

技術論文

軸肥大技術のギヤシャフトへの適用 Application of Partial Diameter Enlargement Technology (JIKUHIDAI) to Gear Shaft

片岡隆之
Takayuki Kataoka
古本雅也
Masanari Furumoto

最近の塑性加工技術として、型がほとんど不要で軸の一部を肥大させることができる軸肥大加工法がある。この技術によれば、生産量が少ないため太径素材から削り出していたギヤ付きシャフトなどの部品に対して、軸径相当の細い径の素材を用い、ギヤ部のみ肥大させ成形することができる。これにより、削り代を低減し、かつ加工時間の低減も図れる。しかし、この技術は最近開発されたこともあり、肥大部の任意の形状(幅や径)を得るための成形条件や、肥大時の塑性変形に伴うワレなどの成形限界条件について不明確であった。この成形条件が明確でないと、多品種への展開ができない。このため、研究を実施しワレなどの成形限界を求める方法を明確にした。これにより多品種であるギヤポンプ部品への適用が可能となった。本報告では、軸肥大技術の概要とともに、本研究の内容について報告する。

The partial diameter enlargement technology (JIKUHIDAI) that can thicken part of a shaft hardly requiring the assistance of a die is a recent forming technology. Using this technology, shafts with a gear that have been manufactured by shaving large-diameter rods due to the requirement of limited quantities can now be formed using rods of a thin diameter equal to the diameters of shafts and by thickening the gear parts of the thick rods. This reduces the shaving allowances and shortens the machining time. Partly because this technology has been developed only recently, forming conditions to obtain a desired shape (width and diameter) of thickened parts and forming limit conditions such as cracking due to plastic deformation during thickening have not been determined. Unless these forming conditions are determined, the technology cannot be used to produce in a large variety. To solve this problem, research has been conducted and a method has been developed to determine forming limits for cracking and other phenomena. The development has enabled application of the technology to the manufacture of gear pump parts that are produced in a large variety. The partial diameter enlargement technology is overviewed and research work is described.

Key Words: 軸肥大 塑性加工 成形 歩留まり向上 座屈 S-N 曲線

1. はじめに

ユーザーズに応じて、豊富なバリエーションが必要となり多品種少量生産となっている部品がある。この中で軸部の一部がギヤとなっているシャフトがあり、多品種少量生産ということで丸棒から削りだしで加工していた。この場合、素材となる棒材の径はギヤ部の最大径に合わせたいため、軸部は削り込む必要があり、その分の材料が無駄になっていた。また加工の時間も多くなる。鍛造などでシャフトの一部を太くし、材料歩留まりを上げることも考えられるが、専用の型が必要である。多品種の場合は、この型費が全品種分必要となり初期費用が高くなる。また生産量が少なく償却費の負担も大きい。

これに対して、(株)いすらにより開発された軸肥大技術を用いると、軸径は細いままでギヤ部のみギヤ外径にあ

わせ肥大させることができる。これにより、材料歩留まりの向上が図れ、また加工時間の短縮も可能となる。

しかし、軸肥大技術は最近の技術のため肥大形状をコントロールするために必要となる要因と条件設定方法が不明確であった。特にワレなどの成形限界が不明確なため、材質や形状ごとに加工試験が必要となり多品種部品への展開が困難であった。このため本研究において、肥大後の形状から成形限界を求める方法を明らかにした。これにより、材質が一定の下で数百アイテムの品種に対して条件設定を行うことが可能となり、ギヤポンプの部品に対して適用が可能となった。この内容について報告する。

2. 軸肥大加工技術について

2.1 軸肥大加工機

軸肥大の装置の外観を図1に示す。

建設機械の部品は自動車などに比べ大きいため、それ

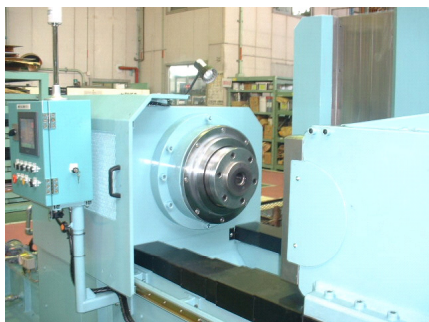
に応じて肥大させるための必要荷重が高くなる。このため、素材の軸方向に最大1500kNの荷重を加えることができる加工機を2006年6月に(株)いづからから導入した。



(a) 加工機全体図

装置仕様

加圧力	max.1500kN
モータ出力	18.5kW (駆動用)
主軸回転数	5~100rpm
曲げ角度	max.8°
加圧部移動速度	約30mm/sec.



