

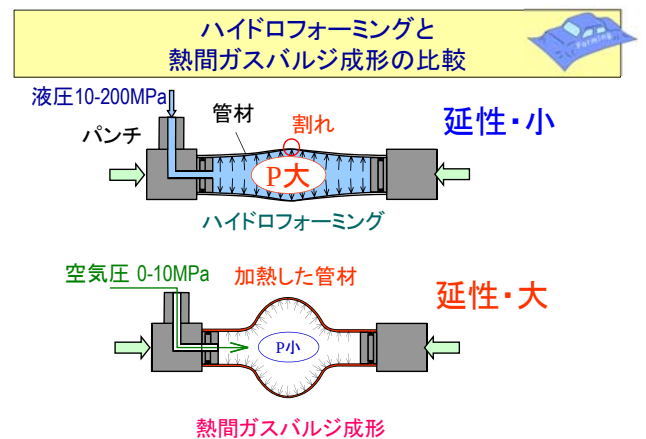
自動車を軽量化する熱間チューブフォーミング

豊橋技術科学大学 前野 智美

自動車を軽量化するためにアルミ中空部品が採用されるようになってきている。管材の成形にはハイドロフォーミングがよく用いられているが、延性が低いアルミニウム合金管は破裂しやすく大きな拡管は容易ではない。アルミニウム合金は高温で変形すると、延性が向上して成形が容易になる。圧力媒体を液体ではなく、気体にすることで温度の制限をなくしたアルミニウム合金管の熱間チューブガスフォーミングが行われている。この成形はチューブ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形状に成形している。管材を加熱しているため、チューブ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、延性も向上しているため大きな拡管ができる。

本講演では3つの管材成形について紹介をする。アルミニウム合金管のホットチューブガスフォーミングを中心に紹介し、加えてチューブハイドロフォーミングにおいて圧力履歴によって成形性を向上した事例や鋼管のホットチューブフォーミングによるV形成形について紹介する。

熱間ガスフォーミング成形



熱間ガスフォーミングとハイドロフォーミングの張出し性の比較



拡管率 20%

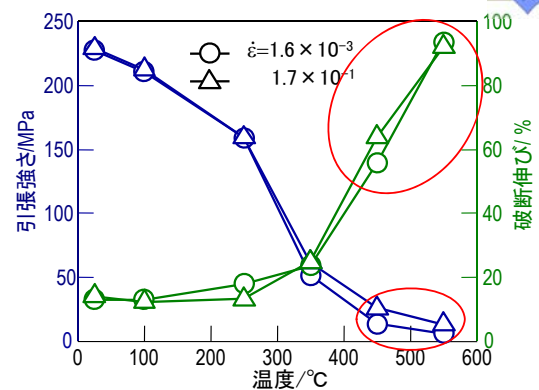
ハイドロフォーミング



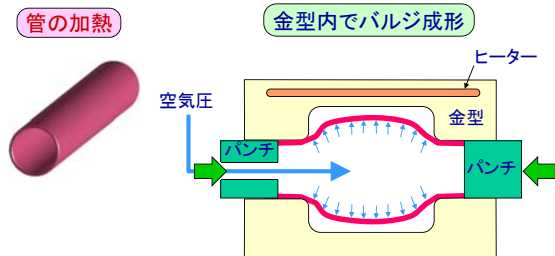
拡管率 132%

熱間ガスフォーミング

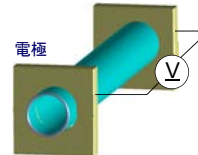
A6063高温引張試験結果



熱間ガスフォーミング成形

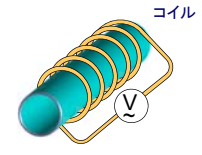


管の加熱方法



直接通電加熱

- 安価
- 加熱効率が非常に高い
- 電極への放熱がある
- 電極設計が簡単



高周波誘導加熱

- 高価
- 直接通電加熱より少し低い
- 電極への放熱がない
- コイル設計が難しい

熱間ガスフォーミング成形事例

国内における熱間ガスフォーミング成形事例

ホンダ 2004年10月
レジェンドに搭載

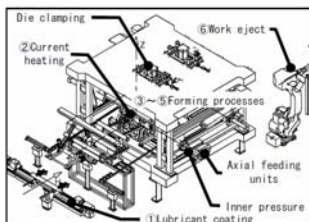


フロントサブフレーム



リヤサブフレーム

国内における熱間ガスフォーミング成形事例

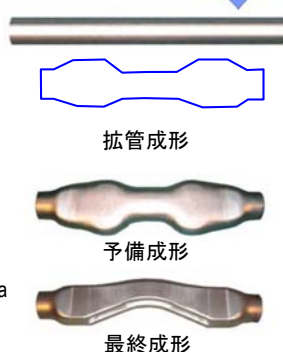


直接通電加熱

拡管成形 $\phi 95 \rightarrow \phi 160$ 3MPa

予備成形

最終成形



海外における熱間ガスフォーミング成形事例



VW トウアレグ



ポルシェ カイエン



エアサスペンション
ケース部品
アルミ合金
10MPa



サスペンション部品
アルミ合金

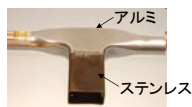
海外における熱間ガスフォーミング成形事例

Hot metal gas forming 1999~2003 アメリカ 誘導加熱
 Tube hot forming 2004~2007 伊・西・蘭 直接通電加熱
 Heat forming 2002~ 独 HEATform社 誘導加熱

HEATform



アルミ 2-6MPa
 サイクルタイム 22sec
 予備加熱15sec



アルミ 2-10MPa
 サイクルタイム 17sec
 予備加熱10sec

ステンレス

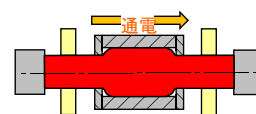


海外における熱間ガスフォーミング成形事例



金型無しでの成形による検討

密封圧力と通電加熱を用いた アルミニウム合金管の熱間ガスフォーミング成形



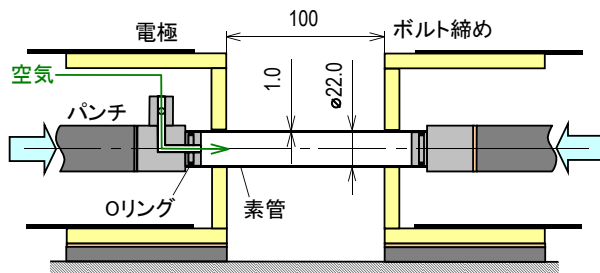
金型内通電加熱

密閉空気 ⇨ 圧力制御なし

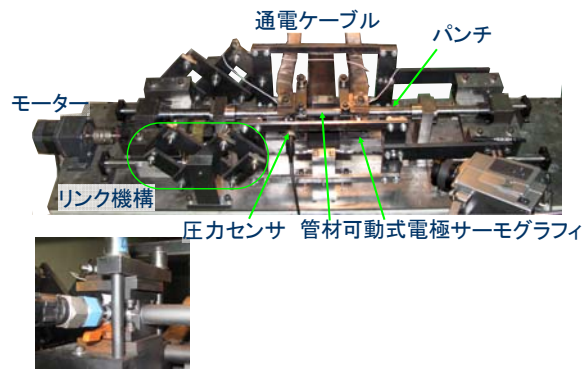
成形中
通電を継続 ⇨ 金型
加熱装置不要

成形装置内通電加熱熱間ガスフォーミング成形方法

初期内圧 $p_0 = 0.2 \sim 0.8 \text{ MPa}$
 通電容量 $I = 3.0 \sim 9.0 \text{ kA}$
 軸押し速度 $v = 0 \sim 40 \text{ mm/s}$

