

NACHI
**TECHNICAL
REPORT**
Components

Vol. **27** D1
May/2014

機能部品事業

■ 技術講座

知りたい油圧講座④

「アクチュエータ 油圧モータと油圧シリンダ」

Things to Know about Oil Hydraulic,
"Actuator hydraulic motor and cylinder"

〈キーワード〉 アクチュエータ・油圧モータ・油圧シリンダ・
回転運動・往復直線運動

油圧事業部／技術部

布村 宏隆 Hiroataka Nunomura

油圧事業部／油圧企画部

林 厚志 Atsushi Hayashi

要 旨

油圧アクチュエータは、人の力ではとうてい動かすことのできない重量物を移動させたり、押しつぶしたりするなど大きな力を必要とする場合に有効な油圧機器です。

回転運動をする油圧モータ、往復直線運動をする油圧シリンダなどが代表的です。

身近にある機械に使用されている油圧アクチュエータを紹介し、その構造と作動原理について解説します。

Abstract

A hydraulic actuator is effective when it is used for the motion that requires a large force such as the moving of a heavy material that is more than a person can handle and the crushing of a material. The typical hydraulic actuators are the hydraulic motor that has rotary movement and the hydraulic cylinder that has back-and-forth linear movement.

Use of a hydraulic actuator in the familiar machines is introduced here and the structure and operating principle are explained as well.

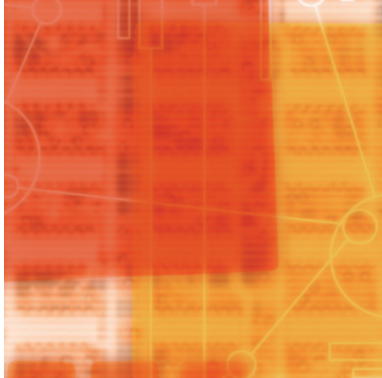
1. アクチュエータとは

アクチュエータ [actuator] とは、[actuate] (“動かす”の意) の名詞形であり、技術用語以外に意味はなく、入力されたエネルギーを伸縮、屈伸、旋回といった直線運動や回転運動の機械エネルギーへと変換する動力伝達装置であり、その駆動を機械および電氣的に制御する装置の総称となっています。実は、人間の手足も筋肉の化学エネルギーを利用したアクチュエータの一種といえ、とても複雑な動きができます。機械装置でこの人間の腕の動きを再現するためには、きわめて複雑なリンク機構や制御装置が必要であることから、生物を手本としたアクチュエータの開発も行なわれています。

私たちの生活のまわりにあるアクチュエータの多くは入力されるエネルギーとして電気を用いており、空気圧や油圧などの流体エネルギーを利用したものはあまり見かけることがありません。もっとも多いのは、電動モータとリンク機構を用いたアクチュエータで、自動車のドアロックやパワーウィンドウ、電車の自動ドアなどは日々の生活の中に身近にあるものです。一方で、エアシリンダや油圧アクチュエータは、工場内の設備や建設機械、プレス機械など、ものをつくる現場において活躍しています。こうした機械になぜ、油圧アクチュエータが使用されるのかその理由について、考えてみましょう。

油圧アクチュエータの最も代表的なものとして、直線運動を行なう油圧シリンダがあります。いわゆる注射器のようなもので、注射器は人が手で押すことで液体が押し出されますが、逆に注射器に液体を押し込めてやれば、ピストンが伸びていきます。それが、油圧シリンダの原理です。少し違うのは、高い圧力の油を送り込むことと、シリンダのピストンは両方向に可動させることができ、ロッドを押し出したり、引き込んだりする構造に一般的にはなっています。

一方、回転運動をするのが油圧モータです。油圧を送り込んで、出力軸を連続的に回転させることができます。この原理については後ほど説明します。このほかに、ある回転角度範囲を繰り返し揺動する揺動シリンダがあり、油圧アクチュエータはこれらの3つに分類することができます。この講座では、もっとも一般的な油圧モータと油圧シリンダについて解説します。



