

(解説)

自動車用アルミニウム合金板材の技術動向

Technical Trend of Aluminum Alloy Sheets for Automobile



櫻井健夫*

Takeo SAKURAI

Automobiles have to meet more stringent regulations for exhaust emissions, including CO₂, to protect the environment. However automobiles tend to become heavier as the safety and comfort features are improved. Therefore, carmakers are pushing forward development of light weight automotive technology. Especially, aluminum alloys have started to be used for various automotive body panels for their low specific gravity. This paper reports on the latest trend and the developmental status of aluminum alloys for automotive body panels.

まえがき = 近年、地球温暖化が深刻化してきているなか、環境問題への対策が世界的に進められ、日欧では、その対策と方策を具体化するようになった。このような背景のなか、自動車から排出される排気ガスが地球環境に悪影響を及ぼすことが問題視され、自動車の排気ガスに関する規制が厳しくなっている。

一方、自動車は、操縦安定性の向上や電子機器等による快適装備の充実化、さらに安全基準の強化に対応するためモデルチェンジごとに大型化され、それに伴い車両重量が増加している¹⁾。車両重量の増加は、そのまま燃費の低下につながり、排気ガスの排出量を増加させ、将来の厳しい規制に対処することはできなくなる。そこで、自動車メーカーでは燃費向上の研究を進めており、日本ではハイブリッド化を主流とした燃費の向上、欧州ではクリーンなディーゼルエンジンの開発が進められ²⁾、すでに50%強の乗用車がディーゼル化している。しかし、これら低燃費型のパワートレインは重量が大きく、車両重量はさらに増加することになる。そこで、重量増への対策として、車体の構造設計の改良や高強度・軽量化素材の適用などによる軽量化が進められている。最近適用が検討されている軽量化素材としては、高張力鋼板(ハイテン)、アルミニウム合金(以下、アルミ合金という)、マグネシウム合金やカーボンコンポジットなどがある^{3)~5)}。なかでもアルミ合金は従来の鋼板に比べ比重が約1/3であり、かつ、リサイクルに優れる点から注目され、様々な部位に使われている。とくに、2000年以降自動車ボディパネルに多く使用され、フードやトランク、ドアなど様々な部位にアルミ合金板材が適用されるようになった^{6)~9)}。

当社も、自動車軽量化に対応すべく、自動車パネルのアルミ化に着目し、材料、成形技術および解析技術の研究開発を進めてきた。フードのアルミ化をはじめ、ドア

やルーフなど新しい部位のアルミ化も実用化し、オンリーワン製品の一つとして、シェアトップを獲得し、その技術力が自動車メーカーから高い評価を受けている。

そこで本稿では、将来の自動車に求められる性能とそれに伴う軽量化への対応、そして、アルミ用合金板材の最新の開発状況について解説する。

1. 自動車軽量化の背景

1.1 自動車の燃費規制

図1は、日本、欧州、北米における2000年～2020年までの燃費規制の現状および将来の目標値を示す¹⁰⁾。欧州の燃費規制が最も厳しく、2008年にCO₂排出量を140g/km以下とし、2012年にはさらに130g/km以下に削減することを義務つける方針を欧州委員会が発表している。日本国内でも、2015年までに前述した欧州並みの厳しい規制が課せられる見込みとなっている。北米で制定されているCAFE規制は、欧州や日本に比べるとそれほど厳しくないものの、2020年には大幅な燃費規制を制定する方針である。図2¹¹⁾および図3¹²⁾は、それぞれ欧州と北米における各自動車メーカーの企業平均燃費を示