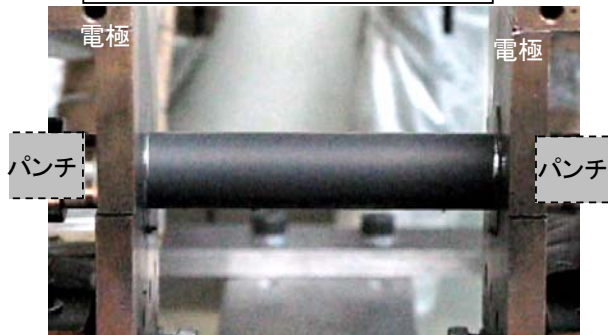


成形装置内通電加熱熱間ガスフォーミング 成形装置外観



通電加熱熱間ガスフォーミング におけるフリーバルジ変形挙動

軸押し速度 $v=20\text{mm/s}$, ストローク $s=24\text{mm}$

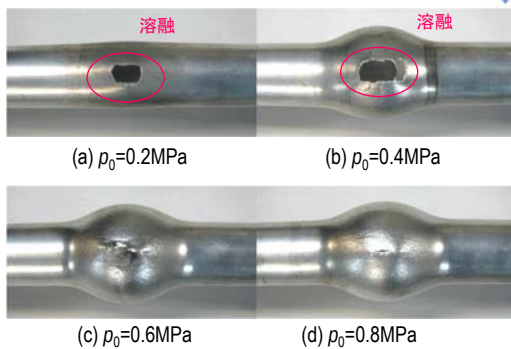


通電加熱熱間ガスフォーミング におけるフリーバルジ変形挙動

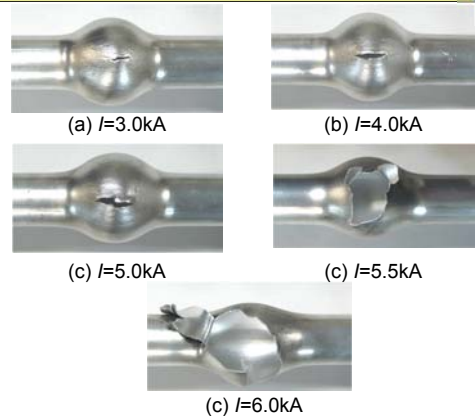


$J=76\text{ A/mm}^2$, $p_0=1.5\text{ MPa}$
 $v=30\text{mm/s}$, $s=30\text{mm}$

初期内圧が成形に及ぼす影響

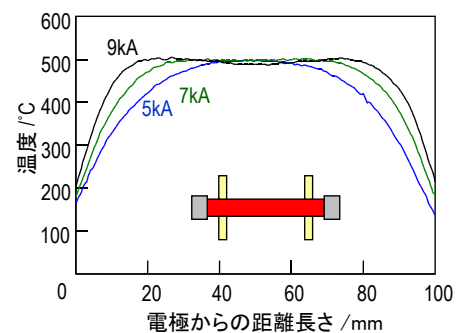


通電電流が成形に及ぼす影響

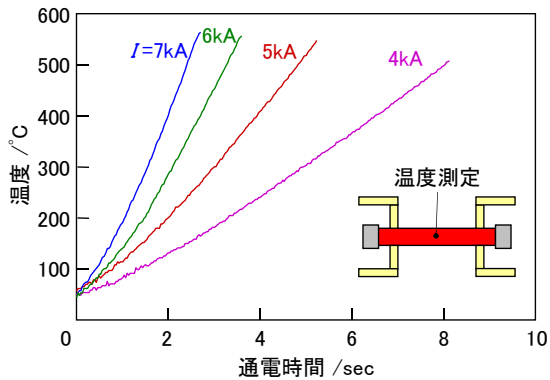


温度分布に及ぼす 通電加熱条件の影響

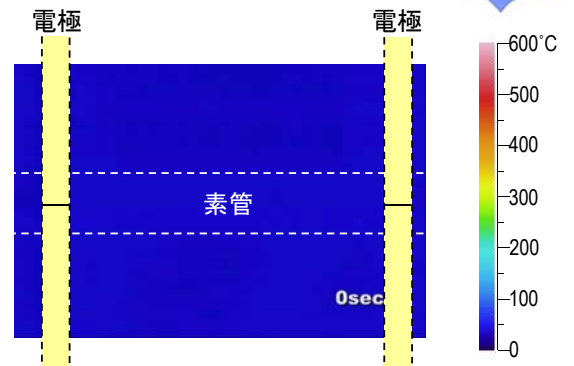
温度分布に及ぼす電流値の影響



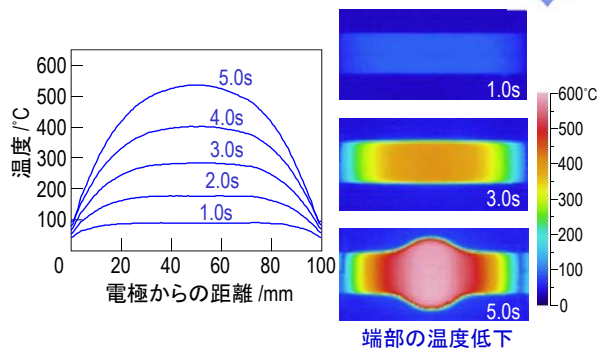
通電電流と加熱速度の関係



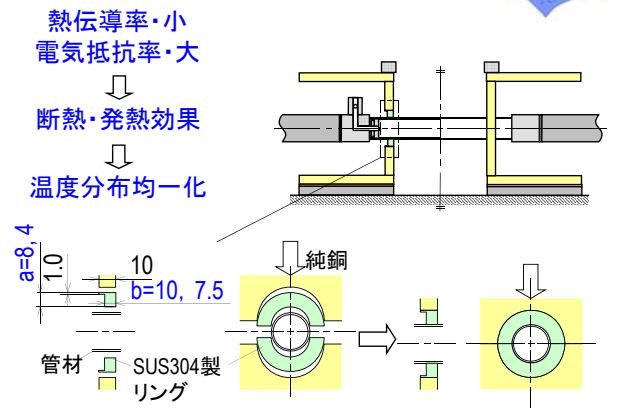
軸押し無しにおける通電加熱の様子 $I=5.0\text{kA}$



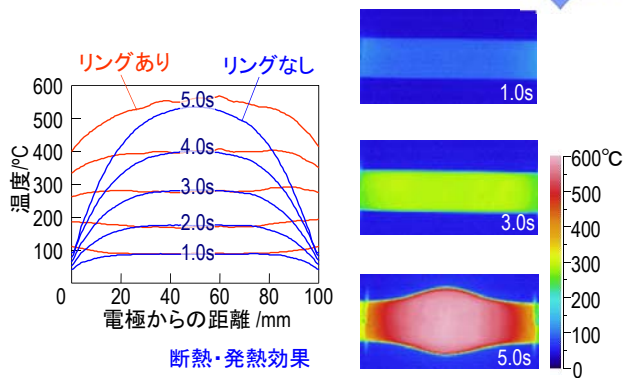
電極付近での温度低下 $I=5.0\text{kA}$



