

(論文)

# 数値解析技術応用によるアルミ板材、管材の曲げ加工プロセスの評価

## Aluminum Hemming and Tube Bending Process Investigations Using Numerical Simulation



小西晴之\*(工博)  
Dr. Haruyuki Konishi



吉田正敏\*  
Masatoshi Yoshida



野田研二\*\*  
Kenji Noda



高木康夫\*\*  
Yasuo Takaki

Two types of bending processes, typically used in producing automotive aluminum parts, were investigated using numerical analysis. The hemming process for 6000 series alloy sheet was studied by using a simplified bending test and FEM analysis. The effects of forming conditions and aging conditions on bending formability and dimensional accuracy were studied, and optimized down flanging conditions were proposed. In the second half of the study, numerical analysis results for a circular tube draw-bending process is presented. Non-dimensional bending limit diagrams for aluminum tubes that are widely applicable to frame structure design are also presented.

まえがき = 自動車軽量化の有効な手段として、アルミ板や型材の利用が進められている。しかしアルミ材と鋼板では特性が大きく異なるため、従来の鋼板の成形加工方法そのままではうまくアルミ材に対処できない場合も多い。

成形加工に関する課題を解決する上で、数値解析技術の応用が有効である。特にアルミ板のプレス加工などでは成形シミュレーションが広く用いられ、効果をあげている。しかし板材のヘム加工や管材の曲げ加工などでは未だ検討例は少なく、またその加工プロセスにも不明な点が多い。

本研究では、数値解析技術の応用により、これらの曲げ加工プロセスの要因分析を行った。ヘム加工については、素材の時効状態や加工条件の違いが割れや寸法精度不良に及ぼす原因について明らかにした。管材の曲げについては、押出型材などの丸パイプのドロベンドングを取上げ、加工限界を設計線図として整理した。

### 1. 自動車パネル材のヘム加工性と加工条件の検討

ヘム加工は、フードなどの自動車部品において、アウトパネルとインナパネルを接合するために行われる曲げ加工である(図1)。外板部品に適用が進んでいる6000系パネル材は高強度な反面、鋼板などに比較して曲げ加工性に劣るため、ヘム加工時に配慮が必要である。しかしながら、ヘム加工のプロセスには不明な点が多く、明確な対応の指針が立てにくかった。以下では素材の時効状態や加工条件の違いが割れや寸法精度不良に及ぼす影響について検討した<sup>1)</sup>。

#### 1.1 ヘム加工試験結果

表1に特性を示す6000系パネル材を供試材とした。

材料Aは通常用いられる6000系材で、材料Bはこれを100 × 10hの条件で促進時効させたものである(室温時効の限界値相当)。またヘム加工試験は短冊状の試験片を用い、図1に示す3工程で行った。この際板の圧延方向は曲げの子午線方向と一致させた。なお通常のヘム加工はプレス成形後に行われるため、その影響を模擬して、素材には試験前に5%の予ひずみを与えた。加工条件としてインナ板厚と90度曲げ半径 $R_d$ を変化させた。

写真1に代表的な試験サンプルの断面写真を示す。同写真(c)の材料Bの試験では、曲げ部先端に割れを生じた。一方同じ加工条件でも、(a)の材料Aではごく軽微な割れにとどまり、大きな差が認められた。また $R_d$ の違いによっても結果に差が見られ、 $R_d$ を1mmとした(d)では、割れは(c)より軽微であった。図2には、目視

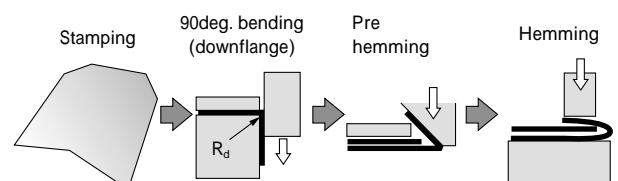


図1 典型的なヘム加工工程  
Fig. 1 Typical hemming process

表1 評価に用いたアルミの材料特性  
Table 1 Mechanical properties of tested material

Materials (Al-1.0%Si-0.6%Mg)	Thickness (mm)	Test direction	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_B$ (MPa)	El. (%)
6000-A (T4)	1.0	L	145	264	29.0
		LT	140	252	30.1
L		160	273	29.2	
LT		155	259	30.4	

