超高強度鋼部材のプレス成形

豊橋技術科学大学　森 謙一郎
http://plast.me.tut.ac.jp/

自動車の燃費を向上するために軽量化が望まれており，高張力鋼板の使用が急増している．引張り強さが1GPa以上の超高張力鋼板も使用されるようになってきているが，プレス成形が困難である．本講演では，超高張力鋼部材のプレス成形において，スプリングバック，伸びフランジ，割れ，焼付き，しわ，せん断加工，テーラードブランク，接合，ホットスタンピングなどについて紹介する．

超高強度鋼部材のプレス成形

豊橋技術科学大学　森謙一郎

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：ウルトラハイテン(7.8)
- アルミニウム(2.7)，マグネ(1.8)，チタン(4.5)

軽量化部品の成形

- 中空部品
- 一体化成形

シミュレーション技術

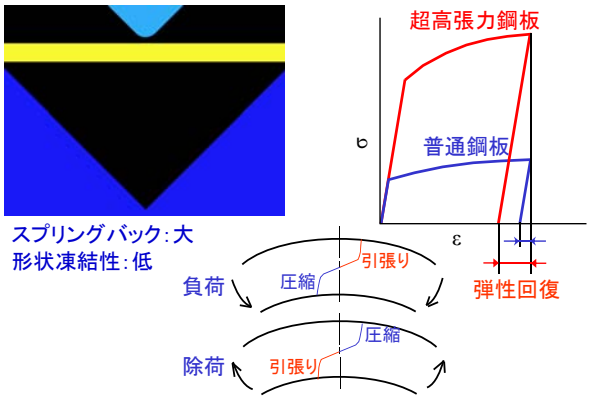
- 有限要素法

自動車用板材の比較

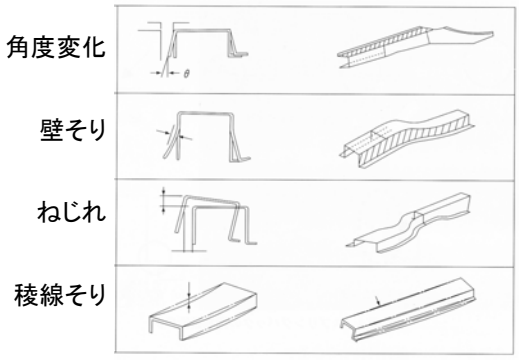
板材	引張強さ	比重	比強度	コスト(1kg当り)	生産量
ウルトラハイテン	980～1470MPa	7.8	126～188MPa	100円程度	鉄：12億ton
従来ハイテン	490～790MPa	7.8	63～101MPa		
軟鋼板 SPCC	340MPa	7.8	44MPa		
アルミ合金板 A6061(T6処理)	310MPa	2.7	115MPa	500円～600円	アルミ：4000万ton
マグネシウム合金板 AZ31	270MPa	1.8	137MPa	3000円程度	マグネ：60万ton
PAN系炭素繊維	2000MPa～5000MPa	1.6		2000円程度	炭素繊維：2万ton

1. スプリングバック
2. 伸びフランジ
3. 割れ
4. 焼付き
5. しわ
6. せん断加工
7. テーラードブランク
8. 接合
9. ホットスタンピング

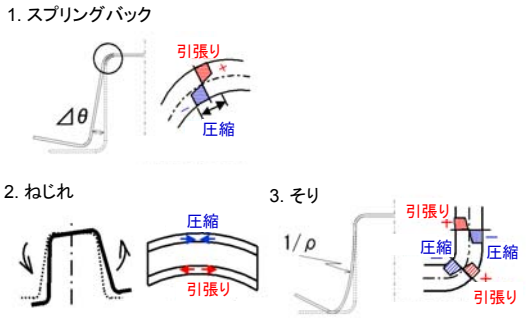
超高張力鋼板のスプリングバック



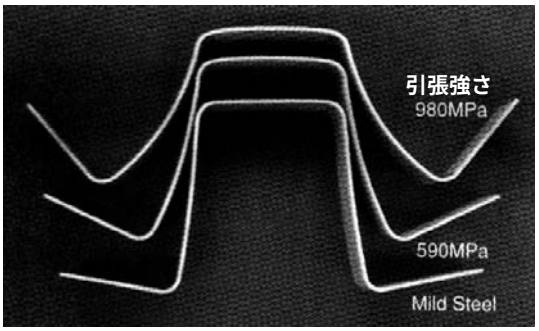
超高張力鋼板の形状凍結性



超高張力鋼板の形状凍結性



高張力鋼板のハット曲げにおけるスプリングバック

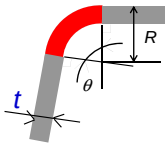


神鋼

スプリングバック

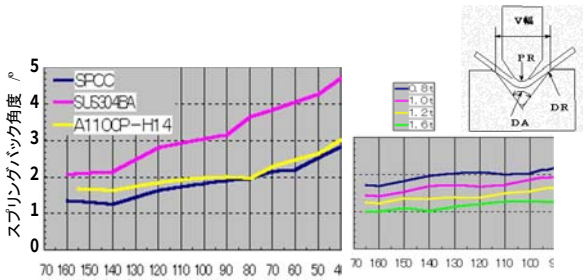
スプリングバック$\Delta\theta$

$$\Delta\theta = \frac{M}{EI}\theta R \approx \frac{3\sigma\theta R}{E\,t}$$



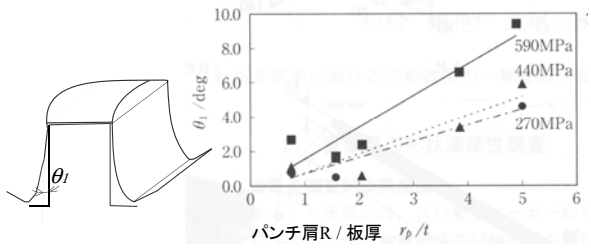
M：曲げモーメント ($bt^2\sigma/4$)，大
E：ヤング率，小
I：断面2次モーメント ($bh^3/12$)，小
θ：曲げ角，大
R：曲げ半径，大
σ：変形抵抗，大
t：板厚，小

V曲げにおけるスプリングバックに及ぼす材質および板厚の影響

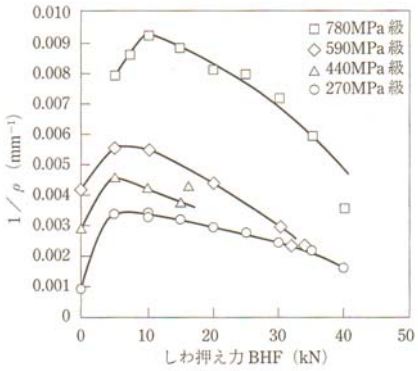


(a) 材質の影響　(b) 板厚の影響

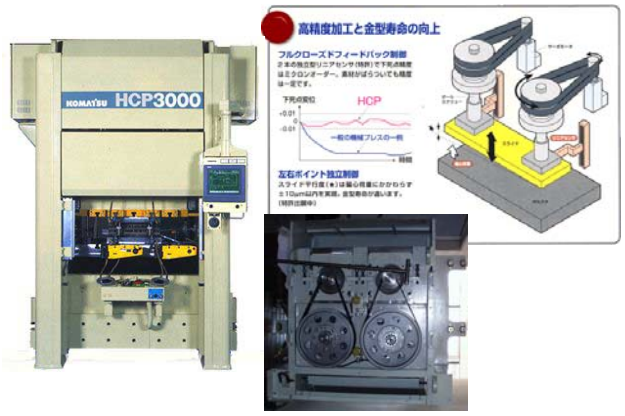
ハット曲げにおけるスプリングバックに及ぼす材質の影響



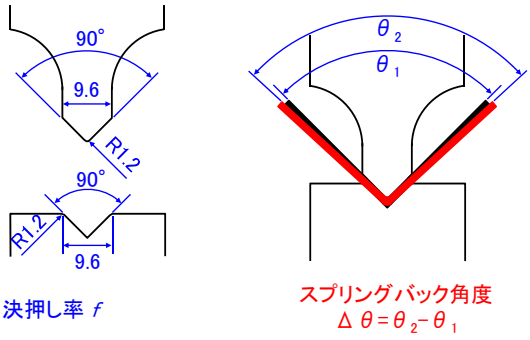
ハット曲げにおけるそりに及ぼすしわ押え力の影響



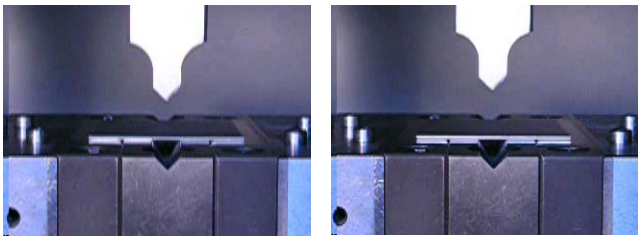
直動式サーボプレス(80tonf)



