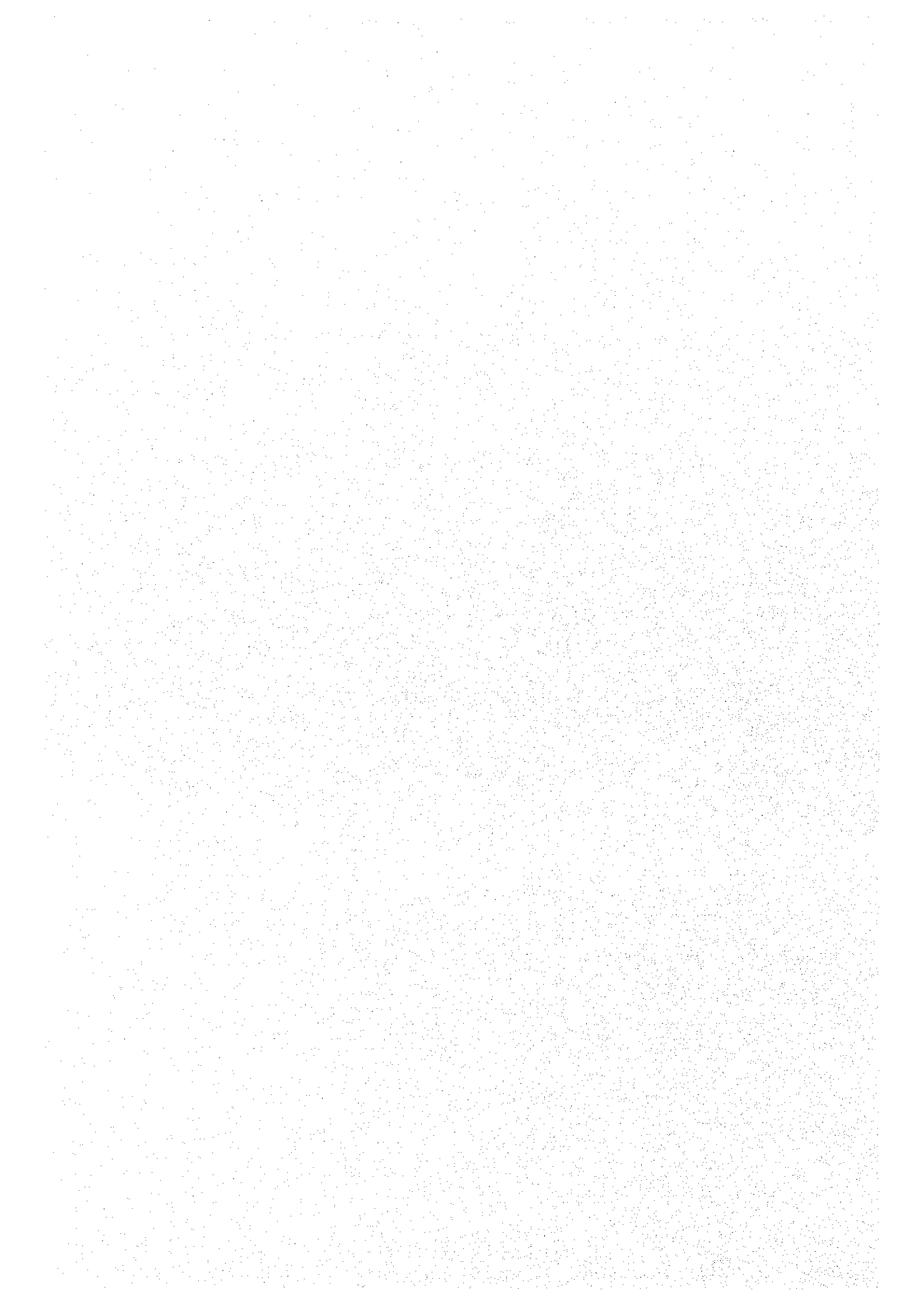


7. エアコンプレッサの省エネルギー



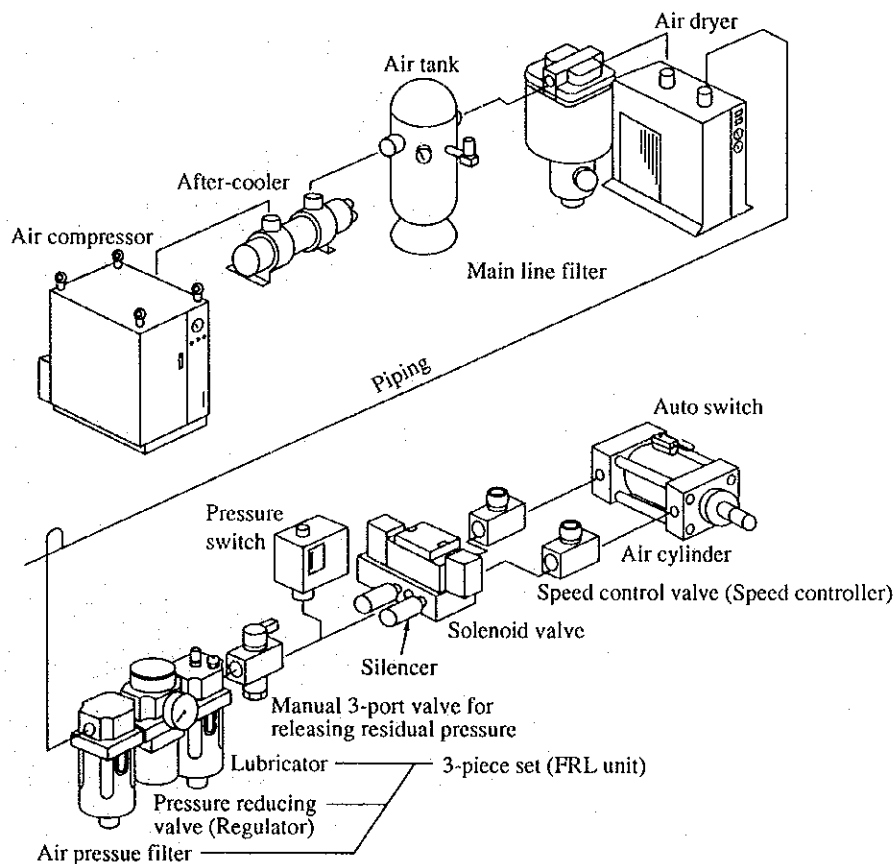
7. エアコンプレッサの省エネルギー

7.1 空気圧システム

7.1.1 空気圧システムの構成

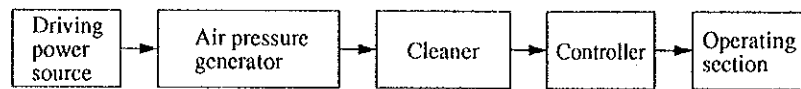
空気圧システムは、圧縮機により得られた圧縮空気を配管により輸送し、各種制御弁により制御調整し、アクチュエータに供給することにより、その出力を負荷側の要求に適合した機械動力として取り出す一つの動力伝達システムである。Figure 7.1 に代表的な空気圧システムの構成を示す。

Figure 7.1 Configuration Example of Pneumatic System



これを機能別に分類すると Figure 7.2 のように表すことができる。

Figure 7.2 Air Pressure System Flow



(1) 動力源

電動機あるいは内燃機関により電気、燃料などを機械的動力に変換する。

(2) 空気圧発生部

圧縮空気を生成し、それを空気圧ラインへ安定供給する。

- ・ 空 気 圧 縮 機 ……大気を圧縮して圧縮空気を生成する。
- ・ アフタークーラ ……圧縮機から吐出された高温空気 (断熱圧縮による) を冷却し、水分を分離する。
- ・ 空 気 タ ン ク ……圧縮空気を蓄積し、圧縮機からの脈動の除去、下流の空気圧ラインの空気消費量の変動を吸収、除去する。

(3) 空気清浄化部

圧縮空気使用機器およびその使用目的に応じて圧縮空気の質を整える。

- ・ ドレン分離器・排出器 ……アフタークーラの出口やタンクの下部に取り付けて、分離された水分や油分を排出する。
- ・ フ ィ ル タ ……圧縮空気に含まれる配管の錆、固形異物、水・油分を除去する。上流から下流にゆくに従い、機器の要求に従い、濾過による空気清浄度を上げて行くのが一般である。
- ・ ミストセパレータ ……圧縮空気に含まれる微細な油粒子を捕捉する。
- ・ ドライヤ (除湿器) ……圧縮空気に含まれる湿分を除去し、乾燥度を高める。

(4) 制御部

圧縮空気の圧力、流量、流れの方向を調整・制御し、アクチュエータを駆動する。

- ・減圧弁……使用目的に応じた低い圧力に設定し、下流の流量変化に対して安定した圧力の圧縮空気を供給する。
- ・ルブリケータ……下流の弁やアクチュエータのしゅうどう部を潤滑するための潤滑油を圧縮空気に送り込む機器である。無給油システムでは不要である。
- ・方向制御弁……圧縮空気の流れ方向を切り替えてアクチュエータを駆動する弁である。
- ・速度制御弁……方向制御弁とアクチュエータの配管途中に取り付け、絞り弁機構で圧縮空気の流量を調整し、アクチュエータの作動速度を制御する。

(5) 作動部

圧縮空気のエネルギーを変位や速度の機械的エネルギーに変換して仕事を行うアクチュエータである。空気圧シリンダ、ロータリアクチュエータなど用途に合わせ種類・サイズが非常に多い。

7.1.2 空気圧システムの特徴

空気圧システムは圧縮性のある作動流体を使用することに特徴がある。

- (1) 空気タンクに圧縮空気を蓄積できるため、負荷の性質によっては、高速作動や短時間に高出力を得ることが出来る。また出力の維持が容易、停電時の非常運転が可能、サージが発生しないなどの特徴がある。一方、圧縮流体による制御は、位置決め、応答性にやや問題がある。
- (2) 配管や装置化が容易であり、排気、外部漏れなどによる騒音や油気も必要に応じて容易に防止可能なため、利用分野が広い。

- (3) 過負荷に対する安全性や、速度制御、シーケンス制御などが、比較的簡単な制御弁により容易に得られる。
- (4) 制御信号の伝達特性は電気や油圧に比較してやや劣るが、温度、脈動、引火などの点で問題のある環境に対する適応性が高い。
- (5) 1カ所の空気源から配管系統を巡らせることにより広範囲に供給することが可能であり、動力源の集約が出来る。
- (6) 空気圧駆動の工具は、電動工具に比べて小型であるため、機械の組立ラインの手工具に広く使用されている。しかし、電動工具は空気圧駆動機器に比べ省エネルギー効果が高いため、最近では電動工具の使用が拡大している。

7.1.3 空気圧システムの省エネルギーのポイント

空気圧システムの省エネルギーを考える場合、次の3点が基本となる。

- (1) 空気圧発生部における電気動力 (内燃力) から空気動力への変換の効率化
- (2) 空気圧伝達系における消費エネルギーの削減
- (3) アクチュエータにおける空気動力から機械動力への変換の効率化

7.2 圧縮空気の性質

7.2.1 用語

(1) 標準大気

海面からの高さの関数で表される温度、圧力および密度の大気を標準大気という。

(2) 標準空気

温度 20℃、絶対圧力 101.3 kPa、相対湿度 65 %の湿り空気を標準空気という。

(3) 標準状態

温度 20℃、絶対圧力 101.3 kPa、相対湿度 65 %の空気の状態を標準状態という。
空気圧システムでは圧縮空気の量を標準状態に換算した体積で表す。

(4) 基準状態

温度 0 °C、絶対圧力 101.3 kPa での乾燥気体の状態を基準状態という。

(5) 比熱比

比熱比 k は定圧比熱を C_p 、定容比熱を C_v とすると次式で表される。

$$k = C_p / C_v$$

空気の場合には $k = 1.4$ の数値が使用されている。

(6) 断熱変化

比熱比を k とした場合 $[P \cdot V^k = \text{一定}]$ となる状態変化を断熱変化という。

(7) ポリトロップ変化

$[P \cdot V^n = \text{一定}]$ となる状態変化をポリトロップ変化という。

(8) ポリトロップ指数

ポリトロップ変化における指数 “ n ” をポリトロップ指数という。

(9) 等温変化

$P \cdot V = \text{一定}$ となる状態変化を等温変化という。

(10) 露点

水蒸気を含む気体を圧力一定のまま冷却するとき、含まれている水蒸気が飽和する温度

7.2.2 空気中の水分

空気中に気体の状態で存在する水分を水蒸気といい、水蒸気を含む空気を湿り空気という。また水分を全く含まない空気を乾き空気という。空気中の水分は凝縮して水滴になると、配管や機器に錆を生じたり、機器の作動不良を起こしたり、また塗料吹き付け時に塗装面にむらを発生させたりする悪影響を与える。機器の作動不良は空気漏れを発生させ、圧縮空気の消費量を増加させ、エネルギー損失を引き起こす。

したがって、水分の除去は空気圧システム保守上の重要なテーマである。

7.3 圧縮空気の流れ

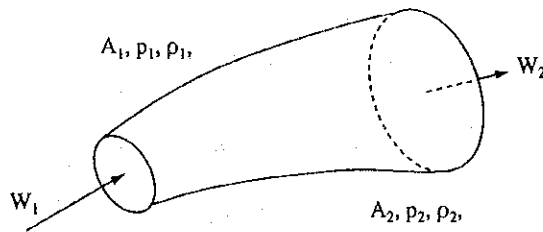
7.3.1 連続の式

流路の任意の断面積を A 、圧縮空気の速度を w 、密度を ρ とすると、定常流れにおける圧縮空気の質量流量 q は質量保存の法則より、

$$q = \rho_1 A_1 w_1 = \rho_2 A_2 w_2$$

となる。添字 1、2 は図の流路の二つの断面を示す。

Figure 7.3 Flow Route



7.3.2 圧縮性流体のエネルギー式

圧縮空気の流れは、速度を w 、圧力を P 、密度を ρ 、比熱比を k とすると、定常流れにおいて、

$$\frac{w^2}{2} + \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P}{\rho} = \text{一定}$$

が成立する。この式をベルヌーイの式という。

第 1 項を比速度エネルギー、第 2 項を比圧力エネルギーといい、Figure 7.3 に示す流路に沿って、単位質量当たりのエネルギーの総和は一定であることを示す。

7.3.3 オリフィスを通る流れ

Figure 7.4 に示すように管路内に設けられた狭い断面積のオリフィスを圧縮空気が流

れる場合、Figure 7.5 に示すように、下流側と上流側の圧力の比 P_2 / P_1 が 1 の時の質量流量が 0 から圧力比を小さくするにつれて質量流量は増大するが、臨界圧力比 $P_2 / P_1 = 0.528$ になると流速は音速に達し、以後圧力比が 0 まで質量流量は一定となる。この質量流量が飽和する流れをチョーク流れあるいは閉塞流れという。また、臨界圧力比が 0.528 以上の音速に達しない流れを亜音速流れという。

Figure 7.4 Orifice

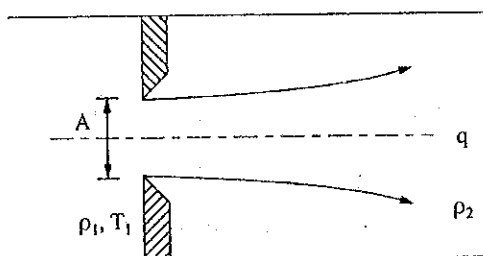
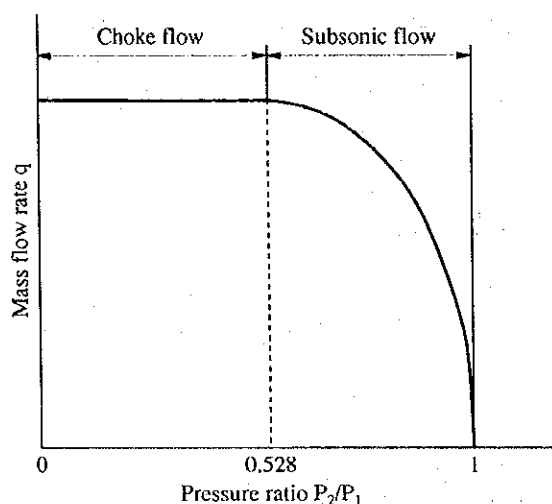


Figure 7.5 Rate of the Flow Passing through the Orifice



オリフィスを通過する圧縮空気の流量はこのように二つの領域に分けられる。

7.3.4 実用流量計算式

空気圧システムにおけるバルブや配管を通過する圧縮空気の流量を計算する実用計算式の一例を次に挙げる。

(1) 亜音速流れのとき

$$Q = 235 \times S \times \sqrt{(P_1 - P_2)(P_2 + 0.1013)} \times \sqrt{\frac{293}{273 + t}}$$

(2) チョーク流れのとき

$$Q = 117 \times S \times (P_1 + 0.1013) \times \sqrt{\frac{293}{273 + t}}$$

ここで、

Q : 圧縮空気の流量 (l/min) (標準空気)

S : 有効断面積 (mm²)

P₁ : 上流側圧力 (MPa [gauge])

P₂ : 下流側圧力 (MPa [gauge])

t : 空気温度 (°C)

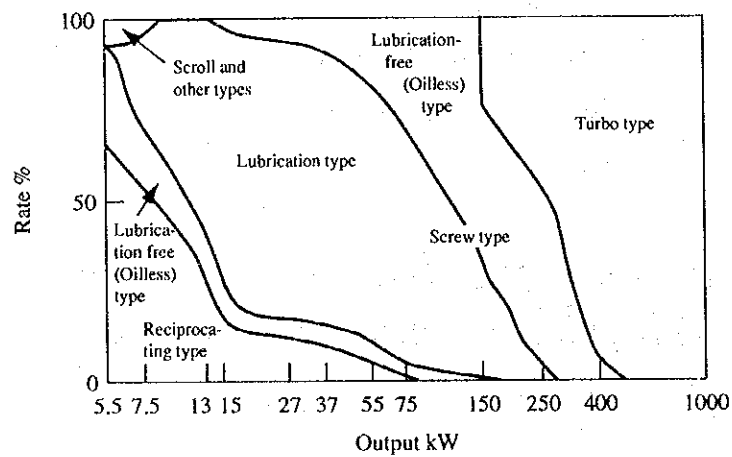
圧縮空気の流量計算式は国や業界により種々なものを使用されている。ISO では ISO 6358 が制定され、現在統一が進められている。

7.4 空気圧縮機

7.4.1 機種および特性

日本における空気圧縮機の市場シェアは Figure 7.6 に示すように、小型は往復形、中型はスクリー形、大型はターボ形が主力となっている。

Figure 7.6 Market Shares of Air Compressors by Type



また機種により多少異なるが、一例としてスクリー形の圧縮機出力と吐出空気量の関係を Table 7.1 示す。

Table 7.1 Discharge Air Volume and Specific Power of Screw-type Air Compressors

Compressor output kW	1.5	2.2	3.7	5.5	7.5	11	15	22	37	55	75	110	150	220
Discharge air volume m ³ /min	0.2	0.3	0.5	0.75	1.0	1.5	2.2	3.3	5.8	8.5	12.0	17.5	27.5	40.0
Specific power kW/m ³ /min	7.5	7.3	7.4	7.3	7.5	7.3	6.8	6.7	6.4	6.5	6.3	6.3	5.5	5.5

