通電加熱ホットスタンピングシステム

豊橋技術科学大学 前野 智美

数秒で鋼板を加熱することのできる通電加熱ホットスタンピングは、加熱設備の小型化、プレス設備と同期した加熱、酸化スケールの低減、部分加熱などが可能になり現状の炉加熱のホットスタンピングに対して多くのメリットが期待できる技術である。ここでは、通電加熱ホットスタンピングシステムについて、これまでの開発を通して得られた知見について経験的な内容も含めて紹介する。

通電加熱ホットスタンピングシステム

豊橋技術科学大学 前野智美





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



- 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

薄板以外への適用

- 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

..... 加熱時間 X Δ 0 0 均一加熱 0 0 Δ Δ 0 O Δ 異形材 X Δ 設備コスト コイル設計 素材形状限定 大型設備 金属:低効率 特徴× 通電条件

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

配線:効率,磁化,段取り

- たわみ導体
- ・ブスバー
- 取り回し

電極:温度分布,耐久性

- 材質
- 形状, 接触方法
- ・板押え方法

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

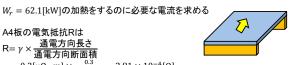
Q =体積×密度×比熱 $=96[cm^3] \times 7.8[g/cm^3] \times 461[J/kg \cdot {}^{\circ}C]$ =310.7[kJ]



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 $W=rac{W_r}{0.7}=88.6[kW]$



必要な電流/は

A4板の電気抵抗Rは

R= γ × 通電方向長さ 通電方向断面積

$$W = I^{2}R$$

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

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

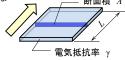
電流密度と通電時間による管理



I[kA] の電流を $t_e[s]$ 通電した時の電力量Qは

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

投入電力量
$$Q$$
と温度上昇 ΔT の関係
$$Q = cm\Delta T = cpAL\Delta T \quad (2)$$
 $(c: 比熱, m: 質量, p: 密度)$



(1),(2)式より』T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、後半の厚さ、長さ、幅が変わっても ほぼ同じ加熱ができる.

通電加熱ホットスタンピングシステムの要素

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



電源:

- ・制御方法、パラメータ
- 容量
- ・プレス機の同期
- 材質
- •形状. 接触方法

電極:温度分布,耐久性

・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

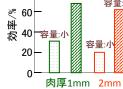


大電流を流す⇨配線の発熱大 極力配線の抵抗は小さく



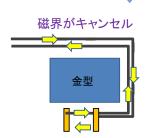
たわみ導線

アルミニウム合金管の加熱 100 80 容量:大 容量:大



思ったより硬い→段取り? 定格0.5kA

配線:取り回し





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

配線:効率,磁化,段取り

- たわみ導体
- ブスバー
- 取り回し

電極:温度分布,耐久性

- 材質
- •形状,接触方法
- ・板押え方法

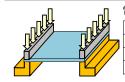
金型:

- •金型内加熱, 金型外加熱
- ∙搬送
- •絶縁,締結

測定:

-温度測定

電極:



電極押さえ圧

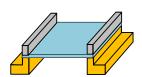
板厚 [mm]	平均面圧 [MPa]
1~1.6	4~7
3~4	20~40
管材	2MPa

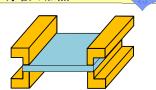




エアシリンダ

電極: 厚板の加熱



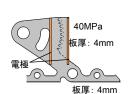


厚板の通電加熱の問題点

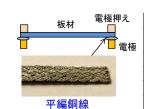
- ・板の剛性が高く電極になじまない
- ・ワークの抵抗が低く、大電流が必要

接触抵抗を減らす

- •高接触面圧 •上下面電極
- •平編銅線

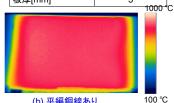


平編銅線による電極の不均一接触防止







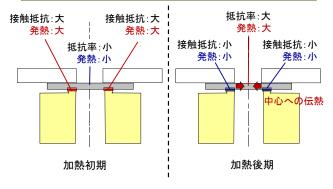


(a) 平編銅線なし

ガススプリング

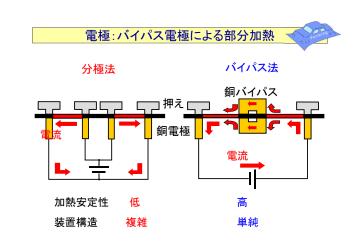
(b) 平編銅線あり

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



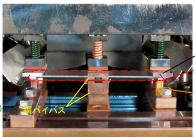


電極:バイパス電極による部分加熱

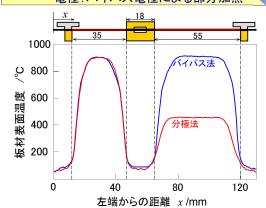








電極:バイパス電極による部分加熱



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

配線:効率,磁化,段取り

- たわみ導体
- ・ブスバー
- 取り回し

電極:温度分布,耐久性

- 材質
- 形状, 接触方法
- ・板押え方法

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





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 通電時間: 3.22s 加熱温度: 900℃ 1部品あたりの成形時間: 3spm 連続成形回数: 4 ブランタ 建建基 銅電極 成形 通電加熱 (1) 板材搬送 (2) 通電加熱, 成形+ダイクエンチ □ (1)(2)の繰り返し<