V曲げ加工における金型形状，決押し率・角度の定義



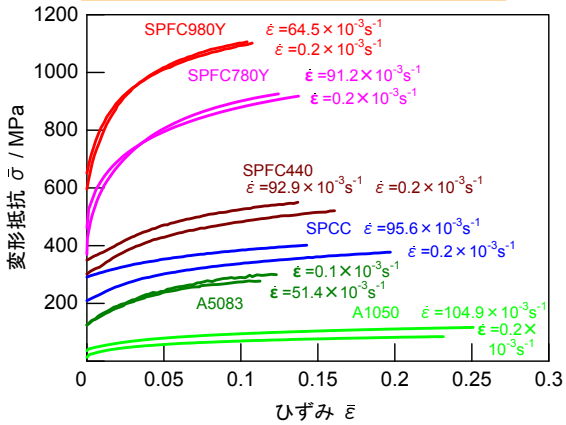
V曲げの変形挙動



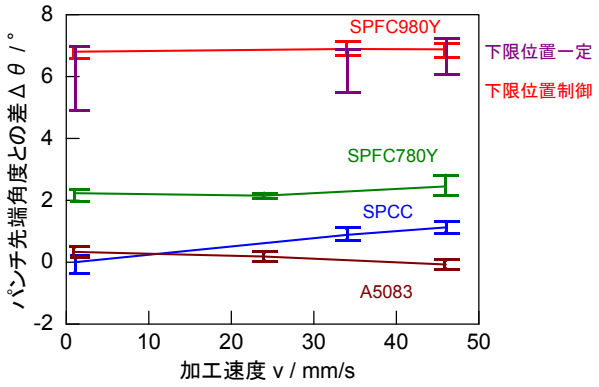
(a) SPCC　　(b) SPFC980Y

v=24mm/s, f=0%, T=0.5s

板材の変形抵抗曲線

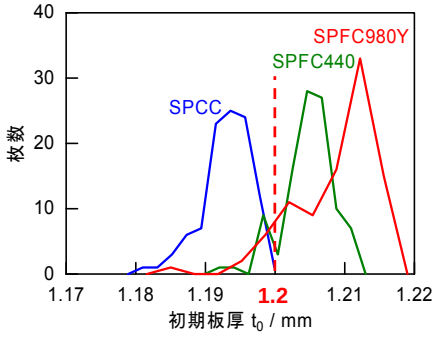


V曲げにおけるパンチ先端角度との差と加工速度の関係(f=0%)



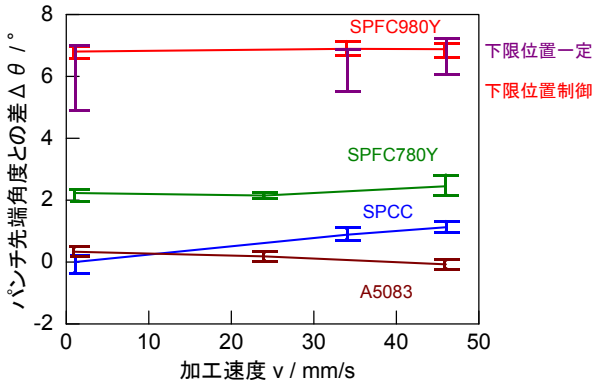
試験片の種類，初期板厚のばらつき

種類	SPFC980Y (二相強化型), SPFC440 (析出強化型), SPCC
試験片形状	W55mm × L60mm
公称板厚	1.2mm

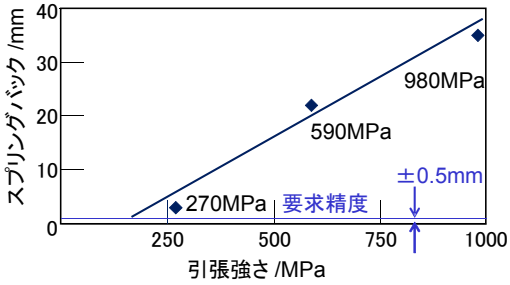


標本数：各100枚

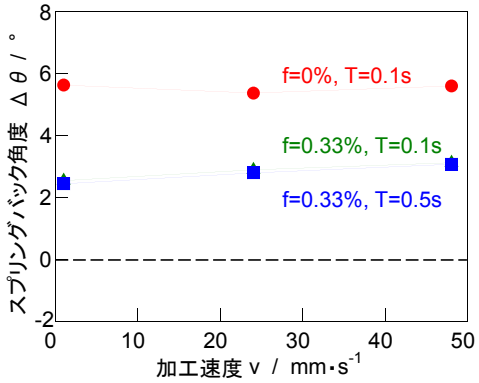
V曲げにおけるパンチ先端角度との差と加工速度の関係(f=0%)



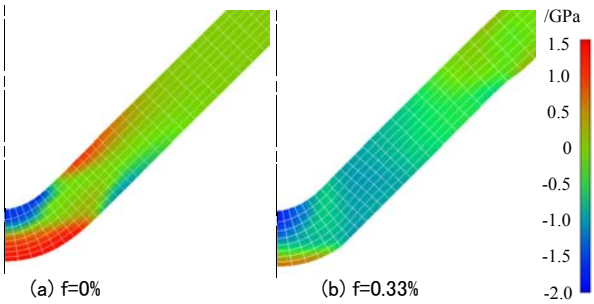
スプリングバックと引張強さの関係



V曲げにおける決押しによるスプリングバックの低減 (980MPa)

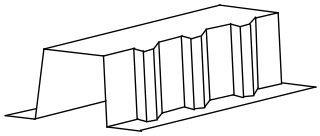


V曲げの決押しによる除荷前の板幅方向応力分布への影響(SPFC980Y)

