

自動車用アルミニウムボディシートの特徴と成形性

Features and Formability of Aluminum Body Sheet for Automobile

野口 修

Osamu Noguchi

概要 地球環境問題に配慮し、自動車業界においても二酸化炭素排出量の削減が課題となっている。アルミニウムの採用による車体の軽量化は自動車の燃費向上に直結し、二酸化炭素排出量を抑制する有効な手段である。このため自動車用アルミニウム材の出荷量は着実に増えてきている。自動車用アルミニウムボディシートは自動車のボディパネルに適用すべく開発された板材であり、適用当初は5000系合金が用いられたが、現在は6000系合金が主流である。本稿では実際に使用されているアルミニウム合金板材の特徴についてプレス成形性を中心に紹介する。さらに、材料の選択や開発段階において重要な指針となる成形性指標について解説する。

Abstract: The reduction of CO₂ emission is an important subject in the automotive industry also out of consideration for global environmental problems. Body weight saving by application of aluminum is an effective means to improve fuel economy and hence to reduce CO₂ emission. Accordingly, shipment of aluminum materials for automobiles is increasing steadily. Aluminum body sheet is an aluminum alloy material that has been developed to be applied to automotive body panels. 5000 series alloys were used at the beginning of application. Currently, however, 6000 series alloys are popularly used. In this paper, characteristics of some commercial aluminum body sheets are outlined focusing on press formability. Moreover, formability indices which are important in material selection and development are illustrated.

1. はじめに

近年、地球環境問題への配慮から排出ガスに対する規制が厳しくなり、自動車業界においても排出ガス、特に二酸化炭素の削減が重要な課題となっている。自動車における二酸化炭素の排出は80%以上が走行により発生していることから¹⁾、車体軽量化による燃費の向上は地球温暖化の原因である二酸化炭素の排出量削減に直結する有望な手段である。また、安全対策、環境対策、装備の充実などによる重量の増加を軽減するためにも車体の軽量化が必要となっている。これら軽量化ニーズを満たすために材料面からの検討がなされ、軽量化効果の高い材料としてアルミニウムの採用が拡大している。

日本国内では1986年にエンジンフードにアルミニウム板が採用²⁾されて以来、アルミニウムボディシートの採用車種は増え、自動車向けアルミニウム板材の出荷量も増え続けている^{3), 4)}。

比重が小さいというアルミニウムの特徴は自動車を軽量化するための素材として魅力的である。例えば、板材をモデルに曲げ剛性を鋼板と等価にすると、アルミニウムは鋼板の1.44倍の板厚で50%の軽量化が可能となる⁵⁾。一方、さらにアルミニウム板材の適用を拡大するための課題としては自動車のダイナミックなデザインに対応できるプレス成形性の向上が挙げられる⁶⁾。

本稿ではプレス成形性を中心に、現在実用化されている自動車用アルミニウムボディシートの特徴を紹介し、材料の選択および開発において重要な指針となる成形性指標についての解説を行う。

2. 最近の自動車アルミ化動向

2.1 自動車用アルミニウムボディシートの種類

図1に自動車向けアルミニウム板材の出荷量(熱交換器用を含む)とアルミニウムボディシートの採用車種数

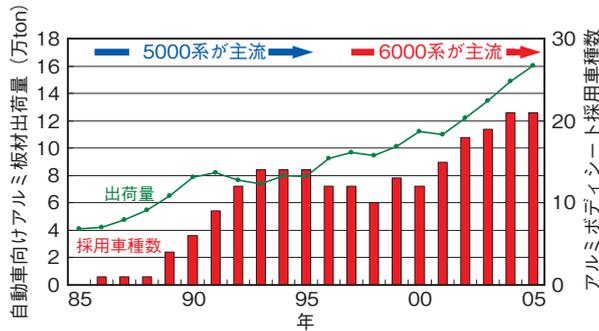


図1 自動車向けアルミニウム板材出荷量とアルミボディシート採用車種数
Fig.1 Trends in the shipment of aluminum alloy sheet for cars, and the number of car models which adopted aluminum body sheet.

