

大型圧縮機用同期電動機

櫻井 泰 男*

Synchronous Motors for the Direct Drive of Large Capacity Reciprocating Compressors

By Yasuo Sakurai

Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

For the drive of large-sized reciprocating gas compressors larger than 300 HP the use of directly coupled synchronous motor is almost exclusive, because of its far higher power factor at low speed running, as compared with any other type of electric motor. However, there have also been a few problems to be solved, attendant on the direct driving by the synchronous motor. And as a solution for the problem as touching current pulsation due to the variation of torque the fly wheel is in use for its restricting effect on the pulsation.

In this paper, the construction of our improved synchronous motors is described, along with the analysis and counter-measure for several problems concerning the current pulsation.

[I] 緒 言

往復動圧縮機駆動には、小型の場合は一般に誘導電動機に依りベルト駆動を行つておるが、300HP以上になると殆ど総べて同期電動機直結駆動方式が採られている。これは云う迄もなく廻転速度の遅いこの種電動機に於て圧縮機容量が使用電力量の可成の部分占める化学工場等にあつては誘導機の場合には力率が非常に悪いのに比し、同期電動機は低速度で良好な力率で運転出来るという大きな特長を有するからである。然し乍ら同期電動機をかかると往復動機械と直結する場合には、トルクの変動に伴う電流脈動の問題があり、このため、はずみ車効果の選定等種々考慮すべき事柄がある。ここに大型圧縮機に使用される同期電動機の構造、特性、はずみ車効果の問題に就いて述べ、使用者各位の便に供したい。

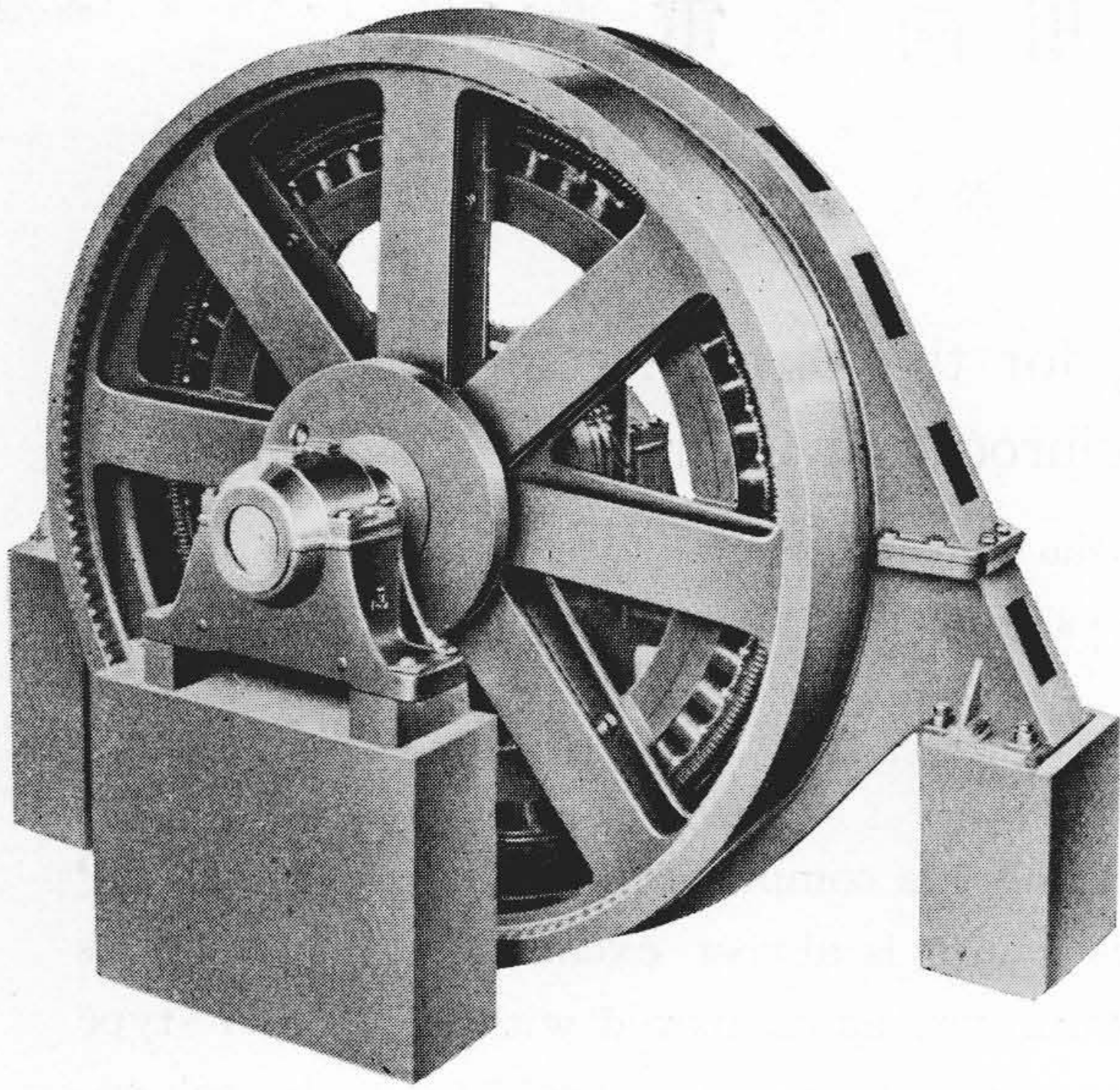
[II] 構 造

ここに大型と称しているのは、1,000HP級以上のものを指す。500HP級のものとは構造上著しく異なる点は、はずみ車効果を孰れの部分に持たせるかにある。500HP