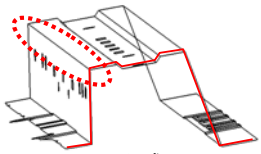


側壁ビードによるスプリングバックの防止

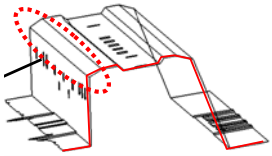
側壁の剛性増加



面取りによるスプリングバックの防止

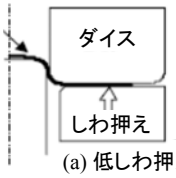


(a) 1段成形

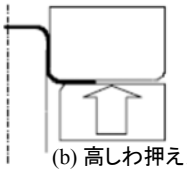


(b) 角部成形

しわ押え力制御によるスプリングバックの防止

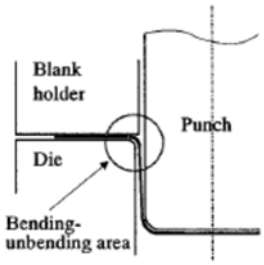


(a) 低しわ押え力

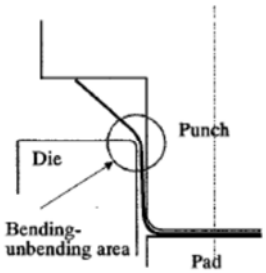


(b) 高しわ押え力

フォーム成形によるスプリングバックの防止

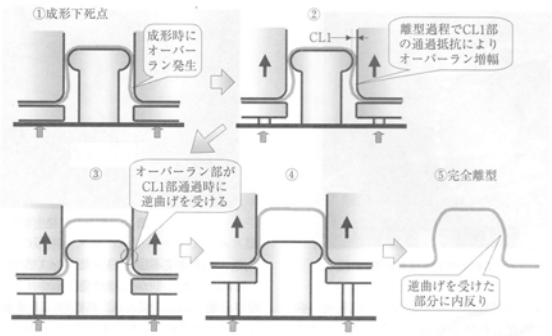


(a) ドロー成形



(b) フォーム成形

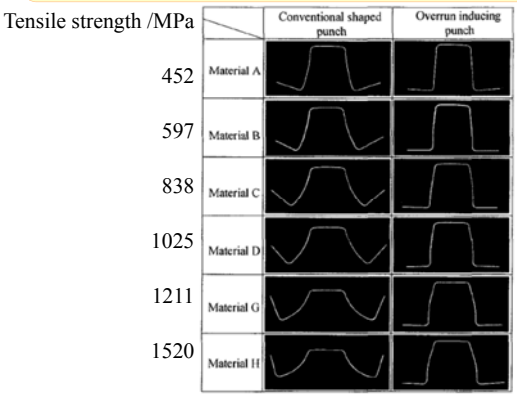
オーバーラン誘発パンチによるスプリングバックの防止



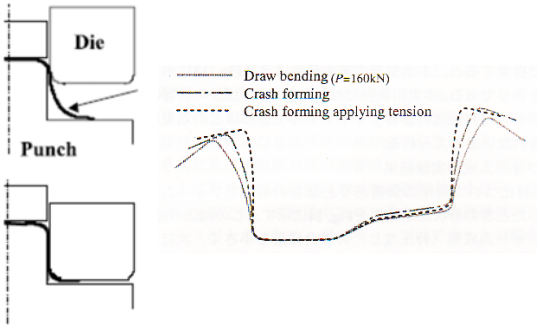
Overrun inducing punch

神鋼

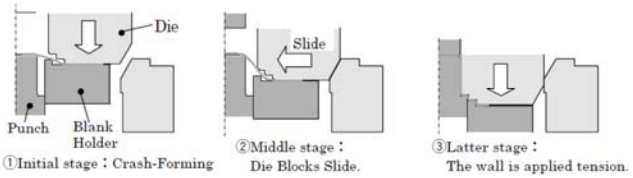
オーバーラン誘発パンチによるスプリングバックの防止



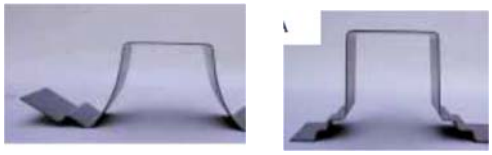
リストライクによるスプリングバックの防止



スライドロックドローによるスプリングバックの防止

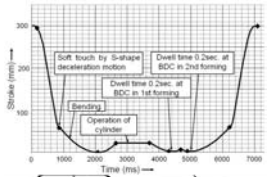


780MPa



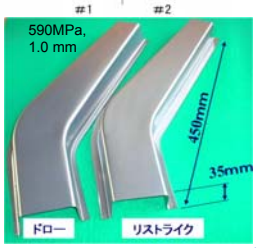
(a) ドロー成形　(b) スライドロックドロー成形

リストライクによるスプリングバックとねじれの低減



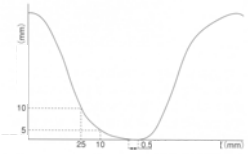
(a) リストライク

(b) リストライクあり　(c) リストライクなし

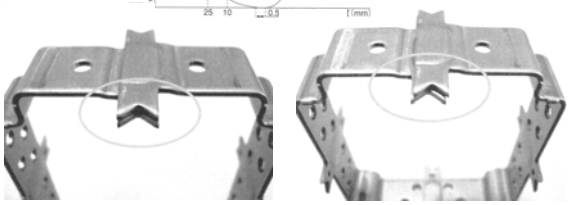


アイダ

下死点保持によるスプリングバックの低減



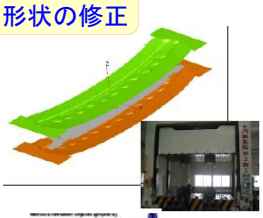
440MPa鋼板

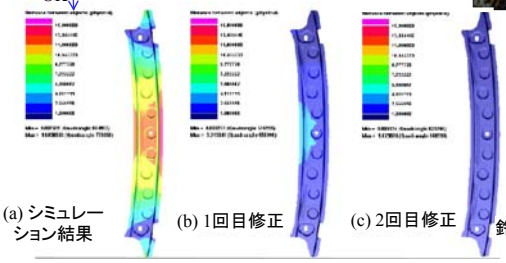


(a) 下死点保持あり　(b) 下死点保持なし

阪口製作所

有限要素シミュレーションを用いたスプリングバックを考慮した金型形状の修正

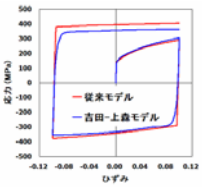


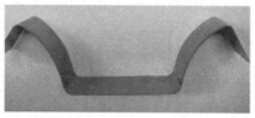


(a) シミュレーション結果　(b) 1回目修正　(c) 2回目修正

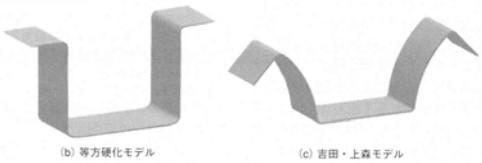
鈴木工業㈱

有限要素シミュレーションにおけるスプリングバックに及ぼす構成式の影響





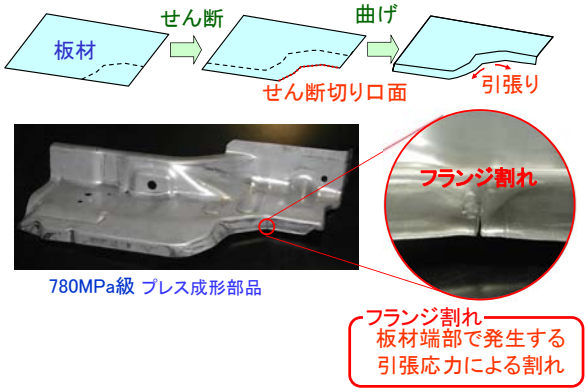
(a) 実験結果（980MPa 高張力鋼板）



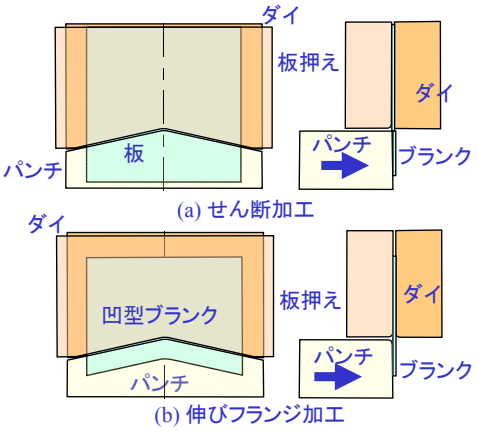
(b) 等方硬化モデル　(c) 吉田・上森モデル

1. スプリングバック
2. 伸びフランジ
3. 割れ
4. 焼付き
5. しわ
6. せん断加工
7. テーラードブランク
8. 接合
9. ホットスタンピング

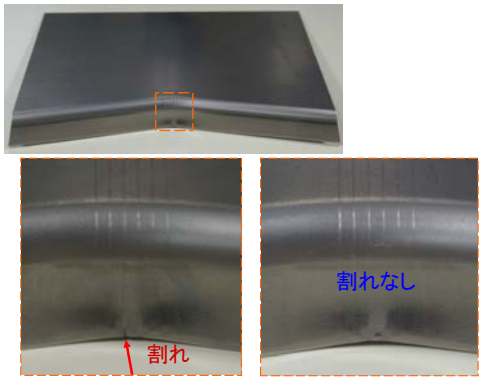
プレス成形におけるフランジ割れ



せん断と伸びフランジ成形

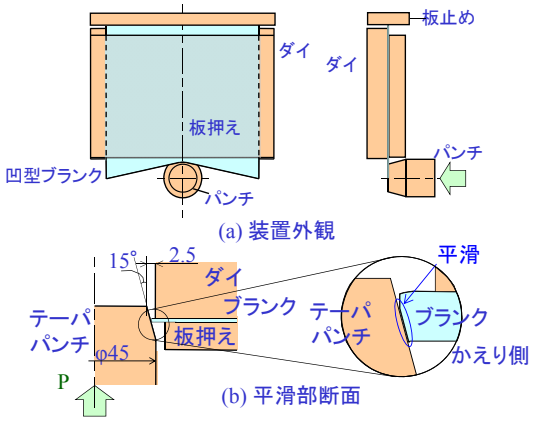


フランジ割れにおよぼすせん断クリアランス比の影響
（JSC780Y，L=17mm）



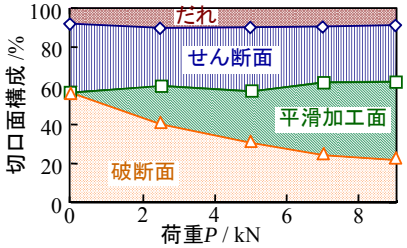
(a) c＝25%　(b) c＝15%

テーパパンチによる破断面平滑加工

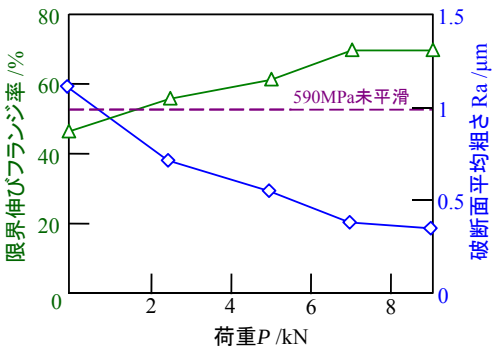


平滑化後の切口面の構成比 (JSC780, c=20%)

