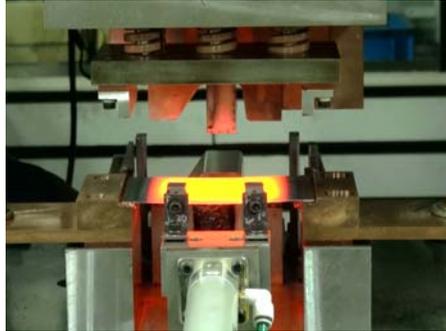


通電加熱ホットスタンピングシステムとその応用

横浜国立大学 前野智美



通電加熱ホットスタンピングシステム

- 通電加熱
 - 構成要素ごとの解説
 - 硬さのばらつきと安定化
 - 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去
- 成形前ブランキングを有するホットスタンピング
- 順送通電加熱ホットスタンピング
- マルテンサイト系ステンレス合金のホットスタンピング
- セラミックス工具を用いた局部焼入れ防止
- 管材の通電加熱ホットスタンピング
- 容器側壁のスプライン成形

各加熱方法の比較

| | 炉加熱 | 遠赤外線 | 誘導加熱 | 通電加熱 |
|-------|------|---------|-------------------------|-----------------|
| | | | | |
| 加熱時間 | × | △ | ○ | ○ |
| 均一加熱 | ○ | ○ | △ | △ |
| 異形材 | ○ | ○ | △ | × |
| 設備コスト | × | △ | × | ○ |
| 特徴 × | 大型設備 | 金属: 低効率 | コイル設計 通電条件 素材形状限定 | 素材形状限定 構造が簡単 |

通電加熱ホットスタンピングシステムの要素

電源:

- 容量
- 制御方法, パラメータ
- プレス機の同期

電極: 温度分布, 耐久性

- 材質
- 形状, 接触方法
- 板押え方法

配線: 効率, 磁化, 段取り

- たわみ導体
- ブスバー
- 取り回し

金型:

- 金型内加熱, 金型外加熱
- 搬送
- 絶縁, 締結

測定:

- 温度測定

電源：容量

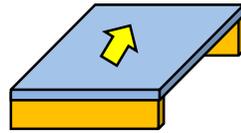
t = 1.6 mm のA4サイズ(200mm × 300mm)の鋼板を5sで900° C昇温する

必要なエネルギーQは

$$Q = \text{体積} \times \text{密度} \times \text{比熱} \times \text{昇温量}$$

$$= 96[\text{cm}^3] \times 7.8[\text{g}/\text{cm}^3] \times 461[\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}] \times 900[^\circ\text{C}]$$

$$= 310.7[\text{kJ}]$$



エネルギーQを5sで発生する必要な出力 W_r は

$$W_r = \frac{Q}{5} = \frac{310.7}{5} = 62.1[\text{kW}]$$

配線を含めた電源の効率が70%であるなら必要な電源容量W

$$W = \frac{W_r}{0.7} = 88.6[\text{kW}]$$

電源：電流

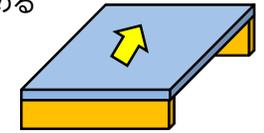
t = 1.6 mm のA4サイズ(200mm × 300mm)の鋼板を5sで900° C昇温する

$W_r = 62.1[\text{kW}]$ の加熱をするのに必要な電流を求める

A4板の電気抵抗Rは

$$R = \gamma \times \frac{\text{通電方向長さ}}{\text{通電方向断面積}}$$

$$= 0.3[\mu\Omega \cdot \text{m}] \times \frac{0.3}{3.2 \times 10^{-4}} = 2.81 \times 10^{-4}[\Omega]$$



必要な電流Iは

$$W = I^2 R$$

$$I = \sqrt{\frac{W}{R}} = \sqrt{\frac{62.1}{2.81 \times 10^{-4}}} = 14.9[\text{kA}]$$

電流密度と通電時間による管理

I [kA] の電流を t_e [s] 通電した時の電力量Qは

$$Q = RI^2 t_e = \gamma \frac{L}{A} I^2 t_e \quad (1)$$

投入電力量Qと温度上昇 ΔT の関係

$$Q = cm\Delta T = c\rho AL\Delta T \quad (2)$$

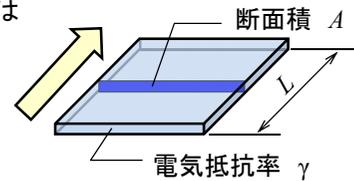
(c: 比熱, m: 質量, ρ: 密度)

(1),(2)式より ΔT について解くと

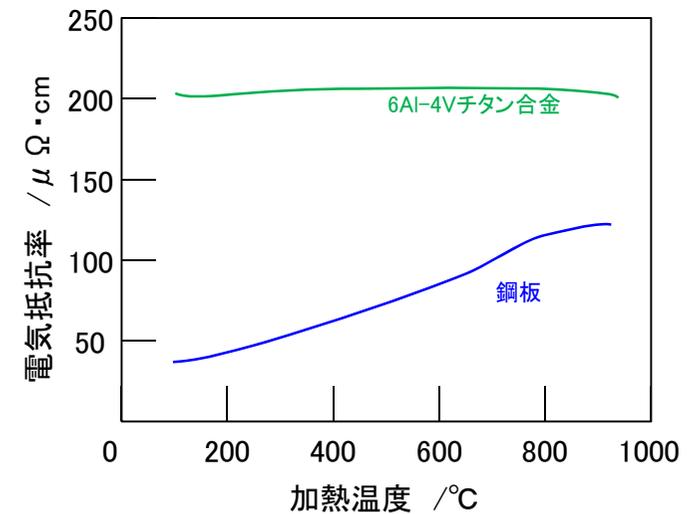
$$\Delta T = \frac{\gamma}{c\rho} \left(\frac{I}{A}\right)^2 t_e = \frac{\gamma}{c\rho} J^2 t_e \quad (3)$$

↓
電流密度 J

電流密度と通電時間で管理すれば、鋼半の厚さ、長さ、幅が変わってもほぼ同じ加熱ができる。



電気抵抗率と温度の関係



通電加熱ホットスタンピングシステムの要素

電源:

- ・制御方法, パラメータ
- ・容量
- ・プレス機の同期

電極: 温度分布, 耐久性

- ・材質
- ・形状, 接触方法
- ・板押え方法

配線: 効率, 磁化, 段取り

- ・たわみ導体
- ・ブスバー
- ・取り回し

金型:

- ・金型内加熱, 金型外加熱
- ・搬送
- ・絶縁, 締結

測定:

- ・温度測定

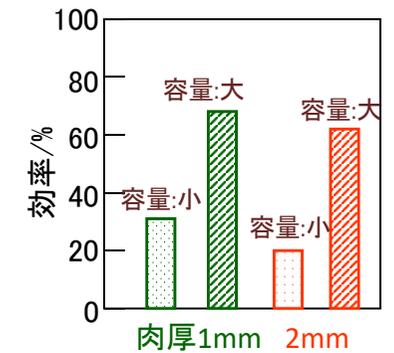
配線: 効率

大電流を流す⇒配線の発熱大
極力配線の抵抗は小さく

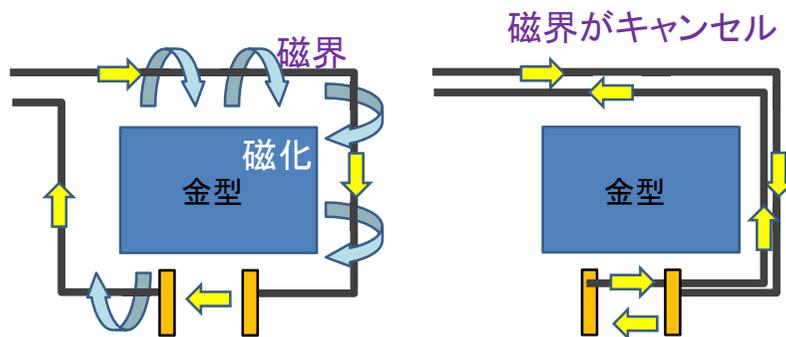


定格0.5kA 思ったより硬い→段取り?

アルミニウム合金管の加熱



配線: 取り回し



ループさせた配線の中に工具を配置しない

通電加熱ホットスタンピングシステムの要素

電源:

- ・制御方法, パラメータ
- ・容量
- ・プレス機の同期

電極: 温度分布, 耐久性

- ・材質
- ・形状, 接触方法
- ・板押え方法

配線: 効率, 磁化, 段取り

- ・たわみ導体
- ・ブスバー
- ・取り回し

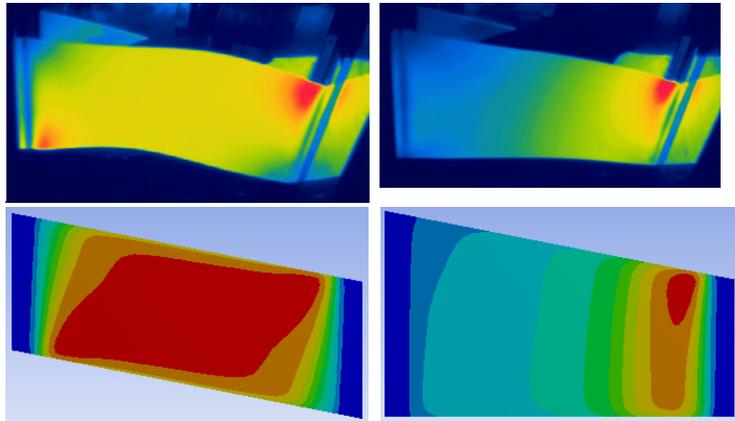
金型:

- ・金型内加熱, 金型外加熱
- ・搬送
- ・絶縁, 締結

測定:

- ・温度測定

異形ブランクの通電加熱

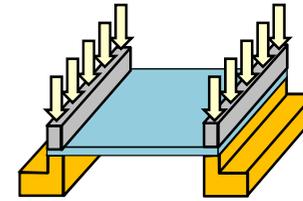


平行四辺形

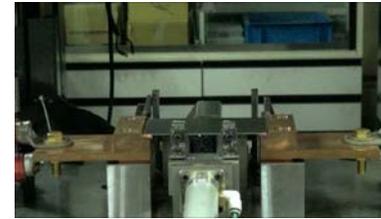
台形



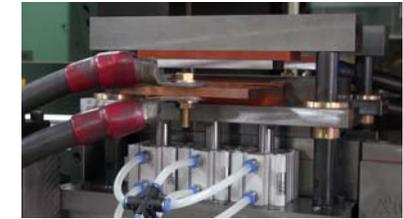
電極: 板押さえ圧力



| 板厚 [mm] | 平均面圧 [MPa] |
|---------|------------|
| 1~1.6 | 4~7 |
| 3~4 | 20~40 |
| 管材 | 2 |

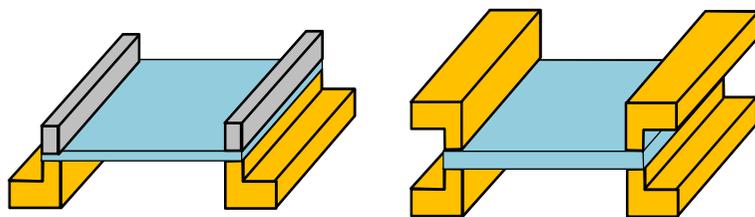


スプリング
×バネの個体差



エアシリンダ
○各シリンダでバランス

電極: 厚板の加熱

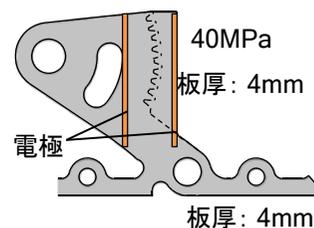


厚板の通電加熱の問題点

- 板の剛性が高く電極になじまない
- ワークの抵抗が低く、大電流が必要

接触抵抗を減らす

- 高接触面圧
- 上下面電極
- 平編銅線



平編銅線による電極の不均一接触防止



平編銅線

| 平編銅線 | なし | あり |
|--------------|-------|-------|
| 電極押え圧力 [MPa] | | 16 |
| 電流 [kA] | | 9.5 |
| 通電時間 [s] | | 7.1 |
| 電力量 [kJ] | 283.2 | 246.8 |
| 板厚[mm] | | 3 |



