

## 鍛造の基礎

ものづくり基礎講座（第39回技術セミナー）  
『金属の魅力をみなおそう 第二弾 加工技術編 第二回』

東北大学金属材料研究所  
正橋直哉  
masanasi@imr.tohoku.ac.jp

2014年6月5日 14:05~14:35

クリエイション・コア東大阪 南館3階 技術交流室



### 様々な鍛造製品

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』  
2014. June 5 14:05~14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

 株式会社メタルアート	 株式会社ミヤジマ	 知多工業株式会社	
 協業組合菊水フォージング	 浪速鍛工(株)	 テクノメタル株式会社	
 株式会社中部鍛造所	 東京精密鍛造(株)	 サムテック(株)	 ティエフォー株式会社

日本鍛造協会HPより

## 鍛造の歴史

Kansei Center

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』  
 2014. June 5 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

東北大学

6000年前	エジプトやメソポタミアで金、銀、銅などを鍛造
5500年前	メソポタミアで鋳型や銅の斧が出土
4000年前	火を使い鉄を製造し、小アジアで鉄の鍛造が始まる
2500年前	中国に鉄製農具が普及
弥生時代後期	倭鍛冶（やまとかめち）が鉄鍛造品を製造
4世紀	百済から鍛造技術者の韓鍛（からかめち）卓素が来朝
7世紀前半	韓鍛治は集落を造り、韓鍛治百島など127人に姓を賜る
8世紀前半	武器、鎌、斧、小斧、鎌、金管等の鍛造品製造
平安期以降	鎌、包丁、剃刀等の日用品や武器の製造技術が発達

農工具

日用品

武器

産業機械部品

**倭鍛冶とは:**古事記、日本書紀などに日本最初の鍛冶として現れるのが天目一箇神(あめのまひとつのかみ)、一名天津麻羅(あまつまら)で、鍛冶の祖神といわれその子孫を称する。

**韓鍛冶とは:**応神天皇のとき、百済から学者和邇(わに)とともに韓鍛(からかめち)卓素(たくそ)が来朝し(古事記)、この帰化系の鍛冶を倭鍛冶に對し称する。

## 鍛造加工の現状

Kansei Center

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第1回 圧延』  
 2014. June 5 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

東北大学

**コスト低減から、精密鍛造の主流である冷間鍛造では、大寸法・複雑形状化と高強度化が課題だが、変形抵抗が大きく対応できない。熱間・温間鍛造は変形抵抗が小さいことから、フリフォームを成形し冷間鍛造で仕上加工を行なう（複合鍛造）。**

品名	コネクティングロッド	ピン	リングギア	コンロッドキャップ	ティーバーローラベアリング	トラックリンク	バルブ
完成図							
プレス直前の素材の形状							
鍛造工程	1 ロールSPHS (粗地)	つぶし	つぶし	曲げ	つぶし	粗地	つぶし
	仕上げ	後方押出	後方押出	粗地	粗地	仕上げ	粗地
	2 						
	3 						
4 バリ抜き	前方押出	ローリングミル	トリミング	ピアス	トリミング	トリミング	



## 鍛造とは

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉




鍛造加工はハンマと金敷、あるいは金型と金型の間で材料を圧縮することによって塑性変形させ、目的の形状に成形する加工を称する。金属を鍛造することで、溶解鑄造時にできた巣やポア等の欠陥を圧着し、結晶粒微細化により機械的性質を改善できる。






**● 鍛造の主な特徴**

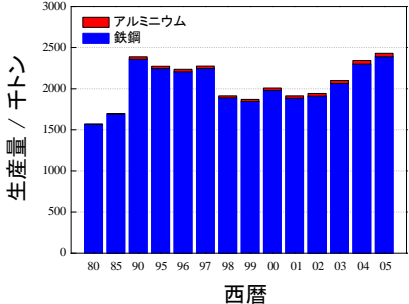
- 1) 切削と違い**素材が節約**でき、**目的とする形状近くまで成形加工**ができる。
- 2) 鑄造時の空隙等の内部欠陥を圧着し、**機械的性質のばらつきが少**ない。
- 3) 再結晶組織を得ることで**機械的性質を向上**することができる。
- 4) **大型インゴットの加工**が可能。**寸法のばらつきが少**ない。