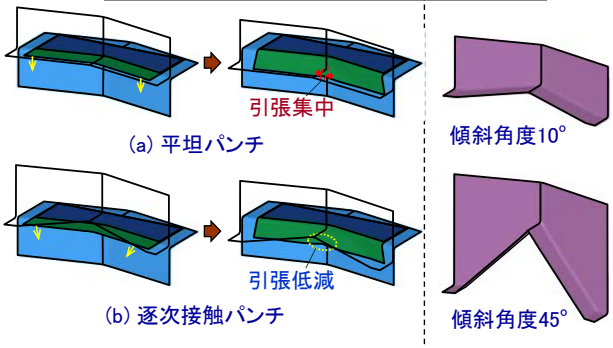
(a) P=0kN　(b) P=2.5kN　(c) P=9kN



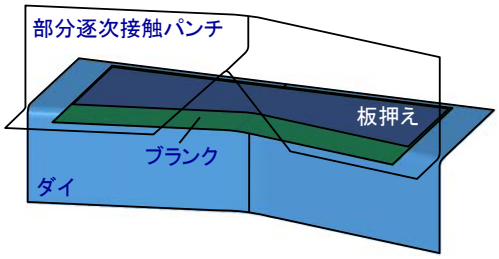
平滑化による限界伸びフランジ率の向上
(JSC780, c=20%)



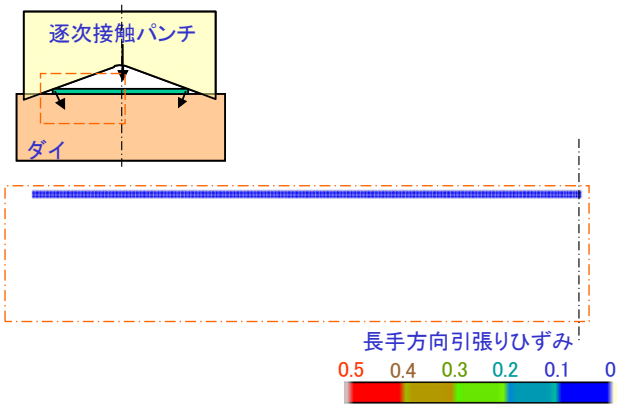
部分逐次接触パンチによる伸びフランジ成形性の向上



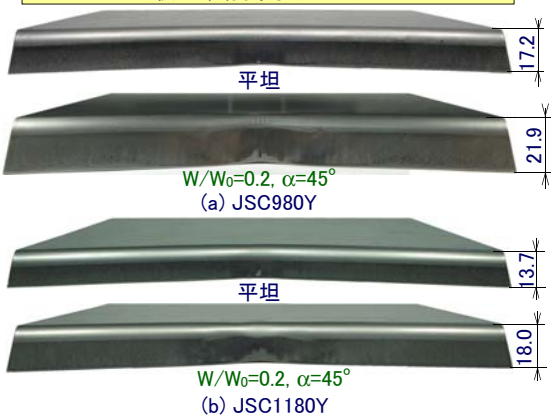
部分逐次接触パンチによる伸びフランジ曲げ成形



逐次接触パンチによる長手方向の引張りひずみ分布
（JSC780, α=10°, W/W_0=1.0, L=18mm）



実験における部分逐次接触パンチによる最大製品高さの向上

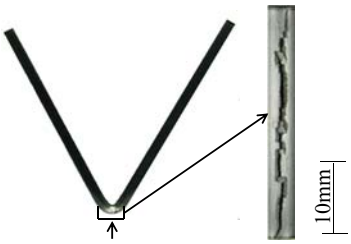


1. スプリングバック
2. 伸びフランジ
3. **割れ**
4. 焼付き
5. しわ
6. せん断加工
7. テーラードブランク
8. 接合
9. ホットスタンピング

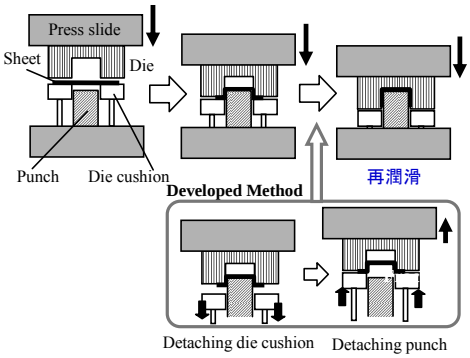
各種鋼板の深絞り成形性

(a) 270 MPa, 55 mm　(b) 590 MPa, 40 mm　(c) 980　MPa, 25mm

980MPa級超高張力鋼板の曲げ加工における割れ



成形途中に工具から板材を外すことによる深絞り性の向上



JFE

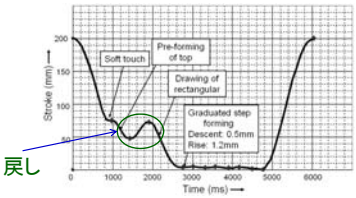
振動プレス成形：摩擦の低減

高張力鋼板
成形限界の向上

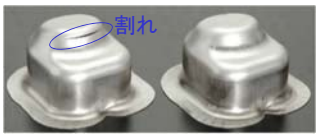
(a) 通常　(b) 振動

JFE

深絞り加工における割れの防止



(a) 最適モーション



(b) クランクモーション　(c) 最適モーション　アイダ

段付き容器の深絞り加工における割れの防止

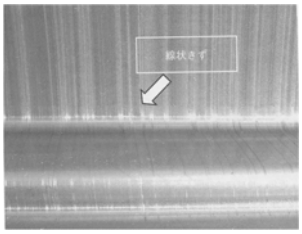
アイダ

1. スプリングバック
2. 伸びフランジ
3. 割れ
4. 焼付き
5. しわ
6. せん断加工
7. テーラードブランク
8. 接合
9. ホットスタンピング

しごき絞り加工における焼付き

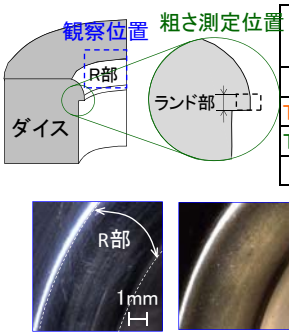
超高張力鋼プレス成形車体部品

焼付き

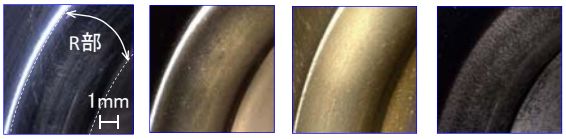


型かじり

使用したコーティングダイス



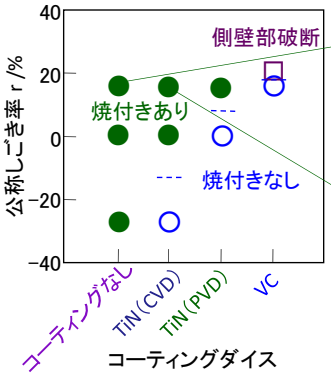
コーティング	平均高さ / μ mRa	最大高さ / μ mRz
なし	0.03	0.19
TiN(CVD)2500HV	0.03	0.43
TiN(PVD)3000HV	0.06	0.84
VC,2700HV	0.02	0.12

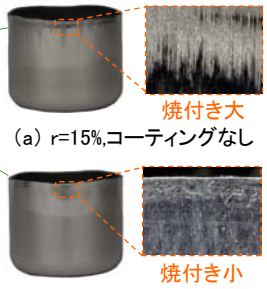


コーティングなし　TiN(CVD)　TiN(PVD)　VC

TD-VC皮膜：900−1000℃で塩浴処理

しごき絞り加工の耐焼付き性に及ぼすコーティングダイスの影響（SPFC1180YN, v=8.3mm/s）

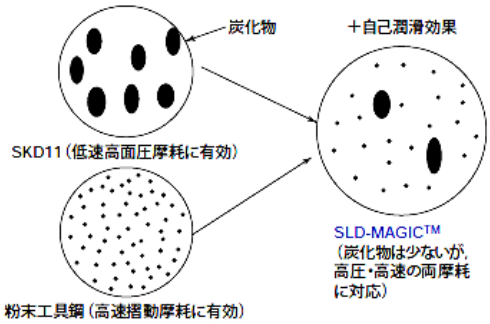




（a）r=15%,コーティングなし

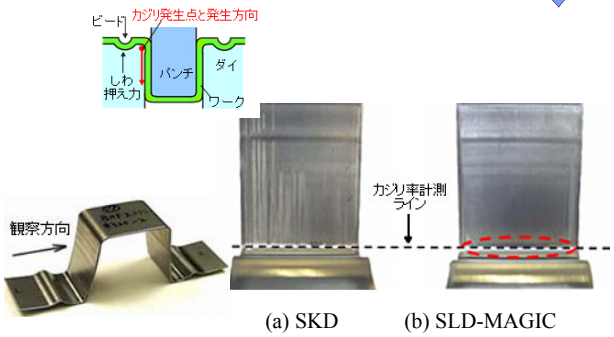
（b）r=15%,TiN(CVD)