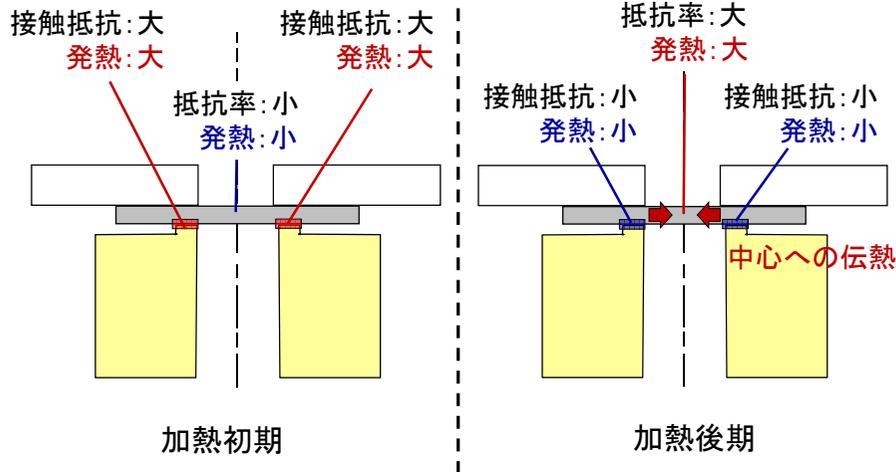
(a) 平編銅線なし



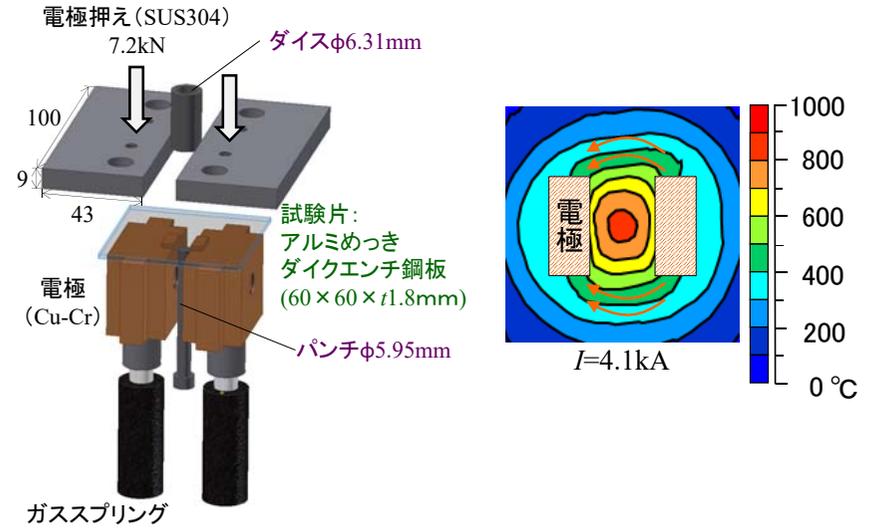
(b) 平編銅線あり



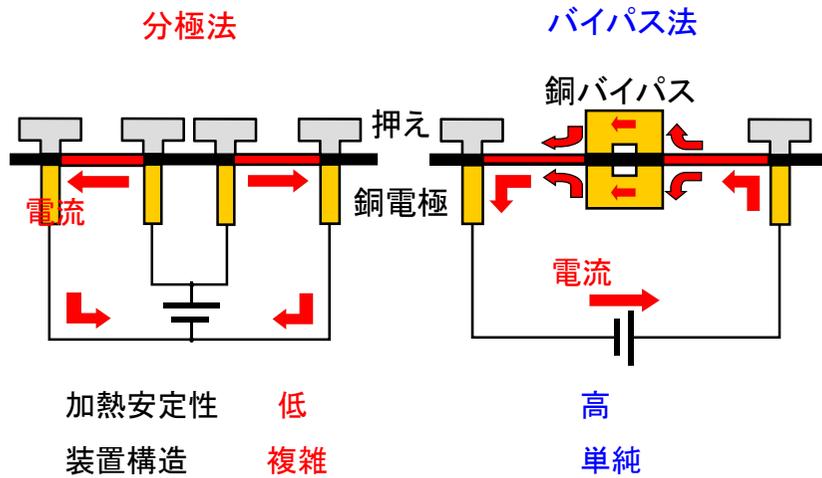
接触抵抗が大きい場合の通電加熱プロセス



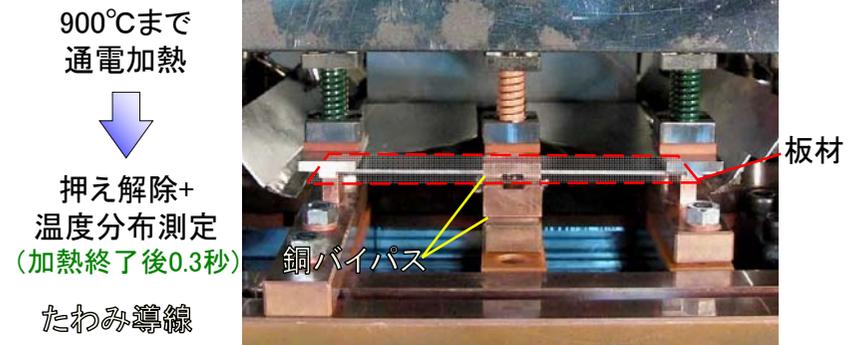
電極:部分加熱



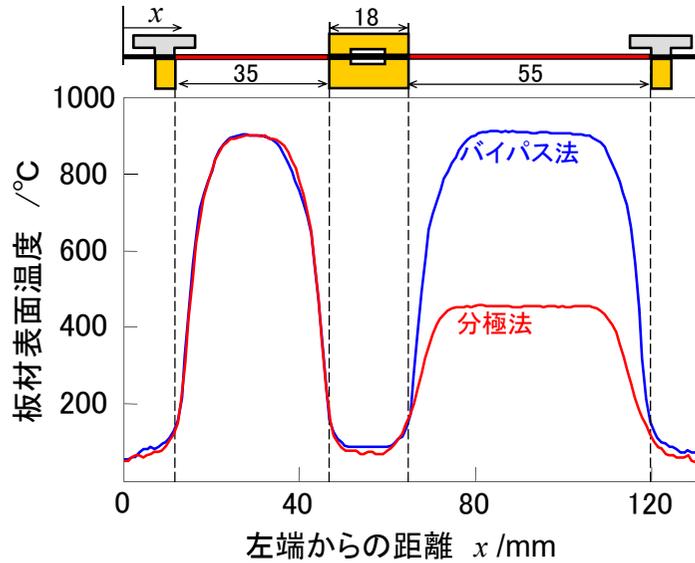
電極:バイパス電極による部分加熱



電極:バイパス電極による部分加熱



電極: バイパス電極による部分加熱



通電加熱ホットスタンピングシステムの要素

電源:

- 制御方法, パラメータ
- 容量
- プレス機の同期

電極: 温度分布, 耐久性

- 材質
- 形状, 接触方法
- 板押え方法

配線: 効率, 磁化, 段取り

- たわみ導体
- ブスバー
- 取り回し

金型:

- 金型内加熱, 金型外加熱
- 搬送
- 絶縁, 締結

測定:

