



水の底力

チューブ hidro フォーム (T・H・F) とは

What is Tube Hydro Forming ?

チューブ hidro フォームの基礎と応用

(株)山本水圧工業所 福村 卓巳

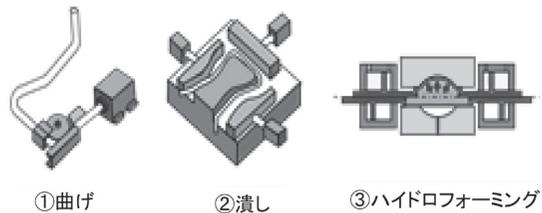
1 はじめに

hidro フォーミングは以前バルジフォーミングと呼ばれ、比較的単純形状の小物製品が成形されていた。しかし1990年代頃から炭酸ガスによる地球温暖化が問題となり、その原因の一つが自動車の排気ガスとされ、その対策のため自動車の軽量化が急務となった。一方で軽量化は安全性を損なうことに繋がるため、この相反した問題の解決手段として、パイプで重量軽減効果の大きいフレームをバルジフォーミングで成形し、閉断面効果で剛性を増すと同時に板厚を減らすことが提案された。この効果を実証するため、1994年から国際鉄鋼協会主導でULSAB (Ultra Light Steel Auto Body) プロジェクトを立ち上げられた。その結果大きな重量軽減に成功しその有効性が確かめられた。この頃からこのフォーミング技術はhidro フォーミングと呼ばれるようになり一般化している。その後この技術はFEM技術の発展に相まって幾多の自動車に採用され、飛躍的に技術が向上し今日に至っている。

2 hidro フォーミングの原理

成形原理は比較的簡単でパイプを包むように金型を設置し、パイプに水を満たし高圧を加え膨張させて、金型形状になぞらせることで行わ

れる。通常この技術は第1図のように、①パイプを曲げる、②パイプを潰す、③パイプに高圧力を加える。この三つの技術を組み合わせて成形される。



第1図 hidro フォーミング3要素技術

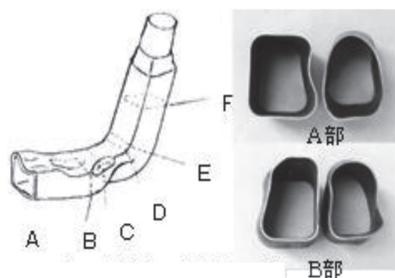


写真1 hidro フォーミング3要素成形品

3 hidro フォーミングの特徴

- ①非対称で複雑な形状の成形が可能 (写真2参照)。
- ②閉断面による剛性向上や加工硬化による強度向上が見込める (写真掲載)。

Technische Mitteilungen文献よれば製品



第2図 潰し品 (右)、THH品 (左)

にもよるが溶接構造との比較では、

- ①曲げ剛性+40%
- ②曲げ応力-30%
- ③ねじり剛性+7%
- ④ねじり応力-20%

とそれぞれ良くなるとある。

- ③成形時軸圧縮を加えるため減肉が少ない。
- ④プレス製品と比較して歩留まりが70～90%に向上。
- ⑤閉断面で拡管するため形状凍結性が良い。
- ⑥複数部品を一体化成形ができ工程数削減可能。
- ⑦同一工程内で穴あけ、バーリング、フランジング等ポストフォーミングが可能。
- ⑧雄型が不要。

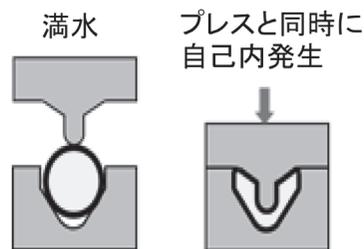
以上のように多くの特徴を有する反面、水を入れ昇圧しなければならない余分な工程があるため、サイクルタイムが遅い。又、水圧による大きな反力を受けるためプレスが大型化し設置面積が大きい欠点がある。

