

ものづくり基礎講座 金属の魅力をみなおそう プロセス技術編 第2回 鍛造（第39回技術セミナー）

東北大学金属材料研究所 正橋直哉

1. はじめに

鍛造という言葉は、「鍛える」と「造る」という二つの動詞が合体した用語です。製錬した金属は溶解・凝固を経てインゴットに作り込まれます。インゴットは巣やポア等の铸造欠陥と称する「隙間」を含むために、このままでは所望の機能を得ることができません。そこで、この「隙間」をつぶすためにインゴットを「たたく」加工を施し、同時に所望の形状に作り込みます。この過程で金属には歪みが付与されますが、歪みは金属そのものを強くする（転位強化）効果があり、後の熱処理で転位が回復して再結晶組織を形成します。加工と熱処理の最適化により結晶粒は微細化すると機械的性質が改善します。このような効果が強く顕在化する場合には「鍛錬」という用語が用いられます。鍛造の定義は「ハンマと金敷、あるいは金型と金型の間で材料を圧縮して塑性変形させ、目的形状に成形する加工」となります。主な特徴は、①切削と違い素材が節約でき、目的形状近くまで成形加工ができること、②铸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こと、③再結晶組織を得ることで機械的性質が向上すること、④大型インゴットの加工が可能で、寸法のばらつきが少ないこと、です。

鍛造の歴史は古く、紀元前4千年頃のエジプトの遺跡から鍛造加工を施した金や銀などの装飾品から発掘されています。我が国では、4世紀に百済から鍛造技術者の韓鍛冶（からかぬち）卓素が来朝し、鍛造技術を伝えました。8世紀後半には武器や農具等の鍛造品が製造され、平安期以降は包丁、剃刀等の日用品も鍛造で製造されました。刀鍛冶の技術は現代にも継承され（図1(a)）、強靱な金属を作る技術として海外からも高く評価されています。熱間鍛造は、高温に加熱した金属に繰り



図1 刀鍛冶の作業(a)、エアハンマーによる熱間鍛造(b)(c)

返し圧縮力を印加して加工を施すため（図 1(b)(c)）、近くに炉を配置します。加熱は金属の変形抵抗を下げて加工を容易にしますが、酸化スケール（酸化物）を形成するために、スケール巻込みによる材質劣化に加え、金型を用いる場合は、金型が熱応力と摩耗によって損傷しやすいという課題があります。冷間鍛造にはそのような懸念は少なくなりますが、今度は金属素材の変形抵抗が高いために、加工が行い難いという課題があります。冷間鍛造と熱間鍛造については、7節で紹介します。

図 2(a)に鍛造の主要金属である鉄鋼とアルミニウムの生産量推移を、(b)に粗鋼生産量及び鍛工品の占有率の推移を示します（一般社団法人 日本鍛造協会鍛造業ビジョンより）。(a)より、国内鍛工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っていることが判ります。一方、(b)から 2007 年の実績が過去最高を記録していることが判ります。1970 年の鍛工品の占有率は約 1%でしたが、現在は約 2%を占め、鍛工品の占有率が増加していることが判ります。

