>。鍛造サスペンションは、複雑な形状に対し数値解析を用いて合理的な形状に設計する技術が駆使されているが、製造プロセスにおいても塑性流動解析を生かした金型設計はじめ各プロセス条件の最適化が進められている。

(本号“アルミ鍛造サスペンション拡大に向けて”参照)

## 3. 接合技術

### 3.1 薄鋼板の接合技術

自動車車体の組立工程においては、コスト面や品質面から現在においても抵抗スポット溶接が主流である。近年、薄鋼板の高強度化に伴い適正な溶接条件を精度良く管理することが求められるようになったこともあり、継手品質の信頼性向上に向けて高強度鋼板の溶接データベース構築や継手強度推定式の提案<sup>48)</sup>、シミュレーションの高度化<sup>49)</sup>などの技術開発が盛んに行われている。

一方、スポット溶接以外では従来テラードブランクの溶接に主として用いられてきたレーザ溶接を車体の溶接に用いる検討が進んでいる。連続溶接が可能なレーザ溶接の適用によって、車体の曲げおよびねじり剛性の向上が見込め<sup>50)</sup>、補強部品の省略による軽量化効果も期待できる。さらには、溶接箇所の移動に時間を要しないリモートレーザ溶接は生産性改善にも寄与することから将来の適用拡大が期待される技術である。

### 3.2 アルミ材の接合技術

アルミ化適用対象としては、ホワイトボディやフードなどの後付け部品があり、その接合方法としては、抵抗スポット溶接やクリンチングの適用が少なくなり、セルフピアッシングリベット(以下SPR)、ミグ溶接やレーザ溶接が増加する傾向にある。

一方、サブフレームのアルミ化も鋳物や展伸材の組合せにて既に始まっており、その三次元の複雑な組立てにはロボットによるミグ溶接が行われている。また、サスペンション部品における摩擦攪拌接合(以下FSW)や、パネルなどにおけるFSWのスポットタイプなどアルミ分野で開発された新規接合方法も既に適用されている<sup>51)</sup>。その他、インパネリンフォースにおける板プレス構造の組立てとして大気中電子ビーム溶接が海外では適用されている<sup>52)</sup>。

### 3.3 鋼板とアルミ材との異種金属接合技術

いわゆる「材料ハイブリッド車体」<sup>53)</sup>のボディ構造へのアルミ材の適用例としては、Daimler Chrysler AGのベンツCL、BMW AGの5シリーズ、そしてAUDI AGの新TTなどがあげられる。これらは主として自動車の前後重量のバランスの最適化を狙ったもので、運動性能を向上させるための軽量化の一つの流れとなっている。また、三菱自動車工業㈱のアウトランダーのルーフパネルへのアルミ材の適用<sup>54)</sup>は、主として低重心化による運動性能の向上を狙った軽量化技術である。

これらアルミ部材の鋼製ボディへの組込みのための接合方法としては、SPRなどのリベッティングやTOXといったクリンチングなどの機械的接合に接着剤を併用した方法が適用されている。さらには、新規な接合方法として片面施工も可能なFDS方法<sup>55)</sup>(鋼製ネジによる木ネジ締結のイメージ)がAUDI AGの新型TTで適用されている。また、摩擦攪拌のスポットタイプもトランクヒンジ部のボルトリテーナの接合としてマツダ㈱のロードスターに適用されている<sup>56)</sup>。

一方では、同種金属同士の接合に由来から適用されて

きた溶接方法もその適用が期待されており、脆弱な金属間化合物の生成抑制課題を克服すべく開発が活発化してきている(本号“抵抗スポット溶接法によるFe-Al異材接合技術の開発”および本号“溶融アルミめっき鋼板を用いたアルミニウム合金と鋼との異種金属接合”参照)。

#### 4. 海外展開

日系自動車メーカーが海外での現地生産を拡張させ、ハイテンのグローバル調達性に対するニーズが高まっている中、日本で開発されたハイテン製造技術は海外での事業展開にも活用されている。

