

## まえがき

---

油空圧システムは、航空機やロケット、産業用ロボット、土木・建設機械、自動車、船舶、工作機械、合成樹脂加工機械および半導体製造設備、製鉄設備、各種発電設備など、先端的あるいは現に国民の生活を支えている機械装置に広く用いられている。これは油空圧システムで用いられる流体の圧力エネルギーが制御しやすいことに基づいている。加えて、特に最近の進歩したマイクロエレクトロニクスを取り込み、各種機械装置の自動化、無人化あるいは高性能化を容易に実現できるからである。このため、油空圧システムは、基本的には制御しやすいエネルギー伝達システムであるが、特に空気圧システムにおいて、実用上はエネルギー伝達よりも制御のシステムとして意識されることも多い。

油空圧工学は、油空圧システムの基礎や原理をまとめた学問分野である。その実用上の歴史の古さにもかかわらず、機械工学の中に油空圧工学として一つの分野を確立したのは比較的最近のことであって、この意味からは学問的に新しい発展に富む分野といえよう。密接な関連のある分野として、流体力学（流体工学）、制御工学、潤滑（機械要素）がある。

本書は、大学での教科書あるいは将来を期待される技術者の参考書として、コンパクトな体裁ではあるが

- (1) “油圧”と“空気圧”とを“油空圧工学”として1冊にまとめたこと、
- (2) 原理ならびに基礎的事項に重点を置いて記述したこと、
- (3) 油空圧サーボ機構の記述を充実させ、特にマイクロコンピュータによる情報処理との関連に留意したこと、
- (4) 基本的な理解を促す例題や問題を加えたこと、

などが特色である。本書により、油空圧工学の要点を把握、理解してもらえ

ば、著者の幸いとするところである。

油空圧工学の応用としての油空圧システムは日々進歩するし、新しい応用分野でその特徴を発揮することになる。また、本書の教科書としての性格から、応用あるいは資料的な事項を省かざるをえなかった。この点を補うために、専門学会である(社)日本油空圧学会の会誌“油圧と空気圧”をはじめとする学会誌や商業誌、あるいは油空圧に関する便覧やハンドブックを目的に応じて参照願いたい。

本書を出版するにあたり、本シリーズ編集委員には原稿をご一覽願った。また、コロナ社編集部の方々からは、表記や体裁の統一に尽力いただいた。ここに深甚の謝意を表します。また、引用を許可された研究論文や成書の著者に対しても、謝意を表します。

昭和61年4月

著 者

# 目 次

---

## 1 油圧と空気圧

---

1.1 概 要	1
1.2 特 徴	2
1.3 用 途	3
1.4 油空圧機器の分類	3
演習問題	4

## 2 流体の性質

---

2.1 油圧作動油	5
2.2 空 気	11
演習問題	13

## 3 流体の流れ

---

3.1 静 力 学	14
3.1.1 圧 力	14
3.1.2 パスカルの原理	15
3.2 管内の流れ	15
3.2.1 連続の式	15
3.2.2 運動量の式	15
3.2.3 ベルヌーイの式	16

3.2.4	粘性流体の管内流れ	17
3.2.5	圧縮性流体の流れ	19
3.2.6	管内非定常流れ	20
3.3	すきまを通る流れ	23
3.3.1	平行平面間の非圧縮性流体の流れ	23
3.3.2	わずかに傾斜した平面間の流れ (動圧軸受)	24
3.3.3	平行円板間の流れ (静圧軸受)	26
3.4	絞りを通る流れ	27
3.4.1	非圧縮性流体の場合	27
3.4.2	圧縮性流体の場合	28
3.5	キャビテーション	29
	演習問題	31

# 4

## 油圧ポンプと油圧アクチュエータ

4.1	分類と構造	33
4.1.1	油圧ポンプ	33
4.1.2	油圧アクチュエータ	35
4.2	性能	37
4.2.1	概要	37
4.2.2	容積式ポンプ, モータの基本性能	40
4.2.3	歯車ポンプ, モータ	44
4.2.4	ペーンポンプ, モータ	44
4.2.5	ピストンポンプ, モータ	46
4.2.6	ピストンポンプ可変容量機構の特性	50
4.2.7	油圧シリンダ	53
4.3	補器	54
4.3.1	アキュムレータ	54
4.3.2	フィルタ	57
4.3.3	熱交換器	58
4.3.4	油タンク	59
4.3.5	シール (密封装置)	60
4.3.6	管, 管継手	61