- 温度測定

金型: 加熱場所

金型内



搬送による温度低下なし
金型専有時間 大

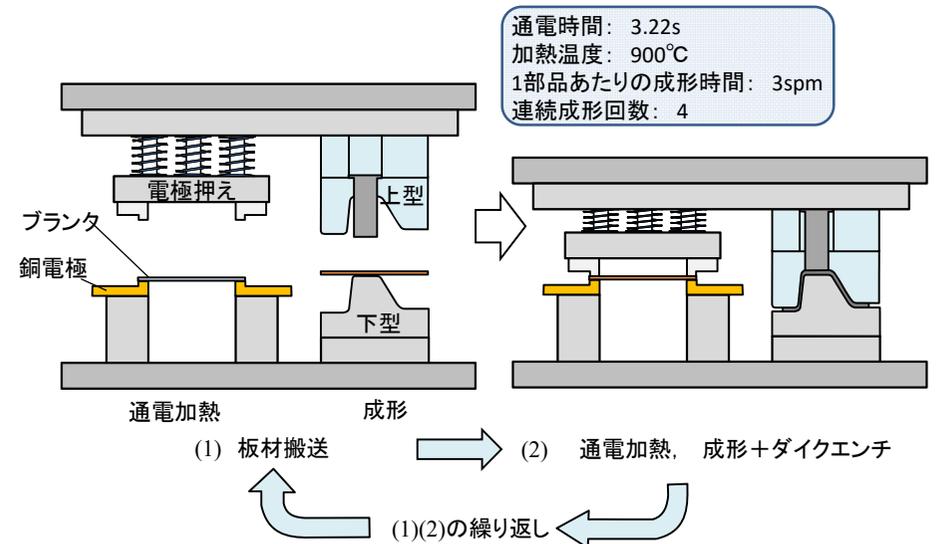
金型外



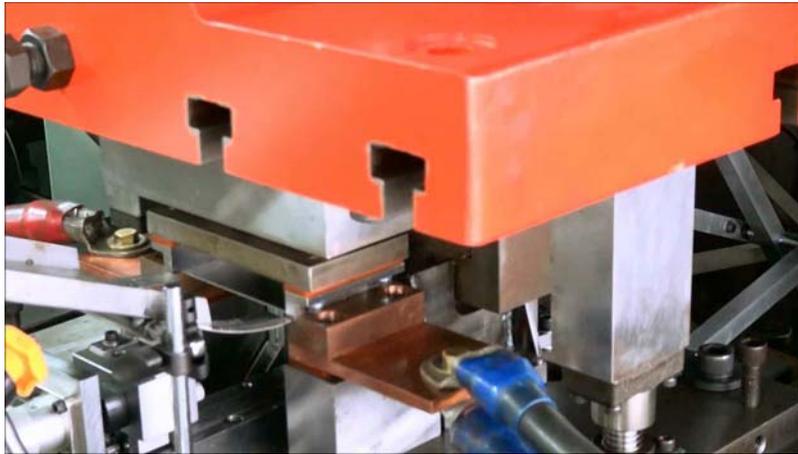
ダイクエンチと同期
高生産性

搬送中の温度低下
加熱された板の搬送

金型: 加熱とダイクエンチの同期

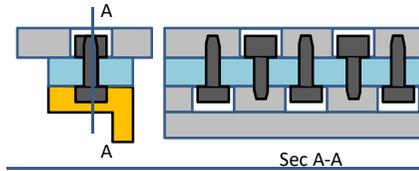


金型：加熱とダイクエンチの同期



金型：絶縁構造

①断熱板（樹脂）を中間に互い違いに締結



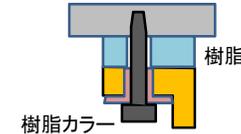
不具合少ない
引張を受ける部分：NG

②樹脂ボルトを使って締結



不具合少ない
引張を受ける部分は使えない
樹脂ボルトの熱対策

③樹脂プレート+樹脂カラーでの絶縁



不具合多い
引張を受ける部分もOK
樹脂カラーが割れやすい

通電加熱ホットスタンピングシステムの要素

電源：

- ・制御方法, パラメータ
- ・容量
- ・プレス機の同期

電極：温度分布, 耐久性

- ・材質
- ・形状, 接触方法
- ・板押え方法

配線：効率, 磁化, 段取り

- ・たわみ導体
- ・ブスバー
- ・取り回し

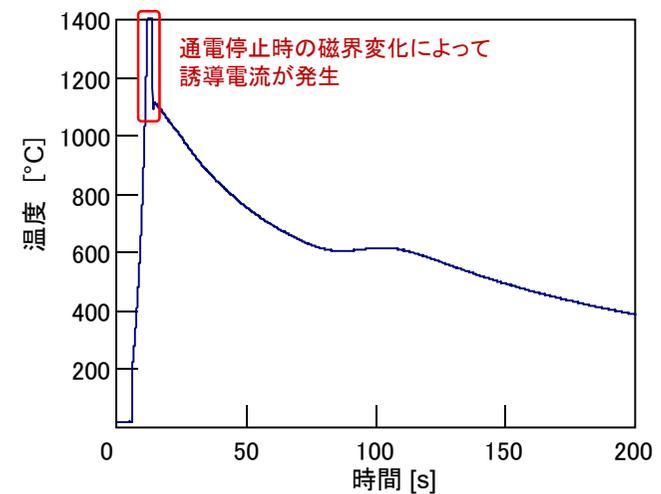
金型：

- ・金型内加熱, 金型外加熱
- ・搬送
- ・絶縁, 締結

測定：

- ・温度測定

温度の測定—熱電対—



温度の測定—放射温度計—



サーモグラフィ

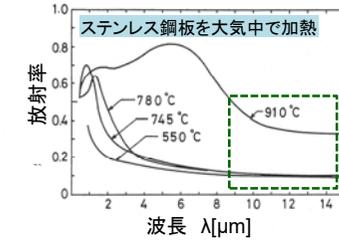
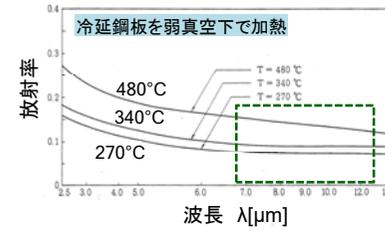


スポット放射温度計

放射温度計のメリット, デメリット

- ・非接触
- ・温度分布
- ・応答性が高い
- ・開放された場所に限定
- ・測定精度が不明瞭
- 放射率で変化する
- ・仕組みを理解しないと
- 間違った測定をしやすい

放射温度計による温度の測定 表面酸化の影響



炉加熱: 安定した酸化膜やめっき層→放射率やや安定

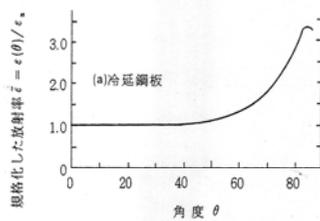
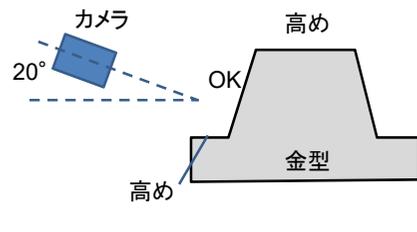
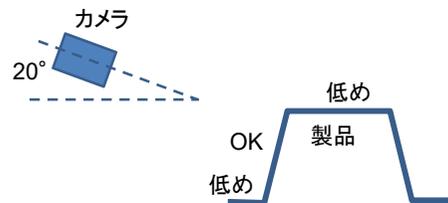
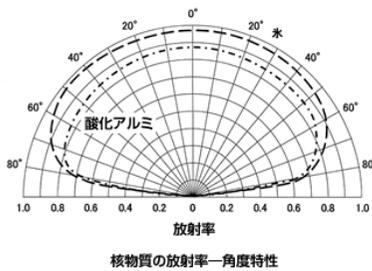
通电加熱: 酸化が進行中→放射率不安定

正確な温度測定には黒体塗料の塗布が必要



ジャパンセンサー
9600円/本

放射温度計による温度の測定 角度の影響



ミラーを用いた撮像



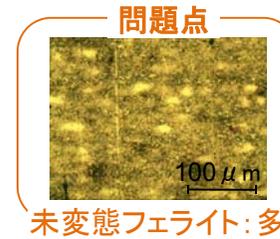
磨き鏡を使った反射像でも温度測定が可能
ガラスはNG

通電加熱ホットスタンピングシステム

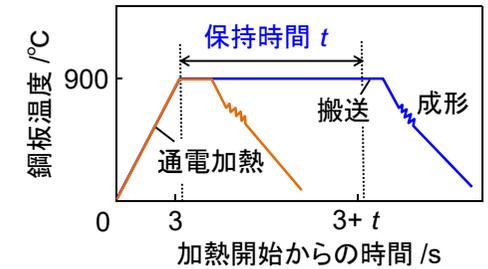
通電加熱

- 構成要素ごとの解説
- 硬さのばらつきと安定化
- 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去
- 成形前ブランキングを有するホットスタンピング
- 順送通電加熱ホットスタンピング
- マルテンサイト系ステンレス合金のホットスタンピング
- セラミック工具を用いた局部焼入れ防止
- 管材の通電加熱ホットスタンピング
- 容器側壁のスプライン成形

通電加熱保持による焼入れ硬さ安定化



未変態フェライト:多

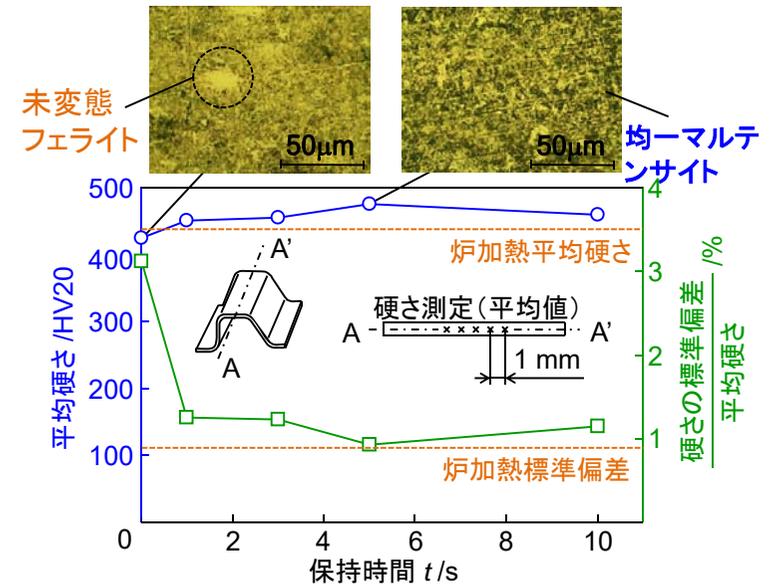


10sの温度保持を行う通電加熱ホットスタンピング

熱間プレス成形用鋼板 155×90×1.6 mm
 通電加熱 900°C(3.2 s) → 最高温度保持(t=10 s) → ダイクエンチ



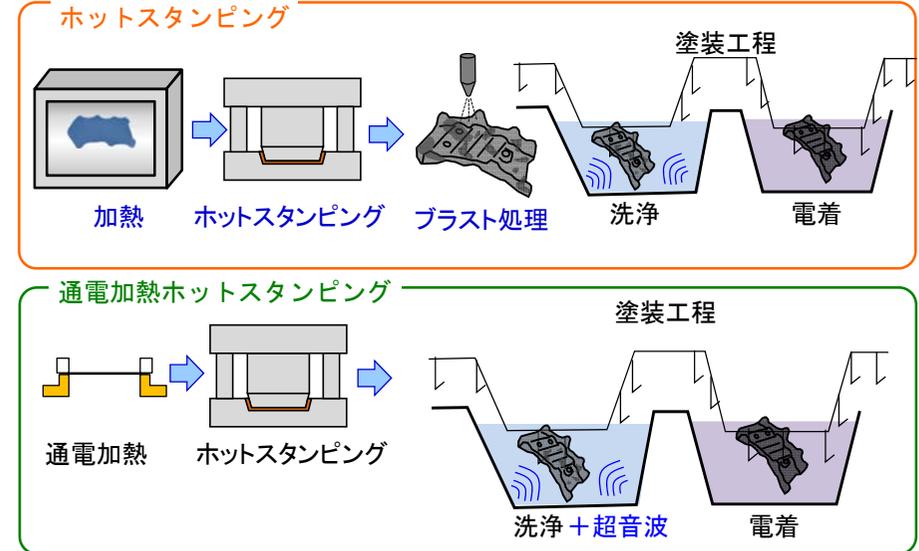
平均硬さばらつきに及ぼす保持時間の影響



通電加熱ホットスタンピングシステム

- 通電加熱
 - 構成要素ごとの解説
 - 硬さのばらつきと安定化
 - 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去
- 成形前ブランキングを有するホットスタンピング
- 順送通電加熱ホットスタンピング
- マルテンサイト系ステンレス合金のホットスタンピング
- セラミック工具を用いた局部焼入れ防止
- 管材の通電加熱ホットスタンピング
- 容器側壁のスプライン成形

塗装洗浄工程を用いた酸化膜除去



通電加熱前の脱脂ありとなしにおけるホットスタンピング後の外観



(a) 脱脂あり



(b) 脱脂なし

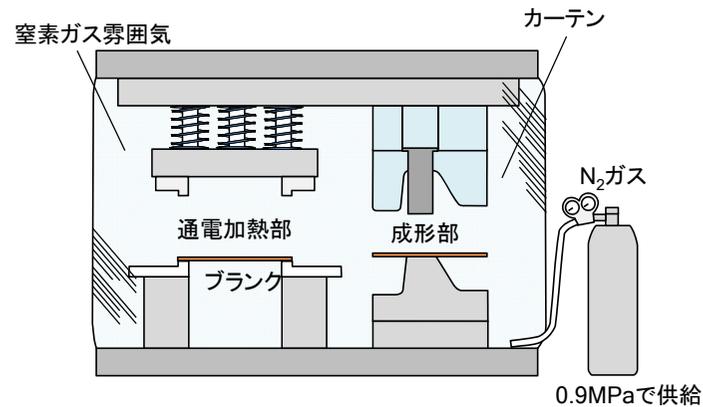
塗膜付着性に及ぼす脱脂工程と超音波洗浄の影響



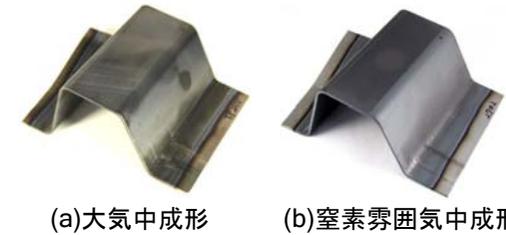
| 洗浄条件 | |
|------|---------|
| 薬品 | アルカリ洗浄液 |
| pH | 10 |
| 洗浄時間 | 4min |

| | 超音波あり | 超音波なし |
|---------|----------------|-----------------|
| (a)脱脂あり | NG(99/100) | NG(100/100) |
| (b)脱脂なし | OK(0/100) | NG(35/100) |