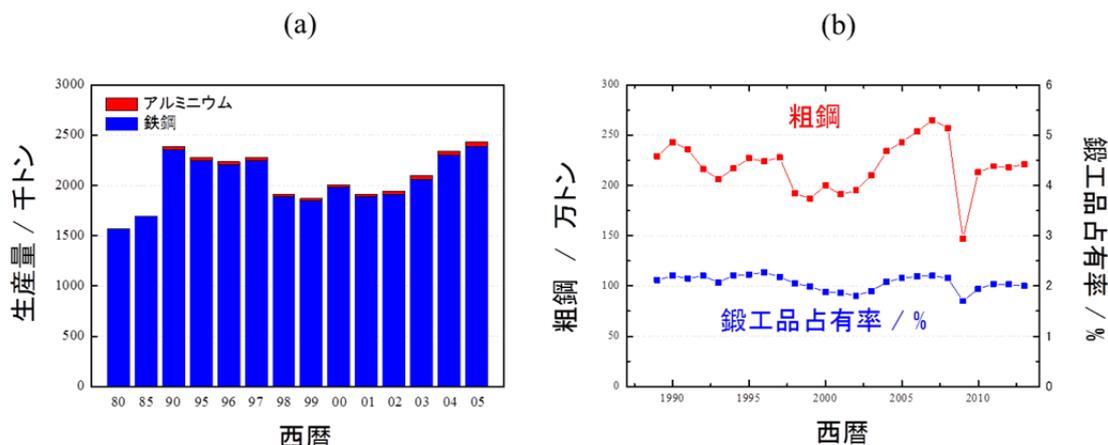


図 2 (a)鉄鋼とアルミニウムの鍛工品生産量推移と(b)粗鋼および鍛工品占有率の推移

2. 鍛造加工の分類と種類

鍛造加工の分類は、専用金型、変形方式、温度又は素材の形態等で、図 3 の様に分けることができます。まず、部品等の製造現場では金型を用いた鍛造加工が一般的ですが、金型を使用しない場合は「自由鍛造」（図 4(a)）と称し、加圧面が平面な工具を用いて素材表面を自由にしたままで圧縮して鍛造を施します。金敷（素材を載せる台）の形状によって、素材を角柱状、円柱状、円筒状などに成型加工します。製品形状に彫った金型により素材表面の大部分を拘束しながら成形する鍛造を「型鍛造」（図 4(b)）、金型により素材を閉塞する鍛造を「閉塞鍛造」、完全には閉塞しないで鍛造を「半閉塞鍛造」、そして一定断面の隙間から押出す「押出」に分けられます。一方、変形様式による分類では、上下型間で軸方向に潰す鍛造を「据え込み」、上記の「押出」や「型鍛造」そして、回転ないしは揺動する工具を用いた鍛造を「回転圧縮鍛造」（図 4(c)）に分類され、それぞれ、方式により細分化されています。そ

して、温度又は素材の形態による分類では、液相あるいは固液複相で加工を施す「溶湯鍛造または半熔融鍛造」、1100～1250℃で加工を施す「熱間鍛造」、200～850℃で加工を施す「温間鍛造」、常温で加工を施す「冷間鍛造」に分けます。冷間鍛造では、素材の変形抵抗が高くなるために、一般的には小さな部品に限られますが、熱間鍛造と違って酸化スケールを形成せずに潤滑が効率的に働くため、表面が清浄で寸法精度が高いという特徴があります。

