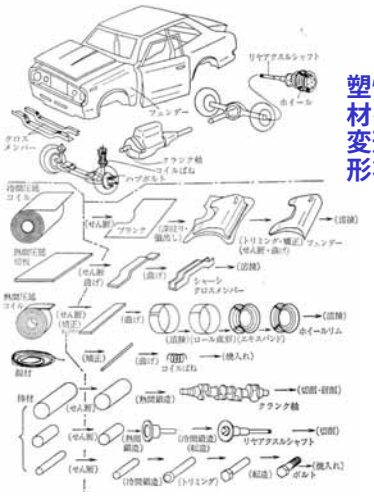
板材成形・鍛造加工の
有限要素シミュレーション

ものづくりプロセスのＣＡＥ

豊橋技術科学大学
森　謙一郎



塑性加工：金属素材を金型で塑性変形させて所定の形状に成形

図　自動車部品の塑性加工

ー　有限要素シミュレーション　ー

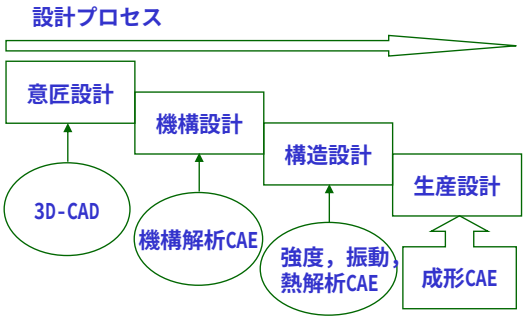
- 全般
- 板材成形
- 鍛造加工

CADとCAE

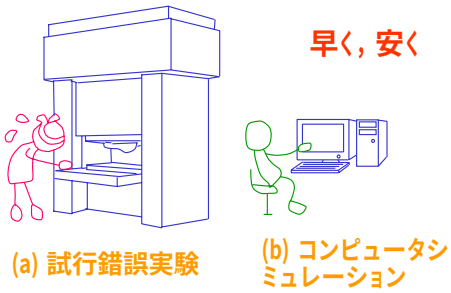
CAD
(Computer Aided Design)
図面作成，図形処理

CAE
(Computer Aided Engineering)
計算機シミュレーション
有限要素法，差分法，境界要素法

設計プロセスとCAE



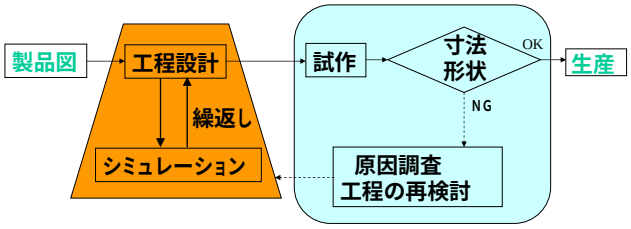
計算機支援技術



シミュレーションを用いた工程設計

開発期間　短縮
コスト　　低減

試作を１回に短縮



- 得たい情報
  - –塑性変形，温度分布，
    工具の変形，欠陥予測，
    材料組織

塑性加工用有限要素法の歴史

60
- 弾性有限要素法：航空機の設計
- 弾塑性：微小変形理論
- 剛塑性：平面応力

70
- 弾塑性：大変形理論
- 剛塑性：ﾗｸﾞﾗﾝｼﾞｭ乗数法，ﾍﾟﾅﾙﾃｨ法，圧縮特性法

80
- 各種加工法への適用：　摩擦，接触問題，定常変形

90
- 実加工への応用：板成形，鍛造，圧延，引抜き
- 動的陽解法
- 市販ソフトウェアの機能充実：ﾌﾟﾘ･ﾎﾟｽﾄ

有限要素法で取扱える特性

1）変形抵抗
加工硬化，ひずみ速度依存性，異方性，
温度依存性
2）摩擦
摩擦係数，摩擦せん断係数
3）加工による組織変化
圧延加工，鍛造加工，板材成形
4）　粉末成形における圧縮性
圧粉成形，焼結金属
5）慣性力
高速加工

塑性加工の有限要素シミュレーション

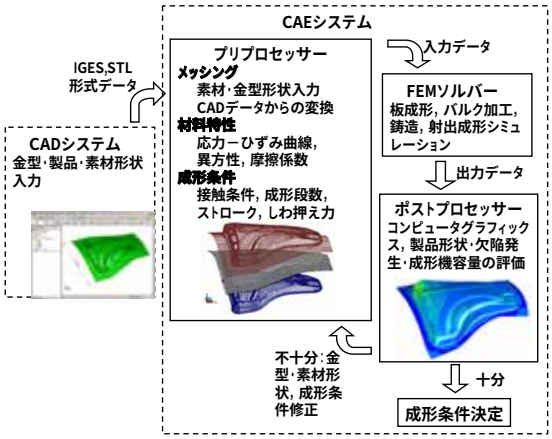
1) 鍛造加工
軸対称鍛造，3次元鍛造，座屈，割れ発生の予測，温度分布
2) 押出し･引抜き加工
軸対称変形，3次元変形，割れ発生の予測，温度分布
3) 板材成形
深絞り，曲げ，張出し，3次元成形，異方性，成形限界，温度分布，組織予測，クラッド材
4) 粉末成形
粉末鍛造，圧粉成形，焼結，金属粉末射出成形
5) 圧延加工
平面ひずみ圧延，3次元圧延，厚板圧延，エッジング圧延，管材圧延，孔型圧延，組織予測
6) 切削･せん断加工
平面ひずみ，3次元変形，材料の分離
7) 表面処理
ショットピーニング

塑性加工用市販ソフト

- 統合システム
  塑性変形，工具の弾性変形，温度
- 3次元解析
- プリ･ポスト処理
- 高価，信頼性

塑性加工用市販ソフト

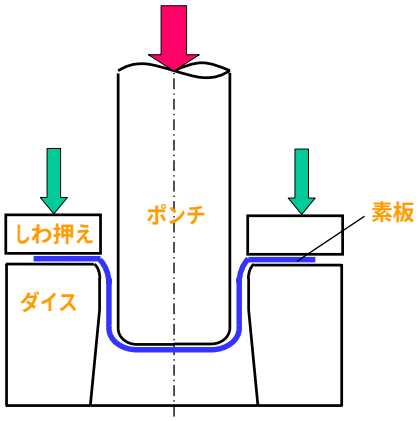
- 動的陽解法：LS-DYNA，JSTAMP，PAM-STAMP，OPTRIS，RADIOSS
- 静的陰解法：JOH/NIKE，MARK
- 静的陽解法：ASTOM3D
- １ステップ法：FAST_FORM3D，HyperForm，Auto Form



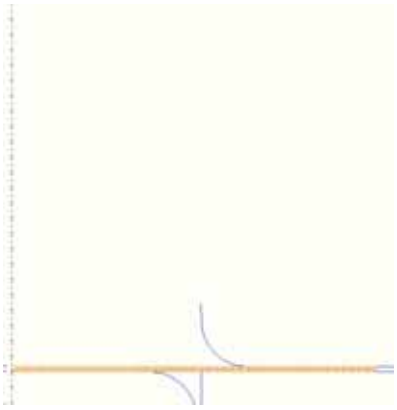
ー　有限要素シミュレーション　ー

- 全般
- 板材成形
- 鍛造加工

円筒の深絞り加工



円筒深絞り加工



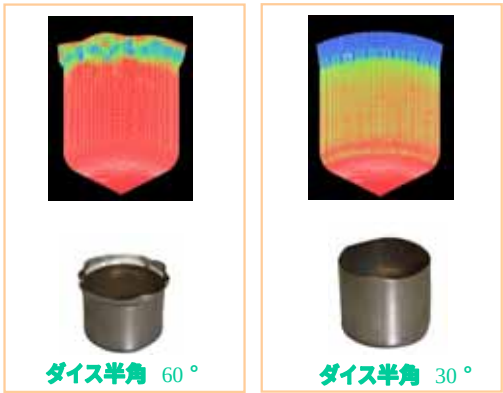
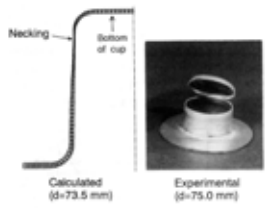
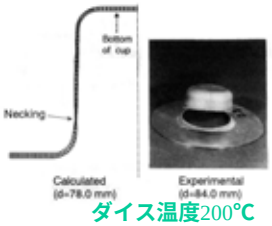