不活性ガスによる酸化防止



不活性ガスによる酸化防止

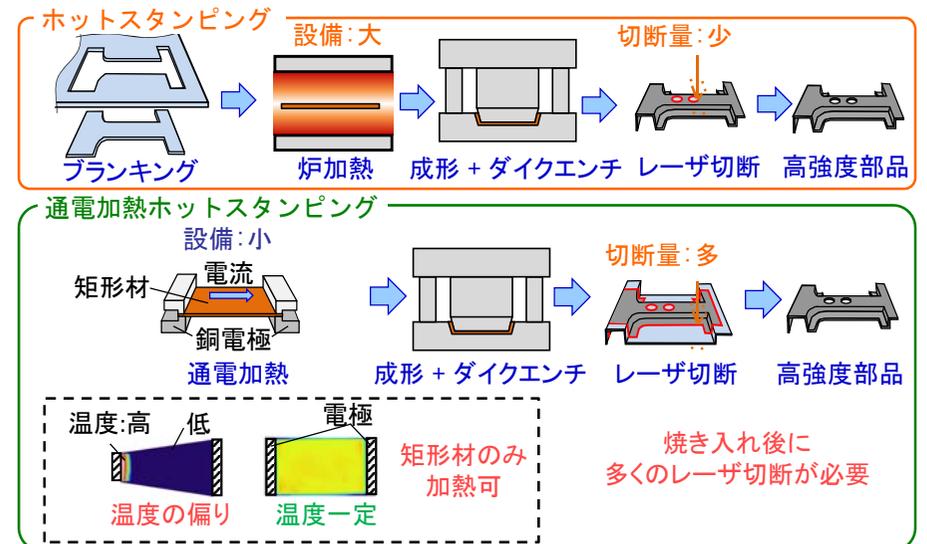


| | | |
|------------|-----------------|--|
| (a) 大気中 | 分類5(98/100) | |
| (b) 窒素雰囲気中 | 分類0 (0/100) | |

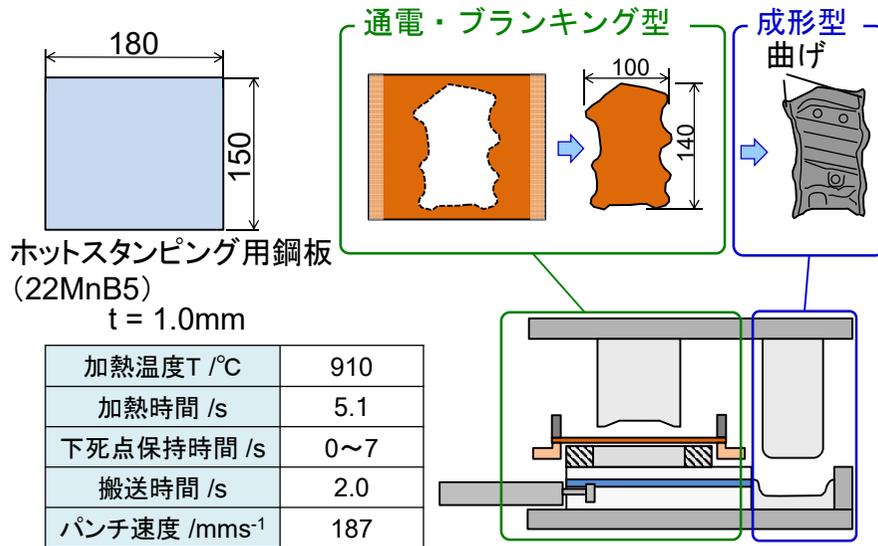
通電加熱ホットスタンピングシステム

- 通電加熱
 - 構成要素ごとの解説
 - 硬さのばらつきと安定化
 - 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去
- 成形前ブランキングを有するホットスタンピング
- 順送通電加熱ホットスタンピング
- マルテンサイト系ステンレス合金のホットスタンピング
- セラミックス工具を用いた局部焼入れ防止
- 管材の通電加熱ホットスタンピング
- 容器側壁のスプライン成形

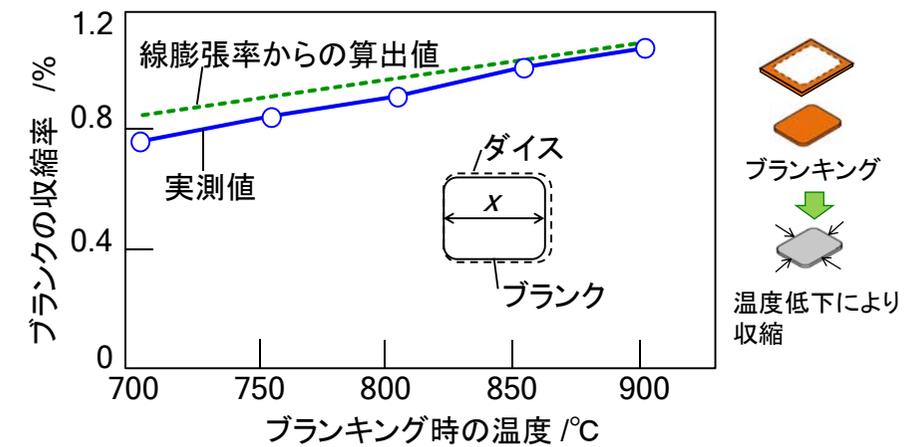
成形前ブランキングを有するホットスタンピング



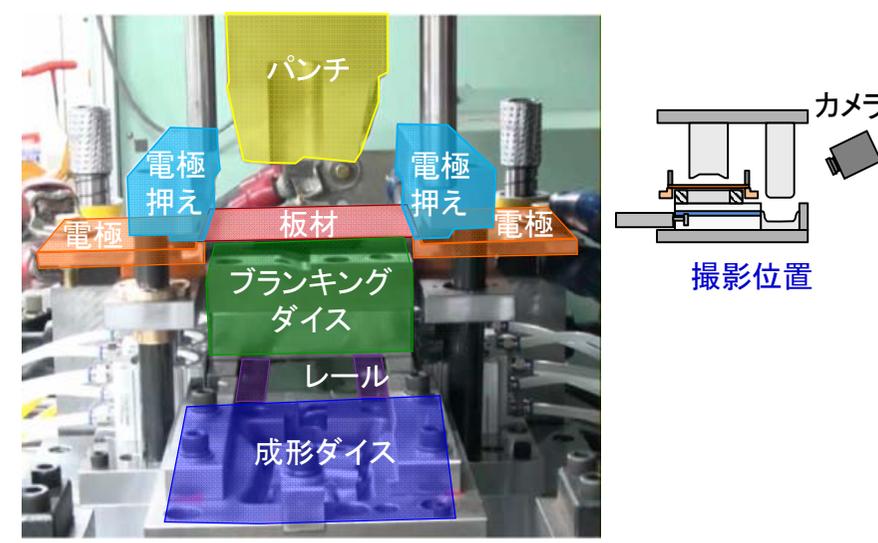
成形前ブランキングを有するホットスタンピング通電加熱
ホットスタンピング金型



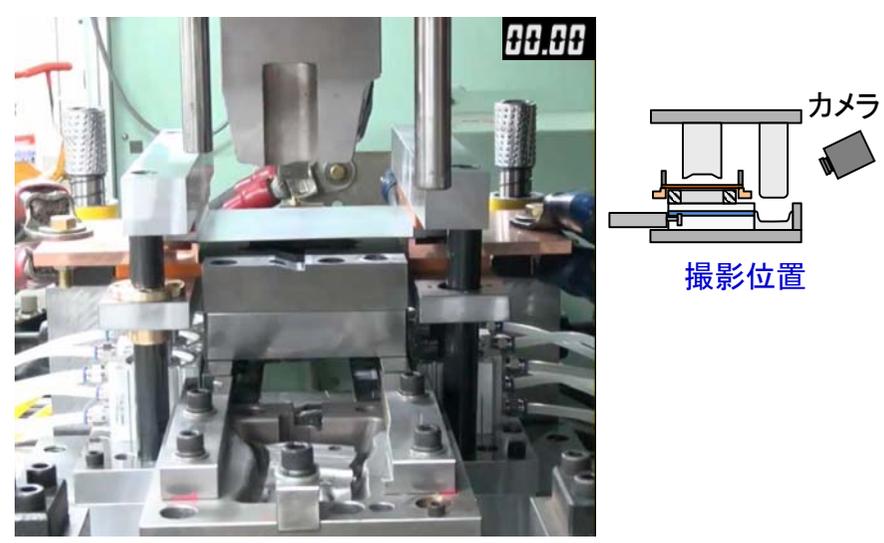
ブランキング時の温度を変化させた時の
ブランクの収縮率



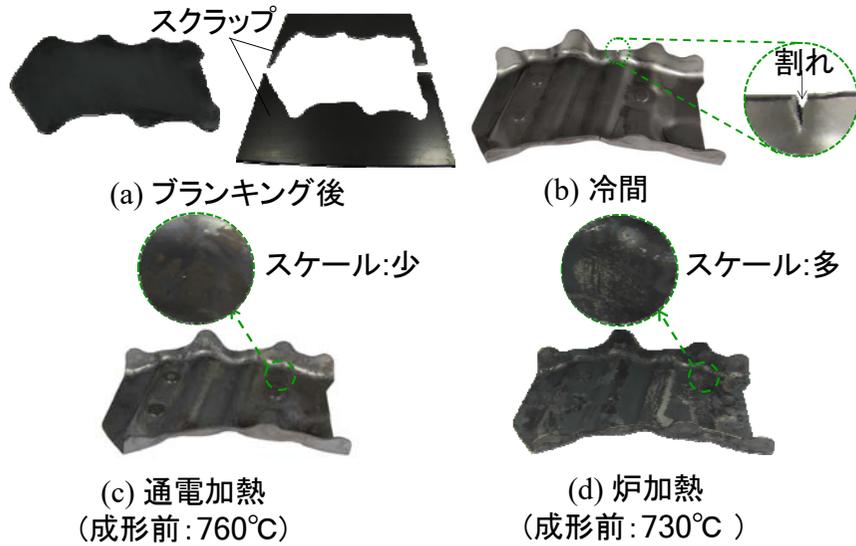
成形前ブランキングを有する通電加熱
ホットスタンピングを用いたドア部品の成形



成形前ブランキングを有する通電加熱
ホットスタンピングを用いたドア部品の成形



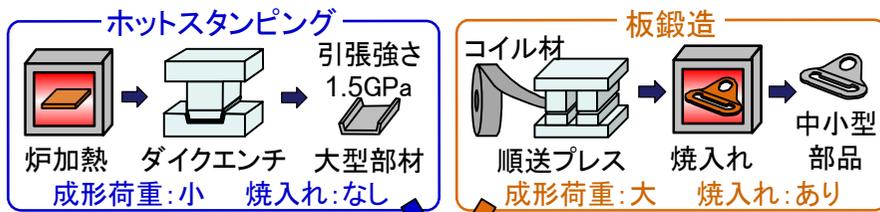
ドア部品外観



通電加熱ホットスタンピングシステム

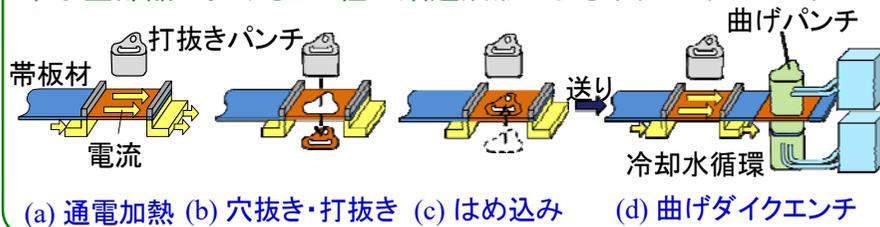
- 通電加熱
 - 構成要素ごとの解説
 - 硬さのばらつきと安定化
 - 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去
- 成形前ブランキングを有するホットスタンピング
- 順送通電加熱ホットスタンピング
- マルテンサイト系ステンレス合金のホットスタンピング
- セラミック工具を用いた局部焼入れ防止
- 管材の通電加熱ホットスタンピング
- 容器側壁のスプライン成形