の推移を示す^{3), 4)}。出荷量および採用車種数はともに増加している。ボディシートにアルミニウム合金が採用された当初は主に成形性の観点から5000系合金が適用された。その後、塗装焼付工程で高耐久化が可能な6000系合金が主流となった⁷⁾。

表1に代表的な自動車用アルミニウムボディシートの機械的性質を示す。

2.2. 自動車用5000系ボディシートの特徴

5000系合金板は一般に強度、成形性、耐食性、表面処理性および溶接性に優れる。自動車ボディシートに実用されている5000系合金板には一般材(主に5052, 5182)と開発材(当社ではTG19, TG25)がある。

5000系合金ボディシートの開発経緯を図2に示す。開発はストレッチャストレインマーク(SSマーク: 図3)の抑制と成形性向上を目標に行われた。SSマークが発生すると塗装後の表面に模様が残るため、外観品質が劣化しアウトパネルへの適用は困難となる。そこで、結晶粒径の調整によりSSマークを抑制する技術開発が行われ、同時に延性向上による成形性の改善が図られてTG19が誕生した。

さらに高成形性を目指してMg添加量の増加による合金開発が行われた。図4⁸⁾に示すようにMg添加量を多

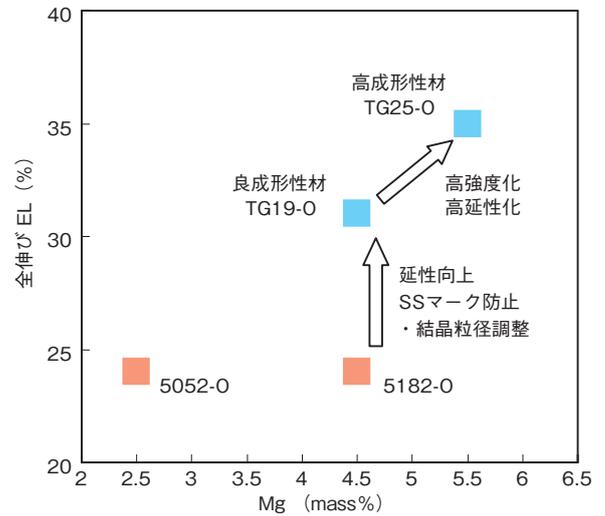


図2 5000系合金ボディシートの開発経緯
Fig.2 History of development of 5000 series aluminum body sheets.

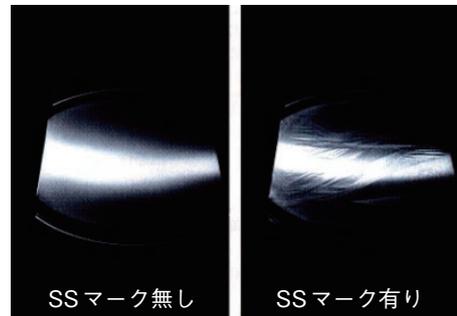


図3 ストレッチャストレインマーク(SSマーク)
Fig.3 Stretcher- strain mark (SS mark).

くすると強度と伸びが向上する。しかし、Mg量の増加は圧延性を低下させるため工業的には制限があり、現状ではMgの添加量は約5.5%が限界である。このような経緯で実用化された合金板がTG25である。

2.3. 自動車用6000系ボディシートの特徴

6000系合金は成形加工時にSSマークが発生しない。また、自動車製造工程の塗装焼付処理時に強度が増加する(バークハード: BH)特徴があり、耐デント性が向上

表1 代表的な自動車用アルミニウムボディシートの機械的性質
Table 1 Mechanical properties of typical aluminum body sheets.