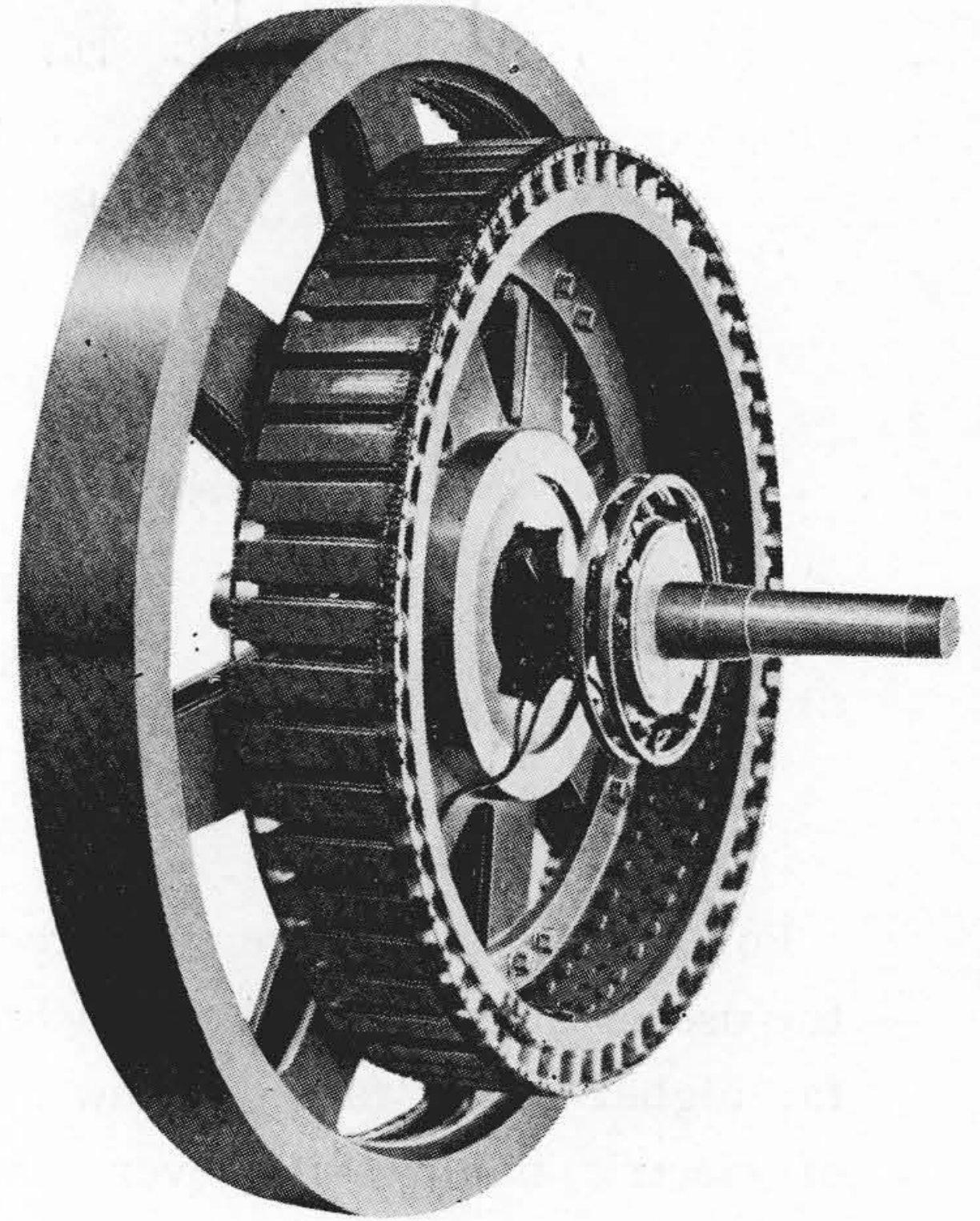
級でははずみ車を別に設けず、磁極、継鉄等で持たせているものが多いが、大型のものは後述のように必要なはずみ車効果も著しく大きくなり、継鉄に持たせる事は継鉄の重量を増して不経済となるので、別にはずみ車を設ける。この場合軸方向の長さ重量を軽減する為に、はずみ車と廻転子とを一体とする。これにははずみ車に継鉄を取付けた形のもの、継鉄にはずみ車リムを取付けるものとあるが、日立同期電動機は前者の形を採つている。第2図(次頁参照)はその構造を示している。

はずみ車は同じはずみ車効果に対して直径の大きい程重量を軽減出来る理であるが、遠心力に対応する強度上の限界があり、或る程度を超えるとスパイダアーム等も太くしなければならずかえつて重量も増し、直径には選べる限度がある。はずみ車は通常、鋳鉄製とするが、3,000HP級になると周速が大きく、遠心力に依る応力も相当大きくなるので材質を考慮しなければならない場合もある。はずみ車の内側にはバーリングギヤを切り、点検並びに起動に便ならしめる。廻転子はクランク軸に取付けられるので、はずみ車は二つ割にする。遠心力に耐える為にははずみ車の合せ目のアームを数本のボルトで締付けると同時に、リムにシュリンクリング、又シュリ