高張力鋼板のプレス成形用金型 SLD-MAGIC



日立金属

金型の焼付き

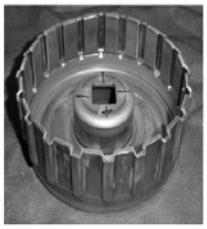


(a) SKD　(b) SLD-MAGIC

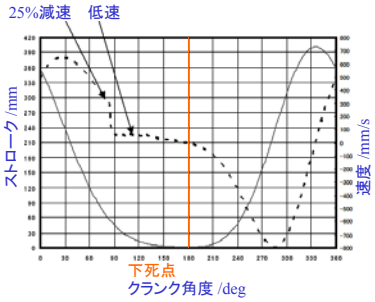
日立金属

生産性：加工速度の制御

焼付き防止：温度の低減



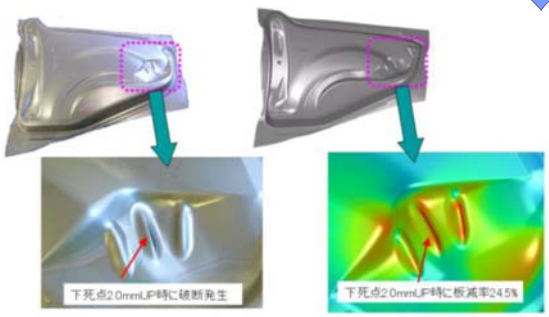
歯形ドラムの板鍛造



コマツ

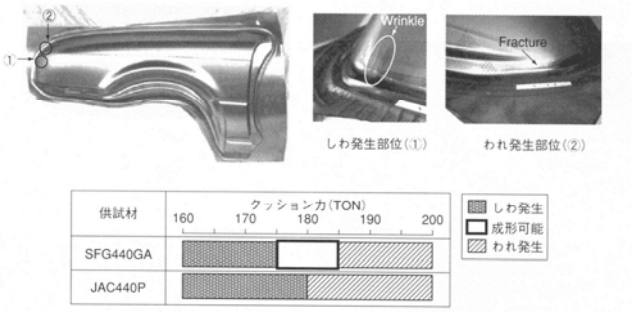
1. スプリングバック
2. 伸びフランジ
3. 割れ
4. 焼付き
5. しわ
6. せん断加工
7. テーラードブランク
8. 接合
9. ホットスタンピング

プレス成形におけるしわの予測

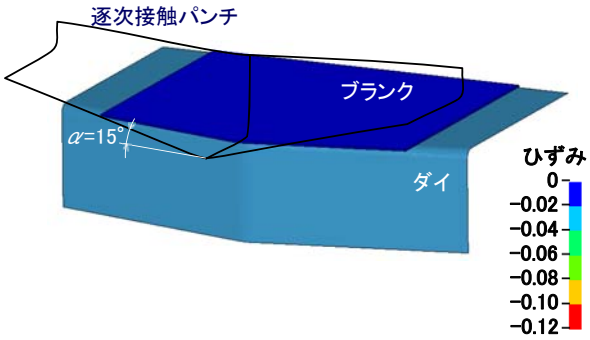


(a) 実験　(b) シミュレーション

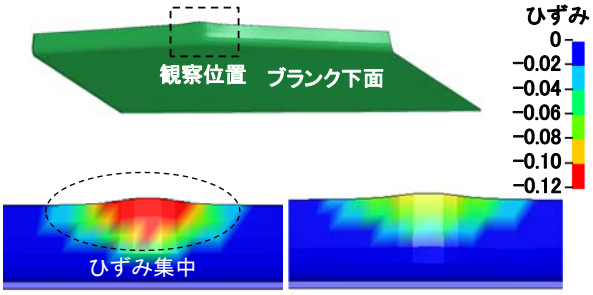
しわと割れ



計算による板幅方向のひずみ
（JSC980Y，t=1.02mm，L=8mm，α=15°）

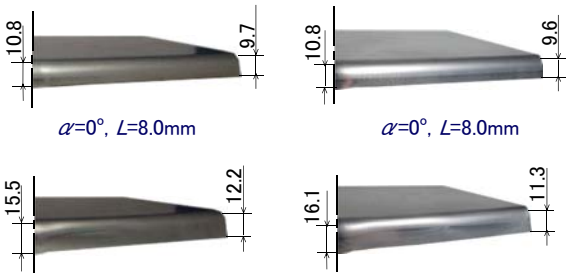


計算による板幅方向のひずみ分布
（JSC980Y，t=1.02mm，L=10mm）



(a) α=0°　(b) α=25°

実験における逐次接触パンチによる限界成形品高さ（t=1.22mm）



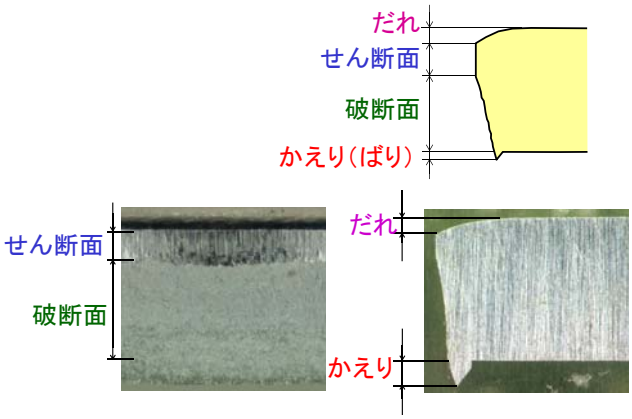
α=0°, L=8.0mm　　α=0°, L=8.0mm

α=25°, L=11.0mm　　α=25°, L=11.0mm

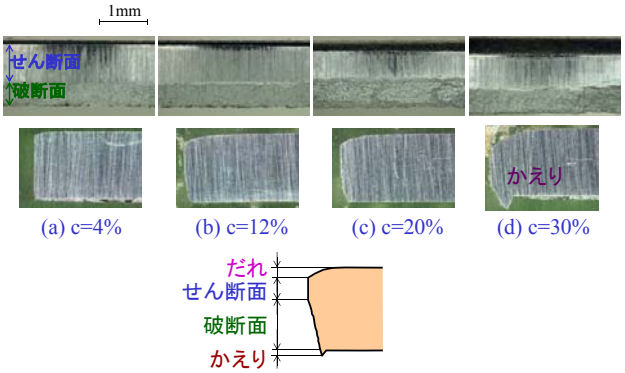
(a)JSC980Y　　(b)JSC1180Y

1. スプリングバック
2. 伸びフランジ
3. 割れ
4. 焼付き
5. しわ
6. せん断加工
7. テーラードブランク
8. 接合
9. ホットスタンピング