4

ハイドロフォーミングにはいろいろな方法があるので紹介する。

(1) 液封ハイドロフォーミング (第3図)

この方法はパイプを金型内にセットした後パイプ内に水を満たし金型を閉じると体積が変化し自己内圧が発生する。上昇し過ぎると破裂するためリリースで圧力をコントロールする。形状には制限があるが、増圧機が不要で設備費が

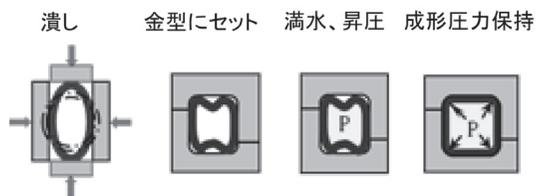


第3図 液封ハイドロフォーミング

安くなる。

(2) 高圧ハイドロフォーミング (第4図)

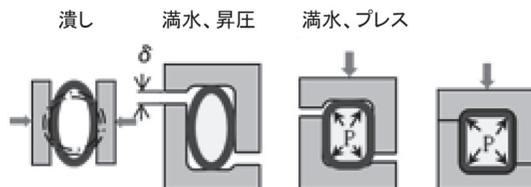
この方法は潰し加工(形状によっては同一金型内で)を行った後金型を閉じ、パイプ内を満水し高圧を加えて拡管し金型になぞわせる。拡管率が大きく取れるので複雑な形状の成形が可能で、最も多く使用されている。



第4図 高圧ハイドロフォーミング

(3) 低圧ハイドロフォーミング (第5図)

この方法は潰し加工を行った後、隙間の与えられた金型にパイプをセット満水にし、昇圧と同時に金型を閉じる。通常コーナーR成形時に最高圧力を必要とするが、この方法ではプレスの力でコーナーRを折り込むように成形されるため、比較的低い圧力で成形できる。しかし大きな拡管率は見込めず複雑な形状を成形するのは難しい。

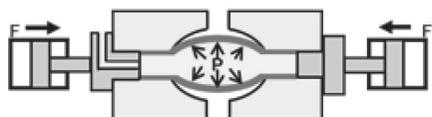


第5図 低圧ハイドロフォーミング

(4) 型寄方法**(5) 型寄法 (第6図)**

この方法は成形の手法でよく使用される。塑性加工では金型と成形品間の摩擦の軽減が鍵を握る場合が多々ある。大敵である摩擦を減らし、拡管率を大きくする時に用いられる。金型に所定の隙間を与えておき、パイプ内に圧力を加えながらパイプと金型同時に軸力を加えて閉じて行く。パイプは軸力を加えられたままキャビティ内を自由に膨張していくため拡管率を大きくすることができる。

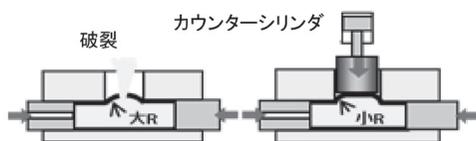
この手法で製造される代表例がフレキシブルチューブである。



第6図 型寄法

(6) カウンター (第7図)

hidroフォームにおいて破裂し易い部分に補助的に使用される装置で、膨張過程では曲率半径に応じて破裂圧力が異なるため、予め破裂し易い部分を押し込み、目的の部分を膨張させるために使用される。

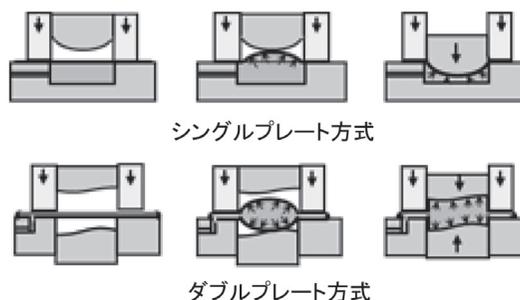


第7図 カウンターの使用

実際の hidroフォームでは、成形形状に合わせてそれぞれの方法を組み合わせることで、拡管率200%を超える製品も出始めている。

この他にパイプでは拡管率が大きく成形困難、ハイテン材料で成形が難しいなどの製品に応用される、シートメタル hidroフォームがありを紹介する。第8図はその概略図である。