比動力でみると 7.5~5.5 kW/m³/min となっている。

空気圧縮機を圧力範囲で分類すると Table 7.2 のようになる。

Table 7.2 Classification of Air Compressors

Type	Class	Main pressure range (MPa)	Applications
Reciprocating compressor	General purpose compressor	0.7 ~ 0.85	2 stage compressor for 100 kW or more
	Intermediate pressure compressor	1 ~ 10	Standard type for 1,000 kW or less
	High pressure compressor	15 ~ 100	For petroleum refining, petrochemical and general chemical industry processes
	Superhigh pressure compressor	150 ~ 350	For synthetic chemistry such as ammonia, methanol and hydrogenation. Mostly large scale such as several thousand kW.
	Oilless compressor	0.7 ~ 0.85	Mainly, ethylene compressor for synthesis of polyethylene and ethylene.
Rotary compressor	Variable profile compressor	1 Stage	Oxygen gas, air for food processing industry and instrumentation, etc.
		2 Stage	
	Screw compressor	1 Stage 2 Stage	Air capacity 2~60 m ³ /min.
	Turbo compressor		Air capacity 500 m ³ /min

(1) 圧縮機の所要動力

一般に圧縮機の使用動力は次式で与えられる。

$$L = \frac{(a+1)K}{K-1} \cdot \frac{P_s Q_s}{6120} \cdot \left\{ \left(\frac{P_d}{P_s} \right)^{\frac{K-1}{K(a+1)}} - 1 \right\} \cdot \frac{1}{\eta_c \eta_t} \dots\dots (1)$$

L : 所要動力 (kW)

P_s : 吸入空気の絶対圧力 (kg/m²·abs)

P_d : 吐出空気の絶対圧力 (kg/m²·abs)

Q_s : 吸入状態に換算した単位時間当たりの空気量 (m³/min)

a : 中間冷却器の数

K : 空気の断熱指数

η_c : 圧縮機の全断熱効率

η_t : 伝達効率

η_cおよびη_tの値は、製作者から提示された値とする。

$\eta_c \eta_t = 1$ のときの動力を理論動力といい、1 段圧縮と 2 段圧縮について理論動力を表にしたものが Table 7.3 である。

Table 7.3 Theoretical Power of Air Compressor (kW)

Compression pressure	One-stage compression	Two-stage compression
0.1	1.261	
0.2	2.129	
0.3	2.811	
0.4	3.380	2.999
0.5	3.874	3.390
0.6	4.312	3.725
0.7	4.707	4.023
0.8	5.069	4.290
0.9	5.404	4.534
1.0	5.715	4.757
1.2		5.163
1.4		5.506
1.6		5.818
1.8		6.100
2.0		6.357

したがって、コンプレッサの使用動力を減ずるためには、

- ・圧縮機およびシステムに効率のよいものを選ぶこと
- ・吸込空気の温度を低下させること。また中間冷却器での冷却効果を上げること
- ・吐出圧力を低減すること。また空気の使用量を削減すること
- ・コンプレッサ本体および配管などからの空気漏れを防ぐこと
- ・圧縮空気のシステム全体の管理を強化すること

が大切である。

(2) 給油式と無給油式

往復形とスクリー形には給油式と無給油式とがあり、ターボ形は無給油式である。給油式は圧縮行程で空気を冷却したり、吸い込み側への空気の漏れ込み

をシールしたりするので、比動力が無給油式より小さく、また低価格なので小・中型のシェアの大部分を占めている。吐出空気に往復形は潤滑油の酸化オイルミストおよび炭化カーボンが、スクリー形はオイルミストが混入するので、清浄な圧縮空気を必要とする場合やドレンに油を含むことが許されない場合には無給油式が選択される。150 kW 以上の大型スクリー形は無給油式が殆どであり、中・小型も次第に無給油式が増加している。

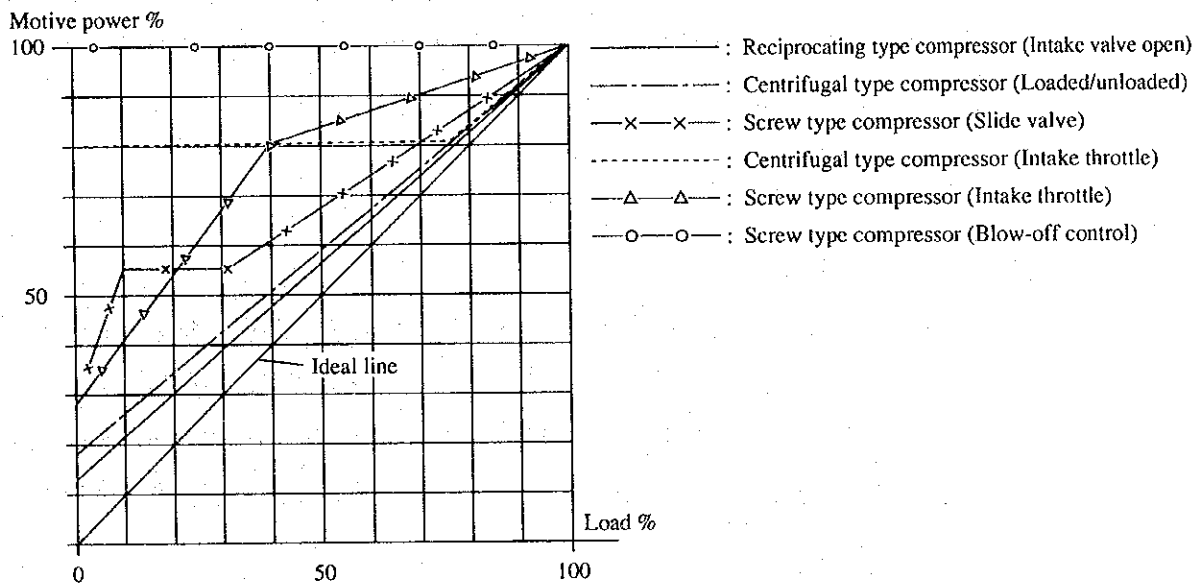
(3) 圧縮段数

多段圧縮形は、圧縮行程において段毎にインタークーラにより圧縮空気を冷却することにより、軸動力を小さくしている。1 段圧縮を 2 段圧縮にすると吐出圧力 0.7 MPa の場合で約 15 % の動力削減となる。

(4) 負荷特性

空気圧縮機の負荷特性の例を Figure 7.7 に示す。100 % より小さい負荷率では動力も小さくなるが、正比例ではなく、往復形でも約 10 % 以上の無負荷軸動力が存在する。したがって負荷率を 100 % 近くで運転することがもっとも効率的である。

Figure 7.7 Load Characteristics of Air Compressors



(5) 台数と設置方法

圧縮機の設置場所を中央の動力室に集中設置する方法と使用場所近くに分散設置する方法とがある。いずれにしても工場全体の負荷変動、危険分散、将来計画などを考慮して配置を決定すべきである。

集中設置の場合は、少ない台数で大型の機種を選択するため、圧縮機の 100 % 負荷時の効率はよくなるが、工場内設備のうち要求される最高圧力で全工場に供給する必要があり、また末端空気使用点までの配管が長くなり、配管の送気圧損が増加する。さらに、休日等の最小使用量時の効率および部分負荷効率を考慮する必要がある。

分散設置の場合は、小型の機種を 1 台または少数台選定するため、圧縮機の 100 % 負荷時の効率は悪くなるが、配管圧損が少ないというメリットがある。部分負荷時の効率を向上させるため容量制御の採用を検討する必要がある。また、事故時のバックアップを考慮する必要がある。

7.4.2 容量制御

(1) 圧力開閉式

空気消費量が減少して吐出ラインの圧力が設定値を超えると圧力スイッチにより圧縮機を自動停止させ、圧力が所定の値以下になると圧縮機を自動起動させる、自動発停制御方式である。空気消費が間欠的な場合に適用され、圧力の変動は大きい。電動機が停止している間の電力消費はないが、起動発停の頻度の問題から小型圧縮機に限定される方式である。

(2) 吐出圧力一定制御

吐出圧力を一定範囲内に維持制御する方式で、圧縮機の形式により異なる。往復形では空気消費量が減少して、吐出ラインの圧力が設定値を超えると、アンローダピストン弁が吸入弁を解放して空気を圧縮しない状態で運転する。空気消費量が変動する場合に適用し、吐出圧力の変動は大きい、省エネルギー効果が大きい。

給油スクリープ形では空気消費量が減少し、吐出圧力が増加すると、吸入絞り弁を閉じるとともに、吐出圧力調整弁を開き、圧縮空気を放出し、吸入空気量

を消費量に適合させる。逆に空気使用量が増加して吐出圧力が低下すると、圧力調整弁が閉じていき、吸入絞り弁を開き、負荷運転に戻る。この方式は連続的な空気消費で負荷変動が小さい場合に適用され、吐出圧力の変動は少ないが、省エネルギー効果は少ない。

空気消費量が減少したとき吸入圧力を低下させないで、スクリー・ロータの有効部分を短くするスライド弁を使用すると、圧力比上昇分がなくなり、省エネルギー効果が大きくなる。

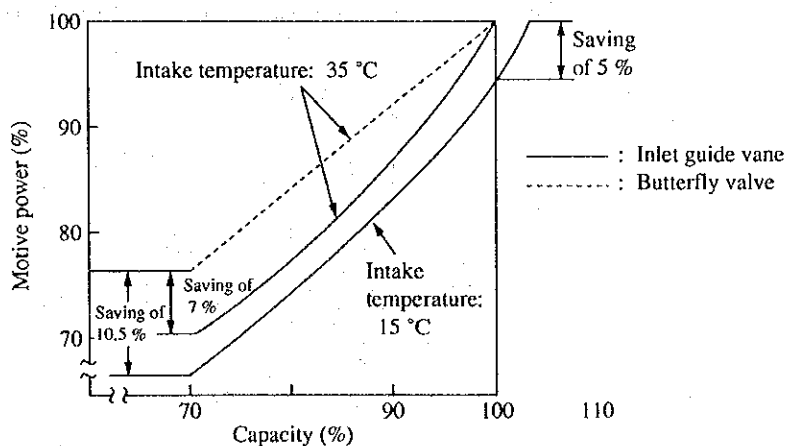
ドライスクリー式では吸入絞り制御方式は、上記の省エネルギー効果が小さいことと、吐出温度が上昇するため殆ど実施されない。スライド弁方式は有効ではあるが、弁の作動に微量の油を要するため、油が混入するという問題がある。

ターボ形では吐出圧力上昇を吸入絞りで制御する。バタフライ弁による絞りが安価であるが、減量したとき吸入圧力が低下する。

減量するとき吸入圧力を低下させないで、吸入空気に旋回を与え、初段のインペラの仕事を減少させるインレットガイドベーン (IGV) 方式がある。インレットガイドベーン方式とバタフライ絞り方式の比較を Figure 7.8 に示す。

吐出側のデフューザを絞る方式もあるが、吐出圧力の低い一段圧縮機で使用されているだけである。

Figure 7.8 Comparison between Butterfly Valve Throttle System and IGV System



(3) インバータ方式

吐出ラインの圧力センサからの信号により負荷に応じた回転数を演算し、最適

な回転数で圧縮機を運転し、常に吐出圧力一定の空気供給を行う。空気消費量の変動に柔軟に対応し、吐出圧力の変動も小さく、省エネルギー効果も大きい。ただし、ターボ形では回転数を低下すると吐出圧力も低下し、必要な圧力が得られなくなるため、回転数制御は適用できない。

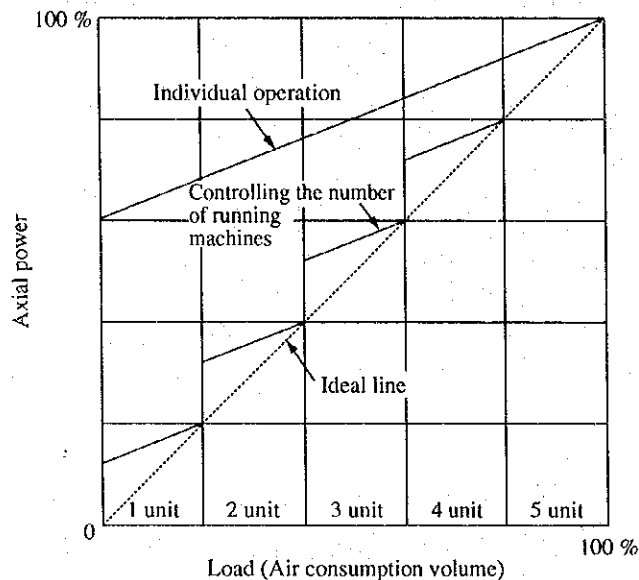
7.4.3 台数制御

圧縮機が複数台設置されている場合、負荷変動に対応して次の目的で台数制御を行う。

- ・ 運転台数を最小とし、空転損失を減らす。
- ・ 吐出圧力を最小とし、適正圧力で運転する。
- ・ 手動運転による対応遅れを防止する。
- ・ 集中管理により保守工数を削減する。

空気消費量に対応する圧縮機の運転台数を最小限に押さえ、かつ、運転される圧縮機は1台を除き100%運転とし、1台のみアンロード運転とする。Figure 7.9 に台数制御による負荷特性を示すが、出来るだけ広い負荷範囲で理想的な負荷特性に近づけることが必要である。

Figure 7.9 Load Characteristic by Controlling the Number of Operating Machines



7.5 圧縮空気設備の省エネルギー対策

7.5.1 吸入温度の低下

容積形の例では吸入温度が 20 °C の低下で軸動力は 3 % 上昇する。一方、実吐出量は理論的には、吸入空気の絶対温度に反比例して増加するので 6.8 % 増加する。この結果、20 °C の低下で合計 3.8 % の省エネルギーになる。

ターボ形では、理論的には吐出圧力や吸入体積流量が変わらなければ、軸動力は変化しないため、吸入温度が下がると重量流量が増加した分省エネルギーになるはずである。しかし、吸入温度が下がると、空気の比重が大きくなり、吐出圧力が増加しようとするが、吐出圧力は負荷側で決まるため、結果として吐出圧力は変わらず吸入体積流量のみが増加する。結果として設計点と異なる運転となり、効率が下がり、実際には 20 °C の温度低下で約 2~3 % の省エネルギーとなる。

屋内吸入の場合は、室内の発熱を抑え、換気により室内温度をいかに下げるかが問題になる。電動機の排熱を直接屋外に排気するか、電動機を水冷すると室内の発熱量を大幅に低減することができる。

屋外吸入の場合は、吸入口として直射日光の当たらない、涼しい場所を選ぶと同時に吸入管の圧力損失の減少、消音器の設置などを検討すべきである。

7.5.2 中間冷却器の冷却効果

中間冷却器での冷却不足は、空気の圧縮がより断熱圧縮に近づき、2 段目以降の圧縮動力を増加させる。中間冷却器の効率低下の原因には、スケールやスライムの付着などによる伝熱効率の低下、あるいは冷却水量の不足が考えられるので、冷却器の洗浄、その他の適切な対策を立てる必要がある。

7.5.3 吐出圧力および使用量の低減

Table 7.3 に示したように、吐出圧力を下げると省エネルギーになる。例えば、吐出圧力 0.7 MPa を 0.6 MPa に下げると、動力は 1 段圧縮の場合、約 8 % の削減となる。一般に同じ作業をする際、同一能力を持ちながら必要とする空気の圧力が異なる機械や工具は多いので、十分に検討して出来るだけ工場全体の機械や工具の使用圧力

を低い方に統一し、所要電力の減少を図ることが大切である。

工場の中に高い圧力の圧縮空気を必要とするプレス機のような設備がある場合は、専用の昇圧機を設置するのが経済的である。

また、使用空気量の削減はほぼ比例して動力費の削減につながるので、人体冷房や掃除などへの圧縮空気の使用は出来るだけやめ、使用場所のノズル口径の見直しなども行い、使用状況の管理を徹底すべきである。

7.5.4 隙間、穴等からの空気漏れ

(1) 空気漏れ量

P_1 の圧力を内部に持つ容器から、圧力 P_2 の空間へ空気が流出する場合の流出量は、Bernoulli の式から、

$$Q = \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\gamma}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

g : 重力の加速度 9.8 [m/S²]

γ : 空気の比重量 [kg/m³]

S : 有効断面積 [m²]

P_1, P_2 : 容器内外の絶対圧力 [kg/m²·abs]

となる。

実際には、圧縮性や断熱膨脹が問題となり、実用式では、

$$Q = C \cdot S \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)}{\gamma}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

C : 流量係数

を用いる。

この漏れ空気による損失は、非常に大きいので配管や漏れ箇所を調査し、空気漏れがある場合は、直ちに修理補修する必要がある。また、(3)式から漏れ量は、

$$\sqrt{P_1 - P_2}$$

に比例するので、使用圧力を低減すれば漏れ量は確実に減少する。Figure 7.10 に小口径オリフィスからの吹き出し量を示す。

Figure 7.10 は、吹き出しノズルの大きさに比較して、十分大きな容量のレシーバータンクおよび配管がある場合のエアの吹き出し量を求めるもので、タンクおよび配管の圧力は吹き出し中変化しないものとし、温度は常温とする。また吹き出しエア量は、標準状態 (20℃、1気圧) に換算したものである。

なお、Figure 7.10 の値は、流量係数 $C = 1$ の場合であるから、実際に使用する場合は、 C として 0.97~0.65 の値を選択使用すること (Figure 7.11 参照)。

Figure 7.10 Compressed Air Pressure and Blow-Off Air Amount from Nozzle

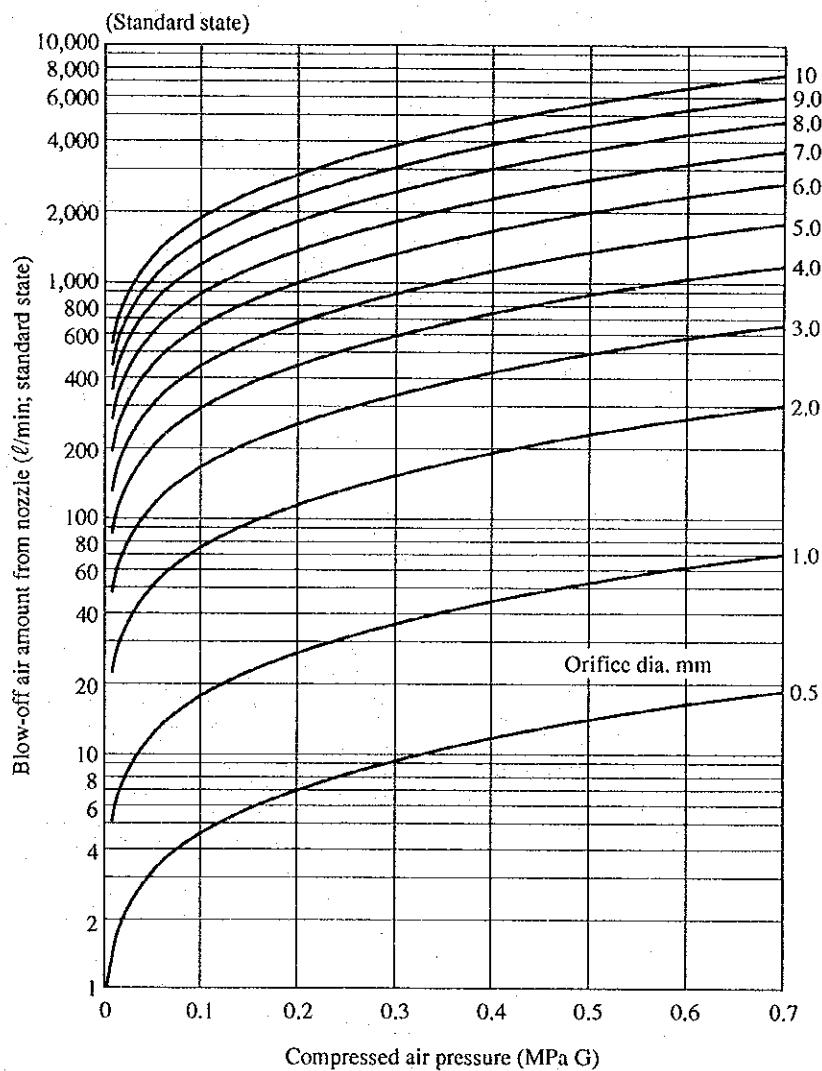
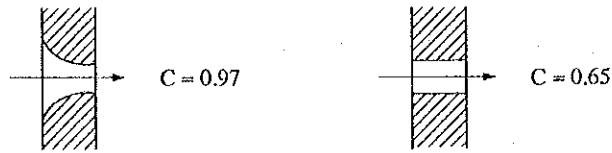