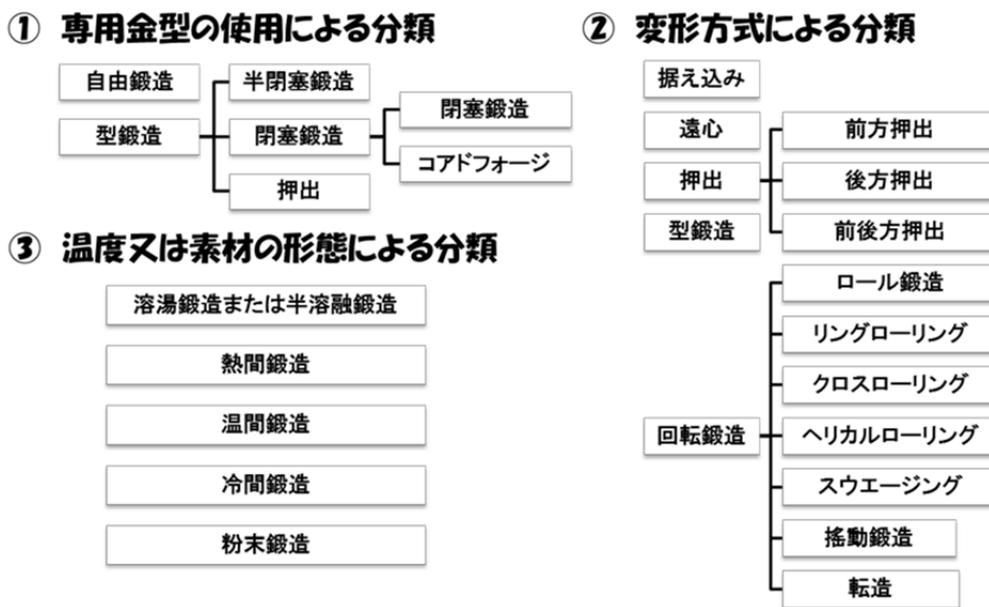


図3 鍛造加工の分類

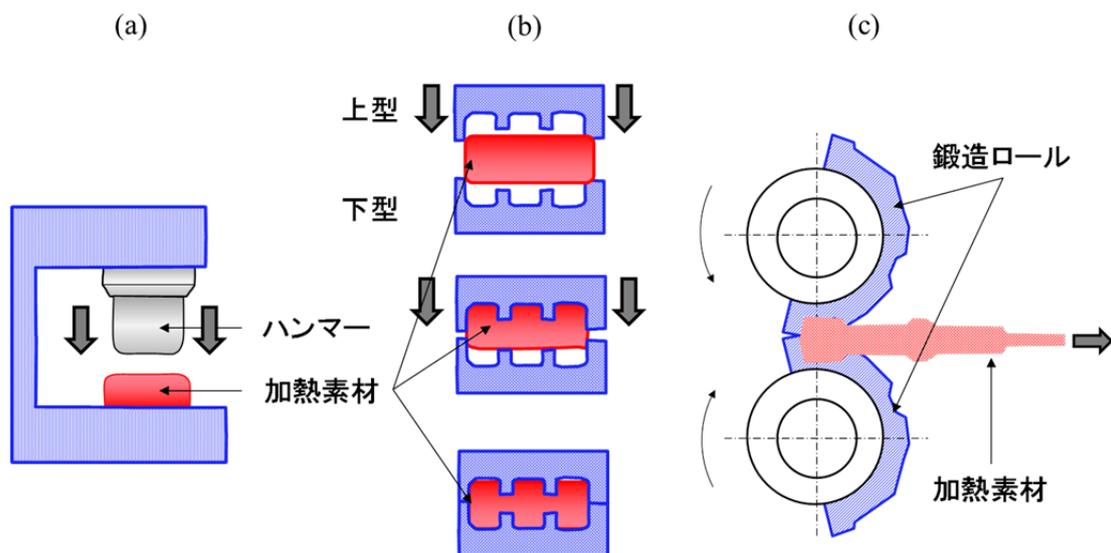


図4 鍛造加工の種類:(a)自由鍛造、(b)型鍛造、(c)回転圧縮鍛造

3 円柱の曲げと座屈

鍛造加工は素材に作用する圧縮力を利用した変形ですが、垂直方向以外の応力が加わった場合、素材は曲げや座屈をおこします。このような場合、垂直方向の応力以外に、せん断応力成分が存在します。そこで、断面積 A 、高さ l の円柱に荷重 P が軸方向より θ だけ傾斜して応力が作用する場合を考えてみます (図 5(a))。まず荷重を面に垂直な方向の成分 $P \cdot \cos \theta$ 、および面に沿う成分 $P \cdot \sin \theta$ に分解します。前者の成分を断面積で除した $(P/A) \cdot \cos \theta$ は、柱のどの高さでも同じですが、円柱の横断面には荷重の面に沿う方向の成分と横断面までの距離との積で表される曲げモーメント M が生じて柱を曲げようとします。曲げられた円柱の (図 5(b))、外側の部分は伸びるために引張りひずみが、内側は縮むために圧縮ひずみが生じ、両者が釣り合った箇所を中立面と称します。曲げにより生じる応力は中立面からの距離 y に比例し、最外周で最大引張応力が最内周で最大圧縮応力が発生します。

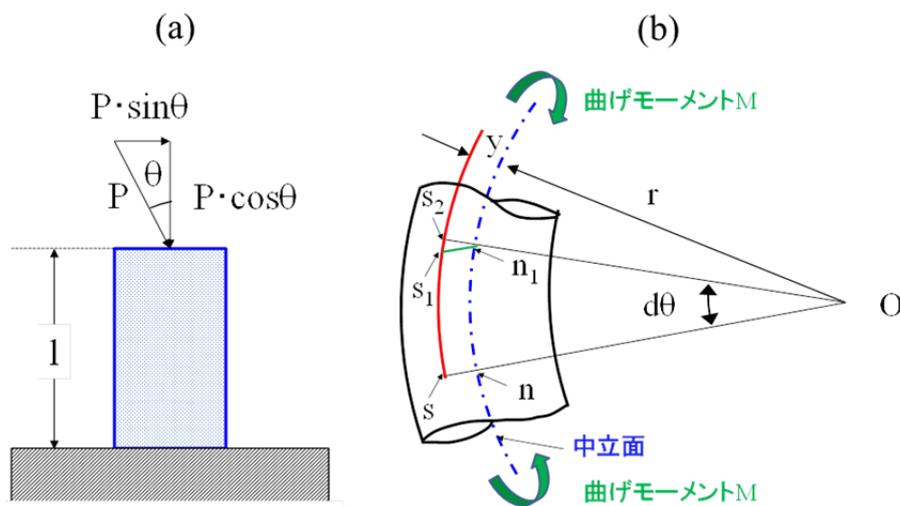


図 5 曲げを伴う円柱の圧縮(a)円柱にかかる応力成分と(b)曲げモーメント

曲げが進むと素材上下の軸心がずれて斜めに潰されて弓なりに変形しますが、これを座屈と称します (図 6)。曲げモーメントは曲げ変形量 δ が増加するほど増加しますので、座屈は曲げと共に進みます。素材のヤング率を E 、断面曲げモーメントを I_z とすると、高さ l の円柱が座屈をおこす時の荷重 P_{cr} は(1)式となり、座屈を抑制するには、 l が小さいか E の大きい素材を用いるか、荷重を小さくすることが有効であることが判ります。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{4l^2} \dots \dots \dots (1)$$