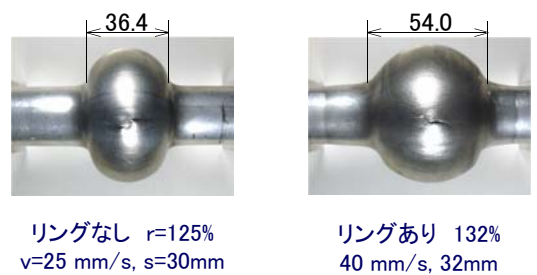
SUS304製リングの導入



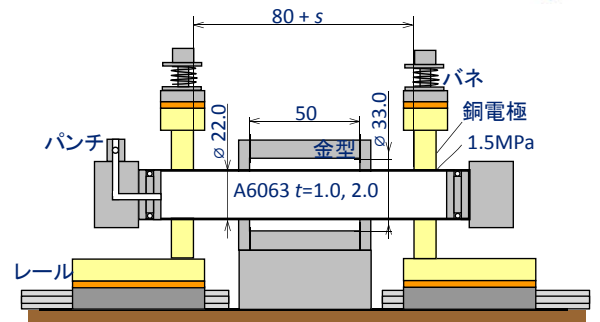
リングありにおける温度分布履歴



軸押しありの熱間ガスフォーミングの管材 $I=5.0\text{kA}$



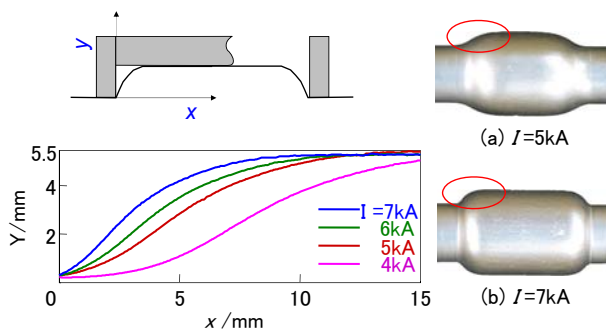
熱間ガス型フォーミング成形方法



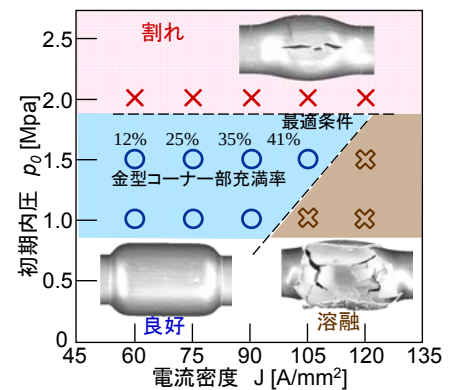
3

円筒金型を用いた成形による検討

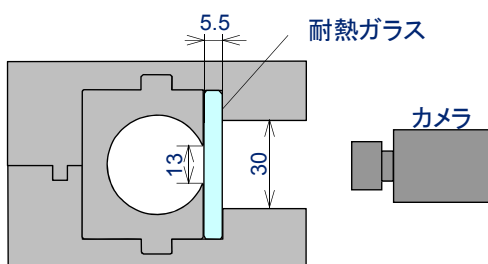
$p_0=1.5\text{MPa}$ における成形形状に及ぼす通電電流の影響



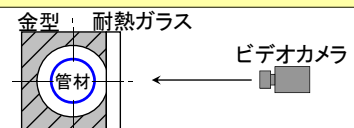
成形結果に及ぼす初期圧力 p_0 と電流密度 J の影響



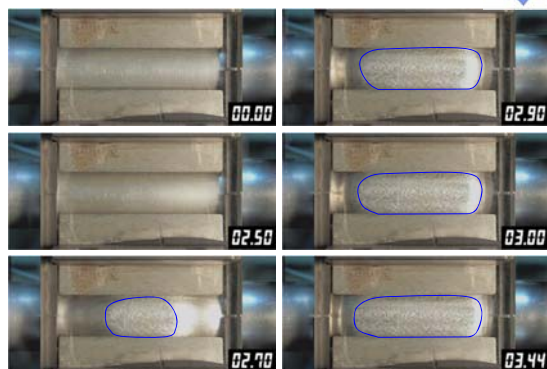
変形挙動測定用金型



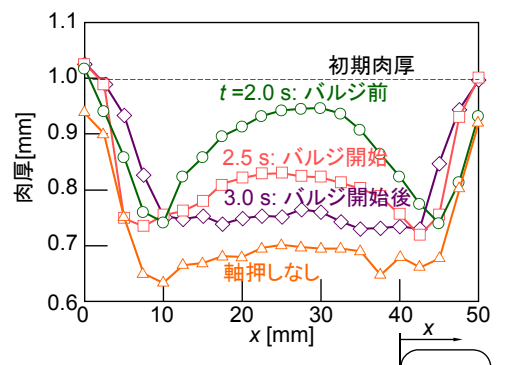
金型内の管材の変形挙動



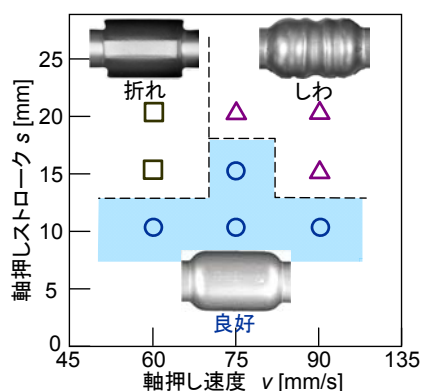
金型内の管材の変形挙動



肉厚ひずみに及ぼす軸押し開始タイミングの影響 $v=20\text{mm/s}$, $s=10\text{mm}$

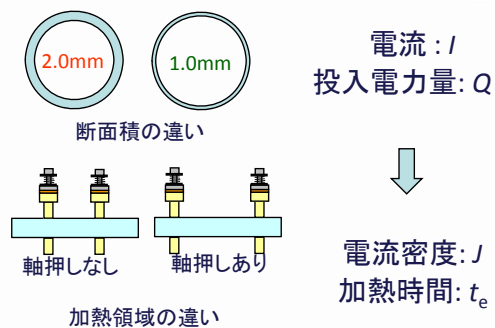


成形形状に及ぼす軸押し速度と 軸押し量の影響



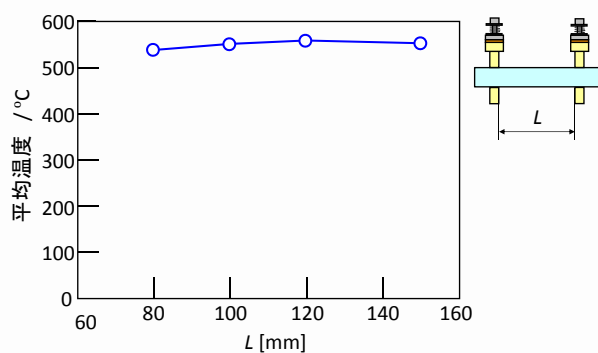
成形性に及ぼす管材の 初期肉厚の影響