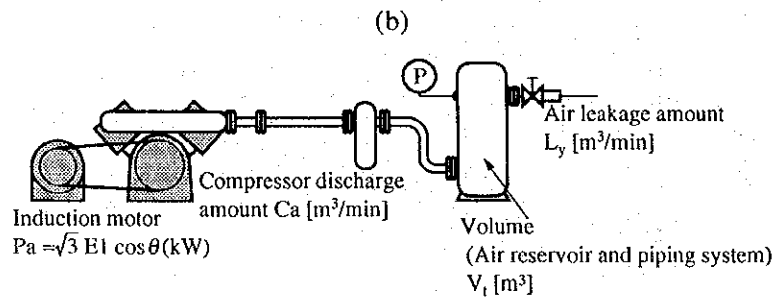
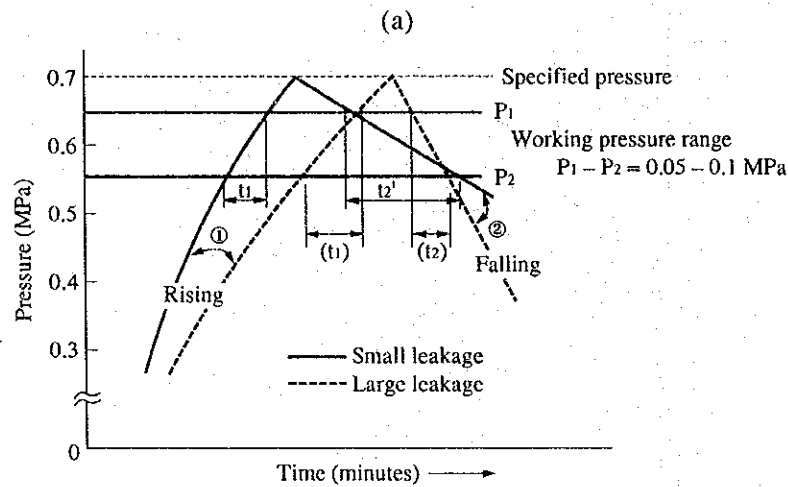
Figure 7.11 Shape of Orifice and Value of Discharge Coefficient



(2) 空気漏れ量の測定

圧縮空気配管系統の空気漏れ率の測定は次のようにする。まず末端を閉じた状態で圧縮機を稼働させると、Figure 7.12 (a)の ① のように漸次圧力が上昇する。規定圧力で圧縮機を停止させ、そのまま放置すれば、空気漏れのために圧力は ② のように下降していく。

Figure 7.12 Pressure - Time Curve



- C_a : Compressor discharge amount
- L_y : Air leakage amount
- t_1 : Time required for pressurizing
- t_2 : Time required for lowering

この場合は、点線より実線のほうが漏れが少ないことを示している。

ここで、圧力範囲 ($P_1 \sim P_2$) は実際使用する圧力とし、 $0.5 \sim 1 \text{ kg/cm}^2 \text{ (G)}$ にとり、 t_1 、 t_2 を図のようにすれば、次式が成立する。

圧縮機設備、配管系統などの容積を V_1 とすれば、

$$V_1 = t_1(C_a - L_y) = L_y t_2 \quad (\text{m}^3)$$

空気漏れ量 L_y を上記式より求めると、

$$L_y = \frac{C_a t_1}{t_1 + t_2} \quad (\text{m}^3/\text{min})$$

空気漏れ率 L_p (%) は

$$L_p = \frac{L_y}{C_a} \times 100 = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \times 100 \quad (\%)$$

空気漏れ箇所は、圧縮機設備 (圧縮機本体、中間冷却器、空気槽など)、配管系統、空気機械、制御回路などを群単位で音、石鹼水塗布により検査して見つける。

音による空気漏れ測定結果の一例を Table 7.4 に示す。工場における空気漏れの総件数は 81 件であったが、継ぎ手類がもっとも多く、その他、補機類が続き、以上で全体の 70 % を占めた。ただし、これには機械装置のシリンダ等駆動機器まわりは含まれてはいない。

Table 7.4 Results of Air Leakage Survey

Machine category	No. of leakages			Total(%)
	Leak amount			
	Large	Medium	Small	
1. Pippings	0	4	1	5 (6.2)
2. Joints	0	14	8	22 (27.2)
3. Auxiliary machines	0	9	6	15 (18.5)
4. Direction controller	0	3	7	10 (12.4)
5. Drives	1	0	0	1 (1.0)
6. Pncumatic tools	0	6	2	8 (10.0)
7. Others	0	16	4	20 (24.7)
Total	1	52	28	81(100.0)
Estimated amount of leak [L/min]	@200 200	@50 2,600	@10 280	
		3.080		

7.5.5 圧縮空気設備の管理

圧縮空気システムで管理上注意すべきことは、以下のとおりである。

(1) コンプレッサの管理

コンプレッサを常に安定した状態で運転するために、日常チェックする項目は次のとおりである。

- a. コンプレッサ、アフタクーラなどへの冷却水は確実に供給されているか
- b. コンプレッサの発熱は異常に高くなっていないか
- c. アンローダ用圧力スイッチは正常に作動しているか、また圧力スイッチの設定値は適正か
- d. コンプレッサが異常音を発していないか。また振動は正常範囲内か

- e. 潤滑油量は正常か、正規の潤滑油を使用しているか
- f. 吸い込み側フィルタの目詰まりはないか
- g. 安全弁は正常に作動するか、安全弁の設定値は正常か
- h. 圧力計の指示圧力は正常か、また圧力計に狂いはないか
- i. 空気タンクのドレン排出器は正常に作動しているか
- j. 中間冷却器は正常に作動しているか

(2) 圧力の管理

圧力を管理する上で、次の点について知っておかねばならない。

- a. ラインの最低必要圧力はどれほどか : 安定した制御をするための最低圧力
- b. ラインの最高圧力はどれほどか : 安定した制御をするための最高圧力
- c. ラインの耐圧力はどれほどか : これ以上になると制御機器装置の故障をまねく圧力

以上のことを確認した上で圧力スイッチ、安全弁、リリーフ弁を設定することになる。チェック事項を次に示す。

- a. 空気タンク、配管中の圧力スイッチ、安全弁、リリーフ弁の設定値は正しいか、正常に作動するかどうか
- b. 空気の逆流を防ぐ逆止弁は正常に作動しているかどうか
- c. レギュレータは正常に作動しているか

d. ラインに使用している圧力計は正常か、表示に狂いはないかどうか

(3) ドレンの管理

ドレンの溜まる場所に設けられたドレンバルブは、少なくとも1日に1回(できれば装置を運転する前がよい)、必ずドレンを排出しておく。

<チェック項目>

- a. 空気タンク・配管の立下がり部・配管の末端・エアフィルタに付いているドレンバルブでドレンを排出する
- b. 自動排水器具が正常に働いているかどうか
- c. エアフィルタ、自動排水器などは定期的に内部エレメントの掃除を行う

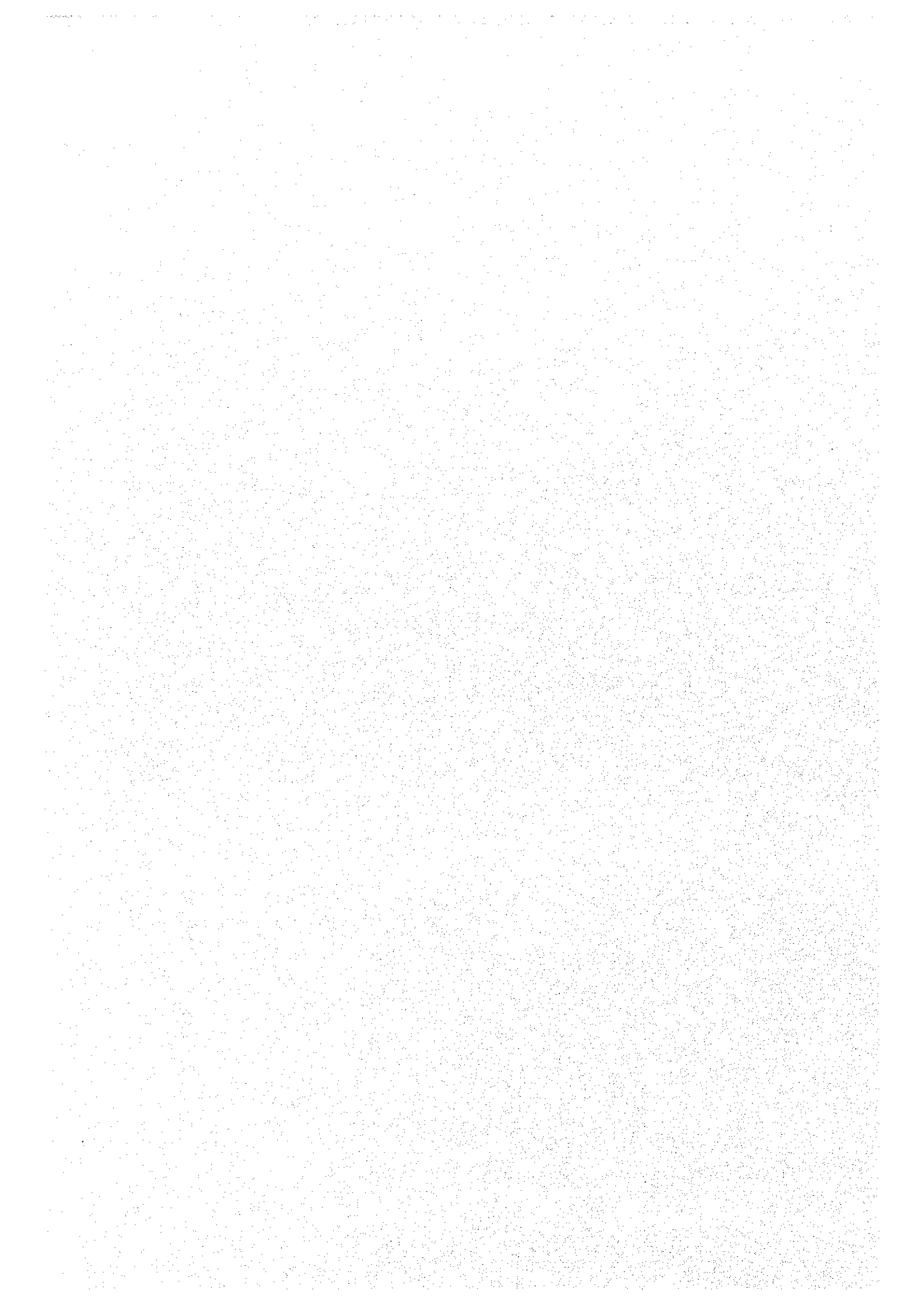
(4) パイプの管理

空気漏れはエネルギーの損失と圧力降下をまねくため、できるだけ漏れのないようにしなければならない。作業終了後または休日に定期的に空気漏れ検査を行い、空気漏れを減少させる。

<チェック項目>

- a. 継手類のゆるみによる空気漏れはないか
- b. パイプ、ホース、チューブ類の破れによる空気漏れはないか
- c. ストップバルブなどは確実に閉じることができるかどうか

8. 電動機の省エネルギー



8. 電動機の省エネルギー

電動機の省エネルギーは、その対応する方法として次の2つのケースが考えられる。

- (1) 負荷および電動機設備を新設あるいは大幅に改造して、省エネルギーを図る場合
- (2) 既設設備の管理面の強化あるいは小幅な改造によって、省エネルギーを図る場合

以下、それぞれの場合について述べる。

8.1 負荷および電動機設備を新設する場合

電動機の応用設備に限らず一般の設備全般にいえることであるが、エネルギーの使用量は設備の計画段階である程度決まるといってよい。設備容量が過大であったり、負荷設備に不適合である場合は、合理的なエネルギーの使い方はできない。そこで、新設設備の計画、あるいは導入段階で考えなくてはならない事項をあげると、次のとおりである。

8.1.1 電動力応用に関する基本式

電動機の省エネルギーを考える場合、まず理解しなければならない基本式を Table 8.1 に示す。

Table 8.1 Basic and Practical Expressions Relating to Motor Application

Item	Formulation	Basic expression	Practical expression	Description of symbols
1 Power and torque	$P = \omega T$		$\begin{cases} N[\text{rpm}] = \frac{60}{2\pi} \omega \\ T_g[\text{kg} \cdot \text{m}] = \frac{T}{g} = \frac{T}{9.81} \\ P_k[\text{kW}] = \frac{N[\text{rpm}]}{973} \times T_g[\text{kg} \cdot \text{m}] \end{cases}$	P : Power (W) P _k : Power (kW) T : Torque (N·m) T _g : Torque (kg·m) ω : Angular velocity (rad/sec) N : Rotating speed (rpm)
2 Moment of inertia and acceleration torque	$J \frac{d\omega}{dt} = T$		$\begin{aligned} GD^2 &= 4J \\ T_g[\text{kg} \cdot \text{m}] &= \frac{1}{375} GD^2 \cdot \frac{dN}{dt} \end{aligned}$	J : Moment of inertia (kg·m ²) GD ² : Flywheel effect (kg·m ²)
3 Acceleration time	$t = \int_0^{\omega_0} \frac{J}{T_a} d\omega [\text{sec}]$		$\begin{aligned} \overline{T_a} &= \frac{\int_0^{\omega_0} T_a(\omega) d\omega}{\omega_0} \\ t_a[\text{sec}] &= \frac{1}{365} \frac{GD^2 N^2 [\text{rpm}]}{P[\text{W}]} \end{aligned}$	t : Time required for acceleration (sec) t _a : Time required for completion of acceleration (sec) T _a : Acceleration torque (kg·m) $\overline{T_a}$: Mean acceleration torque (kg·m)

8.1.2 電動機選定上の負荷条件

最適な電動機を選ぶためには、まず負荷の条件を知る必要がある。

Table 8.2 に示したのは、負荷の種々の条件によって、電動機はいかにあるべきか、あるいは許される条件は何であるのかをまとめたものである。ここで示したような条件が明確になって、はじめて電動機の選定が可能となり、それに伴う制御装置の選定も可能となる。

Table 8.2 では、電動機システムとして直流機、誘導機および同期機に分類してあるが、ここでの誘導機と同期機については、商用電源による定速駆動系を考えている。同期機を用いたサイリスタモータとか、誘導機を用いた周波数制御法などを考える場合、これらはシステムとしては直流機に類似する。

Table 8.2 Conditions for Motor Selection

	Conditions of load	Motor system		
		DC machine	Induction machine	Synchronous machine
Starting conditions	Necessary frequency for starting	Study heat capacity of motor		
	Necessary starting torque • Moment of inertia of load • Possibility of no-load starting	Application of series motor	Application of wound-rotor type IM Study starting current and time according to the above items	
	Necessity of smooth starting	Acceleration restriction	Reactor starting, soft starter, etc.	Low frequency starting, etc.
Stop conditions	Necessity and its degree of emergency stop (quick stop)	Regeneration system, dynamic braking, etc.	Reversing-phase braking	Brake, etc.
	Necessity of precise stop position	Position control	Difficulty	
	Necessity of holding the stop position	Presence of brake		
Operating conditions	Necessity and its conditions of reverse rotation	Field switching Armature switching	Main circuit switching	
	Rating of load (Continuous, time)	Possibility of reducing frame No. for hourly rating		
	Special function	Restriction is comparatively small	Restriction is large.	
Speed control	Constant speed or variable speed?	For variable speed	For constant speed Variable speed in conjunction with control equipment	
	Speed control range	Scope of application is large.	Study combination with control equipment.	
	Necessity of speed control	Suitable	Change by amount of slip	Synchronize with the power source frequency.
Ambient conditions, etc.	Temperature and humidity conditions	Study motor construction.		
	Necessity of explosion-proof construction	Possible, but difficult	Possible	
	Whether good atmosphere or not	Problem on brush commutator	Squirrel cage type is for improper circumstance.	Brushless exciting is possible.
	Problem on personnel for maintenance	Maintenance is important.	In the case of brushless, easy maintenance.	
	Power source condition	Problem on higher harmonics and power factor	Starting current large, Delay power factor	Leading power factor is possible.

8.1.3 項以下に、電動機選定のための主な項目について記す。

8.1.3 負荷のトルク特性

電動機はほとんどの場合、負荷と結合された状態で零速度から始動し、所定の速度まで加速して一定速度運転に入る。負荷は固有のトルク特性を持っているので、電動機は全速度範囲にわたって、負荷の必要とするトルク以上のトルクを発生できるものでなければならない。

一般に負荷と電動機のトルク特性が似ているほど、電動機は経済的な設計ができる。代表的なトルク速度特性の例としては、速度にかかわらずトルクが一定な定トルク負荷、トルクが速度の 1 乗、2 乗、3 乗に比例するトルク漸増負荷、速度と必要トルクとが逆比例し、トルク×速度が一定な定出力負荷などがある。Table 8.3 は、これらの関係をまとめたものである。

Table 8.3 Class of Load and Torque Speed Characteristic

Load characteristic		Typical load
Constant torque load	<p> $T = \text{Constant}$ $P \propto n$ </p>	Gravity load, Friction load [Example] Crane, Winding machine, Conveyor, Paper machine, Mixer
Increasing torque load	<p> $T \propto n^2$ $P \propto n^3$ </p>	Fluid load [Example] Blower, Pump
Constant output load	<p> $T \propto \frac{1}{n}$ $P = \text{Constant}$ </p>	Special load [Example] Winder, Constant cutting machine, Log barker

一般に 3 相誘導電動機や、同期電動機のような定速度電動機では始動時のトルク、最大負荷がかかったときのトルク、それに同期電動機では、同期引き込み時のトルク

クが負荷の要求するトルク以上あることが必要となる。

8.1.4 負荷の GD^2

負荷の慣性 GD^2 (はずみ車効果) の大小は始動時間の大小、始動時の発熱の大小に関係し、電動機選定上重要な要素である。

負荷トルクを T_L ($\text{kg} \cdot \text{m}$)、電動機トルクを T_M ($\text{kg} \cdot \text{m}$)、負荷と電動機のはずみ車効果の和を GD^2 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$) とすれば、

$$T_M = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dN}{dt} + T_L \quad (\text{秒}) \dots\dots\dots (1)$$

したがって、始動時間は、

$$t = \int_0^{N_0} \frac{GD^2 \cdot dN}{375 (T_M - T_L)} \quad (\text{秒}) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

N_0 : 全負荷回転数

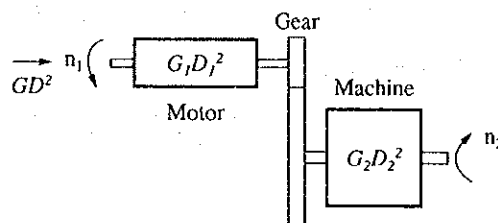
となり、 GD^2 に比例する。 t が長いと電動機が異常加熱するので、どの電動機にも負荷の許容 GD^2 が定めてある。逆に GD^2 が大きい場合には、それに合った電動機を選定する必要がある。