通電加熱2工程順送ホットスタンピング

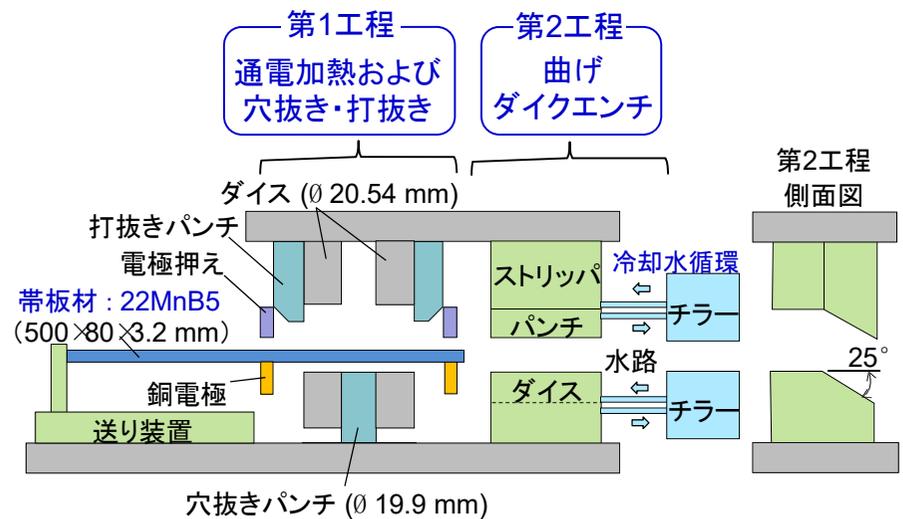


研究目的

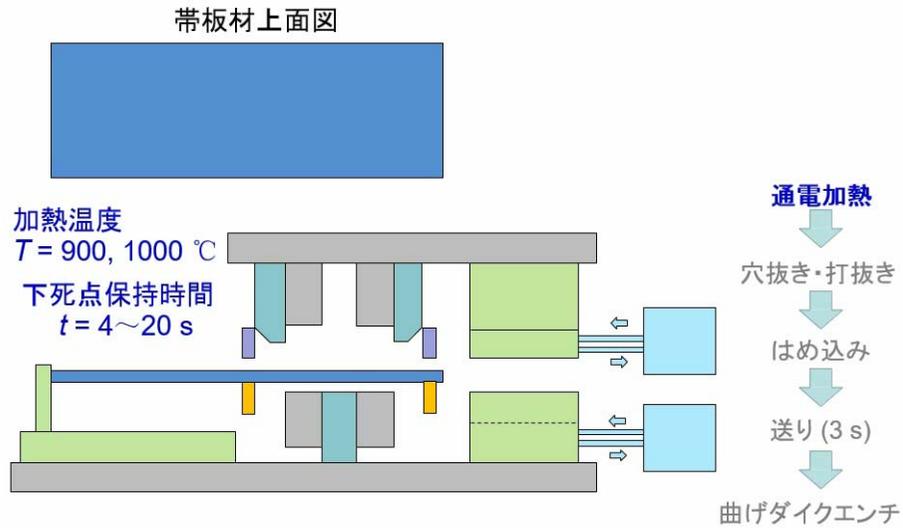
中小型部品における2工程の順送成形によるホットスタンピング



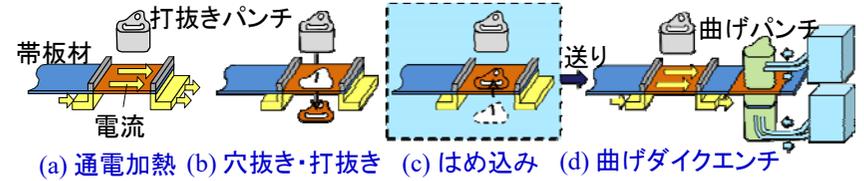
成形金型



通電加熱2工程順送ホットスタンピング方法



穴抜き・打抜き後はめ込みされた帯板材

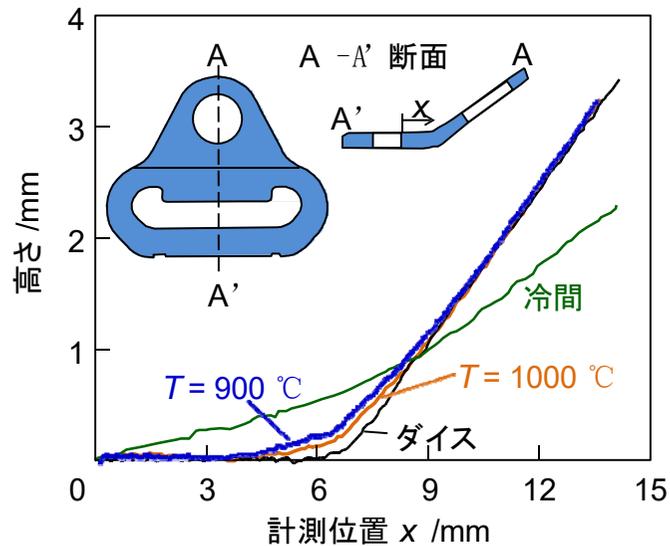


(a) パンチ側

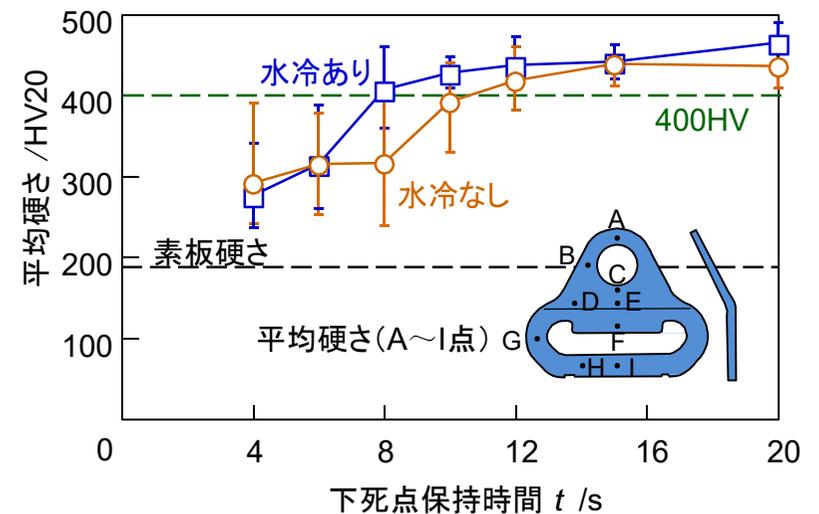


(b) ダイス側

各種加熱温度における水冷ありの成形品形状 ($t = 20 \text{ s}$)



水冷の有無における成形品硬さに及ぼす下死点保持時間の影響 ($T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$)

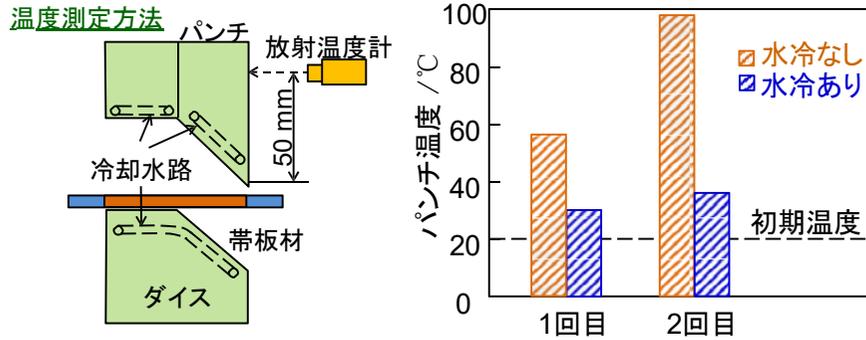


通電加熱ホットスタンピングシステム

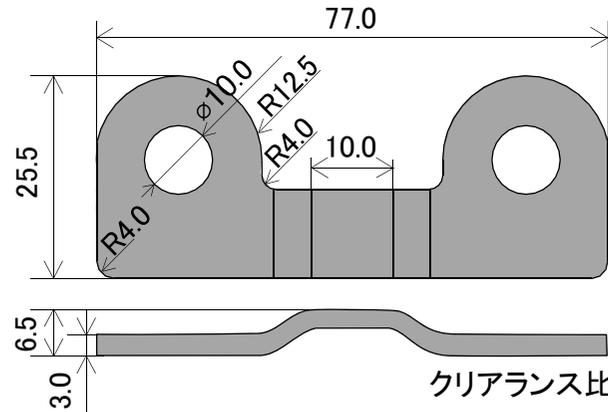
- 通電加熱
 - 構成要素ごとの解説
 - 硬さのばらつきと安定化
 - 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去
- 成形前ブランキングを有するホットスタンピング
- 順送通電加熱ホットスタンピング
- マルテンサイト系ステンレス合金のホットスタンピング
- セラミックス工具を用いた局部焼入れ防止
- 管材の通電加熱ホットスタンピング
- 容器側壁のスプライン成形

2連続成形後の帯板材外観および水冷の有無におけるダイクエンチ後のパンチ温度

($T=1000^{\circ}\text{C}$, $t=20\text{s}$)



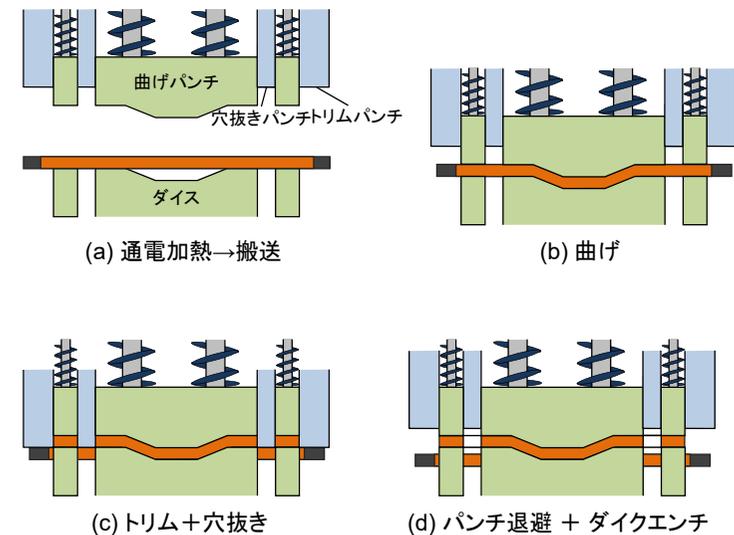
マルテンサイト系ステンレス合金の通電加熱ホットスタンピング



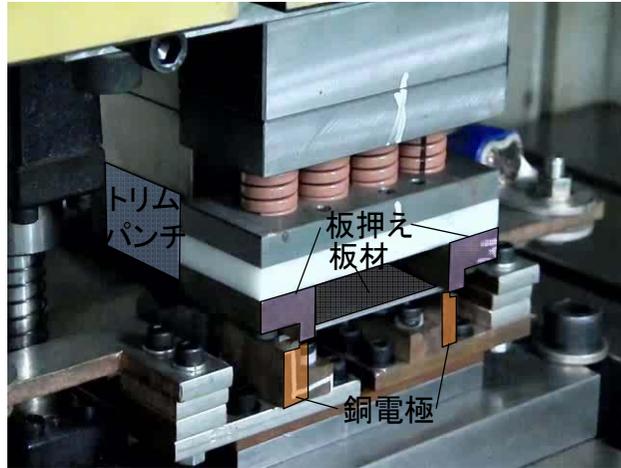
| 材質 | 引張強さ /MPa | 伸び /% | 寸法 /mm |
|----------|-----------|-------|----------------------------------|
| SUS420J2 | 602 | 28 | $110^L \times 40^W \times 3.0^t$ |