シートメタル hidroフォームには、シ



第8図 シートメタル hidroフォーム

シングルメタル方式とダブルメタル方式があり、シングル方式はプレスで板をルーズに押し込んだ後、水槽内に圧力を加えて金型に触れさせることなく、自由に膨張させ周長を稼いだ後、金型でプレスし形状を転写する。ダブルメタル方式は二枚合わせのメタルの縁を閉じ二枚の間に圧力を加えて自由に膨張させた後、両面より金型でプレスして形状を転写する。いずれの場合も対向液圧方式、深絞り等と比較してより深く成形できる。写真2はフレームの成形例である。



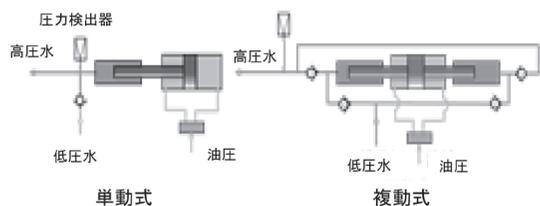
写真2 シートメタル hidroフォーム (出典：新日鉄住金ホームページ)

5 圧力発生装置

hidroフォーム装置は超高压を発生させなければならないが、疲労強度、シール、防錆などが問題となり、設計いかんで寿命に大きな影響を与えるので細心の注意が必要である。

(1) 圧力発生装置の種類

超高压発生装置は一次側油圧を二次側高压水圧に変換する増圧機が使用される。増圧機の種



第9図 増圧機の種類

類には主に単動式と複動式の2種類がある。

単動式は構造が簡単で精度が良く取り扱いし易いが、吐水量に限りがあり大型化になる。複動式は吐水量に限りはないが、息つき現象により精度が落ちる。又、逆流水を受け止められない欠点がある。管の成形においては破裂圧力と成形圧力が極めて近く高精度で制御することが求められる。又、ハイドロフォーミングは膨らむイメージで捉え、高圧水を送るだけの一方通行と思われがちだが、形状によっては素管容積より最終成形形状の方が小さい場合がある。この場合は逆流を受け止め増圧機が後退しなければならぬ。これらの理由により一般的には単動式が採用されている。

シリンダの材料は超高压に耐えるよう高強度低合金鋼が一般的に使用される。又、シリンダの構造としては、単層円筒、多層円筒、自緊円筒、鋼帯巻円筒等の方法がある。単層円筒はその他の構造に比べて最高圧力は低いが、簡単に経済的なため主流となっている。円筒の強度評価については現在国内業界筋で多少ばらつきがあるが、いずれASME規格に統一すべく進行中である。強度評価は、静的強度、動的強度(疲労強度)、破壊工学に基づく強度のいずれか小さい値を採用するよう求められている。高強度鋼は降伏比が高いため一瞬にして破壊が起る危険性があり、十分な評価が必要である。高圧ガス保安協会発行「超高压ガス設備に関する基準」によると円筒胴の肉厚、最高許容圧力は式(2)及式(3)で求められる。又、疲労強度に関しては、材料特性からせん断応力で評価され式(4)となり、その時の応力振幅は設計疲労曲線を用いる場合式(5)で求められる。

$$t = \left(\frac{D_i}{2}\right) \left[\exp \left\{ \frac{\sqrt{3}fP}{S_y + S_u} \right\} - 1 \right] \quad \dots(1)$$

$$P_{max} = \frac{2}{\sqrt{3}f} \times \frac{(S_y + S_u)}{2} \ln K \quad \dots(2)$$