演習問題	61
------	----

# 5

## 油圧制御弁

5.1 分類と構造	63
5.2 スプール弁とポペット弁	65
5.2.1 流量特性	66
5.2.2 弁体に働く流体力	67
5.2.3 スプールに働く定常流体力の低減法	69
5.2.4 スプールに働く横力	70
5.2.5 ポペットに働く流体力	72
5.2.6 スプール弁の設計法	72
5.3 圧力制御弁と流量制御弁	74
5.3.1 リリーフ弁	74
5.3.2 流量制御弁	75
5.4 方向制御弁	76
5.4.1 3ポート切換弁と4ポート切換弁	77
5.4.2 ゼロラップ形4ポート切換弁の流量特性	77
5.4.3 アンダラップ形4ポート切換弁の流量特性	80
5.5 電気-油圧制御弁	82
5.5.1 電気-油圧制御弁の機能	82
5.5.2 ソレノイドの基本的性質	84
5.5.3 高速電磁弁	86
5.5.4 比例制御弁	87
5.5.5 サーボ弁	89
演習問題	91

# 6

## 油圧サーボ機構

6.1 油圧サーボ機構とは	92
6.2 油圧サーボ機構の設計	94
6.3 アナログ式電気-油圧サーボ機構	98

6.4 デジタル式電気-油圧サーボ機構 .....	99
演習問題 .....	102

# 7

## 圧縮機と空気圧アクチュエータ

7.1 分類と構造 .....	103
7.1.1 圧縮機 .....	103
7.1.2 アクチュエータ .....	106
7.2 特 性 .....	106
7.2.1 圧縮機の基本特性 .....	106
7.2.2 空気圧モータの基本特性 .....	110
7.2.3 空気圧シリンダの特性 .....	111
7.3 補 器 類 .....	113
演習問題 .....	116

# 8

## 空気圧制御弁

8.1 分類と構造 .....	117
8.1.1 圧力制御弁 .....	118
8.1.2 流量制御弁 .....	120
8.1.3 方向制御弁 .....	120
8.2 空気圧制御弁の流量特性 .....	121
8.2.1 固定絞りの流量特性 (開口面積一定の場合) .....	121
8.2.2 可変絞りの流量特性 .....	123
8.2.3 3ポート弁の流量特性 .....	124
8.3 電気-空気圧比例制御弁の特性 .....	126
8.3.1 比例電磁式流量制御弁 .....	126
8.3.2 比例電磁式圧力制御弁 .....	128
演習問題 .....	131

# 9

## 空気圧サーボ機構

---

9.1 空気圧サーボ機構とは .....	132
9.2 空気圧シリンダの制御特性 .....	134
9.3 電気-空気圧サーボシリンダ .....	136

付 録

演習問題の略解

索 引

# 1

## 油圧と空気圧

### 1.1 概 要

油圧工学 (oil-hydraulics, hydraulics) は液体を媒体とする動力伝達に関する工学, 空気圧工学 (pneumatics) は気体を媒体とする動力伝達に関する工学である. 両者をまとめて, 油空圧工学と呼ぶ. 技術面からみた場合に, 油圧技術 (oil-hydraulics, hydraulics), 空気圧技術 (pneumatics) あるいは油空圧技術と呼ぶ. 日常的には, 単に“油圧”または“空気圧”ということが多い. 液体としては鉱油が, 気体としては空気が主であるため, “油”と“空気”の語が, また媒体である流体に中間的に蓄えられるエネルギーの形態が, おもに圧力エネルギーであるため, “圧”の語が複合されて, 工学分野の名称となったと考えられる.