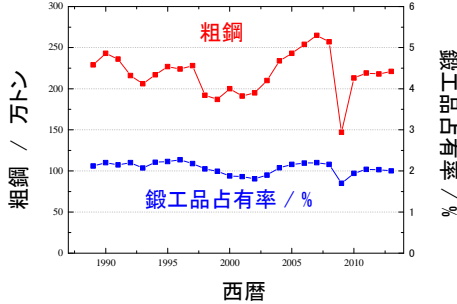
## 鍛造業界の現状

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉





西暦



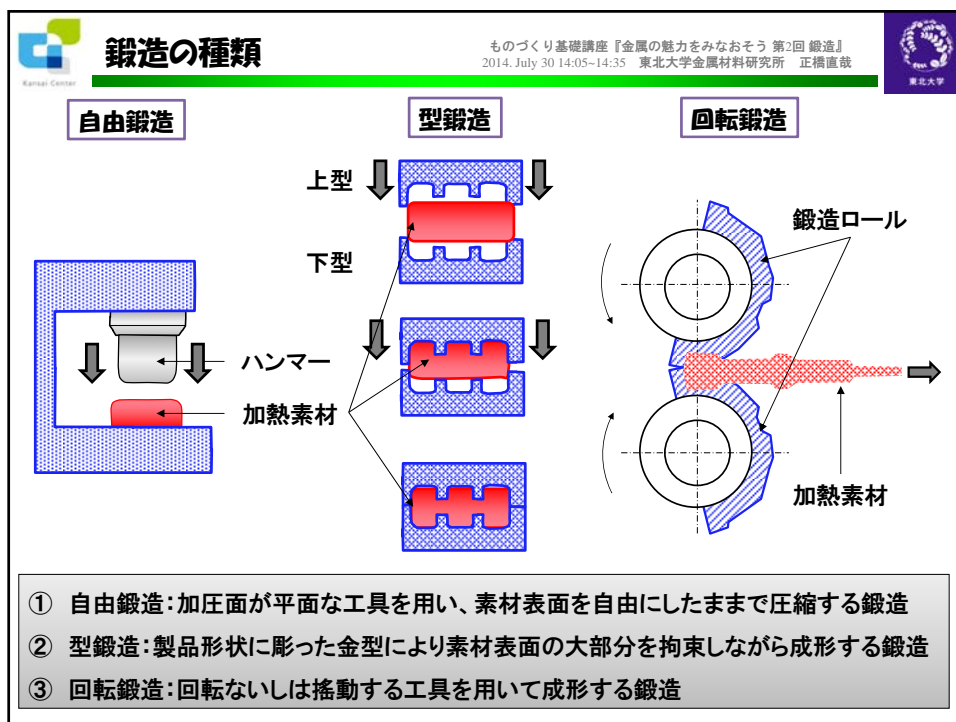
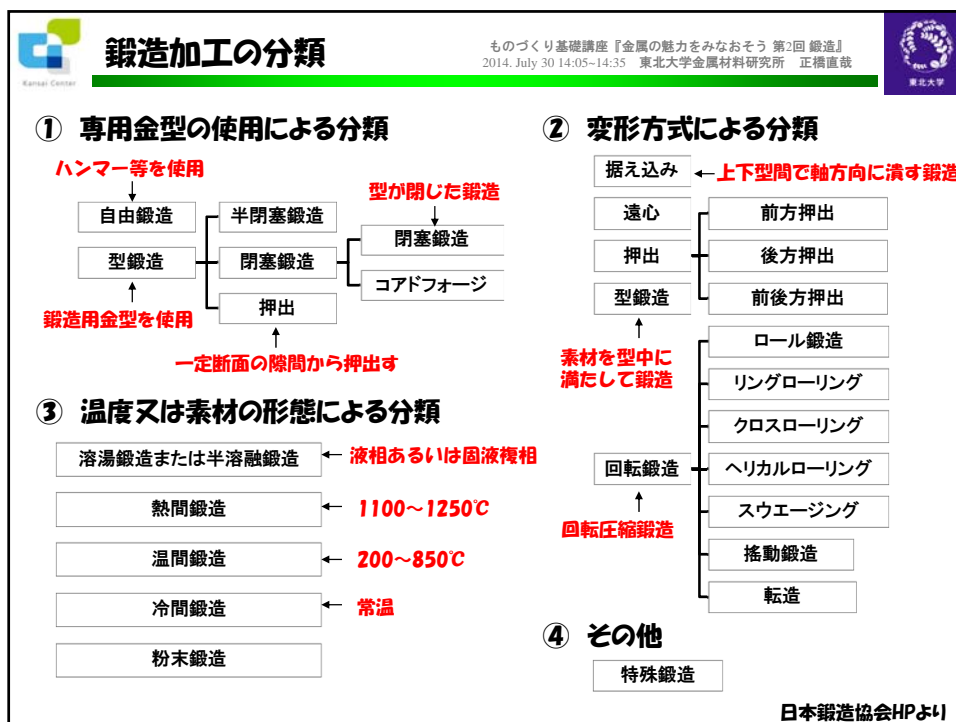
西暦