2. 油圧アクチュエータの特長

数あるアクチュエータの中から油圧アクチュエータを使用するには理由があります。

その理由を油圧アクチュエータが使用されている母機から探ってみましょう。

子供たちが大好きな遊園地には、必ずといっていいほど観覧車があります。あの大きな観覧車を回転させているのは実は油圧モータです。たとえば図1の観覧車では人が乗るゴンドラを支えている大きなホイールのそれぞれ左右に油圧モータが8個使用されています。この大きなホイールをタイヤのようなものでサンドイッチし、それを油圧モータによってゆっくり回転させることで観覧車は回っています。観覧車もさまざまなタイプがあり、すべてではありませんが、ゆっくり正確に回り、力強い動きができることが最大の特徴です。

機械式の観覧車は1893年にシカゴで開催された万国博覧会で、1889年のパリ万国博覧会で建

造されたエッフェル塔に対抗する大きな構造物としてアメリカの威信をかけて、最大の呼び物として登場しました。当時の観覧車は、中心軸に電動機を組み込んでいましたが、より大きなものを実現するために現在の構造が一般的になったようです。

ゆっくり大きな力を発生することが得意な油圧モータが使われるのにはメカブレーキを簡単に内蔵することができることや、減速機との複合モータを構成しやすいなどの理由があります。もちろん油圧モータでなくてもできますが、安全対策や安定性、制御性、静粛性など、様々な機能を容易に追加できることや性能面での優位性によって、油圧モータのほうがコンパクトになりコストも抑えられることで使われています。



図1 観覧車

油圧モータは流体エネルギーを入力として、機械エネルギー、すなわち回転トルクと回転数を出力します。他のアクチュエータに対し、油圧モータのメリットはその回転速度を無段階で自由に、かつ簡単に変えられることです。また油の入口と出口の圧力差が一定であれば回転数によらず出力トルクがほぼ一定であるという特徴を持っています。車のエンジンもある意味で回転力を得るためのモータですが、低速回転は数百回転からが一般的です。そのため、トルコン、CVTなどのトランスミッションと組み合わせて低速から高速までの制御性や操作性を得ています。電動機ではインバータモータやサーボモータの出現により低速性能が向上しましたが、油圧モータのようにゼロ回転から大きなトルクを発生できるようになっているのは高級なサーボモータだけです。

もう一つ油圧モータが使われている機械に注目してみましょう。日本では非常に良く見かける油圧ショベルにも油圧モータが使われています。(図2)

油圧ショベルにはディーゼルエンジンが搭載されていますが、このエンジンの動力で直接ショベルを動かしているわけではありません。エンジンの

動力は、油圧ポンプを回転させることにすべて使用され、油圧エネルギーにすべて変換されます。その油圧エネルギーで油圧モータや油圧シリンダを動かし、すべての動作が油圧アクチュエータで行なわれている、まさに名前の通り「油圧ショベル」なのです。

この油圧ショベルの走行には、油圧モータが使用されています。(図3) この油圧モータは油圧業界では走行モータと呼ばれており、油圧モータと減速機を一体化した特殊モータで、ドラムが回転するようになっています。このモータを機体のフレームに固定し、回転する胴体の周りにスプロケットを取り付け、そのスプロケットが履帯(いわゆるクローラー)を動かして、走行します。また、ショベルの運転者が乗車する位置(ショベルでは上部体とか、旋回体と呼びます。)を回転させているのも油圧モータと減速機を一体化した特殊モータで、こちらは出力軸が回転します。油圧モータのトルクを減速機で更に増幅することで大きな回転トルクを生み出し、硬い土を掘ったり、力強くショベルを動かしたりしています。

