

ベーンコントロールについて

河田直幸* 家坂秀信**

Vane Control

By Naoyuki Kawata and Hidenobu Iesaka
Kawasaki Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

For adjusting air volume supplied by the fan, vane control system has been long in use as an improved type of conventional dampers. This system, with nothing new in its theory, yet holds novelty in the type of application when intended for use to give a forcible whirl to the wind flow before it enters the runner.

In this paper, the writers describe the origination, structure and theory of the system together with the result of experimentation, and the comparison with the other controlling methods. Further, how it is used as automatic combustion device for boiler is added in way of an example of its applications.

[I] 緒 言

送風機の風量調節には種々の方法があるが、大別して機械式と電気式に分けられる。

機械式としては

- (1) ダンパー（サクション又はデリベリー）コントロール法
- (2) プーリーを取替え送風機の変換法
- (3) 流体接手により送風機の変換法

電気式としては

- (1) モータの速度制御法
- (2) セルビアス法
- (3) クレーマー法

然し数年来米国に於てはベーンコントロールという方法がボイラーファンに使用され、又日本でも近頃しばしば採用されるに至り、注目の的になっている。

これは一種のサクションダンパーで、吸込管内部に十数枚の扇形の羽根を取りつけ、これをリンクとレバーの聯動により同時に開閉し得る如くしたものである。

利点としては

- (1) 構造極めて簡単でこれを送風機羽根車の回転方向に開閉して、風の流れを乱さず風量を調節し得る。

(2) ダンパーコントロールに比較し常に送風機入力
は少く、又モータの速度制御に比較し、入力が少い範囲
がある。

(3) 定速度モータが使用出来る。
等が上げられる。

然しこれは最近考案されたものでなく、日立製作所に於ては既に 20 年以前に理論的に考究し、又製作経験も有しているが、このたび改めて実験し、焼失したデータの再確認を行つた。