動力伝達システムとしてみると, 基本構成は図 1.1 になる. 原動機からの機械的エネルギーをポンプ (油圧の場合), 圧縮機 (空気圧の場合) により流体の圧力エネルギーに変換し, バルブ

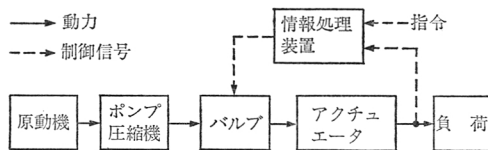


図 1.1 油空圧システムの基本構成

による制御・調節を経て, アクチュエータで再び機械的エネルギーに変換し, 目的とする作業を行う (負荷を駆動する) ことになる. 原動機は固有の特性をもつし, 負荷として要求され

る作業は決まっている。トルク-角速度平面（力-速度平面）に表示すると明らかかなように、両者の特性は一般に合致しないので、ここに種々の伝動装置が必要となってくる。流体のエネルギーは、バルブによって制御できるし、圧力を高くすることで装置を小形にできる。

図では、指令（例えば角速度の設定値）とセンサから得られるアクチュエータの状態（この例では角速度）との差に基づいて、バルブを操作し、指令の設定値にアクチュエータの状態を合致させる制御方式となっている。状態の検出、指令の設定から演算などの情報処理、さらに制御信号の伝達までは、電子回路によるのが便利であるので、バルブとして電気信号によって操作されるものが多い。なお、図では、制御信号は中央のバルブにのみ伝えられているが、高度化したシステムにおいては、ポンプ（圧縮機）、アクチュエータはもちろん、原動機までも電気信号に基づく制御の対象となる。

## 1.2 特 徴

油圧システムと空気圧システムとに分けて、それぞれの長所と短所を挙げる。

### 〔1〕 油圧システム

#### i) 長所

○無段変速が容易に行え、変速の範囲の広いこと。すなわち、力やトルクを広い範囲にわたって容易に調整できる。

○制御性のよいこと。すなわち、力、速度、位置などを正確に高い応答速度で制御できる。特に 電子的情報処理と組み合わせると、優れた特性が得られる。

○作動が確実に操作性のよいこと。

#### ii) 短所

○油漏れのあること（すなわち、安価に漏れを防止することが困難である）。

○動力伝達媒体である油（作動油と呼ぶ）の保守、管理が面倒であること。

特に作動油中の異物が油圧システムの信頼性や機器の寿命に大きく影響する。

## 〔2〕 空気圧システム

### i) 長所

- 自動化、省力化に容易（安価）に適用できること。
- 防爆性であること。
- 清浄な環境内でも使用できること、また、気体の圧縮性に基づく緩衝機能のあること。

### ii) 短所

- 気体の処理を要すること（異物、水分など）。
- 性能面で油圧式や電気式に劣ること。

## 1.3 用 途

油圧システムは、その特長が機械装置の自動化、高性能化、大容量化、小形軽量化などにかされるために、主動力の伝達機構や操作・制御機構などに広く用いられている。主要な用途として、航空機・ロケット、土木・建設機械、船舶、工作機械、合成樹脂加工機械、自動車などがある。

空気圧システムは、各種機械装置の自動化、無人化に広く採用されている。油圧システムと異なり、使用分野として目立つ分野がなく、満遍無く用いられる。

## 1.4 油空圧機器の分類

油空圧機器と周辺機器の組合せとして、油空圧システムが構成されるが、油空圧機器はその機能に基づいて、以下のように三つに分類される。

〔1〕 エネルギー変換用機器      機械的エネルギーと流体の圧力エネルギーとの間の変換を担当する機器であって、ポンプ（油圧）、圧縮機（空気圧）、アクチュエータが属する。圧力エネルギーを機械的エネルギーに変換するアクチ

モータは、直線往復運動を行うシリンダと、連続回転運動を行うモータとに大別される。

〔2〕 エネルギー制御用機器 流体の圧力エネルギーを調節・制御するバルブが属する。制御対象となる流体量としては、圧力、流量および流れの方向であり、それぞれをつかさどるバルブを圧力制御弁、流量制御弁および方向制御弁と総称する。

