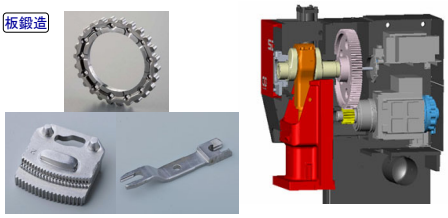
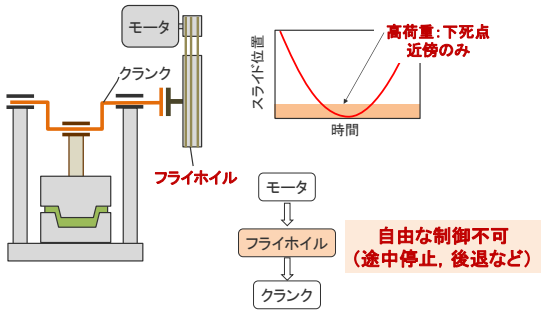
サーボプレスのパルスモーションを用いた自動再潤滑と応用

横浜国立大学　前野智美

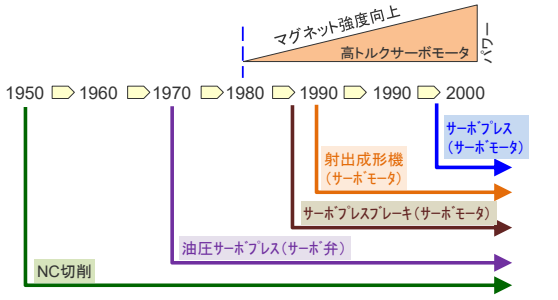


MF-Tokyo 2025　　2025年7月18日　東京ビッグサイト

機械プレス（クランク，ナックル，リンク）



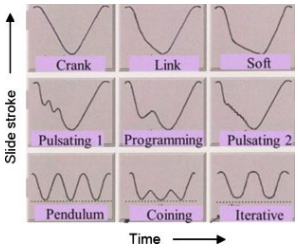
工作機械，鍛圧機械のサーボ制御の流れ



Osakada et al., CIRP Annals - Manufacturing Technology 60-2(2011), 651-672

ACサーボプレスの特徴

- 進行，後退，保持
- 速度可変
- 下死点近傍での往復

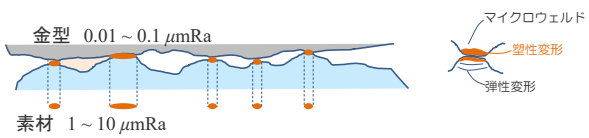


Osakada et al., CIRP Annals - Manufacturing Technology 60-2(2011), 651-672

サーボプレスのパルスモーションを用いた自動再潤滑と応用

- •塑性加工における摩擦と潤滑概要
- •板材プレスにおけるモーション活用
- •鍛造におけるモーション活用
- •パルスモーションによる荷重の低減とメカニズム
- •パルスモーションによるボンデフリー鍛造
- •ステンレス厚鋼板の切り口面性状向上
- •パルス液封鍛造によるギア成形
- •パルスモーションを用いた自動再潤滑に適した潤滑剤設計

接触界面における真実接触面



真実接触面積
弾性体どうし：　見かけの$\frac{1}{10000} \sim \frac{1}{100}$
塑性加工：　20%~80%

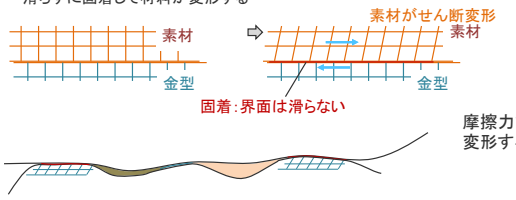
摩擦モデル（せん断摩擦則 トレスカ摩擦）

せん断摩擦則・・・・・・真実接触面積が大きい時

摩擦応力は材料のせん断変形抵抗を超えない

↳滑らずに固着して材料が変形する

$$\mu = \tan\theta = \frac{F_t}{F_n} = \frac{\tau_f}{p}$$



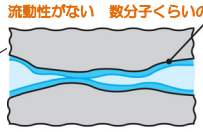
摩擦力で素材が塑性変形するような状態

塑性加工における摩擦

実際の接触はいろんな接触が混合している

固着　汚染層　固着　境界潤滑　流体潤滑

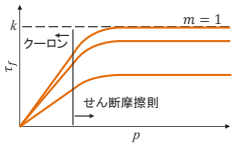
流動性がない　数分子くらいの厚さ

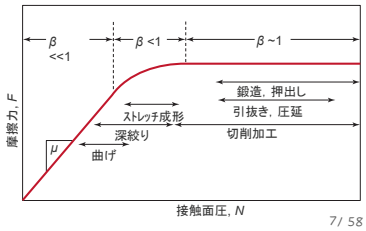


$\tau_f = mk$

└せん断降伏応力

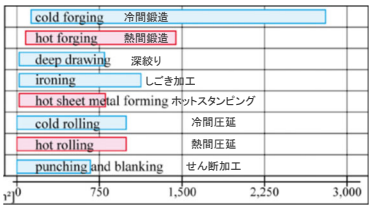
└摩擦せん断係数$(0 \le m \le 1)$

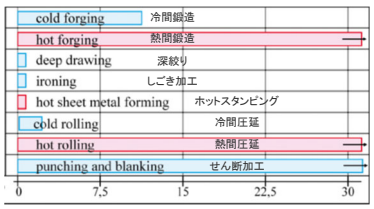




Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed. Kalpakjian • Schmid © 2008, Pearson Education ISBN No. 0-13-227271-7