[II] ベーンコントロールの原理

第1図（次頁参照）はターボファンの羽根車の入口、出口の速度線図を示す。

これにオイラーの理論式を使用すると⁽¹⁾

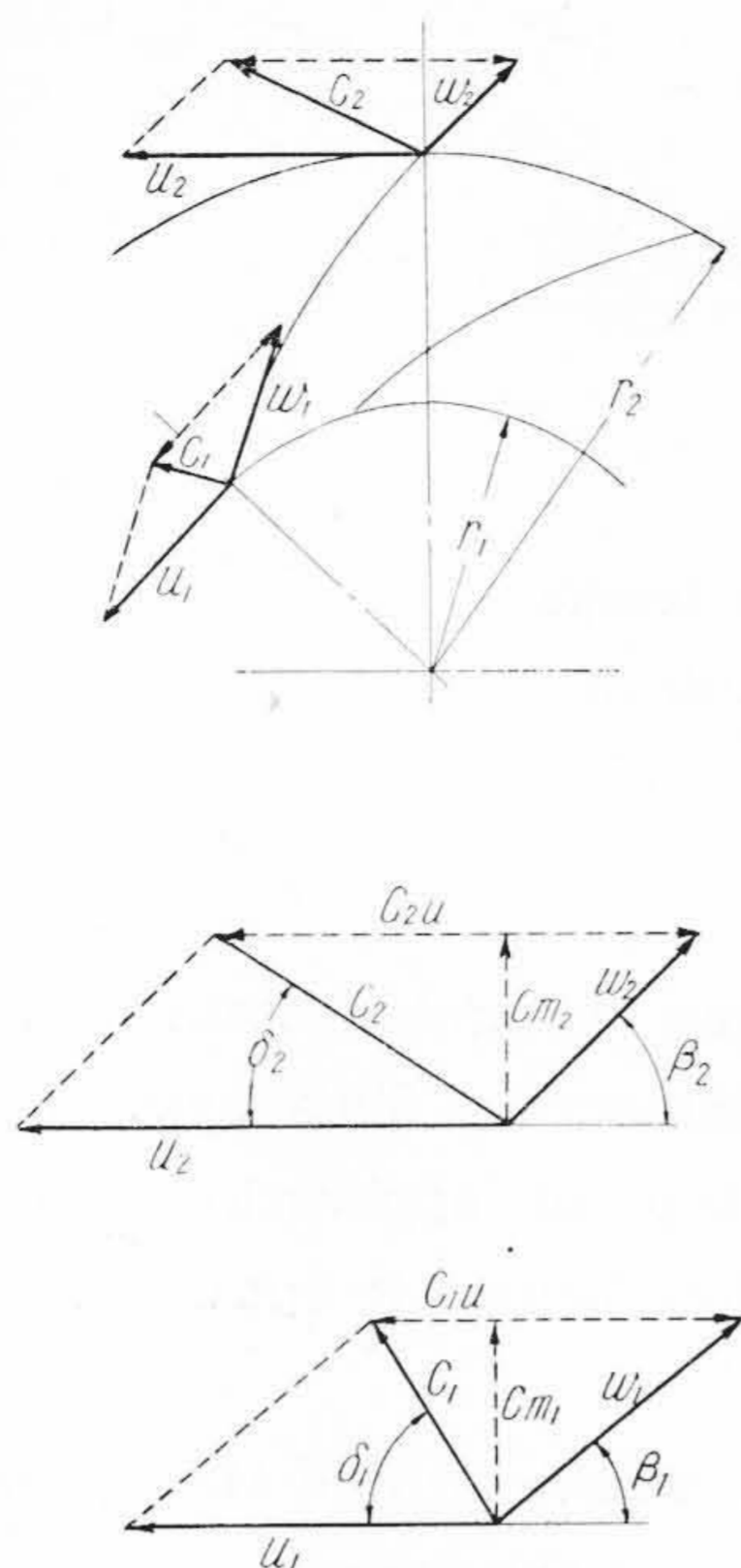
| | |
|-------------------------|---------------------------|
| 羽根に入る直前のホワール | $C_1 \cos \delta_1$ |
| 質量 m なるガスの有する角運動量 | $C_1 \cos \delta_1 m r_1$ |
| 出口のガスの有する角運動量 | $C_2 \cos \delta_2 m r_2$ |
| 連続して 1 秒間に羽根内を通過するガスの重量 | Wkg |
| アンギュラーモーメント | M |

とすると

$$M = \frac{W}{g} (C_2 \cos \delta_2 r_2 - C_1 \cos \delta_1 r_1)$$

羽根車が角速度 ω で回転しているならば、羽根がガ

* ** 日立製作所川崎工場



第1図 ターボファン羽根車の速度線図
Fig. 1. Velocity Diagram of Turbo Fan

スにした仕事を L とすれば

$$L = M\omega \quad \text{即ち} \quad L = \frac{W}{g} (C_2 \cos \delta_2 r_2 - C_1 \cos \delta_1 r_1) \omega$$

$$= \frac{W}{g} (u_2 C_2 \cos \delta_2 - u_1 C_1 \cos \delta_1)$$

$$= \frac{W}{g} (u_2 C_{2u} - u_1 C_{1u}) \quad \dots (1)$$

又 $L = W \cdot H \quad \Delta P = \gamma \cdot H$ なる故

$$\Delta P = \frac{\gamma}{g} (u_2 C_{2u} - u_1 C_{1u}) \quad \dots (2)$$

茲に $H = \text{圧力高} \quad \Delta P = \text{圧力} \quad \gamma = \text{比重}$

粘性を考えぬ時はガスは半径方向に流入し $C_{1u} = 0$ 従って仕事量 L は大になり送風機入力が増加する事になる。同様に (2) 式により圧力は増加する。今更にホワール ΔC_{1u} を与えると、(1) (2) 式の $u_1 C_{1u}$ の項が大となり L 及び ΔP が減少することが判る。

