



鍛造と疲労強度

目次

1. 鍛造と組織	1
(1) 鍛造の役割	1
(2) 鍛造組織	2
(3) 鍛流線の形成	4
2. 疲労強度	5
(1) 疲労強度への影響要因	5
(2) ねじ・ボルトのケース	6
(3) 鍛流線と疲労強度	8
(4) 後処理の影響	10

疲労強度に関連するねじ締結技術ナビ技術資料、コンテンツもあわせてご覧ください。

[疲労に関連するねじ締結技術ナビコンテンツまとめ](#)



ハードロック工業株式会社

1. 鍛造と組織

(1) 鍛造の役割

本稿は鍛造と疲労強度の関係を主眼にしてまとめたものですが、この項目では鍛造について最低限のことについて説明したいと思います。

鍛造は塑性加工の一種で、工具や金型を用いて金属素材を圧縮または打撃することで成形する技術です。主要な鍛造方法である自由鍛造と型鍛造の概念図を図1に示します。自由鍛造は加熱素材を移動回転させながら各所をハンマー等で断続的に加圧する作業方法で、種々の形の鍛造品を自由に成形することが可能で、大型品の多品種少量生産に適しています。一方、型鍛造は鍛造品の形状と寸法に適合させた金型によって、素材を加圧・拘束して成形する方法で小型品の大量生産に適しています。また、図にはありませんが、金型を回転あるいは揺動させる回転鍛造という方法があり、例えばねじ・ボルトのねじ部の成形で使用される転造が代表的です。

作業温度による分類として、熱間鍛造、冷間鍛造、温間鍛造があります。熱間鍛造は再結晶温度以上に加熱して成形する方法で、素材が柔らかく自由度の高い成形によって複雑形状の加工が可能です。素材内部の気泡などの欠陥も押しつぶされて粘り強くなりますが（鍛錬効果と呼ばれる）、加熱による表面の酸化や冷却収縮などによって寸法精度と表面状態は冷間鍛造品と比べて劣ります。一方、冷間鍛造は再結晶温度以下の室温近くの温度で行われ、変形しやすい材質素材が必要ですが、冷間鍛造品は寸法精度と表面状態が良好であることから後仕上げが不要か、研削のみの後加工だけで済みます。温間鍛造は熱間鍛造と冷間鍛造の中間の温度域で行う鍛造で、両者の特徴を併せ持つことをねらった方法です。鉄鋼材料の再結晶温度は約550℃ぐらい（成分や加工度によって幅がある）で、厳密に決まっている訳ではありませんが通常熱間鍛造は1000–1200℃ぐらいの高温で、冷間鍛造は室温で、温間鍛造は600–800℃ぐらいの温度で行われます。

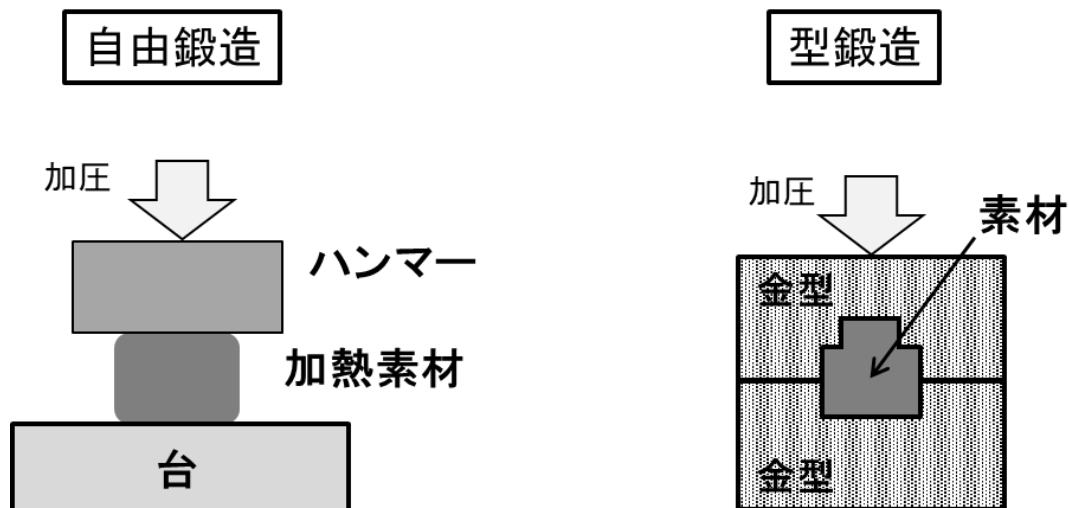


図1 自由鍛造と型鍛造の概念図

表1に、自由鍛造、型鍛造さらに回転鍛造について基本的な特徴を示します。主流の鍛造方法は自由鍛造と型鍛造ですが、ファスナー部品（ねじ・ボルト等）を除く一般的な鉄鋼鍛造品では生産量（重量）は型鍛造の方が自由鍛造よりもかなり多いようです。自由鍛造は主に熱間鍛造で行われ、型鍛造は熱間、冷間ともに製品に応じて広く行われます。回転鍛造は、ねじ・歯車など小部品などへの適用が代表的です。

表1 各鍛造法の基本的な特徴

鍛造方法	自由鍛造	型鍛造	回転鍛造
特徴	ハンマーや工具で材料を叩いて成形する	金型を使って加圧することで成形する	回転または揺動する金型によって成形する。ねじの転造も含まれる
メリット	大型品の多品種少量生産に向く 鍛錬効果が高い	寸法精度が高く、大量生産に向く	局所小荷重成形である。転造ボルトでは疲労強度が大きく向上
その他	切削などの最終加工が必要	パリの除去作業が必要	特に小部品など用途が限定