図　深絞り加工におけるしわの発生



ダイス温度100℃



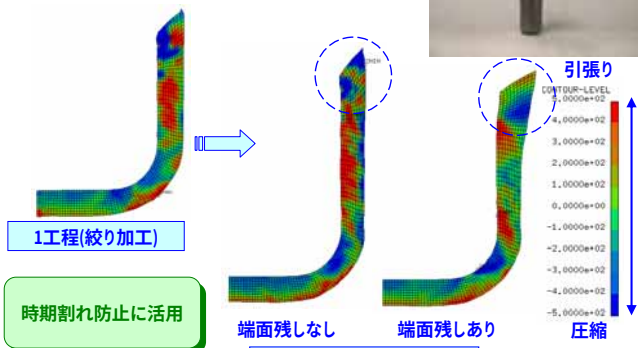
ダイス温度200℃

マルテンサイト変態を考慮したステンレス鋼板の深絞り加工のシミュレーション

変形・温度・
組織変化連成

ステンレス深絞り加工品の
残留応力分布（デンソー）

ステンレス深絞り
加工品の時期割れ



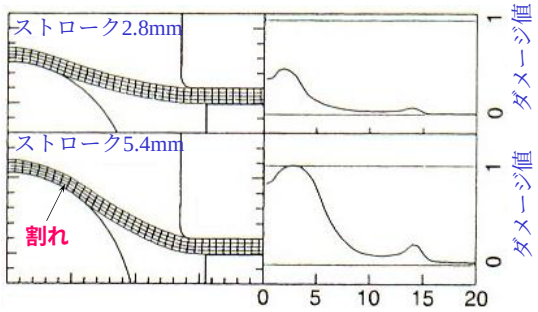
1工程(絞り加工)

時期割れ防止に活用

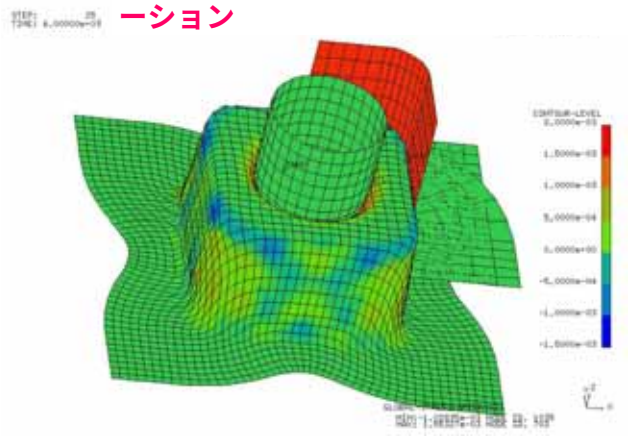
端面残しなし　端面残しあり

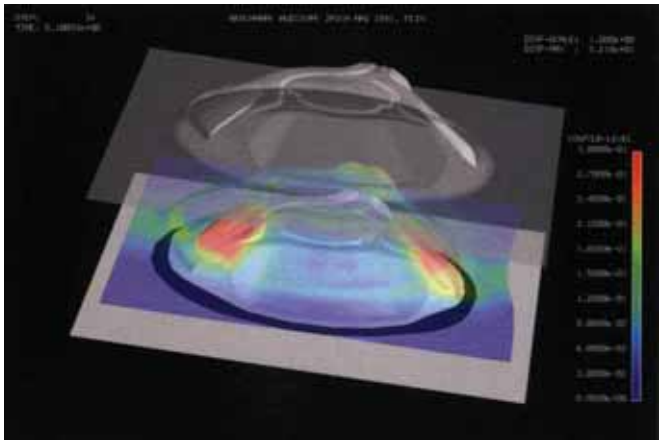
3工程(絞りしごき加工)

アルミニウム合金板の張出し加工における変形形状とダメージ値分布

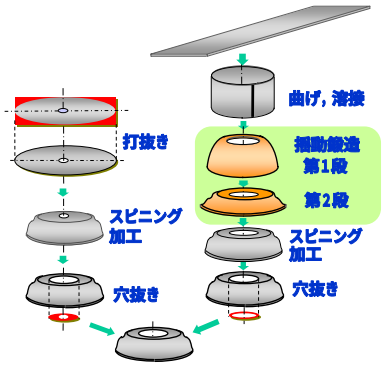


LS-DYNAによる深絞り加工のシミュレーション



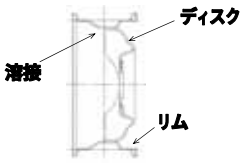


自動車用ホイールの成形



しごき絞り成形による乗用車用ホイール ディスクのフランジ部の肉厚減少

(a) 外観

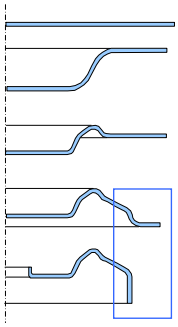


(b) 断面図

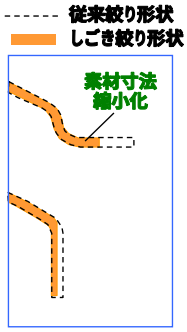
軽量化ニーズ → 強度分布に対応した肉厚分布

ディスク絞り端末部の薄肉化

ディスクのしごき絞り成形

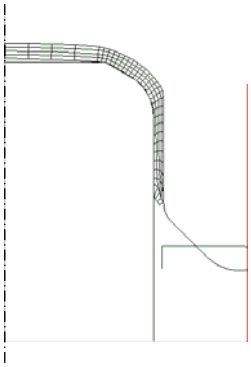


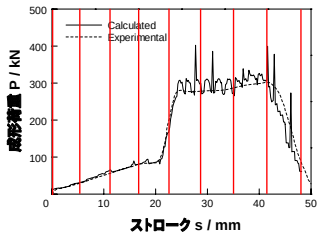
(a) 従来のディスク成形プロセス



(b) 端末部のしごき絞り成形

ディスクのしごき絞り成形





実機ディスク成形の絞りしごき加工

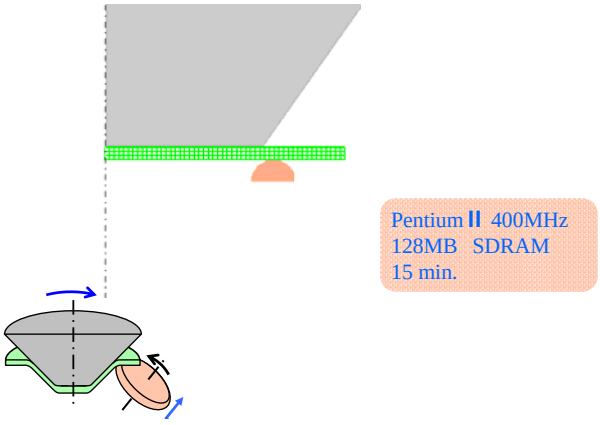
シミュレーション結果

ダイとの接触面圧、しごき率、表面仕上げ状態

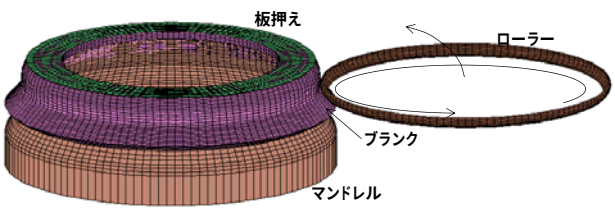
しごき率＝40%

約500g軽量化 (約8%)

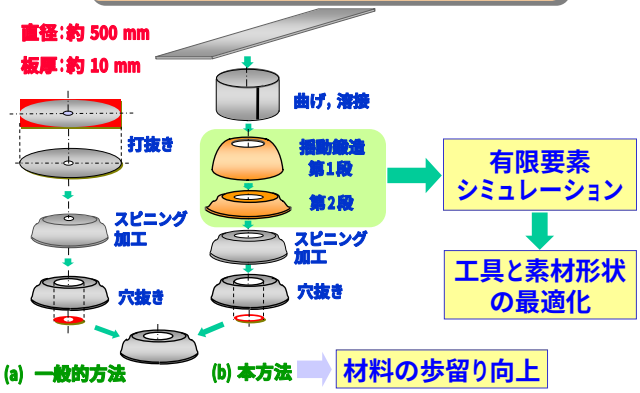
しごきスピニング



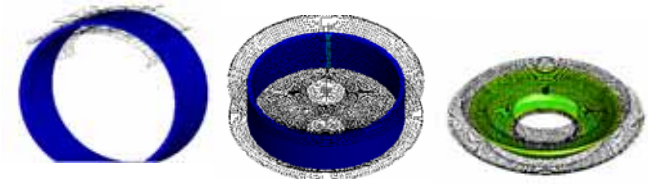
Pentium II 400MHz
128MB SDRAM
15 min.