国内鍛製品生産量は増加傾向にあり、2005 年はバブル期のそれを上回る。一方、事業所数、従業員数は減少し、製造現場は繁忙を極めている。

2007年実績は過去最高を記録。1970年の生産量は86万トンで、粗鋼生産量(9300万トン)の約1%だったが、現在、生産実績は約2%を占める。

生産量は増加しているが、多くのメーカーは十分な利益を確保しているとは言い難い。このため業界として、生産能力増強や技術力向上等に向けた設備投資、人材確保に向けた待遇改善等を行う余裕に乏しい。加えて、規制強化の問題もあり、経営環境は厳しい。

一般社団法人 日本鍛造協会鍛造業ビジョンより



**様々な自由鍛造**

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
 2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

**鍛伸: 円柱や角柱あるいは円筒の断面積を減らして長さを伸ばす加工**

**角柱**

平金敷

**円柱**

タップ金敷  
平金敷  
薬研金敷

**円筒**

心金

**拵込**: 円柱を軸方向に圧縮し長さを縮める加工

**穴拡げ**: 円筒の肉厚を減じ直径を拡大する加工

**展伸**: 四角ブロックの一方の厚さを減じて直角な二方向に交互に伸ばして厚板を作る

あてへし

馬台

**冷間鍛造**

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
 2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

**高い変形抵抗のため加工機械や工具強度の制約があり小部品に限る。適用できる材料は限られるが、酸化膜を生成せず潤滑が効くため、表面が清浄で寸法精度が高い**

素材を軸方向から圧縮し高さを減少し断面積を増やす

**拵え込み**

細長い棒や線材の一端をすえ込む

**ヘッドイング**

凹凸のついた1対の型で圧縮し型の模様を材料に写す

**コイニング**

パンチの進行と材料の流出方向が同じ


**前方押出**

パンチの進行と材料の流出方向が反対

**後方押出**


二つの押し出しを同時に行う

**複合押出**

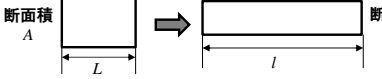


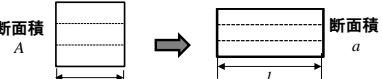



## 鍛錬成形比


ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
 2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



**鍛伸成形比: 鍛造の加工度で、鍛造後の材料の断面積・長さを、鍛造前の材料のそれで割った値**


鍛錬作業		鍛錬成形比
<b>実体鍛錬</b> 径を小さくして長さを伸ばす		$A/a$ $l/L$
<b>据え込み鍛錬</b> 長さを圧縮して径を太くする		$l/L$
<b>展伸鍛錬</b> 主として幅を広げる		$(t/T)(l/L)$
<b>中空鍛錬</b> 内径一定で長さを伸ばす		$A/a$ $l/L$
<b>穴抜き鍛錬</b> 長さ一定でない外形を拡げる		$(D-C)/(d-c)$

