ネットシェイプ成形の現在*

Present State of Net Shape Forming

小坂田宏造**
Kozo OSAKADA

Key words metal forming, net shape, cold forging, plate forming, powder compaction

1. はじめに

最近、塑性加工分野でネットシェイプ成形という言葉が多く聞かれるようになった。これは、鍛造や粉末成形などの金型を用いた加工で、切削による仕上げ後加工なしで最終製品形状（ネットシェイプ）を作製する高精度成形を意味するが、加工方法により技術内容は異なるようである。ここでは、鍛造、板成形、粉末成形を中心としてネットシェイプ化の現状を紹介する。

2. ネットシェイプ成形の経緯

航空機部品の鍛造や鋳造の分野では、以前から「ニヤネットシェイプ」という言葉が製品形状に近い予加工形状という意味で使われていた。1986年にオハイオ州立大学に金型を用いた加工の研究センターが設立されたときに、より高精度な製品を目指して「ネットシェイプ生産・工学研究センター」と名付けられた。

日本で最初にネットシェイプ成形を目指したのはTiやNi合金の航空機部品の等温鍛造¹⁾であった。これは既存のニヤネットシェイプの等温鍛造をより高精度にすることを目標としたが、実際に進展したのは鋼製自動車部品の冷間鍛造であった。

図1に図中の歯車素材を切削加工または冷間鍛造+切削加工とで生産するときのコストと生産量の関係の例を示す²⁾。冷間鍛造金型は高価であるので生産量1000個までは切削の方が低コストであるが、それ以上では冷間鍛造+切削の方が低くなる。

生産量が100000個になると金型費の影響は非常に小さくなり、後切削コストの割合が大きくなる。この段階では切削の削減が重要になり、切削のチャッキング回数を少なくするように冷間鍛造形状を工夫したりする。このため、ネットシェイプ鍛造により切削の全廃が目指されたが、NC旋盤や切削工具の進歩により切削速度が非常に速くな

り、自動化も進展したため、回転対称品で旋削を省くだけではコストメリットが小さくなった。

1980年代までは、冷間鍛造製品のほとんどは回転対称形状であったが、1990年ごろから等速ジョイント部品や歯車といった異形部品が注目されるようになり、複雑形状を後加工なしで成形するネットシェイプ鍛造が開発ターゲットになっていた。図2³⁾はアウターレースと呼ばれる等速ジョイント部品であるが、カップ内面の複雑な形状（図中のNS）を冷間鍛造でネットシェイプに作り、回転形状部を旋削している。切削加工では長時間を要する複雑形状部を冷間鍛造により金型形状から製品に転写・成形する場合にネットシェイプと呼ぶことが多くなった。

図1 冷間鍛造と切削による歯車素材の製造コスト²⁾

図2 等速ジョイント部品（アウターレース）の冷間鍛造形状と切削仕上げ形状³⁾

*原稿受付 平成26年9月17日

**大阪大学名誉教授（神戸市東灘区御影山手4-6-15）

図3 塑性加工用のプレス

3. ネットシェイプ成形の技術課題

1990年ごろまでの精密塑性加工品の到達可能な寸法誤差は $\pm 0.05 \sim 0.1$ mmであったが、最近では ± 0.01 mmも珍しくなくなっている。一方、工作機械や加工技術の進歩により金型の製作誤差は ± 0.001 mm以下も可能になっている。以下では、高精度の金型を用いても金型成形品の精度が金型自体の精度に比べると大きく低下する原因と、その対策について説明する。

3.1 プレス機械の変形

プレス機械に加工力が加わるとフレームの弾性変形を生じる。図3(a)に示すC型プレスは、荷重が加わると口開きでスライドの傾きを生じ、精密な成形には向かない。図3(b)のストレートサイドプレスではスライドの傾きはないが、冷間鍛造プレスなどでは製品精度を上げるためフレームやコラムの剛性を上げて伸びを抑えている。