塑性加工における工具接触面圧および表面拡大率目安

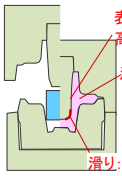




Manufacturing Processes for Engineering Materials, 5th ed.
Kalpakjian • Schmid
© 2008, Pearson Education
ISBN No. 0-13-227271-7

塑性加工の摩擦における課題

鍛造における摩擦は厳しい



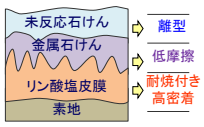
表面拡大率：数十～100
高面圧：2～3GPa
温度上昇:200～300°C
滑り：大

高強度鋼板のかじり

780MPa
980MPa
1180MPa
1450MPa

大同特殊鋼製品紹介より

ボンデ処理



ボンデ処理皮膜

環境性悪い，

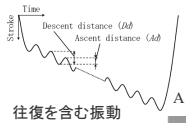
中鎖塩素化パラフィン（MCCP）利用規制

金属加工油剤においては2036年まで延期
※回収システムのある環境に限定

サーボプレスのパルスモーションを用いた自動再潤滑と応用

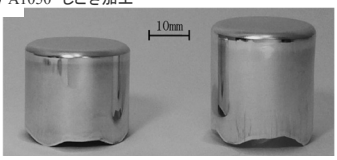
- 塑性加工における摩擦と潤滑概要
- 板材プレスにおけるモーション活用
- 鍛造におけるモーション活用
- パルスモーションによる荷重の低減とメカニズム
- パルスモーションによるボンデフリー鍛造
- ステンレス厚鋼板の切り口面性状向上
- 液封鍛造によるギア成形
- パルスモーションを用いた自動再潤滑に適した潤滑剤設計

振動しごき加工



往復を含む振動

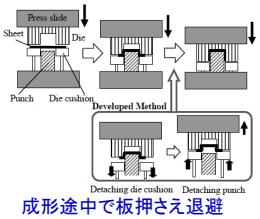
A1050 しごき加工



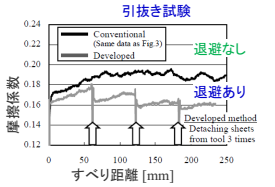
振動なし　　振動 あり

古閑伸裕 ほか, 1050 アルミニウム板のNC サーボプレスを用いた振動深絞り加工としごき加工, 軽金属 Vol.57 No.6 (2007) 240– 244.

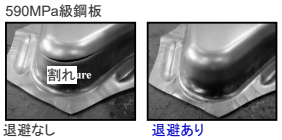
冷間プレス成形におけるサーボプレスのモーション制御を用いた成形性向上



成形途中で板押さえ退避



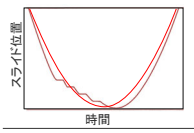
590MPa級鋼板

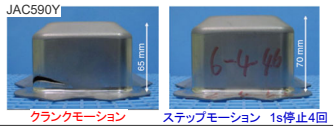


退避なし　退避あり

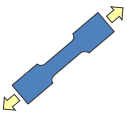
Y. Tamai et.al., Improvement of formability in stamping of steel sheets by motion control of servo press, Steel Research International 41 (9) (2010), Supplement Metal Forming 2010, 686-689.

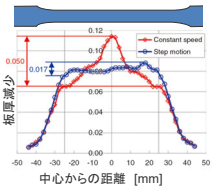
応力緩和減少を利用したひずみ分散化による深絞り性向上





引張試験にステップモーションを適用して詳細な検討



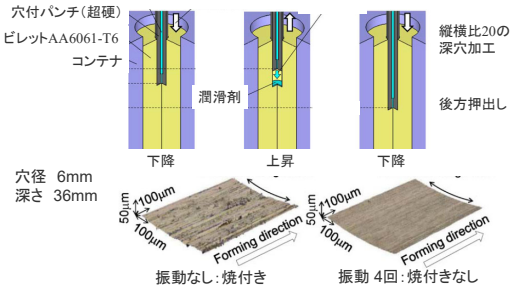


山下裕之 ほか, 応力緩和減少を利用したひずみ分散化による深絞り向上技術, Honda R&D Technical Review Vol.24 No.1 (2012) 142– 148.

サーボプレスのパルスモーションを用いた自動再潤滑と応用

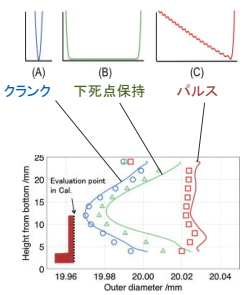
- 塑性加工における摩擦と潤滑概要
- 板材プレスにおけるモーション活用
- 鍛造におけるモーション活用
- パルスモーションによる荷重の低減とメカニズム
- パルスモーションによるボンデフリー鍛造
- ステンレス厚鋼板の切り口面性状向上
- パルス液封鍛造によるギア成形
- パルスモーションを用いた自動再潤滑に適した潤滑剤設計

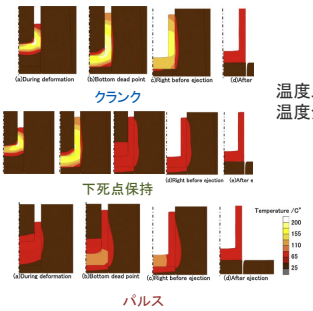
潤滑油流路パンチとサーボプレスのモーション制御を活用したパルス穴あけ加工法



R. Matsumoto et.al., Prevention of galling in forming of deep hole with retreat and advance pulse ram motion on servo press. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60 (1) (2011) 315– 318.