* 日立製作所日立工場



第1図 圧縮機用同期電動機の外観
Fig. 1. General View of Synchronous Motor for Compressor



第2図 同期電動機のローター
Fig. 2. Rotor of Synchronous Motor

ンクキーを焼嵌めし、又ボスにもシュリンクリングを焼嵌めして軸に締付ける。

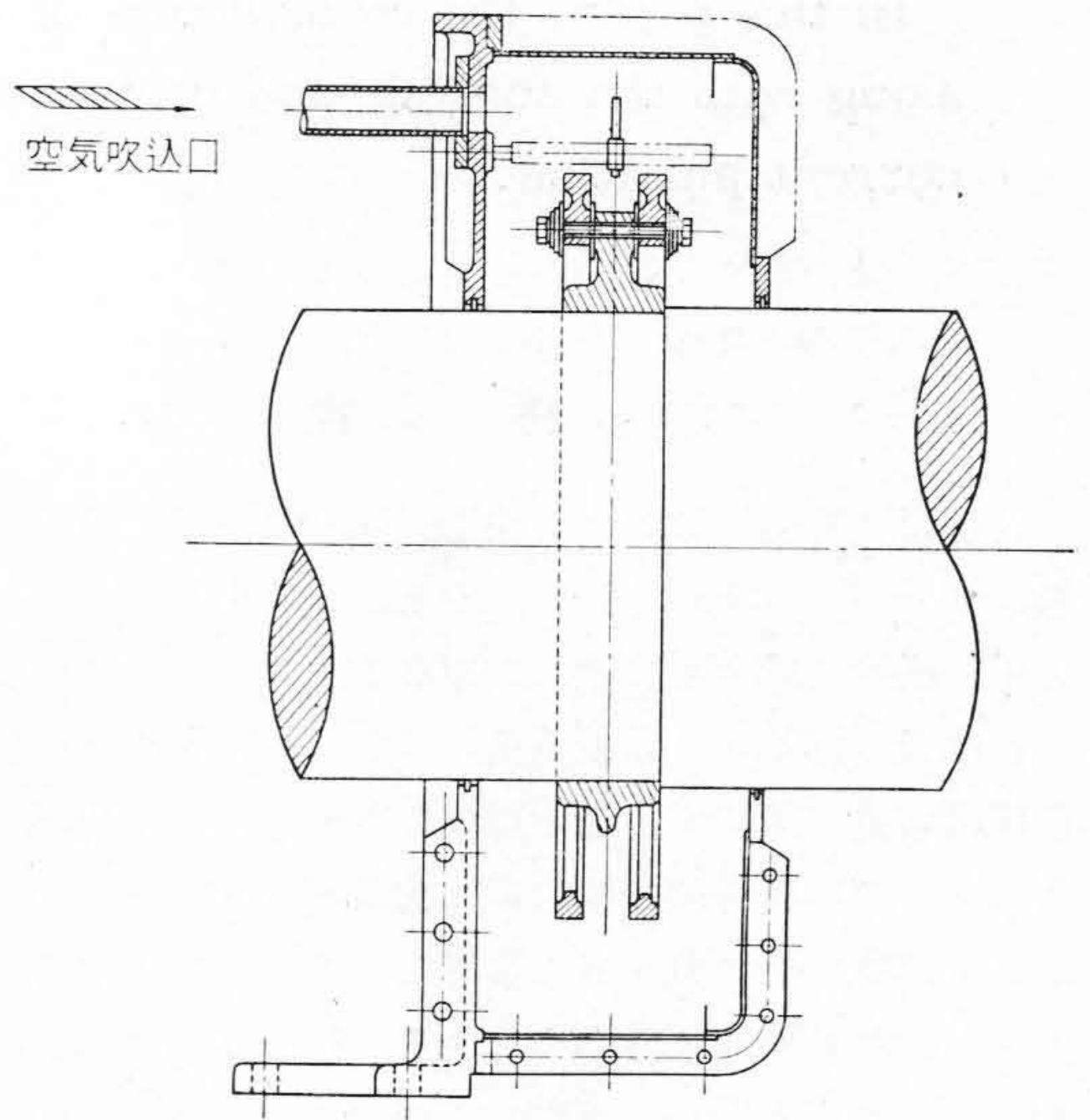
継鉄ははずみ車のアームに締付けて保持すると同時にその取付面に数箇のキーを嵌入してトルクをスパイダーに伝える。

圧縮機用電動機は一般に極数が多いので磁極の組立取外しに便ならしめる為磁極頭のみを積層鉄板とし、磁極本体は単一体として継鉄にボルト締めする。

磁極頭にはダンパを設けるが、このダンパは同期電動機にとっては重要なもので、起動電流を抑え、起動トルクを大にするには、ダンパの抵抗を大きくする必要があるが、同期牽入直前の滑りを小にし、又制動力を増し電流脈動を抑制する為には抵抗を小にする方がよい。両者相反する要求を適当に考慮して設計しなければならない。

化学工場用のものには滑動環部を水素耐爆構造とすることが、要求される場合が多い。この為には滑動環カバーを空気吹込式内圧防爆型とする。即ち起動前に、別置ブロアに依つて、外部から導入された新鮮な空気を吹込みこれと置換して後、主機を起動する。運転中にも一定の内圧を与えて置いて、水素の侵入を防ぐものである。起動時には、この操作が終了せぬ中には、O. C. B. が投入出来ないようインターロックを設ける。第3図は滑動環カバーの構造を示す。

以上簡単に、構造上問題となる要点を述べたが、廻転



第3図 水素防爆滑動環構造図
Fig. 3. Slip Ring for Hydrogen Gas-proof Compressor Motor

子を二つ割にして、両側クランクの場合にも容易に組立が出来た構造になし得る事は同期電動機の大きな特長の一つである。

[III] 起 動

起動はダンパによる誘導電動機としての起動法による。

この場合励磁回路は放電抵抗器で短絡される。容量が大きい為一般には起動変圧器を使用し、起動後全電圧に切換え、励磁を加えて同期化せしめる。

圧縮機はアンローダを使用して無負荷起動する為、起動トルクは 50% あれば十分である。

はずみ車効果の大きい機械を同期化する為には、同期牽入直前の滑りを小さくしなければならない。一般に滑り s が次式で与えられれば同期牽入可能とされている。

$$s < \frac{242}{N} \sqrt{\frac{P_m}{(GD^2)f}} \dots\dots\dots(1)$$

ここに N =廻転数 (r. p. m.)

P_m =与える励磁に対する脱出トルクに相当する出力

GD^2 =はずみ車効果 (kg-m²)

f =周波数 (サイクル/秒)

[IV] 電流脈動の問題

大型圧縮機用同期機で一番問題になるのは、電流脈動である。これは大型圧縮機がそのプラントの主要機器である事が多く、他の電気機器に及ぼす影響が大きいからである。ここで少し詳しくこの問題を検討して見たい。

圧縮機の周期的トルク変動は、圧縮機の種類、段数、各段の配置、ダブルクランクの場合には両クランクの相互位相に依つてその様相を著しく異にする。この様相に依つて所要 GD^2 も変わるが、 GD^2 を極力小さくすれば軽量となり、軸、軸承も経済的になり起動も容易になるのであるから、圧縮機製造家もこの点大いに考慮を払う可きである。

(1) 電流脈動の理論式

端子電圧が動揺しないと考えられる大容量の電源に電動機が直結されている場合、その運動方程式は下のようになる。

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + M \frac{d\theta}{dt} + \frac{NP}{2}\theta = M_0 + \sum_{n=1}^{\infty} M_n \sin(\omega_n t + \varphi_n) \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 I =慣性能率 = $\frac{GD^2}{4g}$ P =極数

M =制動係数 = $\frac{P}{4\pi f} \times T_{is}$ T_{is} は制動トルク

と滑りとの比でダンパーの性質に依つて定まる。

N =同期化トルク、即ち磁極が電気角 1 ラジアン変位する時に生ずる同期化トルク

M_0 =圧縮機平均トルク

M_n =圧縮機トルク脈動の第 n 次高調波

ω_n =脈動波の角周波数 以下添字 n は高調波次数を示す。

この解の自由振動の項より電動機固有振動数を求めると

$$F = \frac{14400}{n_0} \sqrt{\frac{P_0 f}{GD^2}} \text{ サイクル/分 } \dots\dots\dots(3)$$

ここに n_0 =同期速度 (r. p. m.)