表2は、鍛造のメリットとその要因を簡潔にまとめたものです。

鍛造のメリットとして強度が上がること、ねばり強さが向上すること、金型を使えばほぼ最終形状に成形できることが挙げられます。強度としては引張強さ等の静的特性と動的な疲労強度があります。ねばり強さとは急激な力が加わった時の壊れにくさのことで、測定値として衝撃値や破断ひずみに対応します。鍛造では加圧によって組織の流れが形成され、これを鍛流線と呼びます。この鍛流線の形成が製品の衝撃性能に大きく影響し、鍛流線が正常に形成された部材では衝撃値がかなり向上します。

ここで注意したいのは、ある鍛造方法（後処理の熱処理も含む）で製造された鍛造品が表中記載のメリットすべてを同時に享受して各特性が大きく向上する訳ではありません。ある製品に対して適切な鍛造法で製造することで、いくつかのメリットを有した製品を得ることができます。

要因に記載した加工硬化、結晶粒の微細化、鍛流線については以降で改めて述べます。

表2 鍛造のメリットと要因

鍛造のメリット	要因
強度が上がる	加工硬化、結晶粒の微細化、内部気泡の圧着
ねばり強さが向上	鍛流線の形成
ほぼ最終形状に成形できる	金型を使った成形法

(2) 鍛造組織

鍛造において組織的な大きな特徴として転位の発生による転位密度の上昇があげられます。鍛造加工によって圧力が金属素材に繰返し作用することで転位が生成されて移動しながら集積します。強度が増加してこの強化のことを加工硬化あるいは転位強化と呼びます。

加工硬化は塑性変形によって金属が硬化する現象です。金属の変形は転位の移動によって起こりますが、変形ひずみによって新たに転位が形成されて量が増えると転位同士が絡み合っ動きにくくなります。この状態になると転位を移動させるにはより大きな力が必要になる硬化状態になっている訳

で、この強化を転位強化といいます。

転位密度が上昇した状態で再結晶温度以上に加熱すると再結晶が起こって転位の減少とともに結晶粒の微細化現象が起こります。図2にこの過程を概念的に示しました。なお、この再結晶現象には、動的再結晶と静的再結晶があります。動的再結晶は加工時の変形時に起こる再結晶のことで、静的再結晶は加工後の熱処理時に起こる再結晶のことをいいます。動的再結晶では再結晶粒が生じてもすぐに粒内に転位密度の高い加工組織が形成されて次の再結晶を起こします。静的再結晶では加熱によって回復と再結晶が起こってひずみが無い新たな結晶が形成されます。いずれにしても、結晶粒が微細化されますが、その後の保持される加熱環境があれば結晶粒の成長・粗大化が始まることになります。

熱間鍛造では再結晶温度以上で行われますので、図2で示した結晶粒の微細化が起こり、さらに結晶粒の成長と転位密度の上昇・再結晶の繰り返しが続くことになります。冷間鍛造では転位密度が上昇して加工硬化が起こりますが、再結晶温度以下なので微細化は起こりません。仮に再結晶温度以上で熱処理すれば静的再結晶現象が起こることになります。

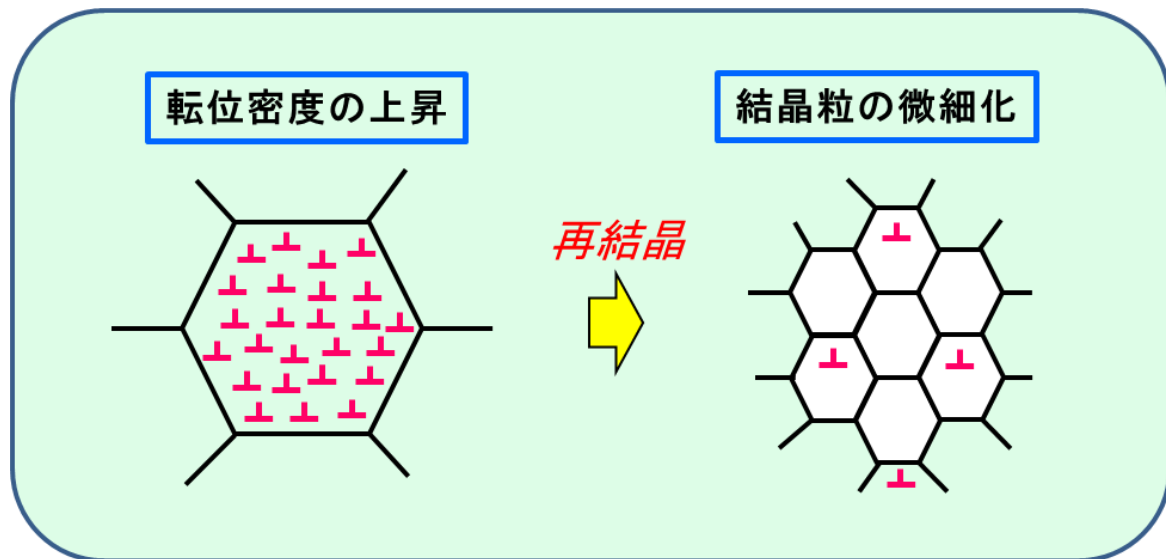


図2 鍛造による結晶粒微細化の概念図

図3は、鍛造時に部材に加わる変形応力と転位密度の関係を模式的に表したイメージ図です。横軸の変形応力は τ (MPa)で表示し、縦軸の転位密度は ρ の $1/2$ 乗($1/\text{cm}$)で表示しています。両者の関係はほぼ直線になることが知られています。したがって、鍛造時の転位の新たな発生過程では加える圧力が高い方がより転位密度が上昇します。