電流密度と加熱時間による通電加熱

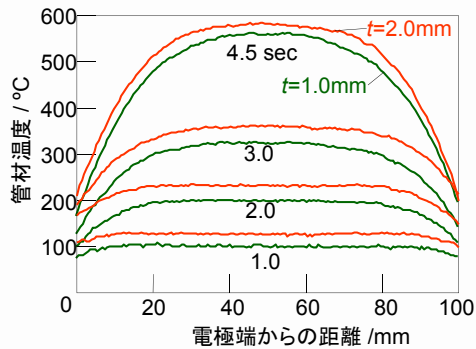


電極間距離と加熱温度の関係

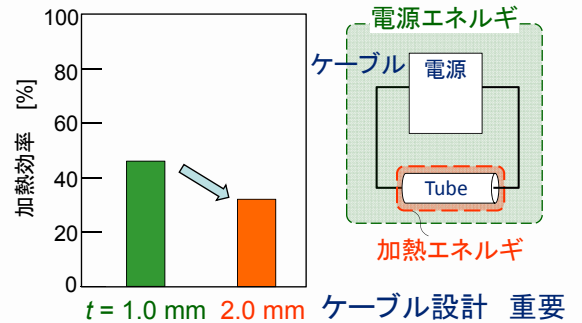
$t=1\text{mm}$, $J=76\text{ A/mm}^2$ and $t_e=4.5\text{ s}$



$t=1.0, 2.0\text{mm}$ における通電加熱中の軸方向温度分布

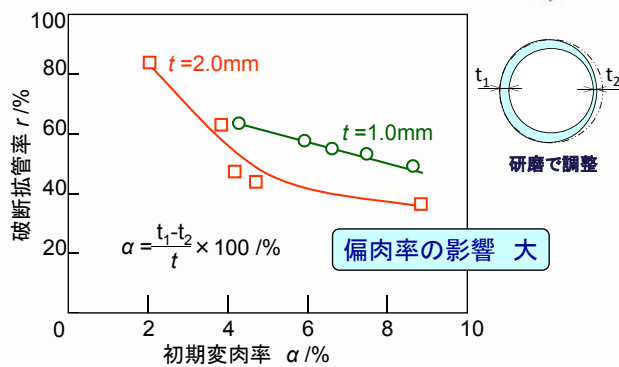


素管断面積増加による加熱効率の低下 ($t_e = 4.5\text{ s.}$)

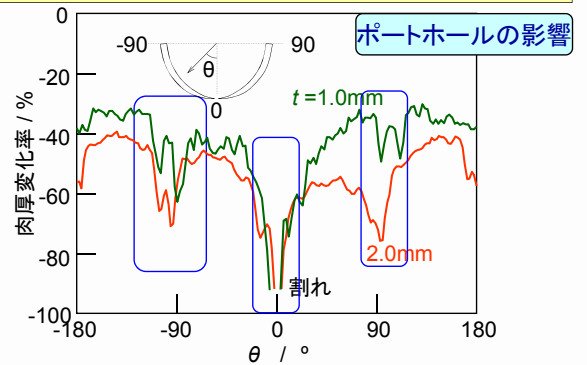


8

初期偏肉率が破断拡張率に及ぼす影響



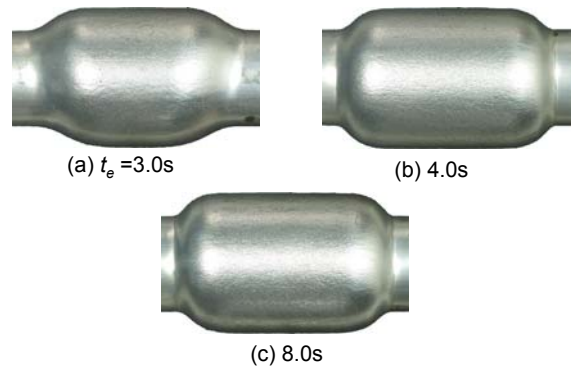
軸押しありにおけるフリーバルジ成形された管材の円周方向肉厚分布



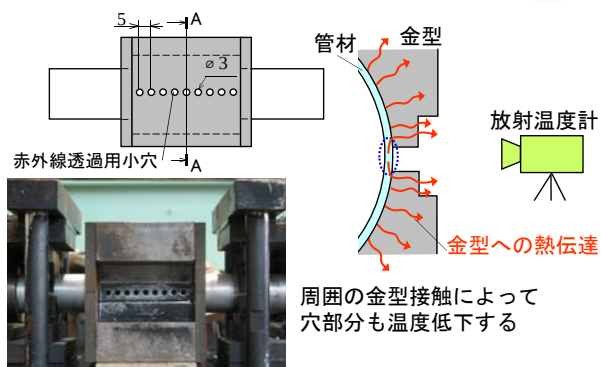
**温度低下防止による
充満率の向上**



成形形状に及ぼす通电時間の影響 ($J=106\text{A/mm}^2, p_0=1.5\text{MPa}$)



小穴による金型内の管材温度測定方法



金型内の管材の温度測定

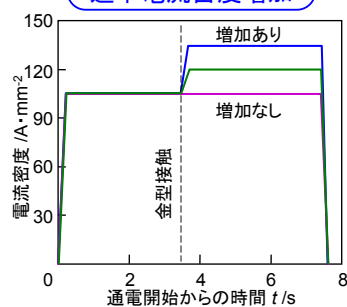


成形中の温度低下防止方法

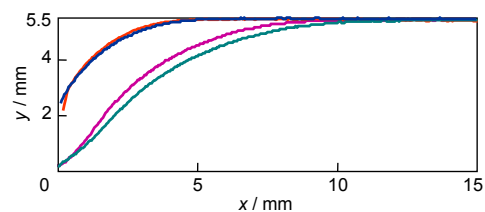
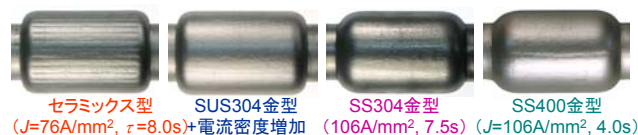
低熱伝導金型