P_0 = N に相当する出力 kW/ラジアン
 GD^2 (kg-m²)

更に (2) 式の解の持続振動の項は

$$\theta_n = \frac{M_n}{n\omega_n} \frac{\frac{P}{2}}{\sqrt{M^2 + \left(n\omega_n I - \frac{NP}{2n\omega_n}\right)^2}} \sin\left\{n\omega_n t + \varphi_n - \frac{\pi}{2} - \alpha\right\} \dots\dots\dots(4)$$

但し $\tan \alpha = \frac{n\omega_n I - \frac{NP}{2n\omega_n}}{M}$

θ_n は相差角の動揺角で、トルク M_0 に相当する相差角 θ_0 を中心にして θ_n を振幅として動揺する事になる。 $2\theta_n/\theta_0$ は略、電流脈動率を示すので概略の見当をつけるには $2\theta_n/\theta_0$ を求めればよい。

次に θ_n なる相差角動揺に対する電動機トルクの変動は τ_0 を中心として次の τ_n の振幅で振動する。

$$\tau_n = N\theta_n + \frac{2M}{P} \frac{d\theta_n}{dt} \dots\dots\dots(5)$$

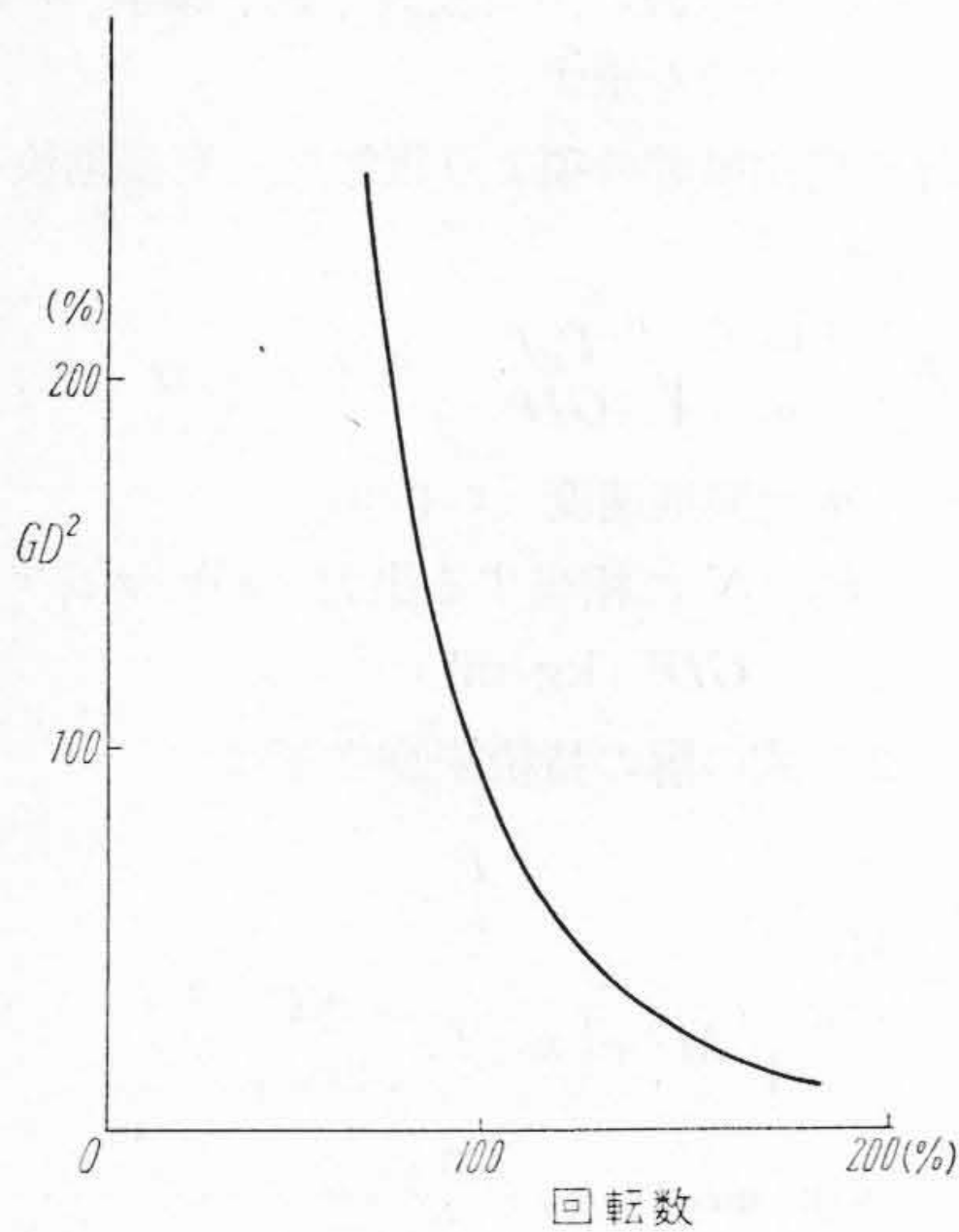
電流は略トルクに比例するから $2\tau_n/\tau_0$ を電流脈動率と考えてよい。但し固有振動数 F がクランクトルク周波数に近い場合には電流脈動は上記計算値より大きくなる。

(2) GD^2 の選定

GD^2 を選定するには i) (3) 式で求めた固有振動数 F をトルク基本周波数より 20% 以上離す事。ii) 脈動を所要値に抑える事。の二項にわたつて考慮し、更に経済的設計に於て、同期牽入に無理がないように選ばねばならない。

米国の規格 (NEMA) には Compressor Factor なる常数を用いて n_0^4 に逆比例するような GD^2 を与える式を示してあるが、これは i) の固有振動数のみを考慮した式であるから、或る GD^2 の実績から、同出力で回転数の異なる GD^2 を類推するのに、 n_0^4 に逆比例するように考えるのは危険である。同出力で電流脈動率を一定値に抑える条件で (4) 式より GD^2 を求めると略 n_0^3 に比例する。従来の種々の実測結果よりしてもこの関係は正しい。