熱間鍛造では再結晶が繰り返し継続しつつ結晶粒も成長しますので、加工硬化や結晶粒微細化による引張強さの増加はほとんど見込めません。ただし、内部気泡などの内部欠陥を圧着すること、鍛流線を形成することなどの効果によって衝撃値は大きく改善されます。

冷間鍛造では、転位密度の上昇による加工硬化(転位強化)が起こって引張強さが大きく増加します。ただし、そのままの状態では一般的に靱性(衝撃値)が低下しますので、後処理工程として適切な熱処理が行われたりします。

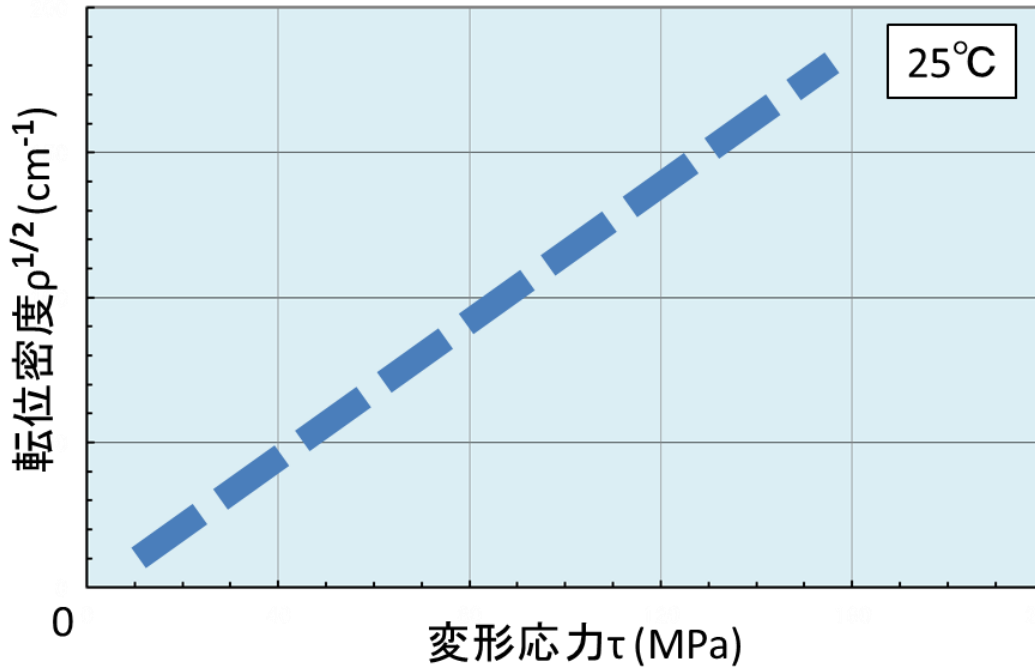


図3 鍛造時の変形応力と転位密度の相関

(3) 鍛流線の形成

鍛造品の断面についてマクロ観察を行うと、鍛造加圧による材料の流れ方向に沿って配向する模様が観察されます。この繊維状の金属組織の流れ模様を鍛流線(ファイバーフロー)といいます。図4に、一例として鍛造によって鍛流線が形成される概念図を示します。圧延、押出し・引き抜き、鍛錬鍛造などの一次加工で製造された素材は加工方向に沿って繊維上の組織が形成されます。この素材を例えば鍛造金型を使って繊維組織に垂直方向から鍛造加工しますと繊維組織の流れが右図のような鍛流線と呼ばれる模様になります。鍛流線は、結晶粒界の不純物、介在物、フェライト/パーライト組織が鍛造金型による材料フローの流れ方向に配向した状態を表しています。右図のように鍛流線が形成されますと、部品の応力集中部である角部では、鍛流線が切断されことなく部品表面に沿うように流れています。