(b) 駆動側



(c) 加圧側

図1 1500kN仕様軸肥大加工機

2.2 軸肥大のメカニズム

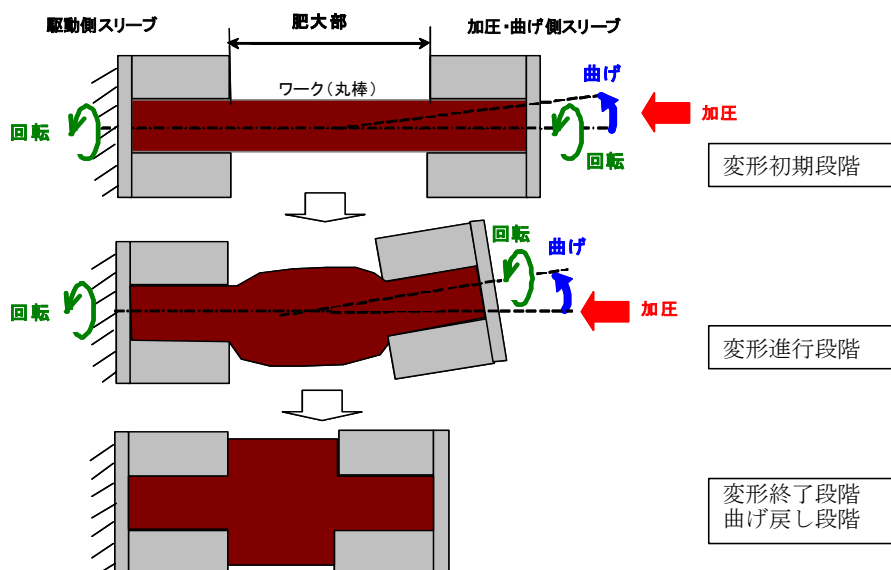


図2 軸肥大変形機構

この軸肥大のメカニズムの詳細について、軸肥大の変形機構を・変形初期段階・変形進行段階・変形終了段階・曲げ戻し段階の4フェーズに分けて説明する(図2)。

(1) 変形初期段階

加圧力と曲げ角の上昇により肥大化する段階

軸肥大の負荷シーケンスは、
回転開始→加圧力負荷→曲げモーメント負荷 である。

①加圧力負荷

まず丸棒に圧縮方向の加圧力が負荷される。この状態では、軸方向に等分布な圧縮応力 σ_c が発生する(図3)。

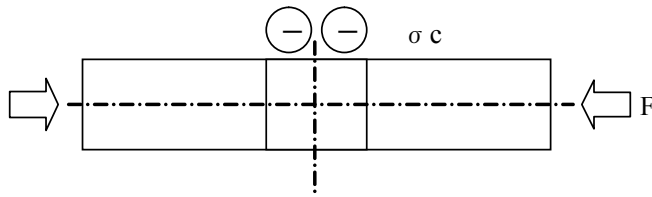


図3 加圧力による軸方向応力分布

②曲げモーメント負荷

曲げモーメントが単独で作用したとき、軸方向には中心線より上方では圧縮応力 σ_{cm} 、中心線より下方では引張応力 σ_{tm} が発生する(図4)。

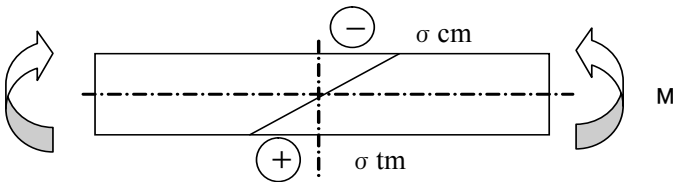


図4 曲げモーメントによる軸方向応力分布

③加圧力と曲げモーメントの同時負荷

軸肥大の初期において①と②の加圧力と曲げモーメントが同時に作用する。重ね合わせの原理により、図5に示す軸方向応力状態となる。

中立軸より上方： $\sigma_c + \sigma_{cm}$

中立軸より下方： $\sigma_c + \sigma_{tm}$ ($\sigma_{tm} < 0$)

であり、 $\sigma_c + \sigma_{cm} > \sigma_y$ (降伏応力)で、その領域は塑性状態となる。塑性状態になるとわずかでも力(エネルギー)の供給があれば、その方向に塑性変形は進行する。このとき体積一定の条件から肥大径方向にも塑性変形し肥大する。