合金系	合金・質別	引張強度 TS (MPa)	耐力 YS (MPa)	全伸び EL (%)	n値	r値	エリクセン値 Er (mm)	限界絞り比 LDR*)	備考
5000系	5052-0	206	98	23	0.26	0.66	9.6	-	一般材
	5182-0	284	137	28	0.30	0.79	9.6	1.96	一般材
	TG19-0	267	127	31	0.31	0.71	10.0	2.02	当社開発材
	TG25-0	274	117	35	0.35	0.73	10.3	2.03	当社開発材
6000系	TM30-T4	214	110	27	0.24	0.73	9.9	1.97	当社開発材
	TM45-T4	224	115	28	0.26	0.74	10.1	1.98	当社開発材
	TM67-T4	250	117	31	0.30	0.74	10.2	2.00	当社開発材
鋼板	SPCC	314	176	42	0.23	1.39	11.9	-	-

*) LDR測定用潤滑剤は防錆油を使用

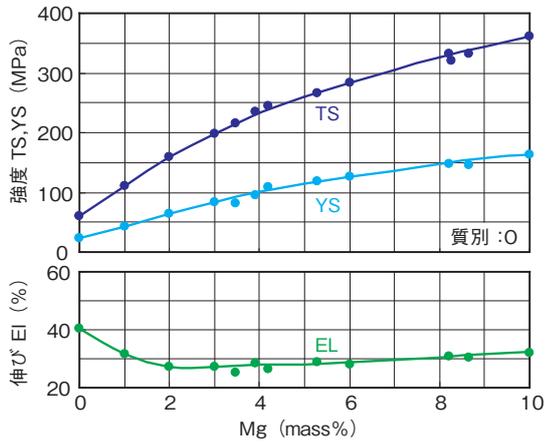


図4 Al-Mg合金におけるMg添加量と機械的性質の関係
Fig.4 Relationship between Mg content and mechanical properties of Al-Mg alloy sheet.

するなど、ボディシートとして優れた特徴を備えている。日本国内の自動車生産ラインでは塗装焼付温度が170℃前後と比較的低く、時間も20分程度と短いため⁹⁾、6000系合金の優れた特徴を活かすことができなかつた。しかし、図5⁸⁾に示すように日本国内の塗装焼付処理条件でもBHにより十分な強度が得られる板材の製造プロセスが開発され、6000系合金板がボディシートとして実用化された。

図6に自動車用6000系合金板のT4での耐力およびBH後の耐力を示す。プレス成形による硬化を考慮して予ひずみを2%付与し、その後170℃、20分の加熱によるBH後の耐力はおよそ200 MPaに達する。これらの開発

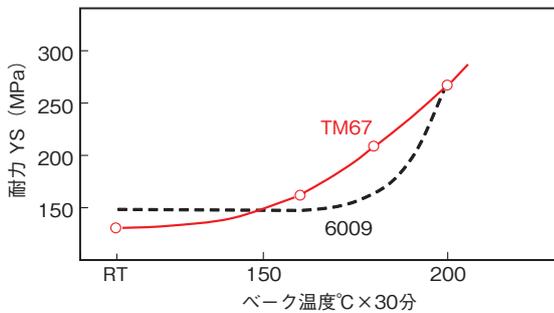


図5 6000系開発合金板のベークハード挙動
Fig.5 Bake hardening behavior of the developed 6000 series aluminum alloy sheet.

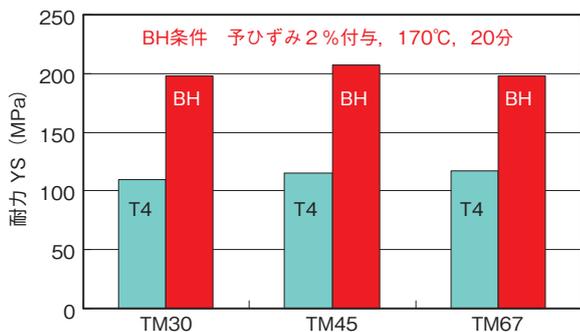


図6 6000系開発合金板のベークハード特性
Fig.6 Bake hardening property of the developed 6000 series aluminum alloy sheet.