添加元素 : 0.28%C, 0.60%Si, 0.43%Mn, 0.23%P, 0.02%S, 0.25%Ni, 13.26%Cr

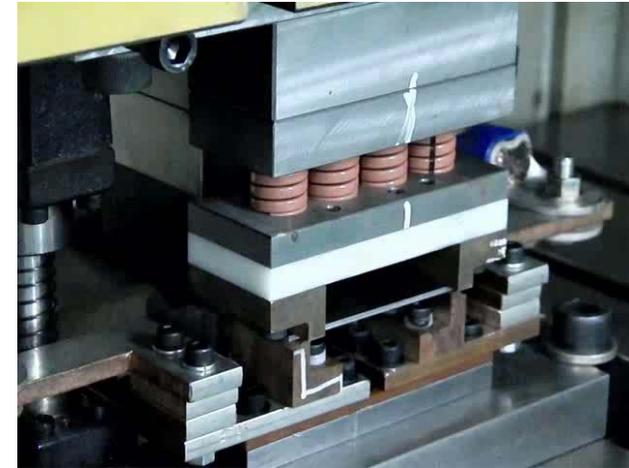
曲げ、トリム、穴抜きを有するホットスタンピング工程



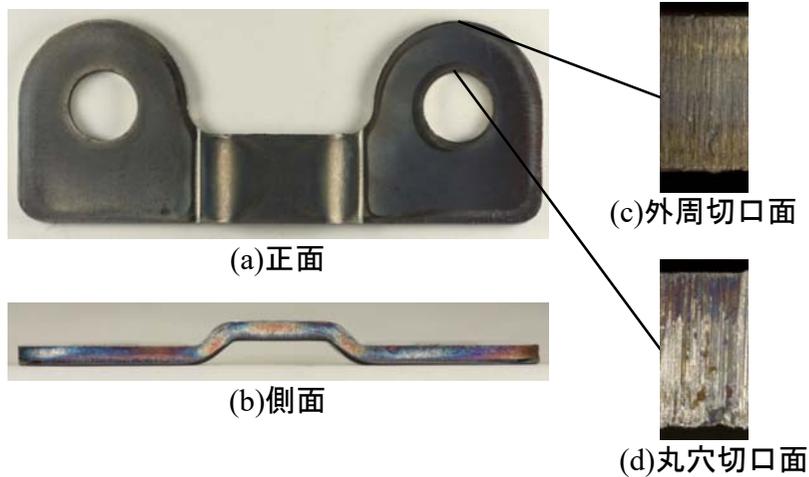
1ショットホットスタンピング



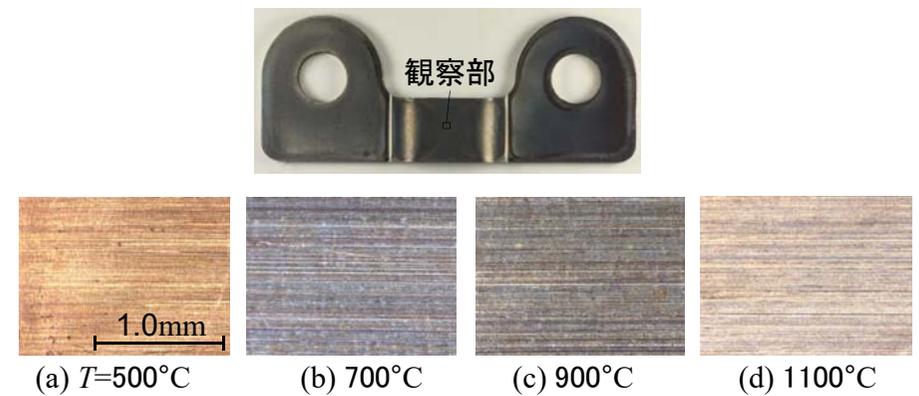
1ショットホットスタンピング



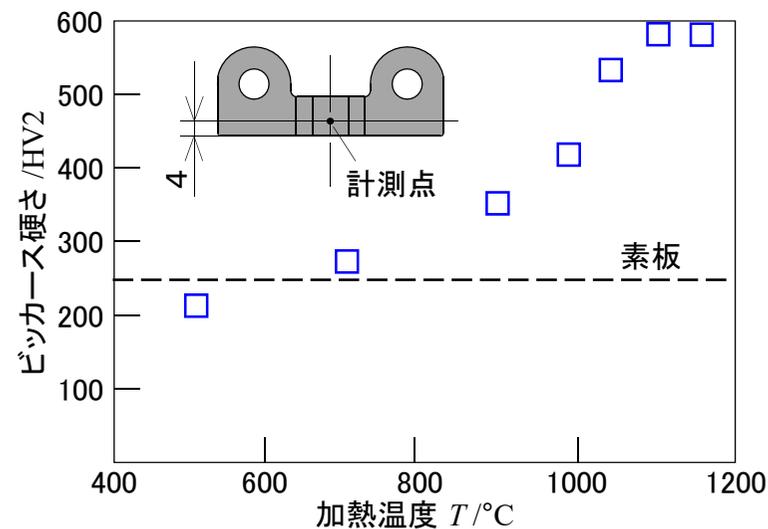
1ショットホットスタンピング加工された 連結部品($T=1100^{\circ}\text{C}$)



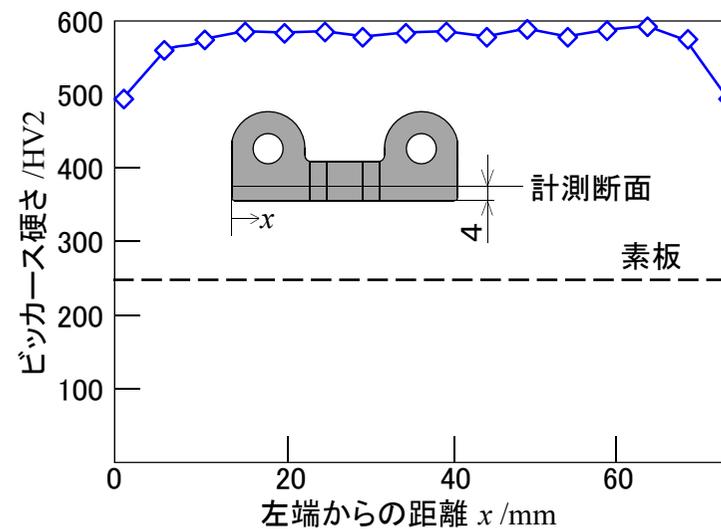
1ショットホットスタンピング加工された 連結部品の表面性状



$t = 3.0s$ における成形品中央部の
ビッカース硬さと加熱温度の関係

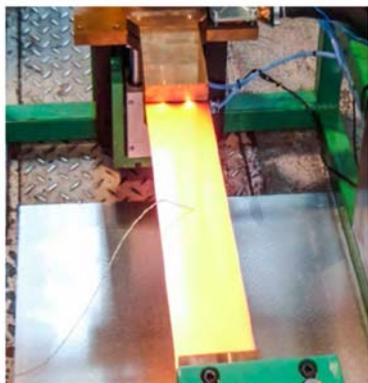


$T = 1100^\circ\text{C}$, $t = 3.0s$ における成形品の
ビッカース硬さ分布



参考: ステンレス合金板のホットスタンピング

Aperamカタログより



メッキ不要→通電加熱に適してる

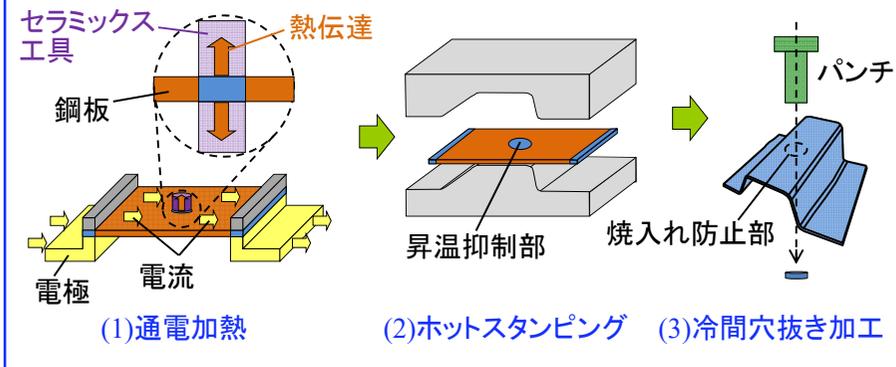


通電加熱ホットスタンピングシステム

- 通電加熱
 - 構成要素ごとの解説
 - 硬さのばらつきと安定化
 - 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去
- 成形前ブランキングを有するホットスタンピング
- 順送通電加熱ホットスタンピング
- マルテンサイト系ステンレス合金のホットスタンピング
- セラミックス工具を用いた局部焼入れ防止
- 管材の通電加熱ホットスタンピング
- 容器側壁のスプライン成形

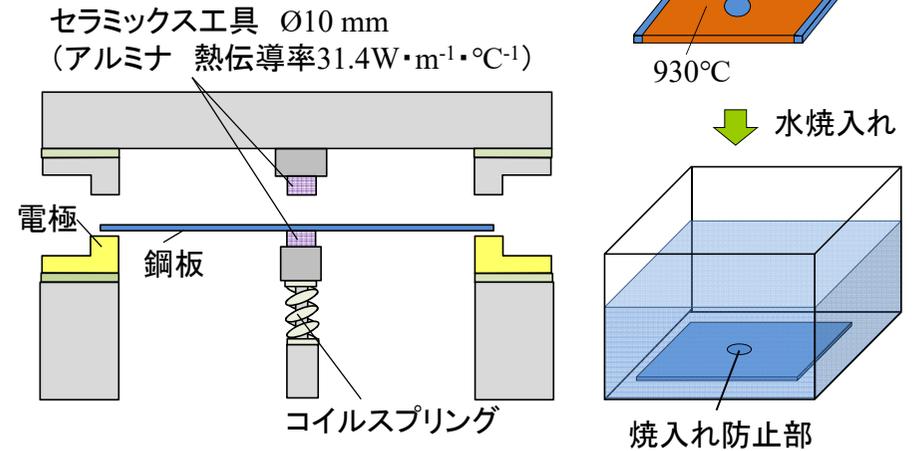
セラミックス工具を用いた局部焼入れ防止

セラミックス工具を用いた局部昇温抑制による
穴抜き部焼入れ防止法と冷間穴抜き加工



局部昇温抑制および焼入れ実験方法

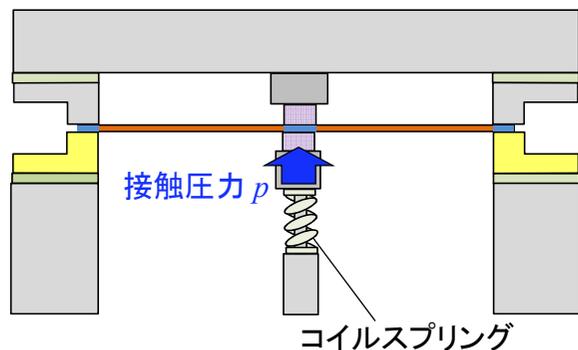
熱間プレス成形用鋼板 155mm×90mm 板厚 1.6mm
目標最高温度 約930°C
通電加熱条件 電流7.5kA (3.3s)



局部昇温抑制および焼入れ実験方法

熱間プレス成形用鋼板 155mm×90mm 板厚 1.6mm
目標最高温度 約930°C
通電加熱条件 電流7.5kA (3.3s)

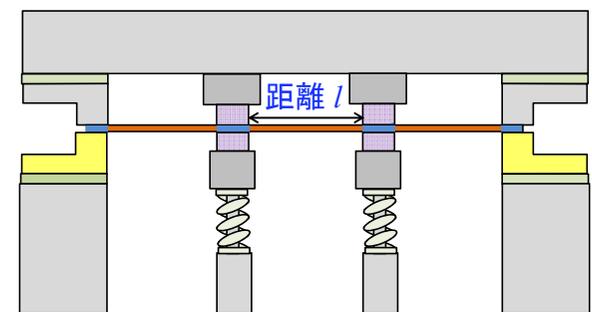
パラメータ: セラミックス工具接触圧力 p



局部昇温抑制および焼入れ実験方法

熱間プレス成形用鋼板 155mm×90mm 板厚 1.6mm
目標最高温度 約930°C
通電加熱条件 電流7.5kA (3.3s)