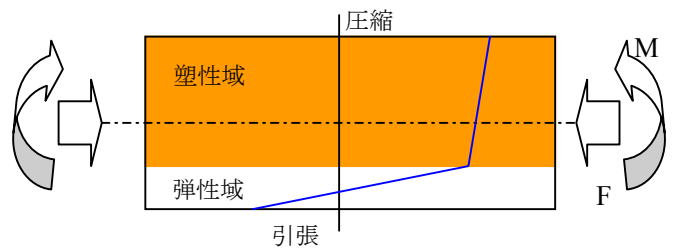


図5 加圧力と曲げの重畳による軸方向応力分布

回転しているため、全周にわたって以上の現象が繰り返され径全体が肥大する。

(2) 変形進行段階

曲率の上昇により肥大化する段階

加圧力・曲げ角が目標値に到達した後、塑性変形すると加工硬化により降伏点が上昇する。しかし、曲げ角度を一定に保っている角度用油圧シリンダから反力の形で

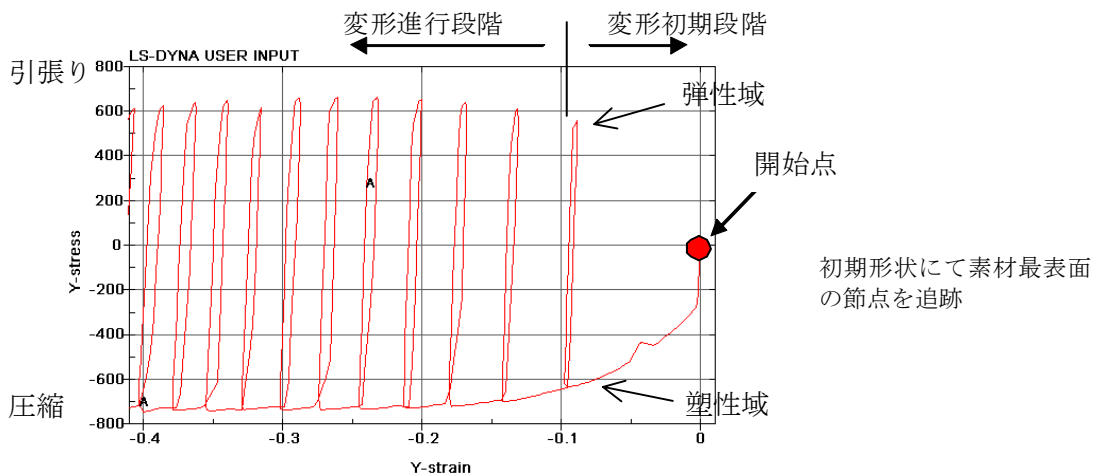


図6 軸方向応力-歪履歴

エネルギーが供給されているため、塑性変形を継続することができ肥大が進行する。

ここまで述べた、変形初期段階と変形進行段階における応力とひずみの関係をシミュレーションにより求めた(図6)。

1回目の負荷は変形初期段階を示し、2回目以後の負荷・除荷は変形進行段階を示す。観察点は初期形状の曲げ圧縮側最表面の節点とした。この例では、変形初期段階での負荷によって、降伏応力が370→600MPaにまで上昇する。

そのため、反転して曲げ引張り側になったときは塑性状態にならず、永久変形しない。この点からも、曲げ圧縮側で最も肥大化が進行することが判る。

(3) 変形終了段階

図面寸法から、肥大幅を設定しておく。肥大幅をセンシングし、この設定した肥大幅になったときに肥大成形を終了する。

(4) 曲げ戻し段階

肥大後丸棒をほぼまっすぐに戻すため、加圧側の傾き角度を0に戻す。

以上により肥大化現象は、加圧力と曲げ力による軸方向の圧縮応力によって進行する。このことから、肥大化現象は、
・加圧力
・曲げ力
が主制御パラメータとなる。

パラメータ	大	小
加圧力	変形速度大	変形速度小
曲げ角	変形速度大	変形速度小
成形までの回転数	フィレットに亀裂入りやすい	フィレットに亀裂入りにくい
初期スリーブ間隔Lo	偏芯/座屈発生しやすい	偏芯/座屈発生しにくい

3. 軸肥大加工の成形限界

軸肥大において、たとえば過大な荷重で行うと素材に微小なワレが発生する。また型を使用しないため肥大径方向がフリーとなり、素材が長いと不適正な荷重をかけた際座屈する。このためまずワレ、座屈などの成形限界を明確にする必要がある。この成形限界の項目は、軸肥大のメカニズムとこれまでの実験結果を検討し

- ①ワレ (フィレット部亀裂)
- ②座屈
- ③肥大率

の3点とした。さらにこれらの評価が肥大後の形状から推定できる方法を明確にした。この内容について説明する。まず肥大前の形状と肥大後の形状を模式的に図7に示した内容で定義する。