米国では、当社は2001年にUnited State Steel Co.(以下U.S.Steel)と自動車鋼板に関する包括技術提携を結び、新製品の共同開発のほか、ハイテンの製造技術、加工技術の相互技術移転、製鋼、熱冷延、表面処理での技術交流を行い、日米同一品質の製品供給体制を構築した。そしてその合併事業として1993年に稼動したPRO-TEC COATING COMPANY(オハイオ州)では、当社と共同開発したDP型590~980MPa級合金化溶融亜鉛めっきハイテンを主力メニューに生産量を伸ばし、北米市場で増大するハイテン需要に対応している。

近年、北米生産車種に対してもボディ骨格部品への780~980MPa級ハイテンの適用が本格化しており、当社とU.S.Steelは材料特性の向上とバラツキ低減を重要課題として共有し、製造条件の改善活動に共同で取り組んでいる。

一方、欧州ではvoestalpine Stahl GmbH(オーストリア)と2002年に自動車用鋼板に関する包括技術提携を結び、日欧市場における同一品質の製品供給パートナーとして日系自動車メーカーを中心に高い評価を受け、両社のハイテンビジネス拡大に相乗効果を発揮している。また新しいハイテン材の共同研究のほか、ロールフォーム工法を用いたボディ骨格の共同開発にも取り組み、軽量化と側面衝突安全性を高次元で両立する車体開発に新たな可能性を見出した。今後の実用化技術の確立へ向け、さらなる開発進展が期待される。

アルミ材についても、車体への適用が始まって20年程度であるが、鉄鋼材料に続いてグローバル調達の求めが増加しつつある。例えば当社は2005年米国にアルミ鍛造サスペンションを製造、販売するKobe Aluminum Automotive Products LLC(KAAP)を設立し、日本の大安工場と併せ、日米での供給体制を確立した。板材、押出材では、海外アルミメーカーとの共同研究開発や技術供与などにより、ユーザーニーズに合わせて個別に対応を行っており、グローバル対応の基盤を固めていっている。

むすび=自動車車体用材料の最近の技術動向を概説した。衝突安全、燃費基準などの規制動向や自動車メーカーの生産体制の変化などにより、材料に求められるキーワードが日々変貌していることを実感する。鉄鋼材料と非鉄材料という、これまで競合する素材であったものが今後は共存すること、すみ分けることを考える時期に来ている。それぞれの素材で培った技術を互いに活かし、最

適なソリューションを提供することが、これからの素材メーカーに求められる一つの姿である。鉄鋼部門、アルミ・銅部門、溶接棒部門を有する総合素材メーカーとして自動車業界の期待、そして社会の期待にこたえていきたい。