加工発熱による温度上昇の均一化による形状制度向上



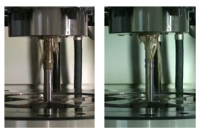


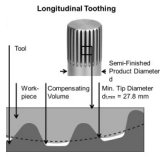
温度上昇抑制
温度分布均一化

T. Ishikawa et al., Control of thermal contraction of aluminum alloy for precision cold forging, CIRP Annals - Manufacturing Technology Vol.63 No.1 (2014) 289– 292.

振動スプライン成形における摩擦制御による形状精度安定化

軸へのスプライン成形





焼付き防止 ⇨ 摩擦制御

荷重コントロール → 油圧シリンダ → 成形荷重

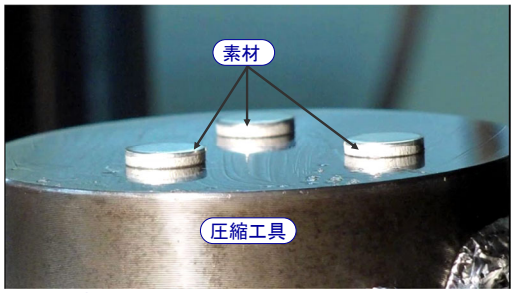
素材のバラツキによる精度欠陥を防止

P. Groche et al., Friction control for accurate cold forged parts, CIRP Annals - Manufacturing Technology Vol.63 No.1 (2014) 285– 288.

サーボプレスのパルスモーションを用いた自動再潤滑と応用

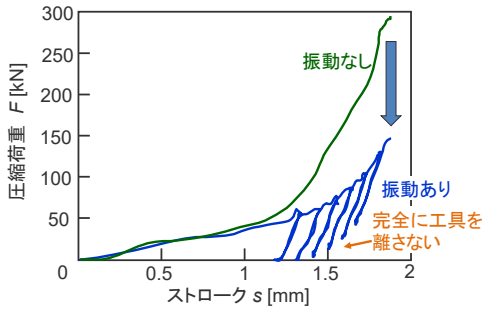
- •塑性加工における摩擦と潤滑概要
- •板材プレスにおけるモーション活用
- •鍛造におけるモーション活用
- •パルスモーションによる荷重の低減とメカニズム
- •パルスモーションによるボンデフリー鍛造
- •ステンレス厚鋼板の切り口面性状向上
- •パルス液封鍛造によるギア成形
- •パルスモーションを用いた自動再潤滑に適した潤滑剤設計

サーボプレスを用いたすえ込み実験

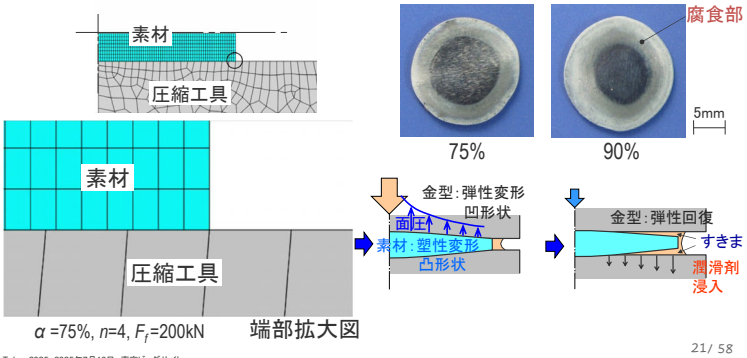


振動モーション
平均除荷率70～80%，除荷回数6回

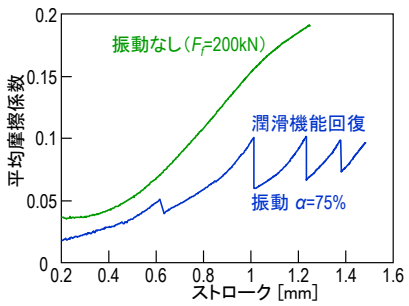
板の圧縮における振動モーションとクランクモーションの荷重－ストローク曲線



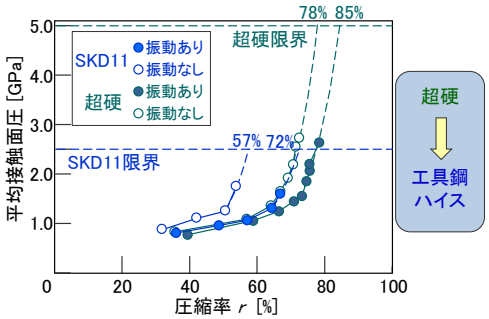
有限要素シミュレーションによる隙間の解析と検証



加工中の摩擦係数の変化



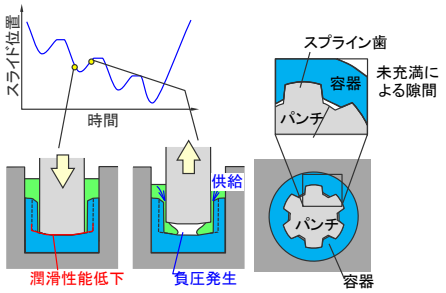
SUS 430素板の荷重振動ありなしにおける平均接触面圧と圧縮率の関係



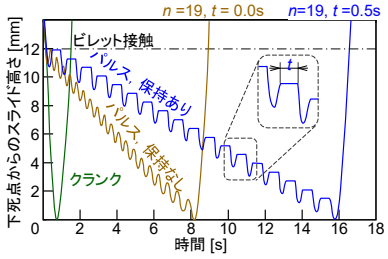
サーボプレスのパルスモーションを用いた自動再潤滑と応用

- •塑性加工における摩擦と潤滑概要
- •板材プレスにおけるモーション活用
- •鍛造におけるモーション活用
- •パルスモーションによる荷重の低減とメカニズム
- •パルスモーションによるボンデフリー鍛造
- •ステンレス厚鋼板の切り口面性状向上
- •パルス液封鍛造によるギア成形
- •パルスモーションを用いた自動再潤滑に適した潤滑剤設計