型材質	熱伝導率 (W/mK)
SS400	51.6
SUS304	16.3
セラミックス (ホトパール)	1.7

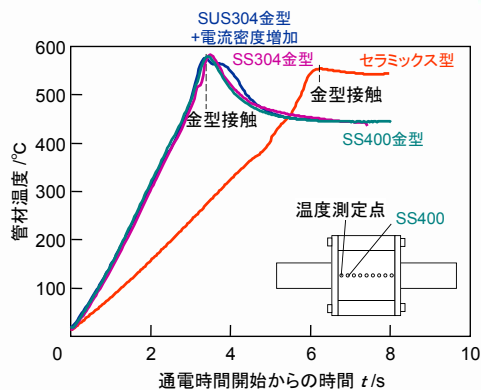
途中電流密度増加



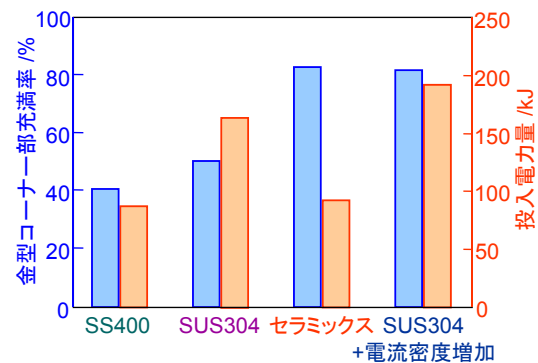
各温度低下防止方法によって得られた製品断面形状



各成形ごとの金型内の管材温度履歴



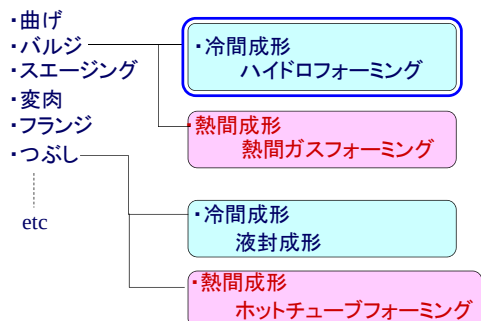
各温度低下防止方法による金型角部充満率と投入電力量



まとめ

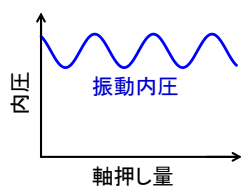
- ・熱間ガスフォーミング成形は冷間のハイドロフォーミングに比べ6倍以上の拡張率が得られた。
- ・軸押しを拡張前に行うことで、肉厚ひずみを減少できた。
- ・金型材質、及び通電方法を最適化することで管材が金型に接触したときの温度低下を防止して金型充填率を向上することができる。