「鍛造品」のうち鍛伸成形比が一定以上の値のものを「鍛鋼品」と称する。

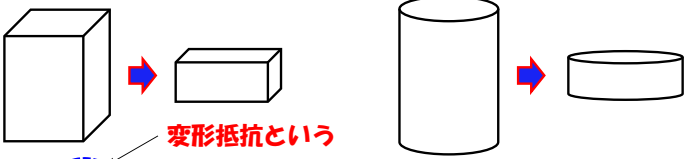


## 据え込み加工による変形

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
 2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



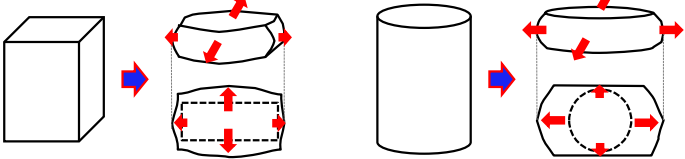
**型と素材間に摩擦がないか小さい時**




変形抵抗という

軸方向にだけ**応力**が作用（単軸圧縮応力状態）する。断面積が増えても材料を横方向に動かす抵抗がなく、**据込み品の平面図は元の平面図と相似形**になる。

**型と素材間に摩擦がある時**




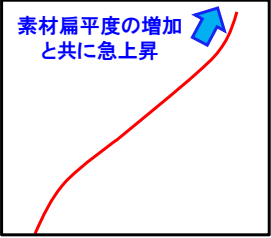
端面は変形できず圧縮方向に素材が押し込まれて**側面が樽形**となる。長方形断面の素材の場合、長辺の向きに流動する応力よりも短辺の向きに流動する応力が小さい。



**据え込み圧力**

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
 2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

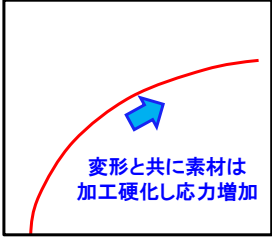




荷重

素材扁平度の増加と共に急上昇

工具の変位



応力

変形と共に素材は加工硬化し応力増加

対数歪み

型と素材との間に摩擦が作用する場合の円柱の据え込み圧力は、次式で求める。


$$P = Y \cdot \left(1 + \frac{\mu \cdot d}{3h}\right)$$

Y: 変形抵抗、 $\mu$ : 摩擦係数、d: 素材直径、h: 素材高さ

{


d/hが小さい時は摩擦の影響は小さい ⇨ 端面の影響が小さい

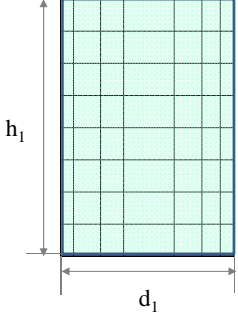
d/hが大きい時は摩擦の影響は大きい ⇨ 端面の影響が大きい



**バレリング変形とは**

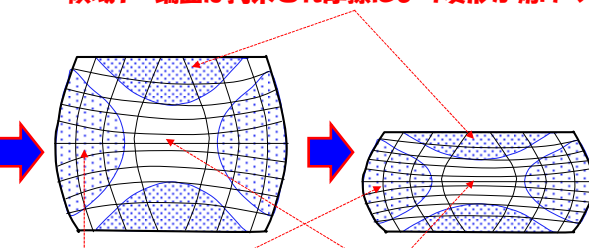
ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
 2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉





$h_1$

$d_1$



**領域1: 端面は拘束され摩擦により変形が妨げられる**

**領域2: 領域1に押し込まれて強圧縮を受ける**

**領域3: 領域2が圧縮変形を受け自由端面が半径方向外側に拡がる**

- ①  $h_1/d_1 < 2$ の素材を据え込み鍛造する時に、素材がたる型に変形することをバレリングと称する。
- ②  $h_1/d_1 > 2$ の素材ではたるが二個垂直に配置したダブルバレリングとなる