第 4 図 (次頁参照) はこの関係を示す。



第4図 同期速度と GD^2 との関係
Fig. 4. Relation between Synchronous Speed and GD^2

固有振動数のみを考慮するならば、 $F \leq 0.8n_0$ を (3) 式に代入すると

$$GD^2 \geq 3.24 \times 10^8 \frac{P_0 f}{n_0^4} \dots \dots \dots (6)$$

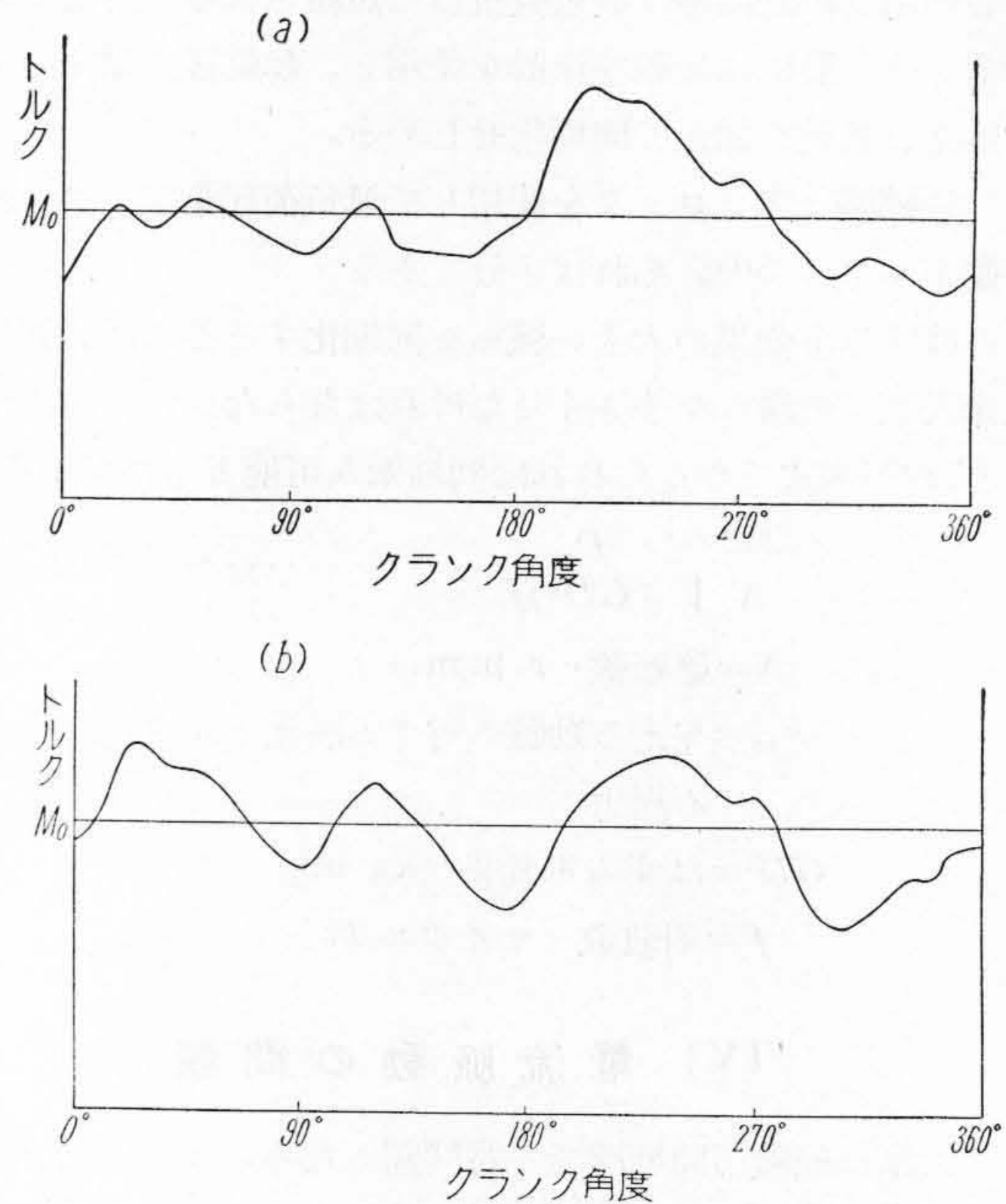
なる関係を得る。

脈動率は JEC-114 に 70% 以下と規定されている。使用場所の条件によっても異なるが、通常 40~50% 位になっている場合が多い。

中型以下の場合、圧縮機トルク変動と機械的エネルギーのみから回転不整率を計算して、圧縮機メーカーが GD^2 を指定するのが普通であるが、上述のように電動機的设计内容によつて、脈動率は可成り変化するものであるから大型機に就いては慎重を期して、クランクエフォート図をフーリエ級数に分解し各高調波に就いて上記の計算を行つて GD^2 を選定しなければならない。大型機に於ては(4)式の分母中、 M に比して $\left(n\omega_n I - \frac{NP}{2n\omega_n} \right)$ が大きく、従つて同じ GD^2 に対しても励磁の大小によつて同期化力 N が変化するので、脈動率は進み力率にする程大きくなる。

第5図は 2,500HP 級 6 段圧縮機のクランクエフォート図の一例である。これはダブルクランクであるが、(a) 図は高圧側クランクの位相が低圧側のそれに対して 90° 遅れ、(b) 図は同一の設計で逆に低圧側が 90° 遅れている場合である。(a) をフーリエ級数に分解すると

$$\begin{aligned} \sum M_n = M_0 \{ & 1 + 0.16 \sin(\omega t + 56^\circ) \\ & + 0.185 \sin(2\omega t - 12^\circ) \end{aligned}$$



第5図 クランクエフォート図の例
Fig. 5. Examples of Crank Effort Diagram

$$+ 0.047 \sin(3\omega t - 52^\circ) + 0.085 \sin(4\omega t + 40^\circ) + \dots \dots \dots (7)$$

(b) の場合は

$$\begin{aligned} \sum M_n = M_0 \{ & 1 + 0.026 \sin(\omega t - 26^\circ) \\ & + 0.188 \sin(2\omega t - 13^\circ) + 0.137 \sin(3\omega t + 93^\circ) \\ & + 0.072 \sin(4\omega t - 42^\circ) + \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