今ホワールを計算するのに、等角写象に依り軸流羽根車に移しホワールを求め、この結果を再び輻流羽根車に還元することによつて、求めることが出来る⁽²⁾。

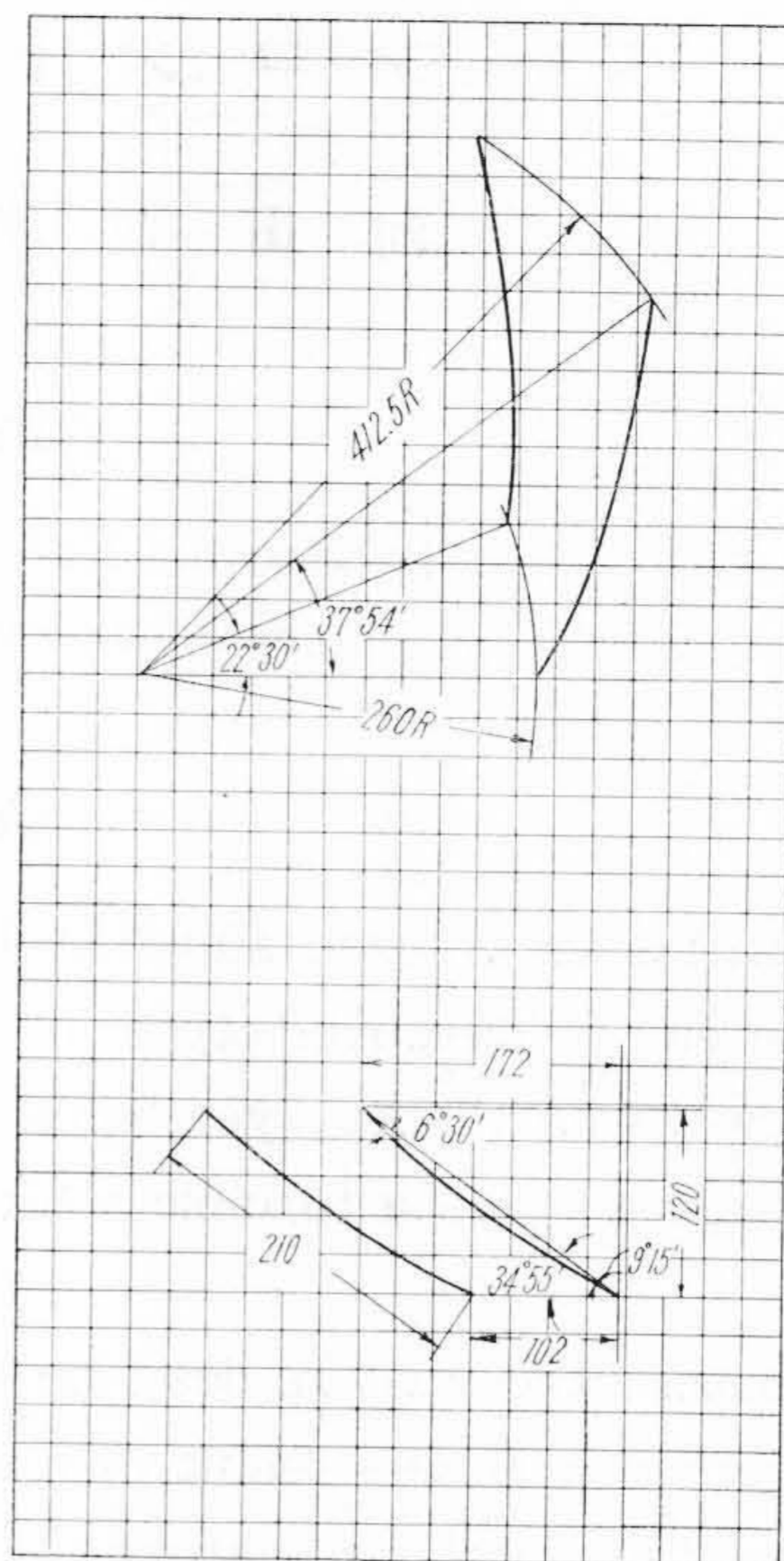
今実験羽根車を軸流羽根車に変換すれば第2図になる。又第3図はこの軸流羽根車の速度線図を示す。