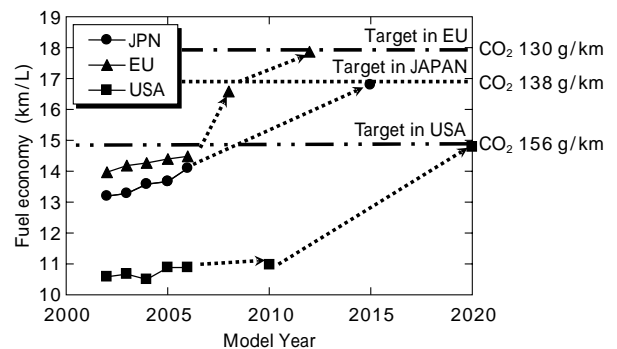


図1 日本、欧州、北米の燃費目標
Fig. 1 Target of fuel economy in JAPAN, USA and EU¹⁰⁾

*アルミ・銅カンパニー 真岡製造所 アルミ板研究部

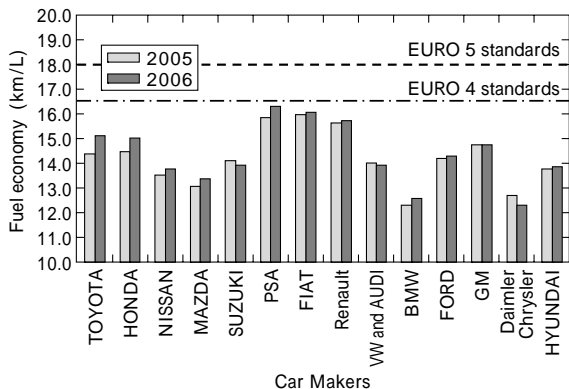


図2 欧州における各自動車メーカーの企業平均燃費

Fig. 2 Fuel economy results of the each car maker in Europe ¹¹⁾

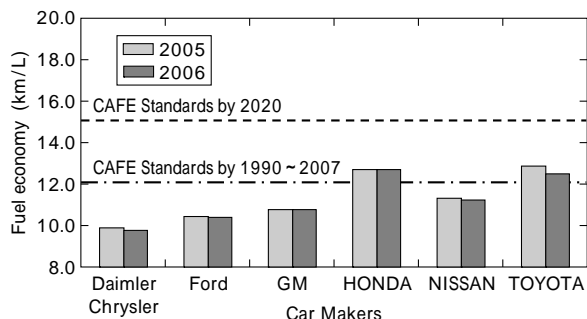


図3 北米における各自動車メーカーの企業平均燃費

Fig. 3 Fuel economy results of the each car maker in USA ¹²⁾

す。各自動車メーカーの企業平均燃費は、欧州では2012年の規制値はおろか2008年の自主規制に対しても目標燃費に到達しているメーカーは一社もない。また、規制がそれほど厳しくない北米においても、ほとんどのメーカーで到達していないのが現状である。欧州では、このCO₂排出量の規制値を到達できない自動車メーカーには罰則を設ける検討がされており、2012年から2018年までの目標値未達成の場合、新車一台あたり1g/km超過で€5、2g/km超過で€15、3g/km超過で€25、4g/km以上は€95の罰金を自動車メーカーは支払わなければならない。さらに、2019年以降は1g/km超過することに罰金は€95となる。このため、各自動車メーカーにとって、自動車の低燃費化が必須となっている。

1.2 自動車の安全基準強化

自動車の安全基準は年々高くなっている。各国で制定される衝突安全基準は、従来制定されているものからさらに複雑かつ多様化されてきている。日本では、車両の

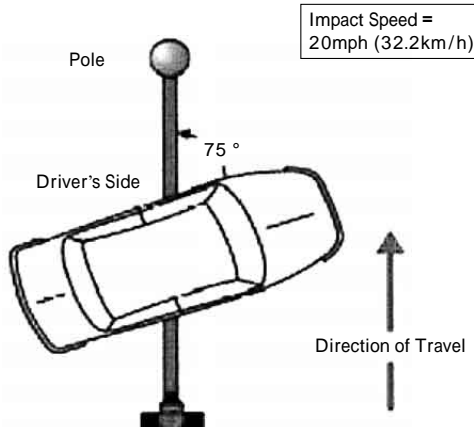


図5 側面ポール衝突安全測定法

Fig. 5 Side pole impact test configurations ¹⁴⁾

安全性能試験としてフルラップ前面衝突試験、オフセット前面衝突試験、側面衝突試験の三つの試験を実施するとともに、図4に示す歩行者頭部保護性能試験およびブレーキ性能試験からなるアセスメントを実施している¹³⁾。さらに、車格や車重の異なる車同士を衝突させるコンパチビリティ試験も実施されるようになる。衝突安全基準の厳しい北米では、従来の正面衝突、正面ポール衝突のほか、側面衝突安全基準の強化のため、図5に示すような側面ポール衝突試験を実施するようになり、これらの安全基準を満足させる必要がある¹⁴⁾。

このような衝突安全基準の強化に伴い、これらの試験に対する高い評価を得るため車両重量がますます重くなる。これらの基準に対応した安全性の高い車両を設計し、かつ、車両重量を増加させないようにするために、ボディの軽量化が求められている。

2. 自動車ボディパネルのアルミ化動向

図6は、アジア（日本）、欧州および北米の自動車部品のアルミ化率を部品ごとに示したものである。欧州の自動車部品のアルミ化率は、日本や北米に比べ非常に高く、フードはすでにシェア18%がアルミ化されている。かつ、その他の部位としてフロントフェンダ（シェア4%）やドア（シェア2%）、構造部材（シェア2%）にまで及んでいる¹⁵⁾。これは、2012年に義務化が決定している欧州の排気ガス規制（CO₂排出量の規制）の強化によるものと考えられる。一方、日本と北米は、アルミ化部位のほとんどはフードで、そのシェアは日本3%、北米

