

# 通電加熱を用いた中空部品の ガスフォーミング

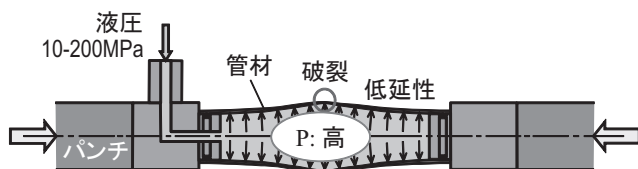
森 謙 一 郎

豊橋技術科学大学

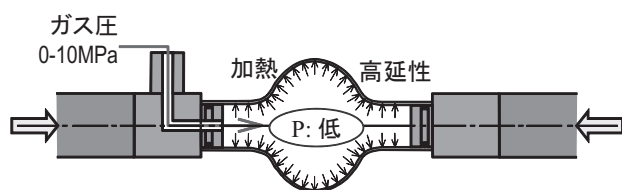
ガスフォーミングは、空気を封入した管材を通電加熱して軟化させ、金型によって中空部材を成形する方法である。管材内側に作用するガス圧によって、管材が金型に押しつけられて形状転写性が向上する。封入したガスを用いて成形中にガス圧を制御しないで、通電条件だけを制御する。アルミニウム合金を膨らませて金型によって成形するガスフォーミングを説明する。また、通電加熱された焼入れ鋼管の中央部をV形成形し、下死点で保持することによって焼入れし、高強度中空部材の成形を行う。

## 1. はじめに

中空部品は曲げ剛性が高いため、自動車の軽量化に対して適用が増加している。中空部品の成形法としてチューブハイドロフォーミングがよく用いられている。この成形法では、液圧を作用させて管材を膨らませ、金型に押しつけることによって所定の形状に成形している(図1(a))。管材を膨らませると肉厚は減少し、肉厚減少が大きいと管材は破裂し、延性が低いアルミニウム合金および高張力鋼管の成形は容易ではない。



(a) ハイドロフォーミング



(b) ガスフォーミング

図1 管材のハイドロフォーミングとガスフォーミング

熱間加工では、素管の延性が向上して成形が容易になる。チューブハイドロフォーミングにおいても延性を改善するために、管材を加熱することが考えられるが、油、水などの圧力媒体を高温にすることはできないため、200℃程度の加熱が限界であり熱間加工領域まで加熱することはできない。

圧力媒体を液体ではなく、気体にすると温度の制限がなくなるため、アルミニウム合金管のガスフォーミングが行われている(図1(b))<sup>1)</sup>。この成形法はハイドロフォーミングと似ており、内圧により管材を膨らませると同時に軸押しを加えて金型によって成形しているが、管材を加熱して軟化させ、ガス圧で膨らませている。管材を加熱しているため、ハイドロフォーミングよりもかなり低い圧力で拡管することができ、ガス圧を利用できる。

ガスフォーミングでは、管材は一般的に成形機の外側で加熱されるが、肉厚が小さいため温度低下が大きく、延性の低下や変形抵抗の増加によって成形が困難になる。温度低下を防止するため、金型に加熱装置を組んでいるが、金型構造が複雑になる。また、高周波誘導加熱によって管材が加熱されているが、誘導電流が流れないようにするために型をセラミックにする必要がある。筆者ら<sup>2)</sup>は、鋼板の

ホットスタンピングにおいて通電加熱を用いた熱間プレス成形法を開発しており、金型内で急速加熱を行うことによって成形開始までの温度低下および酸化スケールを抑制している。通電加熱はガスフォーミングにも用いることができる。

熱間ガスフォーミングでは、内圧は一般に成形中制御されているが、圧縮性ガスによる内圧と加熱温度の両方を制御するのは容易ではない。そこで、筆者ら<sup>3),4)</sup>は管材に予め密封した空気による圧力だけで拡管を行う通電加熱ガスフォーミングを開発した。空気を密封した管材を金型内で加熱すれば、管