なお、Figure 8.1 に示すように、電動機の GD^2 ; $G_1D_1^2$ 、機械の GD^2 ; $G_2D_2^2$ 、減速比 ; $n_1/n_2 = n$ 、のとき電動機側に換算した GD^2 は、次のようになる。

$$GD^2 = G_1D_1^2 + \frac{1}{n^2} G_2D_2^2 \dots\dots\dots (3)$$

産業用の機械には減速機を使用することが多いため、上式の結果は重要である。

Figure 8.1 Conversion of Flywheel Effect



8.1.5 負荷の時間特性

電動機の使用状況には、連続使用、短時間使用、断続使用など各種の使用方法があり、このような時間的な使用責務をデューティという。

電気機器は一定の使用条件で使用された場合、許容最高温度を超えないように設計されており、これを機器の定格という。

定格には定格出力、定格回転数、定格電圧、定格電流、定格周波数などがあり、使用時間に対しては連続定格、短時間定格、反復定格などの種類がある。

(1) 連続定格

24 時間連続運転の場合はもちろん連続定格の電動機を選定する。また容量にもよるが、一般に 2~3 時間以上連続使用する場合には、価格的にほとんど差がなくなるため、連続定格のものが採用されることが多い。

連続使用状態において電動機は、銅損、鉄損などにより内部から発熱する一方、表面からの放熱によって冷却され、両者のバランスした値で運転される。

いま、毎秒の発熱量：Q、電動機と周囲温度との差 (温度上昇値)： θ 、電動機の熱容量：C、熱放散係数：A とすれば、

$$C \frac{d\theta}{dt} + A\theta = Q \dots\dots\dots (3)$$

$t=0$ で $\theta = 0$ とすると、

$$\theta = \frac{Q}{A} (1 - e^{-t/T}) \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$T = \frac{C}{A}$$

上式の T を熱時定数という。また (4) 式で $t = \infty$ とすれば $\theta = Q/A$ となり、最終温度上昇が求まる。

Figure 8.2 は、これをグラフにしたものである。また、熱時定数はおおよそ Table 8.4 のようになる。

Figure 8.2 Temperature Rise Curve of Motor

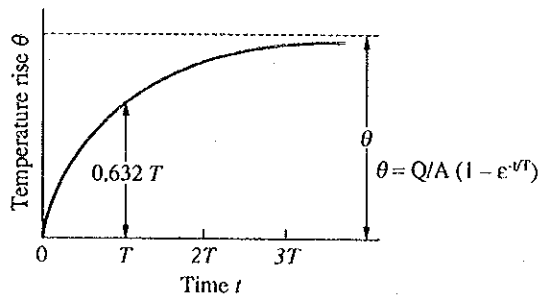


Table 8.4 Example of Thermal Time Constant

Type	Thermal time constant (minute)
Open type	20 - 40
Totally enclosed fan cooling type	50 - 150
Totally enclosed self cooling type	90 - 180

次に、電動機を電源から切り離して停止させるときは、(3) 式において、 $Q=0$ 、また、 $t=0$ において $\theta = \theta_0$ とおけば、

$$\theta = \theta_0 e^{-t/T}$$

ただし、

$$T' = \frac{C}{A'}$$

T' : 冷却時の熱特定数

A' : 冷却時の放熱係数

θ_0 : 冷却開始時の温度

となる。

他力通風電動機では、停止時も冷却風の量は変化しないから熱特定数は運転時と同じであるが、自己通風形電動機では運転時の約3倍程度になる。

(2) 短時間定格

短時間定格には標準の時間として5分、10分、15分、30分、60分、120分などがあるので、その中から実際の負荷状況に最も近いものを選ばよ。

(3) 反復定格

反復負荷とは、一定の負荷と休止の期間が周期的に繰り返されるような負荷をいう。この代表的なものがクレーンであり、クレーン用電動機には、% ED 表示された定格の電動機が使用される (Table 8.5 参照)。

40 % ED とは、10 分間に平均して 4 分間だけ定格容量で使用され、残りの時間は停止しているような使用状態をいう。

ED : Einschetdauer (Germany)

Table 8.5 Frame Number Application Table

Frame number	Load time factor					Number of poles	
		15 %ED	25 %ED	40 %ED	60 %ED		100 %ED
	Output	kW	kW	kW	kW		kW
132M		3	2.5	2.2	1.8	1.5	6
		5	4	3.7	3	2.8	6
160M		7.5	6.3	5.5	4.5	4	6
		10	8.5	7.5	6.3	5.5	6
160L		15	13	11	9	7.5	6
180L		20	17	15	13	11	6
200L		30	25	22	18.5	15	6
225M		40	33	30	25	22	6
250M		50	40	37	30	25	6
		63	50	45	37	33	6
280M		75	63	55	45	37	8
315M		100	85	75	63	50	8
		125	100	90	75	63	8
355L		150	125	110	90	75	10
		185	150	132	110	90	10
400L		220	185	160	132	110	10
		280	220	220	160	132	10

ED: Einschetdauer (Germany)

(4) 2乗平均法による出力の算出

電動機の定格出力は、負荷の時間的特性から選ばれるが、負荷が不規則に変化したり、不規則な使用を行う場合には、電動機出力の決定がかなり困難となる。しかし、負荷が連続して周期的に変化する場合の簡略な出力算出法として、2乗平均法がよく使用される。

誘導電動機や、直流分巻電動機では端子電圧が一定ならば出力は近似的に負荷電流に比例する。電動機の発熱源としては、銅損と鉄損があるが、鉄損に比べて銅損はずっと大きい。また銅損は負荷電流の2乗に比例するので、結局、損失は出力の2乗にほぼ比例するといえる。

負荷電流を $I(t)$ 、そのときの出力を $P(t)$ とおけば、

$$\{I(t)\}^2 R = k \{P(t)\}^2$$

1周期に P_1, P_2, \dots, P_n の負荷がそれぞれ t_1, t_2, \dots, t_n 時間だけかかったとすると、このときの等価負荷を P_a として損失が等しいとおけば、

$$k \{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n\} = k P_a^2 \cdot T$$

ただし、 $T = t_1 + t_2 + \dots + t_n$

ゆえに、

$$P_a = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{T}} \dots \dots \dots (5)$$

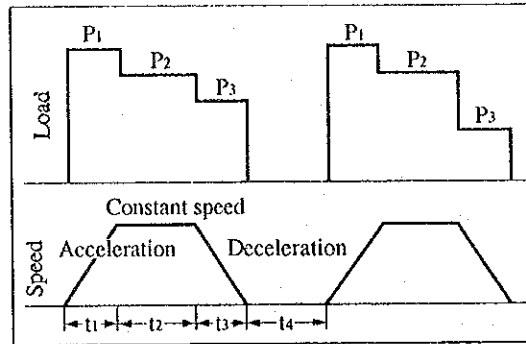
この P_a が、周期的に変動する負荷 P の損失と同一の損失を生じる、等価な連続負荷である。

また断続負荷の場合は、始動が頻繁であるので始動、停止時の発熱、冷却も考慮して等価負荷を決定する必要がある。

例えば、Figure 8.3 のような、断続負荷に連続定格の電動機を使用する場合の等価出力は、次のようにして求める。

$$P_a = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3}{t_1 \alpha_1 + t_2 \alpha_2 + t_3 \alpha_3 + t_4 \alpha_4}} \dots \dots \dots (6)$$

Figure 8.3 Example of Periodic Load



ただし、 α は冷却係数であり、おおよそ Table 8.6 のような値をとる。

Table 8.6 Example of Cooling Coefficient Values

Type of motor	During stop	During acceleration	During operation	During deceleration
Open type AC motor	0.2	0.5	1	0.5
Enclosed type AC motor	0.3	0.6	1	0.6
Totally enclosed fan cooling type AC motor	0.5	0.75	1	0.75
Separately-cooling AC motor	1	1	1	1

また、
$$T = t_1 \alpha_1 + t_2 \alpha_2 + t_3 \alpha_3 + t_4 \alpha_4$$

の T は、冷却係数を考慮した等価周期である。

(5) 電動機容量の決定

電動機の定格出力を算定する場合、最大負荷で決めている場合が多いが、前項で述べたように、等価負荷を算定して決定すべきである。

例えば、Figure 8.4 のような連続運転において、

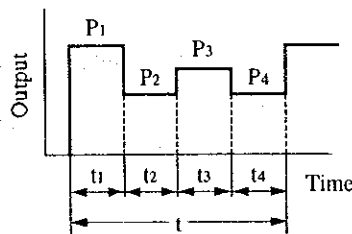
- $P_1 = 100 \text{ kW}$ $t_1 = 10 \text{ 分}$
- $P_2 = 50 \text{ kW}$ $t_2 = 15 \text{ 分}$
- $P_3 = 80 \text{ kW}$ $t_3 = 10 \text{ 分}$
- $P_4 = 50 \text{ kW}$ $t_4 = 20 \text{ 分}$

とすると、(6) 式から所要の電動機出力 P は、

$$P = \sqrt{\frac{100^2 \times 10 + 50^2 \times 15 + 80^2 \times 10 + 50^2 \times 20}{10 + 15 + 20}} = 67.6 \text{ kW} \approx 70 \text{ kW}$$

となる。したがって標準電動機としては定格 75 kW を選定すればよい。この場合最大負荷では $100 / 75 = 1.33$ 、すなわち、133 % の過負荷となるが、電動機の最大トルクは 200 % 以上あり問題はない。これを最大出力 100 kW で電動機を選定した場合は、省エネルギーにとって大きなマイナス要因となる。

Figure 8.4 Example of Load Curve (1)



また Figure 8.5 のような反復使用のクレーン電動機では、

$$P_1 = 50 \text{ kW} \quad 1.5 \text{ 分}$$

$$P_2 = 30 \text{ kW} \quad 1.5 \text{ 分}$$

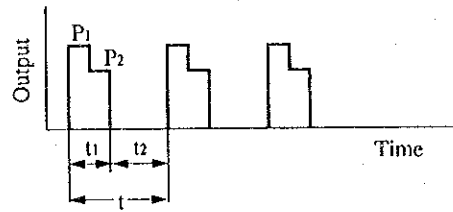
$$t_1 = 1.5 + 1.5 = 3 \text{ 分} \quad t_2 = 7 \text{ 分}$$

の場合、運転中の 2 乗平均負荷は、

$$P = \sqrt{\frac{50^2 \times 1.5 + 30^2 \times 1.5}{3}} = 41.2 \text{ kW}$$

したがって、電動機としては、Table 8.5 の枠番号適用表から選んで 40 % ED、45 kW のものを採用すればよい。

Figure 8.5 Example of Load Curve (2)



8.1.6 電動機の種類と効率、力率

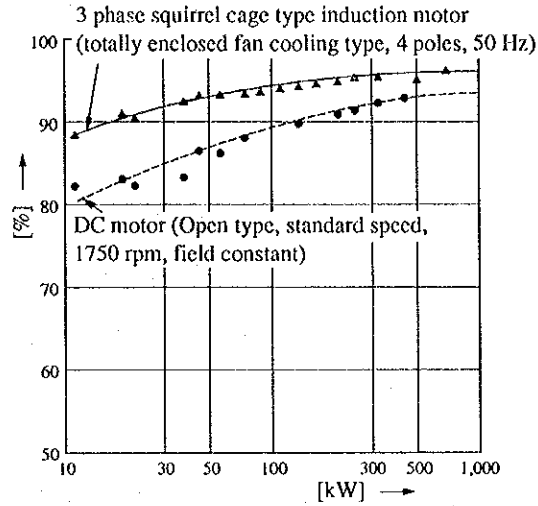
代表的な直流電動機、誘導電動機および同期電動機の効率、力率について、一番多く使用されている誘導電動機と比較してみることにする。

(1) 直流機と誘導機

Figure 8.6 は、直流電動機と誘導電動機との効率の比較を示したものである。図から明らかなように、直流電動機の効率は誘導電動機に比べて、100 kW 以下の小容量機で5~8 %程度低く、300~1,000 kW で2~3 %程度低い。この直流電動機は他力通風形であるため、本来は冷却用の送風機の損失を含めて評価しなければならないが、この値が省略してあるので、実際はさらに効率が低下する傾向がある。

直流電動機は、励磁の方式によって種々の特性が簡単に得られ、負荷の特性に適合した運転ができるとともに、回転速度またはトルクを容易に制御できる特徴がある。反面、効率が誘導電動機、同期電動機などの交流電動機に比較して低いこと、整流子・ブラシによる機械的集電機構を有するので保守面、耐環境性に難点がある。

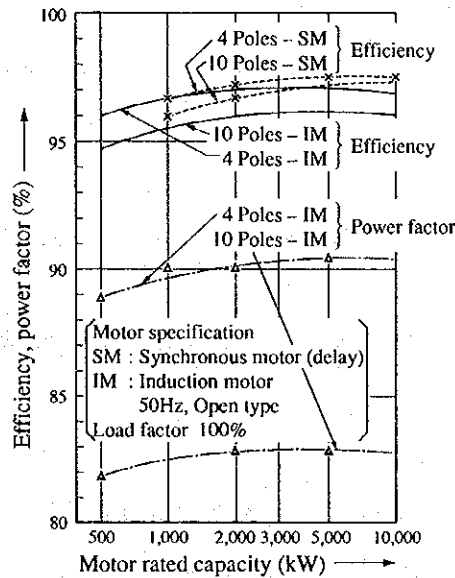
Figure 8.6 Comparative Example of Efficiency for Induction Motor and DC Motor



(2) 同期機と誘導機

同期機と誘導機の効率の比較を Figure 8.7 に示す。

Figure 8.7 Comparative Example of Efficiency and Power Factor between Synchronous and Induction Motors



一般に同期電動機の効率は、誘導電動機より良く、しかもその傾向は極数の大きい低速機において顕著である。例えば 10 MW クラスの場合、4 極同期電動機と誘導電動機では効率が約 0.5 % 程度の差に対し、10 極の場合は同期電動機の効率が約 1~

1.5 %程度も高い例がある。

また、同期電動機の最大の特徴は力率を自由に選定できることで、力率 1.0 あるいは進み力率にすることも可能であり、この点が誘導電動機と最も異なる点である。しかも、同期電動機を界磁制御により進み運転にして系統の力率一定制御を行ったり、または端子電圧一定制御を行うことによって、系統の電圧変動を抑制することも可能である。図から明らかなように、誘導電動機は大容量機でも極数の大きい低速機では力率が相当低下するので、この面でも同期電動機に比して不利である。

しかし、同期電動機は界磁の励磁電源装置を合めてコスト的に高価となるので、一般的には次の点を目安に選定を検討すべきである。

- a. 10 MW 以上は、効率の面で同期電動機を採用することを検討する。
- b. 10 MW 以下でも極数の大きい低速機では、同期電動機の採用を検討する。
- c. 系統の力率制御、電圧制御を行う必要がある場合は同期電動機の採用を検討する。ただし、電動機の容量が系統の無効電力〔Var〕を供給できる程度の大きい場合に限る。
- d. 一般には 5 MW 以下は、始動および電源の構成の簡単な誘導電動機が有効である。
- e. 一般に突極形の同期電動機は、誘導電動機に比較してあまり大きな始動トルクをとれないので、慣性モーメントの大きい負荷、あるいはトルクの大きい負荷では始動が困難であるので注意が必要である。

(3) 誘導電動機とその極数

Figure 8.8 に全閉外扇形の 3 相かご形誘導電動機を例に出力容量をパラメータとして、極数と効率および力率の関係を示した。図において、効率は極数に対しあまり大きな差は見られない。これは、各出力容量において、極数が変わっても効率があまり変化しないように設計が図られているためである。

ただし、力率については励磁電流が極数に比例するので、極数が大きくなるにつれて著しく悪化する。その傾向は負荷電流成分に比べて、励磁電流成分の大

きい小容量機ほど顕著である。

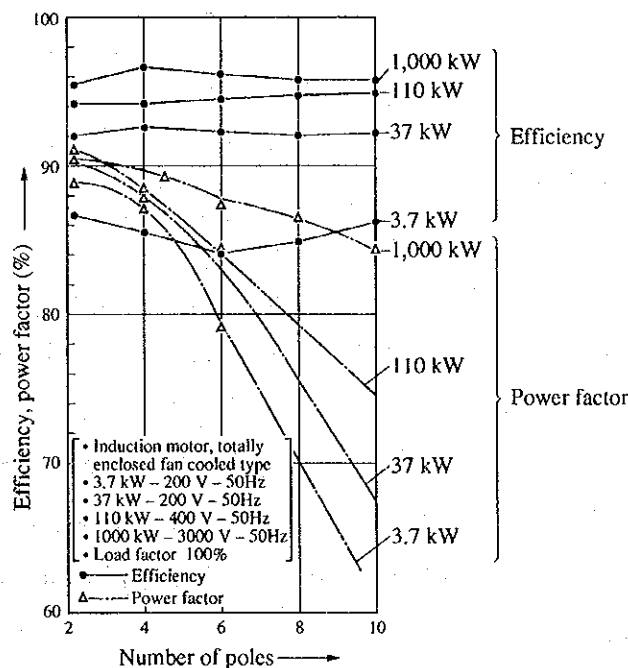
電動機の極数は、所望する相手機械の回転数により選定されるが、一般に同一出力の電動機に対し、極数が大きくなるにつれて容積、重量が大きくなる。

重量は素材の使用量、素材加工の費用と密接な関係があるから、コストの傾向を表すと考えてよい。したがって、極数が大きくなると一般にコストは高くなるとみてよいから、理由なく極数を大きくすることは、初期投資額が大きくなり不経済である。

また、電動機は相手負荷の機械に直結される場合はまれであり、この間に通常、変速機が介在することが多い。

変速機の関連で4極機が選定できれば、コストおよび力率の面で問題はないが、極数の大きい電動機を選定する場合、変速機を含めた駆動系の効率メリットと電動機の投資金額増の兼ね合いで決定すべきである。

Figure 8.8 Relation between Number of Pole, Efficiency and Power Factor of Induction Motors



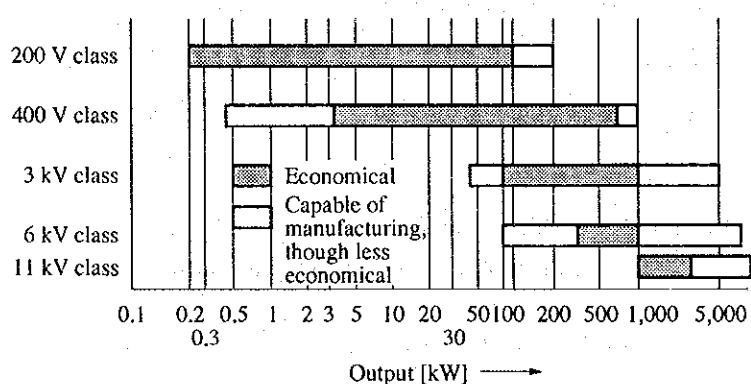
8.1.7 電動機の電圧の選定

電動機の電圧は、その効率および経済性と深い関係があるので配電電圧を決定する

のは、省エネルギーにとって重要な要素である。小容量の電動機にことさら高い定格電圧を選んだり、あるいは逆に大容量機に低い電圧を選定することは好ましくない。

Figure 8.9 は、電動機の電圧別の容量範囲を技術上の問題と経済性を考慮して表したものである。Figure 8.9 で斜線で示した範囲は比較的に経済的な範囲で、かつ製造技術上問題点の少ない範囲であり、白枠で示した範囲はある程度経済性を無視して製作すれば、技術的には製造可能な範囲である。

Figure 8.9 Optimum Output Range of Motor



8.1.8 高効率電動機の採用

生産設備で広範囲に使われている低圧かご形誘導電動機で、高級電磁鋼板の採用および設計の適正化により、枠番および外形寸法を現行の標準機のままで鉄損および銅損を 20~30 %減少させた高効率電動機が近年市販されている。多少初期投資は高くなるが、長時間運転する電動機には、採用を検討すべきであろう。

Figure 8.10 および Figure 8.11 に現在、生産されている高効率機と標準機の効率の比較を示す。Figure 8.11 で注目すべき点は、高効率機は軽負荷時の効率の改善が著しいということである。

Figure 8.10 Efficiency Comparison of 3 Phase Squirrel Cage Type Induction Motor (Output Capacity)