また、肥大率k, 肥大幅率mを以下のとおり定義する。

$$k = \frac{D_1}{D_0}$$

$$m = \frac{L_1}{D_0}$$

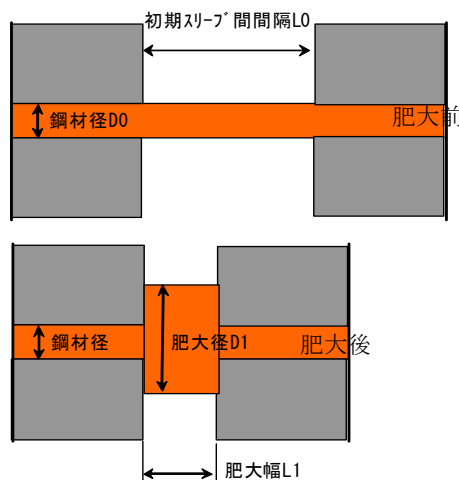


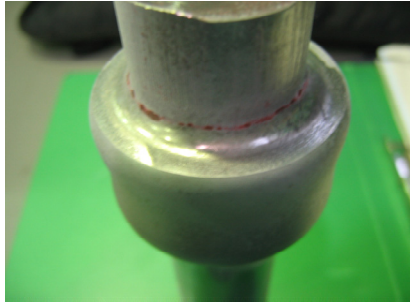
図7 肥大前後の形状

3.1 ワレに関する成形限界

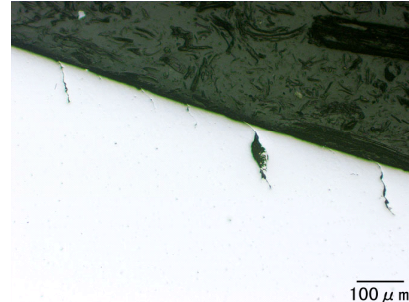
ワレ（フィレット部に発生する亀裂）とは、肥大立ち上がり部の円周上に沿って発生する亀裂である（図8）。

図9は、加圧力 540kN と曲げ角 3° を作用させた時の主せん断応力の分布。肥大立ち上がり部（フィレット部）で主せん断応力が最大。

フィレット部には1回転毎に圧縮、引張の応力がかかる。高応力のため低サイクル疲労により、ある回転数を超えるとフィレット部表面よりワレが発生する。このため、使用する素材材質毎に S-N 線図を作成してワレ発生限界を評価する必要がある。以下に炭素量 0.14% の合金鋼のワレ限界を評価した内容について示す。なお炭素量が多く硬い材料は、柔らかい材料に比べ短いサイクルでワレが発生するため、炭素量上限の 0.18% の材料も用いて試験した。



(a) フィレット部ワレ（赤線部分）



(b) ワレの光顕写真（深0.1～0.2mm）

図8 肥大フィレット部に発生するワレ

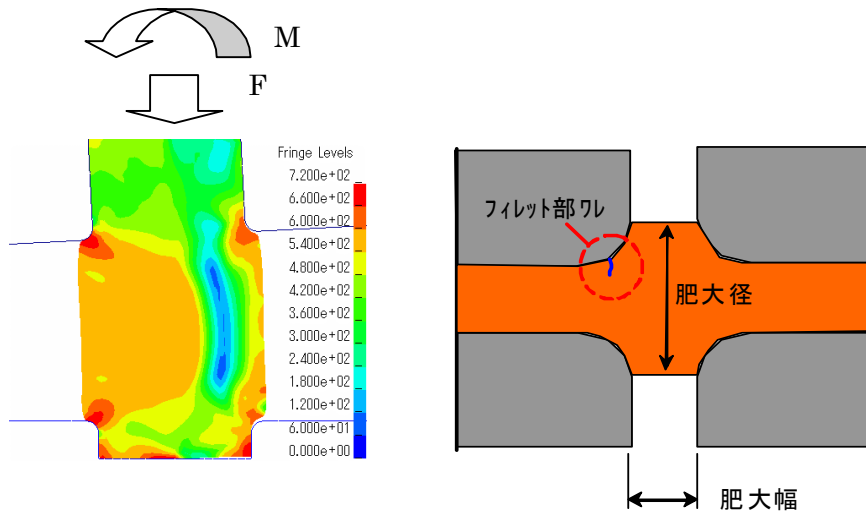


図9 肥大成形中の最大せん断応力分布

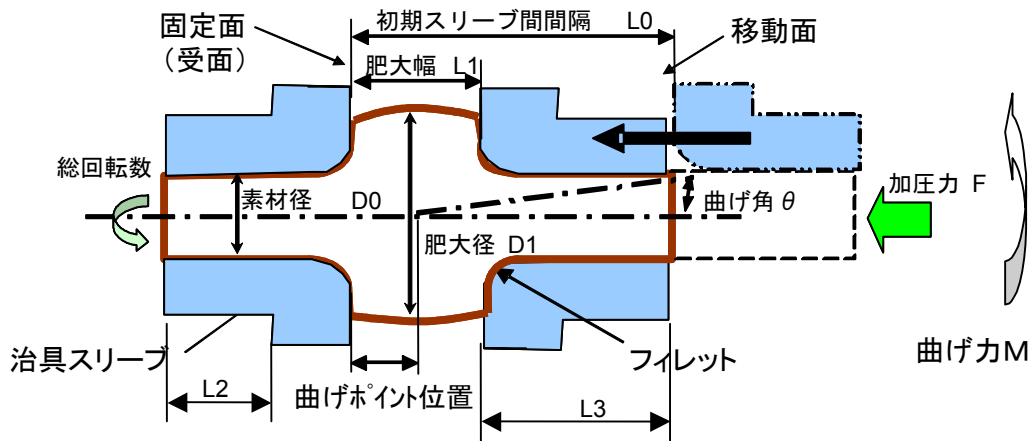
①試験条件

(a) 寸法

- ・素材径 $D0 = \phi 42$
- ・肥大率 $D1/D0 = 1.2 \sim 2.0$
- ・肥大幅率 $L1/D0 = 0.83$
- ・把持幅 $L2 = 40\text{mm}, L3 = 46\text{mm}$

(b) 成形条件

- ・加圧力 $600\text{kN} \sim 1400\text{kN}$
- ・曲げ角 $1^\circ \sim 6^\circ$



②結果 上記の試験条件により S-N 曲線を求めた.