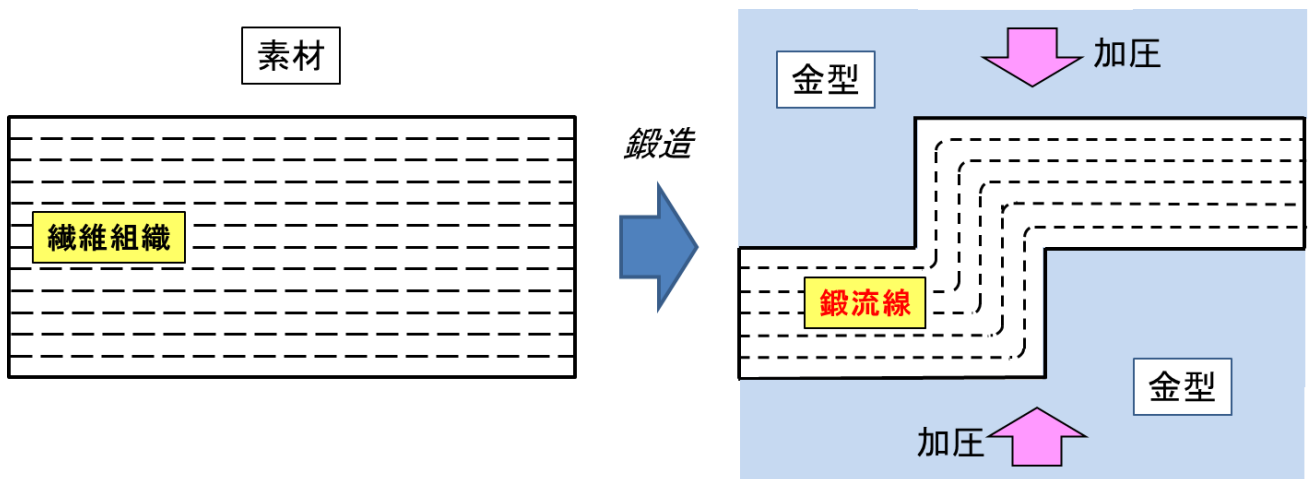


図4 鍛造における鍛流線形成の概念図

鍛流線の形成は鍛造加工の大きな特徴の一つであって、機械的性質に大きな影響を与えます。鍛造品

の表面（鍛造金型の輪郭）に沿って鍛流線が形成されるので、表面引張応力に対して強靱になります。すなわち、一般的な切削品と比較して曲げ応力や靱性（衝撃値）が向上します。疲労強度に優れ、かつ靱性の高い金属製品を製造したい場合は、負荷が鍛造線に沿うようにかかる設計にするとよいことになります。

鍛流線と機械的性質に関して、以下のことが知られています。

- ・上述のように衝撃値は鍛流線方向が優れる。
- ・引張試験において縦弾性係数、降伏強度、引張強さに対する影響は小さいが、破断ひずみ（ねばり強さ）は大きくなる。
- ・疲労試験においては鍛流線の影響が現れる。疲労強度は鍛流線に平行方向が垂直方向よりも高い。

鍛流線と疲労強度については次項で詳しく述べたいと思います。

2. 疲労強度

(1) 疲労強度への影響要因

表3は、鍛造における組織的な要因が引張強さ、靱性（衝撃値）、疲労強度に及ぼす影響をまとめたものです。

組織的な要因としては、加工硬化（転位強化）、結晶粒の大きさ（微細化または粗大化）、脱炭の有無、鍛流線の形成があげられます。鍛造では、加工圧力によって先に述べたように転位強化による加工硬化が起こり、高温や熱処理による再結晶で結晶粒の微細化が起こりますが、高温状態で長時間保持されると結晶粒の粗大化現象が起こってしまいます。また、一般的な鍛造品は品質要求から熱処理を施すことが多く、熱処理の高温時に表面層で脱炭が起こる可能性もあります。

加工硬化は再結晶温度以下で起こる現象でありますので、冷間鍛造時に大きく影響する要因であります。加工硬化では引張強さが大きく増加しますので疲労強度も増加します。全体に硬くなりますので靱性は低下します。結晶粒の大きさに関しては、微細化が起これば微細化効果によって引張強さと疲労強度は増加し、靱性も向上します。逆に、結晶粒の粗大化が起こると引張強さ、靱性、疲労強度すべてが低下するので注意が必要です。熱間鍛造では再結晶によって結晶粒が微細化しますが、その後の高温環境下で結晶粒の成長と粗大化が進むこととなります。また、冷間鍛造で熱処理を施す場合も熱処理条件によっては結晶粒が粗大化する可能性もあります。このため、鍛造終了温度として再結晶温度近くで終了とするなど適切な温度管理によって結晶粒の粗大化を起こさないことが重要です。

表面脱炭層が形成されると、材料の全体的な静的強度を表す引張強さはほとんど影響しませんが、表面層の悪影響で靱性と疲労強度は低下します。疲労強度の低下は脱炭層の厚さが厚いほど大きくなり、疲労強度減少率は数十%と大きな値です。鍛造品の黒皮は脱炭層が存在し、表面粗さによる悪影響も相まって疲労強度を低下させます。鍛流線については、先に述べましたが引張強さはほとんど影響しませんが、靱性は向上し、疲労強度は増加します。鍛流線の疲労強度への影響の度合いとして報告例は非常に少ないですが、大型品の応力集中部位における疲労試験では、鍛流線が表面に沿って流れる部材の方が、鍛流線が完全に切られる部材よりも20-25%程度、疲労強度が増加することが知られています。

表3 鍛造の組織的要因が強度（引張強さ、靱性、疲労強度）に及ぼす影響

要因		引張強さ	靱性(衝撃値)	疲労強度
加工硬化(転位強化)		増加する	低下する	増加する
結晶粒の大きさ	微細化	増加する	向上する	増加する
	粗大化	低下する	低下する	低下する
脱炭の有無		殆ど影響しない	低下する	低下する
鍛流線の形成		殆ど影響しない	向上する	増加する

(2) ねじ・ボルトのケース

ねじ・ボルトは冷間鍛造の一種である圧造および転造によって製造されます。

圧造はねじ・ボルト頭部の成形で行われる冷間加工方法でヘッダー加工（冷間圧造加工）といわれます。頭部の大きさや特殊形状の場合は、通常の鍛造や切削による加工もあります。図5に、ねじ・ボルト頭部の圧造方法と成形によって得られる鍛流線のイメージ図を示します。棒状の素材をダイスに設置し、パンチ金型で通常は横方向から加圧して素材を潰しながら加圧軸と軸直角方向に断面積を広げながら頭部形状に成形する据込み加工方法です。複数回パンチして所定形状に仕上げることもあります。ねじ・ボルト頭部は首下部が強度的に弱い部分ですが、断面の鍛流線は図のように表面に沿うように流れます。このような鍛流線が形成されますと首下部の靱性（衝撃値）や疲労強度といった特性は向上します。