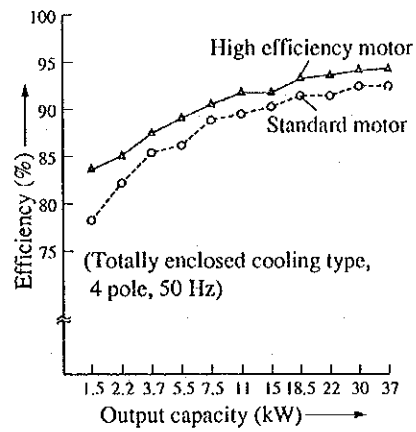
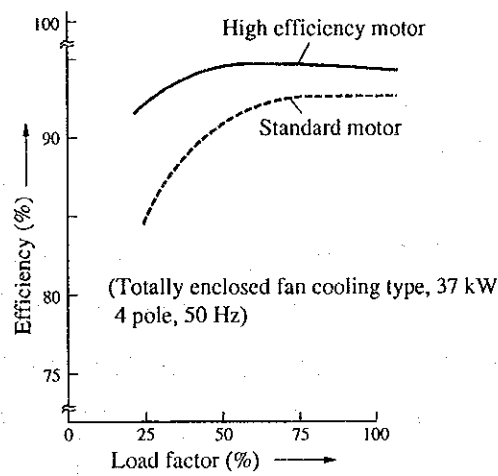


Figure 8.11 Efficiency Comparison of 3 Phase Squirrel Cage Type Induction Motor (Load Factor)

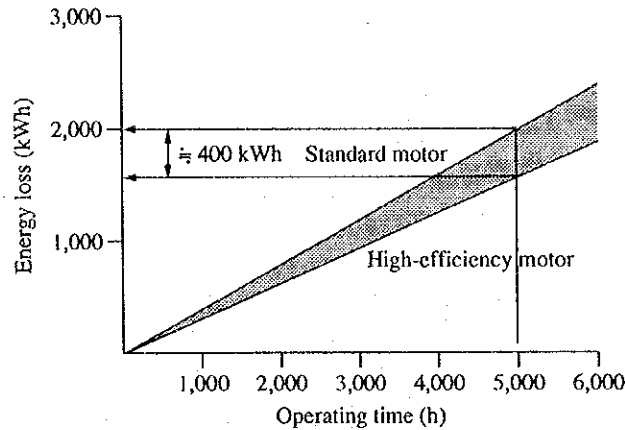


高効率誘導電動機の省エネ効果の一例を Figure 8.12 に示す。

電動機仕様 全閉外扇型 2.2 kW 4 極 200 V 50 Hz

負荷率 100 %

Figure 8.12 Energy Conservation Effect for High-efficiency Motors



この図からこの電動機で、例えば年間 5,000 時間の稼働で年間約 400kWh の省エネルギーが図れることが判る。

8.1.9 誘導電動機の回転数制御

8.1.3 項で述べたように電動機の負荷としては定トルク負荷、低減トルク負荷、定出力負荷の 3 種類がある。このうち流体機械の負荷は低減トルク負荷に属し、トルクは角速度の関数となり、回転速度の 2 乗に比例するので動力は回転速度の 3 乗に比例する。また流量は回転速度に比例するから、流体機械において流量が低減した場合、回転数制御を行い回転速度を低減すれば、動力は回転速度の 3 乗に比例して低減するため、大幅な省エネルギーが期待できる。このほか回転数制御はクレーンなどの定トルク負荷でも使用されている。

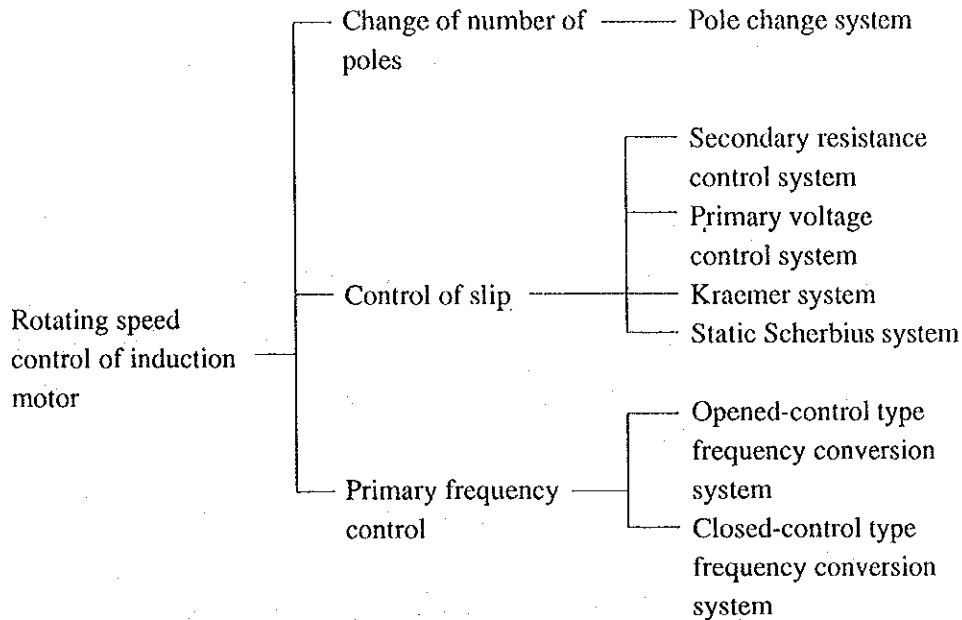
一般に誘導電動機の回転速度は次式で示される。

$$N = \frac{120f}{P} (1 - S) \dots\dots\dots (7)$$

上式でも明らかなように、誘導電動機の回転数制御は、極数 P を変えるか、すべり S を変えるか、電源周波数 f を変えるかのいずれかの要素により行なわれる。

この制御要素別に分類した回転数制御方式を記せば Figure 8.13 のようになる。

Figure 8.13 Classification of Rotating Speed Control



(1) 極数変換

式 (7)で電動機の極数 P を段階的に切り替える速度制御方式で、極数を 2 段～5 段に変化させて回転速度を変化させる。変速範囲は $1:1.5 \sim 1:8$ 程度で、段階的に速度制御する場合に使用される。

(2) 二次抵抗制御

巻線型誘導電動機で、二次抵抗を変化させると比例推移によりトルク特性が変化する。これを利用して、負荷トルクとの平衡点を変化させて速度制御するものである。この方式では回転速度を連続的に変化できるが、二次抵抗を増加して回転速度を低減していくと、二次抵抗による発熱損失が増大し効率が低下する。

(3) 一次電圧制御

誘導電動機をサイリスタと組み合わせて電動機の一次電圧を変化させることによる速度制御方式で、トルクの大きさが電圧の 2 乗に比例する性質を利用して回転速度を連続的に変化させる。低速での安定運転が可能であるが、その反面効率、力率が低下する。

(4) クレーマ方式

誘導電動機の二次出力をシリコン整流器などで直流に変換し、誘導電動機に結合した直流電動機を駆動することにより機械的出力として変換する方式である。制御による損失がないため、効率は良い。可変範囲は 1 : 2 以下で狭い範囲の定出力運転に適している。

(5) 静止セルピウス方式

誘導電動機の二次出力をインバータで逆変換し、電源に電力として返還する制御方式で、インバータの位相制御により速度制御する。制御による損失がないため、効率は良い。可変速範囲は 1 : 2、経済的といわれており、狭い範囲の可変速制御に使用される。

(6) 一次周波数制御

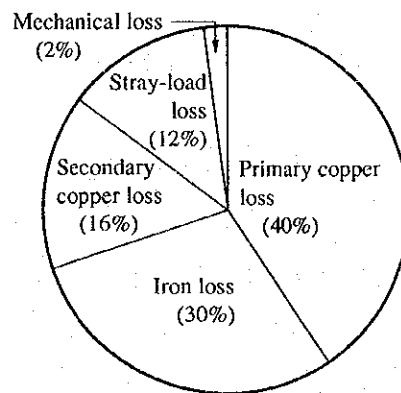
誘導電動機の電源周波数 f を変化させる速度制御方式で、インバータあるいはサイクロコンバータを使用して周波数を変化させ、回転速度を連続的に変化させるものである。特にパワーデバイスの高性能化とともに産業用の大容量機から一般家庭用の小容量機に至るまで、インバータを使用した可変速システムが広く用いられてきている。本システムは特に既設設備の改造に有効なので、8.2.3 で詳述する。

8.2 既設設備の小幅な改造によって省エネルギーを図る場合

8.2.1 誘導電動機と電圧管理

誘導電動機は取り扱いが簡単でコストも安いことから、最も多く使用されているが、一方では、電源電圧の影響を最も大きく受ける電動機であるため注意が必要である。Figure 8.14 は、比較的容量の小さい3相誘導電動機の損失の1例を示したものである。Figure 8.14 から明らかなように、損失の大部分は銅損と鉄損で全体の86%を占めている。したがって電源電圧の変動の誘導電動機に対する影響も、この2つを調べることで判明する。

Figure 8.14 Loss Analysis Example of Standard 3 Phase Induction Motor



さて銅損は、誘導電動機の固定子巻線(1次巻線)と回転子(2次巻線)に電流が流れることにより発生する抵抗損で、負荷電流の2乗に比例するから負荷率の依存性の強い損失成分である。

$$W_c = 3(r_1 + r'_2) I_2^2 \quad [\text{W}] \quad \dots \dots \dots (8)$$

W_c : 銅損

r_1 : 毎相の1次巻線の抵抗 $[\Omega]$

r'_2 : 毎相の2次巻線の抵抗(1次換算値) $[\Omega]$

I_2 : 負荷電流 $[\text{A}]$

電動機が同期速度近辺の定格速度で運転されている時の 2 次電流は、誘導電動機の基本式から、

$$I_2 \cong \frac{\omega_0 T}{3V_1} \quad (\text{A}) \dots\dots\dots (9)$$

である。ただし、

- ω_0 : 同期角速度
- V_1 : 電源電圧
- T : 負荷トルク

(8) 式と (9) 式から、電源電圧と銅損の関係は

$$W_c \cong (r_1 + r_2) \frac{\omega_0^2 T^2}{3V_1^2} \quad [\text{W}] \dots\dots\dots (10)$$

すなわち、負荷トルクが電源電圧の変動の前と後で変化しないとすると、銅損は電圧の 2 乗に反比例することとなる。

一方、鉄損 W_i は、回転磁界により鉄心中の磁束が変化するとき発生する損失で、渦電流損 W_c とヒステリシス損失 W_h とからなる。渦電流損失は、鉄心の鉄板の厚み d の 2 乗、および磁束密度 B の 2 乗に比例し、ヒステリシス損失は Steinmetz の研究によれば、周波数 f に比例し磁束密度の 1.6 乗に比例するといわれている。しかし、最近の鉄板は珪素鋼板が使用されるので、相当高い磁束密度が取られるから、ヒステリシス損失も磁束密度の 2 乗に比例するとみるのが实际的である。ここで、 fB は電圧に比例するから、鉄損 W_i は、

$$W_i = W_c + W_h = k_1 (dfB)^2 + k_2 fB^2 = V_1^2 \left(k_1' + \frac{k_2'}{f} \right) \quad [\text{W}] \dots\dots\dots (11)$$

- k_1, k_1' : 渦電流損を表す定数
- k_2, k_2' : ヒステリシス損を表す定数

となる。

電動機の損失の大部分が鉄損と銅損であることから、仮に全損失を鉄損 W_i と銅損 W_c

の和とすると全損失 W は、式 (10) と式 (11) から次式となる。

$$W = \left(k'_1 + \frac{k'_2}{f} \right) V_1^2 + (r_1 + r'_2) \frac{\omega_0^2 T^2}{3V_1^2} \quad [\text{W}] \quad \dots\dots\dots (12)$$

全損失 W が最小となる電源の電圧 V は、 $dW / dV_1 = 0$ の条件から求められ次式となる。

$$V = 4 \sqrt{\frac{(r_1 + r'_2) \omega_0^2}{3 \left(k'_1 + \frac{k'_2}{f} \right)}} \cdot \sqrt{T} \quad [\text{V}] \quad \dots\dots\dots (13)$$

上式から、損失最小となる電源電圧は、 \sqrt{T} に比例するから、負荷率が低くなるにつれて低下する。

Figure 8.15 は、電源電圧に対する銅損と鉄損の特性の概念図を表したものである。トルクは負荷の反抗トルク T_i と釣り合っているから負荷率とみてよい。したがって、銅損曲線 W_c は負荷率とともに上昇し、鉄損は負荷率に無関係な値となる。損失最小点は、鉄損曲線 W_i と銅損曲線 W_c の交点であるから、負荷率が大きい場合は電源電圧を上昇した点になり、逆に負荷率が小さい場合は電圧を低下させた点となる。

Figure 8.15 Tendency of Loss against Applied Voltage

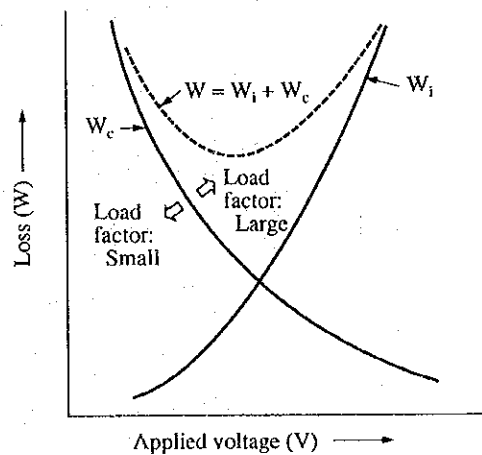


Figure 8.16 は、実際の電動機で電源電圧を変化させた場合の効率曲線の 1 例である。図に示すように、電圧変動時の効率は負荷率によって異なった傾向を示す。負荷率が高い場合は、定格電圧で最高の効率を示し、逆に負荷率が低い場合は、電圧が上昇するにつれて効率が低下する。

Figure 8.16 Example of Efficiency during Voltage Fluctuation of Induction Motor

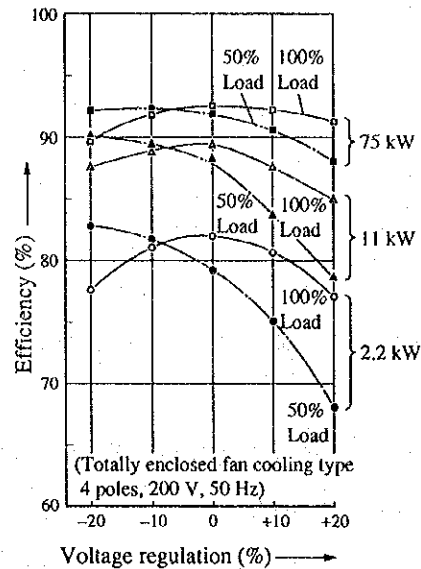


Figure 8.17 は、電源電圧が変動した場合の誘導電動機の力率変化を示したものである。誘導電動機の励磁電流は電源電圧に比例するので、電圧が低下するほど力率は上昇する。

Figure 8.17 Example of Power Factor during Voltage Fluctuation of Induction Motor

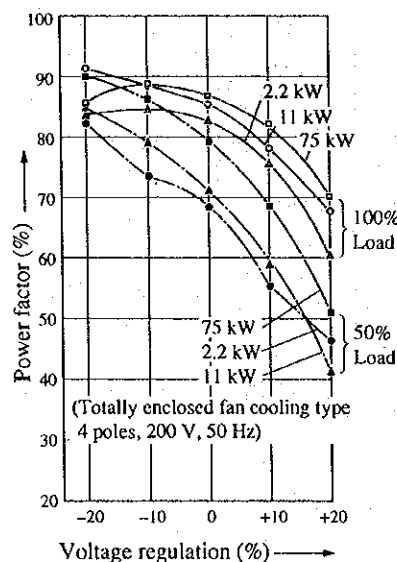


Table 8.7 は、いままで述べたことを一覧表にまとめたものである。

以上、電源電圧の変動時の効率および力率に着目して述べてきたが、実際に現場で運転されている電動機に適用するときには、次の点を併せて検討すべきである。

Table 8.7 Effect of Voltage Fluctuation on Induction Machine

		Voltage fluctuation		
		90 % Voltage	Proportional relation	110 % Voltage
Starting torque		-19 %	V^2	+21 %
Stalling torque				
Synchronous speed		Remain unchanged	Constant	Remain unchanged
% slip		+23 %	$1/V^2$	-17 %
Full-load speed		-1.5 %	-	+1 %
Efficiency	Full load	-2 %	-	Slightly increased
	3/4 load	Actually no change	-	Actually no change
	1/2 load	+1 ~ 2 %	-	-1 ~ -2 %
Power factor	Full load	+1 %	-	-3 %
	3/4 Load	+2 ~ 3 %	-	-4 %
	1/2 Load	+4 ~ 5 %	-	-5 ~ -6 %
Full-load current		-11 %	-	-7 %
Starting current		-10 ~ -12 %	V	+10 ~ 12 %
Full-load temperature rise		+6 ~ 7 °C	-	-1 ~ -2 °C
Magnetic noise		Slightly decreased	-	Slightly increased

(1) 電源電圧を下げる場合の検討

電源電圧を定格電圧より下げて運転する場合は、Table 8.7 に示すとおり、始動トルク、最大トルクも電圧の 2 乗で減少するので、始動時の加速トルクおよびピーク負荷の値をチェックする必要がある。

負荷電流は全損失が減少しても、電圧に反比例して増加するから、電動機の銅損が増加して巻線の温度上昇、配電線の線路損失の増加などがあるので、注意が必要である。このことから、電源電圧の下限は電動機の定格電流を超えない範囲で決定すべきである。

(2) 電源電圧を上げる場合の検討

一方、電源電圧を定格電圧より上げて運転すると、磁束の飽和により励磁電流が著しく増大し、力率悪化、磁気騒音の異常発生と鉄損の増加による鉄心の異常加熱が発生するなどの問題がある。また電動機の実出力トルクも電圧の 2 乗で増加するので、過大トルクで機械が壊れないかチェックする必要がある。

(3) 設備全体の検討

通常、電動機は同一配電系統に多数接続し運転され、しかも個々の電動機は同じ負荷条件で運転されていることはまれである。ある電動機は定格負荷近辺で運転されており、他の電動機は 50 %以下の負荷で運転されている場合もあり得る。このような状態では、一義的に電源電圧を決定することはできないので、設備全体の検討が必要である。

- a. 軽負荷で運転されている電動機が圧倒的に多い場合は、配電電圧を下げて数の少ない重負荷の電動機を 1 ランク上の容量に取り替える。この場合、遊休電動機があればそれを適用するか、または設備相互間での入れ替えを検討する。
- b. 重負荷で運転されている電動機が圧倒的に多い場合は、配電電圧は電動機の定格電圧値を保ち、数の少ない軽負荷電動機の実出力容量を 1 ランク下げる。この場合も、遊休電動機の適用、設備相互間での入れ替えを検討する。
- c. 大容量機が重負荷で運転されていて、他の小容量機が軽負荷で運転されている場合は、大容量機の配電系統を別に分けて、軽負荷電動機群の電源電圧を下げる。

以上のほかに、いろいろの組み合わせが考えられるので、それぞれで検討する必要がある。いずれにしても、取り替えの費用、および一部の電動機の新設を伴う場合は、その投資額と効率改善による省電力料金との兼ね合いで決定すべきである。

なお、電圧管理の面で気をつけねばならないのは、電圧の不均衡の問題である。

3 相交流電動機に不平衡電圧が加えられると、零相分電流、正相分電流および

逆相分電流の不均衡電流が流れる。このうち、零相分電流はその合成起磁力が零となるので、2次巻線には誘起電圧を発生せず、このためトルクも発生しないが、逆相分による磁界は正相分電流による磁界と反対の方向に同期速度で回転する。このためすべりをSとすると2次巻線には $\omega_0(2-S)$ の周波数を持つ電圧を誘起し、電流が流れてトルクを発生する。このトルクを逆相分トルクという。