大型ホイールのディスク成形における近似3次元シミュレーション



ディスク成形の3次元シミュレーション



相当ひずみ (a)先曲げ、EX成形

相当ひずみ (b) 第1段(プレス)

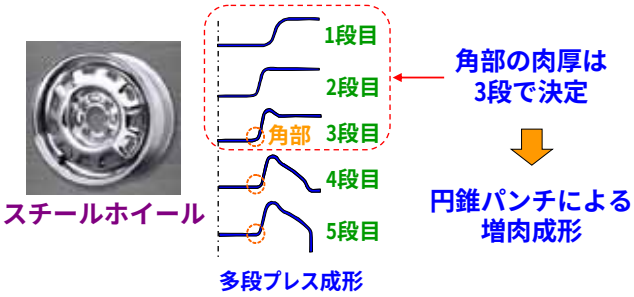
最大主応力 (c) 第2段 (揺動)

シミュレーションで得られた最適条件で成形したディスク

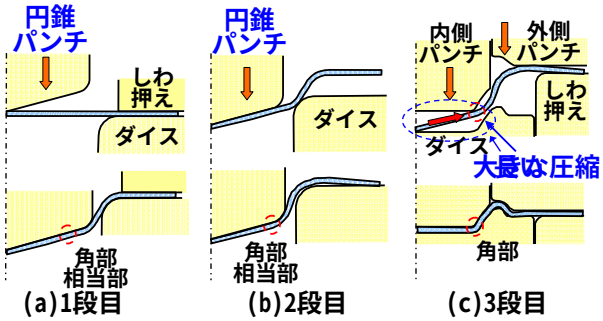
(a) 第1工程　(b) 第2工程

フランジ付き多段絞り容器角部の増肉成形

角部の肉厚は製品強度に大きく影響

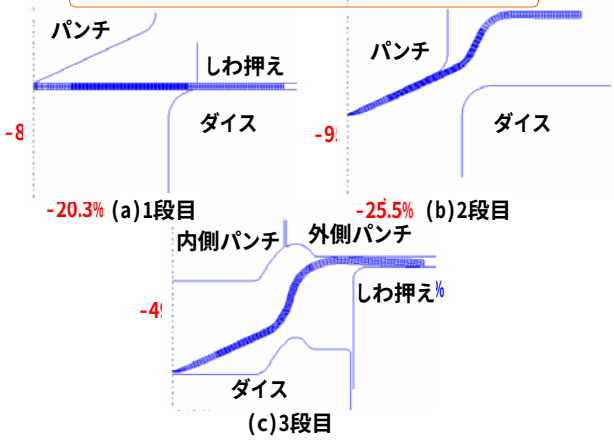


円錐パンチによる増肉成形法

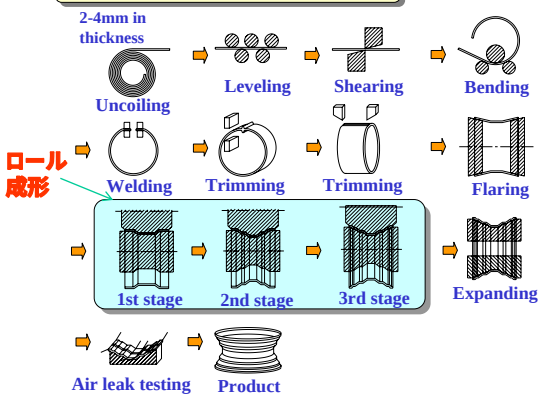


最適な加工条件を求める
円錐パンチ角度, 絞り体積

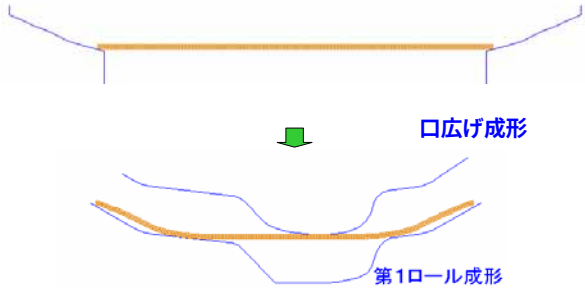
変形挙動(θ =25 ° ,V=7800mm³)