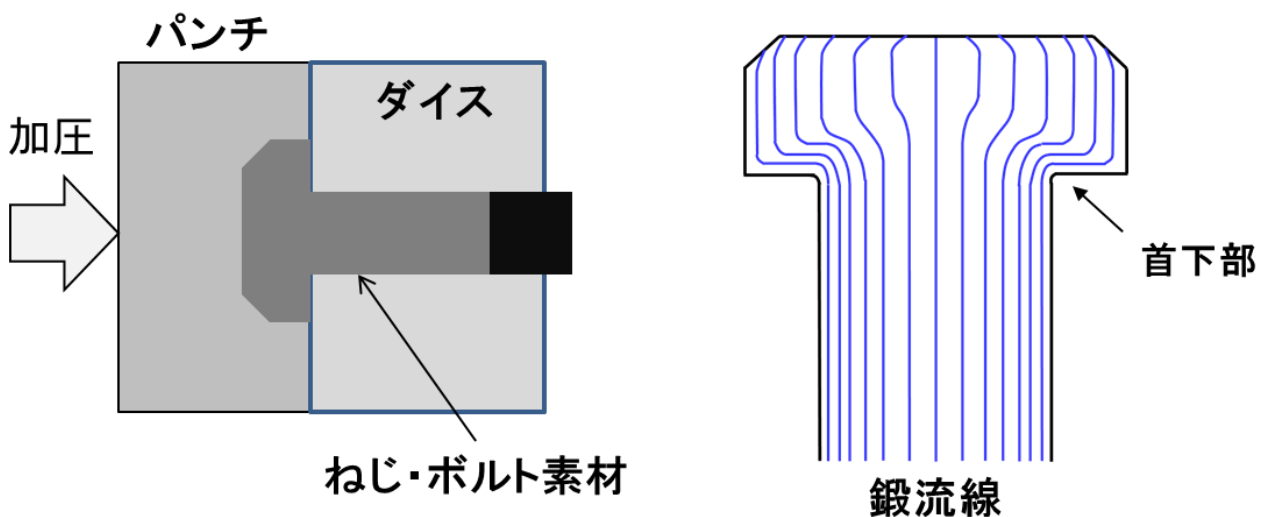


図5 ねじ・ボルトの圧造と鍛流線の一例

ねじ・ボルトのねじ部の成形では、切削加工もありますが、転造加工が広く行われています。図6に、ねじ・ボルトの転造方法と成形によって得られるねじ山部の鍛流線のイメージ図を示します。円柱状の素材を2個のダイス間に圧力をかけて挟み込んで両ダイスを回転させることでねじ山を加圧成形します。得られたねじ山部の断面の鍛流線はねじ山表面に沿うように流れる模様になり、応力集中部である

ねじ谷底部においても谷底形状に沿うように流れる模様になります。ねじ山の強度に関して、靱性（衝撃値）は鍛流線の効果によって向上し、疲労強度は表面硬化と圧縮残留応力、および鍛流線の効果によって増加します。一般的に疲労強度は転造の方が切削よりも 1.5 倍程度かそれ以上に増加するといわれています。

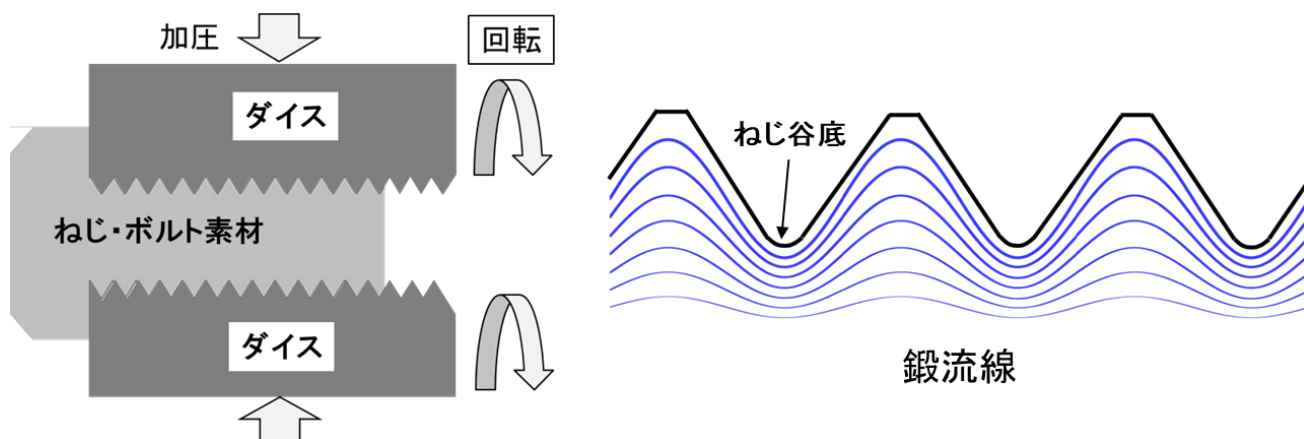


図6 ねじ・ボルトの転造と鍛流線の一例

ねじ・ボルトの疲労破壊は多くの場合、応力集中部であるねじ谷底部で発生します。転造加工では、ねじ谷底部に圧縮加工による表面硬化と圧縮残留応力の発生、そして鍛流線の形成があります。また、表面の平滑度も疲労強度に影響します。

一般的に疲労強度に影響する因子として切欠き係数と表面係数があります。切欠き係数は形状係数である応力集中係数に主に依存するため、切削であっても転造であっても大差はないと考えられます。一方、表面層における表面硬化と平滑度は表面係数に効きますが、切削と転造では転造の方が表面硬化度の大きさと深さがかなり大きくなります。図7は表面係数に及ぼす表面硬化（圧縮残留応力の効果も含む）と表面粗さの影響を概念的に示した図です。ここで、疲労強度の増加に表面硬化による効果と圧縮残留応力による効果があります。表面層が硬化すると圧縮残留応力が生じますが、両者を区別して疲労強度への影響を考えることは従来から極めて困難であると考えられています。転造加工で表面が平滑で表面硬化が起こると表面係数は 1.5 程度に上昇することが見込まれます。切削の場合もわずかな表面硬化がありますので、厳密には表面係数は 1 より若干高くなります。