せん断された切口面

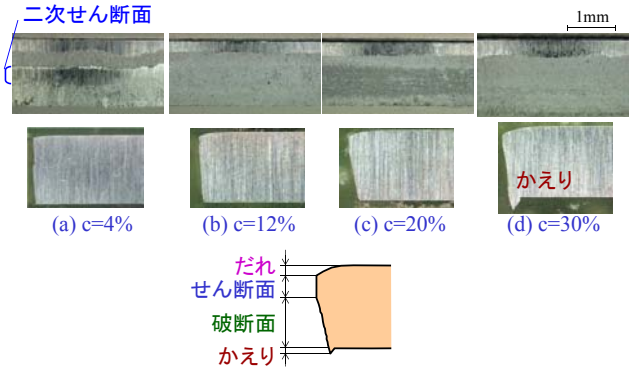


せん断切口面におよぼすクリアランス比の影響（低強度の高張力鋼板：JSC390W）



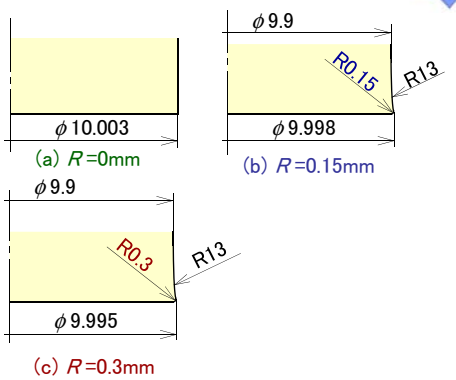
(a) c=4%　(b) c=12%　(c) c=20%　(d) c=30%

せん断切口面におよぼすクリアランス比の影響（超高張力鋼板：JSC980Y）



(a) c=4%　(b) c=12%　(c) c=20%　(d) c=30%

微小丸み角部を持つパンチ

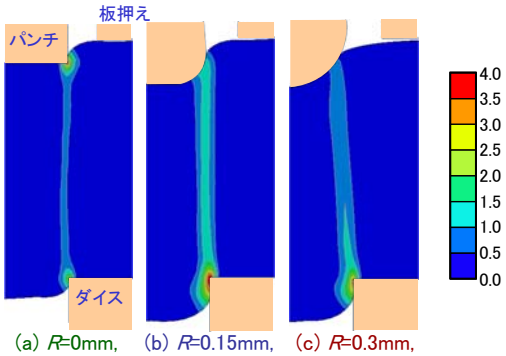


(a) R=0mm　(b) R=0.15mm

(c) R=0.3mm

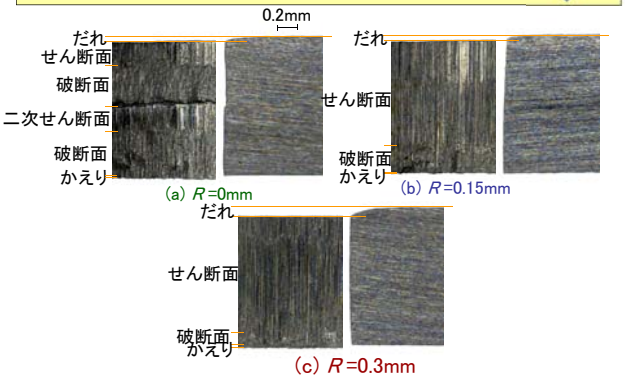
JSC980Yの穴加工における板の変形挙動

JSC980Yの最高荷重直前のストロークにおける計算された相当ひずみ分布

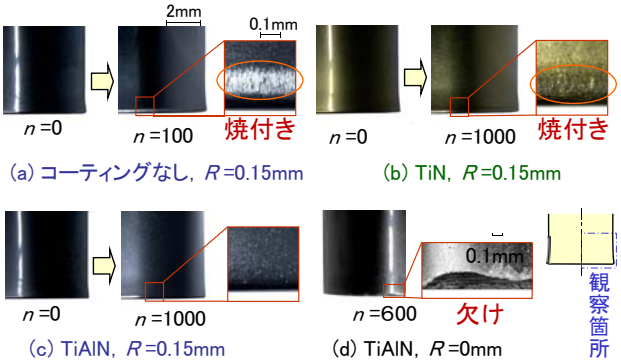


(a) R=0mm, s=0.13mm　(b) R=0.15mm, s=0.21mm　(c) R=0.3mm, s=0.24mm

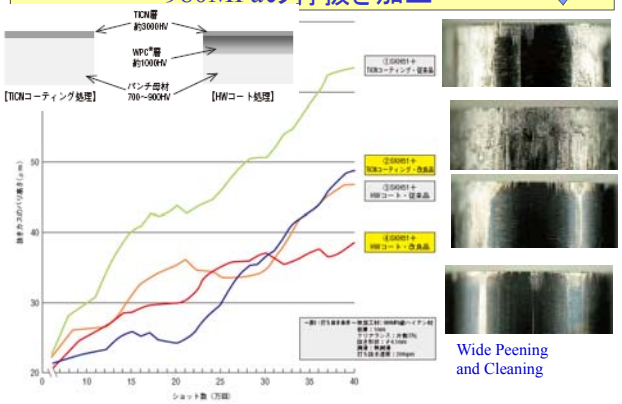
JSC980Yにおける穴抜き加工された切口面と断面



連続穴抜き加工前と加工後のパンチ表面

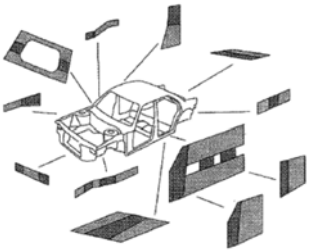


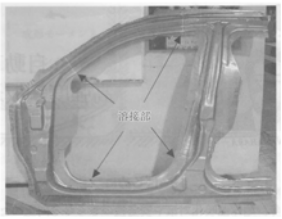
各種コーティング金型を用いた980MPaの打抜き加工



1. スプリングバック
2. 伸びフランジ
3. 割れ
4. 焼付き
5. しわ
6. せん断加工
7. テーラードブランク
8. 接合
9. ホットスタンピング

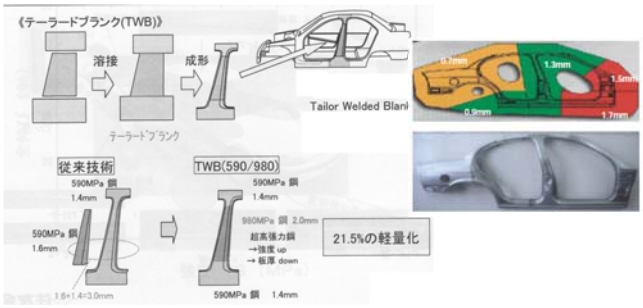
テーラードブランク





Tailored blanks, 590, 780 and 980MPa

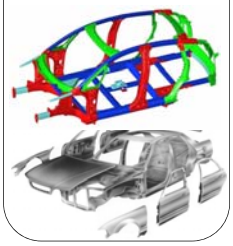
テーラードブランク



1. スプリングバック
2. 伸びフランジ
3. 割れ
4. 焼付き
5. しわ
6. せん断加工
7. テーラードブランク
8. 接合
9. ホットスタンピング

セルフピアシングリベットによる 高張力鋼板とアルミニウム合金板の接合

板組の決定



接合条件の決定
- ・リベット
- ・ダイ
- ・板組

ラインでの接合作業

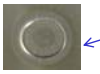
アルミニウム板の接合

Audi_A2：アルミ自動車

アルミニウム：溶接性が低い

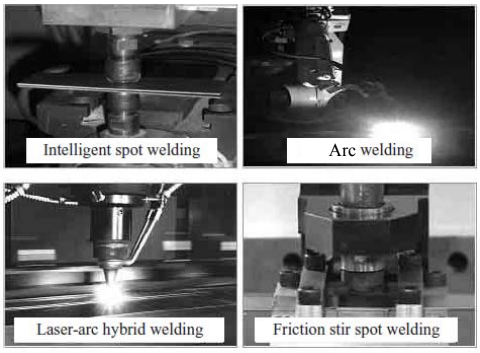
セルフピアシングリベット

表

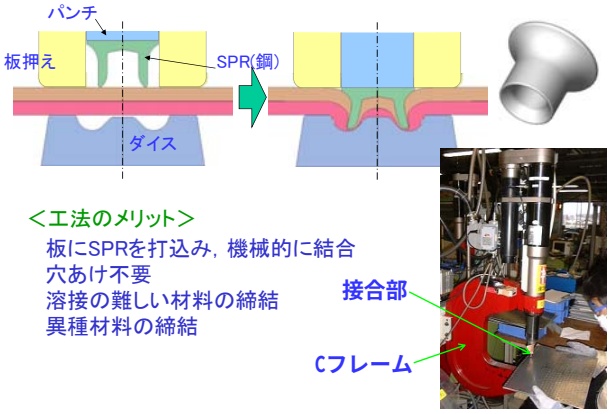


裏

高張力鋼板の溶接



セルフピアスリベッティング



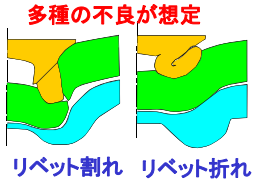
＜工法のメリット＞
板にSPRを打込み，機械的に結合
穴あけ不要
溶接の難しい材料の締結
異種材料の締結