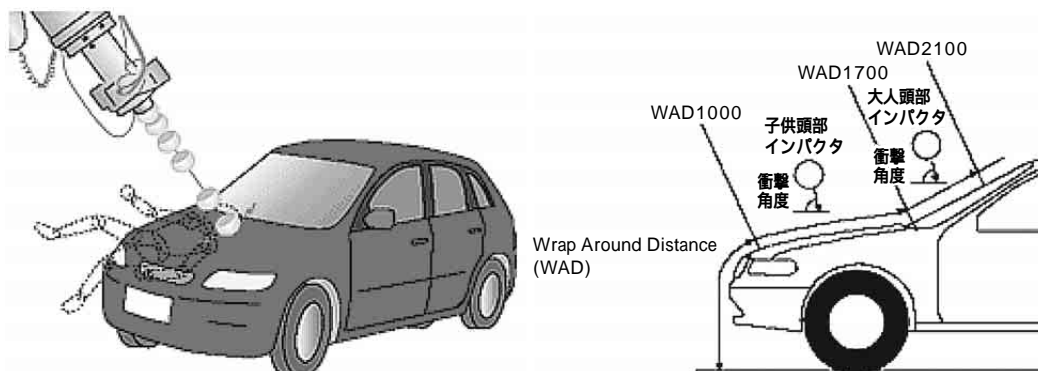


図4 歩行者保護規制測定法

Fig. 4 Pedestrian head protection performance tests ¹³⁾






Aluminium Application	Image	Aluminium Share			Main Drivers for Aluminum
		Europe	N.America	Asia	
Hoods		18%	8%	3%	Weight Reduction Driving Dynamics Pedestrian Safety
Fr-Fenders		4%	1%	< 1%	Weight Reduction Pedestrian Safety
Doors		2%	1%	< 1%	Weight Reduction Ease of Handling Driving Dynamics
Structure		2%	0%	2%	Weight Reduction Driving Dynamics Front Axle Load
Roofs		< 1%	0%	< 1%	Weight Reduction Driving Dynamics

図6 自動車アルミ適用部品とアルミ化シェア

Fig. 6 Examples of automotive application parts and aluminum share¹⁵⁾

表1 日本における自動車パネルのアルミ適用例

Table 1 Examples of aluminum closure panels in Japan

Car Makers	Models	Application Parts
TOYOTA	CROWN	Hood
	CROWN MJ	Hood
	PRIUS	Hood, Back-Door
TOYOTA(LEXUS)	LS	Hood
	GS	Hood
	SC	Hood, Roof
	IS	Hood
DAIHATSU	COPEN	Hood, Roof
NISSAN	FUGA	Hood, Door, Trunk-Lid
	GT-R	Hood, Door, Trunk-Lid
	CIMA	Hood, Trunk-Lid
	SKYLINE Coupe	Hood
	SKYLINE	Hood
	New Fairlady Z	Hood, Door, Back-Door
SUBARU	LEGACY	Hood, Back-Door
MAZDA	RX-8	Hood, Rear-Door
	ROADSTER	Hood, Trunk-Lid
HONDA	LEGEND	Hood, Trunk-Lid, Front-Fender
	S2000	Hood
MITSUBISHI	LANCHER Evo.	Hood, Roof, Trunk-Lid
	PAJERO	Hood
	AUTORUNDER	Roof

表2 欧州, 北米の自動車パネルのアルミ適用例

Table 2 Examples of aluminum closure panels in EU and USA

Car Makers	Models	Application Parts	Car Makers	Models	Application Parts
Ford	Lincoln LS	Hood, Fr-Fender, Trunk-Lid	Audi	A8	All Aluminum
	F150	Hood		R8	All Aluminum
	Ranger	Hood		TT	All Aluminum(steel Door and Back door)
	Explorer	Hood, Fr-Fender		D/C	Benz SL
D/C	300C	Hood		Benz S	Hood, Fender, Door, Trunk-Lid
	LHS	Hood		Benz E	Hood, Fender, Trunk-Lid
GM	Prowler etc.	Hood, Door, Fr Fender	BMW	Benz C	Fr-Fender
	Cadillac CTS	Hood		7 Series	Hood, Fender
	Deville	Hood		6 Series	Hood, Fender
	Seville	Hood		5 Series	Hood, Fender
	Bonneville	Hood	3 Series	Hood	
	Silhouette	Hood	VW	Tuareg	Hood, Fender
	Aurora	Hood	Phaeton	Hood, Door, Trunk-Lid	
	Venture	Hood	Jaguar	XJ	All Aluminum
	Montana	Hood		XK	All Aluminum
	Park Avenue	Hood	Renault	Clio	Hood
	LeSabre etc.	Hood		Laguna	Hood
	Suburban	Back Door		Vel Satis	Hood, Door
	Yukon	Back Door	Peugeot	307, 407, 607	Hood
	Escalade	Back Door		807	Roof
Escalade EXT	Back Door	Citroen	C4, C5, C6	Hood	
			C8	Roof	
		Volvo	S60	Hood, Trunk-Lid	
			V70	Hood, Back-Door	

