

超塑性成形法による 二輪車用アルミニウム燃料タンクの開発

Development of Aluminum Fuel Tank by Superplastic Forming

中 川 昌 彦* 小 屋 栄太郎* 望 月 信 介*
Masahiko NAKAGAWA Eitarou KOYA Shinsuke MOCHIZUKI

中 本 修 平** 木 村 静 雄*** 小 杉 雅 紀***
Shuhei NAKAMOTO Shizuo KIMURA Masaki KOSUGI

要 旨

二輪車の軽量化のために燃料タンクのアルミニウム化を図る場合、プレス成形では各部の分割数が多くなり、充分に軽量化できない、製造工程が長くなるなどの問題点がある。

一方、一部のアルミニウム合金では高温で超塑性を示すことが知られており、この特性を応用した分割成形部品の一体成形化が求められている。超塑性により成形能は著しく向上するが、同時に微細な空洞（キャビテーション）の生成による材料特性の低下、長い成形時間等の課題があり、実用化には至っていなかった。

筆者らは、キャビテーションの生成と材料特性の相関を明確にし、燃料タンクとしての成形限界を明らかにすることにより、ABF(Aluminum Hot Blow Forming)法を確立した。

この製法による軽量かつ低コストの燃料タンクは市販ロードレーサに適用され1994年9月より量産化されている。

ABSTRACT

Aluminum fuel tanks are generally produced by press forming method to reduce the motorcycle weight, however, the press forming has a limitation of weight reduction and long production process because a lot of partitions in fuel tank are required.

It is known that aluminum alloys have a superplasticity at high temperatures. It has been desired for fuel tanks to produce by a unified forming method applying characteristics of superplasticity. Although this superplasticity greatly improves the formability, at the same time, minute cavitation created in the process makes the characteristics of material to change for the worse, and prolongs the forming time.

The authors have attempted to clarify the forming limitation confirming the relation between the cavitation and the characteristics of material, and the Aluminum Hot Blow Forming (ABF) method has completed.

The light and low cost fuel tank applied ABF method has been installed on the production road-racer since September 1994.

1. まえがき

二輪車は運動性能の向上を目的として、軽量化を図ることが望まれており、市販レーサでは燃料タンクのアルミニウム化が図られてきた。従来のアルミニウムタンクでは鋼板タンクと同様に冷間プレス成形によりタンク各部の部品が作られてきたが、複雑な要求形状からタンク各部の分割を増やして溶接接合を行っている。冷間プレ

ス成形法は、溶接施工限界からタンクの板厚が決まるため軽量化に限界があり、さらに溶接仕上げ工程が増加するという課題がある。プレス成形性を向上させるため、材料の改良、150～250℃の温間成形などの検討が進められてきたが、いずれもタンクの部品点数を削減するまでには至っていなかった。

*朝霞研究所

**ホンダレーシング

***ホンダエンジニアリング（株）

一方、一部のアルミニウム合金は、500℃前後の熱間において超塑性を示すことが知られている。冷間でも結晶粒内のすべりにより塑性変形を起こすが、超塑性材料は高温で結晶粒界すべりにより変形を起こすため最大1000～2000%もの変形が可能となる¹⁾。この特性を応用し複雑な形状の部品を一体成形化する検討が行われているが、重要な構造部品の実用化には至っていない。

この第1の理由は、変形が大きくなると材料中に微細な空洞（キャビテーション）が発生し、材料特性に変化が起こるためである。第2の理由は、変形を大きくした場合、ひずみ速度を遅くする必要があり成形時間が長くなるためである。

今回、これらの問題を解決し世界で初めて超塑性成形による燃料タンクを市販レーサRS125Rに1994年9月より採用したFig. 1。キャビテーションの問題に対しては、キャビテーションが材料に与える影響を明確にし、製品



Fig. 1 RS125R with ABF Fuel Tank

特性を確保できるキャビテーション量と板厚の設定を行った。また、成形時間の問題に対しては、プリベンド後に高温ブロー成形を行うABF（Aluminum Hot Blow Forming）法を確立することにより、高ひずみ速度領域での成形を可能とした。本稿ではこれらの概要について述べる。

2. 燃料タンクの要求特性と部品構成

2. 1. 燃料タンクの要求特性

二輪車の燃料タンクは、四輪車とは異なり通常車体の中央上部に取り付けられる外観構成部品である。二輪車の燃料タンクの要求特性を以下に示す。

(1) 耐変形性

レーサでは、燃料タンクがコーナリング時にライダーの体重を支える構造部材となることがあり、また、エンジンのセッティングのために頻繁に脱着が行われる。そのため、燃料タンク上板部は耐変形性が必要である。