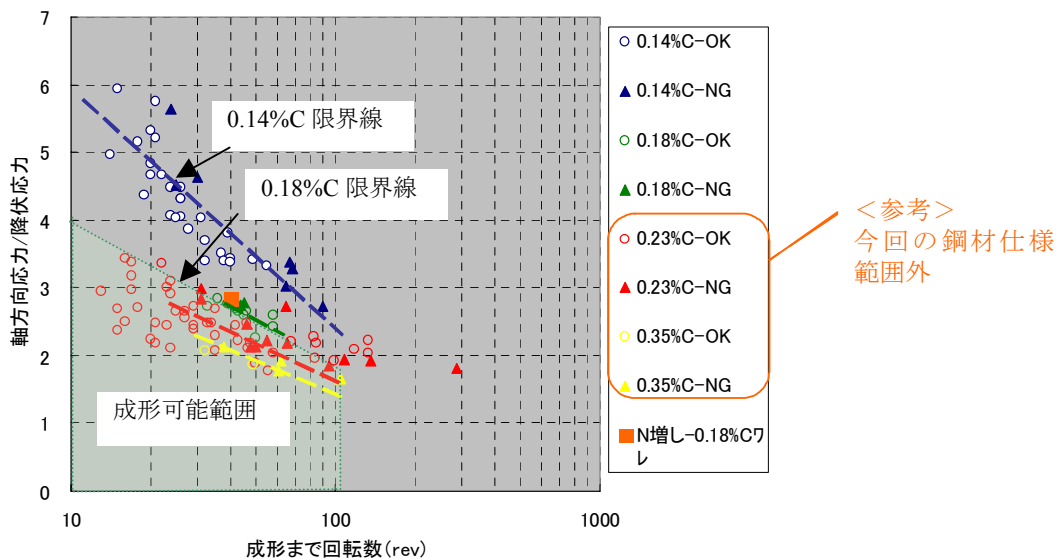


図 10 軸方向応力指数と成形回転数との関係

0.14%Cの限界線(青線)と0.18%Cの限界線(緑線)は図10に示した通りであった。(今回の範囲外であるが参考までに0.23%Cと0.35%Cもあわせて図に示した)0.18%Cの限界線が対象合金鋼の成形限界線となる。

このとき、成形までの回転数と肥大体積は相関がある。従って、S-N曲線は、一定の肥大体積までワレなく軸肥大できるとみることができる。

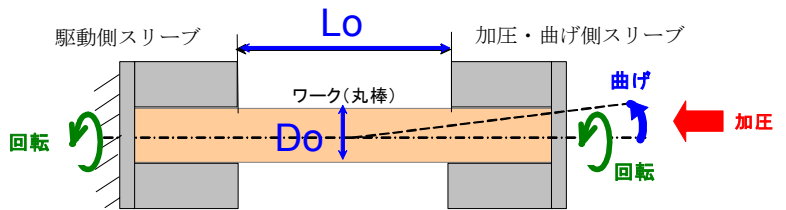
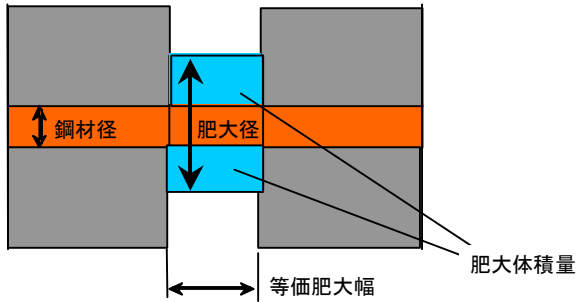


図11 軸肥大加工におけるL0/D0の定義



肥大体積は

$$V = \frac{\pi D_0^3}{4} m(k^2 - 1)$$

であるが、径が太いほど肥大体積は大きくなるので正規化した肥大体積指数 V_n を定義する。

$$V_n = m(k^2 - 1)$$

S-N線図(図10)の0.18%Cの限界線から V_n の限界値は1.3となる。

3.2 座屈(偏心)に関する成形限界

塑性座屈は、長さ L_0 、径 D_0 の断面が円形形状を有する長柱に荷重 F が作用するとき、一般に

$$(\sigma_c) \text{ 座屈臨界} = 16 \pi^2 E' (L_0/D_0)^2 \dots (3-1)$$

(E' は塑性域における応力歪線図の傾きを示す)

であり、 L_0/D_0 により座屈臨界応力が決まる。軸肥大前は、素材丸棒を図11のように把持している。このとき L_0/D_0 が大きいと前述の通り、加圧時に座屈する。このため、座屈の起こる L_0/D_0 を評価した。