8%であり、かつ、フード以外の部品は1%程度である¹⁵⁾。表1は、日本の自動車ボディパネルへのアルミ化適用事例を示す。日本の自動車メーカーはいずれも、ボディの一部にアルミを使用している車種をもち、そのほとんどはフードへの適用であるが、最近では日産自動車㈱のGTRなどでドアやトランクにも適用されるようになった。表2は、欧州と北米の自動車ボディパネルへのアルミ化適用事例を示す。北米は、日本と同様にフードのアルミ化が主である。一方、欧州は、フード以外の部位へ適用拡大しており、オールアルミ車も実用化されるなど自動車のアルミ化が最も進んでいる。

3. 自動車パネル用アルミ合金板材の開発状況

表3は、代表的な自動車パネル用アルミ合金板材の化学成分と機械的性質を示す。自動車パネル用アルミ合金板材は、5000系合金と6000系合金がある。自動車パネル用として要求される特性は、強度、成形性(絞り性、張出性)、へム曲げ性、溶接性など多岐にわたる。6000系合金は熱処理型合金で、自動車製造工程にある塗装焼付時の熱処理を利用することで強度(耐力)を向上させ

ることができることから、ベークハード型パネル材として日本、欧州、北米において主流となっている。AA6022およびAA6016は過剰Si型6000系合金で、前者は北米、後者は欧州で実用化されている。また、北米では、AA6111合金のように過剰Si型6000系にCuを添加した合金も実用化されている。日本でも同様にCuレスおよびCuを添加した過剰Si型6000系合金が実用化されており、グローバルな材料として対応可能な合金が開発されている。AA6016合金は、規格成分範囲内でベークハード性(以下、BH性という)、成形性、へム曲げ性それぞれに優れたタイプのものを各種そろえメニュー化している。例えば、フードのような成形がそれほど厳しくなく、耐デント性を必要とする部位にはBH性に優れたもの、また、ドアなどのアウトパネルとインナパネルをへム曲げにて接合する必要がある部位には、へム曲げ性に優れたものというように適材適所の材料選定ができるようにしている。日本でも同様の開発が進められている。BH性向上の研究は盛んに行われており、復元処理^{16),17)}や予備時効処理^{18),19)}が効果的であることが知られている。最近では、新たな研究も行われている。図7は、BH

表3 自動車パネル用アルミニウム合金板の化学成分と機械的性質

Table 3 Chemical compositions and mechanical properties of aluminum alloys for automotive body sheet

Alloy	Chemical Compositions (wt%)									Mechanical Properties				
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	TS (MPa)	YS (MPa)	El. (%)	n-Value	r-Value	
6000 series	AA6022	0.8 ~ 1.5	0.05 ~ 0.20	0.01 ~ 0.11	0.02 ~ 0.10	0.45 ~ 0.7	0.10	0.25	0.15	275	155	31	0.25	0.60
	AA6016	1.0 ~ 1.5	0.50	0.20	0.20	0.25 ~ 0.6	0.10	0.20	0.15	235	130	28	0.23	0.70
	AA6111	0.7 ~ 1.1	0.40	0.5 ~ 0.9	0.15 ~ 0.45	0.50 ~ 1.0	0.10	0.15	0.10	290	160	28	0.26	0.60
	AA5022	0.25	0.40	0.20 ~ 0.50	0.20	3.5 ~ 4.9	0.10	0.25	0.10	275	135	30	0.30	0.67
5000 series	AA5023	0.25	0.40	0.20 ~ 0.50	0.20	5.0 ~ 6.2	0.10	0.25	0.10	285	135	33	-	-
	AA5182	0.25	0.35	0.15	0.20 ~ 0.50	4.0 ~ 5.0	0.10	0.25	0.10	265	125	28	0.33	0.80
	AA5052	0.25	0.25	0.10	0.10	2.2 ~ 2.8	0.15 ~ 0.35	0.10	-	190	90	26	0.26	0.66

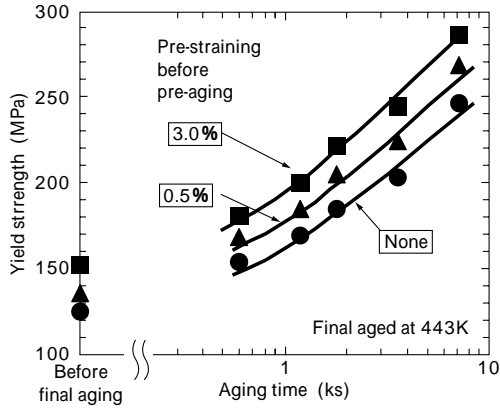


図7 6000系合金の開発 (BH性におよぼす予備時効前の予ひずみ付与の影響)