(2) 疲労強度

燃料タンクにはフレームを介してエンジンの振動が伝わることから、ステー取り付け部などの溶接箇所にはエンジンの振動に耐える疲労強度が要求される。

(3) 耐貫通性

燃料タンクは転倒時に突起物などによる打撃を受ける場合がある。このため上板部には耐貫通性が要求される。

(4) 塗装性能・耐食性

外観構成部品である燃料タンクは塗装外観が特に重要であり、塗膜性能として耐ガソリン性が要求される。一

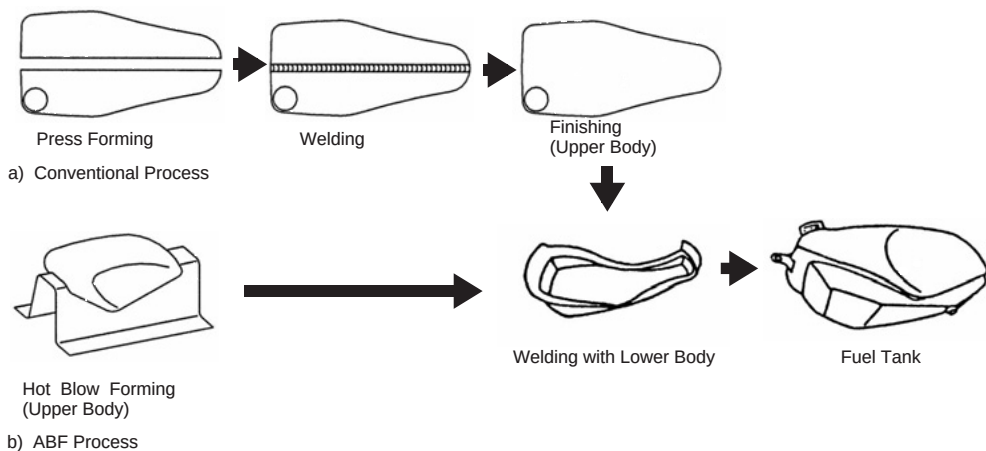


Fig. 2 Making Process of Fuel Tank

方、燃料タンク内面には燃料中に含まれる水分などによる腐食に対する耐食性も要求される。

2. 2. 燃料タンクの部品構成と製造工程

従来の冷間プレス成形による燃料タンクの製造工程を Fig. 2 a) に示す。元板は厚さ 1.5mm の 5052-O 材（以下、従来材）を使用し、燃料タンク本体は上板部と底板部に分けられる。上板部は左右分割でプレス後トリムを行い、左右をタンク上部中心線上で TIG 溶接する。溶接ビードは削り取られ仕上げ加工が行われる。このため従来製法では仕上げ時の板厚減を考慮する必要があり、接合部以外は要求板厚よりも厚くなる。

これに対し、ABF 法では Fig. 2 b) に示すように上板部を一体で成形することが可能である。一体成形では仕上げ代が不要なため約 20% の軽量化が達成され、また工程の簡略化も可能である。

3. 燃料タンク用超塑性材料とその特性

3. 1. 化学組成

超塑性特性を有するアルミニウム合金には、Al-Cu-Mg 系（2000 系）、Al-Mg 系（5000 系）、Al-Zn-Mg 系（7000 系）がある²⁾。燃料タンク用アルミニウム合金として、溶接

Table 1 Nominal Chemical Composition of Developed Superplasticity Alloy

(wt %)					
Mg	Mn	Cr	Fe	Si	Al
4.5	0.7	0.1	0.1	0.1	Bal.

性・耐食性の点から Al-Mg 系を選定した。開発材の化学成分を Table 1 に示す。主成分の Mg はマトリックスを強化し粒内すべりを抑え粒界すべりを発生しやすくするが、同時に圧延性を低下させることから、添加量は 4.5% とした。さらに、キャビテーションの発生の起点となる金属間化合物を少なくするため、従来材に対して Fe と Si を低減させている。

3. 2. ミクロ組織と超塑性特性

超塑性を得るには、成形中に粒界すべりが安定して進行するように元板の結晶粒を微細化する必要がある。Fig. 3 a)、b) に従来材と開発材の成形前の結晶粒を示す。開発材は結晶粒を約 $10\ \mu\text{m}$ 以下と従来材に対して約 1/5 に微細化して超塑性を得ている。また、Fig. 3 c) に開発材の成形後の結晶粒を示す。Al-Mg 系合金では超塑性成