今 $Ns' = \text{完全流体でないため回転方向に誘起される仕事}$

又 $Ca = \text{揚力係数} \quad Cw = \text{抗力係数}$

とすれば

$$\frac{C}{u} = \frac{\frac{C_1}{u} + \lambda}{1 + \lambda} \quad \dots (1)$$



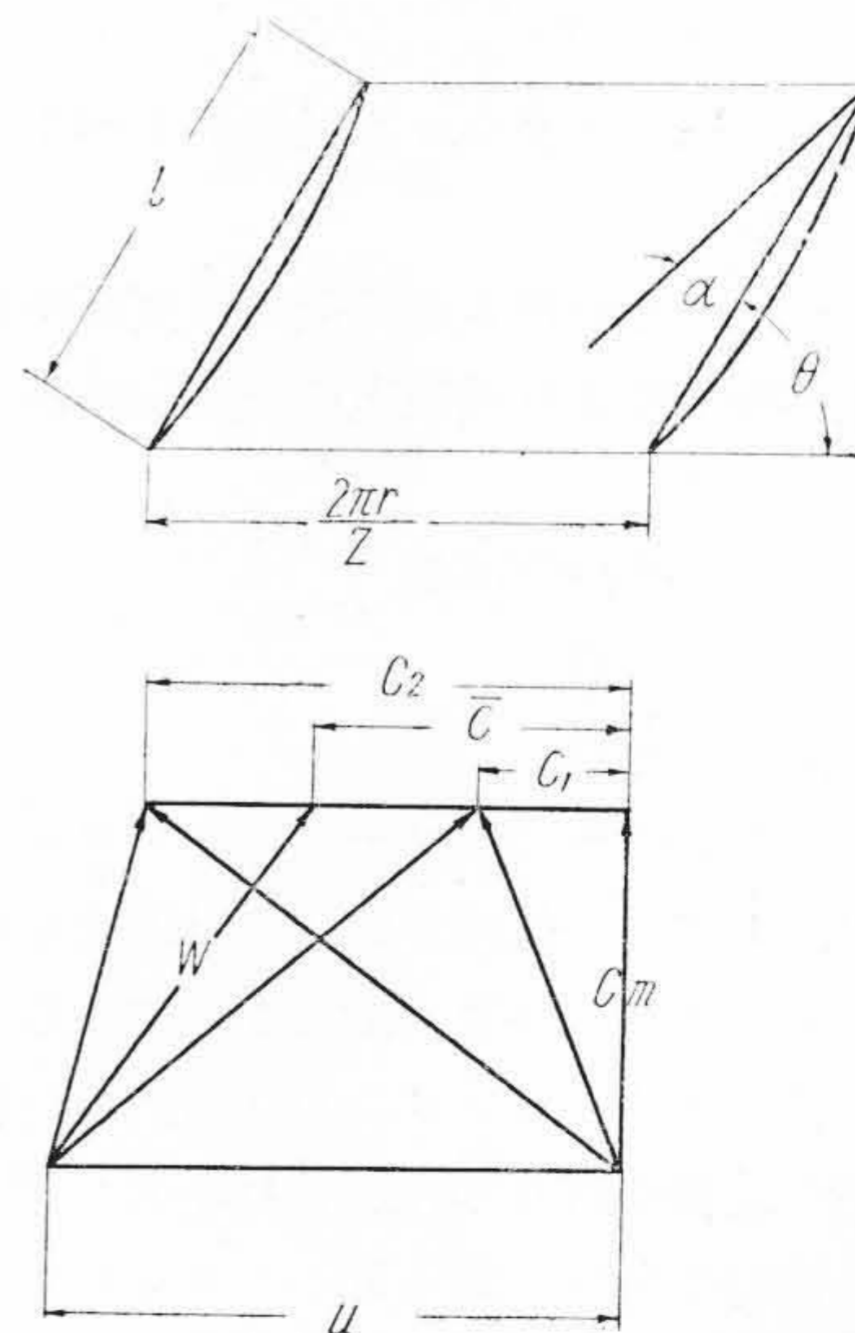
ターボファンの羽根車
(Z面)