管材の成形加工

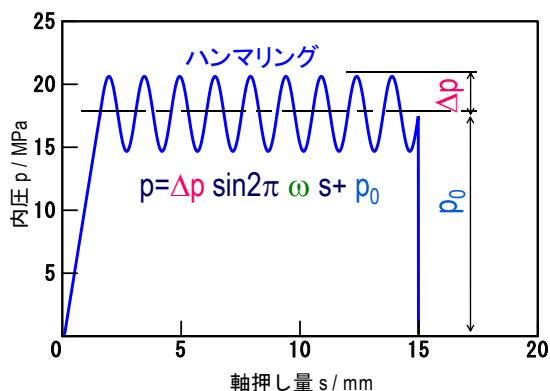


管材の振動内圧ハイドロフォーミングにおける成形性向上のメカニズムの研究

欠陥防止メカニズムを明らかに



ハンマリングによる内圧履歴



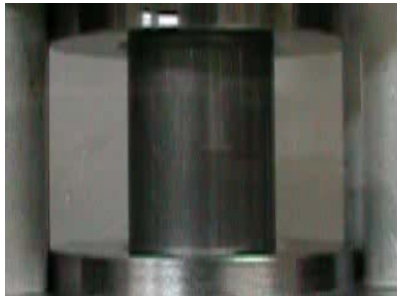
ハンマリングより得られた平坦な張出し



ハンマリングより得られた平坦な張出し



一定内圧(最大)における 変形挙動の観察



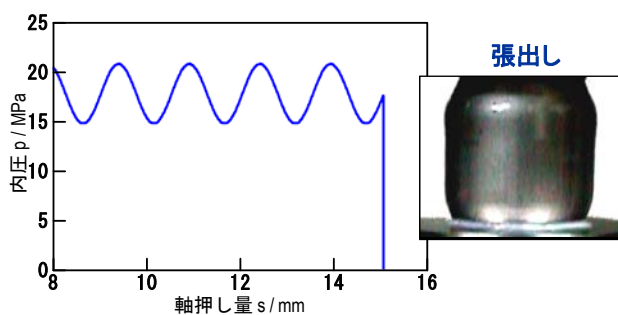
$p_0=20.5\text{MPa}$

ハンマリングにおける 変形挙動の観察

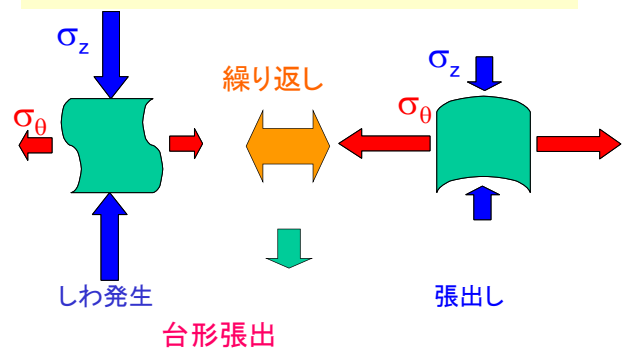


$p_0=17.7\text{MPa}$
 $\Delta p=3\text{MPa}$ $\omega=0.66\text{ c/mm}$

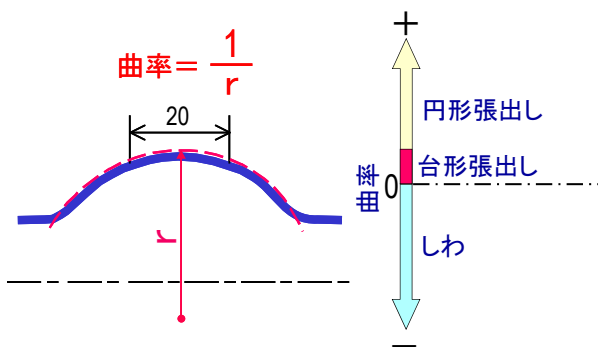
ハンマリング内圧での変形挙動



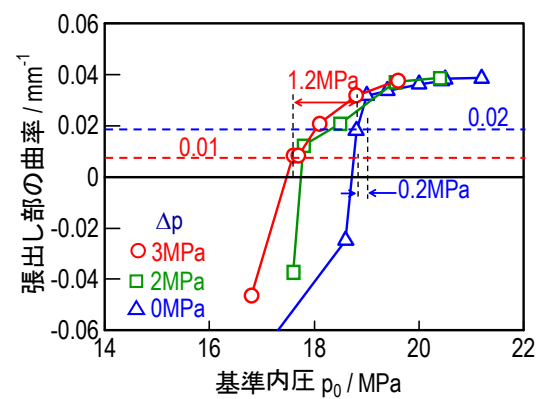
しわ抑制のメカニズム



張り出し部の曲率による評価



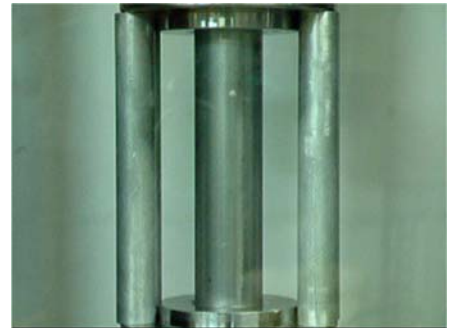
基準内圧に対する張り出し部の曲率変化



L/D = 4.0でのハンマリングの効果 (s = 24mm)



ハンマリングにおける変形挙動の観察



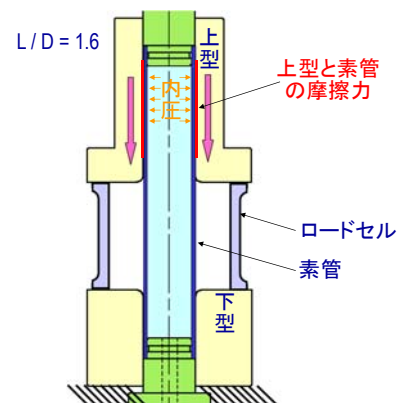
$p_0=18.6\text{MPa}$
 $\Delta p=3\text{MPa}$
 $\omega=0.66\text{ c/mm}$

一定内圧 (最大)における変形挙動の観察

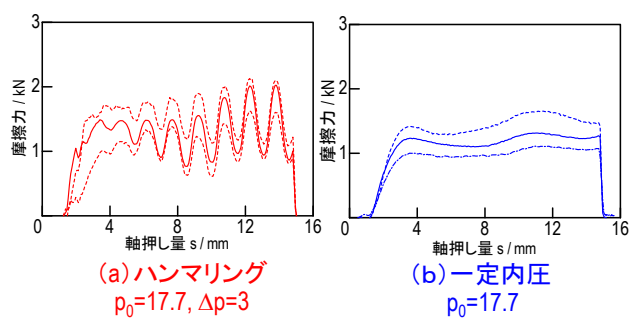


$p_0=21.6\text{MPa}$

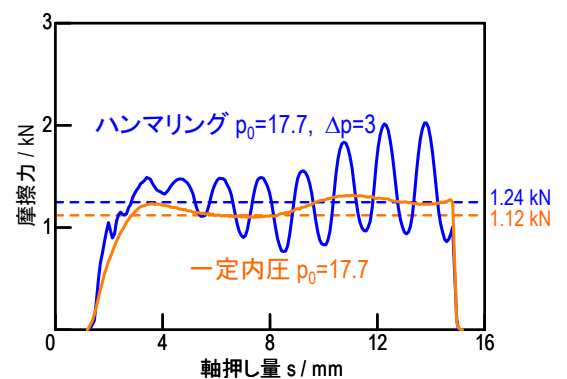
摩擦力に及ぼすハンマリングの影響



測定した摩擦力



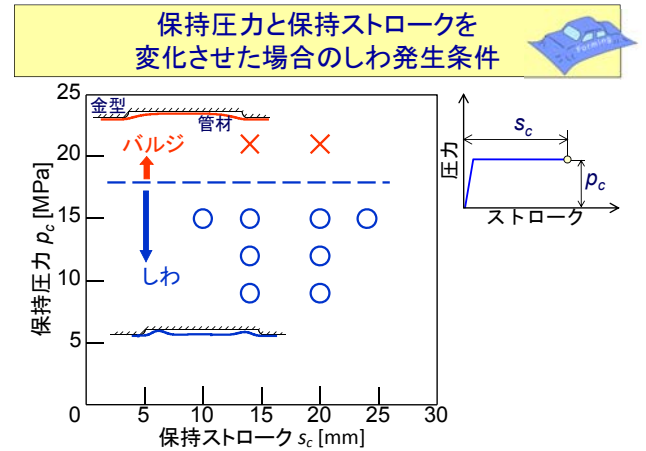
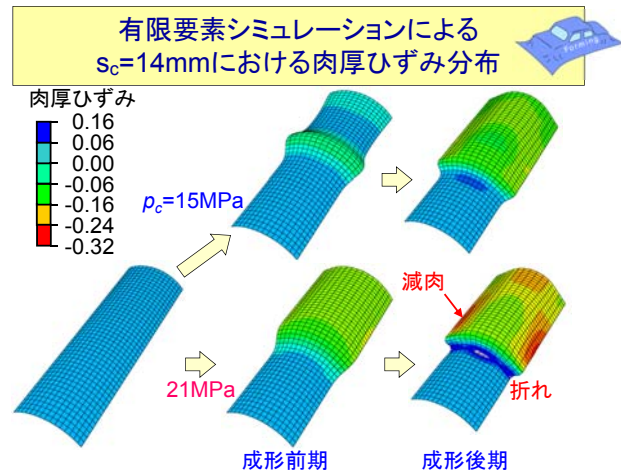
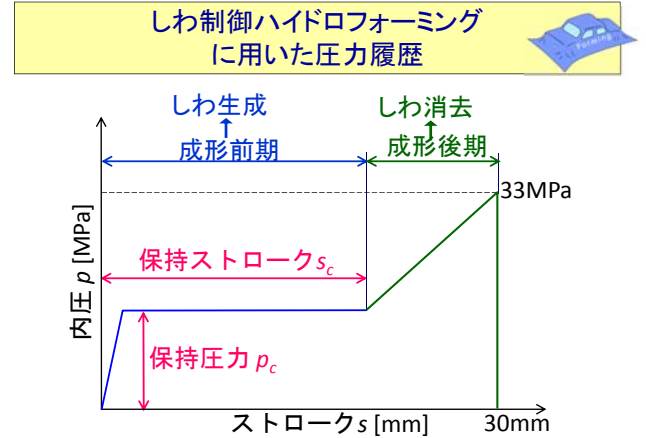
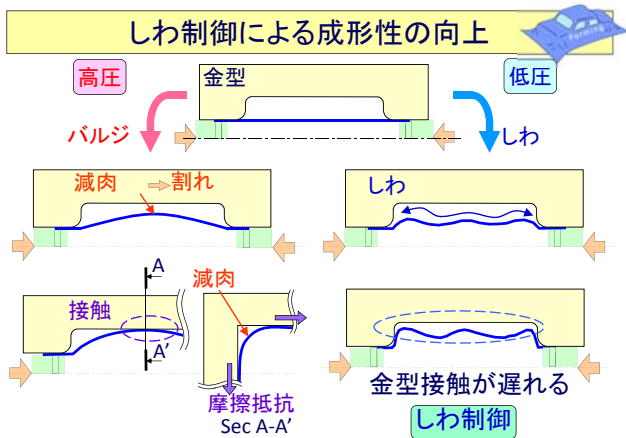
ハンマリングと一定内圧の平均摩擦力の比較