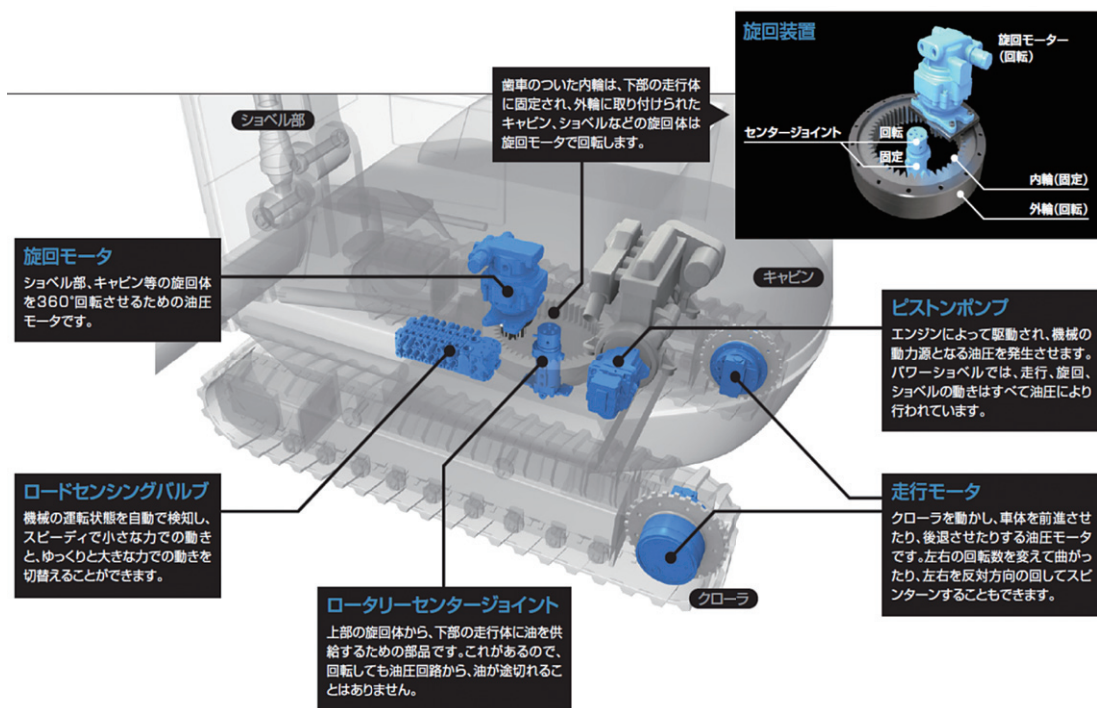


図2 ショベルイメージ

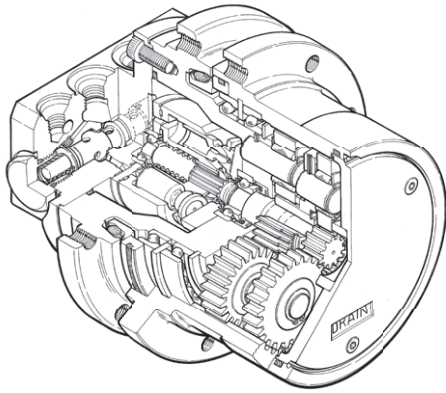


図3 走行モータ

何故油圧ショベルでは油圧モータを使用するのでしょうか。大きな理由に油圧の特徴である小型でありながら大きな出力を得られることが挙げられます。8トンの油圧ショベルは機種によっても異なりますが、3,000ccクラスのディーゼルエンジンを搭載しており、定格回転数では約200N・mのトルクを発生しています。一方8トン用のNACHIの走行モータは約11,000N・mの回転トルクを発生してドーザで土をならしたり、急斜面を登ったりと力強いショベルの動きを作り出しています。

ショベルのエンジンと油圧ポンプは、上部体に位置し、クローラーがある下部体とは相対的に回転しながら油圧をやり取りしています。この油圧をやり取りするために回転中心部に回転継ぎ手が使われています。(図4) 走行モータの供給と戻りの他、ドレン¹⁾や変速用などに使用するパイロット油圧配管など、複数の油圧がこの継ぎ手によってやり取りされています。これができるのも油圧と電気しかありません。油圧モータは、電動機よりもコンパクトなサイズで同じトルクを発生することができます。さらに、油圧モータは元々油を外部に漏らさないように厳重なシール構造を有しています。ですから、泥水の中で駆動しても問題ありません。電動機では、いろんなシールを追加しなければ漏電の元になってしまい、コストも上昇してしまいます。

またショベルの力強い動きは反面大きな衝撃、過負荷を伴うことがあります。油圧作動油は非圧縮性といいながら、多少圧縮性がありショックを多少吸収してくれます。そもそも油圧回路にはリリーフバルブと呼ばれる設定圧力以上の高圧を逃がす安全弁が設置されており、衝撃や過負荷から油圧機器を守ることができるメリットがあり、これらが、油圧ショベルなどの建設機械に、油圧モータが使用されている理由になっています。