この逆相分トルクは、電動機を逆方向に回転させようとするので、銅損が著しく増加する。この結果、電動機の効率が低下する。

このことから、電源電圧の不均衡率は極力小さくする必要があり、1~2%以内で管理すべきである。不均衡電圧は3相交流の電源で、単相負荷をとるため各相の電流がアンバランスとなり、各相の電圧降下が異なるため発生する。このため、単相負荷は各相がバランスするように、うまく電氣的に配置することが大切である。

8.2.2 空転の防止と起動損失の低減

電動機は必ず相手機械と連絡されているので、空運転で消費される電力は電動機単体の場合の約2~3倍になる。したがって、不要時電動機を停止することは省電力のため、重要なことである。またこの場合、電動機の冷却ファンや直流機の界磁なども止めるのが望ましい。この際注意すべきことは、以下のとおりである。

- (1) 多頻度始動による電動機の劣化、出力低下があまり問題とされない範囲に限ること。

100 kW以上の大容量機や、大きいGD²を負荷に持つ(例えば、送風機など)電動機の場合は、電動機のメーカーに相談した方がよい。

- (2) 始動時の電力量が、空転時の電力量を上まわらないこと

一般に電動機を再始動する際には、始動方法によっては、相当大きな損失を発生するので注意が必要である。以下、誘導電動機の起動損失とその低減対策について述べる。

a. 3相誘導電動機の起動損失

滑り S_1 の状態から S_2 の状態まで加速するときの電動機の内部損失 W_l は、一般に次式で表わされる。

$$W_l = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4} \omega_0^2 (S_1^2 - S_2^2) \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) \frac{T_m}{T_m - T_l} \dots\dots\dots (14)$$

停止の状態から同期速度に達するまでの損失は $S_1 = 1$ 、 $S_2 = 0$ として、

$$W_l = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4} \omega_0^2 \left(1 + \frac{r_1}{r_2'}\right) \frac{T_m}{T_m - T_l} \dots\dots\dots (15)$$

- r_1 : 誘導電動機の 1 次抵抗 (Ω)
- r_2' : 誘導電動機の 2 次抵抗 (1 次側換算値) (Ω)
- T_m : 誘導電動機の加速トルク (平均値) ($N \cdot m$)
- T_l : 加速中の負荷の平均トルク ($N \cdot m$)
- ω_0 : 同期角速度

b. 起動損失の低減法

(15) 式から分かることは、次のようにすれば起動損失が低減するということである。

1) 電動機の発生トルクを大きくして、始動する。

運転効率の面からみた場合は、電動機の発生トルクをできるだけ大きくして始動することが望ましい。始動電流を抑制するために減電圧始動、あるいは減電流始動を行うと、発生トルクが低下してかえって損失が増大する。したがって、電源の事情の許す限り直入起動を行うことが望ましい。

2) 始動時 2 次抵抗を大きくする。

巻線形誘導電動機を使用して、始動時に大きな外部抵抗を挿入すると、外部抵抗を含む電動機全体の損失が大幅に低減されるだけでなく、回転子側の発熱および始動電流を抑制することができる。

3) 同期角速度 ω_0 を変化させる。

誘導電動機の同期角速度 ω_0 を電動機の速度の上昇とともに変化させると、

始動時の損失を大幅に低減できる。

この ω_0 を変えるには、極数変換電動機を使用して同期角速度をステップ状に切り換える方法と、電源の周波数を速度とともに連続的に変化させる方法がある。

以下、2 段の極数変換誘導電動機を例にとり、これを説明する。まず最初に低速側巻線で始動して低速巻線 (極数: P_L) の同期角速度 ω_{OL} まで加速し、次に高速巻線側に切り換えて高速巻線 (極数: P_H) 同期角速度 ω_{OH} まで加速する。この間の電動機の全損失 W_{2l} を求めてみる。説明を簡単にするため (14) 式において、 $r_1=0$ 、 $T_l=0$ とする。

$$W_{2l} = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4} \omega_{OL}^2 (1^2 - 0^2) + \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4} W_{OH}^2 \left\{ \left(\frac{W_{OH} - W_{OL}}{W_{OH}} \right)^2 - 0^2 \right\} \quad [J] \quad (16)$$

となる。ここで、

$$\text{極数比} \quad n = \frac{P_L}{P_H} = \frac{W_{OH}}{W_{OL}}$$

とすると、

$$W_{2l} = \frac{1}{2} \cdot \frac{GD^2}{4} \omega_{OH}^2 \left(1 + \frac{2}{n^2} - \frac{2}{n} \right) \quad [J] \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。初めから高速巻線のみで始動した時の損失に対する低減率を k_a とすると、 k_a は次式で表わされる。

$$k_a = \frac{\text{極数変換で始動した時の損失}}{\text{高速巻線でのみ始動した時の損失}} = 1 + \frac{2}{n^2} - \frac{2}{n} \quad [J] \quad \dots\dots\dots (18)$$

上式で損失が最小となる極数比は、 $dK_a/dn=0$ の条件で求められ、 $n=2$ の時に損失が2分の1となる。さらに極数切り換えの段数を多くすれば、損失はさらに低減する。

空転を防止するためには次のような対策が有効である。

- ・ 空転警報器を設置する

- ・ 工程、機器の自動化を図る
- ・ 機器のレイアウト、治工具を改善し、処理事物取扱いの待ち時間の減少を図る。

8.2.3 誘導電動機の回転数制御

8.1.9 項で述べたように回転数制御方式には Figure 8.13 に示すものがある。

このうち、既設設備の改造という観点からみた場合、実現性のあるのは、1 次周波数制御方式 (VVVF) であるので、これについて説明しておく。

1 次周波数制御方式は、周波数変換器 (インバータ) を使用して電動機の 1 次電圧と周波数を同時に制御し、同期速度を変える方式である。

この制御方式は大別すると他制式と自制式があり、このうち他制式は、電動機の回転速度、トルクなどの状態変化に無関係に設定器の周波数指令に基づいて変換器の周波数が決定される開ループ制御をいう。一方、自制式は電動機の状態変化に応じて、変換器の周波数が規制される閉ループ制御をいう。

他制式には、電動機の 1 次電圧 V と周波数 f の比 (V/f) を一定とする V/f 一定制御がある。自制式にはすべり周波数制御、あるいはベクトル制御がある。

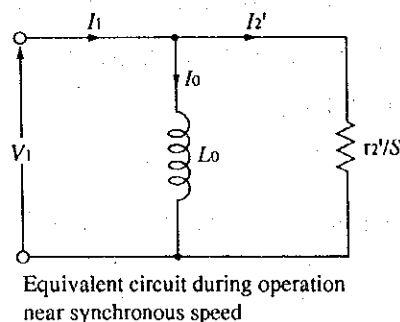
誘導電動機の 1 次周波数制御時の特性式は、次の点に注目すれば近似式と簡単な等価回路が得られる。

励磁回路は励磁インダクタンス L_0 で代表する。

また、この方式では、全回転速度制御領域で同期速度近辺で運転されているから、 $S \approx 0$ の条件で特性式を近似する。

この条件で作成した簡易等価回路を Figure 8.18 に示す。

Figure 8.18 Simple Equivalent Circuit of Induction Motor at Slip ≈ 0



以上のことから、特性式の近似式は次式で表すことができる。

$$I_1 = I_0 + I_2 \quad [\text{A}] \dots\dots\dots (19)$$

$$I_0 = \frac{V_1}{\omega_0 L} \quad [\text{A}] \dots\dots\dots (20)$$

$$I_2 = \frac{S V_1}{r_2'} = \frac{S \omega_0}{r_2'} \cdot \frac{V_1}{\omega_0} \quad [\text{A}] \dots\dots\dots (21)$$

$$T = \frac{3 V_1^2}{\omega_0 r_2'} = 3 \frac{S \omega_0}{r_2'} \left(\frac{V_1}{\omega_0} \right)^2 \quad [\text{N} \cdot \text{m/rad}] \dots\dots\dots (22)$$

一方、磁束 ϕ は電圧係数を K_v とすると、

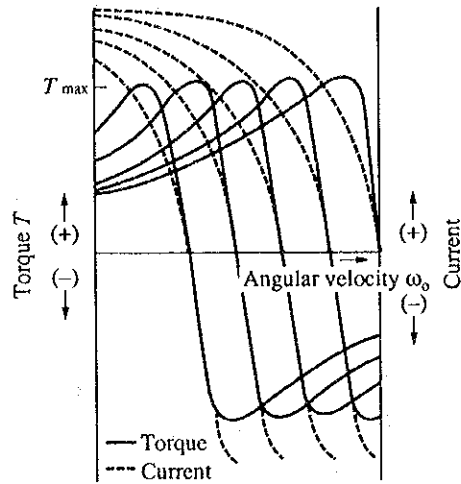
$$\phi = \frac{V_1}{K_v \omega_0} = K_1 I_0 \quad [\text{Wb}] \dots\dots\dots (23)$$

ただし、 $K_1 = \frac{L_0}{K_v}$

の関係となる。

上式の特性式から電圧 V_1 と周波数 ω_0 の比を一定とする制御 (V/f 一定制御) を行うと、電動機の発生トルク、電流 I_0 、 I_2 および磁束 ϕ はともにすべり周波数 $S \omega_0$ が一定のもとで一定となる。Figure 8.19 はこの時のトルク速度特性曲線を示したものであり、最大トルク T_{\max} は速度 ω_0 に対し一定となる。

Figure 8.19 Torque-Speed Characteristics of V/f Constant Control



VVVF システムとして通常インバータが用いられるが、インバータによる回転数制御の特徴を挙げると次のとおりである。

- (1) 既設のかご形誘導電動機をそのまま簡単に回転数制御できる。
- (2) 広範囲に効率良く無段階の可変速ができる。
- (3) 電源力率が良好で、電動機始動時の電源容量も小さくてよい。
- (4) 電子的に正逆切換え運転ができる。
- (5) 高頻度の起動停止ができる。
- (6) 電氣的に制動がかけられる。
- (7) 環境の悪い場所に設置された電動機の回転数制御に最適である。
- (8) 多数台の電動機を一括して回転数制御ができる。
- (9) 簡単に定トルク特性、定出力特性が得られる。

インバータ導入に伴う問題点は、高調波によるトラブル、汎用電動機を速度制御することによるトラブル、商用・インバータ運転切り換えによるトラブルが挙げられる。Table 8.8 にインバータ導入に伴うトラブルと対策を示す。

Table 8.8 Troubles and Measures Accompanied with Introduction of Inverter

No.	Trouble	Measures
I Trouble by harmonic waves		
1	• Metallic sound is generated from motor.	• Insert an AC reactor between inverter and motor.
2	• Condensive capacitor or fluorescent lamp is heated.	• Insert an AC reactor to the receiving side.
3	• Input transformer generates heat or causes vibration.	
4	• AM broadcast on radio cannot be heard due to noise.	• Install a noise filter.
5	• Electronic devices such as measuring instruments cause error.	• Place an inverter in an iron case and earth the case. • Earth the motor frames. • Place input/output cables in an iron pipe and earth the pipe.
6	• Earth leakage breaker operates erroneously.	• Shorten connecting wire between inverter and motor. • Use breaker dedicated to inverters.
II Troubles by speed control of general purpose motors		
7	• Resonance occurs between motor and the other machine. As a result vibration and noise are generated.	• Use tire-type coupling between motor and the other machine.
8	• Self-cooling efficiency of motor lowers. Temperature rises.	• Fit a forced cooling fan.
III Troubles by operation switch between direct and inverter operations		
9	• Life of relay shortens due to frequent switching.	• Review control method.
10	• The device stops due to instantaneous power cut when switching.	• Check sequence control circuit.
11	• Adjust time of motor after switching is too long.	• Increase the capacity of inverter.

8.2.4 その他の対策

現在の設備能力の診断を行ってみて、設備能力が生産規模に比べ過大であるときに、

回転機や設備出力を落すことも省エネルギーとして重要である。例えば、電動機はそのまま使用して動力伝達機構（プーリの径、あるいはギヤの変速比など）を変えることにより、負荷を動かす動力を低減することができる。また予備電動機がある場合には、より小形の電動機、あるいは回転数の低い電動機に取り替えることによっても省エネルギーを図ることができる。

8.2.5 回転数制御の計算例

実際の計算例として、吐出量 10.3 m³/min、揚程 62 m、電動機出力 230 kW のポンプについて、吐出量 9.3 m³/min で運転しているものを 4.2 m³/min まで絞るのに、吐出弁制御で行なった場合と一時周波数制御で行なった場合の省電力効果を比較した例を、Table 8.9 に示す。

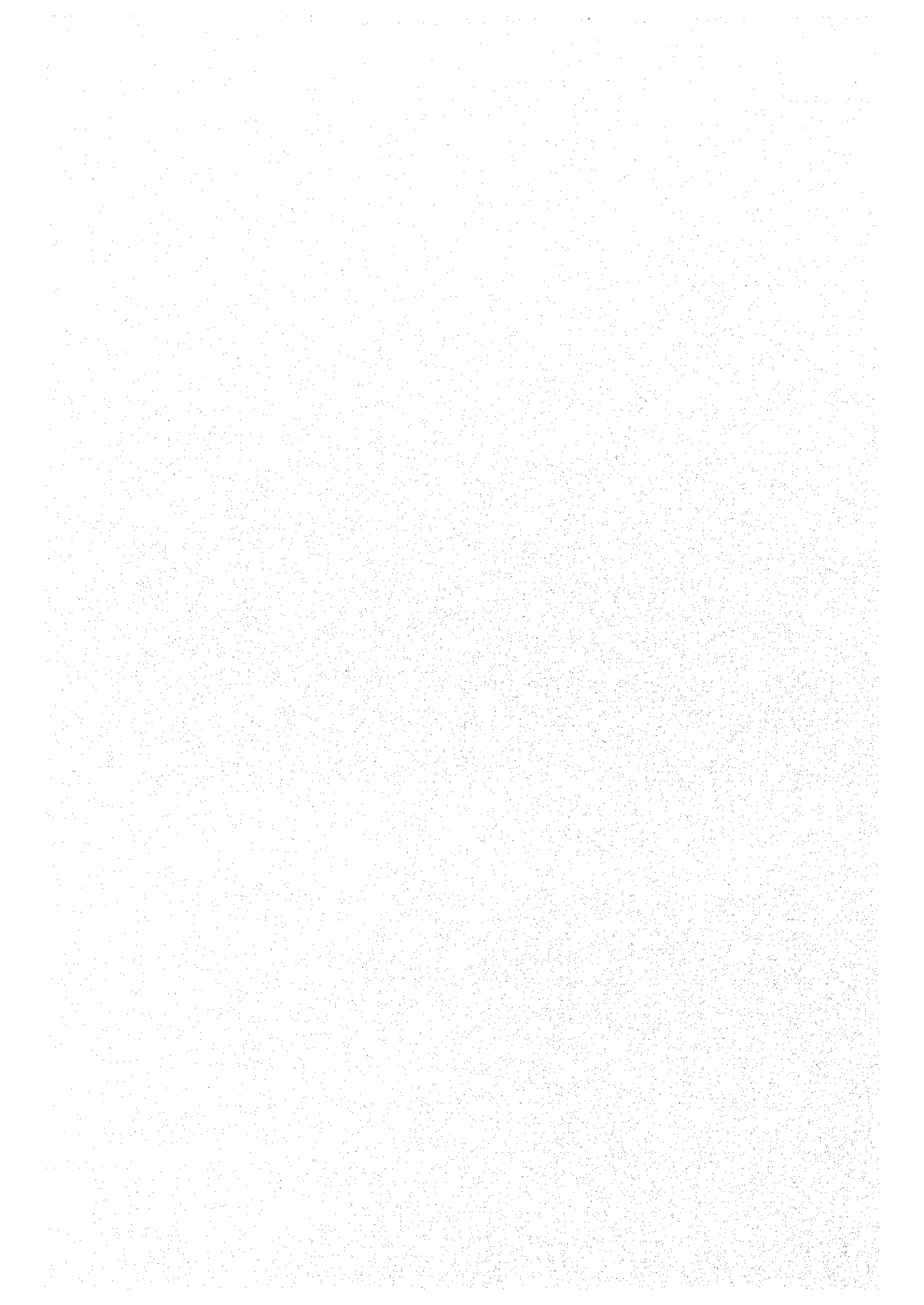
Table 8.9 Comparative Example for Calculating Energy Conservation Effects

Method	Discharge volume [m ³ /min]	Pump head [m]	Rotating speed [rpm]	Pump efficiency [%]	Shaft power [kW]	Power consumption [kW]	Power saving [kW]
Actual state	9.3	67	1,485	61	167	175	—
Discharge valve control	4.2	75	1,485	39	132	139	Δ 36
Primary frequency control	4.2	42	1,114	47	61	68	Δ107

この例では、吐出量の削減が同一量であっても省電力効果は一時周波数制御の方が吐出弁制御の 3 倍になっている。このように、省電力効果を比較すると回転数制御が格段に優れているが、投資金額は吐出弁制御の方が大幅に少ないのが一般的である。

これらを総合的に考えた上での投資効果から、最良の省電力方法を選択するとよい。

9. 変圧器の省エネルギー



9. 変圧器の省エネルギー

変圧器の省エネルギーを図るには、次のことに留意することが必要である。

- (1) 変圧器の効率
- (2) 変圧器が複数基ある場合、その効率的運転基数
- (3) 変圧器のタップ選定

9.1 変圧器の選択

9.1.1 変圧器の効率は、次式で表わされる。

$$\eta = \frac{np \cos \theta}{np \cos \theta + W_i + n^2 W_c} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

- η : 効率 (%)
- n : 負荷率
- p : 定格容量 (kVA)
- $\cos \theta$: 負荷力率
- W_i : 鉄損
- W_c : 銅損

なお、変圧器には上記鉄損と銅損のほかに、誘電体損や漂遊負荷損があるが、測定困難であり、また微少であるので無視する。

また、定格負荷時の銅損 W_c と鉄損 W_i の比を損失比 α と呼ぶ。

$$\alpha = \frac{W_c}{W_i} \dots\dots\dots (2)$$

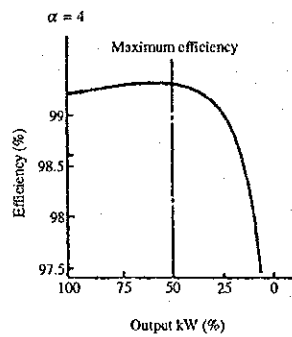
損失比はTable 9.1に示すように、一般に 2~5 である。ただし、後述の省電力形変圧器では10を超えるものもある。

Table 9.1 Efficiency of 3 Phase High Voltage Medium Capacity Transformer

Primary 6.6/3.3 kV, Secondary 400/200 V

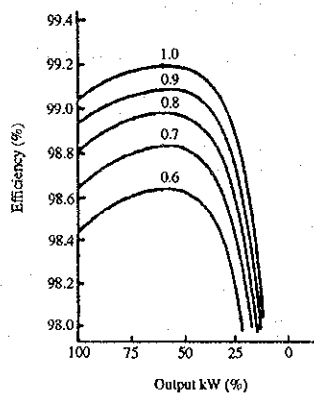
Rated capacity kVA	Company A				Company B			
	Efficiency (%)	Iron loss (kW)	Copper loss (kW)	Loss ratio	Efficiency (%)	Iron loss (kW)	Copper loss (kW)	Loss ratio
300	98.2	0.9	4.6	5.1	97.9	2.2	4.2	1.9
500	98.27	1.3	7.5	5.8	98.1	2.7	7.0	2.6
750	98.36	2.0	10.5	5.3	98.2	3.2	10.6	3.3
1,000	98.52	2.5	12.5	5.0	98.2	3.5	14.8	4.2
1,500	98.62	4.5	16.5	3.7	-	-	-	-
2,000	98.69	6.0	20.5	3.4	98.3	7.3	27.3	3.7

Figure 9.1 Transformer Efficiency (Example)



また変圧器の効率は、(1) 式から負荷の力率によっても変わり、力率が悪くなると効率は低下する。この1例をFigure 9.2に示す。

Figure 9.2 Relation between Power Factor and Efficiency (Example)



Note: Figure indicates power factor.