通常、転造ねじは切削ねじよりも疲労強度が 1.5 倍程度かそれよりやや大きいと言われていています。一般的に表面硬化による表面係数は最大で 1.5 程度と見積もられますので、転造ねじの疲労強度の増加は表面硬化（圧縮残留応力の効果も含む）によるところが大きく、鍛流線による寄与分はこれよりは小さい可能性があります。ただし、鍛流線が正常に形成されればさらなる疲労強度の増加、および靱性すなわち衝撃値が改善できますので、ねじ・ボルトの転造工程で表面硬化度が大きく、平滑度が良好で、鍛流線が正常に形成されることは、強度に優れたねじ・ボルト製造に必要不可欠であります。

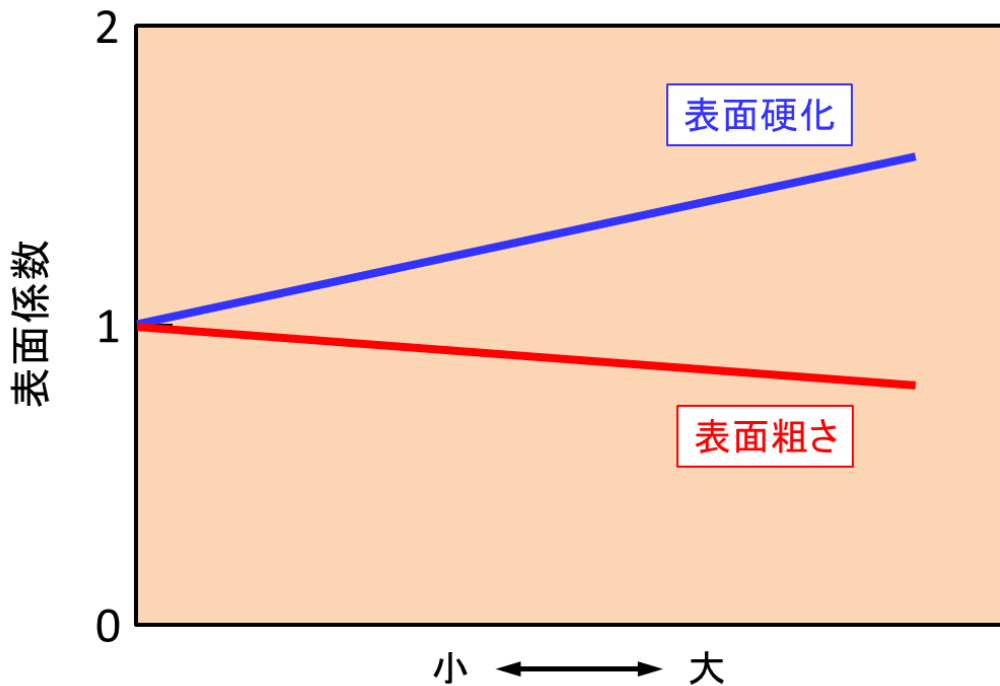


図7 表面係数に及ぼす表面硬化および表面粗さの影響

(3) 鍛流線と疲労強度

鍛造による鍛流線の形成は、疲労強度に影響を与え、鍛流線方向の疲労強度が増加します。実際に鍛流線が形成された場合、組織がどのようなになっているのか、組織と疲労強度の関係について一考察として考えてみたいと思います。

図8は、鍛流線が表面に平行または垂直方向に形成されている場合に荷重が表面に平行に繰返し負荷される状態を考えたもので、介在物の大きさと分布はイメージ的に書いています。鍛流線では結晶粒界に介在物などが並んだ状態になっており、右側の図では鍛流線が表面で切断されています。介在物は鍛流線からそれた結晶粒内にも分布します。一般的な実験データとして鍛流線と平行方向の疲労強度は、垂直方向と比べて1.2-1.3倍大きくなることが知られています。

鍛造によって伸びる形で変形を受けた介在物は母相との界面で結合エネルギーが弱く弾性係数もかなり小さいため、疲労による繰返し応力が作用すると疲労き裂の起点になりやすくなります。このような介在物としては非金属介在物のMnS系などが知られています。表面近傍に介在物が存在する場合、介在物が応力集中部となって介在物との境界付近が疲労起点になります。この境界付近を母相側から見れば、図8(a)では曲率が小さいので応力集中係数が小さいですが、図8(b)では曲率が大きく応力集中係数も大きいことがわかります。つまり、鍛流線の方向によって介在物の方向が異なり、その結果、表面近傍において介在物による応力集中係数が異なるために疲労強度に差が現れると考えられます。

一方、非金属介在物の疲労強度への定量的評価法として、最大主応力方向に対する介在物の投影面積の平方根をパラメータにして、この値を分母側に入れて疲労強度を評価する考え方が広く知られています。この考え方に立てば、図8(a)の荷重方向が鍛流線と平行方向の場合は介在物の投影面積が小さく、図8(b)の荷重方向が鍛流線に垂直方向の場合は介在物の投影面積が大きくなることがわかります。疲労強度が介在物の投影面積の平方根の大小に対して逆関係で変化するということは、投影面積の小さい方は疲労強度が高く投影面積が大きい方は疲労強度が低いことを意味します。すなわち、投影面積