\*アルミ・銅カンパニー・技術部 \*\*アルミ・銅カンパニー・真岡製造所・アルミ板研究部

で5段階評価した曲げ試験結果を示す。両材料とも、インナ板厚が小さくなると割れが生じやすくなった。また極端に時効が進んだ材料Bでは、Aより曲げ加工性が劣った。加工条件の影響については、インナ板厚が同じでも  $R_d$  が大きいケースでは、小さいケースより割れの程度が軽減された。

### 1.2 ヘム加工時の変形解析結果

上記の工程を模擬した加工解析を行い、各ケースでの変形状態について検討した。なお解析には有限要素解析ソフト ABAQUS を用い、曲げ変形を平面ひずみ下の変形と仮定して評価した。材料特性には、各材料の5%予変形後の値を用いた。

図3に写真1(c)(d)と対応する条件での、変形図及び子午線方向ひずみ分布を示す。曲げ部の断面形状は実験結果と良く一致した。また実験で割れ発生部となる頂点部分には、ひずみ集中が見られる。図4に、各条件での計算上の最大発生ひずみ量とインナ板厚の関係を示す。発生ひずみの大きさは  $R_d$  によって大きく異なり、実験と同様  $R_d = 1\text{mm}$  では  $R_d = 0.5\text{mm}$  の場合よりひずみは

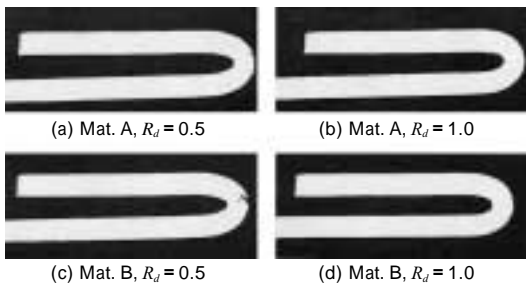


写真1 ヘム加工試験結果(インナ0.8t, 圧延平行方向)  
Photo 1 Hemming test results

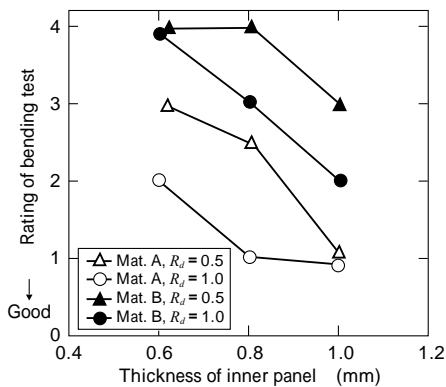


図2 6000系材料のヘム加工試験結果(圧延平行方向, 評点0: 良好, 1: 微小な肌荒れ, 2: 肌荒れ, 3: 微小割れ, 4: 割れ)  
Fig. 2 Hemming test results of 6000-series alloys

小さくなった。材料A, B間の発生ひずみの差は、比較的小さいものと予測される。したがって、先の図2で見られた両材料の曲げ加工性の差は、発生ひずみ量の違いよりも、むしろ材料の局所的な変形能の違いによるものと推測される。

図5には、代表的なケースにおける曲げ外側表面での子午線方向ひずみ分布を示す。90度曲げでの高ひずみ部に後工程でのひずみ加わり、曲げ部先端にひずみが集中する。  $R_d$  が小さいケースに比べ  $R_d$  が大きいケースでは、ひずみ分布がなだらかになることがわかった。このようにインナ板厚が一定であっても、工程面での工夫によって曲げ加工部の変形を変化させ、割れを防止することができる。

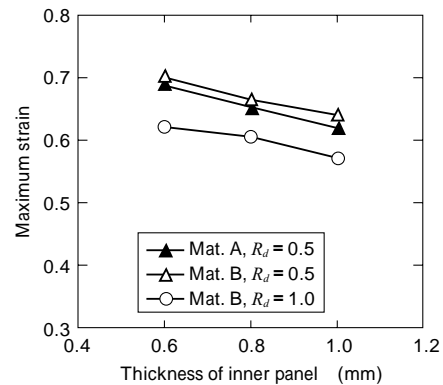


図4 ヘム加工解析結果, 素材表面の最大ひずみとインナ板厚の関係  
Fig. 4 Relationship between maximum longitudinal strain and thickness of inner panel