材は軟化して密封圧力だけで拡管成形をすることができ、成形中は温度だけを制御して内圧制御を省略した。

本解説では、急速通電加熱を用いた中空部品のガスフォーミング法に関して説明する。延性の低いアルミニウム合金および鋼管に通電加熱して成形を行う。アルミニウム合金管では膨らませて金型に押しつけて成形を行う。一方鋼管では、加熱して金型によって断面をV形に成形し、下死点で保持することによって焼入れも行う。

## 2. アルミニウム合金管のガスフォーミング

通電加熱を用いたアルミニウム合金管のガスフォーミング装置を図2に示す。管材は外径22mm、肉厚1mm、長さ150mmのA6063アルミニウム合金管である。金型の材質はSS400、長さは50mm、内径は33mmであり、管材の初期直径に対する増加割合である拡管率が50%になるように金型の内径を設定した。電極は管材の外周の90%と接触し、管材を上下方向から平均面圧1.5MPaで挟んでおり、パンチとともに軸方向に移動できるようになっている。電極間距離は、軸押しなしでは100mm、軸押しありでは80mmに軸押し量を加えた長さとした。管材は銅電極によって金型内に固定されて、空気が充填されて密封圧力 $p_0$ が作用している。管材は加熱されて軟化すると張出して金型形状に成形される。

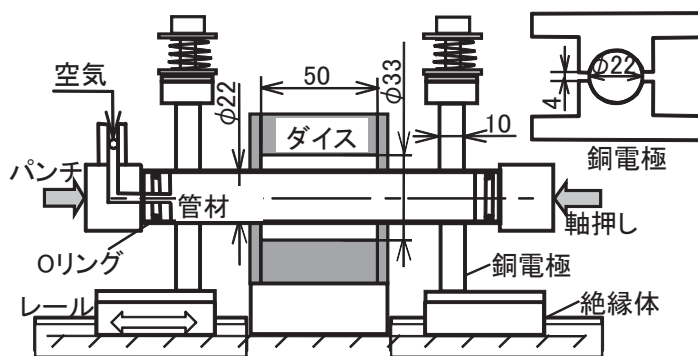


図2 通電加熱を用いたアルミニウム合金管のガスフォーミング装置

密封圧力 $p_0=0.8\text{MPa}$ 、軸押し速度 $v=20\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ における金型なしで張出された管材の変形挙動を図3に示す。サーモグラフィによって管材の温度を測定するため、管材表面にグラファイトを塗布している。空気を充填した管材を通電加熱すると、管材が

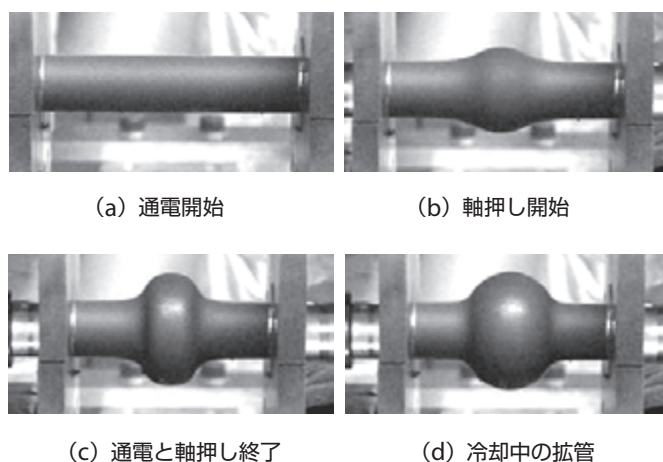


図3  $p_0=0.8\text{MPa}$ 、 $v=20\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ における金型なしで張出された管材の変形挙動

軟化するとともに空気圧も上昇して張出し始める。通電加熱を継続しながら軸押しを行い、所要のストロークに達すると軸押しと通電加熱を同時に終了させる。軸押しが終了しても、ひずみ速度が小さくなり高温時において変形抵抗が低下しているため、クリープ変形のように内圧だけでさらに拡管する。