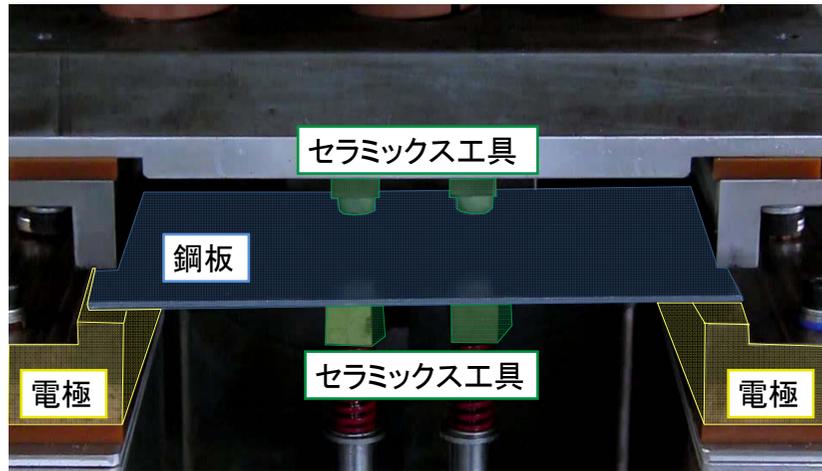
パラメータ: セラミックス工具の外形間距離 l



局部昇温抑制および焼入れ実験方法

板押え 7MPa → 通電加熱 930°C

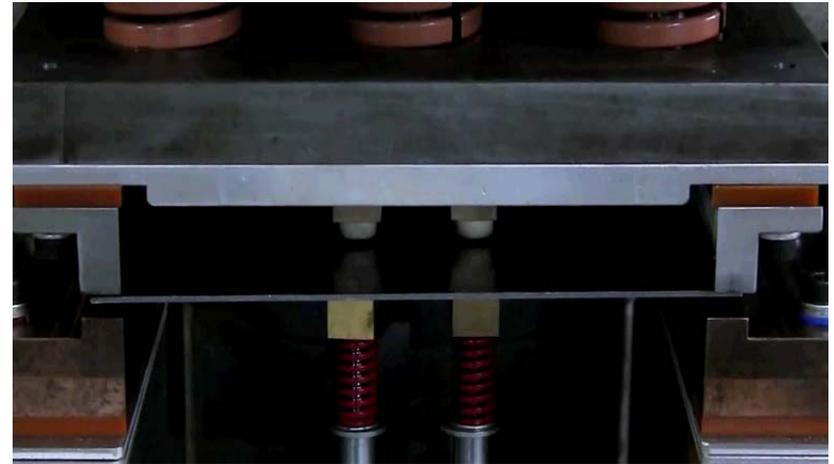
接触圧力 $p=0.9\text{MPa}$
外形間距離 $l=20\text{mm}$



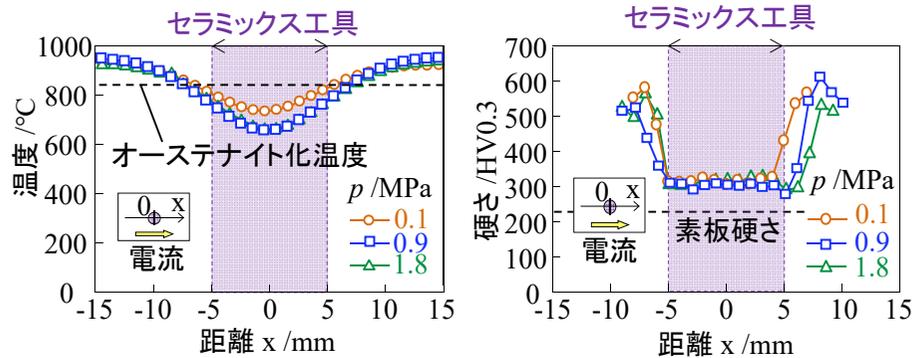
局部昇温抑制および焼入れ実験方法

板押え 7MPa → 通電加熱 930°C

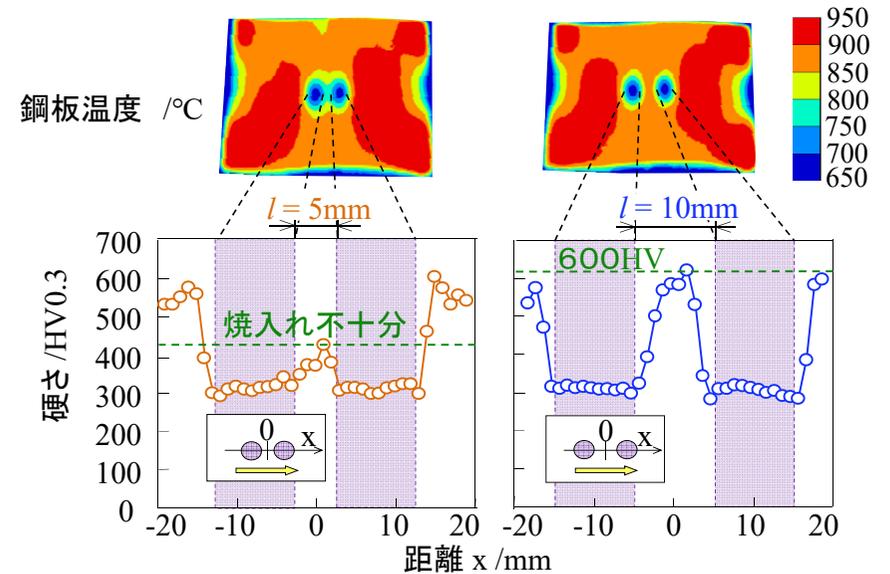
接触圧力 $p=0.9\text{MPa}$
外形間距離 $l=20\text{mm}$



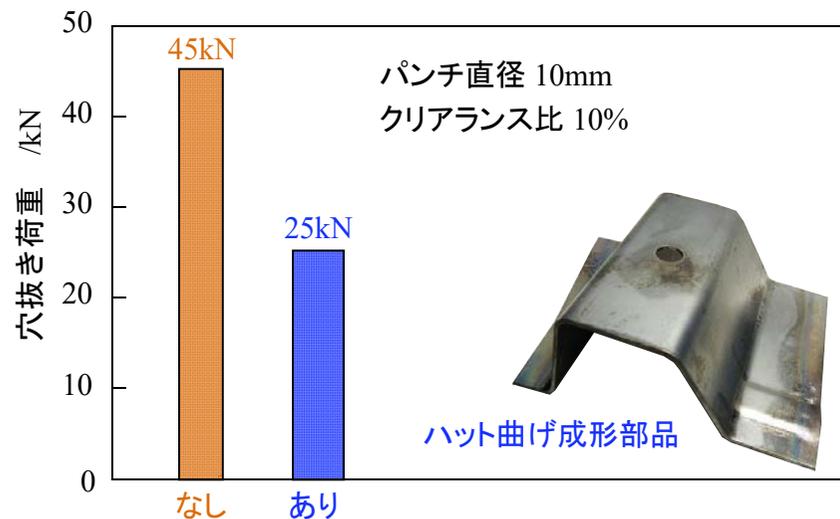
鋼板温度と硬さに及ぼす接触圧力の影響



焼入れ防止部間の温度と硬さに及ぼすセラミックス工具の外形間距離の影響



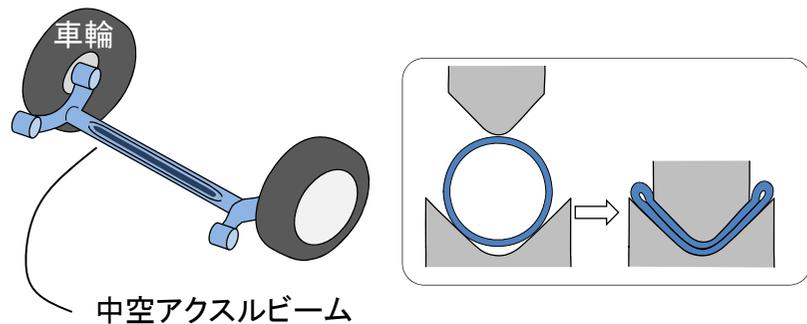
焼入れ防止の有無における最大穴抜き荷重 および穴抜き加工後の成形部品



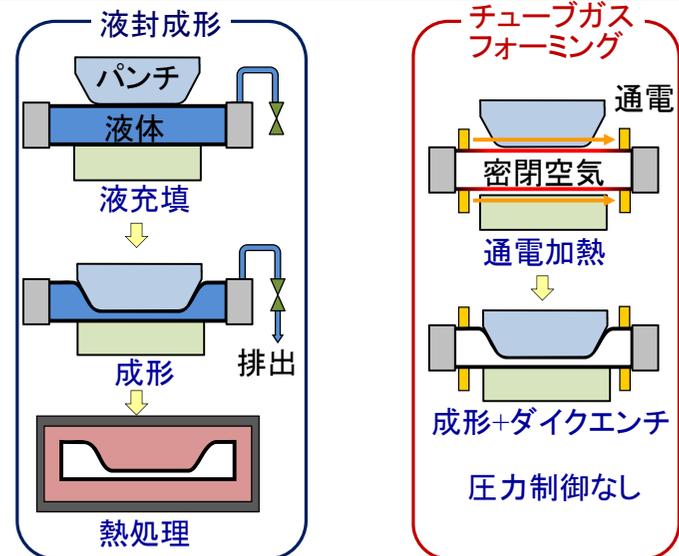
通電加熱ホットスタンピングシステム

- 通電加熱
 - 構成要素ごとの解説
 - 硬さのばらつきと安定化
 - 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去
- 成形前ブランキングを有するホットスタンピング
- 順送通電加熱ホットスタンピング
- マルテンサイト系ステンレス合金のホットスタンピング
- セラミクス工具を用いた局部焼入れ防止
- 管材の通電加熱ホットスタンピング
- 容器側壁のスプライン成形