他のアクチュエータに対して油圧モータの特長を生み出している理由として、モータが回転する場合には必ず作動油が流れていることがあります。「なんだ、当たり前じゃないか」と思われるかもしれませんが、作動油には防錆効果、潤滑効果があるために他のアクチュエータに対してメンテナンスが少なく良いのです。また作動油が流れることで、油圧モータで発生した熱はこの油が取り除いてくれるので特別な冷却を必要としません。もう最初から「液冷」なのです。電気式やエンジンでは、冷却のために、ファンやフィン、ウォータージャケットをまとわなければなりません。油圧モータにはその必要はありません。非常にシンプルな構造でヒートアップを避けることができます。油が奪った熱を油圧タンクやラジエータなどにより、別の位置でまとめて冷却することができるといった、レイアウトの自由度があることは油圧モータというより、油圧ならではの特長を生み出しています。

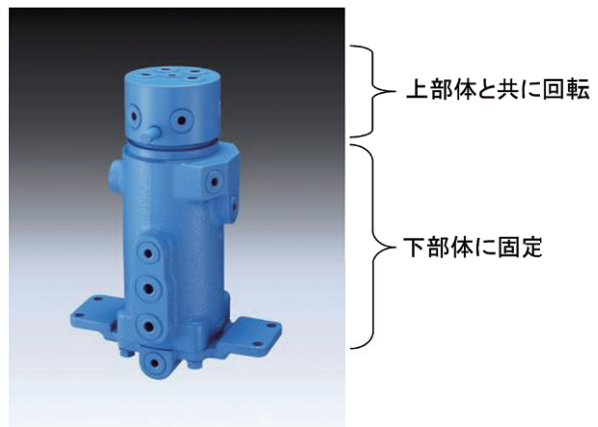


図4 ロータリーセンタージョイント

3. 油圧モータの作動

油圧モータは前述のとおり油圧エネルギーを機械エネルギーに変換します。どうやって変換しているのでしょうか。

例えば油圧ショベルによく使用される斜板式アキシャルピストンモータの場合で説明します。

アキシャルピストンモータは、シリンダバレルというレンコンのように複数の穴が開いた部品にピストンが回転軸に平行に円周上等間隔で複数本配置された構造をしています。ピストンは、一般的には多くて11本少なくて5本挿入されています。

スキーを想像してください。スキーは重力が人間に作用しているのですが、雪の積もった斜面にスキーを履いて立つとスキーと斜面の間に滑りが発生し、人間を移動させます。このとき、人間は垂直に移動しているだけでなく、重力と斜面によって水平移動しています。同じことが油圧モータの内部で起きています。シリンダバレルに勘合したピストンは、斜板と接しています。(図6) ピストンが油圧で押されるとピストンは斜板を滑り落ちようとしてシリンダバレルを回転方向に押します。この力がシリンダバレルを回転させるトルクになります。一方、斜板をすべりあがる際には、ピストンの油

は開放されていますので、シリンダバレルに押されるままにピストンは斜板を滑りあがるようになっています。このピストンに作用する油を弁板で高圧と低圧に切り換えることによって、シリンダバレルを回転させることができるのです。

このとき、ピストンが斜板の上を抵抗無く滑ることができるように静圧軸受機構を応用したり、ピストンとシリンダバレルの滑りをよくするためにシリンダバレルの穴やピストンの表面を磨いたり、表面処理したりと涙ぐましい努力を油圧メーカーは行なっています。実に精密な機械になっています。スキーでは、スキーの滑走面を磨き、雪質や雪温に併せて選定したワックスを塗り、その後削りとり平滑な滑走面に仕上げるなどの努力をして少しでも滑らせるようにしていますが、油圧モータも金属間のすべりが良くなるように、油膜がうまく形成されるよう形状を工夫し、材料を選び、表面処理を施し、面粗さをよくするなどして、油圧モータの効率が良くなるような努力が行なわれています。

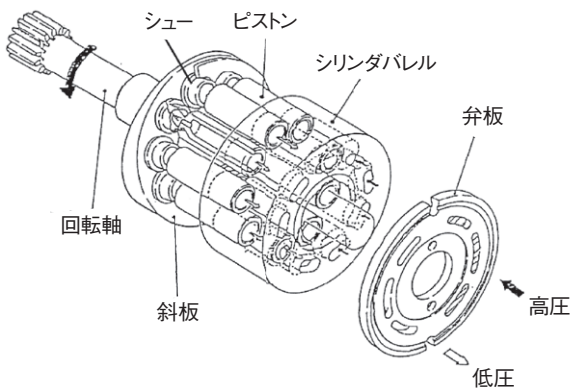
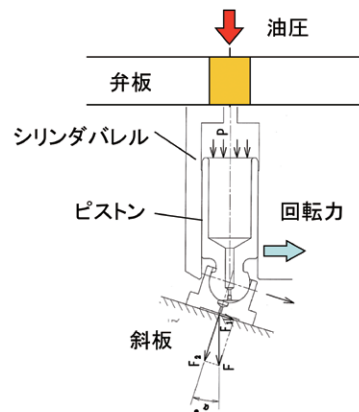