⇨ バレリング材では材料内部の歪が不均一だが、中心部の鑄造欠陥消滅に有効

## 加工歪み量

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
 2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

引張試験（単純引張力応力状態）で得られる変形抵抗はひずみ0.5程度以下で、鍛造に必要なひずみ2~4に及ばない。小さいひずみのデータで大きいひずみの変形抵抗を外挿することは誤差が大きく危険である。

公称歪  $\epsilon_n = \frac{\Delta L}{L_0}$  …… (1)

真歪  $\epsilon_t = \int_{L_0}^L \frac{dL'}{L'} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$  …… (2)

$\epsilon_t = 0.18$     $\epsilon_t = 0.30$     $\epsilon_t = 0.40$

$\epsilon_t = 0.22$     $\epsilon_t = 0.69$     $\epsilon_t = 1.20$     $\epsilon_t = 2.30$

真歪み

試験片の変形量

引張は50%の変形で歪は0.4程度だが、圧縮は0.7になる

**圧縮の変形抵抗は難しい**

## 変形抵抗を求める

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
 2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

### Alの変形抵抗

A1070 (99.73%), Hv=18.5

変形抵抗 Y

平均変形抵抗  $Y_m$

### 炭素鋼の変形抵抗

S50C, Hv=185  
 S40C, Hv=170  
 S30C, Hv=143  
 S20C, Hv=120  
 S10C, Hv=105


### 変形抵抗/硬さ

S50C  
 S10C  
 S40C  
 S30C  
 Al  
 S20C

回帰曲線


- ① 引張試験で得る変形抵抗はひずみ0.5以下で、鍛造に必要なひずみ2~4に及ばない。
- ② よく潤滑した  $d/h > 0.5$  の円柱据込みにおいて、据込まれた試験片の外径を削りながら、 $d/h > 0.5$  に保ちながら、据込み試験を行い変形抵抗を求める。
- ③ 変形抵抗は初期硬さで割るとほぼ同じとなる。
- ④ 硬さから変形抵抗を概算することができる。

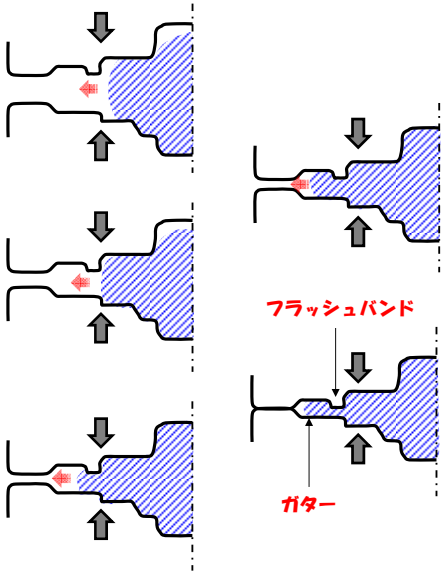




### 型鍛造の成型過程


ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
 2014 July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉






型鍛造は製品形状に彫った金型間に素材を押しつぶして成形する鍛造で、ばりができる。半密閉型鍛造の成型過程を示す。

- ① 円柱を据込む場合、予備成形したプリフォーム(preform)を加工する。
- ② 型の接近と共に材料は据込まれて型穴の隅々へと徐々に充填する。
- ③ 余った材料は狭いフラッシュバンド(ばり道)を通してガター(ばり溜り)に逃げる。
- ④ フラッシュバンドは材料のガターへの流出にブレーキをかけて材料の型への充填を促進する働きをし、ガターは広いばりの形成による荷重の著しい増大を防ぐ。




### 鍛造の代表的な割れ

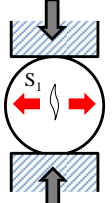
ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
 2014 July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