プレスをスムーズに駆動するためにスライドと案内面との間にわずかな隙間があり、偏心荷重によりスライドは案内面に非対称に接触する。機械プレスではクランクの回転運動を直線運動へ変換する際に生じる横荷重を案内面で受ける。これらにより案内面の変形を生じて成形品精度に反映されるため、金型を剛性のあるダイセットに取り付けてプレスの変形の影響を小さくするのが普通である。最近、案内面の隙間をなくした高剛性プレスが開発され⁴⁾、プレスの高精度化による製品精度向上もなされている。

3.2 工具の弾性変形

塑性加工工具も高い加工圧力を受けて弾性変形を生じるため、工具形状の変化が製品精度低下の原因になる。図4(a)のように長さ100 mmの工具鋼製パンチの端面に1 GPa圧力が加わるとき、パンチは約0.5 mm縮む⁵⁾。弾性収縮量だけ加工終了位置を下げることでこの誤差は取り除けるが、通常、 $\pm 10\%$ 程度の荷重変動があるため、製品高さは ± 0.05 mm程度変動する。図4(b)のように $\phi 30$ の円筒状の金型内部に1 GPaの加工圧力が加わると内径が0.26 mm広がり、製品精度が低下する。このため、試打ちで製品形状を測定し、金型形状を修正するが、荷重変動によるばらつきは避けられない。

パンチや金型材料を工具鋼から超硬合金に変更すると、

図4 鋼製パンチおよびコンテナに1 GPaの面圧が加わった場合の弾性変形⁵⁾

縦弾性係数が2.5~3倍になり、工具の弾性変形による製品寸法のばらつきを1/2以下にできる。わが国では、製品精度向上のために冷間鍛造工具の超硬合金化が1990年以後に進展した。

製品精度を上げるにはストロークごとの荷重変動を低減することが必要であるが、荷重変動の原因としては素材の寸法と材質のばらつき、潤滑状態のばらつきなどがある。素材寸法のばらつきを小さくするため、素材となる線・棒の直径を引抜きにより揃えたり、その切断をせん断から鋸切断に代えたりして、素材寸法の高精度化が行われている。潤滑についても、摩擦が低だけでなく、変動が小さくなるように開発がなされてきた。

3.3 加工発熱

製品精度に影響を与える他の因子として素材の塑性変形による発熱がある。素材に大きな塑性変形を与えると加工仕事が熱に変換され、製品は100~400℃程度の温度上昇を生じる。この熱が金型に伝わり金型形状が変化し、さらにプレスにも熱が伝わる。プレス自体の駆動部の発熱もあるため、プレスの運転時間経過とともにプレス構造の熱変形を生じて製品精度に影響を与える。プレスの熱変形による製品の寸法誤差は、サーボプレスではスライドの下死点位置制御をすることにより補正できる。

加工直後の製品が不均一な温度になっていると、その冷却過程で不均一熱収縮を生じる。温度が100℃上昇した一辺100 mmの鉄鋼製品を冷却すると、0.1 mm程度収縮して寸法誤差の原因となる。加工終了時の製品温度は、加工中の発熱と熱伝導により分布を生じるが、加工速度が高いほど不均一が大きい。加工終了時近辺でプレス速度を落とすと温度分布が均一に近づくため、サーボプレスにより加工速度を適切に変動させることで、生産性をあまり下げずに製品精度を向上させる試みもなされている⁶⁾⁷⁾。

4. 冷間鍛造

通常の型鍛造でネットシェイプ鍛造を実現しようとする、金型と接触している素材表面の割合を大きくして密閉に近い状態にする必要があるが、これにより加工最終段階の加工圧力が急上昇する。これでは、最終圧下位置のわずかな相違が加工力の大きな差を生じて、機械や工具の弾性変形量の変動に結びつき、精度低下の原因になる。この