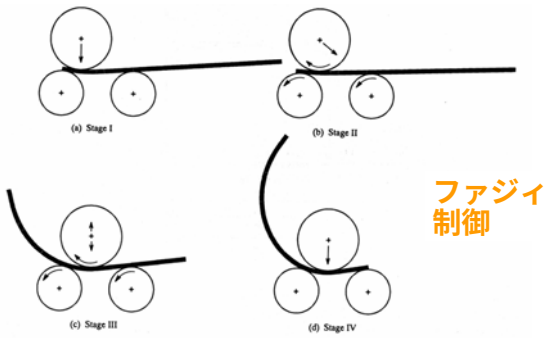
リムの成形プロセス



自動車用スチールリム成形のシミュレーションによる変形挙動

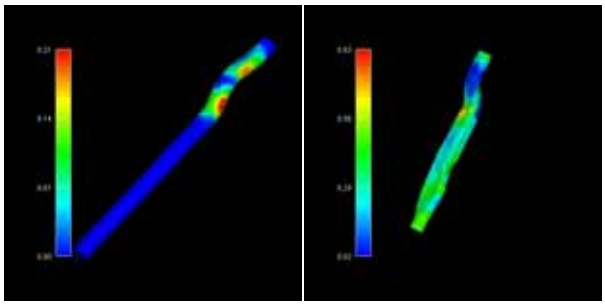


3本ロール曲げ加工の制御FEMシミュレーション



ファジィ制御

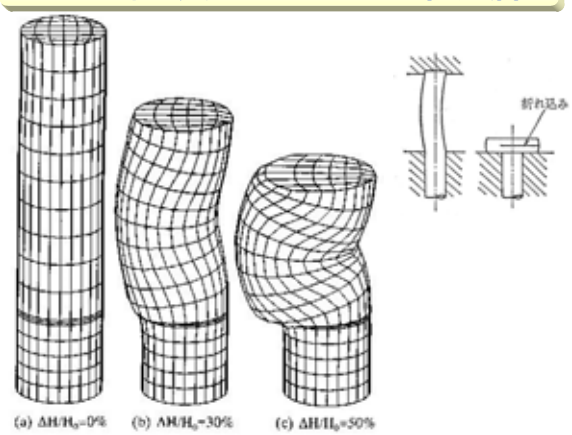
曲げ加工とハイドロフォーミング



ー　有限要素シミュレーション　ー

- 全般
- 板材成形
- 鍛造加工

ヘッディング加工における塑性座屈



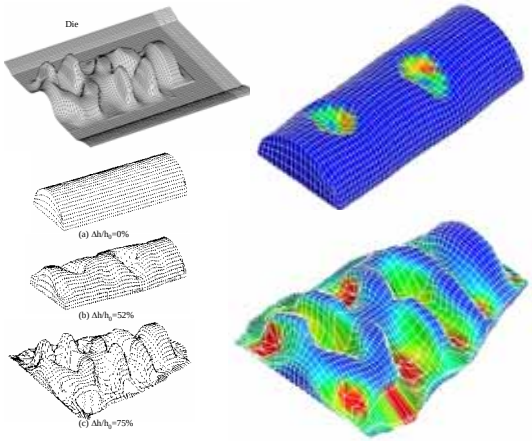


図　クランクシャフトの３次元鍛造

図　多段押出し加工におけるシェブロンクラック

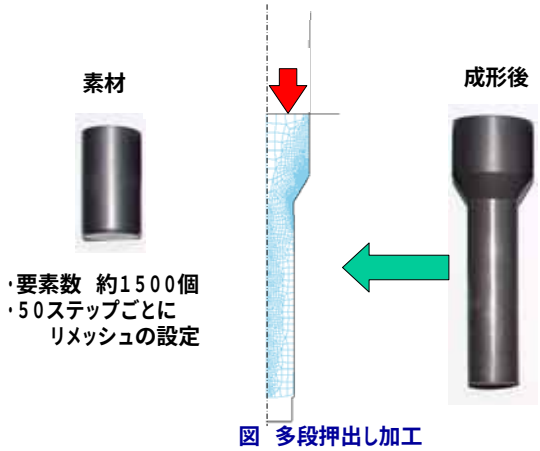


図　多段押出し加工

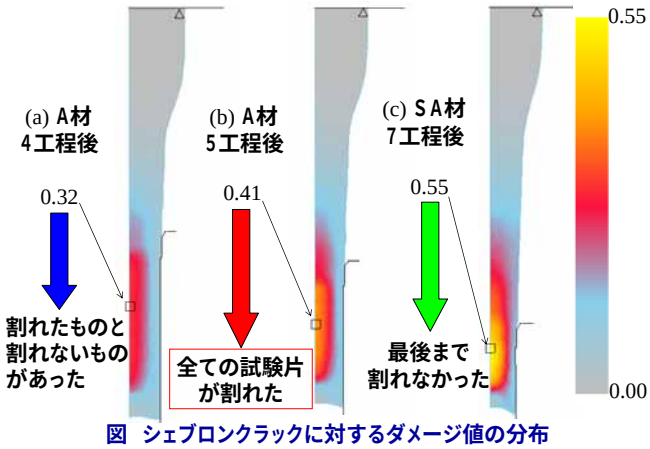
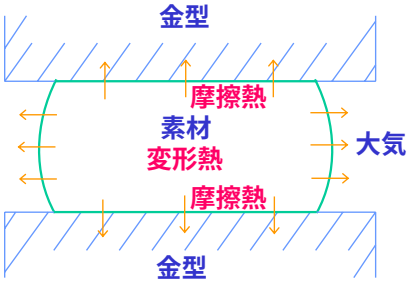