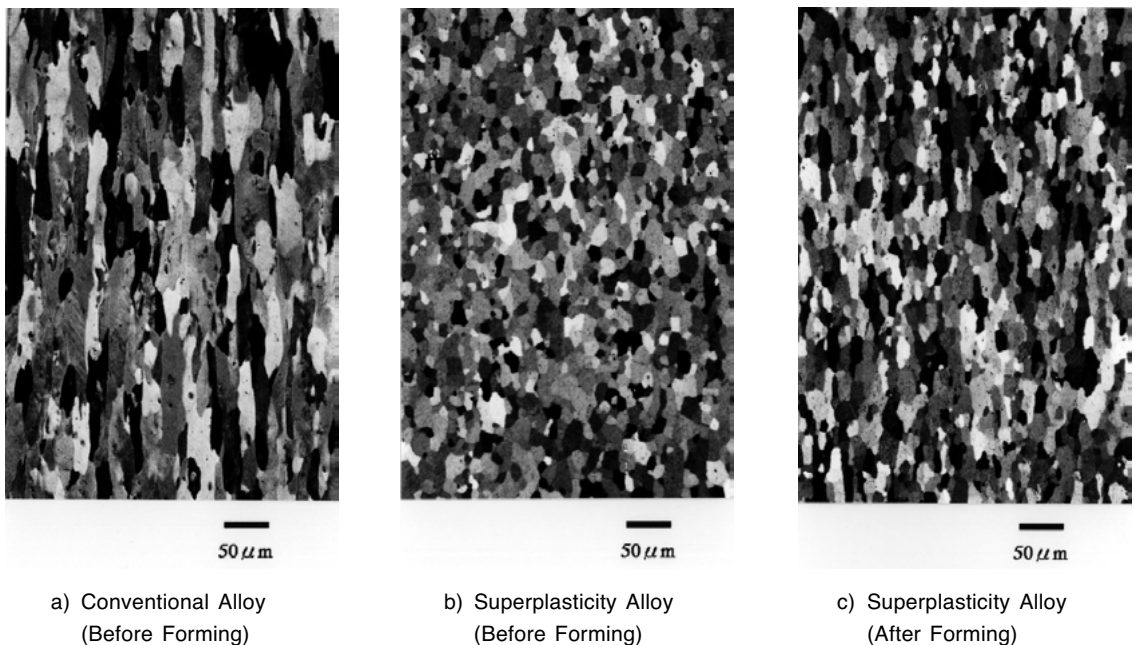


Fig. 3 Micro Structure of Conventional Alloy and Superplasticity Alloy

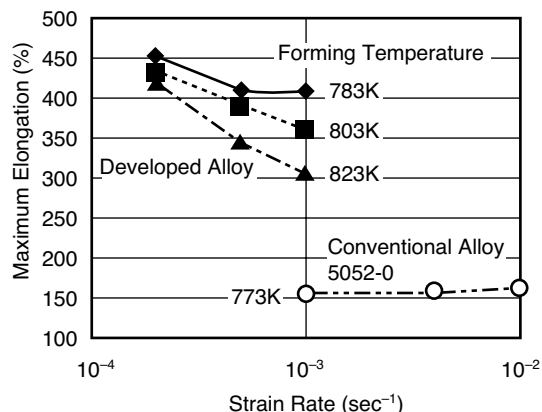


Fig. 4 Relation between Strain Rate and Maximum Elongation

形中に粒界すべりと同時に粒内すべりが発生することが報告されているが³⁾、開発材においても成形後の結晶粒は長く伸びており、粒内すべりが発生している。

Fig. 4に開発材および従来材のひずみ速度と最大伸びの関係を示す。開発材はひずみ速度の変化とともに最大伸びは変化するが、従来材はこのようなひずみ速度の依存性はない。また、開発材は成形温度783Kでは高ひずみ速度領域での伸びの低下が少ないことから、成形時間の短縮化が可能である。一方、粒内すべりの影響により、開発材の最大伸びは300～400%と超塑性材の中では比較的少ないが、燃料タンクの成形に対しては充分である。開発材は最大伸びよりも高ひずみ速度領域での成形性を重視している。