振動後方押出しによる自動再潤滑方法

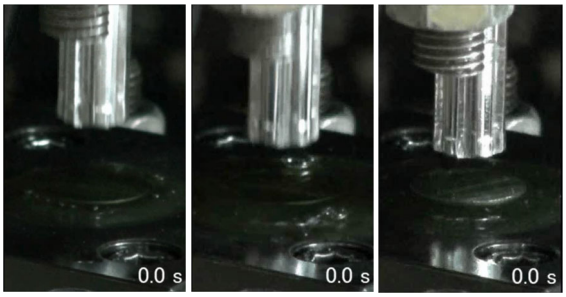


後方押出しに用いたパルススライドモーション



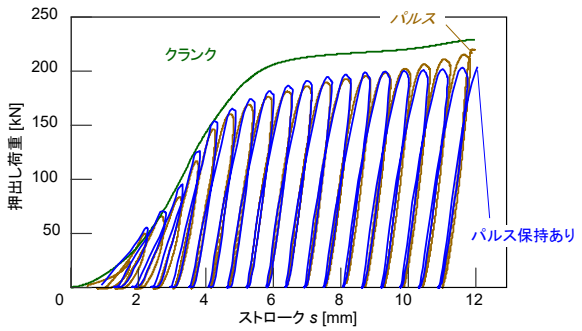
モーション	振動回数 n	上昇量[mm]	保持時間 t [s]	速度[mm/s]
クランク	0	–	–	23
パルス	4 ,19	1.2	–	12.5
パルス，保持あり	4, 9, 19	1.2	0.2, 0.5, 1.0	12.5

パルスモーションを用いた後方押出しによるスプライン成形

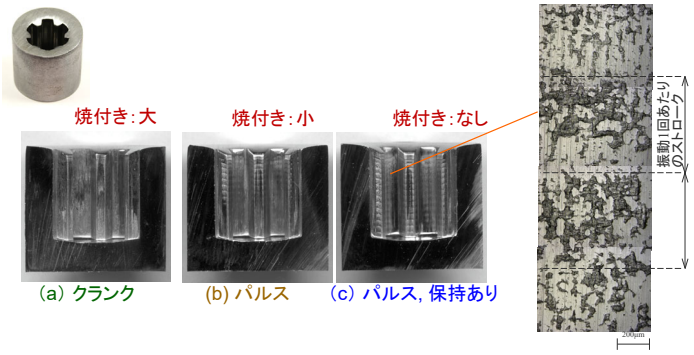


(a) クランク　(b) パルス　(c) パルス，保持あり

パルスモーション後方押出しにおける押出し荷重—ストローク曲線

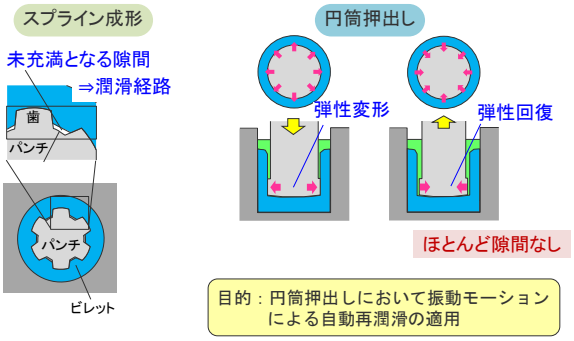


振動後方押出しによって成形されたスプライン容器(低粘度)



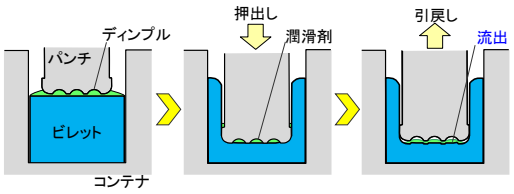
(a) クランク　(b) パルス　(c) パルス，保持あり

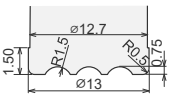
円筒押出しにおけるパルスモーションの適用

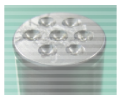


目的：円筒押出しにおいて振動モーションによる自動再潤滑の適用

振動モーションとディンプルパンチによる自動再潤滑

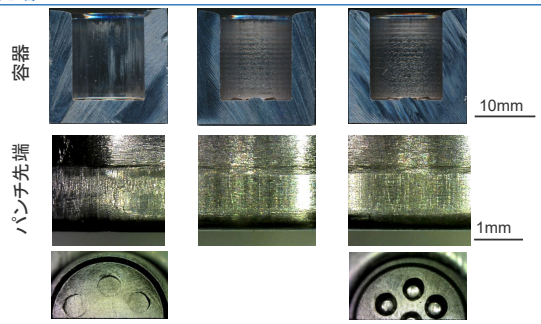






ディンプル内の潤滑剤がパンチ上昇時に底部に供給

ディンプルパンチによる後方押出し後の容器内面およびパンチ先端



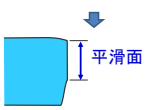
(a) クランク (b) パルス，t = 1 s (c) パルス，t = 0 s