図5 モータ内部部品



油圧によって垂直方向に押されたピストンが斜板の上を滑り落ちようとすることで、水平方向の分力が生まれシリンダバレルを右方向に押す。

図6 モータの作動

4. 油圧モータの種類と選定

少しだけこの油圧モータで発生するトルクがどのように求められるのか、計算式を書いておきましょう。

油圧モータの出力軸が一回転するために必要な油の量を q_m (cm³/rev)とすると、圧力 P (MPa)の油を押し込んだときに発生するトルクは、

$$T \text{ (Nm)} = q_m \times P / 2\pi \times \eta_m$$

で求めることができます。このとき、モータの機械効率 η_m はモータの性能を現しており、0～1の値をとります。効率ですから極力100%(=1.0)に近い値が好ましいのです。

式から分かるようにトルクは圧力とモータの容量に比例して大きくなるのが分かります。使用される圧力には限界がありますので、大きなトルクを発生させるためには油圧モータ容量を大きくする必要があります。

また、ある一定の流量の油を送り込んだときの回転数は、

$$N \text{ (rpm)} = Q / q_m \times 1000 \times \eta_v$$

Q : 流量 (l/min)

q_m : モータ容量 (cm³/rev)

η_v : 容積効率 (%)

で求めることができます。

油圧モータの全効率は、容積効率と機械効率の積で求められ、

$$\eta = \eta_m \times \eta_v$$

この効率が100%に近いほど、地球にやさしいということになります。

これらの式を知っていれば、発生させるトルクや回転数に応じて、どれぐらいの容量のモータが必要なのかすぐに求めることができます。

油圧モータには、主にその構造の違いから様々な種類がありますが、この構造は油圧ポンプと類似していますので、詳しくは油圧ポンプ編で説明し、ここでは簡単に述べます。

油圧モータは、その構造から、ギヤモータ、ベーンモータ、ピストンモータに分類することができます。ピストンモータは、ピストンが回転軸周りの円筒面内に配置されたアキシャル形と、回転軸に対し直角で半径方向に配置されたラジアル形に大きく分類され、アキシャル形は構造によって斜軸式、斜板式、さらにはモータを1回転させるために必要な油の容積が固定である定容量形と容積を変えられる可変容量形に分類することができます。これらは、使用される機械や油圧システム、必要な機能に応じて選定されます。しかしながら、出荷統計によれば、油圧モータの出荷額のほとんどをピストンモータが占めています。理由として高圧での性能に優れることや、建設機械で多く用いられていることにあると考えられます。

5. 油圧シリンダ

「油圧シリンダと油がある限り、油圧がなくなることはない」と言われています。最近では、化学合成油もありますので、油圧シリンダがあれば油圧システムは不滅だということです。何故でしょう？まず、第一に構造がシンプルでコストが安いということです。第二に出力が大きく、低騒音でショックも小さいことです。第三に寿命が長いことです。直線運動をするアクチュエータは、ライバルとしてボールねじや歯車とラックを使った機械式のものがあります。クランク機構を使った機械式のものもありますが、ストロークを容易に変えることができないので除きます。ボールねじは、工作機械などで非常に多く用いられるようになりましたが、大きな推力の油圧シリンダにはまだまだ置き換えできません。さらに、ボールねじも歯車も金属同士が点や線で接触するために寿命があります。油中で、面で荷重を受け、シール部品を除けば半永久的に使用できる油圧シリンダと同じようには使用できません。

6. 油圧シリンダの構造と作動

油圧シリンダは、様々な産業機械で使用されており、動作をさせるもっとも近くにあるアクチュエータであること、また、その負荷の状態や動作範囲、及び固定方法などによって、一品一様であるなど、実に様々なものがあることが特徴です。これらすべてを紹介することはできませんので、ここでは代表的なものに限定して、その構造や作動、特徴について説明します。(図7)