ガスフォーミングでは、変形の開始直後に金型と接触すると、管材が金型に接触すると軸押しによる材料供給の抵抗となり金型内の管材の肉厚減少の防止が難しくなる。そこで、軸押しを始める時期を変形開始前、開始時、および開始後の条件で成形し、得られた管材の肉厚分布を図4に示す。変形開始後となる $t=3.0\text{s}$ では、軸押しなしに比べて肉厚減少があまり低減されていないが、変形開始前の $t=2.0\text{s}$ では中央部の肉厚減少は改善されている。管材が金型に接触する前に軸押しを行うことが金型内の肉厚減少を低減する効果がある。

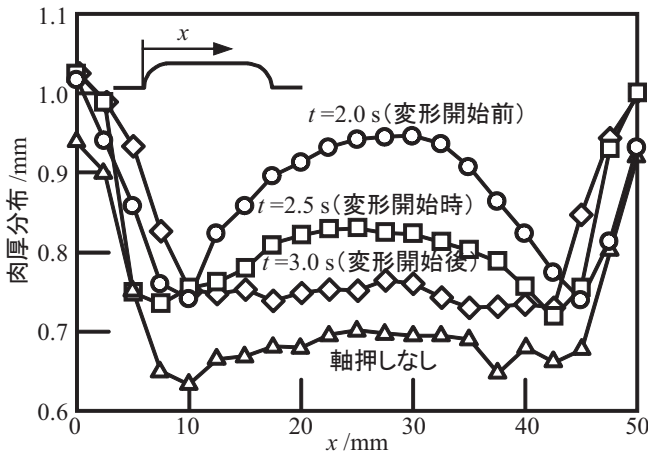


図4 軸押し時期を変化して成形された管材の肉厚分布

成形形状に及ぼす軸押し量と速度の影響を図5に示す。軸押し速度が大きい場合には、しわが発生し、小さい場合には折れ込みが発生している。軸押し速度  $v=20\text{ mm/s}$ 、軸押し量  $s=15\text{ mm}$  が良好な形状で最も大きな軸押し量になった。

金型との接触による管材の温度低下を防止するために、金型を熱伝導の低いSUS304に換え、管材が金型に接触する直前で電流密度を106から136  $\text{A/mm}^2$  に増加させて発熱量を大きくして温度低下を防止した。このようにすると、図6に示すように金型角部の材料充満が向上した。