合金板はボディシートとして実用されている。

アウター材は耐デント性の観点から高耐力であることが望ましい。反面、スプリングバックを抑制する観点から成形時には低耐力であることが要求される。プレス成形時には耐力が低く、成形後の塗装焼付処理で耐力が高くなる6000系合金板はアウター材に適している。

アウターパネルはヘミング加工が必須である。アルミニウム合金板は局部伸びが小さく、曲げ限界が低いいため、ヘミングのような厳しい曲げ加工が難しい¹⁰⁾。TM30は金属組織制御と低耐力化により良好なヘミング性を実現した¹¹⁾。図7に示すようにボディシート用の6000系開発合金板は従来の6000系合金板⁸⁾に比べ室温時効特性が抑制されており、特にTM30は低耐力である。TM45は成分調整により曲げ性を確保しつつBH性および成形性を向上させた合金板であり、TM67はCuの添加により高い成形性を付与した合金板である。

6000系合金板はアウター材として優れるが、ハンドリング性、リサイクルなどを考慮するとインナー材も6000系合金板の使用が望ましい。インナー材に要求される最も重要な性能は成形性であり、成形後のパネルの形状で剛性を確保するため、BHによる強度増加は必ずしも必要としない。そこで、熱処理方法を工夫し、BHによる強度増加は小さくなるものの強度バランス、伸びの向上により良好な成形性を付与した6000系合金板が開発された。

図8に6000系開発合金板の成形性を、図9にプレス成形品の例を示す。成形性の評価は、破断せずに成形できる最大のしわ押さえ力を現す成形限界B.H.F. (blank holding force)によった。成形限界B.H.F.が大きい程、成形性は良好である。

6000系開発合金板ではTM30に比べTM45の成形限界B.H.F.が高く、TM67の成形限界B.H.F.はさらに高い。TM45inrおよびTM67inrはそれぞれTM45およびTM67のインナーパネル仕様材である。TM45inrはTM45に比べ成形限界B.H.F.が高く、TM45より成形性は良好である。同様にTM67inrもTM67より成形限界

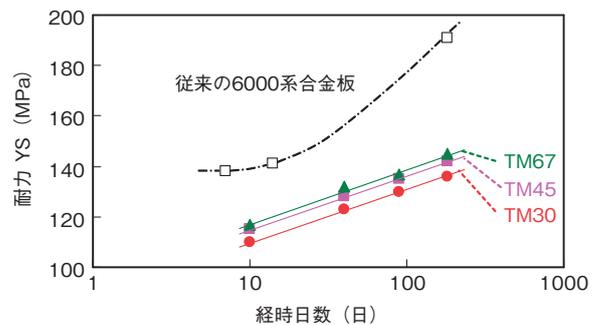


図7 6000系開発合金板の室温時効特性
Fig.7 Age hardening behavior at room temperature of the developed 6000 series aluminum alloy sheet.

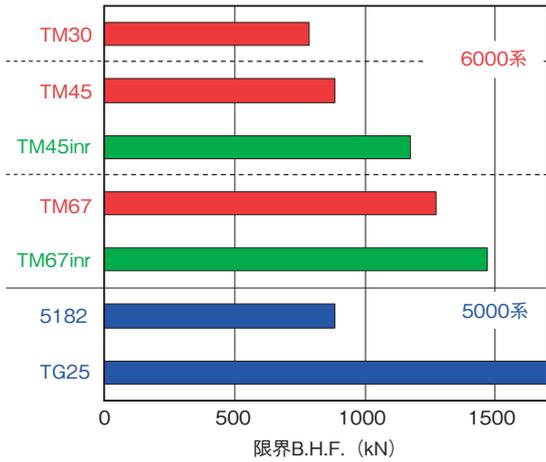


図8 6000系開発合金板の成形限界B.H.F.
Fig.8 Forming limit B.H.F. of the developed 6000 series aluminum alloy sheets.