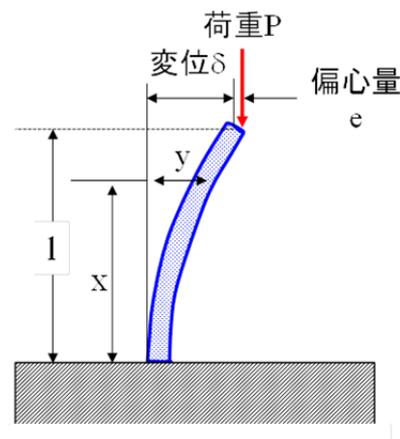


図 6 円柱の座屈

4. 鍛錬成形比と鍛造力

素材がどの程度加工されたかを表記する指標が加工度です。加工度は、圧延の様にスラブあるいは厚板を一様に薄くする加工の場合には、厚み（板厚）変化から算出しますが、鍛造加工は一方向（一軸）だけではないことに加え、中空素材も加工することがあるため、鍛造の種類によって厚み以外の指標が用いられ、鍛錬加工比と称されます。JIS0701-1957によると、鍛錬加工比とは「3方向の主ヒズミ中、常に最大ヒズミの方向の変形比で表示する」「鍛錬成形比の表示方法は原則として鍛錬作業の種類を、定められた記号で添記して工程順に明りょうに記載する」と定められています。表1に自由鍛造の場合の鍛錬加工比をまとめます。JISでは表中の「実体鍛錬」を「実体を鍛錬しその断面積を減少し長さを増した場合」と、「据え込み鍛錬」を「実体を鍛錬しその断面積を増し長さを減少した場合」と、「展伸鍛錬」を「実体角材を1方向より圧縮し圧縮方向に直角な2方向の変形度に著しい差を生ずるような鍛錬」と、「中空鍛錬」は「中空体を鍛錬し中空のままその断面積を減少し長さを増した場合」と、そして「穴拡げ鍛錬」は「中空体を鍛錬しその中空部を拡大した場合」とそれぞれ定義しています。

表1 鍛錬成形比のまとめ

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

一方、鍛造時に素材にかかる力である「鍛造力」Pは、素材の変形抵抗をY、工具との接触面積をA、拘束係数をCとすると、(2)式のように記述できます。

$$P = C \cdot A \cdot Y \dots\dots\dots(2)$$

ここで、変形抵抗とは、素材の圧縮軸の方向における素材の応力です。(2)式の C は円柱を据え込むとき、すなわち円柱を軸方向に圧縮して長さを縮めるとき、円柱の高さ h と直径 d の比の $h/d \geq 1$ では 1、 $h/d \leq 1$ では(3)式となります。

$$C = \frac{\pi}{4} + \frac{d/h}{3\sqrt{3}} \dots\dots\dots(3)$$

図 7(a)は h/d と C の関係をプロットしたのですが、h/d が小さくなるにつれて C が急激に大きくなることが判ります。これは素材の高さに対して直径が大きくなることにより、素材と治具との間での摩擦が大きくなることに起因します。一方、素材の断面積を減少させると同時に長さを伸ばす「鍛伸」加工の場合、素材の高さ h と長さ L の比の $h/L > 1$ の時の C は(4)式、 $h/L \leq 1$ では(5)式で表され、h/L と C の関係をプロットすると図 7(b)の様になります。この図から C は h/L=1、すなわち素材の高さと長さが同じである時に C が最少となります。