金型: 加熱とダイクエンチの同期

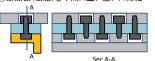




金型: 絶縁構造



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 (本数多め、タップ深め)

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 樹脂カラー

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

配線:効率,磁化,段取り

- たわみ導体
- ・ブスバー 取り回し

電極:温度分布,耐久性

- 材質
- •形状. 接触方法
- ・板押え方法

金型:

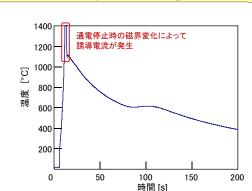
- •金型内加熱, 金型外加熱
- ∙搬送
- •絶縁,締結

測定:

•温度測定

温度の測定一熱電対一





温度の測定一放射温度計一





サーモグラフィ

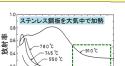


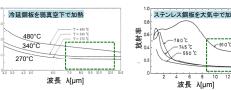
スポット放射温度計

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





放射率

炉加熱:安定した酸化膜やめっき層→放射率やや安定 通電加熱:酸化が進行中→放射率不安定

ジャパンセンサ-9600円/本

正確な温度測定には黒体塗料の塗布が必要

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



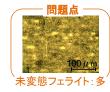
- 通電加熱
 - 構成要素ごとの解説
 - 硬さのばらつきと安定化
 - 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去

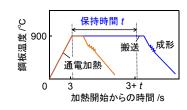
薄板以外への適用

- 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



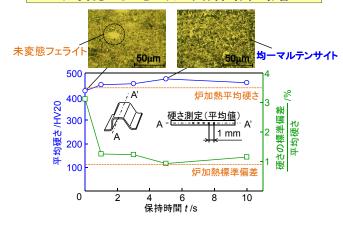




熱間プレス成形用鋼板 155×90×1.6 mm 通電加熱 900℃(3.2 s) → 最高温度保持(t=10 s) → ダイクエンチ



平均硬さばらつきに及ぼす保持時間の影響



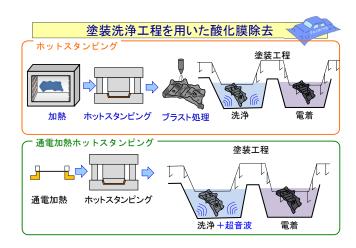
酸化スケール厚さに及ぼす保持時間の影響 スケール厚さ= t₁-t₂ 酸洗前 酸洗後 (a)成形品 (b)切り出し (c)酸洗 (d)測定 炉加熱酸化スケール厚さ 炉加熱成形品 温度保持あり 低速昇温 10 6 8 通電加熱成形品 保持時間 /s

通電加熱ホットスタンピングシステム マ

- 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

薄板以外への適用

- 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



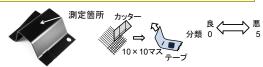


洗净余件		
薬品アルカリ洗浄液		
pН	10	
洗浄時間	4min	

クロスカット試験

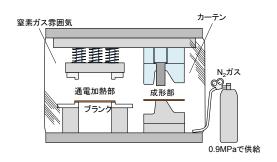
ノーバルノログ				
	超音波あり	超音波なし		
(a)脱脂あり	NG(99/100)	NG(100/100)		
(b)脱脂なし	OK(0/100)	NG(35/100)		

酸化スケール除去ありとなしにおける クロスカット試験(酸性)

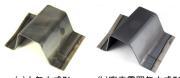


	潤滑剤なし	潤滑剤あり
(a) 超音波酸洗浄なし	分類5(98/100)	5 (80/100)
(b) 超音波酸洗浄あり	分類0 (0/100)	0 (0/100)

不活性ガスによる酸化防止

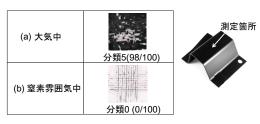


不活性ガスによる酸化防止



(a)大気中成形

(b)窒素雰囲気中成形



通電加熱ホットスタンピングシステム

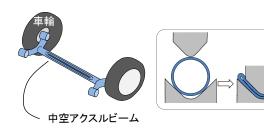


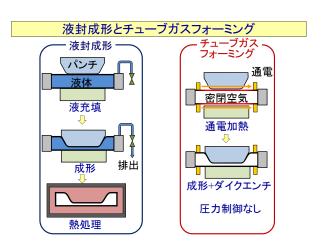
- 通電加熱
 - 構成要素ごとの解説
 - 硬さのばらつきと安定化
 - 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去