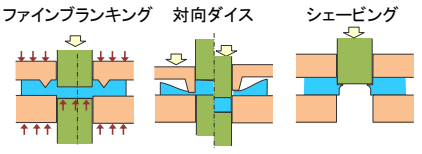
サーボプレスのパルスモーションを用いた自動再潤滑と応用

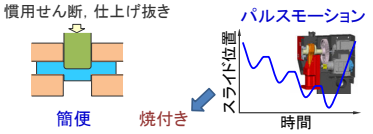
- 塑性加工における摩擦と潤滑概要
- 板材プレスにおけるモーション活用
- 鍛造におけるモーション活用
- パルスモーションによる荷重の低減とメカニズム
- パルスモーションによるボンデフリー鍛造
- ステンレス厚鋼板の切り口面全平滑面化
- パルス液封鍛造によるギア成形
- パルスモーションを用いた自動再潤滑に適した潤滑剤設計

ステンレス厚鋼板の穴抜きへのパルスモーション適用

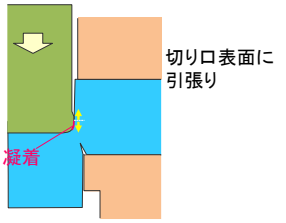
板鍛造製品の切り口
機能面：歯車，嵌合部



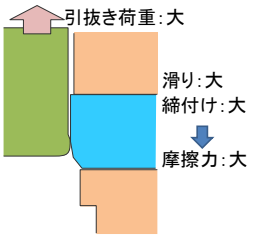




厚板の穴抜き，せん断における問題点

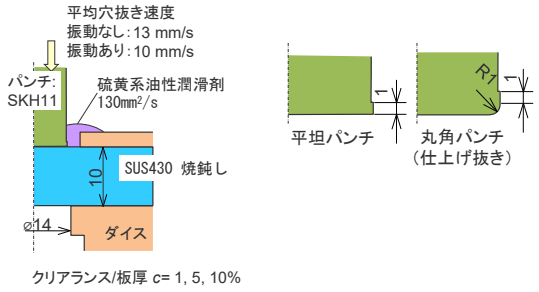


凝着 ⇨ むしれ傷
パンチ側からのクラック



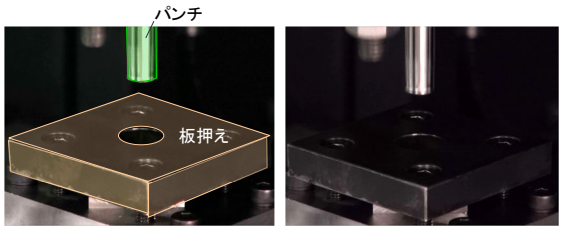
粉末工具⇒破断
コーティング⇒剥離，摩耗

パルスモーションを用いた穴抜き加工に用いた工具寸法および穴抜き条件



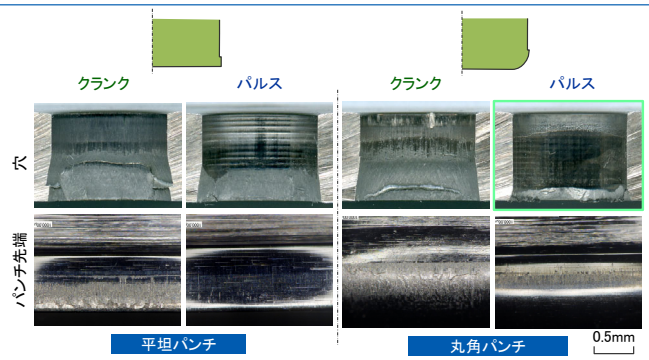
クリアランス/板厚 c= 1, 5, 10%

振動ありとなしにおけるSUS430鋼板の穴抜きの様子

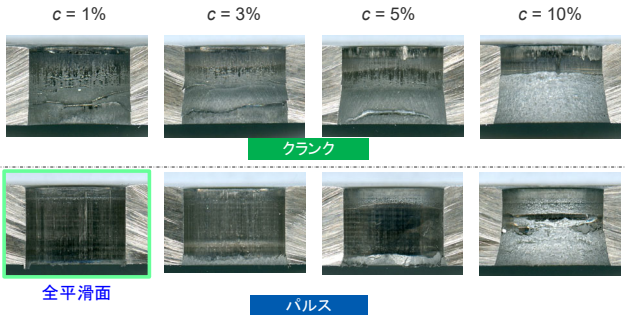


クランク　　パルス

平坦，丸角パンチで穴抜きされたSUS430材穴切り口面およびパンチ先端（c = 5%）



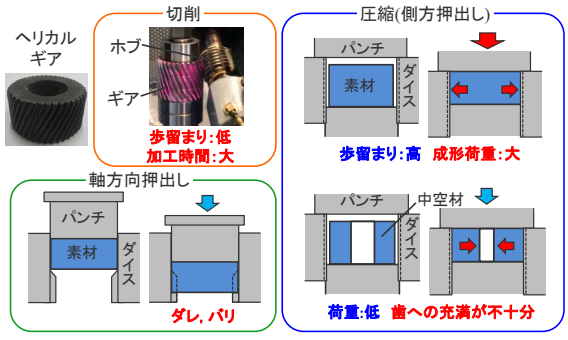
振動ありなしによる各クリアランスにおける切り口面（sus430，丸角パンチ）



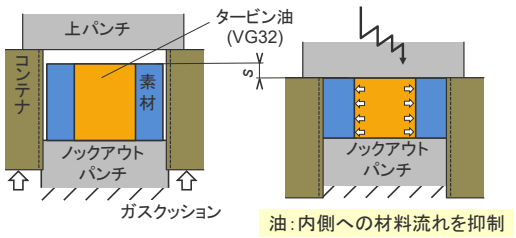
サーボプレスのパルスモーションを用いた自動再潤滑と応用

- 塑性加工における摩擦と潤滑概要
- 板材プレスにおけるモーション活用
- 鍛造におけるモーション活用
- パルスモーションによる荷重の低減とメカニズム
- パルスモーションによるボンデフリー鍛造
- ステンレス厚鋼板の切り口面全平滑面化
- パルス液封鍛造によるギア成形
- パルスモーションを用いた自動再潤滑に適した潤滑剤設計