〔3〕 エネルギー伝導用機器 流体を導く管や管継手、流体を蓄えるタンク、流体自体の調整を行うためのフィルタ、クーラなど、いわゆる付属機器が属する。

### 演 習 問 題

〔1〕 工作機械、自動車などにおいて、伝動装置が必要となる理由を具体的に調べよ。

〔2〕 “油圧”や“空気圧”に比べて、歯車やベルトを用いる機械式駆動、電動機を用いる電気駆動の特徴を調べよ。

# 2

## 流体の性質

### 2.1 油圧作動油

〔1〕 概 説 油圧システムに用いる流体を、油圧作動油あるいは単に作動油 (hydraulic fluid) と呼ぶ。油圧作動油は、圧力エネルギーの伝達媒体であって液体であることを前提とし、油圧システムを構成する機器の材料と良好な適合性などを必要とする。主要な要求項目を表 2.1 に示す。

表 2.1 油圧作動油に要求される性質

- 
1. 液体であること
  2. 適度の粘性があり、広い温度範囲にわたって粘度変化の小さいこと
  3. 良好な潤滑特性のあること
  4. 寿命の長いこと
  5. 体積弾性係数の大きいこと
  6. 安価で入手しやすいこと
  7. 難燃性であること
  8. キャビテーション壊食の小さいこと
  9. 比熱，熱伝導率の大きいこと
  10. 廃液処理の容易なこと
- 

原油を高度に精製し、防錆剤，酸化防止剤などの添加剤を加えたものが石油系作動油であり、これらの要求の大部分を満たしているため、油圧作動油として最も広く用いられている。石油系作動油には添加剤により、潤滑特性や粘度特性の改善あるいは長寿命化を図ったものがある。



耐火性を重視する用途には、石油系作動油は使用できない。このため、水・グリコール溶液、油中水滴形 (W/O) エマルジョン、水中油滴形 (O/W) エマルジョン、りん酸エステルなど、燃えないあるいは燃えにくい作動油が用いられる。これらの中には、機器材料やシール材との適合性に問題のあるもの、潤滑特性に劣るもの、キャビテーション壊食の著しいものなどがあり、使用に際して注意が必要となる。

〔2〕 密 度 油圧作動油の密度を表 2.2 に示す。

表 2.2 油圧作動油の密度  
(15°C, 大気圧下の概略値)

種 類	密 度 [kg/m <sup>3</sup> ]
石油系作動油	870~890
水・グリコール	1060~1080
W/O エマルジョン	920~940
りん酸エステル	1130~1150

〔3〕 体積弾性係数 動特性を問題とする油圧システムや高圧下で使用される油圧システムでは、油圧作動油を圧縮性流体として取り扱うことが必要となる。圧縮されにくさを表す物性値として、式 (2.1) で定義される体積弾性係数 (bulk modulus)  $K$  を用いる。

$$K = -V \frac{dp}{dV} \quad (2.1)$$

ここに、 $p$ : 圧力,  $V$ : 体積である。密度  $\rho$  を用いて書き直すと

$$K = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (2.2)$$

$K$  の逆数は圧縮されやすさを表し、圧縮率 (compressibility) と呼ばれる。

液体中を伝わる音の速さ、すなわち音速  $a$  は

$$a = \sqrt{K/\rho} \quad (2.3)$$

で与えられる。高い応答性を得る目的では、音速の大きいことが必要で、このため体積弾性係数の大きい作動油が望ましい。

1) 火災上の安全性や経済性などを追求した、水を主成分とする作動油を高含水作動液あるいは単に作動液と呼ぶことがある。

# 索 引

## 【A】

油タンク 59  
 アキシアルピストンポンプ 34  
 アクチュエータ 106  
   空気圧—— 103  
   揺動形—— 35, 106  
   油 圧—— 35  
 アクキュムレータ 54  
   ブラダ形—— 55  
 アンダラップ弁 77, 80  
 安全弁 118  
 圧縮機 103  
   回転—— 104  
   往復—— 104  
 圧縮率 6  
 圧縮仕事 108  
 圧 力 14  
   ——ゲイン 80  
   ——補償制御 39  
   ——流量係数 80, 128  
   ——損失(管路系の) 19  
 圧力制御弁 63  
   比例電磁式——88, 128

## 【B】

バランスピストン形  
   リリーフ弁 75  
 ベーンポンプ 34, 44  
 弁 体 66  
 ベルヌーイの式 16  
 膨張形消音器 109  
 ブラダ形アクキュムレータ 55  
 ブリッジ回路 77