図5 等速ジョイント部品（クロス）の型鍛造と閉塞鍛造⁸⁾

図6 分流鍛造の工程原理と製品⁹⁾

ため、密閉に近い最終状態でも加工圧力や加工荷重が極端に高くないように、閉塞鍛造や分流鍛造などの複動の加工軸を用いた鍛造方法が開発された。

4.1 閉塞鍛造

図5に通常の型鍛造と閉塞鍛造とを比較して示す。閉塞鍛造は素材を上下パンチで上下型間のダイキャビティに押し出す側方押し出しである⁷⁾。パンチと素材の接触面積が小さく工程中一定であるので、型鍛造に比べて最大加工力は大幅に低くなる。

閉塞鍛造は大きなバリを生じないので精密鍛造法として図中の等速ジョイント部品（クロス）のほか傘歯車など複雑形状の精密製品の冷間鍛造のため1990年代から多く使用されるようになった。この方法は上下パンチの動きとともに金型の閉め付けも必要であるため、複動多軸プレスや多軸ダイセットが開発された。

4.2 分流鍛造

密閉鍛造で歯型に材料を押し込むと加工圧力が極端に高くなるため、歯形精度が悪くなる。そこで、加工の最終段階で歯型以外の部分に自由表面を作って加工圧力を下げて変形を進め、歯型に材料を充満させる分流鍛造が利用されるようになった。

図6⁹⁾に分流の原理を利用して歯車を鍛造する工程と製品例を示す。密閉型による第1工程は加工圧力が過大にならないように歯形部が未充満の段階で変形を終了する。第2工程では中心のパンチを引き抜いて内部に空間を作り、

図7 板鍛造による歯形成¹⁰⁾

図8 板鍛造によるプリーピストン¹¹⁾

素材を上下から圧縮すると、内部空間に材料が流れるとき歯形部充満の流れも生じるため、比較的低い圧力で成形できる。実際には、1組の工具の各部を複動プレスで巧みに動かすだけで2工程を達成している。

5. 板 成 形

高精度板部品には強度増加のため一部の厚肉化が求められる。厚肉のために板面に平行に圧縮力を加えると板の座屈を生じやすいため、板プレス加工の最終段階に座屈を防ぎながら増肉する各種の板鍛造法が用いられる。

図7は厚板から深絞りによりカップを作成した後、側壁を増肉し、この部分に歯形を形成している¹⁰⁾。この場合には深絞りでカップ成形後に型内での軸方向圧縮により側壁を部分増肉し、その部分を歯型の中でさらに軸圧縮して歯形を完成している。

図7の例では側壁を厚肉化しているが、深絞り加工ではカップ側面が厚肉化するのであまり無理がない。一方、図8¹¹⁾に示すプリーピストンの事例では、中央部が厚くなっているため、深絞りのあとに逆絞り工程を加えて材料を中央に寄せて厚肉化し、その部分を板鍛造で成形しているので難易度は高い。

6. 粉 末 成 形

6.1 CNC 圧粉プレス

金属やセラミック粉末を圧縮・焼結する粉末冶金法は、自動車部品や電機・電子部品に多く採用されている。粉末冶金法では精密部品の成形が多く、焼結後の機械加工を省略するためネットシェイプ化が早くから行われていた。

図9 CNC粉末プレスによる成形工程

図10 CNCプレスにより圧粉・焼結した機械部品¹³⁾

段差がある形状の圧粉体を作成する場合に全体を一定量圧縮する通常のプレス成形では大きな密度分布を生じ、これを焼結すると大きな形状誤差になる。多軸 CNC プレス¹²⁾を用いると段差に応じて圧縮量を変化させることができ、均一な密度の圧粉体を得ることができる。図9にCNCプレスによる圧粉の工程例を、図10に製品例¹³⁾を示す。