油圧シリンダは、大きく単動形と複動形に分類することができます。単動形は、油の出入口が片側(キャップ側もしくはヘッド側)にしかなく、力の発生も片側一方向になり、戻り行程は自重やスプリングなどの他の負荷によって行なわれます。複動形は油の出入口がキャップ側とヘッド側の両方に設置されており両方向への力の発生が可能となっています。一般的な複動ピストン形シリンダの構造を図8に示す。

油圧シリンダの推力は、下式のように表されます。

$$\text{推力} : F (N) = A \times P / 100$$

A : 受圧面積 (cm²)

P : 圧力 (MPa)

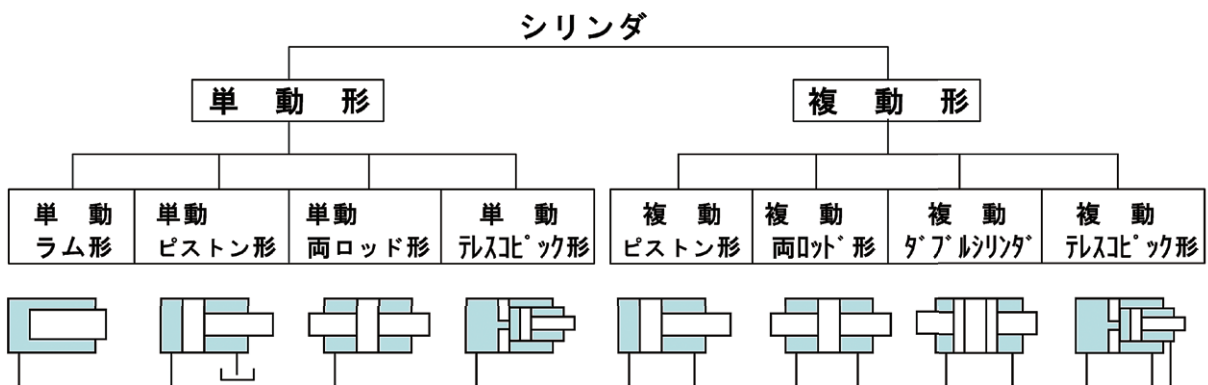


図7 油圧シリンダの種類

必要な推力（荷重）が決まれば、供給可能な圧力に応じて、受圧面積を決定します。シリンダの内径とロッド径はJIS (ISO) 規格で規定されており、各メーカーの標準品となっています。シリンダの受圧面積を大きくするか、供給圧力を高くすることで推力を上げることができますが、いたずらに受圧面積を大きくすると、シリンダ速度が低下します。シリンダ速度を確保しようとする、ポンプの吐出量を大きくしなければいけなくなり、装置のコストが上昇するので、全体のコストを睨みながらシリンダのサイズを決定しなければいけません。

最も多く使用される複動ピストン形では、キャップ側とヘッド側で受圧面積が異なり、ヘッド側がロッドの断面積分小さくなりますので、ヘッド側推力が十分であることを確認することも必要です。油圧シリンダサイズの決定には、装置（設備）の仕様を十分に把握し、負荷を解析し、油圧回路圧力を決定した上で行う必要があります。

負荷の解析では、全ストローク域において負荷の方向や慣性、負荷からの逆荷重や負荷の急激な変化や自走に注意し、それらの負荷に応じた油圧回路や油圧シリンダの選定をすることが重要です。大きな力を出力する油圧装置であるからこそ、安全性に最大の関心を払い、その挙動については、事前に十分な検討を行なうことが重要となります。