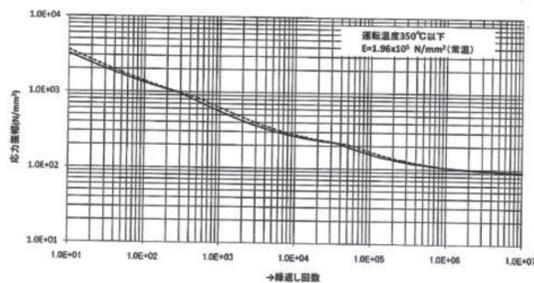
$$\tau_{max} = \frac{2K^2}{K^2 - 1} (P_u - P_\ell) \quad \dots(3)$$

$$S_a = \frac{K^2}{K^2 - 1} (P_u - P_\ell) \quad \dots(4)$$

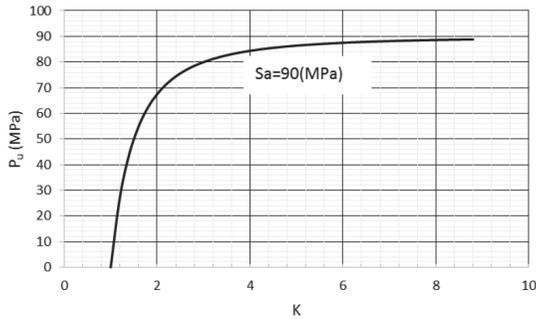
ここに

- t : パイプ肉厚 (mm)
- P_{max} : 最大許容圧力 (MPa)
- P : 設計圧力 (MPa)
- D_i : 円筒胴の内径 (mm)
- D_o : 円筒胴の外径 (mm)
- K : 円筒胴の内外径比 D_o/D_i
- f : 安全率で2.4とする
- S_y : 設計温度における材料の降伏点
又は耐力 (N/mm^2)
- S_u : 設計温度における材料の引張強さ
(N/mm^2)
- τ_{max} : 最大せん断応力 (N/mm^2)
- P_u : 運転圧力変動の最大値 (MPa)
- P_ℓ : 運転圧力変動の最小値 (MPa)

式(5)によればKの値が無大の時、せん断応力 τ_{max} は $2(P_u - P_\ell)$ に、応力振幅 S_a は $(P_u - P_\ell)$ に収束する。高強度低合金鋼の 10^7 回時の応力振



第10図 高強度低合金鋼の設計疲労曲線

第11図 応力振幅 10^7 回時の P_u と K の関係

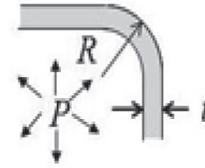
幅を設計疲労曲線で求めると $S_a=90\text{N/mm}^2$ であり、 $P_t=0$ の条件で K と P_u の関係をグラフ化すると第12図になる。この図によれば K をむやみに大きくしても大きな効果はなく、 $K=3$ 以下で計算される。又、式(4)、式(5)の関係から設計疲労曲線を用いる場合の最大許容圧力は 180MPa となる。この事から単層円筒の場合は 200MPa 以下で使用するのが良い。この値以上の圧力、回数を要求する場合は、最適疲労曲線を用いた疲労解析を行わなければならないが、この解析と、破壊工学的強度については文献が市販されているので参考にされたい。

(1) 最高圧力の決定

最高圧力は一般的にコーナー R の成形時に発生し、肉厚とコーナー R の大小で決まる。従ってコーナー R を小さくし過ぎると高圧を必要とし、装置が大型化して不経済になる。それ故一般的には肉厚の5倍程度で留めるべきだが、できるだけ型寄法で折り込み成形するようにして圧力を下げるのが良い。実際の圧力決定においては幾多の式があるが、最も簡単な式(5)を記載する。