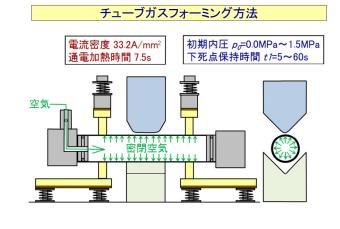
薄板以外への適用

- 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

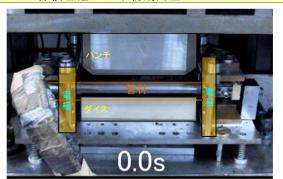
超高強度鋼中空部材のホットスタンピング







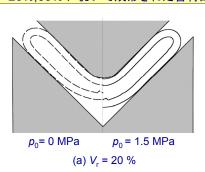
チューブガスフォーミング 体積圧縮=60%, 初期内圧=0.75MPa



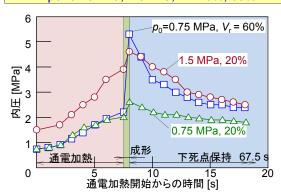
チューブガスフォーミングされた管材 p₀=1.5MPa



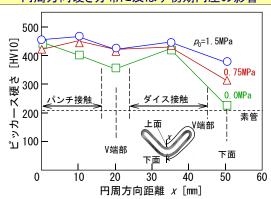
Vr=20%,60% において成形された管材断面



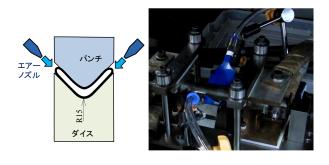
ホットチューブフォーミング中の内圧変化 p0=0.75MPa, 1.5MPa, Vr=20%, 60%



円周方向硬さ分布に及ぼす初期内圧の影響



圧縮空気を用いた強制空冷方法



通電加熱ホットスタンピングシステム マ

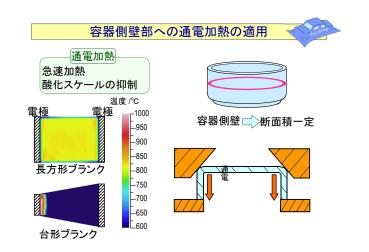


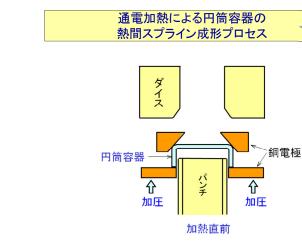
- 通電加熱
 - 構成要素ごとの解説
 - 硬さのばらつきと安定化
 - 塗装洗浄工程を用いた酸化スケール除去

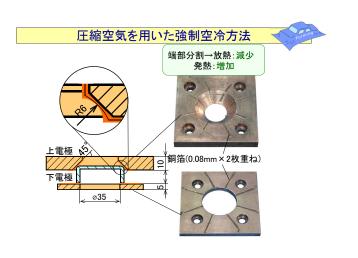
薄板以外への適用

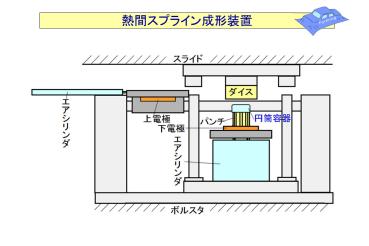
- 管材の通電加熱ホットスタンピング
- ・ 容器側壁のスプライン成形

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 熱間スプライン成形 熱間スプライン成形 がりしごきな形 加工荷重小 延性高

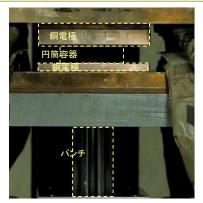








通電加熱を用いた熱間スプライン成形の様子 (/ = 8kA, Q = 60kJ)



スプライン成形後の高張力鋼容器外観。





(a)冷間成形(途中破断)

(b)熱間成形 (I= 8.0kA, Q=60kJ)

底部接触電極 25mm



角部温度低下の抑制



(b)底部接触電極



上電極



下電極

底部接触電極を用いた通電加熱の様子 (Q = 25 kJ)



(a)角部接触電極



(b)底部接触電極

底部接触電極を用いたスプライン成形結果



角部:640℃ 中心部:960℃



角部:630℃ 中心部:640℃





(a)角部接触電極



(b)底部接触電極