## 【D】

断熱膨張効率 110  
 電気-空気圧比例制御弁 126  
 電気-空気圧サーボ機構 133  
 電気-空気圧  
   サーボシリンダ 136  
 電気-油圧式サーボ機構 93, 94  
 伝ば定数 21  
 電磁弁 82, 83  
   高速—— 86  
 動圧軸受 24  
 動粘度 7  
 動作圧力 95

## 【E】

エアドライヤ 113, 114  
 エネルギー伝導用機器 4  
 エネルギー変換用機器 3  
 エネルギー保存則 16  
 エネルギー制御用機器 4  
 円筒絞り 30

## 【F】

フィルタ 57, 115  
   ——エレメント 57

## 【G】

ガスケット 60  
 減圧弁 119

## 【H】

波動方程式 20

ハーゲン・ポアズイユの式 17  
 歯車ポンプ 34, 44  
 ハイドロチェッカ 139  
 吐出し空気温度 108  
 吐出し消音器 109  
 変調率 100  
 比 熱 8  
 非ニュートン流体 7  
 比例電磁式圧力制御弁 88, 128  
 比例電磁式流量制御弁 126  
 比例制御弁 82, 83, 87  
   電気-空気圧—— 126  
 比例ソレノイド 83, 88  
   ——の磁束線図 126  
 非定常流体力 69  
 方向制御弁 63, 76  
 飽和蒸気圧 9  
 負荷流量 79  
 複動シリンダ 36  
 噴流の噴出角 68  
 フラップ 39  
 標準空気 12

## 【I】

引火点 8

## 【K】

可変容量形ポンプ 35  
 可変容量機構 50  
 回転圧縮機 104  
 干渉形消音器 109  
 渦流ランド方式 70  
 片ロッドシリンダ 36  
 気泡核 29  
 機械-空気圧サーボ機構 133

機械-油圧式サーボ機構 92  
 気体の物性値 11  
 基準状態の空気 12  
 高速電磁弁 86  
 管 61  
 —継手 61  
 管摩擦係数 18  
 空気圧アクチュエータ 103  
 空気圧工学 1  
 空気圧モータ 106  
 空気圧サーボ機構 132  
 空気圧制御弁 117  
 —の流量特性 121  
 空気圧シリンダ 111  
 空気圧システム 3  
 クラッキング圧力 75  
 キャビテーション 29  
 —係数 31  
 供給圧力 94  
 共鳴形消音器 109  
 吸音形消音器 109

## 【M】

メータアウト方式 120  
 メータイン方式 120  
 密封装置 60  
 漏れ流量 41  
 無膨張効率 110  
 ムーディ線図 18  
 脈動 54

## 【N】

粘度 7, 12  
 —指数 8  
 粘性底層 18  
 熱伝導率 8  
 熱交換器 58  
 2 段式サーボ弁 90  
 ノズル 89  
 —フラップ弁 118  
 ニュートン流体 7

## 【O】

オリング 60  
 オーバライド現象 119  
 オーバライド特性 75  
 オーバラップ弁 78  
 往復圧縮機 104  
 オイルシール 60  
 温度-動粘度図表 7  
 音速 6, 12  
 汚染 10, 12  
 —の影響 38  
 作動油の— 10  
 作動気体の— 12  
 押しのけ容積 35

## 【P】

p-v 線図 106  
 パッキン 60  
 パルス幅変調 87  
 —制御 100  
 —法 93  
 パスカルの原理 15  
 ピストンポンプ 46  
 アキシアル— 34  
 ラジアル— 34  
 ポンプ効率 41  
 ポンプ制御 39  
 ポンプトルク効率 41  
 ポンプ容積効率 41  
 ポペット弁 64, 65, 118  
 —の流量係数 67  
 プランジャ形ソレノイド 85

## 【R】

ランド 70  
 ラップ量 77  
 ラジアルピストンポンプ 34  
 冷却器 58, 113, 114  
 連続の式 15  
 臨界状態 28  
 リップ形パッキン 60  
 リーフ弁 64, 74, 119