$$C = \frac{\pi}{4} + \frac{h/L}{4} \dots\dots\dots(4)$$

$$C = \frac{\pi}{4} + \frac{L/h}{4} \dots\dots\dots(5)$$

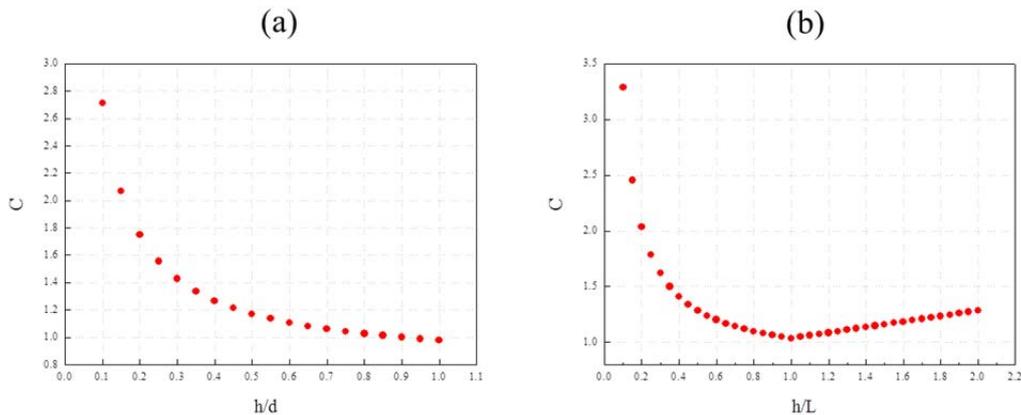


図 7 (a)据え込みの場合の拘束係数の h/d 依存性と(b)鍛伸の場合の拘束係数の h/L 依存性

5. 鍛造における材料の変形

前節では、拘束係数 C が素材の形状に依存して鍛造力 P が変化することを示しました。素材は鍛造力 P が印加されて塑性変形しますが、この鍛造力が素材の破壊応力よりも高くなると、素材は付加された歪みを変形に消費しきれず、歪みを解放するために割れなどの欠陥を形成します。鍛造のような圧縮変形を主体とした加工は、

素材に付与される歪み量が引張の場合と比べて高く、素材への蓄積歪み量が大きくなることで欠陥を形成しやすくなります。図 8 は単純な一軸引張と圧縮の場合の試験片の変形量に対する真歪みを計算した結果ですが、50%の変形を施したとき（図 8 の緑色の点線）、引張の場合の真歪みは 0.40 ですが、圧縮の場合は 0.69 に達します。この差は試験片の変形量が大きくなるほど増加し、圧縮変形による真歪みは図の青点の様に急激に増加します。言い換えると、圧縮変形では小さいひずみの変形抵抗のデータを用いて、大きいひずみの変形抵抗を外挿することは極めて危険ということを意味します。以上のことから、真歪みの小さい引張では転位密度が圧縮より小さく、超塑性変形などの特別な場合を除いて、回復再結晶などの固相反応は圧縮の方がおこり易いこととなります。

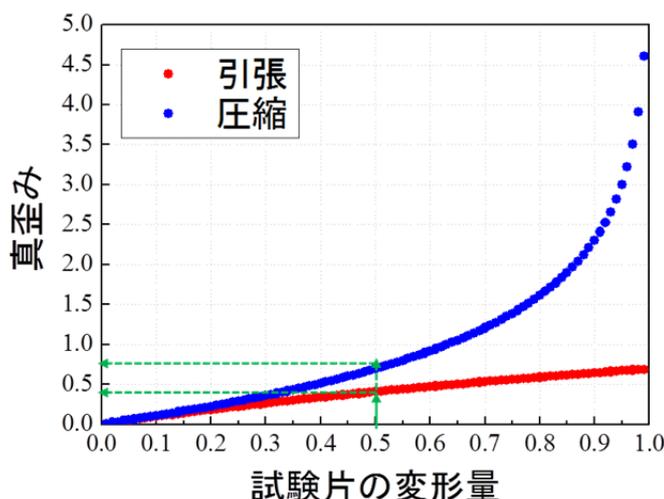


図 8 単純一軸引張および圧縮変形時の試験片の変形量に対する真歪みの変化

図 9 は円柱素材を据え込んだときの、素材の場所による変形の推移を描いたものです。円柱素材の高さ h_1 と直径 d_1 の比が $h_1/d_1 < 2$ である場合、自由表面である側面は外側に張り出し、いわゆる樽型へと形状が変化します（バレルリングと称します）。一方、 $h_1/d_1 > 2$ の場合、変形初期には素材が拘束されている上下面近くでバレルリングがそれぞれ発生し（ダブルバレルリングと称します）、変形が進むと通常のパレルリング状態へと変遷します。図 9(b)(c)から明らかなように、素材上下面直下のくさび状の領域（領域 I）では、素材が治具によって拘束されているために変形がおこりません。この未変形部が圧縮により押し込まれると、その先端の領域（領域 II）が強加工を受け、領域 III が外側に押し出されるためにバルジングがおこります。溶解凝固インゴットの casting 欠陥は、液相が最後に凝固する中心部の領域 II に生成しやすいことから、大きな歪みが印加できる鍛造加工は casting 欠陥を潰すのに有効な手段ということが判ります。