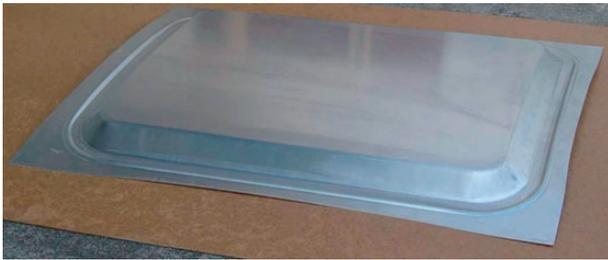


図9 6000系開発合金板の実験プレス成形品
Fig.9 Experimental press-stamped panel of the developed 6000 series aluminum alloy sheet.

B.H.F.が高く、成形性良好でインナー材に適している。

TM30を除く6000系開発合金板の成形性は5000系高成形性材TG25には及ばないものの一般材の5182以上の成形性を備えている。

3. プレス成形性

3.1. アルミニウム合金板の機械的性質の特徴

自動車用アルミニウムボディシートの成形性は鋼板と比較されることが多い。図10にアルミニウム合金板および鋼板の応力-ひずみ曲線を示す。鋼板に比べ、アルミニウム合金板は伸びが大幅に小さく、特に最大荷重点

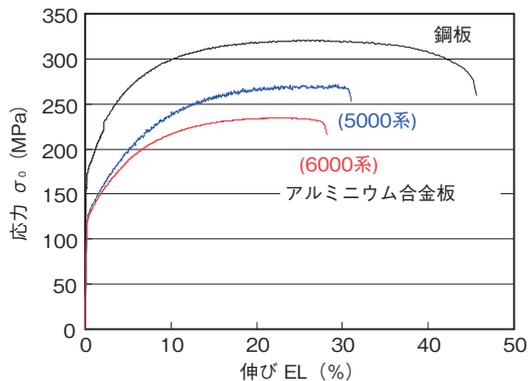


図10 アルミニウム合金板および鋼板のS-S曲線
Fig.10 S-S curves of aluminum alloy sheet and steel sheet.

以後の伸び、すなわち局部伸びが小さい。

アルミニウム合金板のn値(加工硬化指数)は鋼板のそれよりも大きい。図11に、微小変形領域でのn値であり式(1)により定義されるn*値(瞬間n値)¹³⁾のひずみ量による変化を示す¹²⁾。

$$n^* = \{ \langle d\sigma / \sigma \rangle / \langle d\varepsilon / \varepsilon \rangle \} \quad (1)$$

$\varepsilon \geq 0.1$ のひずみ領域で鋼板のn*値は一定であるが、アルミニウム合金板のn*値は一様に低下し、高ひずみ領域での加工硬化性が次第に減少することが分かる。

図12は各ひずみ領域におけるひずみ速度感受性指数m値を示す¹²⁾。鋼板のm値は0.015程度と大きく、ネckingにより変形領域が局所化して局部的にひずみ速度が増加すると変形抵抗が大きくなり変形が周辺に分散する効果が発生すると考えられ、鋼板の局部伸びが大きいことの一因といわれている。しかし、アルミニウム合金板のm値は鋼板に比べかなり小さいため、ひずみ速度の効果は期待できない。

このようなn*値やm値の挙動がアルミニウム合金板の伸び、特に局部伸びの小さい一因であると考えられる。

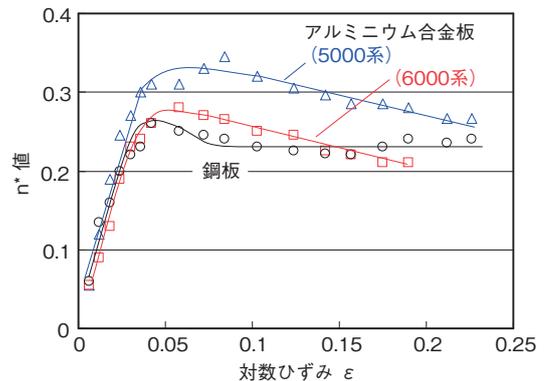


図11 アルミニウム合金板および鋼板の微小変形領域でのn値(n*値)
Fig.11 Moment n values of aluminum alloy sheet and steel sheet.