$$P = \frac{t\sigma}{R-t} \quad \dots(5)$$

P : 成形圧力
 t : パイプ肉厚
 R : コーナー R
 σ : 塑性応力



第12図 コーナー部

(3) 増圧機容量の決定

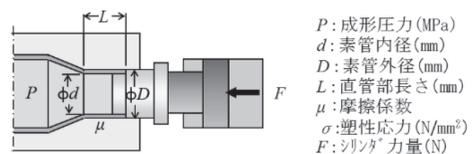
水はわずかだが圧縮性があり圧力と容積に比例して容積が小さくなる。この圧縮容積にリーク量、エア残留量、パイプの拡管容積などが加算されて、増圧機の容量が決まり式(6)で求められる。最近ポストフォーミング（ピアシング加工、バーリング加工など）を実施することが増えてきているので、十分な余裕を取る必要がある。

$$V_B = \beta P(V_E + V_P) + V_R + V_A + V_V \quad \dots(6)$$

V_B : 増圧機容積 (L)
 β : 圧縮比 4×10^{-4} (1/MPa)
 P : 設計圧力 (MPa)
 V_E : 素管容積 (L)
 V_P : 配管容積 (L)
 V_R : リーク量 (L)
 V_A : エア残留量 (L)
 V_V : 拡管量 (L)

6 軸押し装置

減肉、破裂を防ぎ且つシールを目的として、第13図の様に油圧シリンダの先端にパンチを取り付けて制御を行う。軸押し力量は塑性変形力量、成形圧力の反力、摩擦力の合計で決まり式(7)で求める。素管径が大きく、肉厚が薄

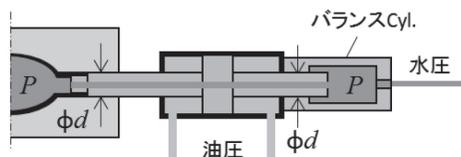


第13図 軸押しシリンダ

P : 成形圧力 (MPa)
 d : 素管内径 (mm)
 D : 素管外径 (mm)
 L : 直管部長さ (mm)
 μ : 摩擦係数
 σ : 塑性応力 (N/mm²)
 F : シリンダ力量 (N)

い場合は、成形圧反力と塑性変形力量との比率が極端に小さくなり制御精度が悪くなる。このような場合には第14図に示すようにバランスシリンダを取り付けて、反力を相殺すれば改善される。

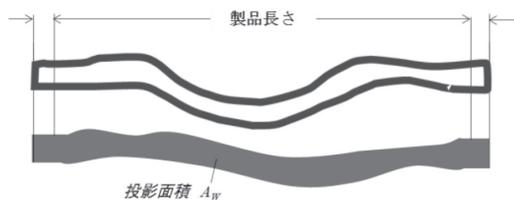
$$F = \frac{\pi}{4} \{ (D^2 - d^2) \sigma_p + d^2 P \} + dLP\mu \quad \dots (7)$$



第14図 バランスシリンダ

7 プレス機

ハイドロフォーミングの金型は第15図及び式(8)に示すようにシール部分を含めた成形品の投影面積に成形圧力を掛けて算出されるが、成形圧力が超高压であるため、大きな反力を受ける。この反力を受け止める方法に2種類ある。



第15図 加工品と投影図

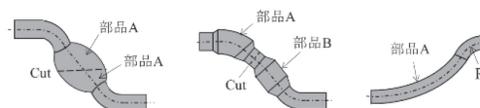
$$F = PA_w \quad \dots (8)$$

F : 水圧による反力
P : 成形圧力
A_w : 投影面積

(1) プレス方式

ハイドロフォーミング成形品は形状が複雑で、プレス軸心と通常一致しない。そのため軸押しシリンダを傾けて取り付ける場合があるので、通常汎用性の高い油圧プレスが用いられる。

軸心が極端に違う場合は、第16図のように同一部品2個つなぐ、他の部品との一体化を図る、ダミーバンドを追加して軸方向を合わせるなど行えば歩留まりも良くなり一石二鳥である。又、プレス軸心と水圧反力による荷重中心が一致しないことが多く、大きな偏心荷重を受ける場合がある。さらに金型のパーティング面が水平でない場合は分力が働き金型がずれる恐れがあるので、注意が必要である。