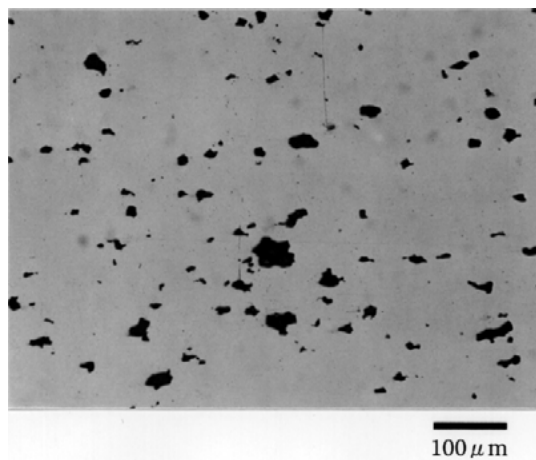


Fig. 5 Example of Cavitation

4. キャビテーション

超塑性成形では変形量が多くなるとキャビテーションの発生が見られる⁴⁾。Fig. 5にキャビテーションの発生例を示す。キャビテーション発生的主要原因には、粗い結晶粒の存在(粒界三重点のくさび型空洞)、粒界介在物の存在、水素ガスに起因するブリスタ、内部ポロシティの存在等が指摘されている⁵⁾。

燃料タンク各部の板厚および変形量を決定するには、キャビテーションの生成過程を明らかにし、燃料タンクの要求特性に対してキャビテーションがどのような影響を与えるのか明確にする必要がある。

4. 1. キャビテーションの生成過程

開発材の燃料タンク成形過程におけるキャビテーションの発生量と形状変化の調査結果を以下に示す。

変形量(本文中の変形量は成形後の板厚に対する成形前の板厚の比率を表わす)とキャビテーション量(面積率)の関係をFig. 6に示す。変形量が150%を超えるとキャビテーションの発生が見られ、その後キャビテーションの増加率は徐々に上昇し、250%以上においては増加率はほぼ一定となる。

Fig. 7にキャビテーション開口長径とキャビテーショ

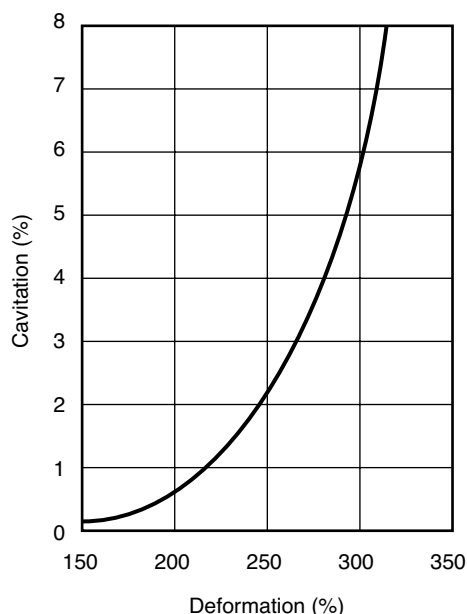


Fig. 6 Relation between Deformation and Cavitation Ratio

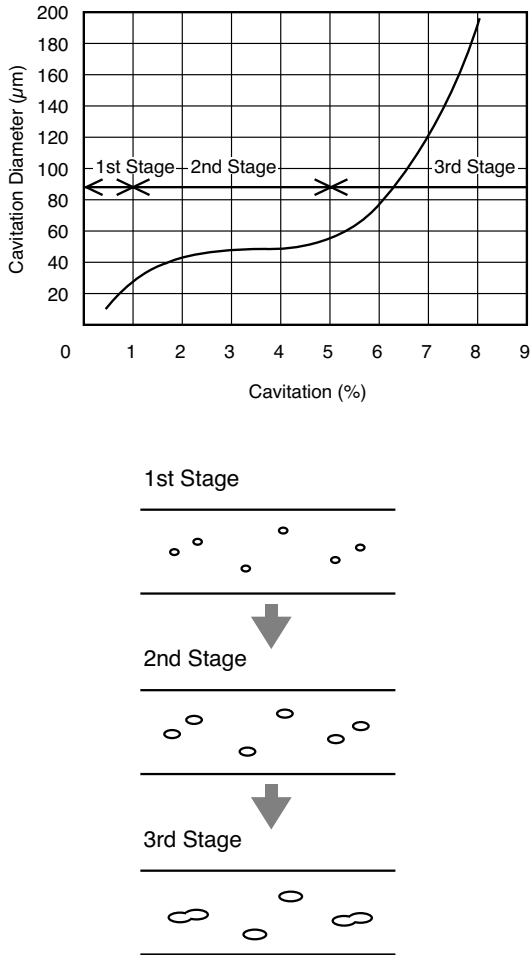


Fig. 7 Relationship between Cavitation Area Ratio and Cavitation Diameter

量との関係を示す。表面キャビテーション開口長径は、キャビテーション量 5 % までは徐々に拡大するが、それ以降では急激に拡大する。これらの形状の変化をもとに、キャビテーションの成長過程を以下の三つのステージに分類した。