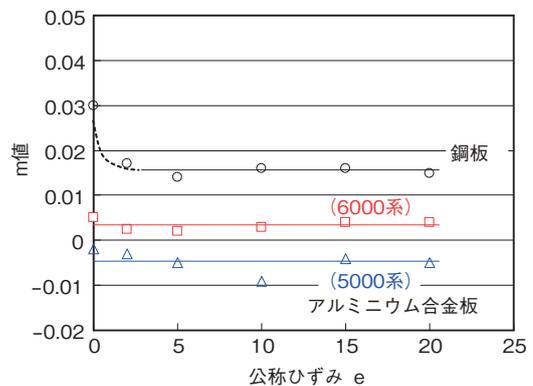


図12 アルミニウム合金板および鋼板のm値
Fig.12 m values of aluminum alloy sheet and steel sheet.

3.2. 成形性指標

成形性指標は材料の選択や材料開発においては重要な要素である。アルミニウム合金板に適した成形性指標を見いだすことができれば自動車ボディのアルミニウム化に大きく貢献するものと考えられる。

鋼板では r 値が有効な成形性指標である。しかし、アルミニウム合金板では r 値が大きく変わらないこともあって、必ずしも有効な成形性指標ではない。また、成形性指標は簡便な試験で測定できることが望ましい。引張試験で測定できれば実用上の価値も大きい。このような観点からアルミニウム合金板に関する成形性指標の検討が行われ、引張試験における引張強さと耐力を組み合わせた(TS-YS)¹⁴、TS・(TS/YS)¹⁵などが深絞り性と相関があると報告されている。

著者らは図13に示す成形実験用モデル金型を用いたプレス成形試験での成形限界B.H.F.に対する相関係数の大きさを成形性指標を検討した¹⁶。

プレス成形試験に使用した5000系合金板および6000系合金板の(TS-YS)、 n 値、TS(引張強さ)、と成形限界B.H.F.の関係を図14に示す。成形限界B.H.F.と(TS-YS)の相関係数は0.88、 n 値との相関係数は0.82、TSとの相関係数は0.90である。(TS-YS)は成形限界B.H.F.と良好な相関関係を示す。また、 n 値、TSと成形限界B.H.F.も同様に良好な相関関係を示す。

図15に引張試験で測定できる各特性値と成形限界B.H.F.の相関係数を示す。逆相関の場合を考慮し、各指標と成形限界B.H.F.の相関係数の絶対値を比較した。TS、(TS-YS)、EL(全伸び)、U.EL(一様伸び)、 n 値は相関係数が0.8以上と良い相関を示す。L.EL(局部伸び)、 r 値は相関係数が小さいが、これはアルミニウム合金板の場合L.ELと r 値が材料によって大きく変わらないためと考えられる。

次に、各種の小型カップ試験値と成形限界B.H.F.の相関係数を図16に示す。平面ひずみ張出し高さの相関係数が最も大きい。プレス成形における破断が平面ひずみ状態となる部位で発生することが多いため、平面ひず

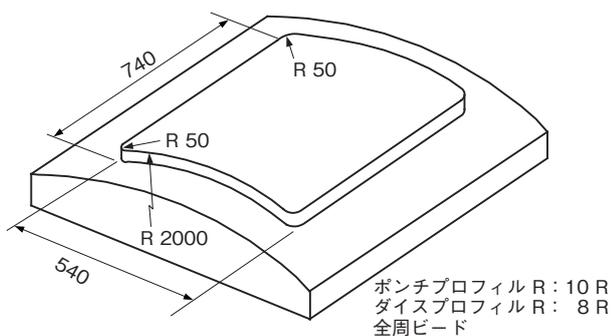


図13 成形実験用モデル金型
Fig.13 Model die for experimental press forming.