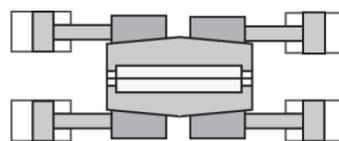


1. 同一部品2個つなぎ 2. 別部品2個つなぎ 3. ダミーバンド追加

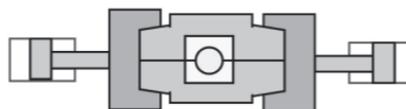
第16図 軸心を整える方法

(2) メカロック方式

プレス方式は大型プレスが必要となるが、メカロック方式は第17、18図に示すようにテーパリング又は、テーパークランプを使用して、反力を受け止める方法である。形状に制約あるもののテーパリング方式はリングが閉断面であり、金型ひずみが小さく、大きな反力を受けることができる。又、テーパークランプはテーパリングに比べれば受け止める反力は小さいが、テーパリング方式より金型面積が大きく取れる利点があり、いずれも小スペース、省エネルギー化が可能である。写真3はテーパリ



第17図 テーパーリング方式



第18図 テーパークランプ

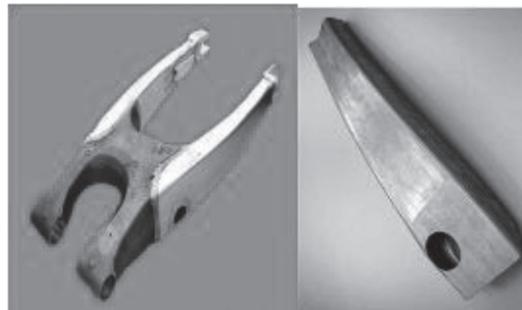
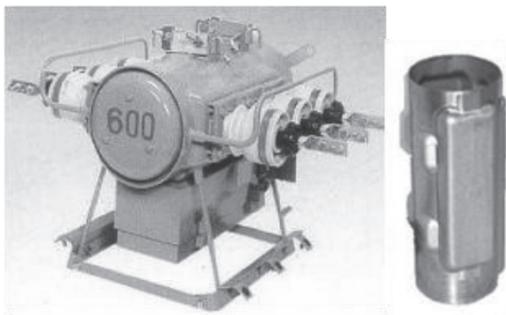
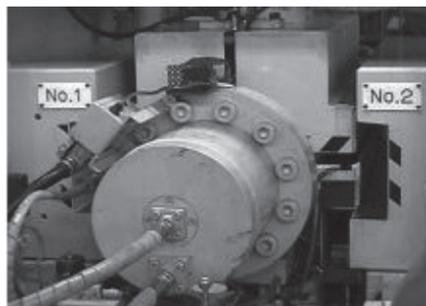
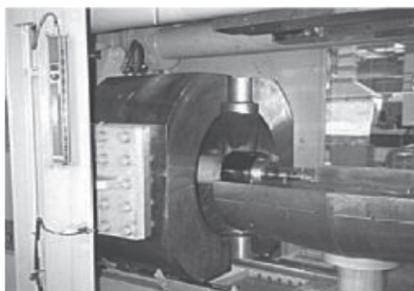


写真3 柱上開閉器

写真4 単車リアフォーク

ング方式で製作された柱上開閉器ケースと金型部、写真4は単車のリアフォークとクランプ部である。

<参考文献>

- (1) 高圧ガス保安協会KHKS 0220 (2016)
- (2) 新日鉄住金ホームページ

8 おわりに

以上、ハイドロフォーミングについて初心者向けに一般的なことを記載した。専門的知識をお持ちの方にはさぞ退屈されると思うがご容赦願いたい。

筆者紹介

福村 卓巳

(株)山本水圧工業所 営業部 顧問