- ・第 1 ステージ (キャビテーション量 1 % 以下)
→ キャビテーションの核発生領域
- ・第 2 ステージ (キャビテーション量 1 ~ 5 %)
→ キャビテーションの成長領域
- ・第 3 ステージ (キャビテーション量 5 % 以上)
→ キャビテーションの連結領域

第 3 ステージでは、キャビテーションの連結によりキャビテーション開口長径が急激に増大するため破断に至る。

各ステージのキャビテーションの変化をふまえて特性を明確にし、燃料タンク各部の変形量を決定することとした。

4. 2. キャビテーションの燃料タンク要求特性に対する影響

(1) 耐変形性

Fig. 8 に開発材の引張特性とキャビテーション量との関係を示す。キャビテーション量の増加により抗張力、0.2 % 耐力とも徐々に低下するが、変形限界付近のキャビテーション量 5 ~ 8 % の第三ステージでも急激な低下は見られない。開発材は従来材よりも強度が向上しており、耐変形性にはキャビテーションの影響よりも成形後の板厚の影響が大きい。

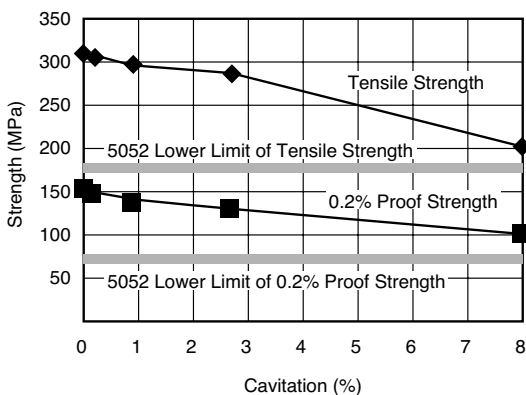


Fig. 8 Influence of Cavitation Ratio for Tensile Strength

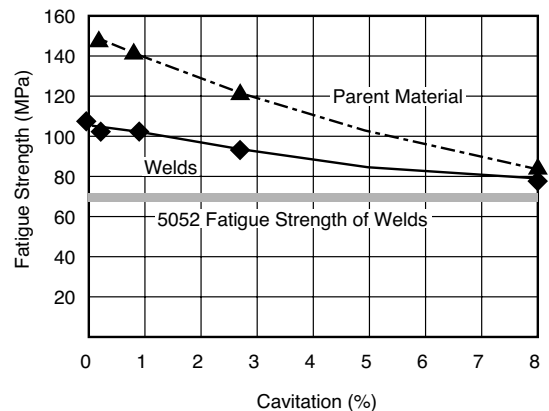


Fig. 9 Influence of Cavitation Ratio for Fatigue Strength

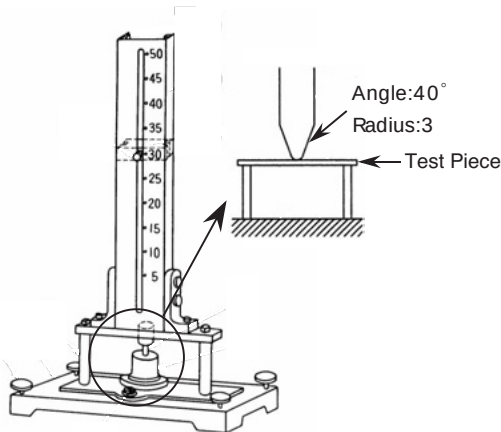


Fig. 10 Penetration Test Equipment for Fuel Tank Sheet

(2) 疲労強度

Fig. 9 に開発材の母材および溶接部の疲労強度とキャビテーション量の関係を示す。キャビテーションが少ない領域では母材疲労強度は、溶接部疲労強度より高い。変形限界のキャビテーション量 8 % では、開口長径の増大による応力集中が溶接ビードの応力集中と同等の切欠き効果を与えるため、母材と溶接部とは同等の強度となる。そのため開発材の溶接部疲労強度は従来材溶接部と同等以上であり従来と同様の継ぎ手形状とした。