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

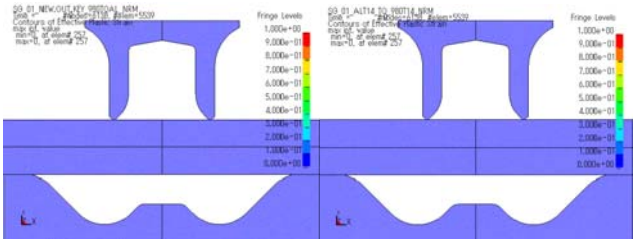
↓

多種の不良が想定



⇦ ・ダイ形状の最適化（ダイ径，深さ）

有限要素シミュレーション

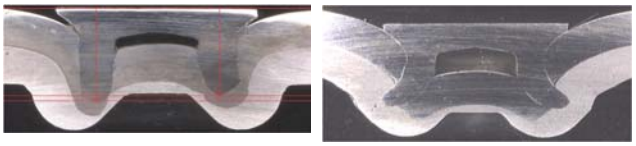


(a) 上板 SPFC980 t1.4,
下板 A5052 t1.5

(b) 上板 A5052 t1.5,
下板 SPFC980 t1.4

ダイ形状の最適化

曲面ダイ → テーパーダイ形状



上板：SPFC980, 1.4mm, 下板：A5052, 1.5mm

メカニカルクリンチングによる 高張力鋼板とアルミニウム合金板の接合

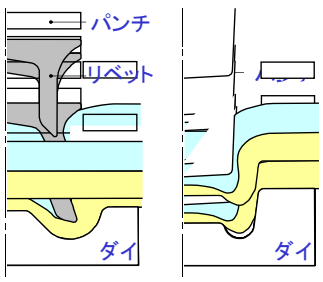
セルフピアシングリベット

リベット使用
→ 高コスト

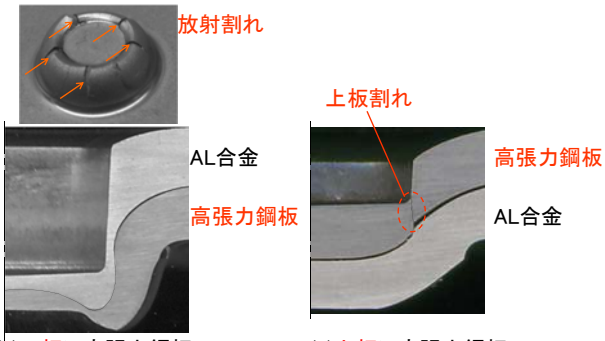
⇩

メカニカルクリンチング

リベット不要
→ 低コスト



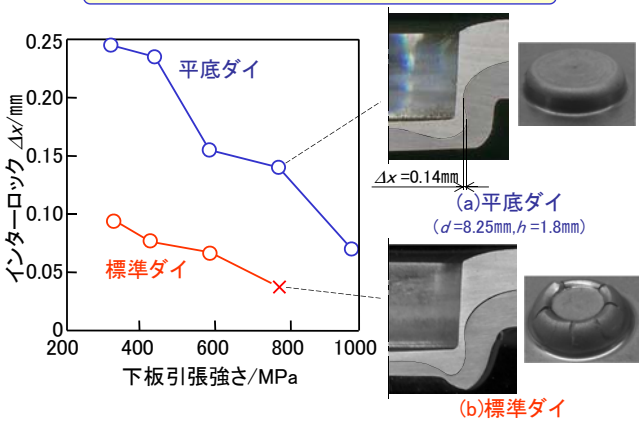
高張力鋼板とアルミニウム合金板の接合



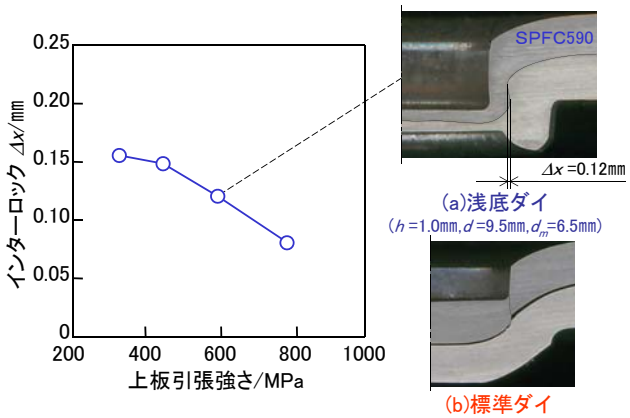
(a)下板に高張力鋼板　(b)上板に高張力鋼板

・高張力鋼板とアルミニウム合金板の接合性
・ダイ形状の改善による接合性の向上

平底ダイによる下板高張力鋼板の接合

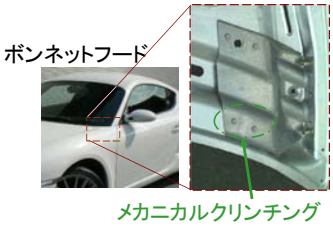


浅底ダイによる上板高張力鋼板の接合

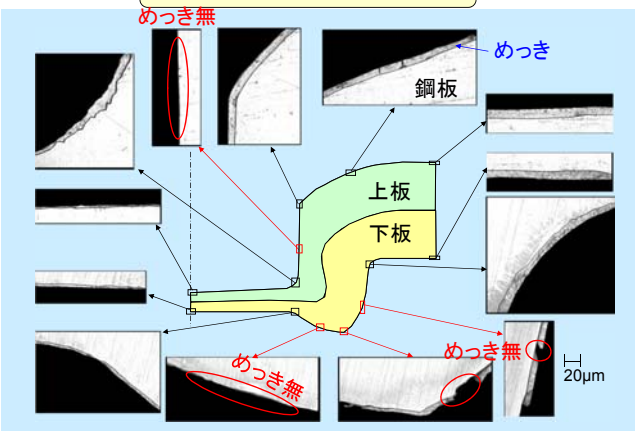


メカニカルクリンチングによる表面処理高張力鋼板の接合

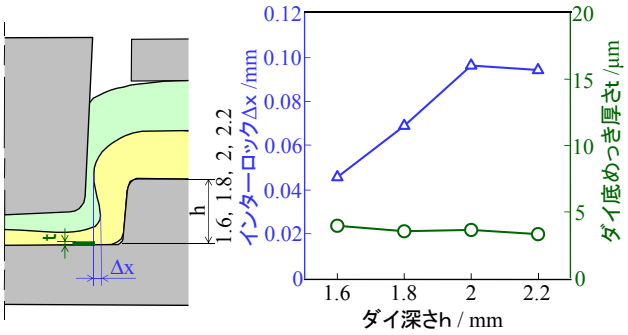
抵抗スポット溶接
電極の寿命：短い
コーティング厚さ：小さい



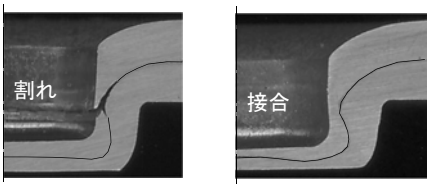
接合後の断面写真



実験によるΔx, tへ及ぼすダイ深さhの影響

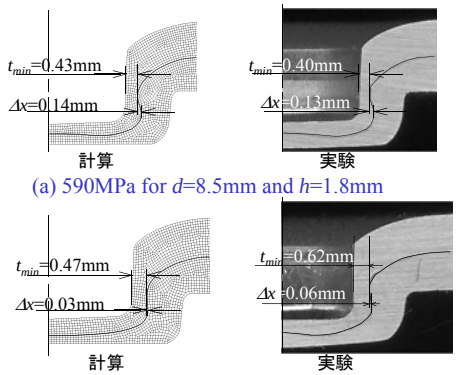


従来ダイによる590MPa 高張力鋼板の接合



(a) 590MPa　　(b) 軟鋼

工具形状の修正



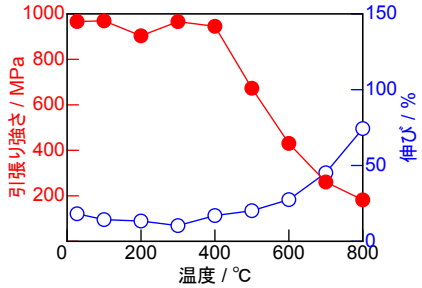
(a) 590MPa for d=8.5mm and h=1.8mm

(b) 780MPa for d=8.5mm and h=1.5mm

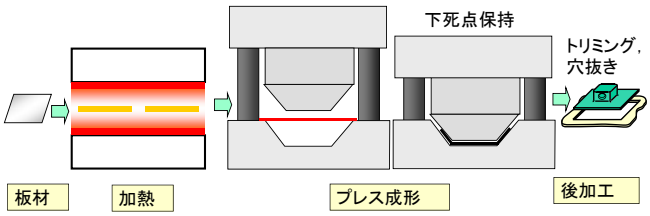
1. スプリングバック
2. 伸びフランジ
3. 割れ
4. 焼付き
5. しわ
6. せん断加工
7. テーラードブランク
8. 接合
9. ホットスタンピング