6.2 高密度圧粉法

粉末を型内で高圧で圧縮し、一定厚さの高密度圧粉体を作製する方法が最近進歩している。鉄粉の成形で圧力を通常の粉末成形の5~10倍の2000 MPaにすると、95%程度の相対密度になり、焼結後にはほぼ100%になる。高密度圧粉では潤滑剤を粉末に混入する潤滑方法が使用できないため、150℃程度に加熱した金型キャビティに潤滑剤を噴霧する金型潤滑温間成形法¹⁴⁾が用いられている。

図11にこの方法で成形したハイブリッド車用の磁心の例¹⁵⁾を示す。この場合には、渦電流損失を抑制するため高耐熱絶縁被覆をした粉末の圧粉体を焼結して使用している。

7. お わ り に

製造のグローバル化の進展とともに、国内では高度製品を国際競争力のあるコストで生産することが求められるようになり、ネットシェイプ成形もその一手段と考えられている。その実現は既存の技術だけでは達成が困難であり、ハード面の複動サーボプレス、ソフト面のシミュレーションソフトの進歩がネットシェイプ化を支えている。ネットシェイプ成形には、素材、プレス、金型、潤滑などの技術

図11 高密度圧粉磁心（リアクトル）¹⁵⁾

を結集する必要があるが、わが国はそれらが揃っており、ネットシェイプ成形の今後の発展を期待している。

参 考 文 献

- 1) 中沢克紀：高温型鍛造システム，塑性と加工，**30**, 343 (1989) 1108.
- 2) 村松勤，今井敏博：冷間鍛造の最適化，塑性と加工，**30**, 337 (1989) 160.
- 3) H. Kudo: Manufacturing of Net or Near-Net Shape Forgings in Japan, 25th Plenary Meeting International Cold Forging Group, (1992).
- 4) 村川正夫：ファインブランピング技術の現状と将来，塑性と加工，**49**, 572 (2008) 856.
- 5) 小坂田宏造：ネットシェイプ精密鍛造技術，塑性と加工，**41**, 477 (2000) 971.
- 6) 安藤弘行：サーボプレスを活用した鍛造加工，プレス技術，**47**, 12 (2009) 27.
- 7) T. Ishikawa, T. Ishiguro, N. Yukawa and T. Goto: Control of Thermal Contraction of Aluminum Alloy for Precision Cold Forging, CIRP Annals-Manufacturing Technology, **63** (2014) 289.
- 8) 篠崎吉太郎，吉村豹治，安藤弘行：精密鍛造へのパスポートー閉塞鍛造，塑性と加工，**40**, 495 (1999) 316.
- 9) 大賀喬一，村越文夫，安藤弘行，三吉宏治，近藤一義：分流通造法を活用した歯形部品のネットシェイプ化，塑性と加工，**41**, 477 (2000) 1021.
- 10) 平澤勝芳：板鍛造による製品開発事例，プレス技術，**44**, 1 (2006) 33.
- 11) 西野創一郎，大屋邦雄，湯澤幸雄：プレス加工による板鍛造成形技術，塑性と加工，**51**, 594 (2010) 642.
- 12) 鶴英明，中川威雄：電動式6軸CNC粉末成形プレスの開発と今後の展望，生産研究，**43**, 11 (1991) 528.
- 13) 住友電工焼結事業部 HP <http://www.sei.co.jp/pmp/>
- 14) 宇波繁：鉄系粉末の高密度成形が可能な温間金型成形法，塑性と加工，**47**, 542 (2006) 179.
- 15) 杉山昌揮，山口登志也，大河内智，岸本英史，服部毅，齋藤貴伸：車載リアクトルコア用高密度・低損失圧粉磁心の開発，SOKEIZAI, **51**, 12 (2010) 25.

小坂田宏造

1970年京都大学大学院博士課程修了。工学博士。2002年日本塑性加工学会会長。2006年大阪大学名誉教授。著書は「生産加工学」，朝倉書店(2002)や「精密鍛造」日刊工業新聞社(2011)。