Fig. 7 Development of 6000 series alloy (Effect of pre-strain before pre-aged on bake hardenability of 6000 series alloy)

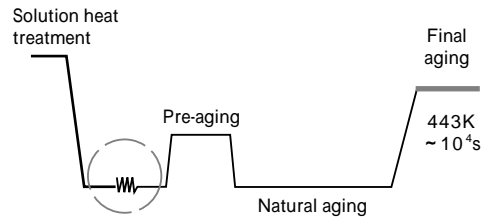


図8 アルミ合金板および軟鋼板の応力 - ひずみ曲線

Fig. 8 Stress-strain curves of aluminum alloys and mild steel

性に及ぼす予ひずみの影響を示す。予備時効前に予ひずみを0.5~3.0%付与することで10MPa以上のBH性の向上が得られることが報告されている^{20)~22)}。

4. 自動車パネル用アルミ合金板材の成形性向上技術

図8は、代表的な自動車パネル用5000系、6000系アルミ合金板と軟鋼板の応力 - ひずみ曲線を示す。アルミ合金板の引張強度と耐力は軟鋼板とほぼ同等であるが、伸びが小さい。とくに、最高荷重に到達した後の伸び(局部伸び)が鋼板に比べて著しく小さい。つまり、アルミ合金板は局部変形が小さく、限界荷重に到達するとそのまま破断してしまう。これが、アルミ合金板と軟鋼板との成形性の相違の原因の一つである。図9は、5000系アルミ合金板の機械的性質に及ぼす成形温度(引張温度)の影響を示す。アルミ合金板の機械的性質は、成形温度(引張温度)に依存し、室温近傍の20~25℃のとき、引張強度、耐力、伸びともに最も低い値となる。一方、室温より高温になると引張強度は低下するが伸びは向上し、200~300℃の温度域では45~60%まで増加する。また、低温側では、引張強度、伸びともに増加することが知られている²³⁾。-100~-196℃の温度域では、引張強度300MPa以上、伸び40%以上を得ることができ、これらの温度域を利用することでアルミ合金板でも鋼板並みの成形性の向上が期待できる。

4.1 アルミニウム合金板の温間成形

アルミ合金板の温間成形による成形性向上については

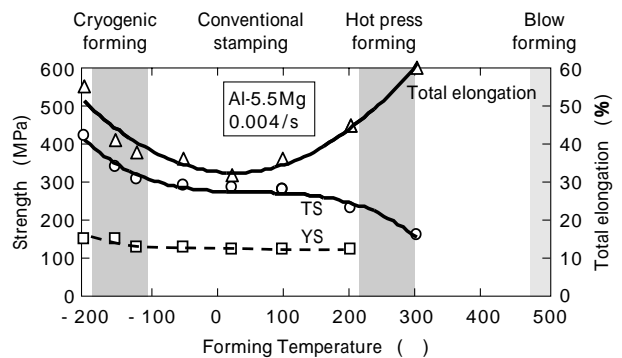


図9 5000系合金の機械的性質におよぼす成形温度の影響

Fig. 9 Effect of forming temperature on mechanical properties of 5000 series alloy

古くから知られている技術である^{24)~26)}。温間成形は、ブランクの周辺部を加熱して変形抵抗を小さくし、ダイ内へのブランク流入を容易にする。さらに、ブランク周辺を加熱しながらポンチを積極的に冷却し、ポンチ肩部の破断抵抗を増加させることで深絞り成形性は高くなる。図10は、アルミ合金板の240℃温間成形によるLDR (Limited Drawing Ratio) 測定結果を示す。なお、比較として軟鋼板の通常成形を行った。温間成形に用いた金型は、ポンチ径 50mm(肩 R5mm)、ダイス系 52.75mm(肩 R5mm)で、ダイスのみ240℃で加熱され、ポンチは冷却水で常時冷却されている。供試材は、自動車パネル用5000系合金と6000系合金でそれぞれ板厚は1mmである。アルミ合金板は、温間成形することにより、5000系合金でLDR=2.45、6000系合金ではLDR=2.30となり、通常成形の軟鋼板(LDR=2.2)より向上する。

また、5000系合金の場合、500℃以上の高温域でひずみ速度を遅くすることにより高い延性を得ることができる高温ブロー成形技術の開発も進められている。これは、アルミ合金特有の超塑性変形を活用した成形法の一つで、鋼板をしのぐ加工形状を得ることができる。しかし、加工時間が通常成形法に比べて長時間を必要とするため、一部の少量生産車にのみ適用されていた。最近では加工工程を簡略化し、従来の高温ブロー成形より短時