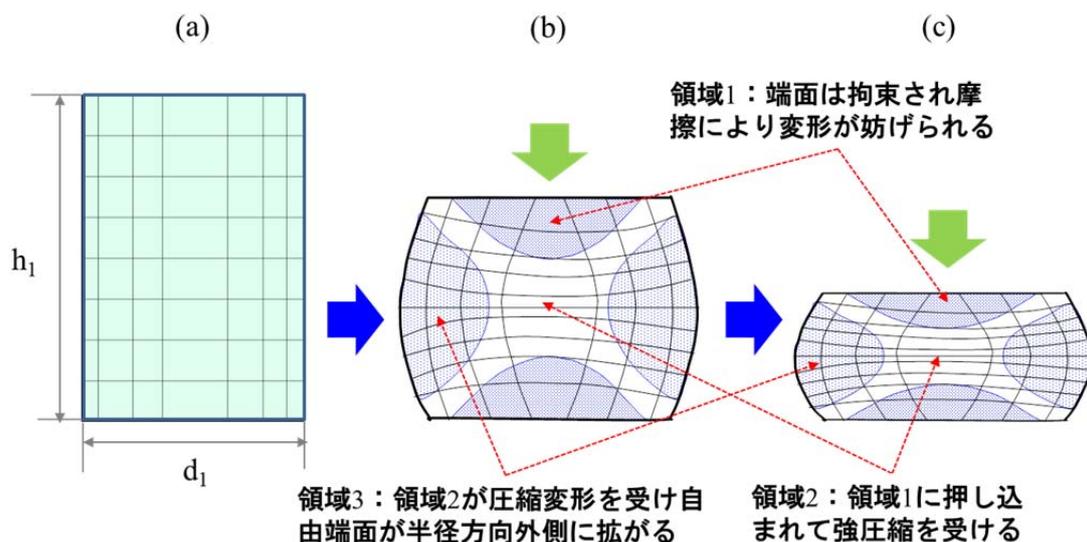


図9 円柱素材を据え込んだときの変形の推移

6. 鍛造材の材料欠陥

鍛造材の欠陥は、①材料に起因する欠陥、②鍛造加工に起因する欠陥、③熱処理に起因する欠陥、④設計等に起因する欠陥に大別できます。②の欠陥を細分すると、材料受入および切断工程での欠陥、加熱工程での欠陥、鍛造工程での欠陥に分類できますが、本稿では鍛造工程の欠陥を自由鍛造と型鍛造に分けて説明します。

自由鍛造で出現する主な欠陥として、「表面割れ」、「中心割れ」、「かぶりきず」があります。「表面割れ」は、据込比がその材料と温度に対して過大なときに、たる形に膨んだ自由表面の円周方向に発生する2次的引張り応力によって発生します(図10(a))。「中心割れ」は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、軸心部の横方向に大きな引張り応力が発生し、そこにひずみが集中して生成したボイドに起因する割れです(図10(b))。そして、「かぶりきず」は、角半径の小さい金敷を用いた角柱の鍛伸の際に、1回の押込み量を大きくとり過ぎた時に、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欠陥です(図10(c))。

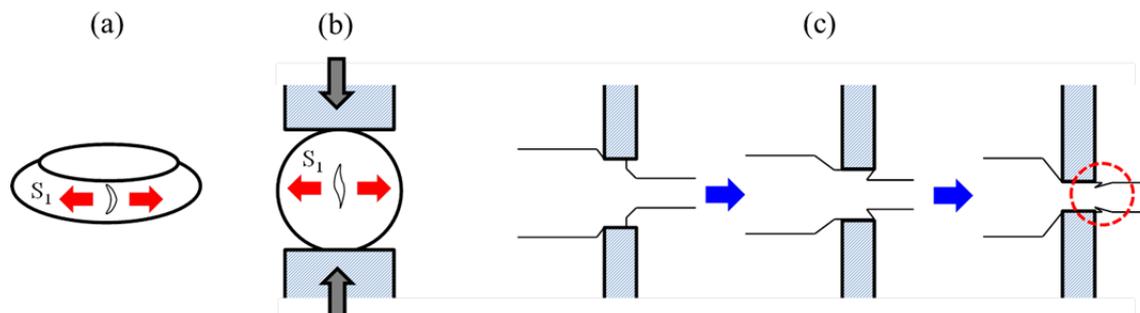


図10 自由鍛造で出現する欠陥：(a)表面割れ、(b)中心割れ、(c)かぶりきず

型鍛造は材料を金型にあわせて変形させるため欠陥は金型形状に依存し、金型設計の重要度が高まります。金型素材および設計を最適化しても出現する代表的な欠陥を図 11 に示します。なお鍛造品の型割り面に平行で比較的薄い箇所を「ウェブ」、鍛造品の型割り面に直角に突出する薄い部分は「リブ」と称します。(a) は材料が金型に充填後に、薄いウェブが圧縮されて材料がシャープな隅部（赤点線部）において、リブ底をせん断してできる欠陥で、「しわきず」と称します。(b) はリブ内に材料が流入する際、ウェブが薄いためリブの反対側に生じた欠陥で、「ひげきず」と称します。(c) は型の隅の R 不足や荒成形した材料（荒地）形状が不良な場合、材料が角を回り込んでオーバーラップした欠陥で、「かぶりきず」と称します。