加工条件)加圧力:1200kN,曲げ角:3°,主軸回転数 40rpm
肥大率 $D_1/D_0=1.4$

材質:0.14%C,0.22%Cの2種類の合金鋼

として、 L_0/D_0 を2.0から0.5おきに設定し、成形後の偏心量を測定した。 L_0 は素材セッティング状態におけるスリーブ間の間隔(図11)。

C量にかかわらず、 $L_0/D_0=2.75$ までは、偏心量は1mm以下に抑制されており、実用上問題ないレベルであった。
 $L_0/D_0>3.2$ となると急激に偏心量が増大し、3mmを超える量となる。最終的には、 $L/D=3.75$ のように、座屈から腰折れが発生して破断に至る(図12,13)。

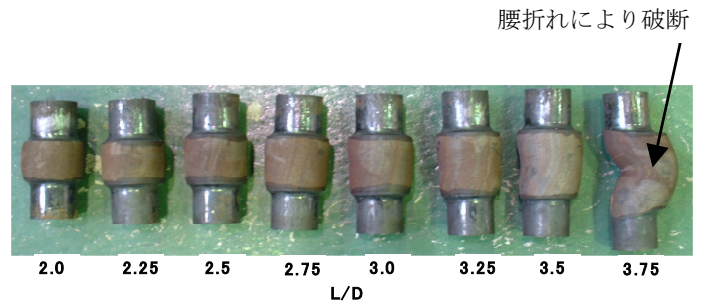


図12 L/Dによる軸肥大後外観

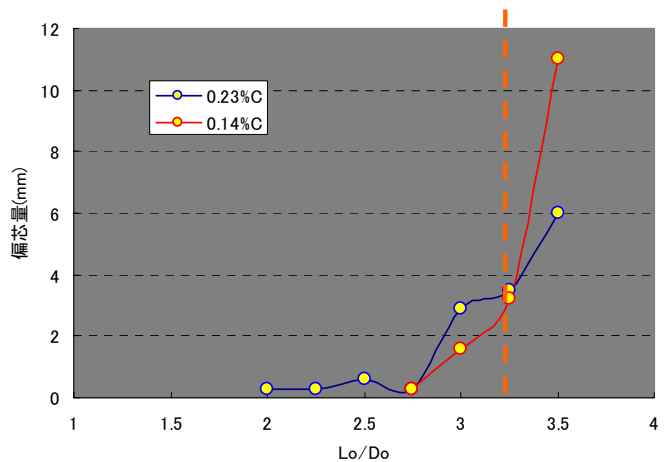


図13 加工後の偏心量

本研究では、偏心量3mm以上を座屈と定義し、 L_0/D_0 が3.2以下を限界値とした。

このとき肥大体積は肥大前後で体積一定であることから

$$\frac{L_0}{D_0} = k^2 m$$

$$k = \frac{D_1}{D_0}$$

$$m = \frac{L_1}{D_0}$$

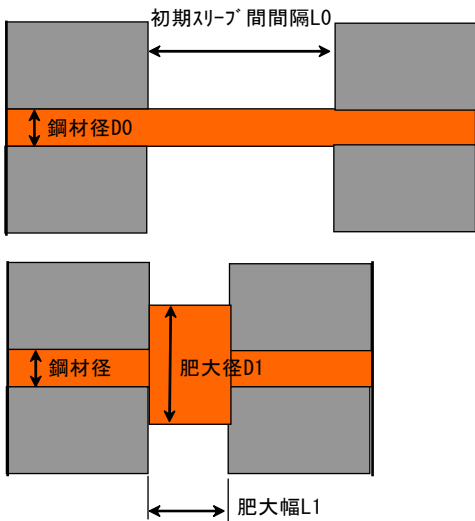
3.3 肥大形状から求める成形限界

前述したとおり，肥大形状からワレ限界，座屈限界の限界値が求まった。

ワレ限界 $V_n = m(k^2 - 1)$

座屈限界 $\frac{L_0}{D_0} = k^2 m$

肥大率限界 k



であるから，縦軸を肥大率 k (D_1/D_0) とし，横軸を肥大幅率 m (L_1/D_0) とすると炭素量 0.14%合金鋼の場合は，求めた限界値から限界線が図 14 のようにプロットできる。

なお肥大率の限界は，S-N 線図に用いたデータから，ワレのない領域として 1.6 以下と求まる。

以上により，肥大後の形状から肥大率，肥大幅率を求めることで，ワレ，座屈，肥大幅の 3 点について評価できる。肥大幅率が大きい領域では座屈律速，肥大幅が小さい領域では肥大率律速，それ以外ではワレ律速となっているといえる。