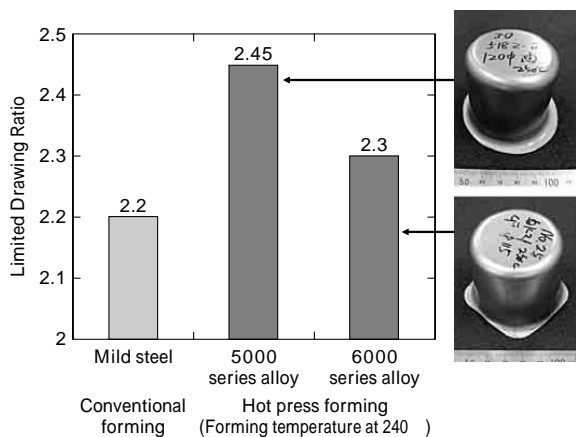


図10 アルミ合金板の温間成形技術による成形性向上
Fig.10 Improvement of aluminum-sheet formability by hot press forming technology

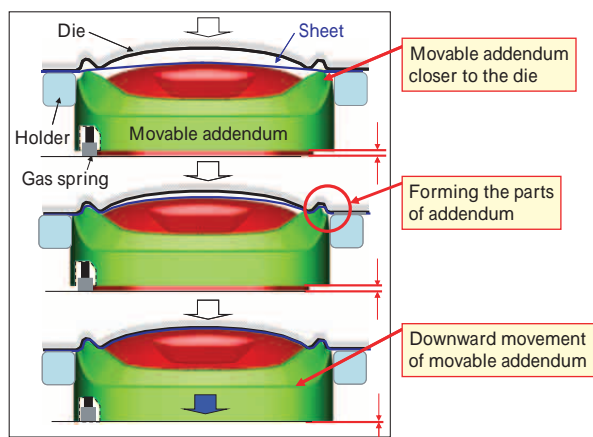


図11 可動余肉法による新成形プロセス概略図
Fig.11 Schematic view of new forming process by using movable addendum

間で生産可能な技術を確立し、本田技研工業(株)のレジエンドのトランクリッドなどで実用化している²⁷⁾。

4.2 新成形技術によるアルミ合金板の成形性改善

温間成形法はアルミ合金板の成形性向上には非常に効果があるものの、金型構造の複雑化、成形に要する時間が通常の成形より長時間必要となるなどの課題がある。

深絞り成形は、ブランクの周辺部は延性を大きくし、ブランク中央部、とくに破断危険部となるポンチ肩の強度を高くすることで成形性を向上することができる。そこで、深絞り性を高める方法の一つとして、硬質ブランクの周辺のみを予め加熱して部分的に材料特性を変化させ、強度差をつけることにより成形性を向上させる局部軟化ブランク法の研究が行われている^{28)~31)}。一方、図11に示すように、通常の常温プレス成形でも余肉部の形状適正化と余肉部をポンチと分割可動させることで、ブランクにかかる張力を均一化し、成形性と形状精度を向上させる可動余肉法による金型設計技術が開発されている^{32), 33)}。

5. 数値解析による予測技術

自動車部品へのアルミ合金板の適用を拡大するために、材料および成形技術の開発が進められている中、最近では、コンピュータシミュレーション技術を適用し、成形加工時に発生するしわや割れを事前に予測することで製品化までに繰返される試作工程の削減が図られている³⁴⁾。さらに、構造解析技術により、これまでアルミ合金板化が困難とされる部位にも適用可能な構造の検討が行われている。実用化されているアルミ合金板製ドアインナの構造はプレス成形が困難なため、ヒンジ部/中央部/ロック部をそれぞれ分割し、その後これらをSPR (Self Pierce Rivet) などにより接合している。図12は、従来の3分割構造から、数値解析によりインナを2分割構造とした新構造提案でありプレス成形を容易にし、リインフォースの省略、剛性向上などを可能とし、かつ、軽量化も実現した。さらに、衝突安全(側面ポール衝突)についても数値シミュレーションを行っており、従来構造と同等の安全基準を満足していることを確認している。