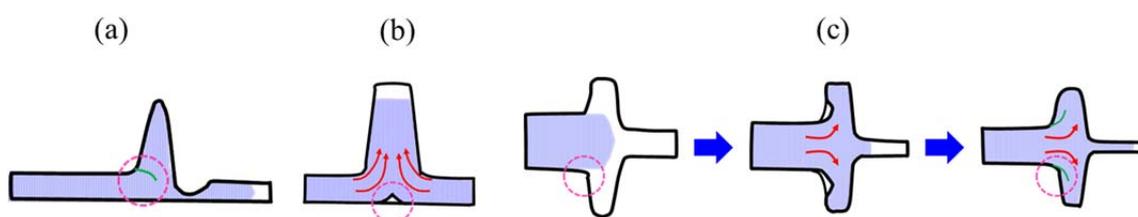


図 11 型鍛造で出現する代表的な欠陥：(a)しわきず、(b)ひげきず、(c)かぶりきず

この他に、ばり抜き後にばり線上に現れる「割れきず」、型割線上で製品がくい違う「型ずれ」、鍛造図面寸法に対する肉不足の「欠肉」、鍛造時の「打ち損じ」、不適当なばり抜きによる「ばり残り」、製品の長さ・幅・公差ずれ等の「寸法不足・過大」等があります。「ばり」とは鍛造の際に過大荷重、欠肉防止のために金型の隙間からはみ出させる薄い材料部分を、「型割線」は型鍛造品の鍛造図上で一組の金型が互いに合わさる面を示す線を、「鍛造図」は鍛造品の形状を投影図法で示した要求品質を記入した図面を称します。

金型は素材流動に対し拘束の役割を担い、強度や摩耗性に加え耐熱性、耐食性、靱性が必要です。強度は鍛造力より高く、熱間であれば高温強度が必要です。焼入れ温度は高温強度重視であれば高く、靱性重視であれば低く設定します。金型素材は炭素鋼を主体に Mo や V を多量に添加して炭化物により硬化させます (図 12)。冷間用であれば、焼入・焼戻し温度を低くして靱性を確保しますが、熱間用ではダイには高靱性をハンマには高強度が必要です。また精密用であれば、圧縮耐力や高ヤング率が必要となります。

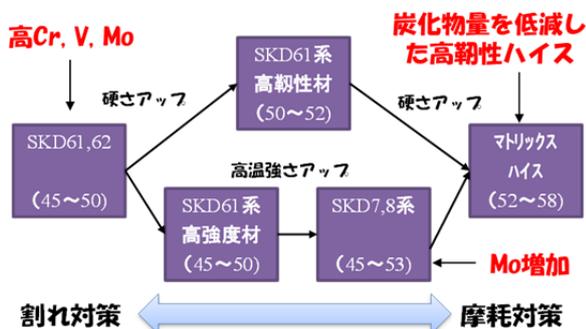


図 12 温・熱間鍛造金型の選択基準

7. 冷間鍛造と熱間鍛造

金属素材を常温で鍛造する場合は「冷間鍛造」、1000℃から 1250℃の高温で鍛造する場合は「熱間鍛造」、そして 300℃から 850℃の中間温度で鍛造する場合は「温間鍛造」と称します。高温で加熱して鍛造すると、加工条件の適正化により組織を緻密にすることができますが、酸化膜（スケール）の形成や冷却による熱収縮を伴うために、成形品の寸法精度が劣ってしまいます。しかし、金属の強度（変形抵抗）は温度を上げると低下しますので、熱間鍛造では加工が容易であるというメリットがあります。それに対して冷間鍛造は、酸化膜を形成せずに潤滑が効くために、成型された素材の表面が清浄で寸法精度が高いというメリットがありますが、より大きな力を必要とするために加工機械や工具強度の制約を伴います。以上のことから、冷間鍛造は比較的小型の部材や部品に、熱間鍛造は大型で複雑な形状の部材や部品の製造に適用されます。