(3) 耐貫通性

Fig. 10 に板材の耐貫通性試験装置を、また、Fig. 11 に開発材の貫通エネルギーとキャビテーション量の関係を示す。キャビテーション量 5 % 以下の第 2 ステージまでの貫通エネルギーの低下度は大きい、第 3 ステージでは低下度は小さい。これはキャビテーション量が少ない間は塑性変形後貫通するが、キャビテーション開口長径が大きくなるとあまり変形せず、剪断的に貫通するためである。本開発においては、変形限界付近のキャビテーション量まで考慮して、製品各部の剪断強度を確保する板厚を設定し、形状的には局部的な荷重の集中を避け、変形の分散化で耐貫通性の保証を行った。

(4) 塗装性

キャビテーションの発生量が多いと、塗装時に塗膜ブリスタが発生することがある。Fig. 12 に塗膜ブリスタの発生していない部位を基準点とし、そこから塗膜ブリスタ発生部位にかけて 20mm 間隔で塗膜ブリスタ発生の有

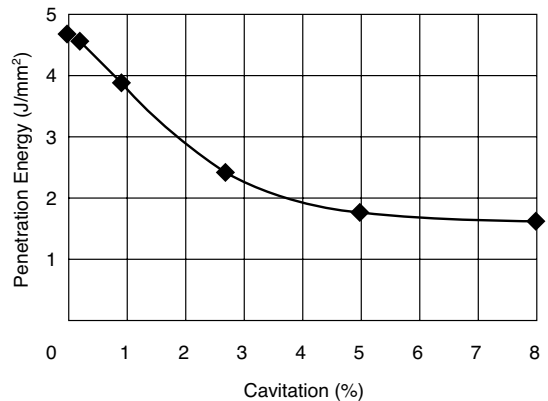


Fig. 11 Influence of Cavitation Ratio for Penetration Energy

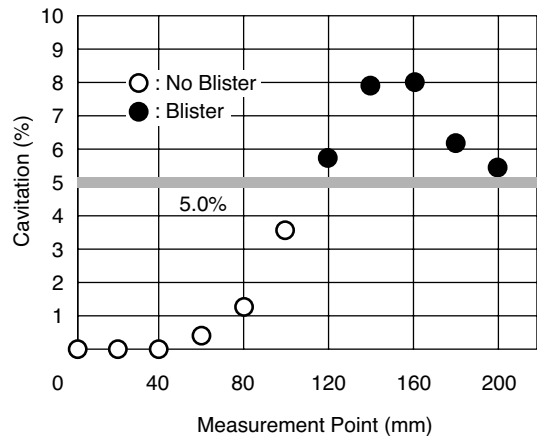
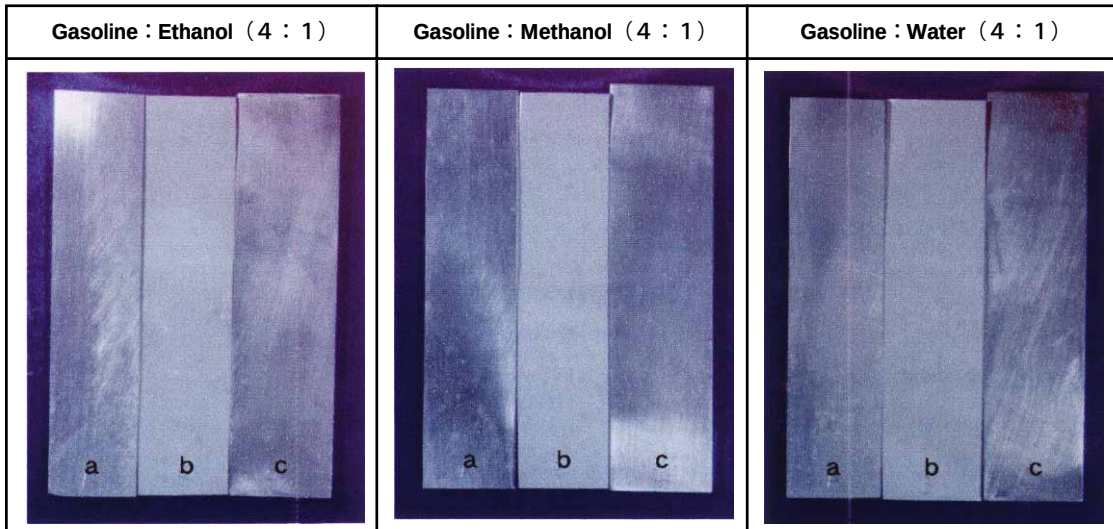