パルス液封鍛造によるギア成形



中空ギアのパルス液封鍛造方法

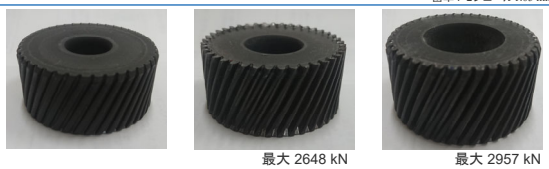


油：内側への材料流れを抑制

油を入れるだけ⇒設備・金型の簡略化

液封鍛造したヘリカルギア

素材: SCR420，球状化焼鈍，ボンデ
外径45 mm，内径24 mm，高さ30 mm
歯車：モジュール1.05 mm，歯数41，ねじれ角25°



最大 2648 kN　　最大 2957 kN

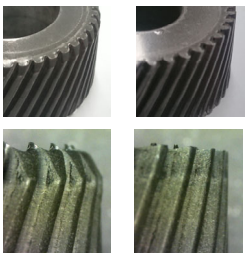
液封なし　　液封・パルス　　液封・クランク

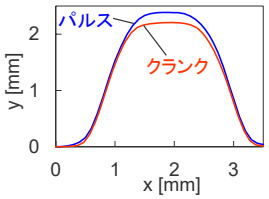
	平均内径 [mm]	歯先円直径 [mm]	歯底円直径 [mm]	歯たけ	製品高さ [mm]
液封なし	15.0	48.4	46.1	1.15	20.7
液封・パルス	19.6	50.4	46.3	2.05	21.4
液封・クランク	25.0	50.1	46.4	1.85	24.8