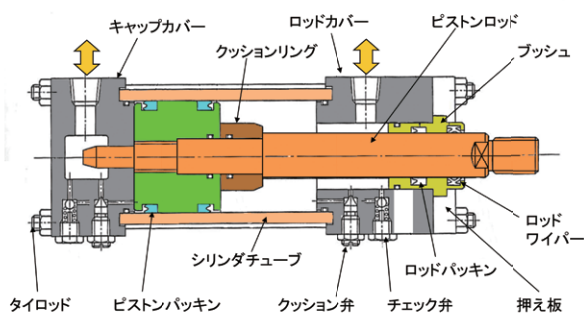


図8 油圧シリンダの構造

7. 油圧シリンダのショック

油圧シリンダには、前進及び後退のストローク最終端でピストンがカバーと衝突して機械的ショックを起こすという問題点があります。ショックは、機械装置や油圧装置の機器、配管に多大な悪影響を及ぼすため、極力低減することが重要になります。このショックをシリンダのクッション機構を設けることで軽減することができます。ほとんどの油圧シリンダメーカーでは、標準オプションとして設定しており、安価に設けることができます。クッション機構の作動説明については、図9で説明します。シリンダがストローク端に近くなるとプランジャが油路に勘合し始めます。このときヘッド側から出る油はクッションバルブの絞りを通してポート出口に向かいます。クッションバルブの絞り開度によって、シリンダを減速できるしくみになっています。一方、シリンダが伸び始める際には、チェックバルブを通過してクッションバルブの影響なくスピーディにストロークを開始することができます。

ただし、シリンダのスピードが非常に速く負荷が大きい場合に、クッション機構のみで慣性力を吸収しようとするるとシリンダ内部で瞬間的に高い圧力が発生し、パッキンやOリングなどの破損、油漏れ、シリンダチューブの膨張を引き起こすことがあります。そのような場合には、油圧回路側で予め減速させるなどの配慮が必要になります。

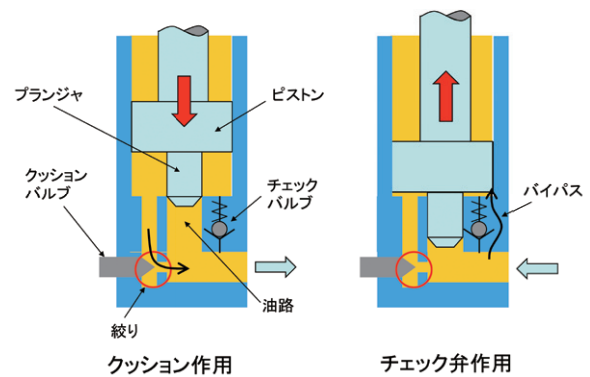


図9 クッションバルブ

8. 油圧シリンダのたわみと座屈

油圧シリンダの選定や取り付けを検討する場合に、もう一点注意することとして、シリンダロッドの自重によるたわみやシリンダの座屈現象があります。(図10、図11) これらに関する考え方や、判定基準は、油圧に関する専門書やメーカーのカタログなどが詳しいのでここでは割愛します。

油圧シリンダは、負荷に最も近く機械と直結した部位であるため、この変更は機械の設計に影響を及ぼす可能性があります。そのため、油圧システムの中でも油圧シリンダは非常に重要な部位といえます。また、油圧シリンダの動

きが悪い場合には、油圧バルブの調整など、小手先の対策では難しいこともあり、選定や設計には十分な注意が必要です。油圧アクチュエータの特徴を理解し、必要な力や動き方を検討し、最大のパフォーマンスを引き出すようにしたいものです。

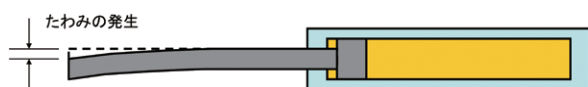


図10 ロッドのたわみ

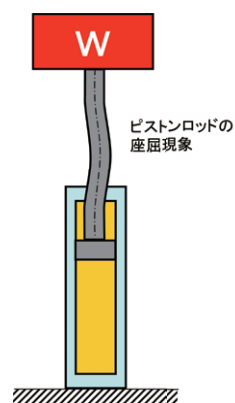


図11 シリンダの座屈現象

9. 油圧アクチュエータのこれから

油圧アクチュエータ、特に油圧モータは、そのパフォーマンスが長い間進化していない、あるいは電動モータの進化に比べて、そのスピードが遅く、パワー密度については追いつかれてきているとの報告²⁾があります。

さらにコンパクトに、さらに高圧、高速化することで、その優位性はもっともっと高くなる可能性を秘めています。現状に満足せず、常に進化し続け、油圧アクチュエータの適用範囲を広めていきたいと考えています。

参考文献

- 1) ドレン：油圧モータの高圧側から漏れた内部漏れをタンクに戻す油圧管路
- 2) 田中：フルードパワーシステム 2008 Vol.39 No.5