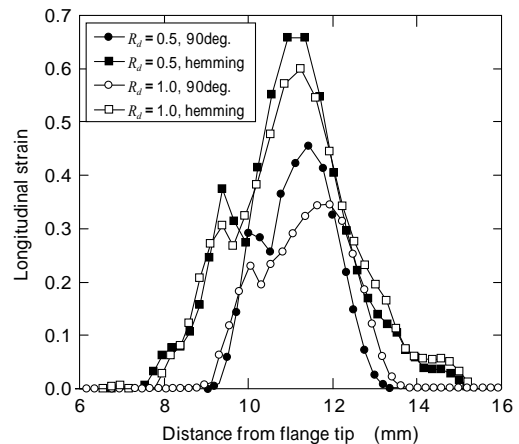
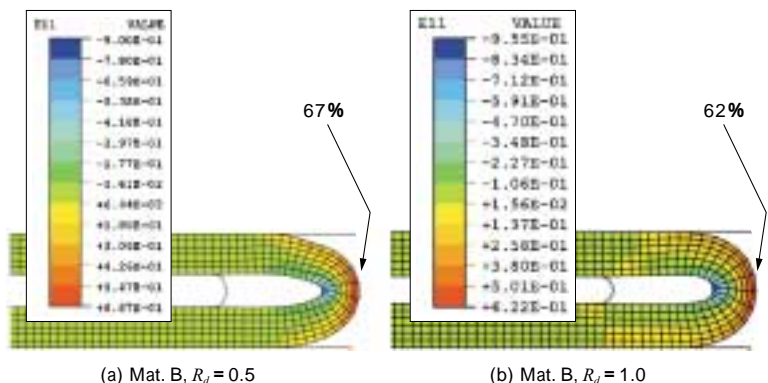


図5 ヘム加工解析結果, 素材表面のひずみ分布(材料B)  
Fig. 5 Strain distribution on outer surface of hemming specimens obtained by FEM analysis (Mat. B)

図3 ヘム解析結果, 子午線方向ひずみ分布(材料B, 圧延平行方向, インナ0.8t)  
Fig. 3 Longitudinal strain distribution obtained by FEM analysis (Mat. B, Rolling direction, Inner thickness = 0.8)



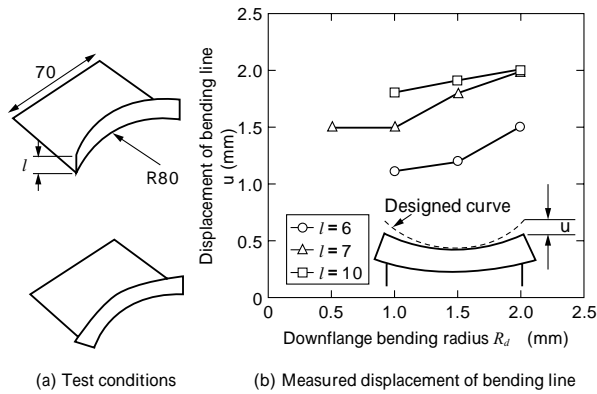


図6 伸びフランジ部のヘム加工実験結果，曲げ線のずれ量  
Fig. 6 Displacement of bending line obtained by hemming test of stretch flanging part

### 1.3 ヘム加工部の寸法精度不良に関する検討

ヘム加工部分の曲げ線が凹凸形状をもつ場合，上記の割れの問題に加えて，曲げ線が当初のねらい位置からずれる寸法精度不良が生じる。ここでは円弧状の曲げ線でのヘム加工試験を行い，寸法精度不良の要因について調査した。

図6(a)に示すような伸びフランジ形状のヘム加工が可能な曲げ金型を用いて，前節と同様の3工程からなるヘム加工試験を行なった。供試材として表1の材料Aを用い， $R_d$ とフランジ長さ $l$ を様々に変化させ，曲げ線のずれ量 $u$ への影響を調べた。ここでは予ひずみは付与せず，ヘム加工時にはインナを挟まずに試験した。

試験結果を図6(b)に示す。試験片端部近くで曲げ線がずれ，最終的な輪郭線は直線に近づいた。ずれ量 $u$ は $l$ が短いほど，また90度曲げ半径 $R_d$ が小さいほど小さくなった。前節で述べたように $R_d$ を大きく選ぶことは，割れの抑制に対しては有利となるが，その反面寸法精度に対しては悪影響を及ぼすことがわかった。

上記の曲げ線ずれの生じる原因は，次のように推定される。すなわち曲げ線ずれが無く，フランジ各部を周方向に広げるようにヘム加工すると，伸びフランジ変形に多大な塑性仕事量を要する。これに対し，フランジが直線に近づくよう曲げ線がずれると，新たな曲げ線を形成するための塑性仕事量は増加するものの伸びフランジ変形は緩和されるため，トータルの塑性仕事量は少なくて済む。90度曲げ工程と異なり，135度曲げ，180度曲げ工程では曲げ線位置がダイスで固定されないため，このような曲げ線ずれが生じたものと考えられる。