となる。(4) 式に明かなる如く、電流脈動に大きく影響するのは第1高調波で、第2高調波以下は、次数が進むに従つて影響は著しく小さくなる。(a) (b) を比較して(b) の場合は第1高調波が極めて小さく GD^2 を著しく軽減する事が出来る。(a) に於て脈動率を 55% とする GD^2 をそのまま(b) に適用すると 20% となる。これによつても各段の配置或はクランクの位相が脈動に極めて重要な関係を有する事が判る。

(a) 及び (b) を構成するクランクエフォートは

$$\text{高圧側 } \sum M_n = M_0 \{ 0.48 + 0.078 \sin(\omega t - 48^\circ) + \dots \dots \dots (9)$$

$$\text{と低圧側 } \sum M_n = M_0 \{ 0.52 + 0.079 \sin(\omega t - 117^\circ) + \dots \dots \dots (10)$$

とをクランクの位相差を以て合成したものである。低圧側 90° 遅れの場合、第1高調波の両者の位相差は 159° となり、合成振幅は小さく、高圧側 90° 遅れの場合は位相差 21° となる。

この場合低圧側 110° 遅れにすれば第1高調波は殆ど

零になるが、孰れにしても小さい値であるから実用上は 90° で差支ない。

以上は一例を示したものであるが、クランクエフォートの形は段数によつても非常に異なるが、上述のように分離して考えれば、脈動を小さくするクランク位相を見出す事が出来る。

(3) 脈動と容量との関係

電動機の定格出力は平均トルクに相当する出力に対して適当な余裕をとつて定められる。脈動が大きいと理論上損失が増して、温度上昇の点から出力が制限される事になるが、脈動率 70% 以下では殆ど問題にならない。

電流脈動が A なる平均値の上に $B\sin\theta$ が重疊された形で表わされるものとして、電流の自乗平均値を kA とすると

$$kA = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (A + B\sin\theta)^2 d\theta} = \sqrt{A^2 + \frac{B^2}{2}}$$

$$= A \sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{8}} \dots (11)$$

ここに $\gamma = \text{脈動率} = \frac{2B}{A}$

γ と k との関係は

γ	0.7	1.0	2.0
k	1.03	1.06	1.22

となり 70% で電流が 3% 従つて損失は 6% 増した事になるが、温度上昇には余裕があるのが普通であるからこの程度増しても問題にならない。

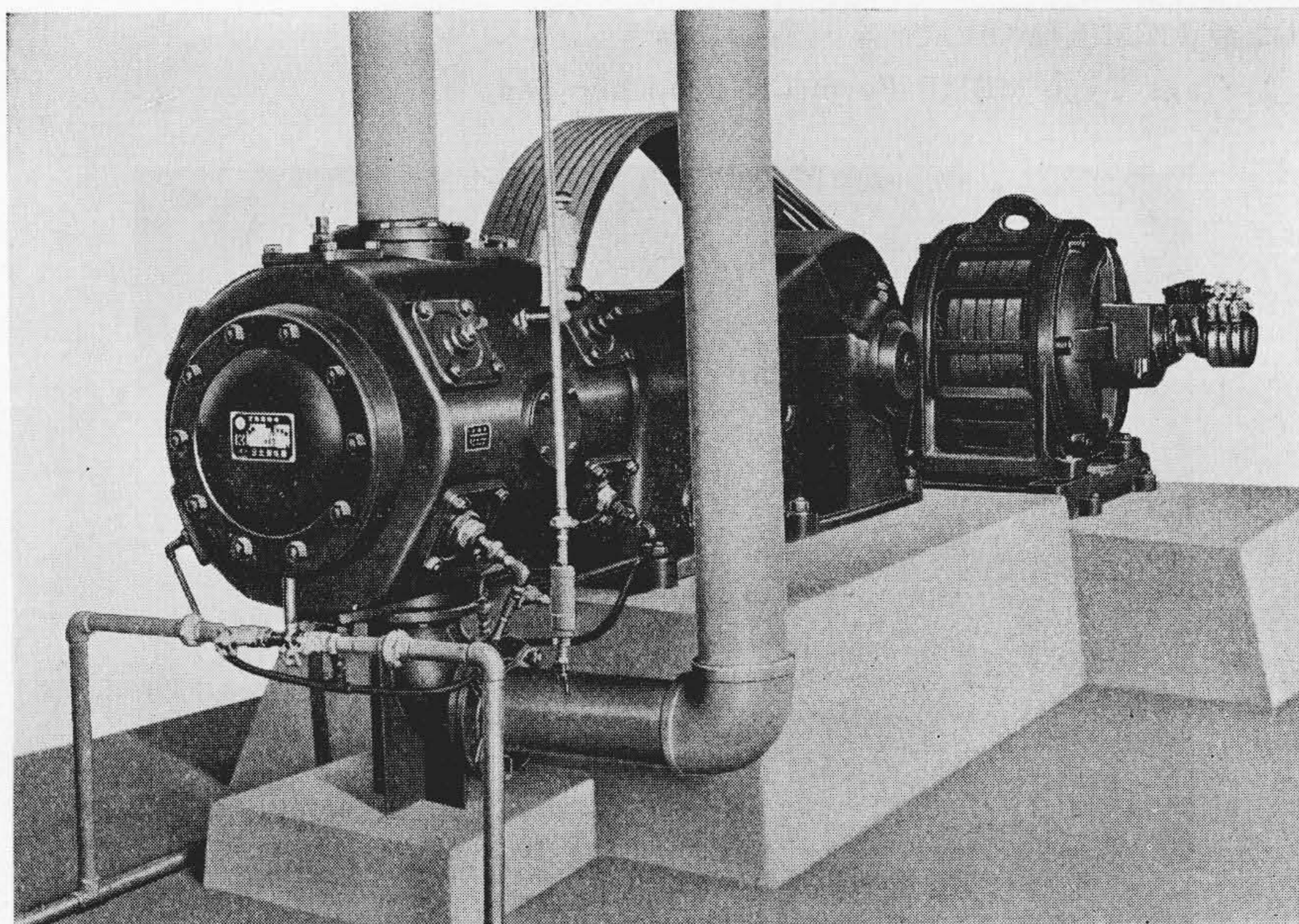
[V] 結 言

大型圧縮機は今後需要が増加して行く事と考えられるので、これに直結される同期電動機に就いての問題点を述べた。特に GD^2 と電流脈動の問題は、電流脈動を何%に抑えるかによつてその大きさが定まり、これが又機械の大きさに関係するので重要な問題である。殊にクランクトルク曲線の形如何に依つて所要 GD^2 を軽減する事も出来るのでこの点も電動機、圧縮機製作者の緊密な連絡の下に設計する事を要する。