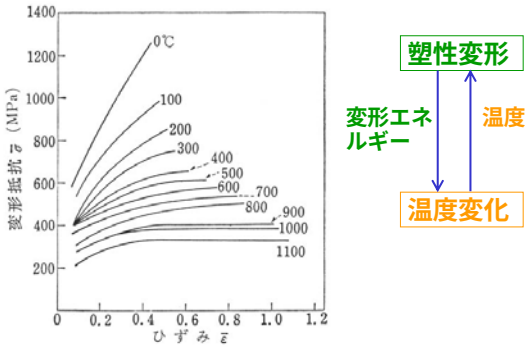
図　シェブロンクラックに対するダメージ値の分布

高温加工における熱発生と熱移動

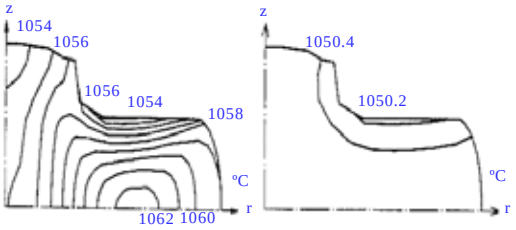


温度分布不均一

ステンレス鋼の変形抵抗曲線

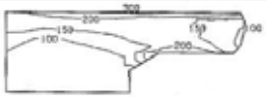


ニッケル基合金の超塑性鍛造のシミュレーションにおける温度分布



(a) v=1mm/s　(b) v=0.05mm/s

ヘッディング加工における温度と残留応力



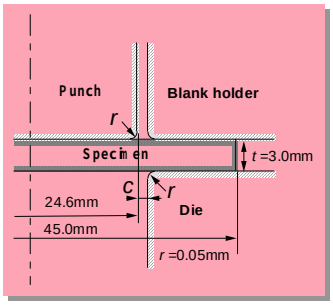
(a) 温度分布

(b) 除荷時の残留応力分布

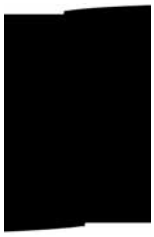
(c) 常温における残留応力分布

変形・温度・温度降下による弾性回復

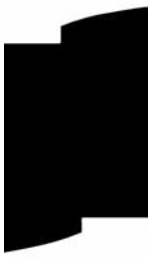
せん断加工のシミュレーション（名大）



亀裂の進展を考慮したせん断加工シミュレーション



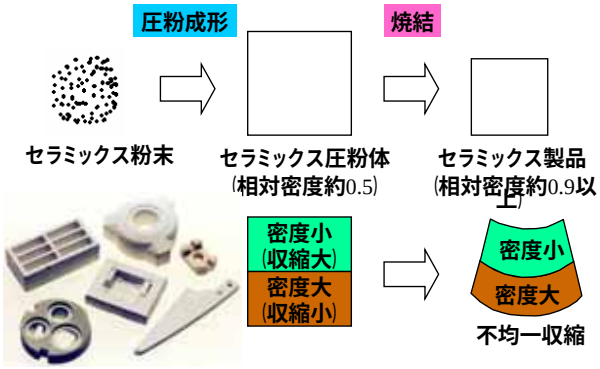
亀裂の進展を考慮したせん断加工シミュレーション



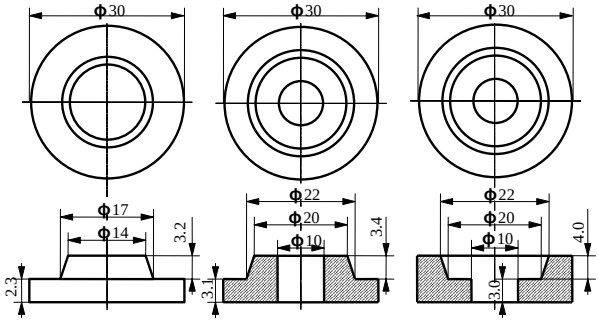
亀裂の進展を考慮したせん断加工シミュレーション

亀裂の進展を考慮したせん断加工シミュレーション

粉末成形と焼結

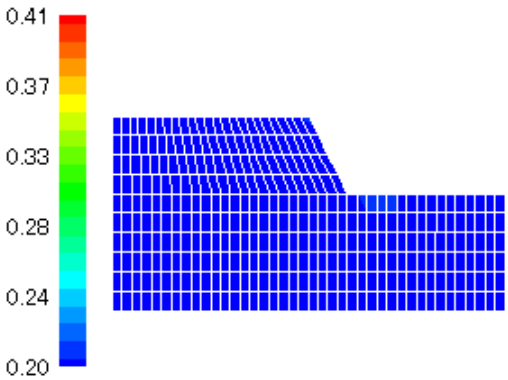


焼結実験に用いた圧粉体の形状

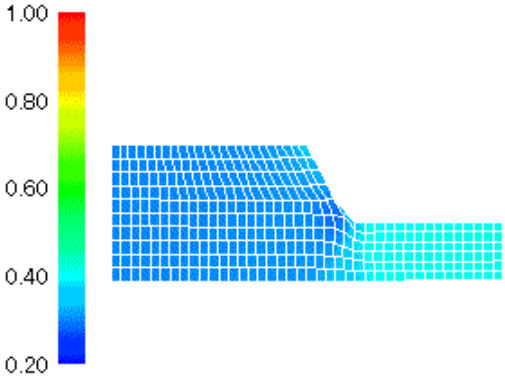


(a) Circular plate (b) Ring with inner boss (c) Ring with outer boss

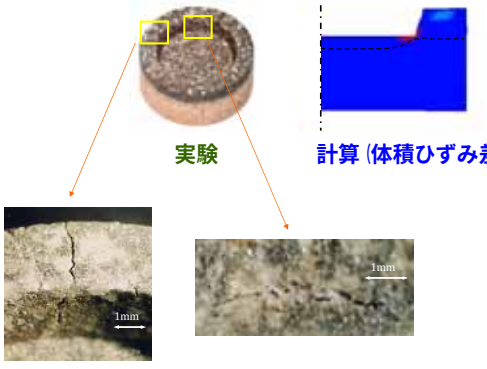
圧粉成形における相対密度分布



焼結における相対密度分布



セラミックスタイルの焼結における割れ予測



軽量部品のプレス成形技術

－環境にやさしい成形技術を目指して－

豊橋技術科学大学

森謙一郎

－　軽量自動車部品の成形　－

100kg軽量：1km/l燃費向上

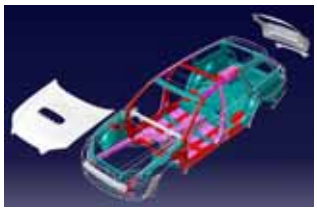
軽量材料の成形

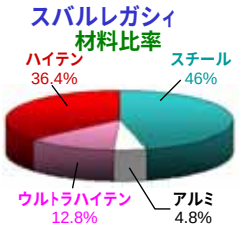
- 超高張力鋼板
- アルミニウム，マグネ，チタン
- 接合

軽量化部品の成形

- 中空部品
- 一体化成形

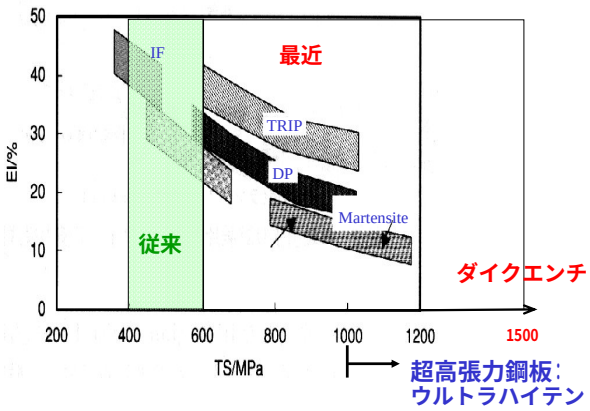
自動車車体への高張力鋼板の適用





トヨタ クラウン，骨格部材の45%が高張力鋼板

高張力鋼板の強度



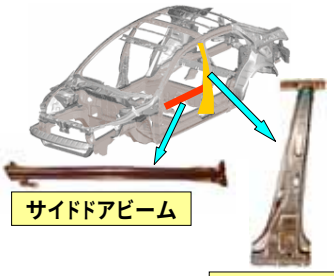
自動車用板材の比強度の比較

板材	引張強さ	比重	比強度
ウルトラハイテン	980～1470MPa	7.8	126～188MPa
従来ハイテン	490～790MPa	7.8	63～101MPa
軟鋼板 SPCC	340MPa	7.8	44MPa
アルミ合金板 A6061(T6処理材)	310MPa	2.7	115MPa

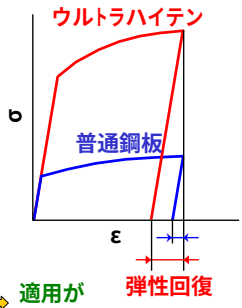
- 低価格
- 成形に関するノウハウの蓄積

ウルトラハイテンの自動車部材への適用

ウルトラハイテン：1GPa以上

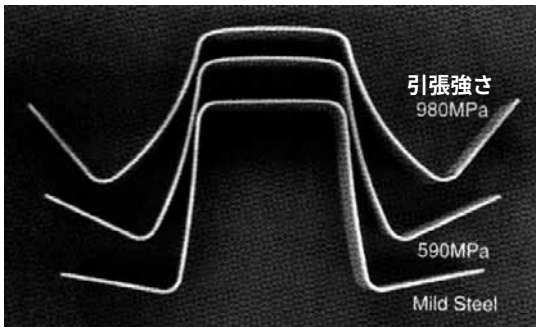


ウルトラハイテンのスプリングバック



スプリングバック：大
形状凍結性：低 ⇨ 適用が限定

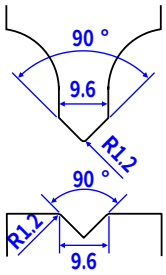
高張力鋼板のハット曲げにおけるスプリングバック

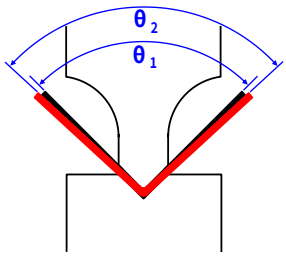


岩谷：プレス技術，42-8(2004)，43

サーボプレス(80tonf)

V曲げ加工における金型形状，決押し率・角度の定義





決押し率 $a = \frac{\text{圧下量}}{\text{初期板厚} \times \sqrt{2}}$

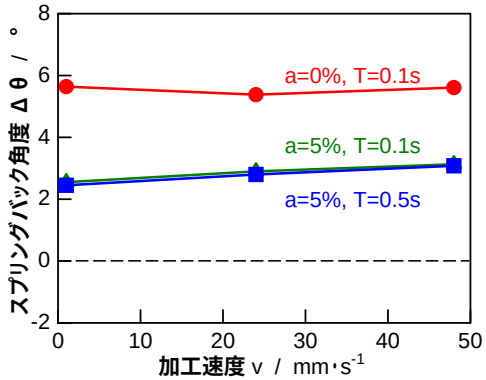
スプリングバック角度 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$

V曲げの変形挙動

(a) SPCC　　(b) SPFC980

設定加工速度：25mm・s^{-1}

V曲げにおけるスプリングバック角度と加工速度の関係 (SPFC980Y)



通電加熱を用いたウルトラハイテンの温・熱間プレス成形

サイドドアビーム

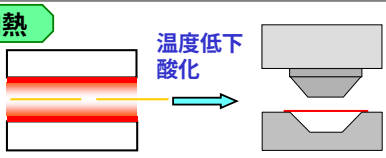
センターピラー

スプリングバック：大
成形性：低

熱間プレス成形
変形抵抗：小
延性：大

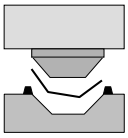
通電型内加熱を用いた温・熱間プレス成形

炉加熱



加熱 → 搬送 → 成形

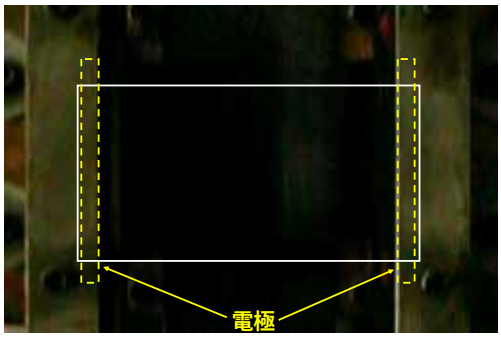
通電加熱



加熱，成形

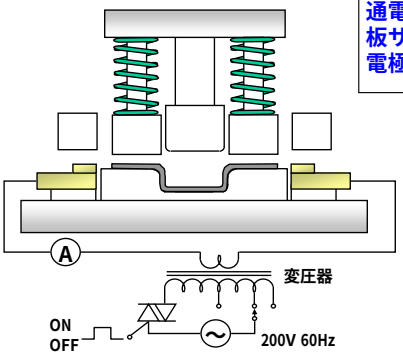
利点
- 小さい温度低下
- プレス作業との同期
- 少ない酸化スケール
- 高い加熱効率