ルーフのアルミ化は、軽量化効果とともに自動車の重

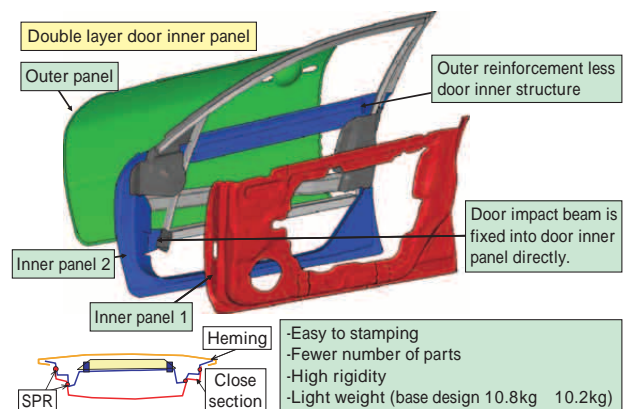


図12 アルミ合金板製ドアインナの新構造提案
Fig.12 New concept aluminum door module

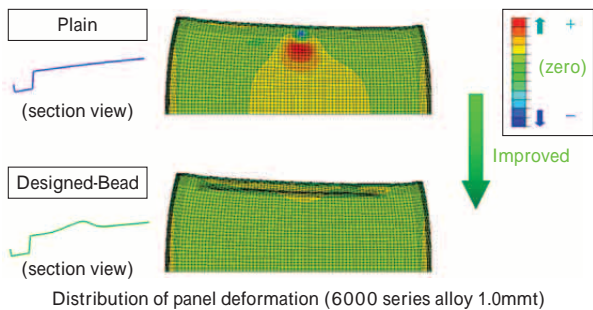


図13 ルーフのアルミ化技術

Fig.13 Aluminum of roof panels by simulation technology

心を下げ運動性能を向上させる効果がある。しかし、ルーフは車体の一部であり、鋼板製のボディと接合する必要がある。ルーフが鋼板の場合にはなんら問題はないが、アルミ合金板の場合、鋼板と熱膨張係数が違うため、鋼板と同様に使用すると塗装焼付処理後に熱ひずみが発生し、変形してしまう。そこで、熱変形解析による熱ひずみ低減の検討が行われている。熱ひずみはアルミ合金板材の板厚増加によっても改善されるが、図13に示すようにデザインビードを入れることで鋼板並の改善が可能となった³⁵⁾。この技術は三菱自動車工業㈱のランサーエポリッシュンやアウトランダーに適用され実用化されている³⁶⁾。

6. 自動車軽量化とパネルアルミ化の今後の展望

環境問題対応のための燃費改善や安全基準の適合、快適装備の装着などによる車両重量の増加により、自動車ボディの軽量化ニーズはますます高くなることが予想され、自動車ボディのアルミ化は今後さらに継続、進展するものと考えられる。2008年における自動車のアルミ化率は各国とも数%にしかすぎず、欧州でもフードが20%弱である。アルミ合金板が鋼板並みに適用されるようになるためには様々な課題を解決し、アルミ化促進のための研究開発が必要である。図14は、自動車パネル用アルミ合金板材の開発目標を示す。現行の5000系、6000系の成分やプロセス制御、組織制御などにより鋼板と同等の高い成形性と高強度な材料の開発が必要であろうと考える。図15は、アルミ合金板の成形技術とその生産能力を示す。アルミ合金板の成形方法として、温間成形、対向液圧などの技術を用いることで成形性が向上する。また、アルミ特有の性質を生かした高温ブロー成形や極低温成形は、複雑な形状でも成形を可能にすることが期待できる。しかし、これらの技術は金型構造が複雑であり、成形までに長時間を必要とする。量産車種への適用のためには生産効率の高い成形技術の開発が必要であり、その場合、特殊な方法でなく、通常のプレスで成形できることが望ましい。そのため、新しい部品構造設計と成形技術を組合わせた提案が必要になるであろう。また、安全基準に適合するための重量増に対応するため、軽量素材であるアルミを生かした構造設計も実用化されている。例えば、歩行者頭部保護を考慮したフードの開発が進められ、トヨタ自動車㈱のインパクトアブソープションウェーブフードやマツダ㈱RX-8のショックコー

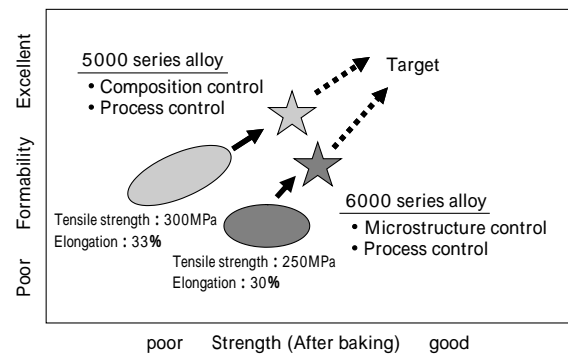


図14 自動車パネル用アルミ合金板の開発

Fig.14 Development of aluminum sheets for automotive body panels

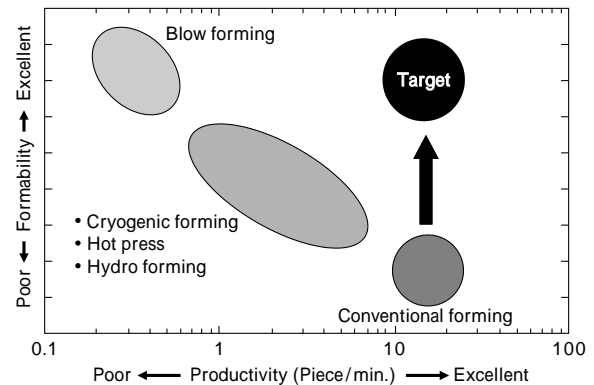


図15 自動車パネル用アルミ合金板材の成形技術の開発

Fig.15 Development of forming technology of aluminum alloy sheets for automotive body panels