#### 参考文献

- 1) 藤根 学ほか: TOYOTA Technical Review, Vol.53, 219(2004) p.40.
- 2) 杉山隆司: 塑性と加工, Vol.46, No.534(2005) p.8.
- 3) 中屋道治ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.1(2000) p.75.
- 4) 大宮良信ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.52, No.3(2002) p.10.
- 5) 嘉村 学ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.51, No.2(2001) p.79.
- 6) M. Kamura et al.: IBEC2002, Proceedings of the 2002 IBEC and ATT Conferences on CD-ROM, 2001-01-3094 (2002)
- 7) M. Kamura et al.: SAE Technical Paper, 2003-01-0522(2003)
- 8) X.M.Chen et al.: SAE Technical Paper, 2004-01-1048(2004)
- 9) X.M.Chen et al.: SAE Technical Paper, 2005-01-0354(2005)
- 10) 二村裕一ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.57, No.1(2007) p.109.
- 11) 大宮良信: R&D 神戸製鋼技報, Vol.50, No.3(2000) p.20.
- 12) 白沢秀則ほか: 鉄と鋼, Vol.74, No.2(1988) p.326.
- 13) 田中福輝ほか: R&D 神戸製鋼技報, Vol.42, No.1(1992) p.20.
- 14) 岩谷二郎ほか: 塑性と加工, Vol.35, No.404(1994) p.1122.
- 15) 北条智彦ほか: 鉄と鋼, Vol.90, No.3(2004) p.177.
- 16) 上妻伸二ほか: CAMP-ISIJ, Vol.18, No.6(2005) 1480.
- 17) 湯瀬文雄ほか: CAMP-ISIJ, Vol.18, No.6(2005) 1481.
- 18) 中屋道治ほか: CAMP-ISIJ, Vol.18, No.6(2005) 1484.
- 19) 高木 潔ほか: 日産技報, No.57(2005) p.4.
- 20) 野村正裕ほか: 鉄と鋼, Vol.92, No.6(2006) p.378.
- 21) 橋本郁郎ほか: CAMP-ISIJ, Vol.17, No.6(2004) 1356.
- 22) 小嶋啓達: 塑性と加工, Vol.46, No.534(2005) p.5.
- 23) 佐藤章仁: 塑性と加工, Vol.46, No.534(2005) p.4.
- 24) 例えば山野隆行ほか: 第53回塑性加工連合講演会論文集(2002) p.249.
- 25) 吉田亨ほか: 塑性加工春季講演会(2000) p.425.
- 26) 例えば時田裕一ほか: CAMP-ISIJ, Vol.16, No.6(2003) 1426.
- 27) Watanabe, K. et al.: SAE Technical Paper, 2006-01-1403(2006)
- 28) Morita, T. et al.: Advanced Technology of Plasticity(2005) p.595.
- 29) 八幡重太郎ほか: 自動車技術会論文集, Vol.31, No.1(2000) p.51.
- 30) 川本親ほか: マツダ技報, No.17(1999) p.72.
- 31) 例えば Mori, K. et al.: Proc. TUBEHYDRO 2003, KARIYA(2003) p.84.
- 32) 例えば Barlat, F. et al.: Int. J. Plasticity, Vol.5(1989) p.51.
- 33) Seguchi, Y. et al.: Computational Methods in Non-linear Mechanics(1974) p.683.
- 34) 上森武ほか: 塑性と加工, Vol.43, No.498(2002) p.639.
- 35) 薦森秀夫ほか: 塑性と加工, Vol.46, No.532(2005) p.407.
- 36) 社)日本アルミニウム協会, ホームページ資料.
- 37) 志賀信道: アルトピア, Vol.37, No.1(2007) p.25.
- 38) 柴田勝弘: アルトピア, Vol.35, No.4(2005) p.9.
- 39) 西脇武志ほか: 塑性と加工, Vol.47, No.541(2006-1) p.46.
- 40) 吉田正敏ほか: 平成19年度塑性加工春季講演会講演論文集(2007), p.167.
- 41) 野田研二ほか: 第99回軽金属学会周期講演会講演論文集(2000) p.217.
- 42) 高木康夫ほか: 軽金属学会第111回秋季大会講演概要(2006) p.283.
- 43) 板成形プレス分科会年間展望: 塑性と加工, Vol.47, No.547(2006) p.727.
- 44) 松村吉修ほか: 三菱自動車テクニカルレビュー, No.16, (2004) p.82.
- 45) 福本幸司ほか: 自動車技術会学術講演会前刷集, No.72-05, 20055228(2005)
- 46) 橋本成一: 第19回塑性加工フォーラム講演論文集(2004)

- 47) 稲垣佳也ほか：R&D 神戸製鋼技報，Vol.55, No.3(2005) p.83.
- 48) 小野守章：第 63 回軽構造接合加工研究委員会資料，MP-347-2003 (2003)
- 49) 田村栄一：R&D 神戸製鋼技報，Vol.54, No.2 (2004) p.100.
- 50) 千葉晃司：日産技報，No.57 (2005) p.28.
- 51) 加藤喜久生ほか：軽金属溶接，Vol.42, No.11 (2004) p.530.
- 52) Klaus-Rainer Schlze, et al. : Welding J., Vol.83, No.2 (2004) p.32.
- 53) 中西栄三郎：溶接学会シンポジウム JAAA2002 テキスト，p.37.
- 54) 松村吉修：溶接学会全国大会フォーラム，講演概要集，Vol.78 (2006) p.27.
- 55) Kuting, et al. : Automotive Circle International Conference (March.2005), p.193.
- 56) 玄道俊行ほか：軽金属溶接，Vol.44, No.12 (2006) p.556.