通電加熱の映像（ＳＰＦＣ980）



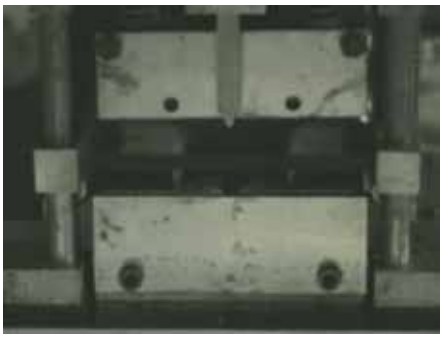
通電加熱ハット曲げ成形装置

実験条件
通電電圧：10V
板サイズ：130mm×20mm
電極中心間距離：120mm



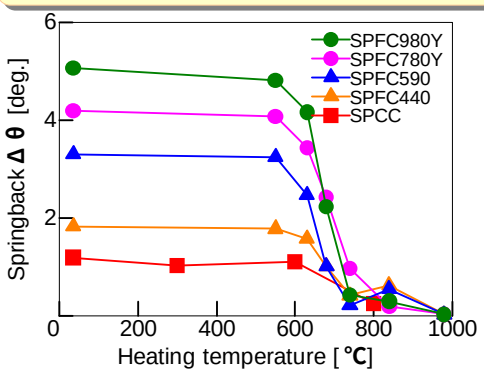
通電
(0.2秒)
プレス
2秒保持

980 ℃における通電加熱ハット曲げ成形

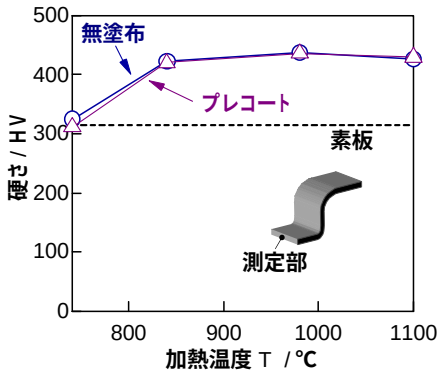


ハット曲げの成形体（SPFC980Y）

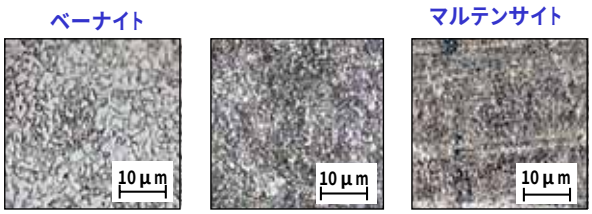
ハット曲げ加工における スプリングバックと加熱温度の関係



ハット曲げ成形体の硬さの変化

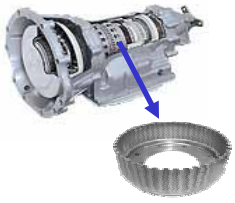


ハット曲げ成形体底面板厚中央部の組織写真



(a) 740℃　(b) 840℃　(c) 980℃

通電急速加熱を用いた管材の熱間歯形成形



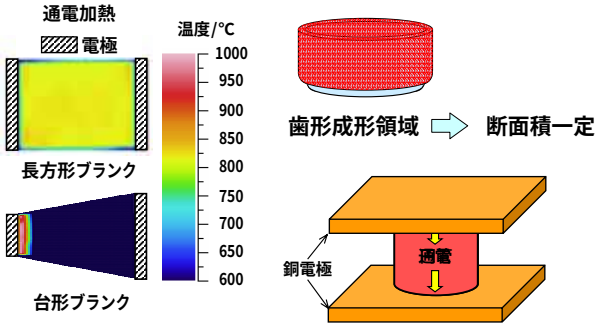
自動車用精密部品

高張力鋼板

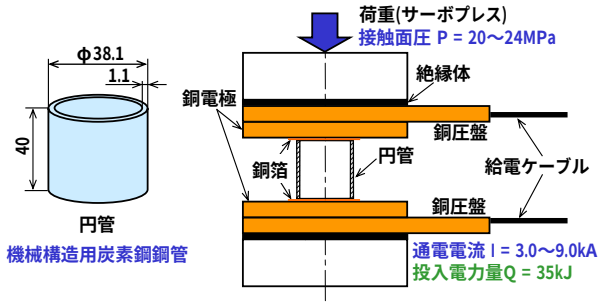
冷間加工
加工荷重大，成形性低

熱間加工
加工荷重低，成形性向上
ダイクエンチによる強度向上

円管端部からの給電による通電加熱

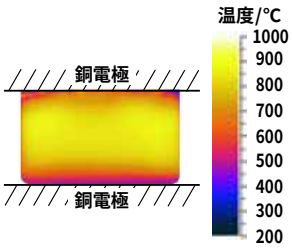


円管の通電加熱実験条件



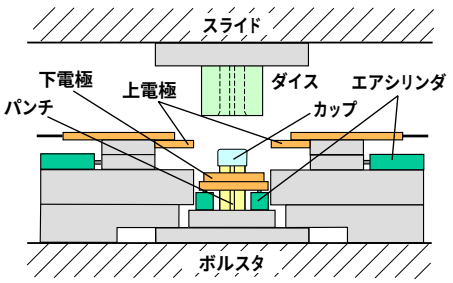
放射状線電極を用いたカップの通電加熱状態 (I=7.0kA)

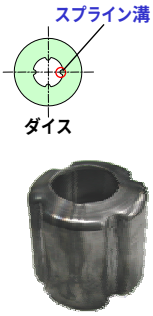
加熱動画



通電完了直後のカップの温度分布

カップの熱間歯形成形



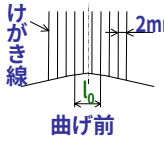


歯形成形後のカップ

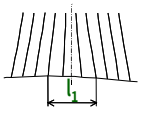
高張力鋼板の伸びフランジ成形における割れ

伸びフランジ割れ

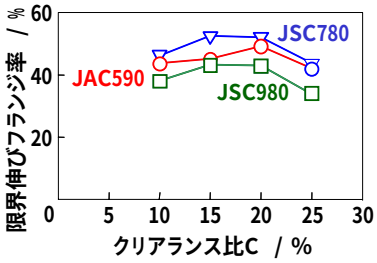
限界伸びフランジ率とクリアランス比の関係



曲げ前

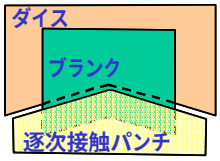


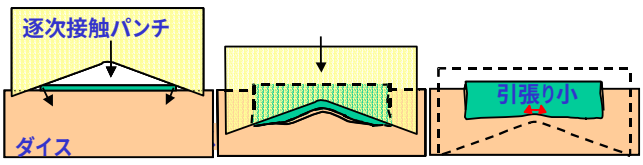
曲げ後



$$\text{伸びフランジ率} = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100/\%$$

逐次接触パンチによる角部引張りの軽減





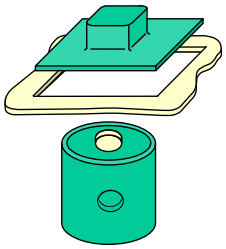
成形前　成形中　成形後

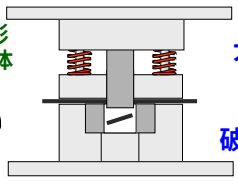
逐次接触パンチによる割れの防止 (JSC780)

(a) α=0°　(b) α=10°

超高張力鋼板のせん断加工

加工硬化した冷間成形体，ダイクエンチ成形体





大きな加工荷重

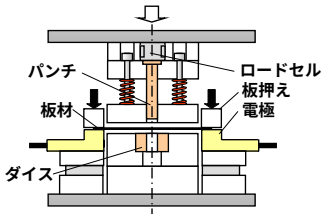
⇩

破損･寿命の低下

トリミング，穴あけ加工

全体加熱せん断加工における切口面性状

サーボプレス



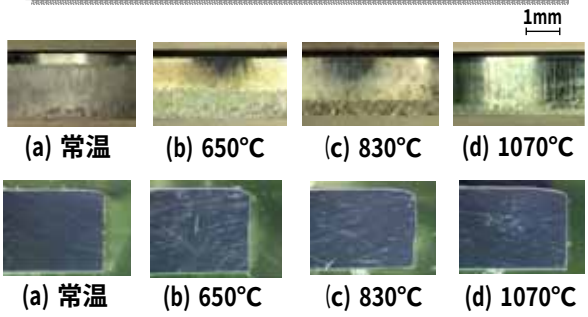
T=1070°C, v=150mm/s

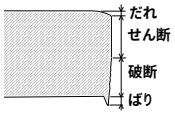
･板材
超高張力鋼板：SPFC980
長さ130mm, 幅50mm, 板厚2.0mm
･穴抜きパンチ
直径：10.0mm
材質：SKH51 (TiCNコーティング)