バランスピストン形— 75

理論体積効率 106  
 ロードセンシング制御 39  
 ルブリケータ 113, 116  
 両ロッドシリンダ 36  
 流量 15  
 —ゲイン 80, 128  
 —変動率 48  
 —制御弁 63, 75  
 —調整弁 63, 75  
 流量係数 66  
 圧力— 80, 128  
 ポペット弁の— 67  
 スプール弁の— 67  
 流量特性 66, 77, 81, 121  
 アンダラップ弁の— 81  
 空気圧制御弁の— 121  
 ポート切換弁の— 77  
 絞りの— 66  
 流体固着現象 70  
 流体力 67, 72  
 非定常— 69  
 定常— 67

## 【S】

サーボ弁 82, 83, 89  
 2 段式— 90  
 サーボ機構 92, 133  
 電気-空気圧— 133  
 電気-油圧式— 93, 94  
 機械-空気圧— 133  
 機械-油圧式— 92  
 空気圧— 132  
 油圧— 92  
 サーボピストン 51  
 サージ 54  
 作動油 5  
 酸化安定性 9  
 3 ポート切換弁 77  
 静圧軸受 26  
 石油系作動油 5  
 指圧線図 106  
 絞りの流量特性 66  
 シール 60

シート弁 64  
 湿り空気 11  
 シリンダのクッション機構 53  
 シリンダ出力 53  
 質量流量 15  
 自然発火温度 8  
 速度分布 17  
 速度係数 66  
 損失トルク 41  
 騒音 37  
 ソレノイド 84  
   比 例—— 83, 88  
   プランジャ形—— 85  
   磁気漏えい形—— 85  
 操作モーメント 50  
 滑り弁 64  
 推力係数 53  
 スクイズ形パッキン 60  
 スプール弁 64, 65, 118  
   ——の流量係数 67  
 消音器 109  
 縮流係数 66

〔T〕

体積弾性係数 6

体積効率 41  
 体積流量 15  
 多位置形シリンダ 36  
 単動シリンダ 36  
 定圧比熱 112  
 定動力制御 39  
 抵抗形消音器 109  
 定トルク制御 39  
 定容比熱 112  
 定常流体力 67  
   ——の低減法 69  
 テレスコープ形シリンダ 36  
 蓄圧器 54  
 特性インピーダンス 21  
 トルクモータ 83, 89  
 閉じ込み現象 48  
 透磁率 85

〔U〕

運動量の式 16

〔Y〕

揺動形アクチュエータ 35, 106  
 4ポート切換弁 77

容積式モータの性能 43  
 容積式ポンプ 33  
   ——の性能 40  
 油圧アクチュエータ 35  
 油圧工学 1  
 油圧モータ 35, 36  
 油圧ポンプ 33  
 油圧サーボ機構 92  
 油圧作動油 5  
 油圧シリンダ 36  
 油圧システム 2  
 油空圧工学 1

〔Z〕

ゼロラップ弁 77  
 絶対ろ過度 57  
 磁界の強さ 85  
 磁化特性 85  
 磁気漏えい形ソレノイド 85  
 磁束密度 85

—著者略歴—

- 山口 惇  
1959年 横浜国立大学卒業  
1964年 東京大学大学院博士課程修了  
1964年 工学博士  
1977年 横浜国立大学教授  
2002年 横浜国立大学名誉教授
- 田中 裕久  
1970年 横浜国立大学卒業  
1975年 東京大学大学院博士課程修了  
1975年 工学博士  
1978年 東京大学講師  
1979年 横浜国立大学助教授  
1989年 横浜国立大学教授 現在に至る

油空圧工学

Oil-hydraulics and Pneumatics

© Atsushi Yamaguchi, Hirohisa Tanaka 1986

1986年 6月 10日 初版第1刷発行  
2003年 7月 30日 初版第10刷発行

検印省略

著者 山口 惇  
横浜市磯子区磯子台 7-19  
田中 裕久  
東京都目黒区大岡山 1-15-3  
発行者 株式会社 コロナ社  
代表者 牛来辰巳  
印刷所 富士美術印刷株式会社

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

電話 (03) 3941-3131 (代) 振替 00140-8-14844

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 4-339-04050-9

(清文社, 愛千製本所)

Printed in Japan



無断複写・転載を禁ずる

落丁・乱丁本はお取替いたします