Fig. 12 Relation between Cavitation Ratio and Film Blister at Painting Process

無と各部キャビテーション量を調査した結果を示す。塗膜ブリスタ発生位置とキャビテーション量には相関性があり、キャビテーション量が 5 % を越える部位で塗膜ブリスタが見られる。塗膜ブリスタの発生部位のキャビテーション量はキャビテーション開口長径が急激に拡大する第 3 ステージに対応しており、キャビテーション開口長径が塗膜強度に対するふくれの臨界径を越えたため塗膜ブリスタ発生に至るものと考えられる。そのため塗膜ブリスタの発生を防止するためにキャビテーション量を 5 % 以下に抑制した。

(5) 内面耐食性

Fig. 13 に内面耐食性試験の結果を示す。試験片は (a) 従来材、(b) 成形時の高温酸化膜を残した開発材および (c) 高温酸化膜除去した開発材の 3 種類を用いた。試験液



(a) Conventional Al Sheet (b) Developed Al Sheet with High Temperature Oxidation Film
(c) Developed Al Sheet without Oxidation Film

Fig. 13 Comparison of Fuel Tank Sheets Surface after 1000 hours Dipping in Various Fuels

はガソリンにエタノール、メタノール、水をそれぞれ添加し、その容積比を4：1とした。試験は40℃の雰囲気です試験片の約半分を1000時間浸漬して調査を行った結果、浸漬面、界面、非浸漬面とも腐食生成物、板厚の減少は各試験片でほとんど認められなかった。開発材は従来材と同等の耐食性を有しており、耐食性に対してキャビテーションの影響は認められない。

以上の(1)～(5)の結果をもとに、本燃料タンクの成形の基本設定を、元板厚2.5mm、完成品平均板厚1.25mm、狙い変形量を200%の中成形量領域に設定した。さらに製造条件を制御し、製品各部の要求板厚およびキャビテーション量を満すようにした。

5. A B F 法の特徴

5.1. A B F 法の製造工程

今回の燃料タンク上板に適用したA B F法は、超塑性成形法として高温ブロー法を採用し、簡易な設備での製造を可能としている。また、プリベンド工程を設けて変形量を抑えている。Fig. 14にA B F法の工程の概略を示す。以下に主要工程の細部を補足する。

(1) プリベンド工程

燃料タンク上板の形状は袋状になっており、平板からの成形では部分的に変形限界を越える。この問題を解決するためにブロー成形前に平板をU字形状に曲げる工程を設定した。曲げR部はブロー成形時の加熱により結晶粒の粗大化を起こすため、曲げR部が粗大粒発生加工度