液封・パルス：穴径縮小　液封・クランク：穴径拡大

パルスとクランクで液封鍛造したヘリカルギアの歯の比較

ギアの上端　　高さ中央の歯丈

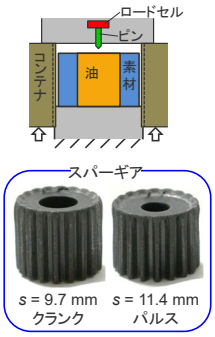


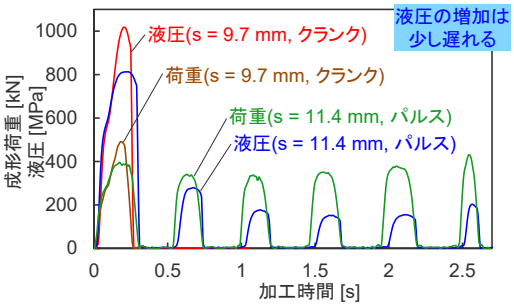


(a) クランク　　(b) パルス

パルスによって歯形充満が向上

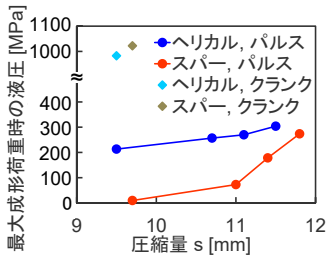
スパーギアの液封鍛造における成形荷重と液圧の履歴

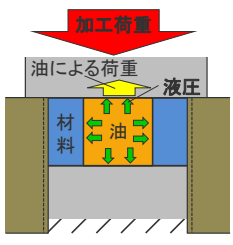




荷重：振動5回目に最大
液圧：圧縮量に比例，パルスにより油が流出することで低下

液圧による最大荷重への影響

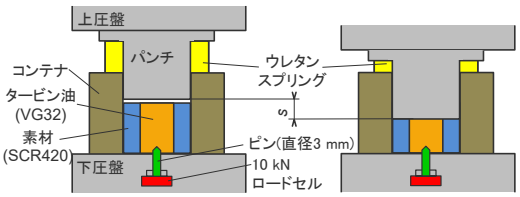


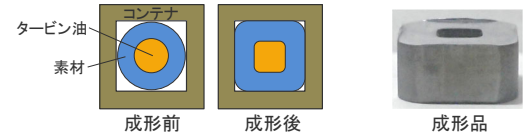


最大成形荷重発生時の液圧
クランク：約1000 MPa
パルス　：最大300 MPa

⇒ 液圧の低下によって
パンチにかかる荷重が低下し
成形荷重が減少している

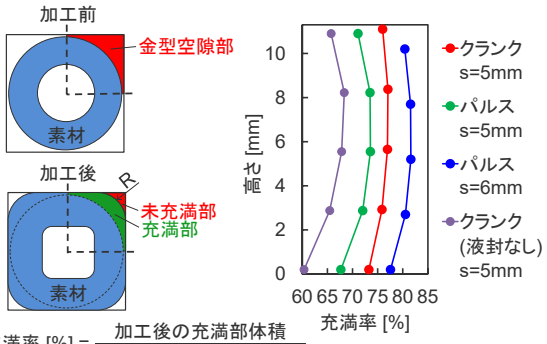
矩形コンテナを用いた液封鍛造による検討





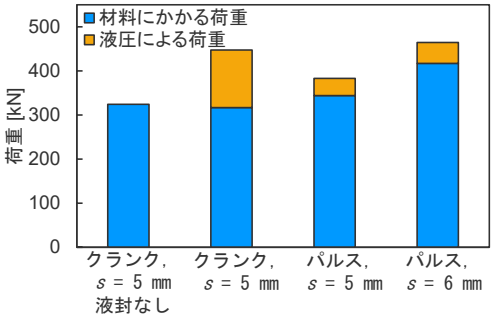
成形前　　成形後　　成形品

矩形コンテナを用いた液封鍛造における角部充満率の比較



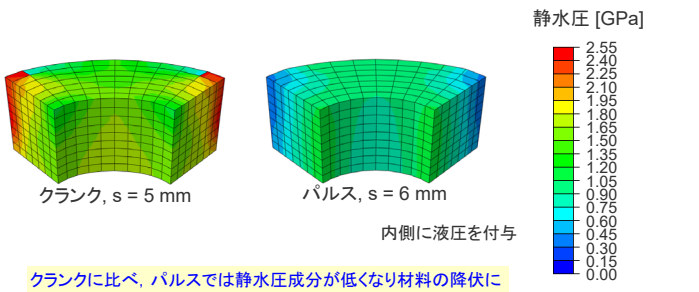
$$充満率\ [\%] = \frac{加工後の充満部体積}{加工前の金型空隙部体積}$$

最大荷重発生時の材料にかかる荷重と液圧による荷重



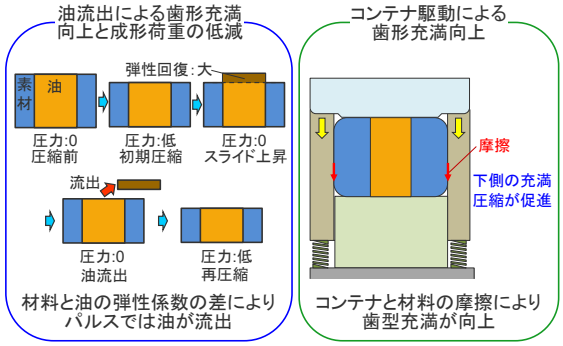
液圧による荷重の低下 ⇒ 最大荷重の低下
材料にかかる荷重の増加

素材中の静水圧分布

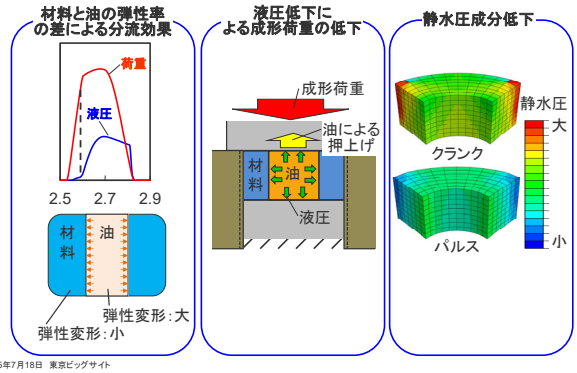


クランクに比べ，パルスでは静水圧成分が低くなり材料の降伏に必要な荷重が小さくなった

中空ギアの液封鍛造における荷重低減と歯型充満向上のメカニズム



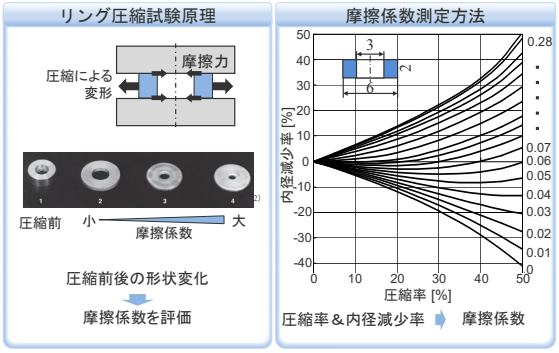
油流出による歯形充満向上と成形荷重低減のメカニズム



サーボプレスを用いたパルスモーションによる自動再潤滑の応用

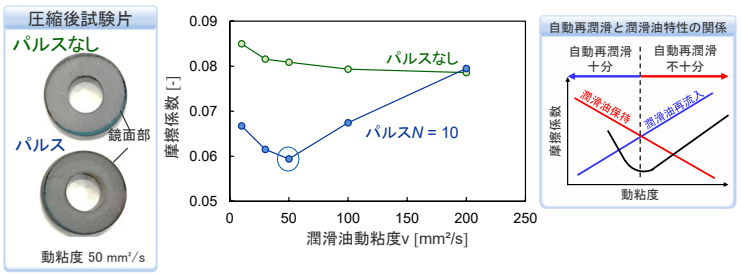
- 塑性加工における摩擦と潤滑概要
- 板鍛造
- 荷重振動鍛造による荷重の低減とメカニズム
- 荷重振動によるボンデフリー鍛造
- ステンレス厚鋼板の切り口面性状向上
- パルスモーションを用いた自動再潤滑に適した潤滑剤設計

リング圧縮試験の原理



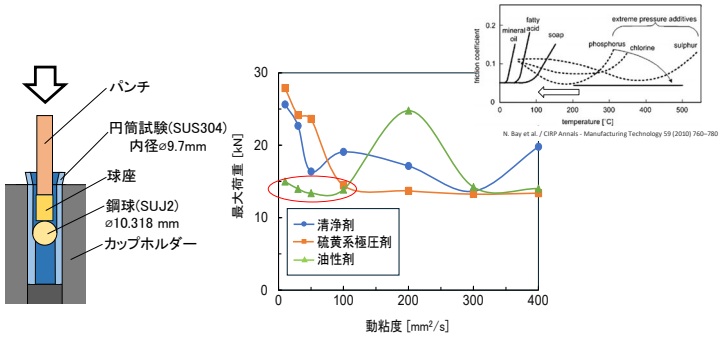
2) Seropе Kalpakjian, Steven R. Schmid, MANUFACTURING Engineering and Technology