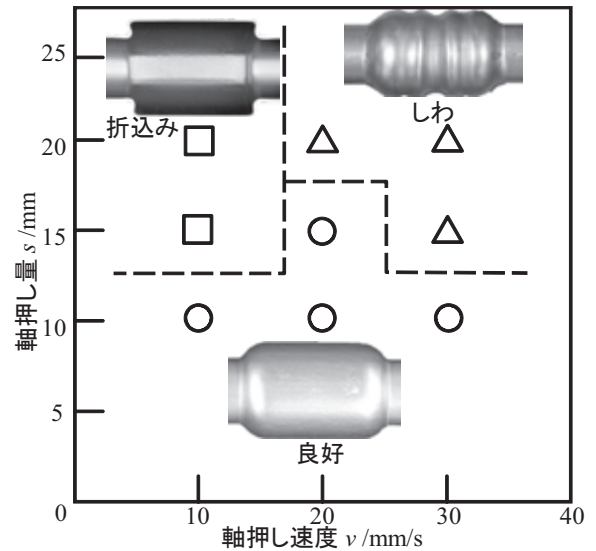


図5 成形形状に及ぼす軸押し量と速度の影響

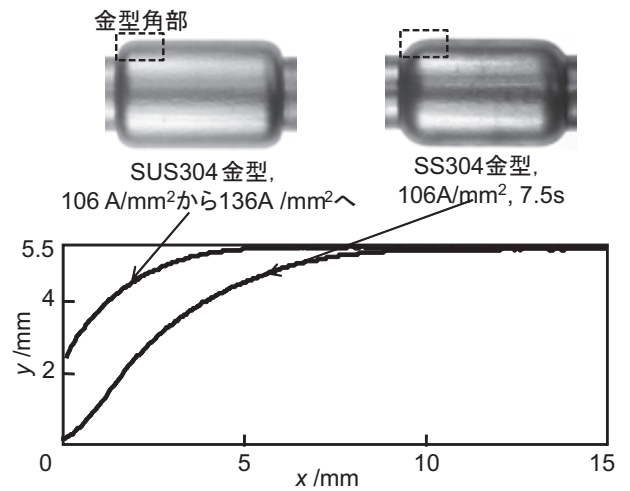


図6 金型接触における管材の温度低下による金型充満の向上

### 3. 高強度中空部材のV形ガスフォーミング

自動車の足回り部品である中空アクスルビームは、鋼管の中央部をV形に成形して軸方向に剛性を変化させている部品である。図7に示すように、V形成形において鋼管の座屈を防止するために、冷間液封成形が行われており、焼入れによって製品の強度が確保されている<sup>5)</sup>。最近鋼板のホットスタンピングが注目されているが、加熱によって成形性を向上するとともに下死点保持によって焼入れを行っている。これを鋼管に適用することによって中空アクスルビームの製造において成形性を向上できるだけでなく、焼入れ工程も省略できる。また、冷間液封成形では、圧縮