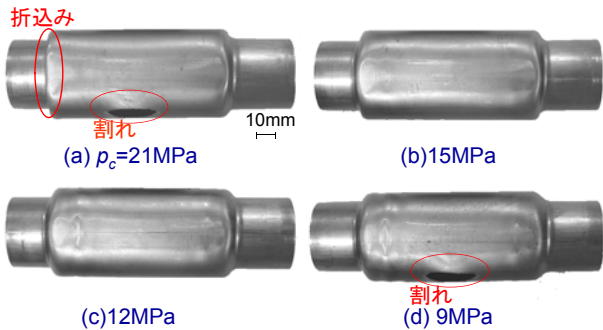
まとめ

- ハンマリングは、均一な張出しにより成形限界が向上する。
- ハンマリングは低い内圧を使うことで割れを抑制し、振動する圧力によってしわも抑制される。
- ハンマリングの金型と素管の摩擦力は一定内圧の場合と同様であった。

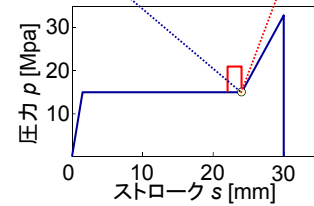
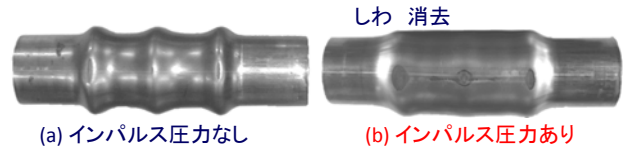
しわ制御による成形性の向上



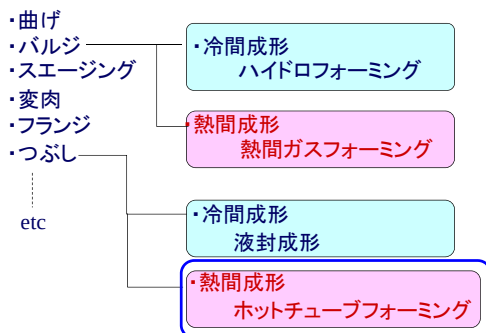
$s_c=14\text{mm}$ における成形された管材



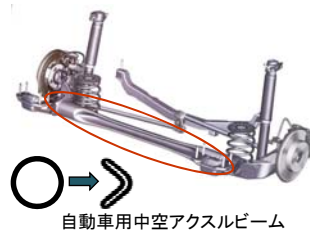
インパルス圧力ありとなしで成形された管材
 $p_c=15\text{MPa}$, $s_c=24\text{mm}$, $s=24\text{mm}$



管材の成形加工



密閉ガスを用いたホットチューブフォーミング による超高強度鋼部材のV形成形



目的
内圧付加による
形状転写性、ダイクエンチ性の調査

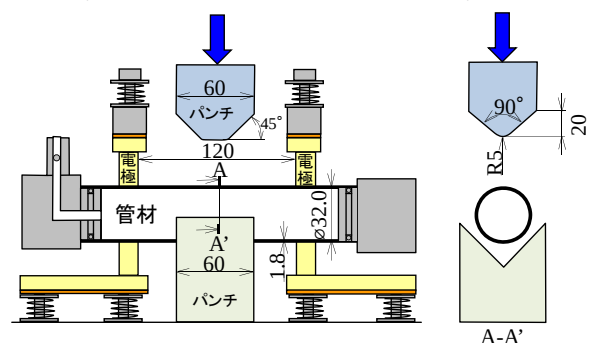


目次

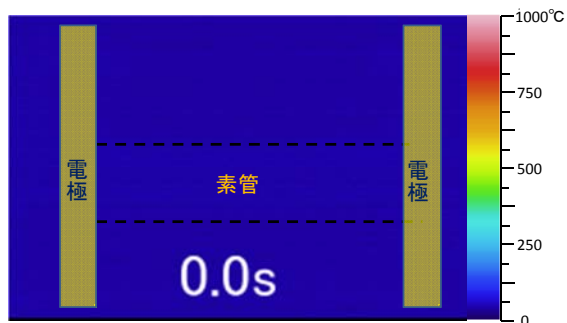
1. ホットチューブフォーミング
成形方法
2. V形成形結果
3. 金型によるダイクエンチ性
4. 圧縮空気を用いた強制空冷
による焼入れ性向上

チューブフォーミングによるV形成形方法

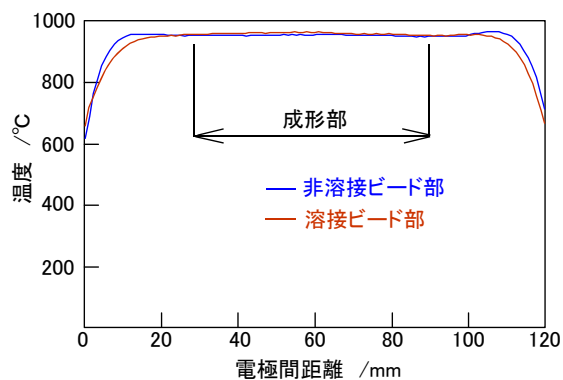
焼入れ用鋼管 直径32mm 肉厚1.8mm
(C:0.19%, Si:0.18%, Mn:1.28%, Cr:0.24%, B:0.0037%)



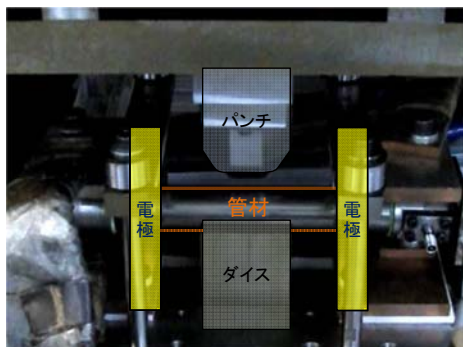
通電加熱による管材温度分布



成形部温度950°Cにおける軸方向温度分布



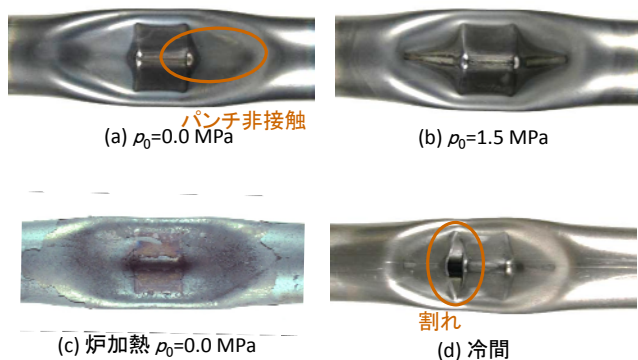
チューブフォーミングによるV形成形 ($p_0=1.5\text{MPa}$, $t_f=10\text{s}$)