変圧器の容量による効率の差をFigure 9.3、Figure 9.4に示す。

Figure 9.3 Example of Efficiency of 50 Hz Single Oil Immersed Transformer

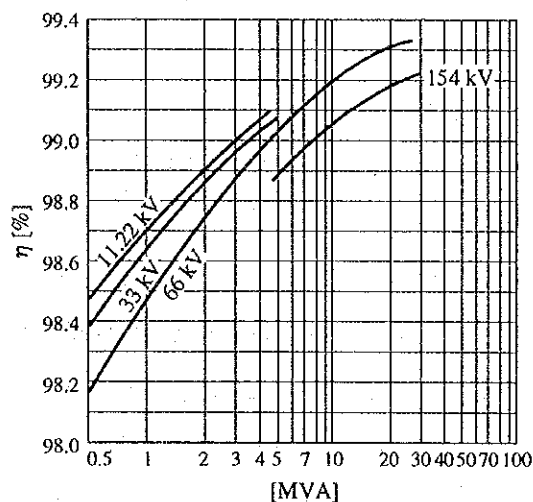
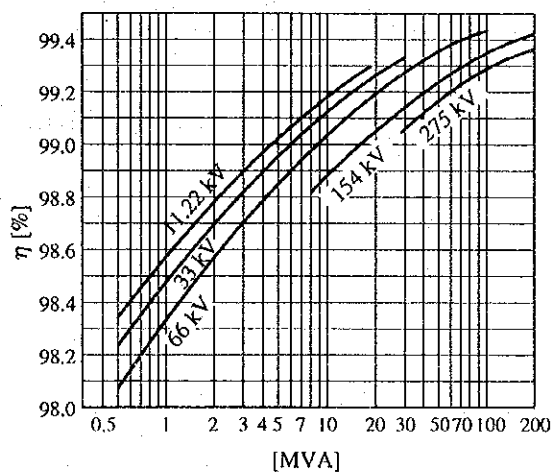


Figure 9.4 Example of Efficiency of 50 Hz 3 Phase Oil Immersed Transformer



9.1.2 変圧器の全日効率

変圧器の最高効率点を考えて変圧器を構入したり、運用することももちろん大切であるが、変圧器の負荷は時々刻々変化するので、1日当たりの効率も無視してはいけない。(3) 式に示すものを全日効率と呼ぶ。

$$\text{全日効率} = \frac{\text{1日の出力電力量 [kWh]} \times 100\%}{\text{1日の出力電力量 [kWh]} + \text{1日の損失電力量 [kWh]}} \dots\dots\dots (3)$$

毎日の負荷変動のパターンがほぼ同じならば、全日効率が最高となるような運転方法を考えれば、損失電力量は少なくなる。

9.1.3 省エネルギー形変圧器

(1) 低損失形電磁鋼板変圧器

従来のけい素鋼板に比較して鉄損の小さい、レーザー照射により磁区を細分化した電磁鋼板を使用し、更に電流密度を低くすることにより付加損を低減した変圧器である。Table 9.2に従来の汎用変圧器との損失などの比較例を示す。負荷率が特に低くない限り、固定費と運転費の合計費用で考えると b.で述べるアモルファス鉄心変圧器と競合可能で、中型以上の変圧器として採用されている。最近の研究結果では鉄損についてもアモルファス磁性体とほぼ同程度の電磁鋼板が開発されており、将来の工業化が期待されている。

Table 9.2 Comparisons between a Low Loss Type Transformer and a General-purpose Transformer in Various Specifications (Three-phase, 60 Hz, 500 kVA)

Item	Unit	Low-loss type transformer	General-purpose transformer
No-load loss	W	750	1,090
Load loss	W	5,540	7,000
Efficiency	%	98.75	98.40
Outside dimensions	mm	1,250 × 800 × 1,360	1,280 × 810 × 1,365
Oil amount	L	360	290
Weight	kg	1,540	1,210

(2) アモルファス鉄心変圧器

アモルファス磁性材は、1980年代に電力用変圧器の鉄心として性能試験が実施され、従来のけい素鋼板変圧器より低損失で同等の信頼性を持つことが確認された。アモルファス磁性体を変圧器鉄心に使用する場合の特徴は次の通りである。

(長所)

- ・鉄損がけい素鋼板変圧器の約 6分の 1と小さい。
- ・無負荷電流が小さい。
- ・透磁率が高い。
- ・高周波特性が優れている。

(短所)

- ・飽和磁束密度が低い。
- ・占積率がけい素鋼板の約10分の1と悪い。
- ・焼鈍条件が複雑で、しかも焼鈍すると脆くなる。

以上の特徴からけい素鋼板変圧器に比較して、鉄損は小さいが、材料費が高く、加工費もかかるため、アモルファス変圧器は小型大量生産の変圧器に限定されて製作されている。

同一仕様 (单相、50Hz、30kVA、415V / 210 - 105V) のけい素板変圧器との損失比較例をTable 9.3に示す。またFigure 9.5、Figure 9.6にそれぞれの変圧器の負荷率と損失・高率との関係を示す。

Table 9.3 Comparison of Losses due to Iron Core Material

	Amorphous iron core transformer	Silicon steel plate iron core transformer
No-load loss (W)	21	124
Load loss (W)	427	440
Total loss (W)	448	564

Figure 9.5 Load Factor and Loss/Efficiency of Amorphous Iron Core Transformer

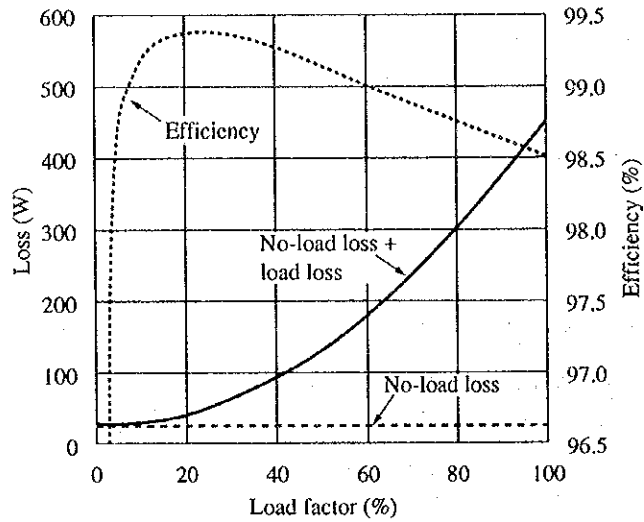
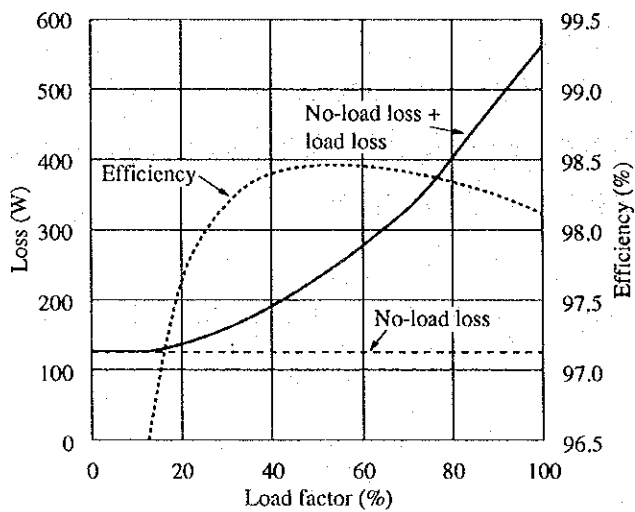


Figure 9.6 Load Factor and Loss/Efficiency of a Silicon Steel Plate Transformer



9.2 変圧器の効率的運転

9.2.1 軽負荷変圧器の停止

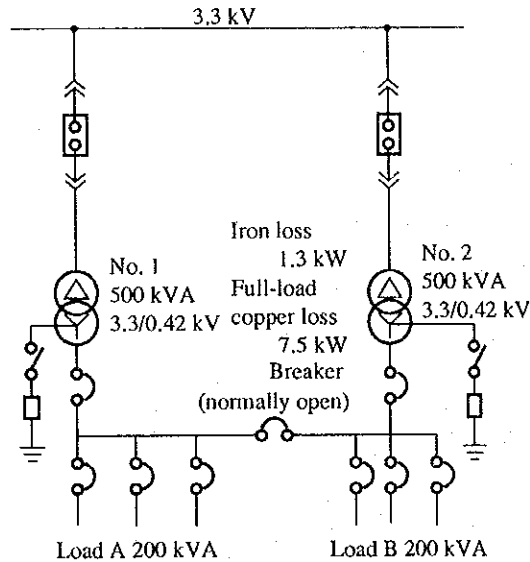
複数の変圧器があり、おのこの負荷率が低い場合は負荷率の低い変圧器を停止し、負荷を統合する方が省電力となる。

ただし場合によっては、停止した変圧器の損失減よりも負荷が増えた方の変圧器の損失が増えて、逆効果となる場合があるので、その都度、次の(例)に示すような計算をして、確める必要がある。

<例> 500 kVAの変圧器が2台ある場合

Figure 9.7のような電源設備において、それぞれの変圧器の負荷率が40%の場合、1台の変圧器を停止した場合のメリットを計算する。特性はTable 9.1のA社の値を使う。

Figure 9.7 Method to Use Two 500 kVA Transformer



現状ではNo.1変圧器、No.2変圧器とも、

鉄損 = 1.3 [kW]

銅損 = 全負荷銅損 \times $\left(\frac{\text{負荷率}}{100}\right)^2 = 7.5 \times \left(\frac{40}{100}\right)^2 = 1.2$ [kW]

したがって、

全損失 = 2 (1.3 + 1.2) = 5 [kW]

No.1変圧器停止後では、

No.2変圧器の鉄損 = 1.3 [kW]

No.2変圧器の銅損 = 全負荷銅損 \times $\left(\frac{\text{負荷率}}{100}\right)^2 = 7.5 \times \left(\frac{80}{100}\right)^2 = 4.8$ [kW]

全損失 = 1.3 + 4.8 = 6.1 [kW]

となり、1台の変圧器を停止したほうが 1.1 kW損失が多くなる。

9.2.2 変圧器の台数制御

同じ定格の変圧器を並列運転している場合には、負荷の大小によって運転台数を増減することにより、総損失を軽減することができる。

いま、N台の変圧器を並列運転したときの総合損失は、次の式で表わされる。

$$W_N = N \left\{ W_i + \left(\frac{P_L}{NQ} \right)^2 W_c \right\} \quad (\text{kW})$$

W_N : 総合損失 (kW)

W_i : 1台の変圧器の鉄損 (kW)

W_c : 1台の変圧器の銅損 (kW)

P_L : 負荷容量 (kVA)

N : 台数

Q : 1台の変圧器容量 (kVA)

(N-1) 台の変圧器を並列運転したときの総合損失は、次の式で表わされる。

$$W_{(N-1)} = (N-1) \left\{ W_i + \left(\frac{P_L}{(N-1)Q} \right)^2 W_c \right\} \quad (\text{kW})$$

(N-1) 台の変圧器の並列運転の方が損失が少ない条件は、 $W_N > W_{(N-1)}$ である。

ゆえに P_L は次の式で表わされる。

$$P_L < \sqrt{\frac{N(N-1)}{\alpha}} \times Q \quad (\text{kVA})$$

ただし、

$$\alpha = \frac{W_c}{W_i}$$

例えば、損失比 $\alpha = 3$ で 500 kVA の変圧器 3 台を運転している場合、

$$\sqrt{\frac{N(N-1)}{\alpha}} \times Q = \sqrt{\frac{3 \times 2}{3}} \times 500 = 707 \text{ kVA}$$

すなわち、負荷が 707 kVA 以下になったら、変圧器の運転台数を1台減らして、2台にした方が省エネルギーになる。

9.2.3 夜間、休日の変圧器の停止

夜間や休日に操業しない設備や工場などでは、夜間や休日でも停電できない負荷だけがある変圧器にまとめ、不要の変圧器を停止することにより省電力を図ることができる。しかし、昼間と夜間の電力差があまりない場合はメリットはない。

9.3 変圧器のタップの選定

低圧用変圧器および幹線には多くの負荷があり、負荷のいずれにも定格に近い電圧を供給することは容易ではないが、変圧器のタップの適正化を図って、これにできるだけ近づくよう努力することが大切である。

また、工場において電動機が使われている状態をみると、全負荷運転の場合は少なく、おおむね50 %から80 %負荷程度のものが多い。電圧変動と誘導電動機の負荷状態との関係は、Table 9.4およびTable 9.5に示すとおりである。変圧器の負荷がすべて電動機である場合、これらを参考にしてタップを選定するのが望ましい。

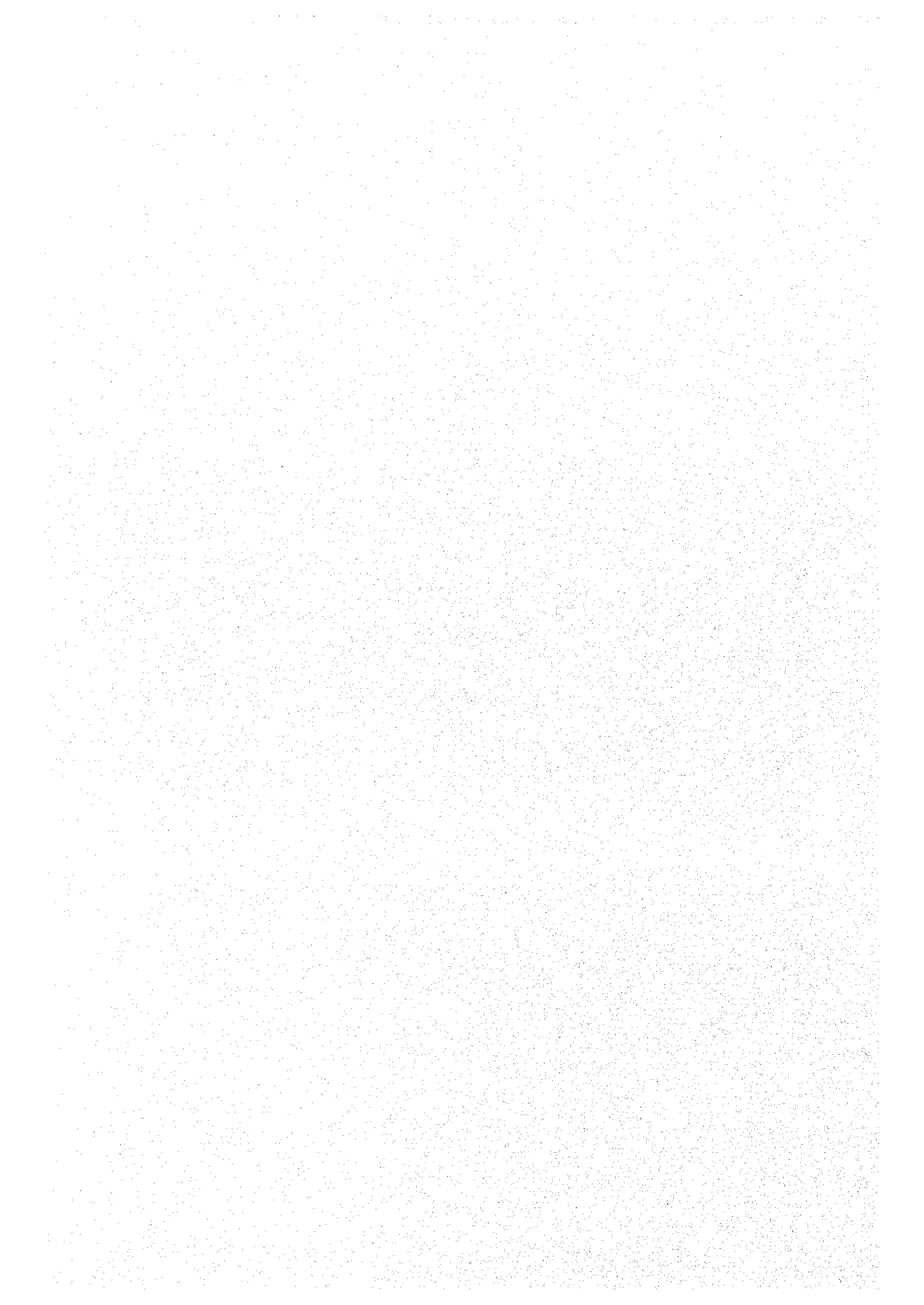
Table 9.4 Effect of Voltage Fluctuation on Induction Motor

	Voltage fluctuation	
	90 % Voltage	110 % Voltage
Starting torque, Maximum torque	-19 %	+21 %
Synchronous speed	Remain unchanged	Remain unchanged
% Slip	+23 %	-17 %
Full-load speed	-1.5 %	+1 %
Efficiency (Full-load)	-2 %	Slightly increased
Power factor (Full-load)	+1 %	-3 %
Full-load current	+11 %	-7 %
Starting current	-10 ~ -12 %	+10 ~ +12 %
Full-load temperature rise	+6 ~ +7 °C	-1 ~ -2 °C
Magnetic noise	Slightly decreased	Slightly increased

Table 9.5 Relation between Voltage Fluctuation and Loading State of Induction Motor

		Voltage fluctuation	
		90 % Voltage	110 % Voltage
Efficiency	Full load	-2 %	Slightly increased
	3/4 Load	Actually no change	Actually no change
	1/2 Load	+1 ~ +2 %	-1 ~ -2 %
Power factor	Full load	+1 %	-3 %
	3/4 Load	+2 ~ +3 %	-4 %
	1/2 Load	+4 ~ +5 %	-5 ~ -6 %

10. 工場暖房における省エネルギー



10. 工場暖房における省エネルギー

10.1 大空間工場の空調

大空間とは一般にその容積が大きな室と解される。しかし空調技術の上からは、容積が大きいことよりも天井が高いことの方が問題となる場合が多い。ここでは大空間を「天井が高くかつ大容積である建築空間」とし、天井高さの目安を4ないし5m以上、容積を2,000m³以上程度と考える。

近代的な工場では大空間を持つものが多い。これには以下のような理由が考えられる。

- ・ 生産規模の拡大 (大量生産) が大空間を必要とした。(例: 紡績工場)
- ・ 生産工程の連続化・自動化が大空間を必要とした。(例: 自動車組立工場)
- ・ 生産設備の大型化が大空間を必要とした。(例: 大型機械組立工場・航空機工場)
- ・ 発熱・発塵などの生産に伴う各種負荷の増大が大空間を必要とした。(例: 鋳物工場)

空調から見た大空間の特徴は、上下の温度のアンバランスを生じやすい点である。

10.1.1 生産設備の特徴

大空間施設の代表的なものである機械工場を例にとって工程と設備からみた空調の特徴を述べる。

(1) 鋳造・鍛造・焼入れ加工

工場内には、金属を溶かす炉や鋳物に着いたバリを除去する仕上げ機、砂を再使用するためのふるい機などがある。工場内は全般に発塵と発熱が多く、作業環境が悪化しがちである。作業環境の改善には、換気や局所排気が一般的であるが、溶解炉、鋳造や焼入れ炉などの近くでは発煙と発熱があるので、局所排気、遮へい板による放射熱の遮断などとともに作業者のためにスポットクーリングを行う場合が多い。