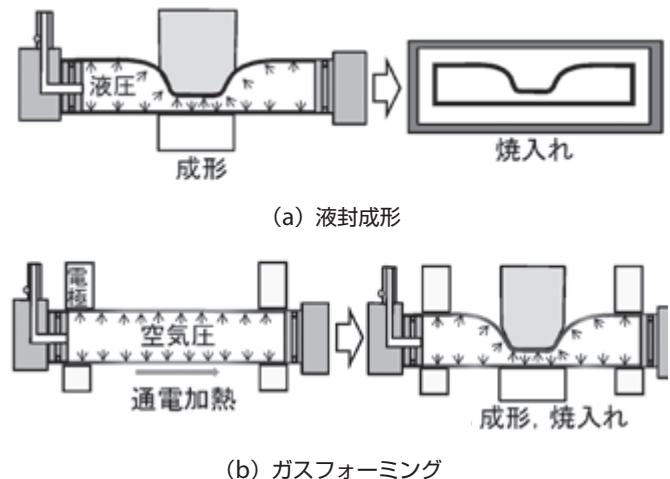


図7 中空アクスルビームの液封成形およびガスフォーミング

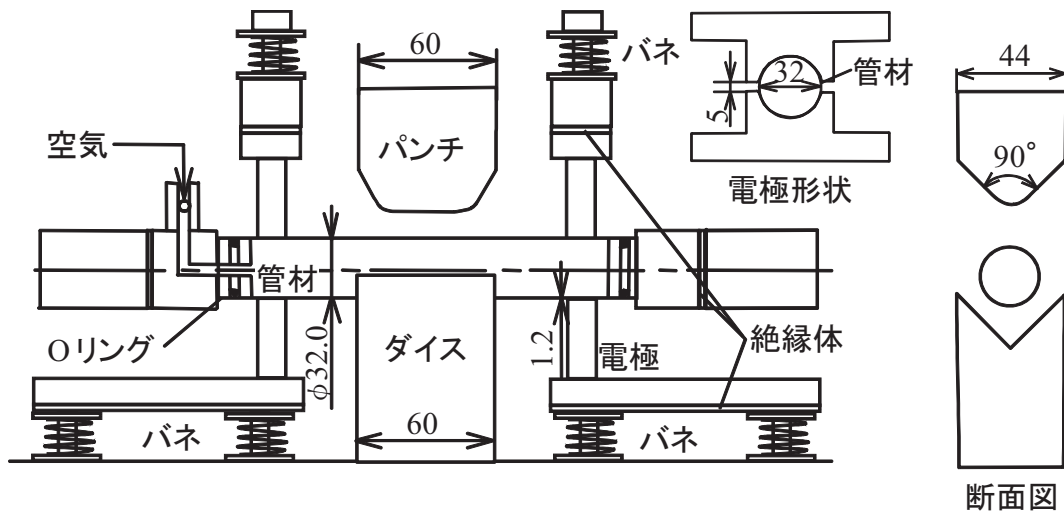


図8 焼入れ鋼管のV形ガスフォーミング装置

とともに圧力が急激に増加するため液体を外部に排出する必要があるが、本成形法では密閉空気を用いているため成形中の圧力上昇は高くなく空気を排出する必要がない。

通電加熱を用いたホットチューブフォーミング装置を図8に示す<sup>6)</sup>。空気を密閉した鋼管を電極で固定し通電加熱を行う。加熱終了と同時にパンチとダイスによって鋼管の中央部分をV形成形し、下死点で金型を保持してダイクエンチを行う。直径32mm、肉厚1.8mmの焼入れ用鋼管(C:0.19%、Si:0.18%、Mn:1.3%、B:0.004%)を実験に用いた。成形部を約950℃に加熱した。通電加熱では、直流を用いて管材断面の平均電流密度と加熱時間を調整した。電極での接触を安定させるために銅電極は2

MPaの平均圧力で管材に押しつけられた。パンチとダイスはSS400製であり、管材と接触する稜線の角半径を5mmとした。成形時のパンチ速度およびストロークはそれぞれ80mm/sおよび27mmであり、ダイクエンチのための下死点保持は60秒と長くして十分に管材を冷却した。密封圧力 $p_0$ を変化させて実験を行った。

V形成形されたパンチ側の管材を図9に示す。密封圧力 $p_0=0$ 、1.5MPaでは割れを生じることなく成形されており酸化スケールもほとんど発生していない。冷間では管材の延性が低いためパンチ角部で割れが発生しており、炉加熱では酸化スケールが非常に多く発生している。

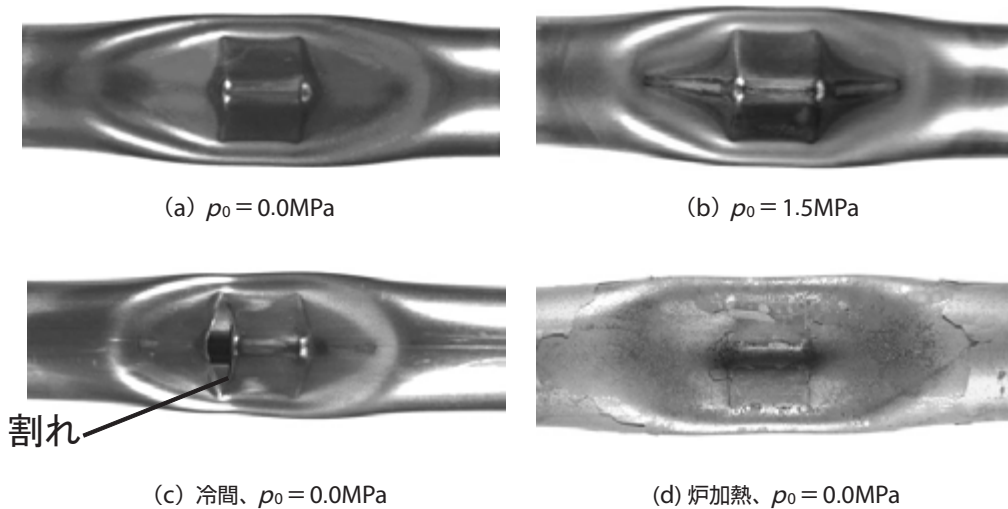


図9 V形成形されたパンチ側の管材



密閉圧力が成形形状に及ぼす影響を図10に示す。V形成形中央断面において、 $p_0=0\text{MPa}$ ではダイス側の底部の半径が大きく、ダイス接触面も平面になっていないが、 $p_0=1.5\text{MPa}$ では接触面は平面に成形されダイス側の底部の半径も小さく成形されており、形状転写性が向上している。軸方向断面も  $p_0=1.5\text{MPa}$ の方が転写精度が向上している。