S45Cリングにおけるパルスモーションありとなしにおける摩擦係数と動粘度の関係



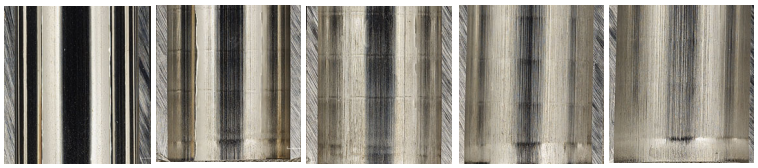
クランク	高粘度ほど低摩擦
パルス	摩擦係数が低下する極値が存在

パルスモーションを用いたボール通し試験による潤滑剤添加剤および動粘度が押通し荷重に及ぼす影響



油性剤の各濃度がにおける玉通し試験結果　耐焼付き性

少 ← 焼付き → 多



(a) 塩素系	(b) α=20%	(e) α=50%	(d) α=30%	(c) α=10%
最大荷重：13.7 KN（クランク）	最大荷重：14.7 KN	最大荷重：15.5 KN	最大荷重：16.5 KN	最大荷重：16.4 KN

パルスモーションを用いた油性剤濃度α=20%の結果は，塩素系潤滑剤に近い結果を示した．

ま と め

パルスモーションを用いると様々な自動再潤滑が得られます

高性能潤滑剤アプローチ		振動鍛造アプローチ
潤滑性能維持	➡	潤滑性能回復

パルスモーションを用いると，自動再潤滑以外の効果も得られます

せん断応力付与による荷重低減，液体工具との組み合わせ，温度上昇防止

関連文献リスト（論文）

1. 前野智美，小坂田宏造，森謙一郎，荷重振動による板鍛造における摩擦低減，塑性と加工，50-585 (2009), 951-955.
2. T. Maeno, K. Osakada, K. Mori, Reduction of Friction in Compression of Plates by Load Pulsation, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 51-7-8 (2011) 612-617.
3. T. Maeno, K. Mori, A. Hori, Application of load pulsation using servo press to plate forging of stainless steel parts, Journal of Materials Processing Technology, 214-7 (2014), 1379-1387.
4. 前野智美，サーボプレスを用いた摩擦を低減する荷重振動鍛造，プレス技術，50-12 (2012), 81-92.
5. 前野智美，サーボプレスを用いた摩擦を低減する荷重振動鍛造，型技術，27-10 (2012), 23-27.
6. 前野智美，荷重振動鍛造による成形荷重低減とボンデフリー化，プレス技術，52-7 (2014), 24-27.
7. T. Maeno, K. Mori, Y. Ichikawa, M. Sugawara, Use of liquid lubricant for backward extrusion of cup with internal splines using pulsating motion, Journal of Materials Processing Technology, 244(2017), 273-281.
8. T. Maeno, M. Sugawara, T. Saito, A. Terada, K. Mori, Improvement of burnished area in punching of stainless steel thick plate by means of pulsating motion, Procedia Manufacturing 50 (2020), 203-209.
9. T. Maeno, H. Homma, R. Ikeda, K. Mori, Automatic re-lubrication by pulsating motion with punch having dimple bottom in backward extrusion of cylindrical cup, Procedia Manufacturing 50 (2020), 231-235.
10. A. Soleymanipoor and T. Maeno, Effect of Pulsating Motion Conditions on Relubrication Behavior and Dimensions of Laterally Extruded Internal Gears, J. Manuf. Mater. Process. 9(6)(2025), 190.
11. A. Soleymanipoor, T. Maeno, K. Tosaka, M. Kakudo, K. Takahashi, M. Yanagisawa, O. Tsukamoto, Measuring Transient Friction Coefficient Affected by Plastic Heat Generation Using a Warm Ring Compression Test with an In Situ Measurement System Measuring Ring Expansion Velocity. J. Manuf. Mater. Process. 9(7) (**2025**), 241.

関連文献リスト（学会）

1. すえ込み加工における途中除荷による摩擦の低減，第59回　塑加連，341.
2. 荷重振動による軸付きフランジ部品のフランジ成形における摩擦の低減，第60回　塑加連，97.
3. 板鍛造における荷重振動を用いたステンレス鋼部品の段差付け加工　平23塑加春，1.
4. 板鍛造における潤滑浸漬荷重振動による摩擦低減，平24塑加春,123.
5. ステンレス鋼平歯車の荷重振動板鍛造，平25塑加春，81.
6. サーボプレスを用いた振動後方押出しによる内スプライン成形における焼付きの抑制　平26塑加春，259.
7. 内スプラインの振動後方押出しにおける振動モーションの最適化および潤滑ポケットビレットによる成形時間の短縮，第65回塑加連，281.
8. サーボプレスを用いた振動後方押出しによる内スプライン成形品の表面性状の向上，平27塑加春,13.
9. ステンレス厚鋼板の穴抜き加工における振動モーションを用いたせん断面品質向上，平28塑加春
10. パルスモーションによる自動再潤滑に及ぼす潤滑油特性のリング圧縮試験による評価，2020塑加連合講論，139
11. パルスモーションを用いたボール通ししごきにおけるパンチ荷重に及ぼす潤滑添加剤種類及び濃度の影響，2024塑加連講論