超高強度鋼中空部材のホットスタンピング



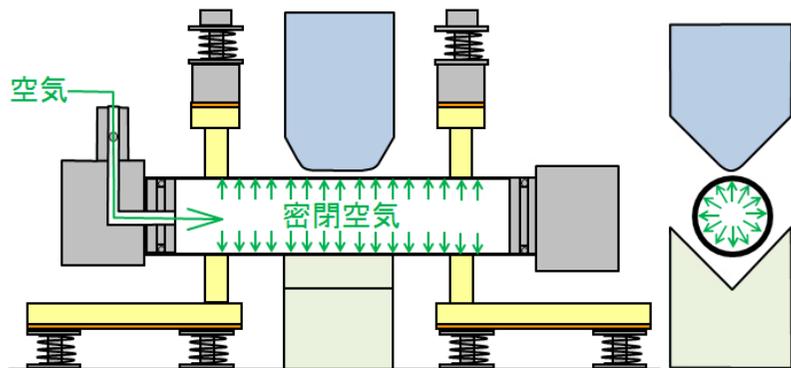
液封成形とチューブガスフォーミング



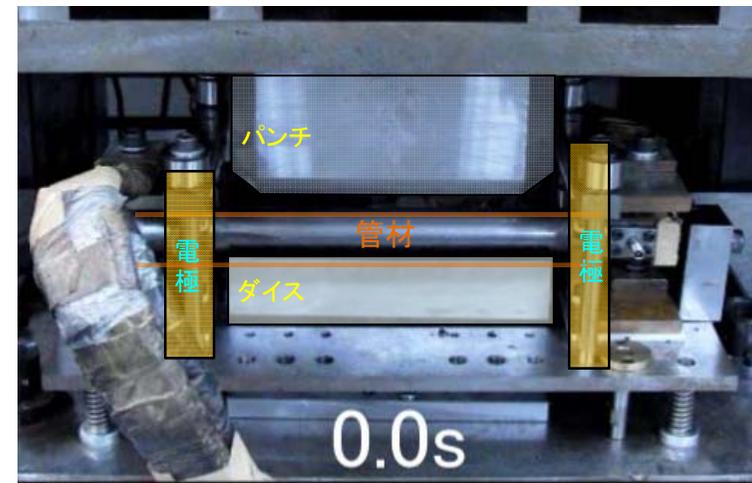
チューブガスフォーミング方法

電流密度 $33.2\text{A}/\text{mm}^2$
 通電加熱時間 7.5s

初期内圧 $p_0=0.0\text{MPa}\sim 1.5\text{MPa}$
 下死点保持時間 $t_f=5\sim 60\text{s}$



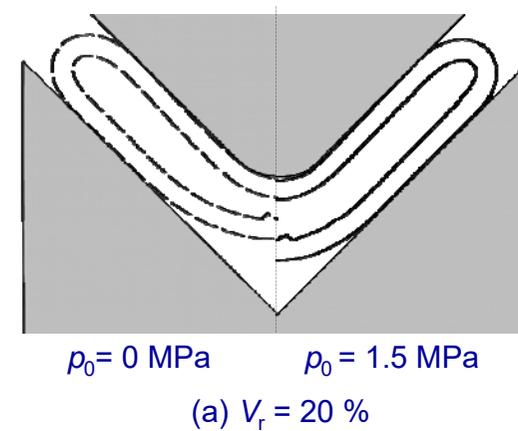
チューブガスフォーミング 体積圧縮=60%, 初期内圧=0.75MPa



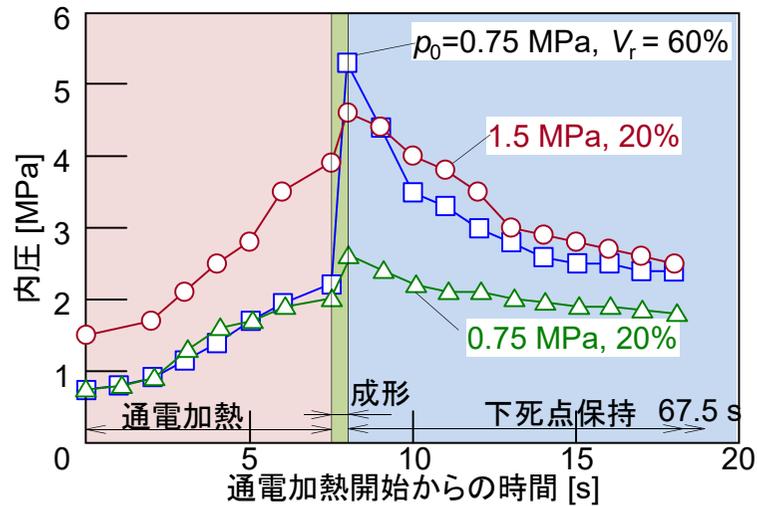
チューブガスフォーミングされた管材 $p_0=1.5\text{MPa}$



$V_r=20\%, 60\%$ において成形された管材断面



ホットチューブフォーミング中の内圧変化
 $p_0=0.75\text{MPa}$, 1.5MPa , $V_r=20\%$, 60%



通電加熱ホットスタンピングシステム

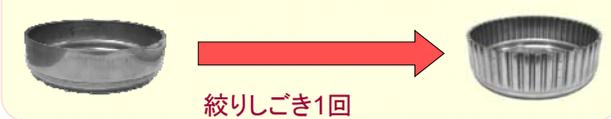
- 通電加熱
 - 構成要素ごとの解説
 - 硬さのばらつきと安定化
 - 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去
- 成形前ブランキングを有するホットスタンピング
- 順送通電加熱ホットスタンピング
- マルテンサイト系ステンレス合金のホットスタンピング
- セラミクス工具を用いた局部焼入れ防止
- 管材の通電加熱ホットスタンピング
- 容器側壁のスプライン成形

ギアドラム側壁のスプライン成形



加工荷重大
延性低

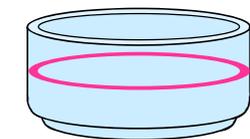
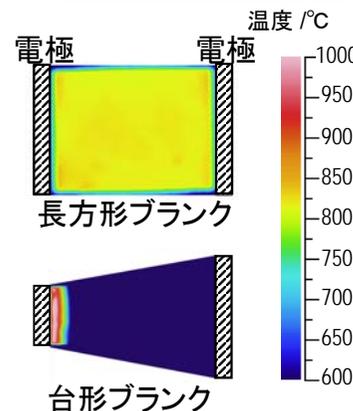
熱間スプライン成形



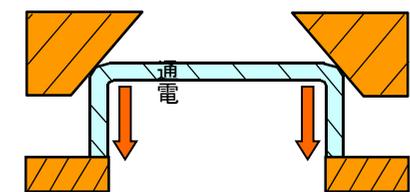
加工荷重小
延性高

容器側壁部への通電加熱の適用

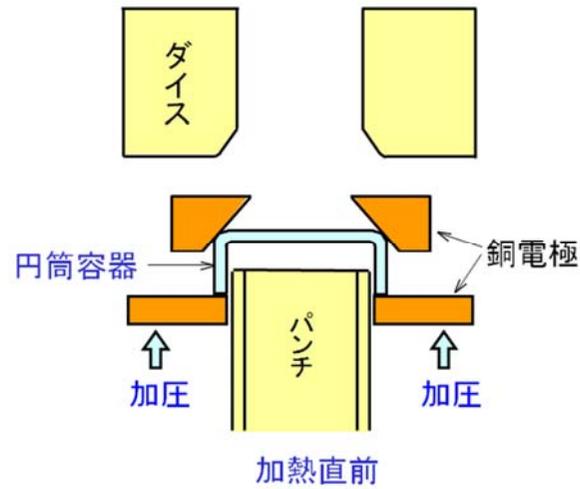
通電加熱
 急速加熱
 酸化スケールの抑制



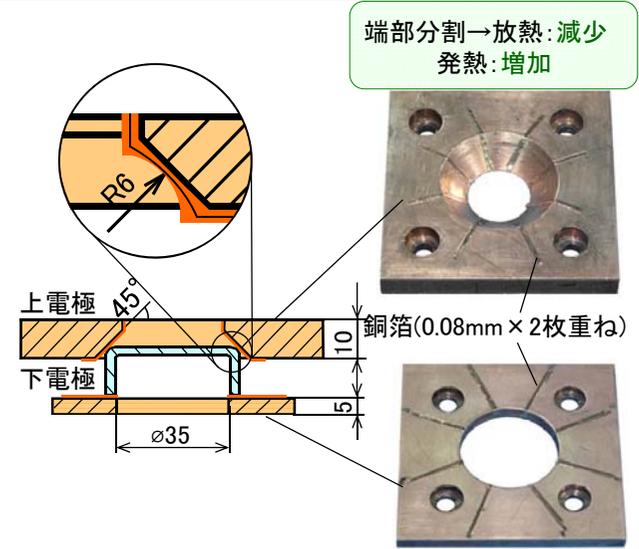
容器側壁 → 断面積一定



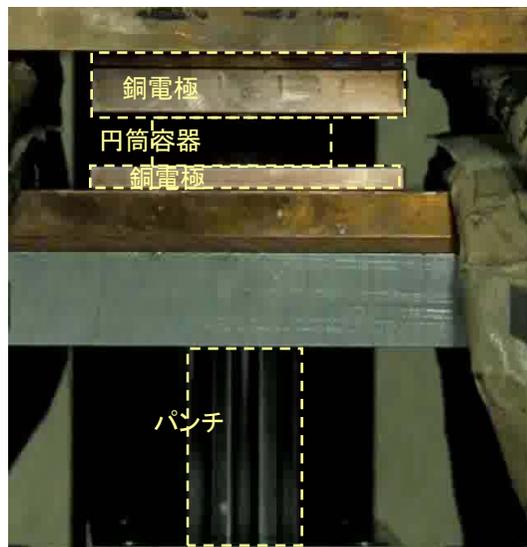
通電加熱による円筒容器の熱間スプライン成形プロセス



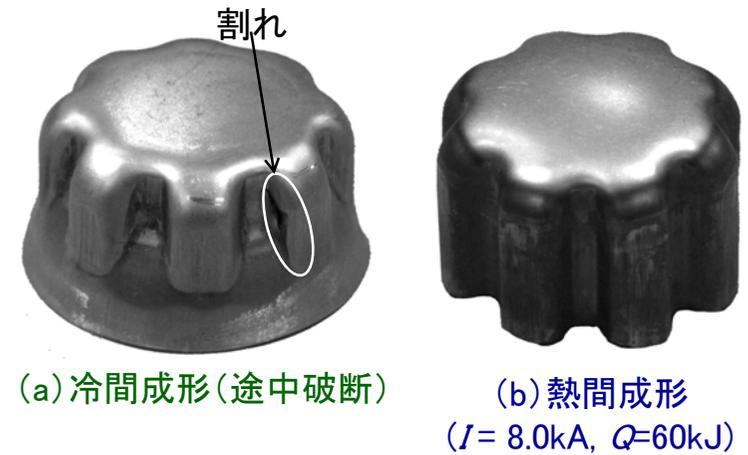
圧縮空気を用いた強制空冷方法



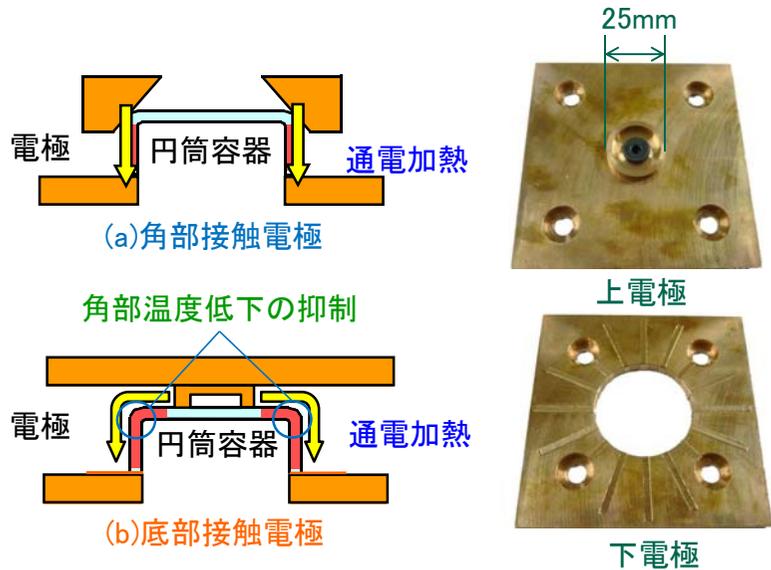
通電加熱を用いた熱間スプライン成形の様子 (I = 8kA, Q = 60kJ)



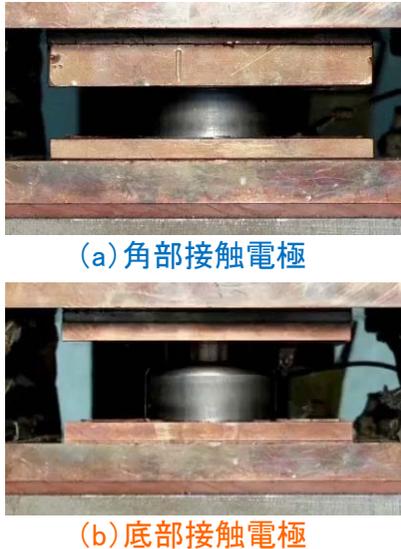
スプライン成形後の高張力鋼容器外観



底部接触電極



底部接触電極を用いた通電加熱の様子 (Q = 25 kJ)



底部接触電極を用いたスプライン成形結果