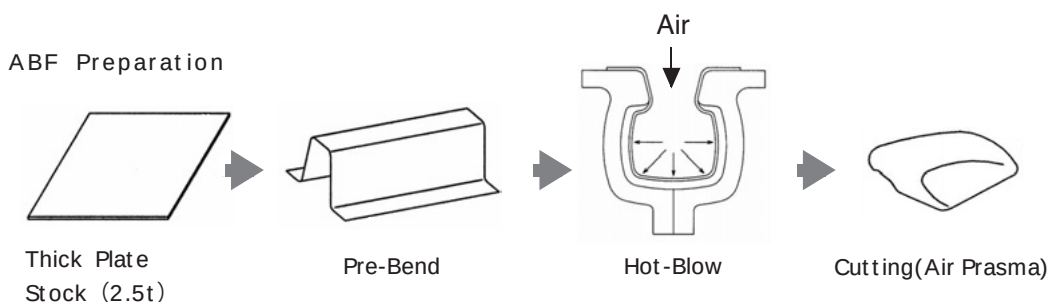


Fig. 14 ABF Process

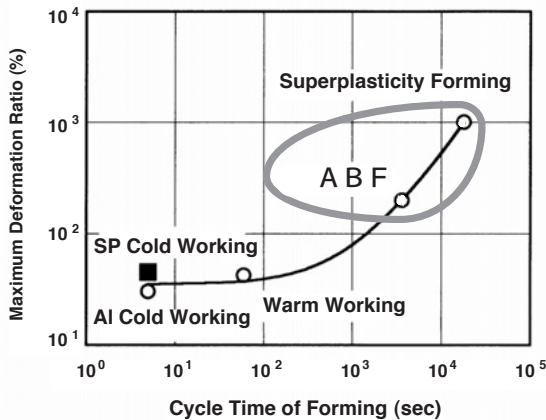


Fig. 15 Comparison of Production Cycle Time and Deformation Ratio

を避けるように元板の圧延率を大きくした。元板は冷間圧延上がりのままでは曲げの変形抵抗が大きいことから、焼鈍を加えた H24 材を使用した。

(2) 高温ブロー成形工程

曲げ加工された板材は高温に加熱された金型にセットされ、上型で外縁部がシールされる。その後、1 MPa 未満の空気圧で成形を行う。ABF 法に用いる金型は、上型と左右に分割可能な下型で構成され油圧クランプにより固定される。上下の型には凸状のビードを設けシール性を確保している。

(3) 検査工程

検査工程では成形終了後、板厚の測定とキャビテーション量の測定を行っている。キャビテーション量の測定は、従来断面の画像解析装置による破壊検査のみが提案されていたが、今回あらたに超音波の特性を利用した非破壊検査方法を確立することにより全品保証を容易にした。

5. 2. ABF 法と他製法との比較

アルミニウム板材の各種成形法を最大変形量と成形サイクルの関係から整理すると Fig. 15 のように表わせる。超塑性成形では最大変形量を大きくすると成形サイクルは急激に長くなる。ABF 法は超塑性成形の中では最大変形量は中程度であるが成形サイクルが短い。また、成形荷重も小さく、型締力を少なくすることが可能であり大規模な設備を必要としない。さらに金型はブロー成形の

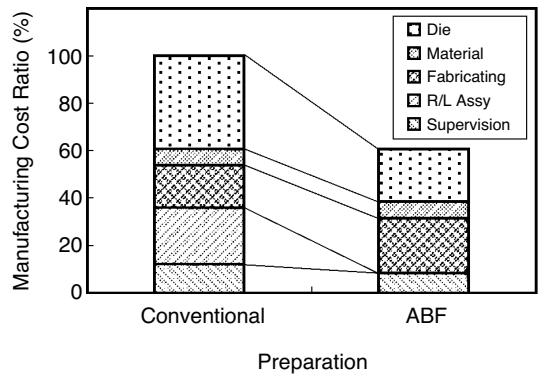


Fig. 16 Comparison of Manufacturing Cost of Upper Body

ため片側だけでよい。

Fig. 16 に ABF 法と冷間プレス成形のタンク上板の製造コストの比較を示す。ABF 法は金型が安いこと、溶接および仕上げ工程が不要であることから冷間プレス成形の約 2/3 とすることが可能となった。ABF 法は冷間プレス成形に対して成形サイクルが長いことから比較的少量生産に適しており年間数千程度の生産量であればプレス成形からの転換が可能である。

6. 結論

超塑性成形を燃料タンクに適用し、軽量化とコスト削減を以下の手法により達成した。

- 1) 燃料タンク用超塑性成形材料として、Al-4.5%Mg、平均結晶粒径 $10 \mu\text{m}$ の材料を開発した。
- 2) 燃料タンクの特性を得るためキャビテーション量は 5% 以下に抑制した。
- 3) 超塑性の成形法としては高ひずみ速度、中成形量領域のプリベンド後、高温ブローを行う方法を確立した。

今回、燃料タンクに超塑性成形を適用して構造部材としての可能性を明らかにしたが、Al-Li 合金や粉末法の高ひずみ速度超塑性材料の実用化により、さらに適用拡大が図られるものと思われる。

謝 辞

本材料の開発にあたり、スカイアルミ株式会社および新日本製鐵株式会社の方々から多大な御協力をいただいたことに感謝いたします。

参考文献

- 1) 本間、北田：機能材料入門（下巻）、アグネ
- 2) 超塑性研究会：超塑性と金属加工技術、日刊工業新聞社
- 3) 松木、針山、時沢：日本金属学会誌、45-9（1981）、p.935
- 4) 大塚、持田：“Al-Li-Cu-Mg-Zr合金の超塑性変形に伴う空洞生成”、軽金属学会、研究部会報告書、No.21（1989）
- 5) 岩崎他：“微細粒超塑性7475アルミニウム合金の空洞問題に及ぼす予備加熱の影響”、軽金属、vol.39、No.11（1989）

■著 者■



中 川 昌 彦



小屋 栄 太 郎



望 月 信 介



中 本 修 平



木 村 静 雄



小 杉 雅 紀