図 13 に代表的な冷間鍛造を図示します。冷間鍛造は、大きな圧縮応力を受けて変形するため加工硬化が高いため、加工素材の強度が高く、伸びや絞りが低下します。このため、鍛造後の二次加工に支障を来すことがあり、低温での焼鈍により加工歪みを低減させます。冷間鍛造材の加工組織はファイバーフロー（繊維状組織）と称する、金属組織が潰されてあたかも繊維状に繋がった組織になり、耐摩耗性が高い特徴があります。

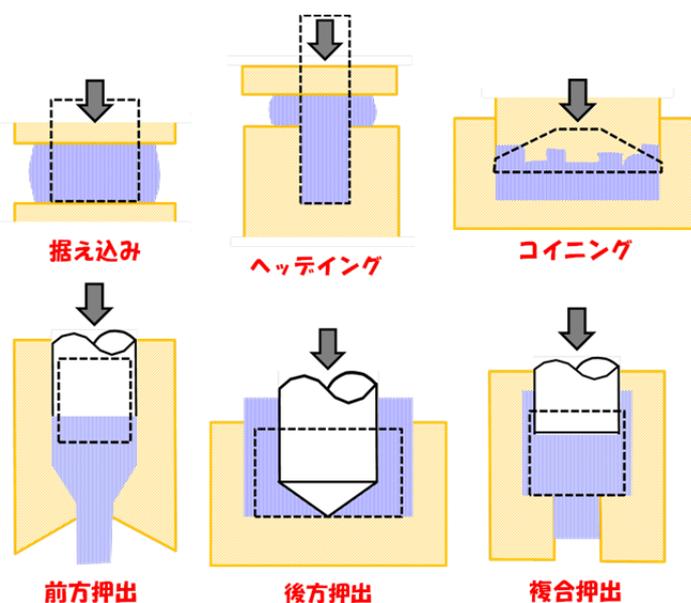


図 13 様々な冷間鍛造

一方、熱間鍛造は素材に加えられる力は小さいのですが、温度が高いために素材に与えられた歪みは、再結晶などの回復に供給されます。加工歪みと温度のバランスを最適化することで微細な組織を作り込むことが可能で、加工材の機械的性質を高めることができます。熱間鍛造の課題の一つは、鍛造素材が高温で金型に接して変形するため、金型の急激な温度上昇と繰り返し摩耗により、寸法精度劣化の一因となる金型の劣化です。そのため、前節で紹介した金型の材質選定だけでなく、素材の型離れを目的とした離型剤の塗布や、鍛造初期の急激な熱変化を回避するための金型の余熱など、管理を徹底する必要があります。

8. 最後に

我が国の伝統的な鍛造品として特筆されるものに日本刀（図 14）があります。日本刀は鍛造と熱処理の緻密な工程の積み重ねで、硬いマルテンサイトの刃先と靱性を備えたトルースタイトの棟からなる複合組織を呈します。マルテンサイトは物を切る役割を、トルースタイトはその際の衝撃をやわらげる役割を担い、合理的な機能を持つことが判ります。そしてこの二つの組織の境界部に美しい刃紋が現れることから、芸術性を備え日本刀は美術品として教育委員会に登録されます。



図 14 太刀「名刀にかける」刀匠 河内國平作刀展より

戦後の鍛造技術の発展は自動車部品の低コスト化と大量生産と密接に関係し、鍛造品の 60～70%はクランクシャフトやサスペンション、ブレーキ部品等の自動車部品です。これらの部品を鍛造で製造するための金型は、自動車 1 台あたり 300～500 組使用されると言われています。優れた金型の製造には、品質・精度・設計技術が必要で、それぞれ金型素材の高品質化、NC 等の新しい工作機械の導入、設計への CAD/CAM/CAE システムの導入がポイントです。日本の金型技術、特に精密金型技術は世界最先端にあり、日本の製造業をトップに押し上げた原動力とも言えます。他方、国内市場の縮退、競合の激化、輸出の減少はこの分野の成長を妨げています。金型産業は 9,221 社の事業所のうち、89.6%の 8,261 社が従業員数 20 人以下の中小企業であるため、コスト競争力に劣り、後継者育成をはじめとした継承問題を抱えています。社団法人日本鍛造協会は、鍛造業の現状と経営課題として、「業界全体として、生産能力の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状況にある」と総括しています。さらに、「騒音や振動に対する規制の強化などの問題もあり、鍛造業を取り巻く経営環境は厳しさを増している」と報告しています。その上で、「鍛造業が目指すべき方向」として、「技術・技能を活かした攻めの経営」における 7 つの方向性を示しました。自動車だけでなく多くの産業を支える鍛造技術の課題を、我が国のものづくり技術を支え発展させるという視点に基づいて考える必要があると考えます。