変換によって得られる
対応すべき軸流羽根車
(W面)

$$W = 260 \log \frac{Z}{260}$$

第2図 試験用ターボファンの羽根車とこれに対応する軸流羽根車

Fig. 2. Propeller Fan's Vane Corresponding to Turbo Fan's Runner



第3図 軸流羽根車の速度線図

Fig. 3. Velocity Diagram of Propeller Fan

$$\frac{C_m}{u} = \frac{\left(1 - \frac{C_1}{u}\right) \tan(\theta - \alpha)}{1 + \lambda} \quad \dots (2)$$

$$Ns' = \frac{2\gamma u^3}{g} \frac{\left(1 - \frac{C_1}{u}\right)^2 \varepsilon \lambda}{(1+\lambda)^2} = \frac{\gamma C_m u (C_1 - C_0)}{g} = \frac{\gamma u^3}{g} \frac{\left(1 - \frac{C_1}{u}\right) \tan(\theta - \alpha)}{1+\lambda} \times \left(\frac{C_1}{u} - \frac{C_0}{u}\right) \dots\dots(3)$$

但し上記式中

$$\lambda = \frac{Z \text{ cal}}{8\pi r \cos(\theta - \alpha)} \quad \varepsilon = \frac{C_w}{C_a} \quad \gamma = \text{比重}$$

C_0 = 吸込側でベーンコントロールにより強性的に与えられるホワール

とする。又 $\tan \beta = \frac{C_0}{C_m} \dots\dots(4)$

(3) より

$$\frac{C_1}{u} = \frac{1 + \frac{C_0}{u} \frac{(1+\lambda) \tan(\theta - \alpha)}{2\lambda\varepsilon}}{1 + \frac{(1+\lambda) \tan(\theta - \alpha)}{2\lambda\varepsilon}}$$

$$1 - \frac{C_1}{u} = \frac{\left(1 - \frac{C_0}{u}\right) (1+\lambda) \tan(\theta - \alpha)}{2\lambda\varepsilon \left\{1 + \frac{(1+\lambda) \tan(\theta - \alpha)}{2\lambda\varepsilon}\right\}} \dots\dots(5)$$

(4) より $\frac{C_0}{u} = \frac{C_m}{u} \tan \beta$ これに(2)を代入すれば

$$= \frac{\left(1 - \frac{C_1}{u}\right) \tan \beta \tan(\theta - \alpha)}{1+\lambda} \dots\dots(6)$$

(5) を (6) に代入すれば

$$\frac{C_0}{u} = \frac{\left(1 - \frac{C_0}{u}\right) \tan^2(\theta - \alpha) \tan \beta}{2\lambda\varepsilon \left\{1 + \frac{(1+\lambda) \tan(\theta - \alpha)}{2\lambda\varepsilon}\right\}}$$

$$\therefore \left\{2\lambda\varepsilon + (1+\lambda) \tan(\theta - \alpha)\right\} \frac{C_0}{u} + \frac{C_0}{u} \left\{\tan^2(\theta - \alpha) \tan \beta\right\} = \tan^2(\theta - \alpha) \tan \beta$$

$$\therefore 1 + \frac{C_0}{C_m} \left(1 - \frac{C_1}{u}\right) \frac{\tan^2(\theta - \alpha)}{2\lambda\varepsilon} = \frac{C_1}{u} \left\{1 + \frac{(1+\lambda) \tan(\theta - \alpha)}{2\lambda\varepsilon}\right\}$$

$$\therefore 1 + \frac{C_0 \tan^2(\theta - \alpha)}{C_m 2\lambda\varepsilon} = \frac{C_1}{u} \left\{1 + \frac{(1+\lambda) \tan(\theta - \alpha)}{2\lambda\varepsilon} + \frac{C_0 \tan^2(\theta - \alpha)}{C_m 2\lambda\varepsilon}\right\}$$