### 1.4 ヘム加工に関する検討結果まとめ

- ・インナ厚を一定としたフラットヘム加工においても，工程の選び方によって結果は大きく異なり，工程の工夫により割れを回避できる可能性がある。
- ・時効による曲げ加工性の低下は，発生ひずみ量の変化よりも，むしろ材料の局部変形能の低下によると考えられる。
- ・90度曲げ半径 $R_d$ を大きく選ぶことは，割れ防止には有効な反面，曲げ線の寸法精度には不利に働き，割れと寸法精度は相反する。円弧ヘム部でのこれらの両立には，フランジ長さ低減が有効と考えられる。

## 2. アルミ円管の曲げ加工性に関する検討

アルミ押出材などの中空パイプを活用した自動車用のサブフレームが実用化されている。この部品の製作では，円管状の素材に曲げ加工やつづし加工，ハイドロフォームなどが施され，曲げ加工時の不具合が問題になることが多い。この製品は比較的厚肉の円管であるため，加工時のしわは生じにくく，主として破断が問題となる。ただし，こうした曲げの加工限界の理論化は十分なされていない。ここでは円管のドロワーベンドングを取上げ，加工プロセスの解析<sup>2)</sup>により曲げ加工限界の設計線図化を試みた。

### 2.1 解析条件

管材の曲げ加工限界は曲げ外側部位のひずみと素材破断伸びの大小関係で定まることから，種々の曲げ半径 $R_i$ ，曲げ角度における曲げ外側の最大主ひずみを解析で求めた。自動車用サブフレームに用いられる円管の形状は，外径 $D$ が80~100mm，肉厚 $t$ が3.5~4.5mm程度である。そこで，90mm円管(肉厚4.0mm)を対象に調査した。供試材には5182-O材を用いた。素材の機械的特性を表2に示す。

ここでは曲げ加工機として図7に示すドロワーベンダを考え，球頭の首振式心金を用いる場合を想定した。解析ソフトにはPAM-STAMPを用い，管材をシェル要素で，金型を剛体近似して解析した。計算条件を表3に示す。

### 2.2 解析結果

#### 2.2.1 曲げ角度の影響

$R_i/D = 1.0$ 条件での曲げ変形形態及び最大主ひずみ分

表2 供試材の材料特性  
Table 2 Mechanical properties of tested aluminum tube

Materials	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_b$ (MPa)	El. (%)	r value		
				0	45	90
5182-O	126	274	27	0.745	0.705	0.678
(MPa) = 513.54 <sup>0.2826</sup>						

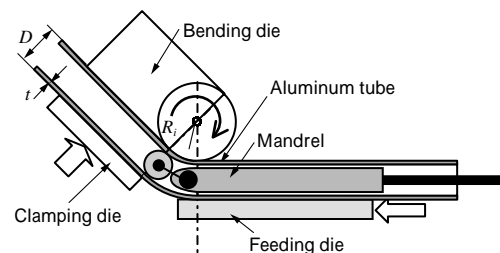


図7 円管90度曲げのFEM解析モデル ( $D=90\text{mm}$ ,  $t=4\text{mm}$ )  
Fig. 7 Schematic illustration of draw-bending process

表3 ドロワーベンドング工程の解析条件  
Table 3 Conditions of draw-bending analysis

Tube shape	Diameter / $D$	90.0mm
	Thickness / $t$	4.0mm
	Bending radius / $R$	63, 90, 135, 180, 270mm
	Bending angle / $\theta$	15 ~ 90deg.
Tool conditions	Clearance / $CL$	0.1mm
	Friction coefficient / $\mu$	0.14

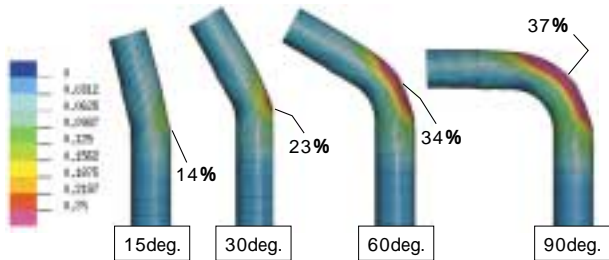


図8 管外側最大主ひずみ予測結果  $R_i/D = 1.0$  ( $R_i = 90\text{mm}$ )  
Fig. 8 Predicted strain distribution of tube bending