み状態での破断限界を示す平面ひずみ張出し高さが良い相関を示すと考えられる。また、エリクセン値の相関係数も大きい。エリクセン値は板材のプレス成形性を調べる簡便な試験法としてJIS規格化され広く用いられている。アルミニウム合金板においても、その有効性が再確認されたと考えられる。

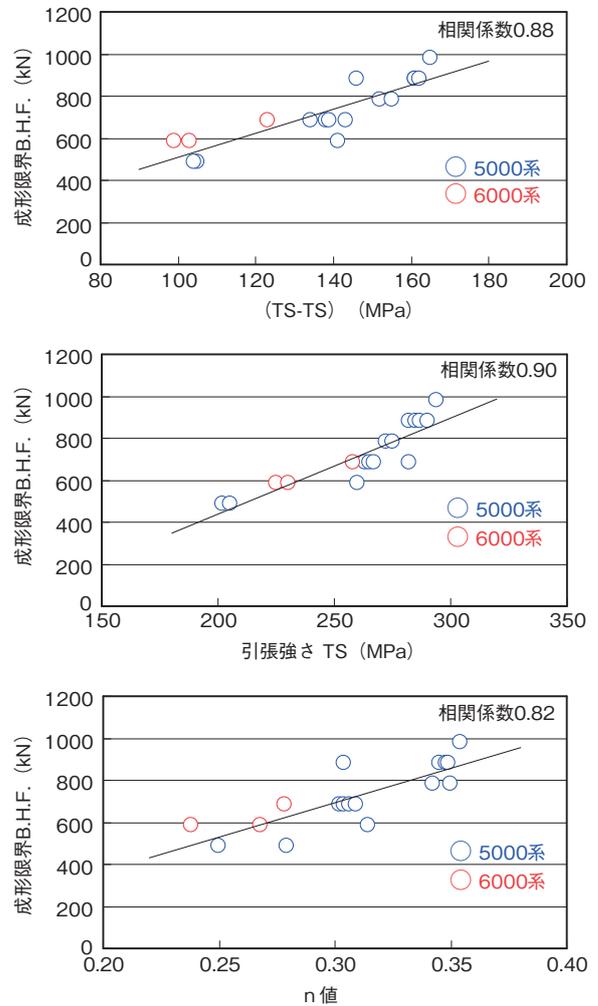


図14 アルミニウム合金板の(TS-YS)、TSおよび n 値と成形限界B.H.F.の関係
Fig.14 Relationship between (TS-YS), TS, n value and forming limit B.H.F. of aluminum alloy sheets .

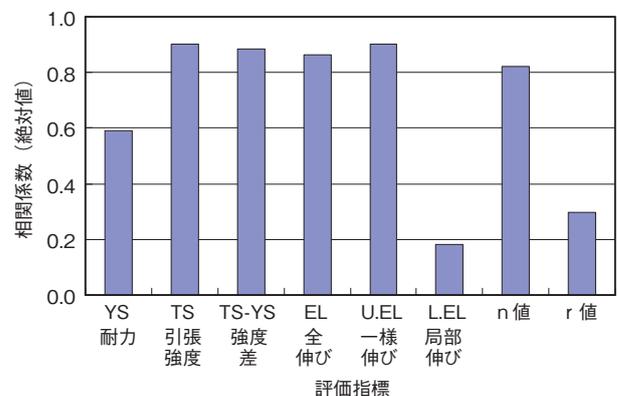


図15 各材料特性と成形限界B.H.F.の相関係数
Fig.15 Correlation coefficients between each material property and forming limit B.H.F.