実験条件

加熱温度 T / ℃	650～1070
クリアランス c / %	5, 10, 15
穴抜き速度 v / mm･s^{-1}	100, 150

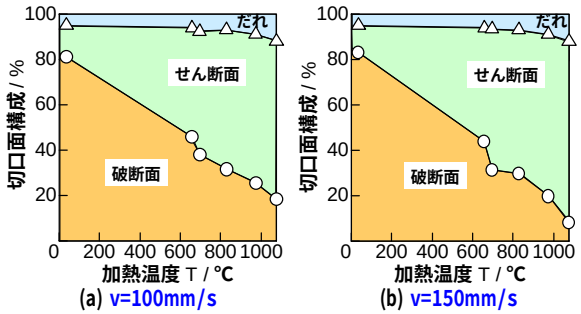
c=5%, v=150mm/sにおける各温度での切口面





加熱温度 高 ⇨ せん断面 増

c=5%における切口面構成の変化



ー　軽量自動車部品の成形　ー

100kg軽量：1km/l燃費向上

軽量材料の成形

- 超高張力鋼板
- アルミニウム，マグネ，チタン
- 接合

軽量化部品の成形

- 中空部品
- 一体化成形

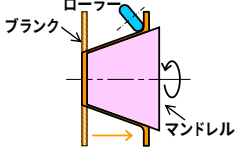
アルミニウム合金鋳物の熱間しごきスピニング加工

鋳造されたアルミホイール

鋳造欠陥→強度 低

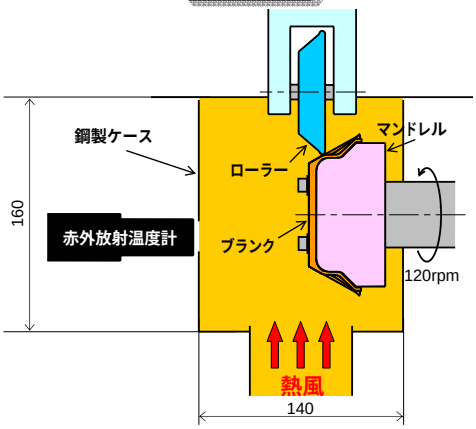
⇩ 塑性加工

鋳造欠陥および
デンドライト組織の改善



しごきスピニング加工

実験方法

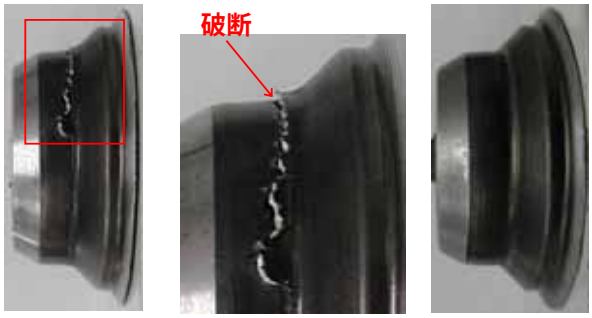


熱間しごきスピニング加工の映像

ρ_R =2mm, T=400℃, R=40%

加工温度上昇による加工性向上

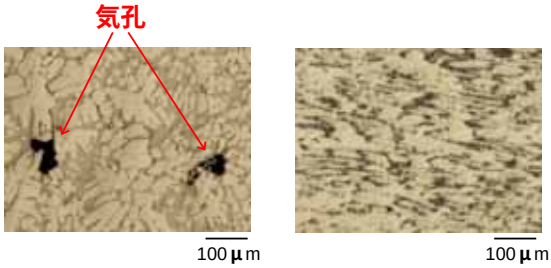
ρ_R =2mm, R=40%



(a) T=350℃　(b) 拡大図　(c) T=400℃

しごきによる鋳造欠陥の改善

ρ_R =2mm, T=400℃, R=40%



(a) 成形前　(b) 成形後

マグネシウム合金板の冷間深絞り加工

	ﾏｸﾞﾈｼｳﾑ合金	ｱﾙﾐﾆｳﾑ合金	鋼
比強度　MPa	139	107	70

マグネシウム合金の
温間プレス成形品

ダイカスト，チクソフォーミング（90%以上）

⇩ 生産性向上

プレス成形

温間　200～300℃　装置複雑

冷間　常温　成形性低

⇩

冷間での成形性向上

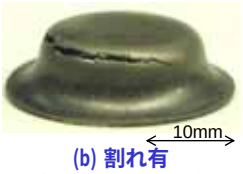
マグネシウム合金板の冷間深絞り加工における割れ

(a) 焼なましなし
(r=1.32)

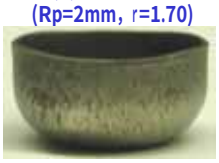
(b) 焼なましあり
(r=1.32)

冷間深絞り加工されたマグネシウム合金容器

(a) 割れ無
(Rp=2mm，r=1.70)



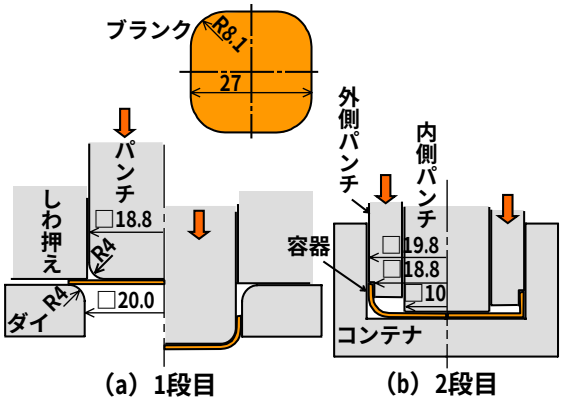
(b) 割れ有
(Rp=2mm，r=1.75)



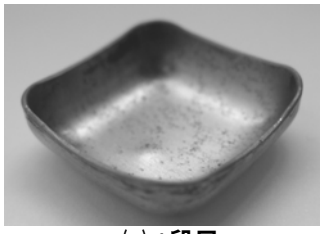
(c) 割れ無
(Rp=5mm，r=1.70)

(d) 割れ有
(Rp=5mm，r=1.75)