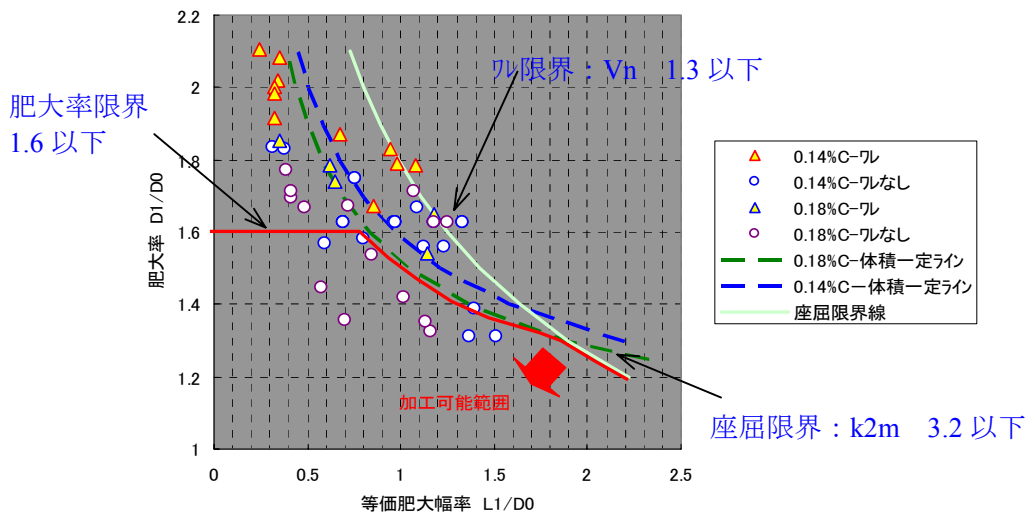


図 14 肥大率と肥大幅率による成形限界 (0.14% C 合金鋼の場合)

4. 工程能力

本技術による肥大後の形状ばらつきを確認した。特に肥大径方向はまったく拘束されていないためばらつきも大きい可能性がある。このため、試験を実施した。

(1) 工程能力テストの水準

表 1 にテスト水準を示す。(素材径 φ36)
炭素量 0.16%, 0.22%の合金鋼

表 1 テスト水準

素材 C 量(%)	素材径(mm)	N 数
0.16	35.5	30
	36	30
0.22	35.5	30
	36	30
	36.5	30

(2) 成形条件

加圧力 650kN
曲げ角度 3°

(3) 結果

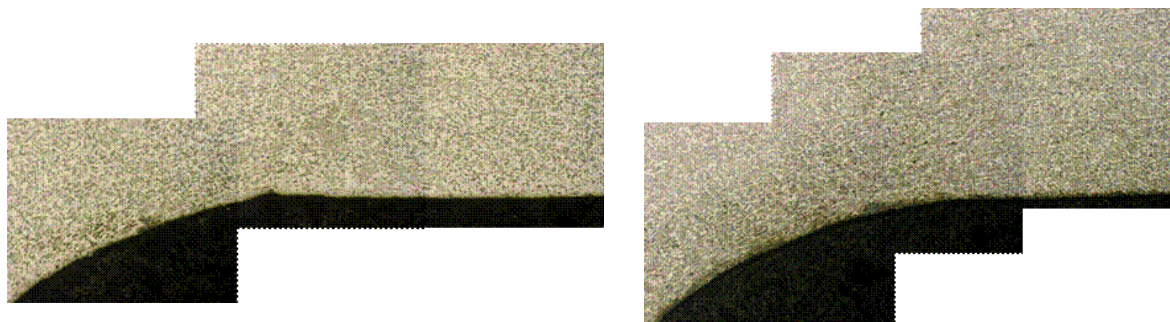
① 上記成形条件にて表 1 に示す試験水準各 N=30 において亀裂の発生はなく、成形条件の妥当性を検証できた。

図 15 はフィレット部近傍の組織である。カラーチェックの結果、全ての水準で亀裂は発生していなかった。また、異常な塑性流れも見られなかった。

② 成形寸法のバラツキを評価した。

- a) 肥大幅のバラツキ ±0.19mm (3σ)
- b) 肥大径のバラツキ ±1.22mm (3σ)
- c) 肥大径のフラット性 ±1.73mm
- d) 肥大部の偏芯量 max.0.54mm

肥大幅は、加圧側の移動量をセンシングし設定値になると加圧を終了しているため他の項目に比べバラツキが小さい。肥大径は、肥大径方向に拘束するものがなくフリーなためバラツキが 1mm を超える。なお、フラット性とは、径の最大と最小の差である (図 16 肥大部の形状を参照)。