参 考 文 献

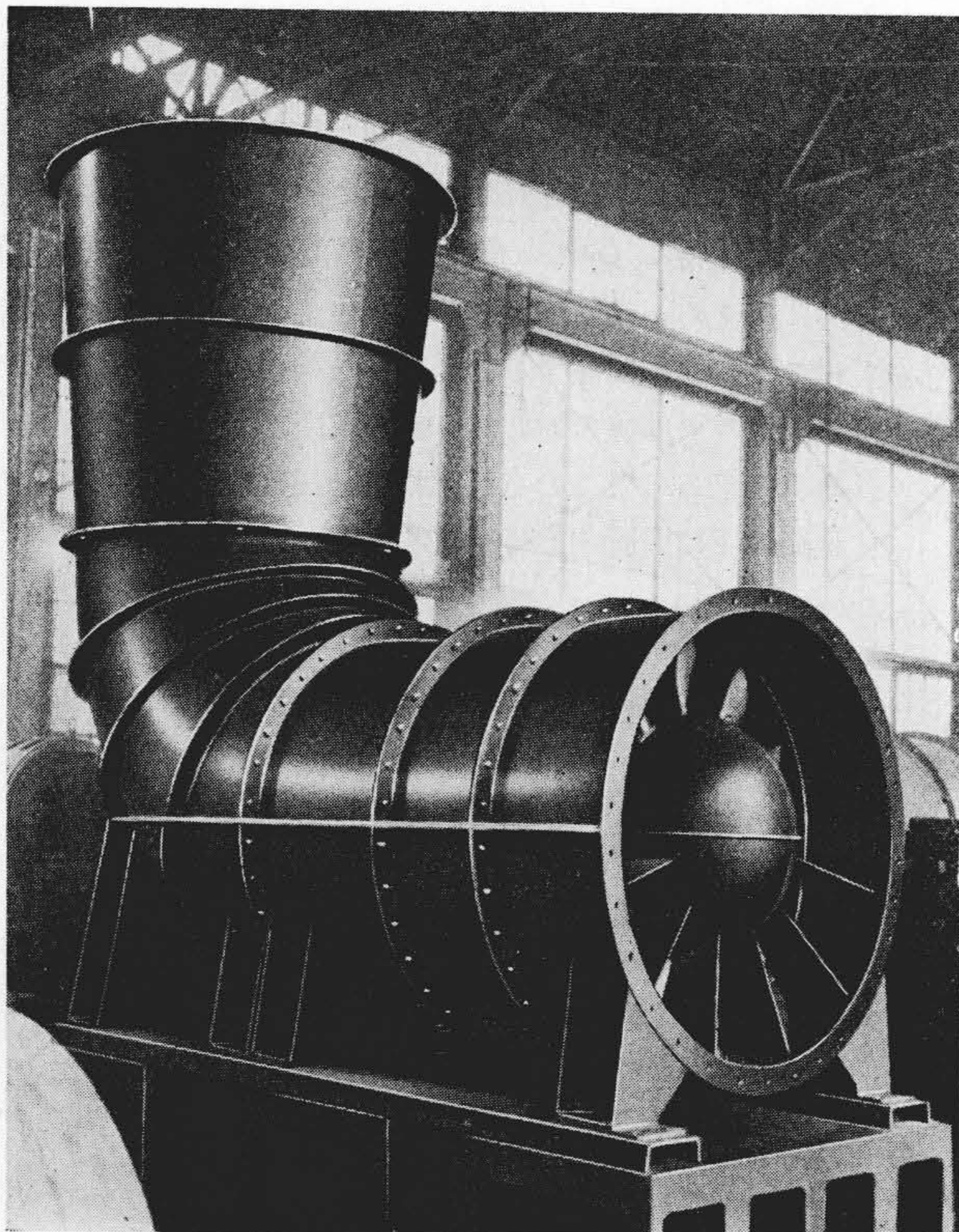
小西：往復動圧縮機用大型低速度電動機
 昭 9. 日立評論
 藤久保：圧縮機用同期電動機、昭 12 日立評論
 後藤、北村：圧縮機用同期電動機、昭 15 日立評論