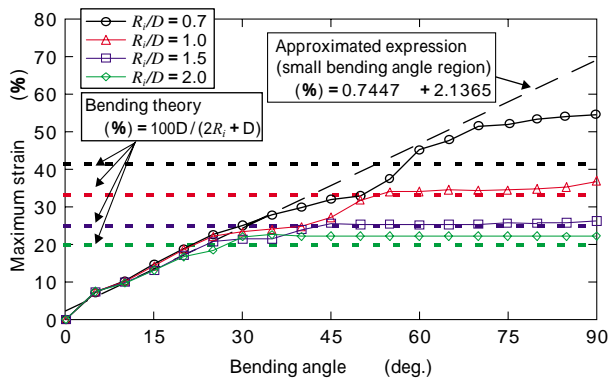


図9 曲げ角度と最大主ひずみ量(最大値)の関係  
Fig. 9 Relationship between maximum strain and bending angle

布を図8に示す。球頭の首振式心金を用いたため、管内側のしわは十分に抑制されている。一方管外側に生じる最大主ひずみは、曲げ角度が増えるにしたがって増加している。この結果は、最大主ひずみが  $R_i/D$  のみで決まるとする純曲げ理論と異なっており、その原因は直辺部と曲げ加工部の境界に生じるせん断変形の影響と考えられる。

曲げ角度と管外側最大主ひずみの関係を図9に示す。各曲げ半径の場合とも、加工初期には曲げ角度に比例してひずみが増加し、その後一定値に収束した。図中の破線は、純曲げ理論の解である。不均一変形が生じた  $R_i/D = 0.7$  の場合を除くと、曲げ角度の大きい領域では、純曲げ理論解とFEM解析結果はほぼ一致した。逆に曲げ角度の小さい領域では、最大主ひずみと曲げ角度の関係は、曲げ半径によらずほぼ一定の比例関係となった。

### 2.2.2 加工限界線図の作成

上記のように、最大主ひずみと曲げ角度との間には、加工初期には曲げ半径  $R_i/D$  によらずほぼ一定の比例関係が認められ、その後  $R_i/D$  によって決まる一定のひずみ

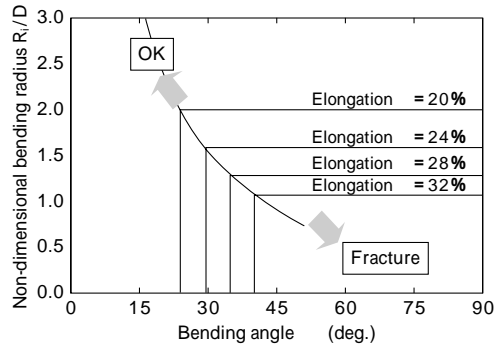


図10 曲げ角度、曲げ半径の条件で表した曲げ加工可能範囲  
(近似式による結果: O, H112, T1, T4 調質材対象)  
Fig.10 Bending limit diagrams of aluminum circular tube

に収束した。以上の結果は同一素材での結果であり、素材の加工硬化特性や断面形状が異なると、厳密には異なった関係になると推定される。しかし、サブフレーム用素材に同様な断面形状の素材が多く使われることを考慮すると、近似的にはこの関係が広く成立すると考えられる。

上記の関係を利用して、一般化した曲げの加工限界線図の作成を試みた。最大主ひずみ量が素材破断伸びを越えた場合に破断すると仮定すると、図10のような加工限界線図が得られる。曲げ半径が非常に厳しい条件であっても、曲げ角度が小さければ加工可能である。本線図は、加工硬化特性の近いO, H112, T1, T4調質材であればほぼ共用でき、広くサブフレームの設計に適用可能と考えられる。

### 2.3 円管の曲げ加工性の検討結果まとめ

サブフレーム用の素材として用いられる円管のドロウベンディング工程を解析で検討し、曲げ半径、曲げ角度と発生するひずみ量との関係を求めた。得られた結果から、広く適用可能な無次元化した加工限界線図を提案した。

むすび=アルミの板、形材における成形加工のうち、比較的検討例の少ない、(1)ヘム加工の問題、(2)円管の曲げ加工の問題を取上げ、数値解析技術の応用により加工条件に有益な知見及び線図を得た。これらを活用し、自動車軽量化へ貢献していきたい。

### 参考文献

- 1) 野田研二ほか: 第99回軽金属学会秋期講演会講演論文集(2000) p.217.
- 2) 吉田正敏ほか: 銅と銅合金, 41-1 (2002) p.54.