(a) 0.16%C 素材径 φ36.0

(b) 0.22%C 素材径 φ36.0

図 15 加圧側フィレット部近傍

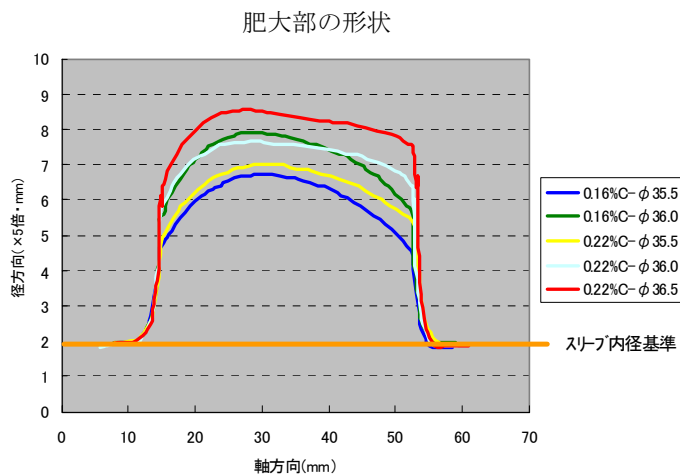


図 16 肥大形状プロフィール

③成形形状の特徴

- a) 肥大部は樽形になる。両端はスリーブとの摩擦により半拘束されるため肥大が抑制される。
- b) 素材径が大きいと肥大径も大きい。スリーブと素材のクリアランスが相対的に小さいためにスリーブ内での変形に取られにくいためである。
- c) 体積変化は一定のため、C量との相関はない。

この材料の場合、トータルとして肥大部径方向誤差±4.7mmとなる。このようにばらつきを把握し、後工程での旋削代を決定した。

5. 適用事例

使用する材質の成形限界および主制御パラメータの条件を明確にし、数百アイテムあるギヤポンプ用シャフトへの適用をおこなった。

アイテム数が多いため、図17に示すとおり、素材径はφ32mm～φ60mmであり、肥大径、幅も様々である。

本技術を適用することで歯切り前ブランク材の材料歩留まりが削り出しに比べ約2倍となり、加工時間も約20%低減できた(図18)。現在、丸棒の切断～軸肥大～熱処理(ノルマ)～旋盤加工までの量産ラインを立上げ中である。



図17 肥大例

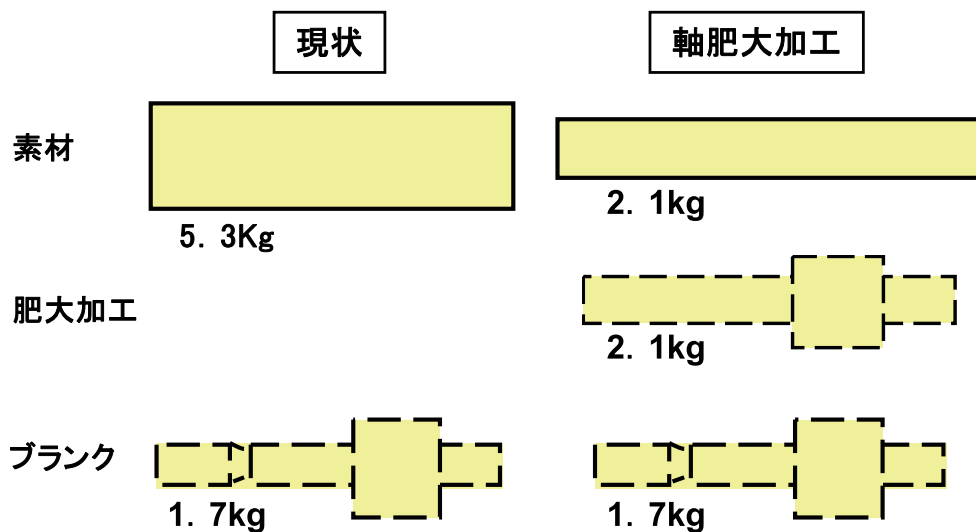


図18 歯幅31.5mm、外径(ギヤ部)62.5mmのシャフトの例

6. おわりに

少量生産のため型費等のコスト面から塑性加工法が採用できない場合があった。しかし、塑性加工は材料歩留まり向上に適している。このため型をほとんど必要としない工法とすれば利用が可能であり、軸肥大技術はこの目的に合致している。この意味で塑性加工の適用範囲を広げることができる優れた技術である。一方、本技術は型が不要で多品種少量生産にむいているが、型がないことから肥大させる径方向に形状を拘束するものがなく、コントロールが難しい。このため肥大メカニズムの理解とそれに基づく成形条件を明確にしていないと多品種に対する成形条件の作成が困難となる。これに対し、本研究において多品種部品に対する成形限界の設定手順を明確化した。これにより実用化に対する大きなハードルを越えることができたと考えている。現在数百アイテムあるギヤポンプの部品に対して適用を進めている。

筆者紹介



Takayuki Kataoka

かた たか ゆき
片岡 隆之 1983年、コマツ入社。
現在、生産本部 生産技術開発センター所属。



Masanari Furumoto

ふるもと まさなり
古本 雅也 1991年、コマツ入社。
現在、研究本部 知的財産部所属。

【筆者からのひと言】

本研究においては、材料の特性、加工のメカニズムの把握だけでなく装置の段取り性や高負荷部の強度設定など装置関連の工夫も必要であった。自動化に対してはさらに工夫の余地があると思うが、装置を含めたひとつの工程として検討したことで多くの知見が得られた。また採用できないと思っていた塑性加工を適用できたことはこの技術の特長によるところが大きいですが、このような常識にとらわれない見方・工夫を努力して行うことが重要なことだと感じています。