が小さくなる図 8(a)の方が、投影面積が大きくなる図 8(b)よりも疲労強度が高くなることこの考え方からも理解できます。

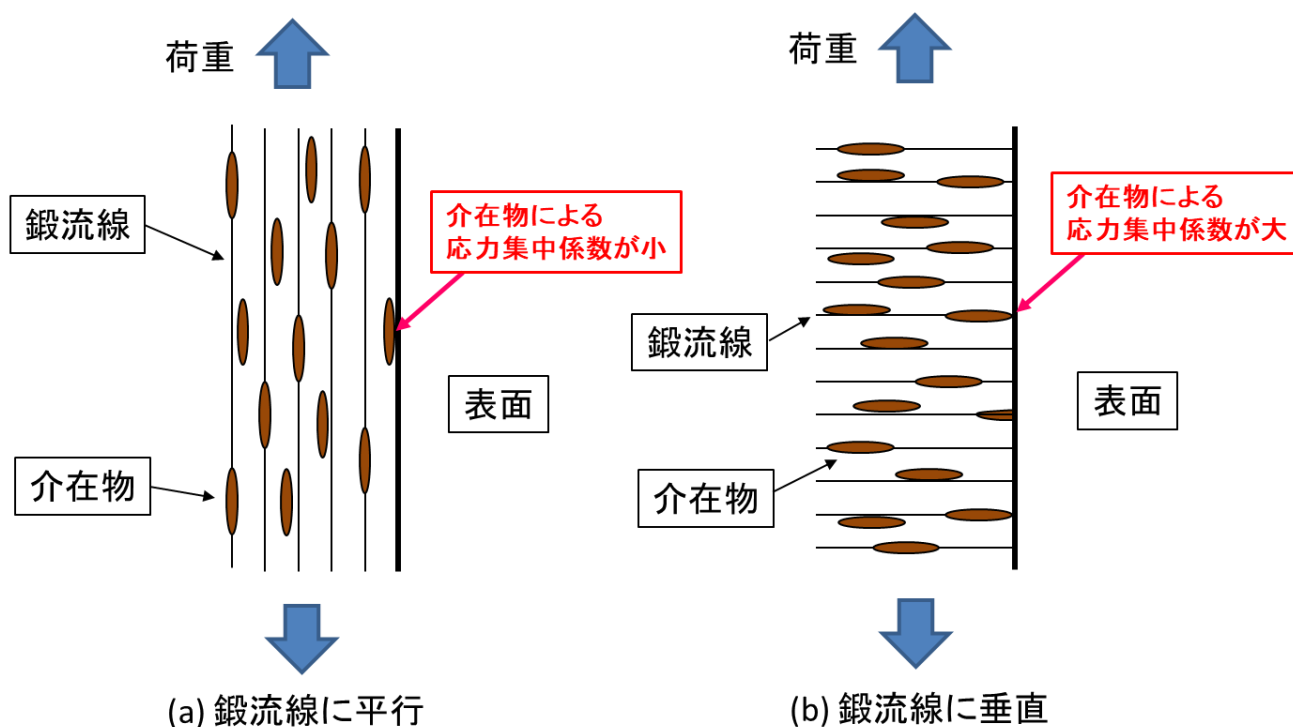


図 8 繰り返し荷重方向が鍛流織に平行または垂直の組織概念図

図 9 は、段差切欠き部を有する部材について切削加工の場合の鍛流線の流れと応力集中部における介在物の状態を模式的に表した概念図です。元の素材段階で鍛流線は横方向に流れて形成されているものとします。右側の図で、応力集中部には丸み R が加工され、最大の応力集中係数を有する箇所は丸み R の中心付近になります。その箇所では鍛流線が切断されており、介在物が表面近傍に存在する場合、介在物の応力集中係数の大きい箇所が表面近傍に存在することになって、応力集中部である丸み R を広げる繰り返し応力に対して弱くなります。すなわち、このような状態で鍛流線が切断されて扁平な介在物が表面近傍に存在する場合、この介在物の尖った先端箇所を起点とする疲労破壊が起こりやすく、介在物/母相界面の応力集中係数が大きい分、疲労強度は不利な状態にあるといえます。

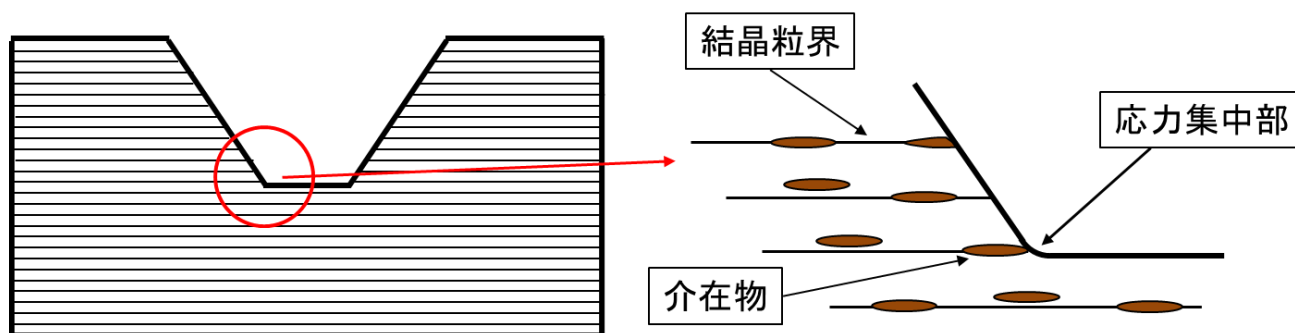


図 9 段差切欠き材における切削加工の組織概念図

一方、図 10 は、同様の段差切欠き部を有する部材について鍛造加工の場合の鍛流線の流れと応力集中部における介在物の状態を表した概念図です。元の素材段階で形成される横方向に流れた鍛流線が金型鍛造によって表面に沿うように鍛流線が形成されています。右側の図で、応力集中部の丸み R 部