いずれにせよ、ここでの空調の主な目的は作業環境の改善であり、最近では、公害防止と作業環境の改善の目的から工場を無窓化し、主要部分に空調を実施するケースもある。

(2) 機械加工

機械加工工場では、金属の成型・切断・切削・研磨などが機械で行われる。自動車部品の加工工場などのように大空間の大規模工場も多い。これらの工場では、広いスペースに加工用の工作機械が並び、それらからの発熱、切削湯の蒸発、ミストの発生、切削や研磨の際の発じんなどがある。

このため一般に換気や局所排気が必要であるが、作業環境の改善を目的として空調を実施する場合も多い。また、NC 工作機械や FMS (フレキシブル生産システム)などの高度の機械加工のために環境条件の確保が必要な場合もある。本格的な自動車部品の工場などでは、自動化の結果として作業員数が少なくなっており、点在する作業員を如何に効率よく空調するか、ライン変更に伴う作業位置の変更にいかに対応するかが問題となっている。

精密機械工場では、1 μ m 以下の高精度の加工が行われるとき、精度維持のために一定の温度の維持が必要である。また水蒸気凝縮による発錆と腐食、静電気の防止のために適当な湿度の維持も必要である。このような精密機械工場では、恒温・恒湿・防塵が要求されるので全体を無窓工場とし厳格な空調を実施する場合が多い。

(3) 組立て

一般に組立工場では加工工場のような発塵やミストの発生は少ないが、電気溶接や半田付けの工程があるときはヒュームの発生がある。このような場合には局所排気が必要となる。

組立工程は機械加工工数の 65 から 70%を占めるといわれており、機械工場の主要部分であり、最近では搬送ロボットなどの導入によって作業員の少ない工場も多くなってきているが、一般的には他の工程に比べて作業員数が多い。

小型の電子・電気機器の組立工場では、作業員の密度が高かったり、生産上の理由などから全体空調を実施するケースが多いが、自動車の組立工場のように作業員のほとんどが組立てラインに集中しているような場合には、その周囲だけを局部的に空調する方法もとられる。精密機械の組立工程では、生産上の理由から恒温・恒湿かつ空気清浄度を求められることも多い。

(4) 塗装

塗装工程では、塗料を噴射して塗装物に付着させるが、周囲の温湿条件がこのときの仕上がり状態や生産効率におおきく影響するので、厳格な空調を行う場合も多い。また塗装工程では溶剤の蒸発や塗装粒子の発塵があるため、安全上や品質上の問題を避けるため気流分布に工夫が必要である。塗装工程の排気はそのままでは排気できないので、エアワッシャなどを通じて処理する必要がある。

(5) 検査・計測

製品の検査・計測の内容は多様であるが、自動車工場のシャシー、ダイナモなどの特殊な場合を除けば、一般に発塵や排ガスなどの負荷が少ない。ただし各種測定で周囲の温湿度が影響する場合には、工業標準温度が定められている。小さな製品の検査・計測のために大きな空間を恒温・恒湿に維持することは不経済なので、この場合は恒温槽やチャンバを室内に設置して、その中で必要な温湿度条件を確保し、周囲は作業者を対象に一般空調を実施するケースが多い。

10.1.2 大空間生産施設の特徴と空調設備計画

(1) 大空間生産施設の特徴

製造工程によって多様の大空間があるので一概には規定できないが、比較的共通のものを取り上げると以下ようになる。

- a. 上下の温度差を生じやすい。
- b. 生産機器などによる内部からの熱負荷が大きい。
- c. 天井高が高い割には人員密度が低い。
- d. 局所的に大きな発熱や有毒ガス・じんあいの発生がある場合がある。
- e. クレーンやホイストの走行のために、設備配置に制約がある。
- f. 大型の製造機器のために、空調吹き出し口の配置に制約がある。
- g. 使用時間が長く、24時間運転の場合もある。

(2) 大空間の設備計画

大型車両組立工場のように天井高が高く、内部発熱が小さい場合には室内の上下の温度差を生じやすく、暖房設備計画が重要となる。

暖房設備は、温風暖房と放射暖房に大別される。一般に温風暖房では、天井の高い空間ではドラフトの影響で居住域だけを効率的に暖房することが困難のため、放射暖房が採用される場合が多い。

放射暖房方式では、蒸気や高温水を通すパネルヒータ方式と、電気・ガスによる赤外線放射暖房がある。作業者が多く、作業位置も固定していないために全体暖房を実施する場合は、蒸気や高温水によるパネルヒータ方式が一般的である。作業位置が固定しており、また建物の気密性が悪いために、強い熱放射を必要とする場合はガス・電気等による赤外線放射暖房を局所的に実施する場合もある。

建物の気密性がよく、比較的天井が低い場合には温風暖房も採用される。温風暖房には、「温風炉+ダクト」のような集中方式と、ユニットヒータによる個別方式がある。集中方式は外気導入の必要があったり、ダクトスペースが確保できる場合に採用され、ダクトスペースがない場合はユニットヒータ方式が採用される。

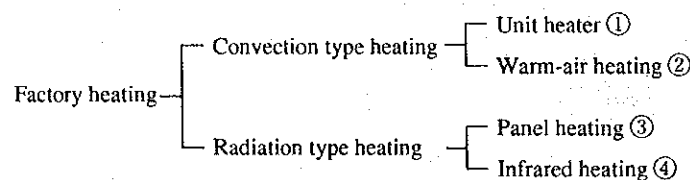
加工工場や組立工場で、機器発熱が全体負荷の 20%以下の場合や作業者の位置が特定せず、ライン変更の頻度が高い場合には、大空間であっても全体空調をした方がよい。機器発熱が多く、作業者の位置が限定されている場合はエリア空調やスポット空調が採用される。ただしスポット空調はドラフトの問題から暖房には不向きである。

10.1.3 工場暖房

(1) 暖房設備の種類と概要

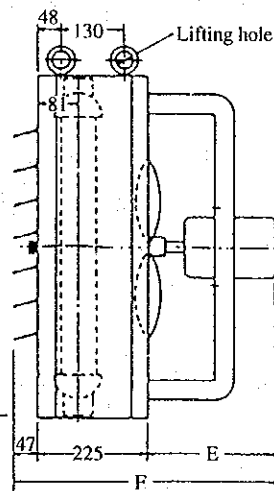
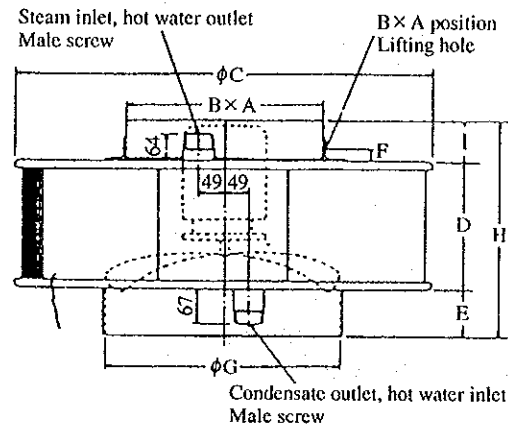
大空間生産施設の暖房設備として一般に用いられるものを Table 10.1 に示す。

Table 10.1 Types of Factory Heating System



このうち①のユニットヒータは、Figure 10.1 のように送風機とコイルと吹き出し口が一带となった小型のユニット機器を各所に配置して暖房するものである。

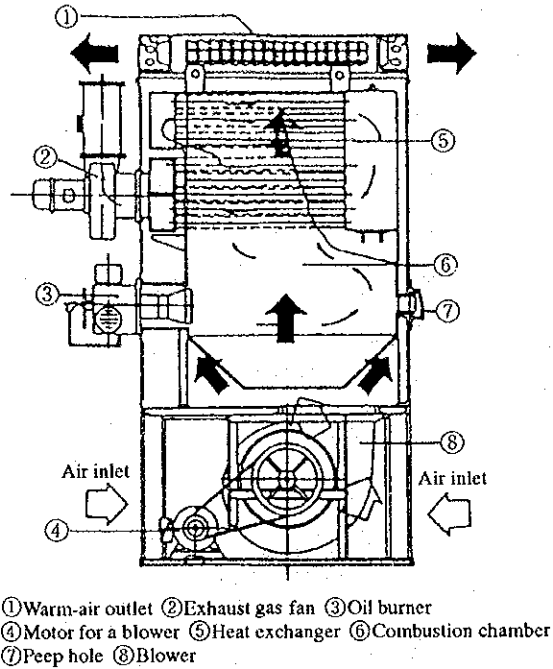
Figure 10.1 Unit Heater



この図の場合の熱源は蒸気であるが、最近では天吊りで小型のガス焚きや油焚きの「エアファーンエス」などもあり、これらを総称してユニットヒータという場合もある。

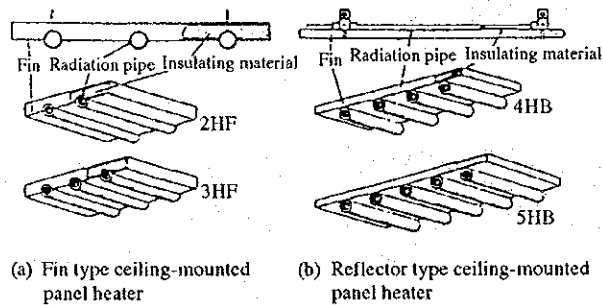
②の温風暖房は、Figure 10.2 のようなガス焚きまたは油焚きの温風炉や蒸気コイル・温水コイル・電気ヒータなどによる温風を送風機とダクトに配分する方法である。

Figure 10.2 Air Furnace



③のパネルヒーティングは、蒸気や高温水を Figure 10.3 のような表面積の大きなパネルに供給し、100-200℃の高温放射によって暖房するもので、パネルは普通天井面に配置する。

Figure 10.3 Panel Heater



④の赤外線暖房は、Figure 10.4 や Figure 10.5 のようなガスまたは電気による赤外線暖房器を設置して、主として $3\mu\text{m}$ から $400\mu\text{m}$ の遠赤外線を利用して暖気を与えようとするものである。

Figure 10.4 Gas Infrared Heater

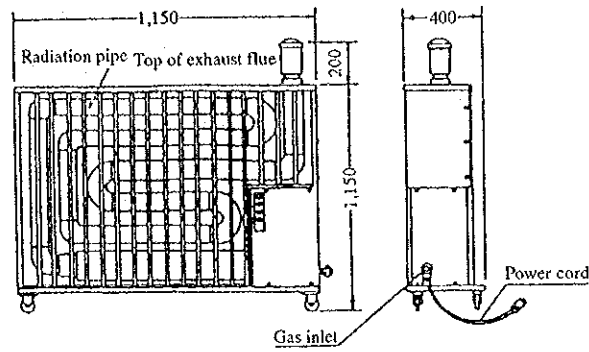
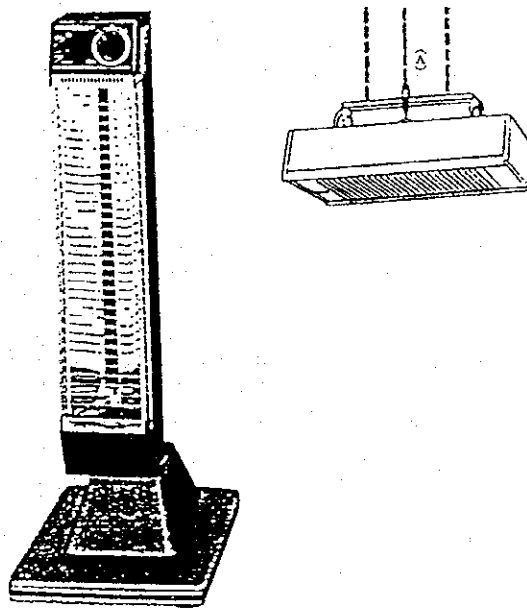


Figure 10.5 Air Infrared Heater



(2) 暖房システムの選定

工場の暖房では、工場の特徴のために一般事務所ビルなどでは起こらない諸現象が発生する。そのため装置の容量が過大なものとなったり、また適正な環境維持ができない結果を招く場合がある。一般に暖房方式は Table 10.2 のように分類される。

Table 10.2 Types of Heating System

	Types	Heating sources	Energy sources	Radiator	Remarks
Centralized system	Hot water heating	Boiler	Fuel oil, kerosene, gas, electricity, coal, outside air, recovered waste heat	Radiator	Features ① The heat radiation area is larger than in steam heating ② The heat capacity of equipment is large and preheating takes a long time.
		Heat pump		Convector	
		Regional heating		Fan/coil/unit Tube radiator	
	Steam heating	Boiler	Fuel oil, kerosene, gas, electricity, coal	Radiator Convector	In addition to the characteristics opposite to those of hot water heating, this type of heating involves the following problems: ① Occurrence of water hammer ② Poor controllability
Warm-air heating	Boiler Air furnace Heat pump Integrated heat recovery unit	}	Fuel oil, kerosene, gas, electricity Outside air, recovered waste heat	Heating coil	① Controllable air current ② Fresh air supply available. ③ The preheating time required for equipment is extremely short. ④ Increase in blower power.
				Heating coil	
Radiation heating (Low temperature system)	Boiler (Hot water)	}	Fuel oil, kerosene, gas, electricity	Floor panel	① High degree of comfort ② Even distribution of temperature ③ Large fuel savings (Low room temperatures allowed) ④ High equipment cost ⑤ Difficult to repair ⑥ The capacity cannot be adjusted for rapid changes.
				Ceiling panel	
				Wall panel	
				Warm-air floor heating	
Decentralized system	Forced convection unit	Unit ventilator	Electricity, gas, oil	Unit ventilator	Ceiling mounting The following types of mounting are used for the equipment for local heating.
	Natural convection unit	Unit heater	Electricity	Unit heater Baseboard heater	
	Radiation heating (High temperature system)	Combuster Electric resistor	Electricity, gas, oil Electricity, gas, oil	Radiation-convection panel Heat radiation assisted by a reflector panel	Local heating is available and there is no heat loss during transportation through heat medium.
Infrared heating	Incandescent lamp	Electricity			• The heat energy hardly heats the surrounding air and directly carries the heat to the human body, floor, machines, and other portions at which the infrared rays are directed. • Easily absorbed by water. (Thus, suitable for drying)
	Infrared lamp	Electricity			
	Gas infrared burner	Gas			

暖房方式は大きく分けて中央方式と分散方式に分けられる。中央方式では、一般的に判断して小規模建物には温水暖房、大規模建物には蒸気暖房が推奨される。これは暖房運転時間などによって異なるが、大規模建物で温水暖房を行う場合、朝方始動時の予熱負荷が大きくなること、および配管中の水が凍結した場合の事故などを考慮した上での判断であり、このような心配のない場合は温水暖房でもよい。設備費の面では蒸気暖房の方が温水暖房に比して安価な場合が多い。

温風暖房はボイラーで発生した蒸気または温風をコイルに流して空気を加熱する方式、ヒートポンプにより温風を作る方式、あるいは熱風炉 (エア・ファーンレス)を利用する方式などがあるが、設備費の点では前記の蒸気暖房方式よりも一般には高額となる。

輻射暖房は、Table 10.2 の備考に記載のとおり種々の特徴をもち、特に天井の高い室には床パネル方式が非常に有利な暖房方式となる。輻射暖房の場合は、室内空気温度が低くても十分な快適感が得られ、エネルギー消費の面からは経済的なシステムであるが、一般工場では、設備機械の配置、床下ピットの設置などで、床スラブに埋設するパネルヒーティング (低温式)は、實際上施工困難な場合が多い。むしろ高温式輻射暖房 (分散方式)が多く用いられる。

赤外線暖房は、通常方式の周囲空気を加熱する方式と異なり、その効果は実際に吸収される輻射エネルギーの量によって決まり、また平均輻射温度 (室内各表面温度の平均値)を上げることによって決まる。放射を受けて加熱された物体からの対流によって周囲の空気はいくらか加熱されるが、ほとんどが直接に受ける放射量によってその暖房効果は決められるので、在来の負荷計算と違った計算が要求される。

赤外線はこのような性質を持つので、天井の高い工場などでは床上 4 から 5m 位の壁面に取付け、床に最大輻射量を直接に放射できるような角度を設定しながら設置する。また、直接外部と接続しているような場所 (搬出入口、玄関など)または外気にさらされた場所で、周囲空気を加熱することなく暖房を必要とする場合に応用される。鋼材倉庫などでは錆を防止するために温度を上げて水分の凝結を防ぐが、この目的にも赤外線暖房は有効な方式となる。

(3) 暖房設備の計画上の要点

a. 全体暖房と局所暖房

一般に作業者の多い場合や作業の位置が固定していない場合には全体暖房、逆の場合は局所暖房が考えられる。

b. 放射型の暖房と温風型の暖房

天井が高い場合や建築の密閉度が悪いときは、放射型の暖房が有利であり、逆の場合は温風型の暖房が考えられる。

- c. 局所排気が多いなどの理由で、外気を多く取入れる必要がある場合は、温風暖房方式で考えたほうがよい。
- d. ガス焚き・油焚きなど小型の機器を分散設置することは、保守管理・安全の面からみて避ける。
- e. ガス焚きまたは油焚きのユニットヒータは、腐食性の蒸気が存在する工場等では、漏洩時の火災防止の点から好ましくない。
- f. 赤外線暖房器の放熱面は、900-2000℃もの高温になるので、引火性のガスや粉塵の存在する施設では避ける。
- g. 工場の出入り口付近は外気の影響で環境が悪くなりがちなので、エアカーテンの設置などを検討する。

(4) 暖房設備の設計上の留意点

a. ユニットヒータ

ユニットヒータは台数が同じでも取付け高さによって暖房効果が異なるので注意が必要。

ユニットヒータは外壁面に主に取り付けるほか、出入り口付近にも集中的に配置する。

b. 温風暖房

吹き出し口を高い位置に設置する場合は、吹き出し口にノズルが用いられる。この際に、上部に滞留した暖かい空気を効果的に誘引して吹出す誘引型ノズルも用いられる。

c. パネルヒーティング

放射パネルは外壁からの熱損失を補うように外周部に重点的に配置する。また構造物や機械が放射の到達を妨げないように配置する。

d. 赤外線暖房

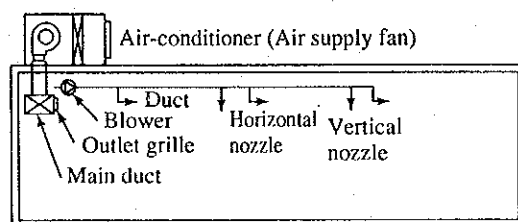
赤外線暖房は放射密度が高く、遠赤外線が直接に人体に暖気を与えるので、倉庫の荷積み作業など外気にさらされる場所で使用される場合が多い。

ガス焚きの機器では、なるべく煙突を設けて排ガスを室内に出さないようにする。煙突を用いない場合は適切な換気を行うとともに、室内側に結露しないよう注意する。

e. エアジェットシステム

大空間の空調・換気において特殊なジェットノズルを用いた「エアジェットシステム」がある。このシステムは、大きなダクトの代わりにジェットノズルから高速に吹出したジェットエアの運動量を利用して空気を搬送するものである。これを空調に利用する場合には、Figure 10.6 のような構成となる。

Figure 10.6 Configuration of Air Jet System



(5) エアジェットシステムの特徴と問題点

- a. このシステムは、低風速域で気流を広範囲に発生させて空気を搬送するので、大空間の自然対流に有効に対応でき、暖房時に比較的良好な温度分布を得ることができる。
- b. ジェットエアによる誘引作用を利用するので、オイルミストなどで汚染されやすい空間の吸気系には利用できない。
- c. 低風速気流による搬送であるため、局所的な外乱気流の影響を受けやすい。

d. エアジェットノズル

エアジェットから吹出す空気は全空気量の数%から 10 数%であり、吹出し風速は 20 から 30m/s 程度が多い。

エアジェットノズルの例を Figure 10.7 に示す。

Figure 10.7 Air Jet Nozzle