参考文献

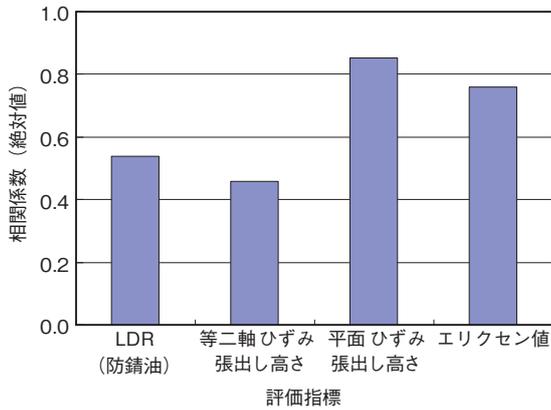


図16 小型カップ試験の各評価指標と成形限界B.H.F.の相関係数

Fig.16 Correlation coefficients between each value of small cup tests and forming limit B.H.F..

4. おわりに

オイルショック、米カリフォルニア州の独自規制、京都議定書などによる二酸化炭素削減と理由は移り変わったが自動車の燃費向上の要求は変わらない。また、車体重量は自動車の操作性や運動性にも深く関わっており、これらの面からも軽量化のニーズがあることから、将来も車体軽量化の必要性は変わらないと考えられる。軽量化を実現するための材料としてアルミニウムへの期待もますます大きくなると推察される。

近年の合金設計と製造プロセスの改善により、自動車用アルミニウムボディシートの成形性は向上した。しかしながら、自動車ボディシートとして求められる成形に関する要求を満たすまでには至っていない。また、成形性指標は、材料開発や使用時の材料選択に重要であり多くの実験的な研究報告がなされたが、未だ道半ばの感が否めない。今後、さらに検討が進みアルミニウム合金板材に適した成形性指標が見いだされ、同時にアルミニウム板材に適した成形方法の開発も進み、材料と成形方法の両面から自動車用アルミニウムボディシートの成形技術が構成されていくものと期待する。

その結果、アルミニウムボディシートの適用による自動車の軽量化が進み、地球環境の向上に貢献することで多くの人に役立つことを願う。

- 1) 多田博, 佐々木憲夫:自動車技術, **55** (2001), 9.
- 2) マツダwebサイト:RX-7物語.
- 3) 日本アルミニウム協会webサイト:アルミ板類需要部門別出荷推移(2005).
- 4) 日本アルミニウム協会 自動車アルミ化委員会webサイト
- 5) 八木三哉, 小宮山恭弘, 峯憲一郎:自動車技術, **55** (2001), 29.
- 6) 牛尾英明:軽金属, **56** (2006), 580.
- 7) 高橋淳, 勝倉誠人:自動車技術会2006春大会「アルミニウム加工における現状と今後の方向性フォーラム」, 20064396, (2006), 8.
- 8) 阿部佑二, 吉田正勝, 野口修, 松尾守, 小松原俊雄:塑性と加工, 33-375 (1992), 365.
- 9) 片桐知克, 東海林了ほか:自動車技術会12-06シンポジウム「ボディ構造形成技術の最前線」, (2006), 46.
- 10) 志賀信道:自動車技術会2006年春季大会「アルミニウム加工における現状と今後の方向性フォーラム」, (2006), 1.
- 11) M. SAGA, M. KIKUCHI, Y. ZHU, M. MATSUO, : Proceedings of ICAA-6, (1998), 425.
- 12) M. Usuda, K. Hasimoto, T. Amaike, T. Katayama, Y. Abe, M. Yoshida:SAE, No950924, (1995).
- 13) 薄鋼板成形技術研究会編:プレス成形難易ハンドブック第2版, (1997), 456.
- 14) 中村真一郎, 恵比根美明, 佐藤章仁, 岩田徳利, 富岡良郎, 松居正夫:44回塑加連講論, (1993), 613.
- 15) 林稔, 戸次洋一郎, 林登, 安永晋拓, 松本義裕, 橋口耕一:92回軽金属春講概, (1997), 69.
- 16) 阿部佑二, 吉田正勝, 野口修, 白田松男, 片山知久:平5年度塑加春講論, (1993), 301.



野口 修 (Osamu Noguchi)
技術研究所