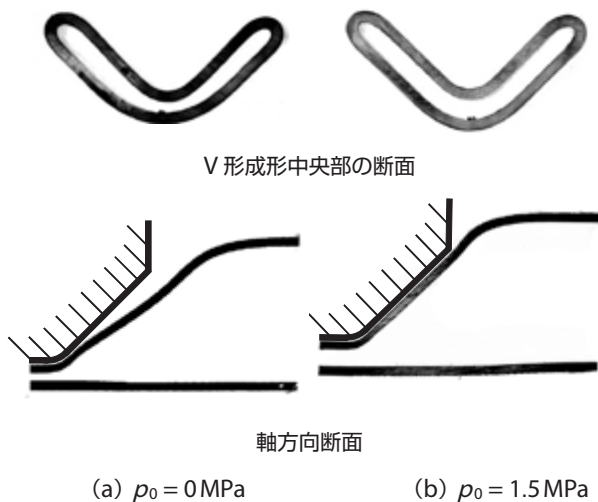


図10 密閉圧力が成形形状に及ぼす影響

成形後の管材の円周方向硬さ分布を図11に示す。板厚中央の硬さを測定した。圧力の上昇とともに管材と金型の接触が十分になり、金型接触面で硬さが向上している。特に、ダイス底角部での硬さの向上は顕著である。

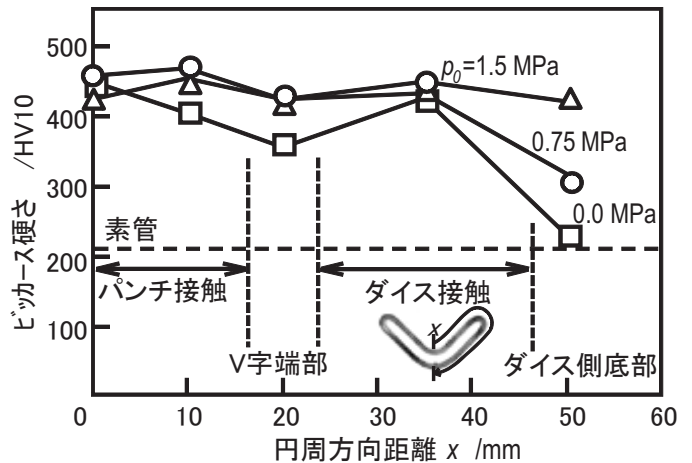


図11 成形後の管材の円周方向硬さ分布

## 4. おわりに

自動車の軽量化に中空部材が有効であり、中空部材の使用が増加している。アルミニウム合金および高張力鋼部材がますます望まれているが、成形が困難になっている。従来のプレス成形は常温で行うのが一般的であったが、成形性を向上させるために素管を加熱することが検討されると思われる。通電加熱を用いた中空部材のガスフォーミングは、成形性の限界を超えるものとして今後適用が広がることが期待される。

### 参考文献

- 1) 木山啓：塑性と加工，47-551 (2006) 1178-1181.
- 2) K. Mori, S. Maki, Y. Tanaka: CIRP Ann, 54-1 (2005), 209-212.
- 3) 前野智美, 森謙一郎, 藤本浩次：塑性と加工，50-580 (2009) 424-428.
- 4) 前野智美, 森謙一郎, 宇納千裕：塑性と加工，53-612 (2012) 54-58.
- 5) 山本出, 近藤正顕, 志満津了, 福士孝聡, 中村秀幸, 穴井功：素形材，50-12 (2009) 44-47
- 6) 前野智美, 足立一晃, 森謙一郎：平成23年度塑性加工春季講演会講演論文集 (2011) 173-174.