日 立 の 気 体 機

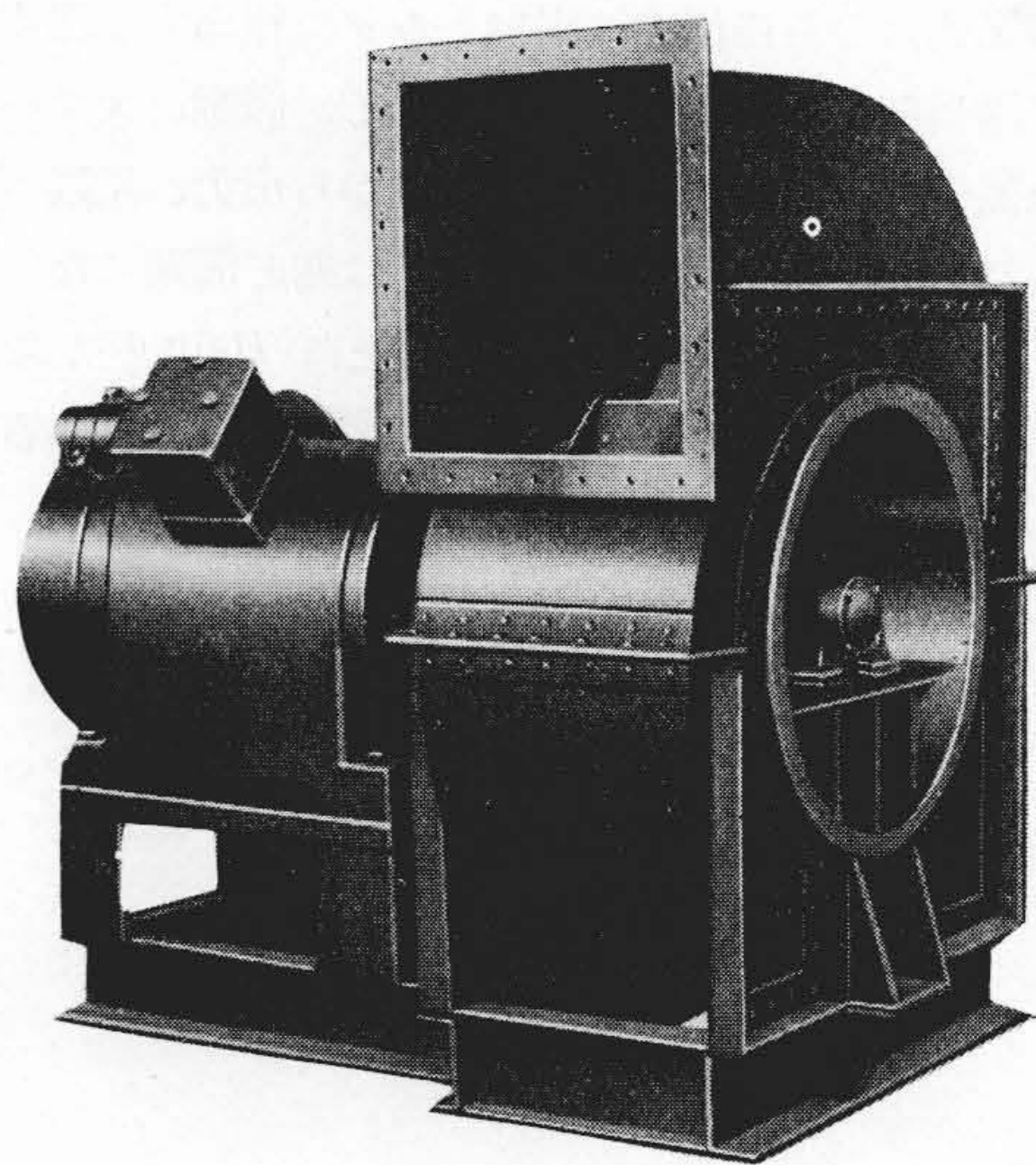


100 HP HSD 型 WRC 式 横 型 空 気 圧 縮 機
 100 HP Type HSD Form WRC Horizontal Air Compressor

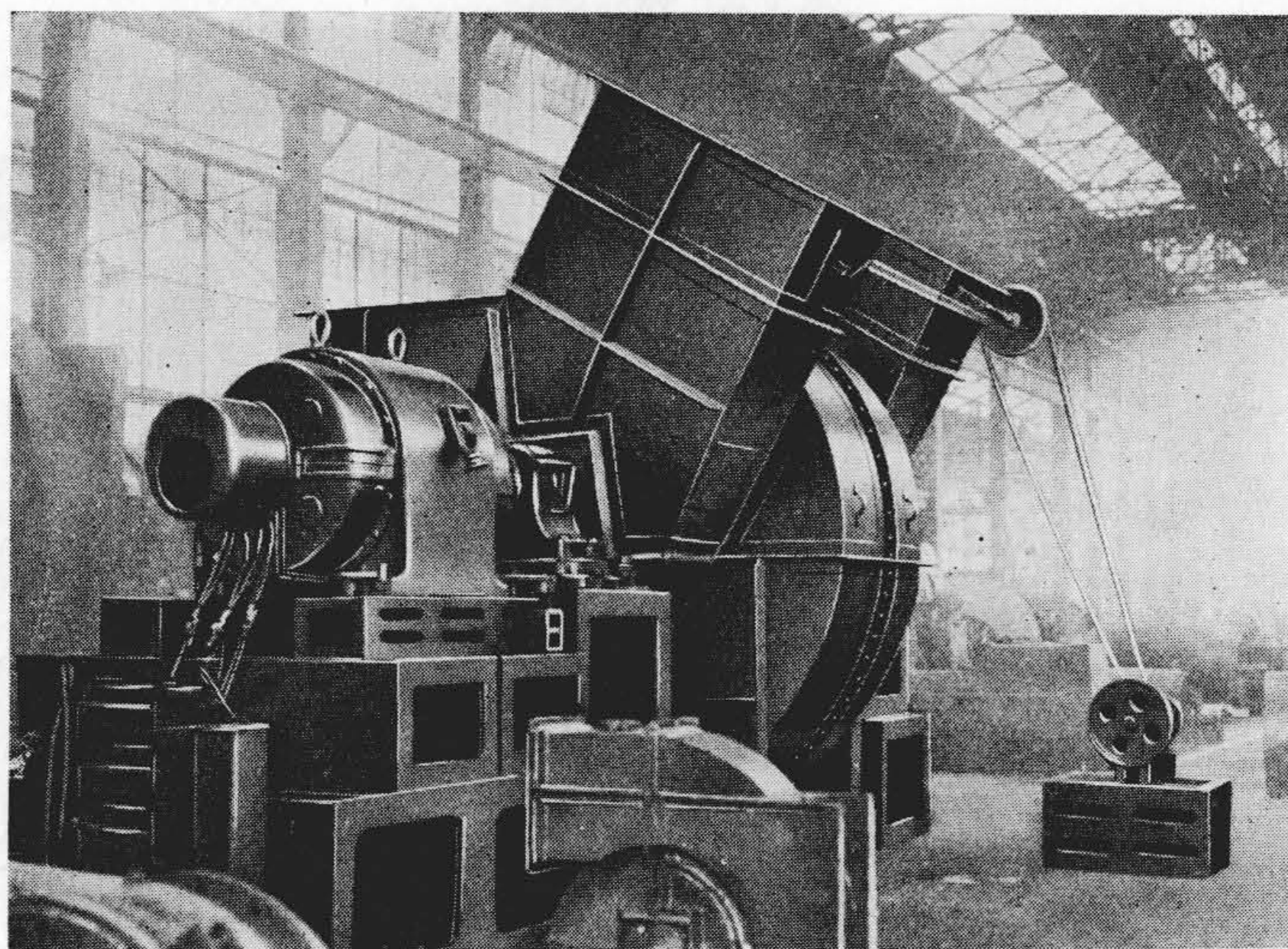
日立の気体機



1,800 mm 2 段 MBMP 型 CH 式プロペラーファン
1,800 mm 2-Stage Type MBMP Form CH Propeller Fan



PST 型 CH 式ターボファン
Type PST Form CH Turbo Fan



#13 PDT 型 CH 式両吸込型ターボファン
#13 Type PDT Form CH Double Suction Turbo Fan