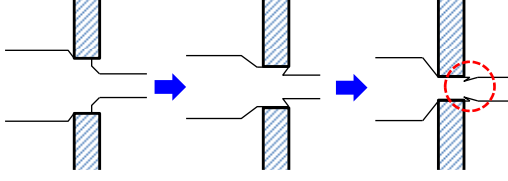
表面割れ



中心割れ



かぶりきず



- ①表面割れ：据込比がその材料と温度に対して過大なとき、たる形に膨んだ自由表面の円周方向に発生する2次的引張り応力( $S_1$ )により生じる。
- ②中心割れ：円柱を平金敷を用いて鍛伸するとき軸心部に生じる割れで、軸心部には大きな横方向の引張り応力 $S_1$ が生じるのみならず、そこにひずみが集中するためにポイドが発生し、結晶粒界が緩んで割れる。
- ③かぶりきず：角柱の鍛伸の際、角半径Rの小さい金敷を用いて1回の押し込み量を大きくとり過ぎると、前段階でできたシャープで深い段差が折れ込んで生じる。

**型鍛造における欠陥** ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

**R不足**  
 材料がR部を回り込んで流動する

**かぶりきず発生**

**R不足**  
 材料が金型に充満した後に薄いウェッジがさらに圧縮され、材料がシャープな隅部でリブ底をせん断してできたしわきず


リブ内に材料が流入する際に、ウェッジが薄いためリブの反対側に生じたひげきず

**曲げを伴う円柱の圧縮** ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉

圧縮応力 + 曲げによる応力 = トータル応力


垂直成分による圧縮応力  $\sigma = \frac{P \cdot \cos \theta}{A} = \frac{P}{A} \cdot \cos \theta \dots\dots(1)$   
 横断面により生ずる曲げモーメント  $M = (P \cdot \sin \theta) \times l \dots\dots(2)$   
 曲げにより生ずる軸歪み  $\epsilon = \frac{s_1 \cdot s_2}{n \cdot n_1} = \frac{y}{r} \dots\dots(3)$   
 曲げにより生ずる応力  $\sigma = E \cdot \epsilon = \frac{E \cdot y}{r} \dots\dots(4)$   
 微小面積dAに作用するモーメント  $M = \int \left( \frac{E \cdot y}{r} \right) \times dA \times y = \frac{E \cdot I_z}{r} \dots\dots(5)$   
 (5)式を(4)式に代入  $\sigma = \frac{M \cdot y}{I_z} \dots\dots(6)$

**曲げにより生ずる応力は中立面からの距離yに比例し、最外周で最大の引張応力が、最内周で最大の圧縮応力が発生する。**



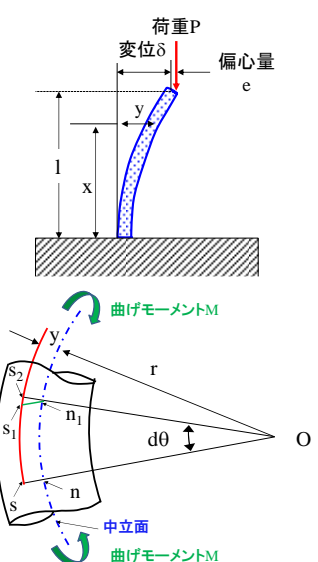
## 座屈をおこす荷重

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



---

座屈：圧縮荷重を受けて上下の軸心がずれて斜めに押し潰されるか、弓なりに曲がる変形



微小角における近似  $n \cdot n_1 = r \cdot d\theta \approx dx \dots\dots(1)$

微小角における三角関数近似  $\theta \approx \tan\theta \approx \frac{dy}{dx} \dots\dots(2)$

$\therefore \frac{1}{r} = \frac{d\theta}{n \cdot n_1} = \frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} \dots\dots(3)$

(3)を前ページ(5)式に代入  $E \cdot I_z \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = -M \dots\dots(4)$

曲げモーメント  $M = P \times (\delta + e - y) \dots\dots(5)$


たわみが無限大になる条件から座屈をおこす荷重 $P_{cr}$ は

円柱の一端が固定で他端が自由  $P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{4l^2} \dots\dots(6)$

両端とも自由端  $P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{l^2} \dots\dots(7)$


両端とも固定端  $P_{cr} = \frac{4\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{l^2} \dots\dots(8)$