分では、最大の応力集中係数を有する丸み R の中心付近では、鍛流線が切断されることはなく、丸み R に沿って流れます。したがって、応力集中部である丸み R を広げる繰返し応力に対して、介在物が表面近くに存在する場合、疲労破壊の起点になり得る箇所は介在物/母相界面の応力集中係数が小さい側になります。すなわち、このような状態で鍛流線が丸み R 部表面に沿うように流れて扁平な介在物が表面付近に存在する場合、疲労起点になりやすい介在物の箇所の応力集中係数が相対的に小さく、疲労強度は図 9 の場合と比べて有利な状態にあるといえます。

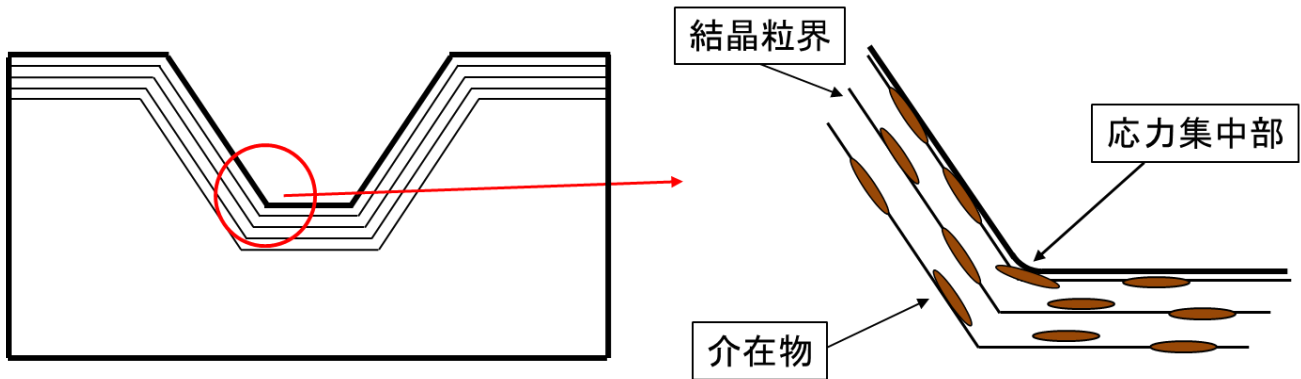


図 10 段差切欠き材における鍛造加工の組織概念図

図 9 あるいは図 10 のような段差切欠き部を有する大型部品について、切削加工と鍛造加工で製造した部材について横方向の繰返し荷重による疲労試験では、応力集中箇所である丸み R をもった角部から疲労破壊し、疲労強度は鍛造加工の方が切削加工よりもおよそ 20% 高いことが知られています。この疲労強度の異方性は介在物の存在状態の違いで説明することができます。

また、先に述べました転造ねじでは応力集中部は丸み半径をもったねじ谷底であります。ねじ谷底は微視的には平坦部を持った図 9 あるいは図 10 のような形状に近いと考えられます。転造ねじでも同様の考え方によって、切削加工のねじ谷底では鍛流線が切断されるのに対して、転造加工のねじ谷底では鍛流線が谷底表面に沿うように流れると考えられます。このため、転造ねじの疲労強度の増加に対して、加工硬化（圧縮残留応力も含む）以外に鍛流線の効果も期待できると考えられます。

(4) 後処理の影響

鍛造加工では一般に製造品の品質向上の観点から後処理が行われます。後処理としては、機械加工、熱処理、表面処理があります。機械加工では、形状寸法精度を上げたり、表面欠陥層を除去したりする目的で切削加工が行われます。熱処理では、金属組織の均一微細化、部品の強度向上、表面硬化などの目的で行われます。表面処理では、鍛造関係ではショットブラストなどのスケール除去、ショットピーニング、各種めっきなどがあります。

ここでは疲労強度のみに着目し、代表的な後処理と疲労強度への影響を簡単にまとめた結果を表 4 に示します。

表 4 鍛造加工の後処理と疲労強度への影響

後処理	疲労強度への影響
仕上げ切削加工	鍛流線を切ることによって疲労強度が低下する可能性あり
焼入れ焼戻し	引張強さが増加し、疲労強度も増加
浸炭焼入れ	表面硬化によって疲労強度が増加
高周波焼入れ	表面硬化によって疲労強度が増加
スケール除去	ショットブラストでは圧縮残留応力によって疲労強度が増加
ショットピーニング	疲労強度が大きく増加

最終形状に仕上げるために切削加工が行われますと、鍛造で形成されている鍛流線を切断してしまう可能性があります。応力集中部に鍛流線が表面に沿って形成されている場合に、新たな切削面が表面平行からずれた場合は鍛流線を切断してしまいます。これによって疲労強度が低下する可能性があります。

材料の強度を上げるために、焼入れ焼戻し、浸炭焼入れ、高周波焼入れなどの熱処理も一般的に行われます。これらの熱処理では、焼入れ焼戻しは引張強さが増加し、また浸炭焼入れと高周波焼入れが表面硬化（圧縮残留応力も含む）しますので、いずれの熱処理でも疲労強度が増加することになります。

鍛造加工では、特に熱間鍛造の場合は、表面にスケールが付着して荒れたりします。このような場合にスケール除去が必要になりますが、一般的なスケール除去法であるショットブラストでは表面に圧縮残留応力が付与されて疲労強度が増加することになります。表面処理の一種であるショットピーニングは表面を硬化し圧縮残留応力を発生させることから疲労強度が大きく増加し、鍛造小型部品などで必要に応じて行われます。