ンフードなどがある³⁷⁾。このように、技術の進歩により将来の自動車パネルのアルミ化拡大が可能となり、自動車軽量化に大きな効果をもたらすと考える。

むすび=自動車軽量化の背景から、自動車パネル材アルミ合金板材の開発の現状と今後の動向および新技術を紹介した。今後、自動車は環境問題への対応のみでなく、安全や快適性から車両重量の増加は避けられない状況にあり、また、排気ガス規制においても燃費計測方法が改められるなどさらに厳しくなる。このため、車体の軽量化ニーズはこれまで以上に高くなるであろう。自動車の軽量化は必須課題であり、軽量素材および適用技術の開発はますます進められると考えられる。とくに、アルミ合金板は鋼板の自動車ボディ生産ラインをそのまま活用することができ、リサイクル性にも優れることから、他の軽量素材に比べて今後も発展し、拡大する可能性が高い材料である。今後、材料および成形技術の開発と数値解析技術の進歩により、現在、パネルでは数パーセントしかないアルミ適用率が十数パーセントあるいは数十パーセントにまで拡大すると期待される。

参考文献

- 1) 沼尻 到: アルミニウム, 61 (2005) 85-89.
- 2) 奥田修司: アルミニウム, 68 (2007) 50-53.
- 3) 三浦隆宏: アルトピア, 1 (2008) 17-24.
- 4) 勝倉誠人ほか: アルミニウム, 66 (2006) 125-129.
- 5) 千葉晃司: アルミニウム, 61 (2005) 75-79.
- 6) 自動車アルミ化委員会: アルミニウム, 54 (2003) 105-106.
- 7) 自動車アルミ化委員会: アルミニウム, 58 (2004) 163-167.

- 8) 自動車アルミ化委員会：アルミニウム，63（2006）25-38.
- 9) 自動車アルミ化委員会：アルミニウム，71（2008）22-24.
- 10) 日刊自動車新聞：2008年2月13日号
- 11) European Federation for Transport and Environment ホームページ，<http://www.transportenvironment.org/>，（参照2008年10月）.
- 12) National Highway Traffic Safety Administration ホームページ，<http://www.nhtsa.dot.gov/>，（参照2008年10月）.
- 13) 独立法人自動車事故対策機構（NASVA）ホームページ，<http://www.nasva.go.jp/>，（参照2008年10月）.
- 14) 細川成之ほか：新しい側面衝突試験法に関する研究（第2報），独立行政法人交通安全環境研究所（NTSEL）ホームページ，<http://www.ntsels.go.jp/>，（参照2008年10月）.
- 15) European Aluminum Association ホームページ，<http://www.eaa.net/>，（参照2008年10月）.
- 16) 内田秀俊ほか：軽金属，46（1996）427-431.
- 17) 櫻井健夫ほか：軽金属学会第91回秋期大会講演概要（1996）175-176.
- 18) 佐賀 誠ほか：軽金属，53（2003）516-522.
- 19) 櫻井健夫ほか：軽金属学会第87回秋期大会講演概要（1994）185-186.
- 20) 増田哲也ほか：軽金属学会第109回秋期大会講演概要（2005）247-248.
- 21) 増田哲也ほか：軽金属学会第110回春期大会講演概要（2006）243-244.
- 22) 増田哲也ほか：軽金属学会第111回秋期大会講演概要（2006）267-268.
- 23) 杉田知之ほか：軽金属学会第88回春期大会講演概要（1995）71-72.
- 24) 金子純一ほか：塑性と加工，28（1987）375-380.
- 25) 阿倍佑二ほか：軽金属，44（1994）240-245.
- 26) 大上哲郎ほか：軽金属，50（2000）451-455.
- 27) 千葉晃司：軽金属，56（2006）136-141.
- 28) 菅 又信ほか：プレス技術，25（2005）36-43.
- 29) 西脇武志ほか：軽金属，55（2005）33-36.
- 30) 西脇武志ほか：軽金属，55（2005）306-309.
- 31) 倉田恵史ほか：軽金属学会第111回秋期大会講演概要（2006）41-42.
- 32) 吉田正敏ほか：平成19年塑性加工春季講演会講演文集，（2007）167-168.
- 33) 吉田正敏ほか：塑性加工連合講演会講演論文集，（2007）99-100.
- 34) 高橋 進：プレス技術，46，（2008）22-27.
- 35) 福本幸司ほか：自動車技術会学術講演会前刷集，72-05（2005）15-20.
- 36) 松村吉修ほか：三菱自動車テクニカルレビュー，16（2004）82-87.
- 37) 日経ものづくり9（2004）74.