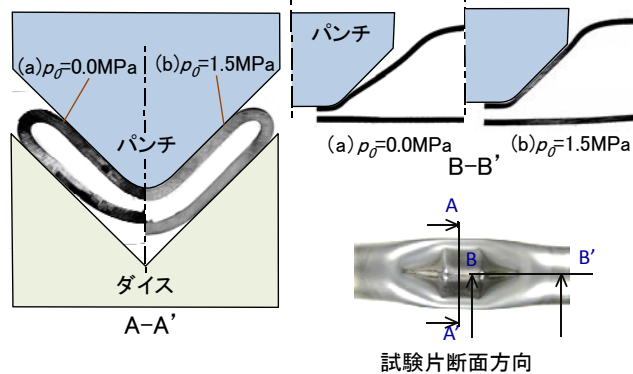
目次

1. ホットチューブフォーミング
成形方法
2. V形成形結果
3. 金型によるダイクエンチ性
4. 圧縮空気を用いた強制空冷
による焼入れ性向上

V形成後の試験片外観 ($t_f=60\text{s}$)



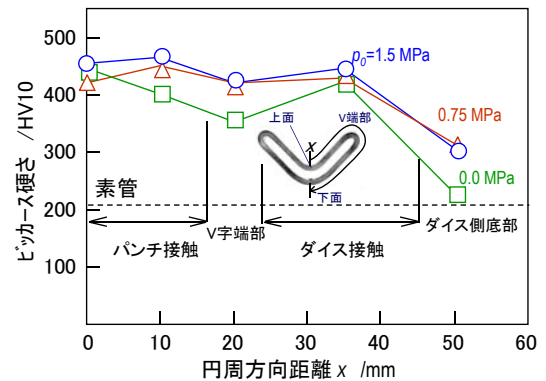
成形後の断面面形状 ($t_f=60\text{s}$)



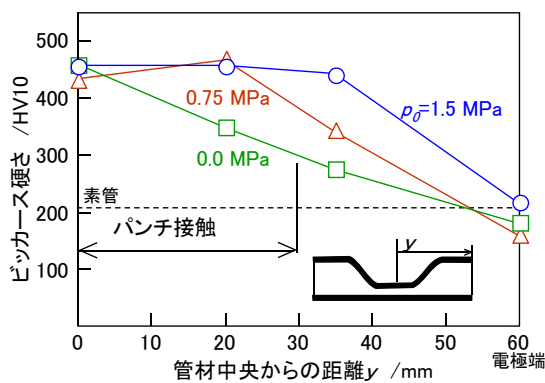
目次

1. ホットチューブフォーミング
成形方法
2. V形成形結果
3. 金型によるダイクエンチ性
4. 圧縮空気を用いた強制空冷
による焼入れ性向上

初期内圧を変えた時の円周方向硬さ分布 ($t_f=60s$)



初期内圧を変えた時の軸方向硬さ分布 ($t_f=60s$)

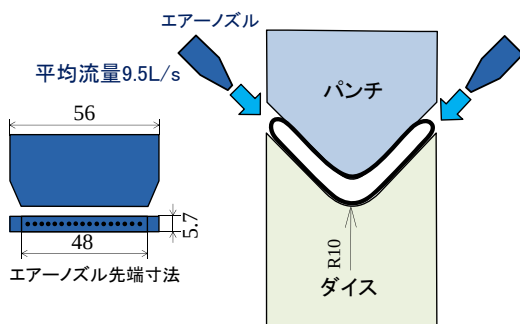


目次

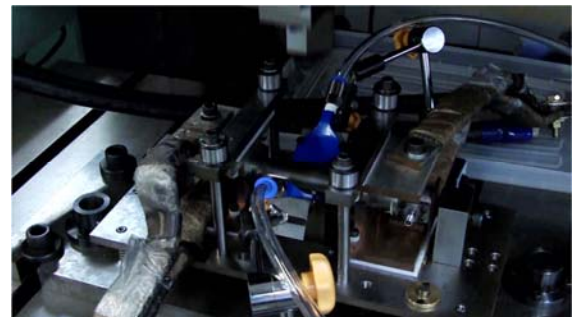
1. ホットチューブフォーミング
成形方法
2. V形成形結果
3. 金型によるダイクエンチ性
4. 圧縮空気を用いた強制空冷
による焼入れ性向上

圧縮空気を用いた強制空冷方法

下死点保持中強制空冷を行う

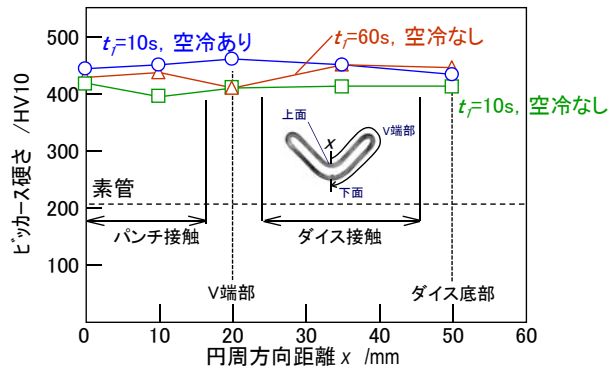


圧縮空気を用いた強制空冷方法



強制空冷による下死点保持時間の影響

($p_0=1.5\text{MPa}$)



通電加熱開始から成形までの内圧変化

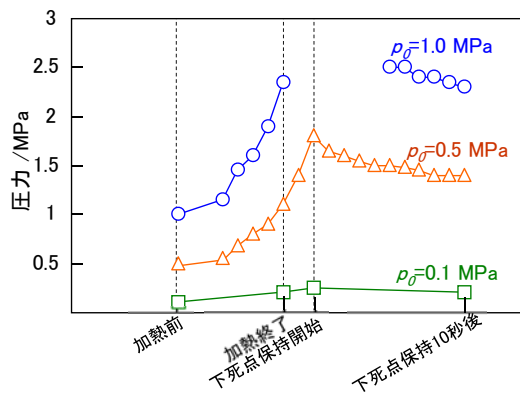


圧カトランスデューサ
通電環境におけるノイズ

⇒

メカニカル圧力計
ビデオ撮影による記録

通電加熱開始から成形までの内圧変化



まとめ

- ・冷間で割れを生じる形状も950°Cに加熱することで成形することができた。
- ・初期内圧を付加することにより形状転写性が向上した。
- ・初期内圧を付加することで金型への接触面圧を高めダイクエンチ性を向上することができた。
- ・V端部に空気を吹き付けることにより焼入れ性を向上させることができた。下死点保持時間を短くして焼入れを行うことができた。