角筒容器の冷間2段成形



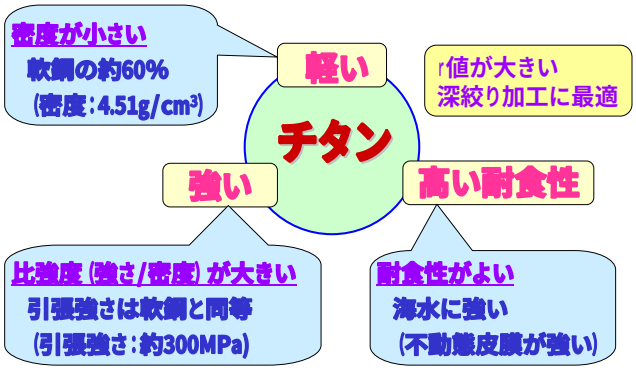
1・2段成形後の角筒容器外観



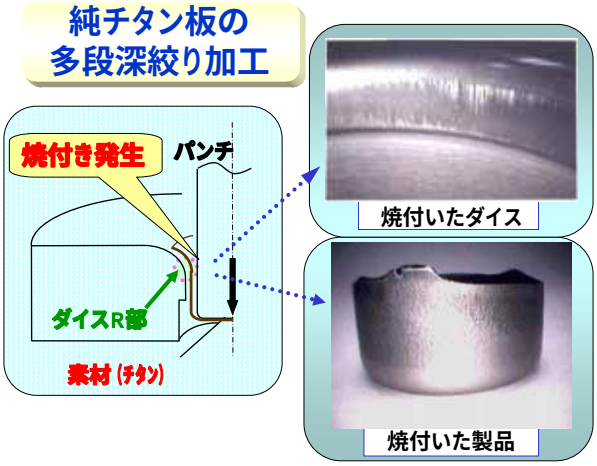
(a) 1段目

(b) 2段目

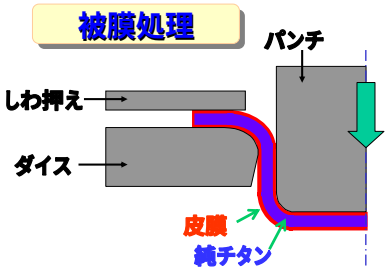
チタン板の多段深絞り加工



純チタン板の多段深絞り加工

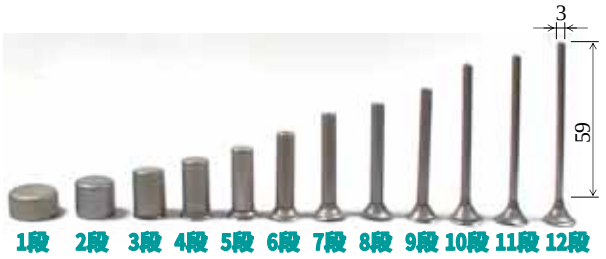


被膜処理



皮膜の種類
(1) 陽極酸化皮膜処理
(2) 大気酸化皮膜処理
(3) 市販材（カラーチタン，窒化チタン）

陽極酸化皮膜処理と銅合金ダイスによる純チタン容器の成形



皮膜処理70V ＋ エッチング

深絞り加工されたβ型チタン合金容器

750°C-5min 大気酸化皮膜処理

10mm

ー 軽量自動車部品の成形 ー

100kg軽量：1km/l燃費向上

軽量材料の成形
- 超高張力鋼板
- アルミニウム，マグネ，チタン
- 接合

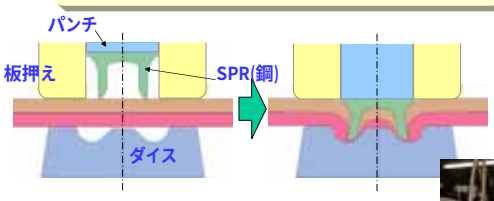
軽量化部品の成形
- 中空部品
- 一体化成形

アルミニウム板の接合

アルミニウム：溶接性が低い

Audi_A2

セルフピアッシングリベット

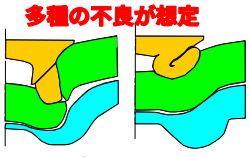


＜工法のメリット＞
- 板にSPRを打込み，機械的に結合
- 穴あけ不要
- 溶接の難しい材料の締結
- 異種材料の締結

アルミニウム板と高張力鋼板の接合

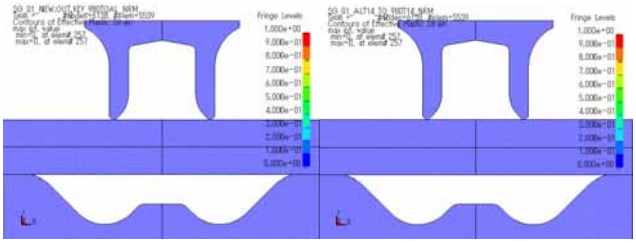
高張力鋼板
- 高強度，高硬度 → リベット硬度に近い
- 延性小

多種の不良が想定



・ダイ形状の最適化（ダイ径，深さ）

シミュレーションによる打ち込み

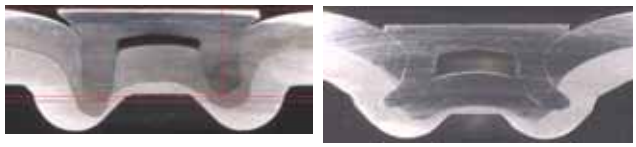


(a) 上板 SPFC980 t1.4,
下板 A5052 t1.5

(b) 上板 A5052 t1.5,
下板 SPFC980 t1.4

テーパーダイを使用した実験断面
(上板：SPFC980, t1.4, 下板：A5052, t1.5)

曲面ダイ → テーパーダイ形状



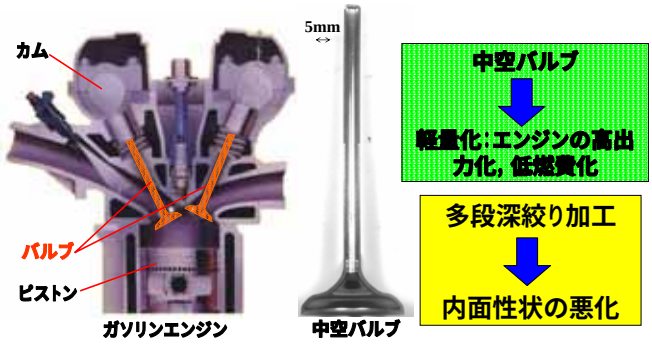
ー 軽量自動車部品の成形 ー

100kg軽量：1km/l燃費向上

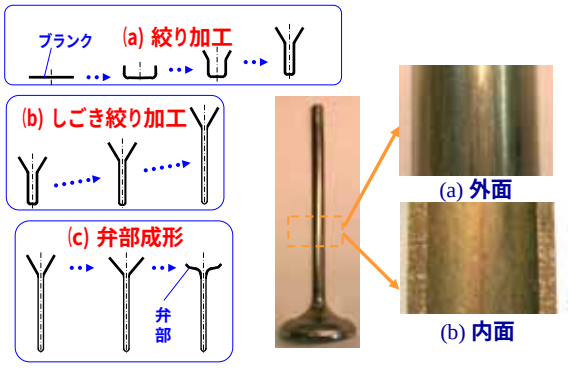
軽量材料の成形
- 超高張力鋼板
- アルミニウム，マグネ，チタン
- 材質改善，接合

軽量化部品の成形
- 中空部品
- 一体化成形

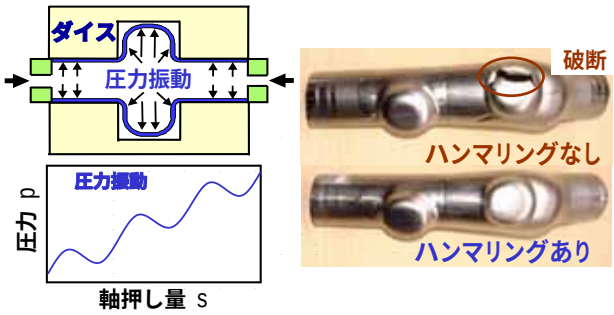
自動車用中空エンジン弁のプレス成形



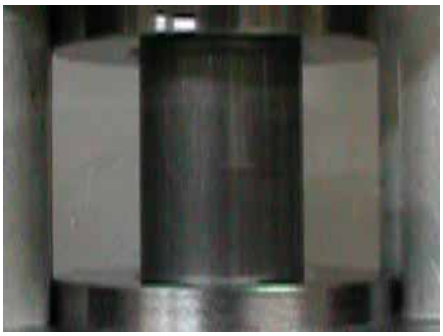
プレス成形法と内面粗さ



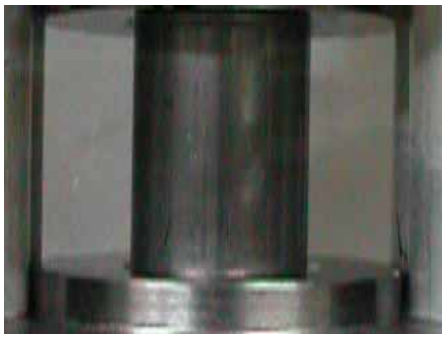
管材のハンマリングハイドロフォーミング



一定圧力におけるハイドロフォーミング



ハンマリングハイドロフォーミング



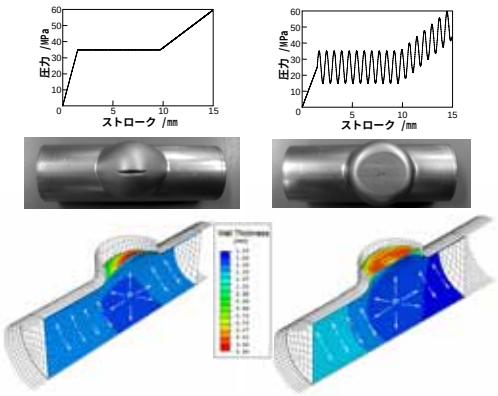
ハンマリングより得られた台形の張出し

台形張出し　　円形張出し　　しわ

(a) ハンマリング
p_0=17.6MPa
Δp = 3MPa
ω=0.66 c/mm

(b)一定圧力
p_0=20.5MPa

(c)一定圧力
p_0=17.5MPa



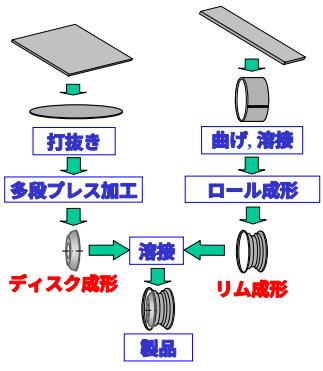
ー　軽量自動車部品の成形　ー

100kg軽量：1km/l燃費向上

軽量材料の成形
- 超高張力鋼板
- アルミニウム，マグネ，チタン
- 接合

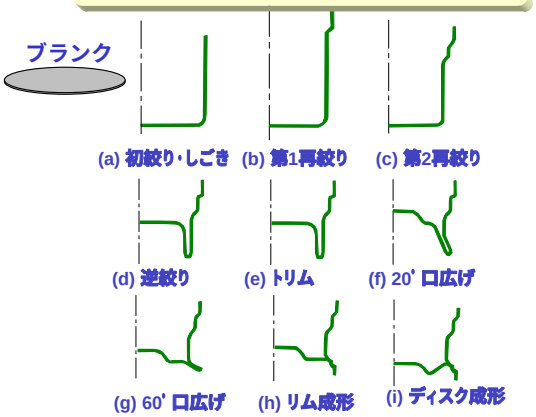
軽量化部品の成形
- 中空部品
- 一体化成形

乗用車用ホイールの一体成形



一体成形の利点
溶接工程省略
溶接検査不要
連続プレス成形
生産性向上

乗用車用ホイールの一体成形法



実験による成形結果

一体プレス成形ホイール

ー　軽量自動車部品の成形　ー

100kg軽量：1km/l燃費向上

軽量材料の成形

- 超高張力鋼板
- アルミニウム，マグネ，チタン
- 接合

軽量化部品の成形

- 中空部品
- 一体化成形