超高張力鋼板の高温引張り特性

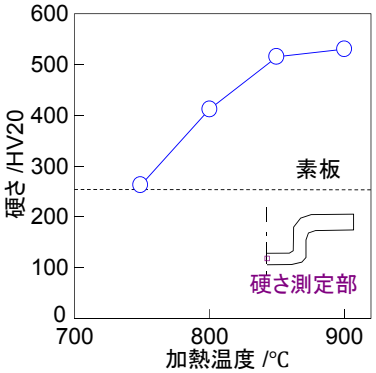
ホットスタンピング：成形荷重低下，
スプリングバックなし，成形性向上



ホットスタンピング



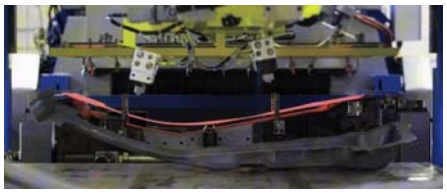
ホットスタンピングにおける ダイクエンチによる硬さの上昇



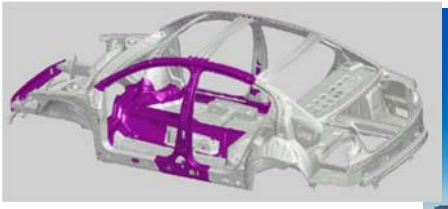
金型急冷
による焼
入れ，
1.5GPa級

ホットスタンピング

ホットスタンピング



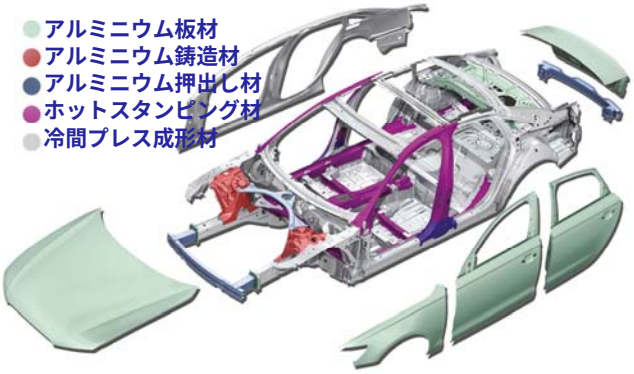
フォルクスワーゲン，パサート



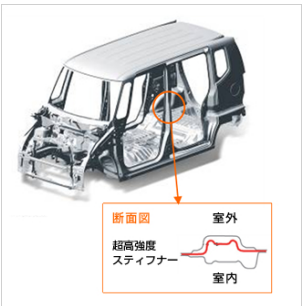
フォルクスワーゲン パサート，骨格部材の16%が熱間プレス成形

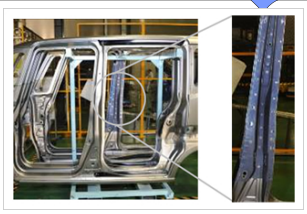
Audi A7 Sportback

- アルミニウム板材
- アルミニウム鋳造材
- アルミニウム押出し材
- ホットスタンピング材
- 冷間プレス成形材

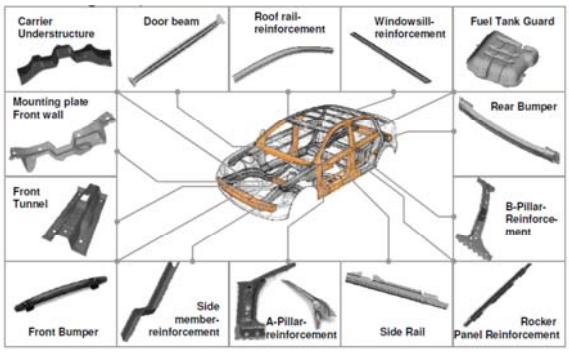


ホンダN BOXのセンターピラー





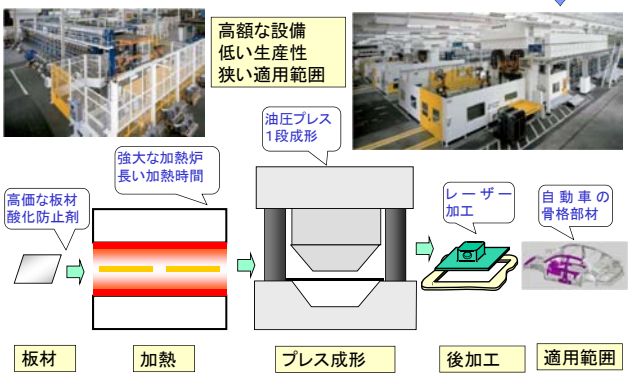
ドイツ　ベンテラー社における ホットスタンピング成形品



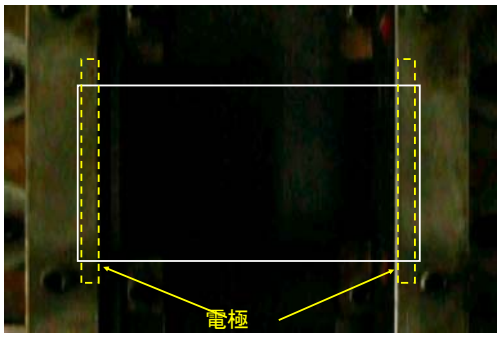
カナダ　マグナ社における ホットスタンピング成形品

アイシン高丘における ホットスタンピング成形品

現行熱間プレス成形の問題点



通電加熱の映像



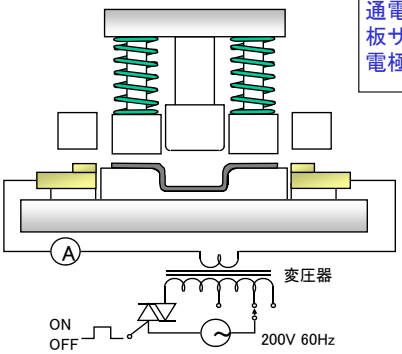
通電加熱とサーボプレスの連動

高速加熱・高速成形：
酸化防止
成形性の増加

通電電源　サーボプレス　通電電源　サーボプレス

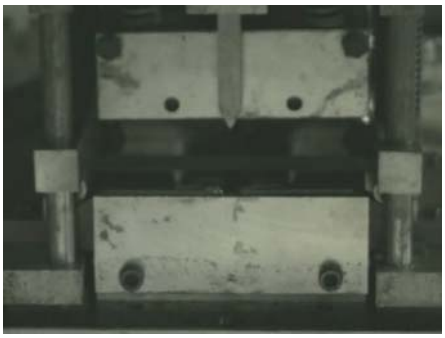
通電加熱ハット曲げ成形装置

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
3.5秒保持

900 ℃における通電加熱ハット曲げ成形

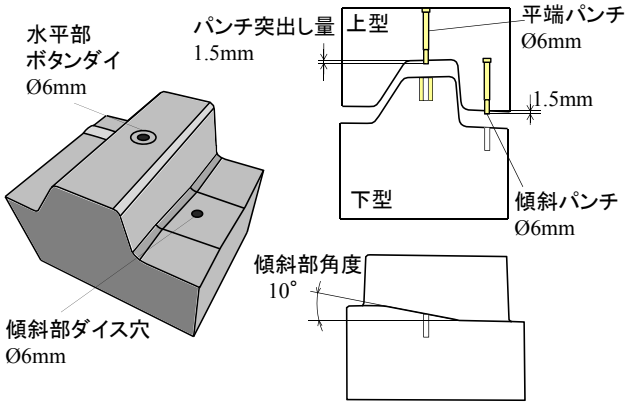


900 ℃における通電加熱ハット曲げ成形

(a) 高温炉加熱

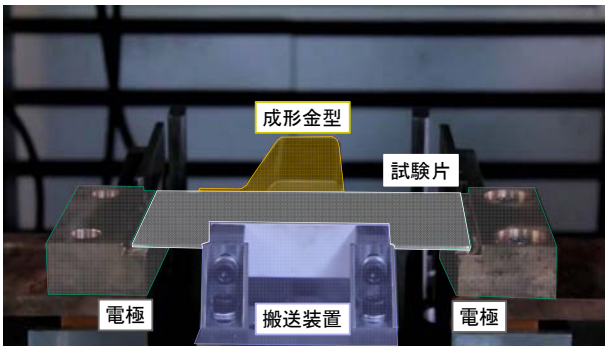
(b) 通電加熱

抜残し機構を取り入れた成形金型

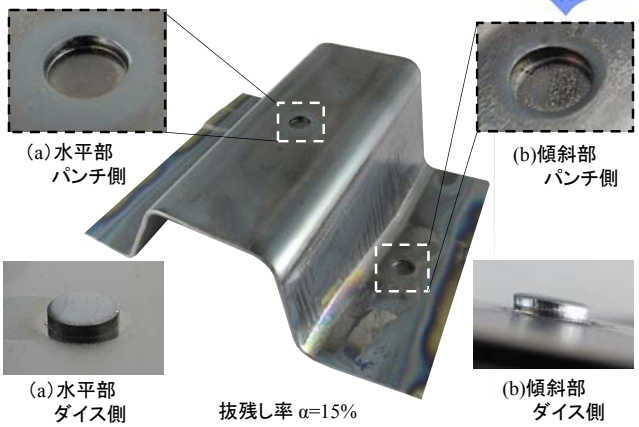


成形とクリアランスなし熱間抜残し加工

通電加熱 850℃, 3.3s → 搬送 2s → 成形 抜残し加工 1s → 下死点保持 5s



成形品



(a) 水平部 パンチ側

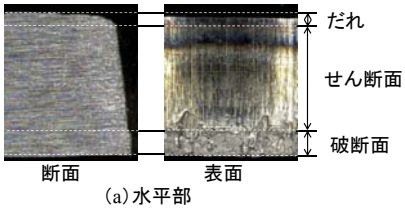
(b)傾斜部 パンチ側

(a) 水平部 ダイス側

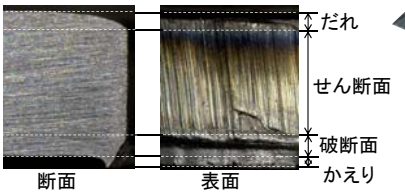
抜残し率 α=15%

(b)傾斜部 ダイス側

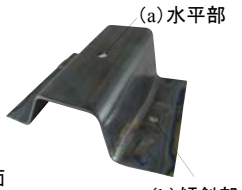
ピンによる抜取り加工後の切口面と切口断面



(a) 水平部



(b) 傾斜部



1. スプリングバック
2. 伸びフランジ
3. 割れ
4. 焼付き
5. しわ
6. せん断加工
7. テーラードブランク
8. 接合
9. ホットスタンピング