たわみに関する微分方程式 (5)からたわみ曲線を求め、たわみが無限大になる条件から座屈を起こす荷重 $P_{cr}$ (限界荷重、オイラーの荷重)を算出



## 鍛造における潤滑

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
2014. July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



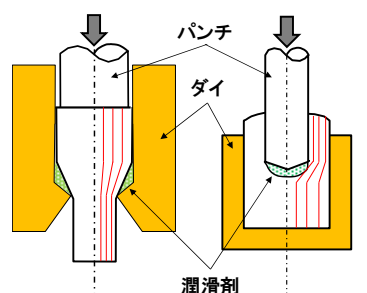
---

**【潤滑の目的】**

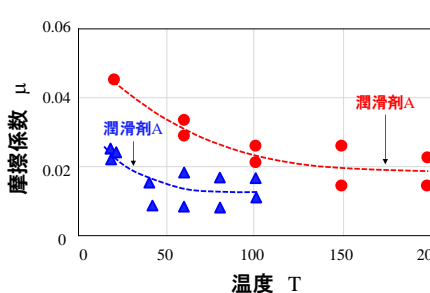
- ① 高温・高圧下でも、型と鍛造品が凝着せず、健全な塑性流動を促進
- ② 型および鍛造品が傷つかないように保護

**【潤滑剤の条件】**


- ① 型と鍛造品とが凝着しないために、潤滑剤は型および鍛造品とは異質。
- ② 潤滑剤が型と鍛造品との間に存在するために、型または鍛造品に強く固着。
- ③ 熱間鍛造に用いられる潤滑剤は鍛造品を型から早く外す(離型剤)。



油は摩擦抵抗が低く、鍛造品表面に空間を設けて油を封入することがある。




高温になるほど潤滑剤が変質しない限り、摩擦係数は低くなる。



## 金型材料の選択

ものづくり基礎講座『金属の魅力をみなおそう 第2回 鍛造』  
2014 July 30 14:05-14:35 東北大学金属材料研究所 正橋直哉



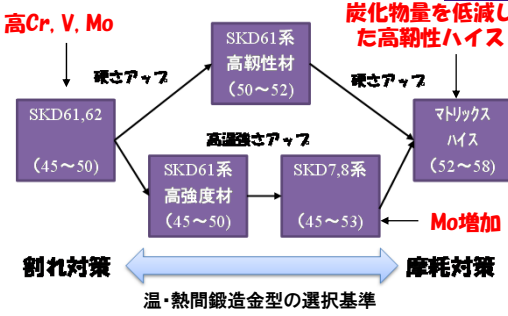
東北大学

強度は鍛造圧力より強く、熱間鍛造であれば高温強度を考慮。焼入れ温度は高温強さを重視なら高めに、靱性を重視なら低めに設定する。

- ① 炭素鋼を主体に合金元素を添加
- ② MoやWを多量に添加し炭化物により硬化。

- ・冷間用: 焼入・焼戻し温度を低くして**靱性確保**
- ・熱間用: **ダイは高靱性をハンマは高強度材**使用
- ・精密用: **圧縮耐力やヤング率の高い**材料使用



温・熱間鍛造金型の選択基準

表 温・熱間鍛造金型の損傷減少と寿命改善における検討項目

損傷現象	金型材料の必須特性	熱処理・表面処理	鍛造条件・型設計・型製作
摩耗(熱影響大)	高温強さ	窒化、焼入温度アップ	金型冷却、潤滑強化
摩耗(熱影響小)	靱性、炭化物	表面処理、設定硬さアップ	金型潤滑強化、高硬度入れ子
ヒートクラック	高温強さ、靱性	冷却速度・設定硬さアップ、窒化最適化	金型冷却、金型潤滑強化
窒化層剥離(肌荒れ)	窒化最適化、高温強さ	窒化最適化	金型冷却、金型潤滑強化
エロージョン			金型潤滑強化、ガス抜道追加
大割れ	靱性	冷却速度アップ、設定硬さ・焼入温度ダウン	金型予熱、金型表面形状、金型分割