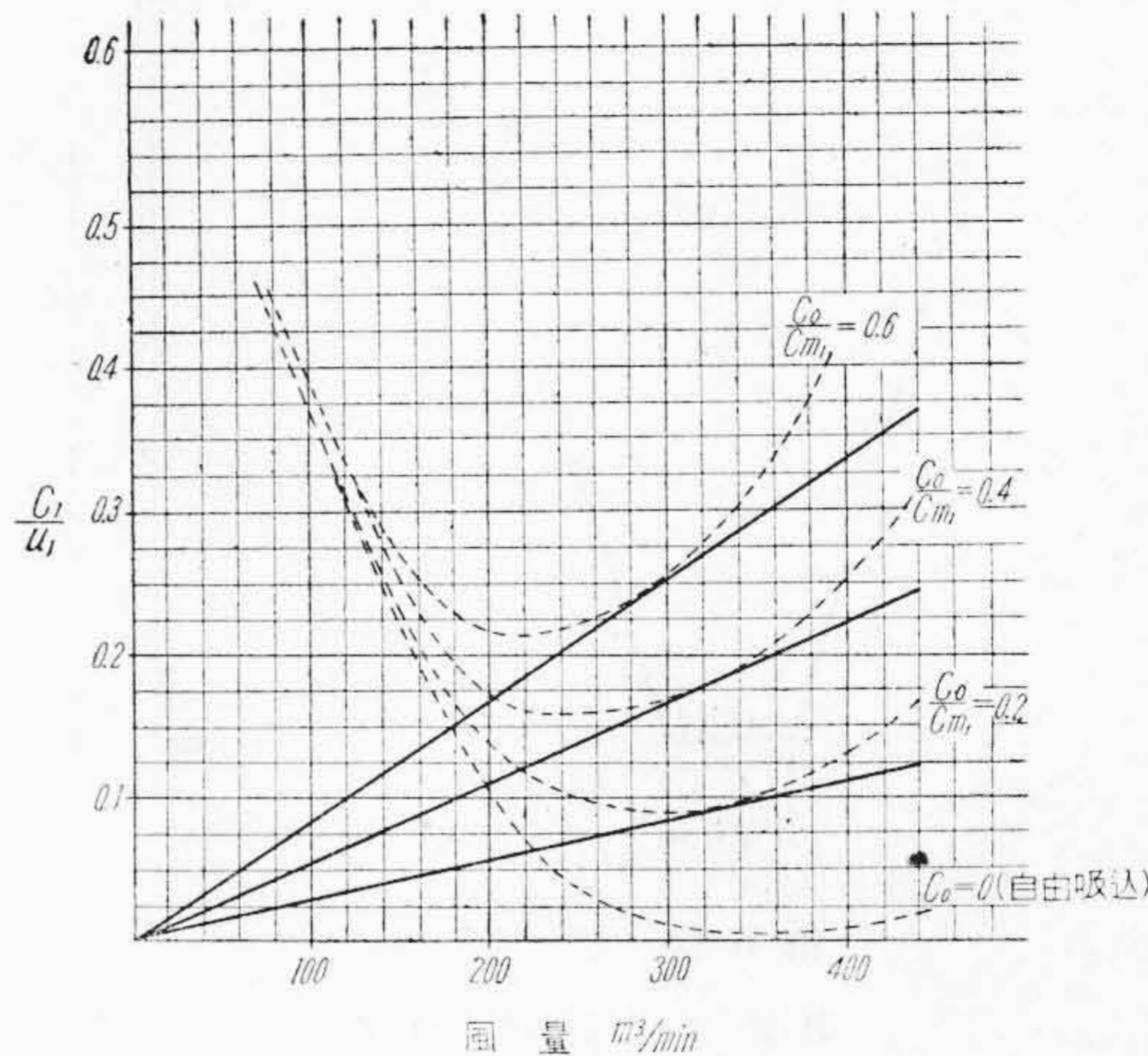
$$\therefore \frac{C_1}{u} = \frac{1 + \frac{C_0 \tan^2(\theta - \alpha)}{C_m 2\lambda\varepsilon}}{1 + \frac{(1+\lambda) \tan(\theta - \alpha)}{2\lambda\varepsilon} + \frac{C_0 \tan^2(\theta - \alpha)}{C_m 2\lambda\varepsilon}}$$

上式に本実験の羽根車第2図を適用して羽根車吸込口に於ける総合ホワールを求め、これを還元すると第4図の如くなる。第4図に於て

C_1 = 羽根車吸込側に与えられるホワール

u_1 = 羽根車吸込側羽根端の周速

C_{m1} = 羽根車吸込側の径方向の風速



第4図 羽根車吸込口に於ける総合ホワール
Fig. 4. Total Whirling at Suction in Turbo-Fan

実線は粘性がないと考えた場合
又点線は粘性を考慮した場合

【III】 実験及び実験結果

(1) 実験装置

実験装置の概略を第5図に示す。

ファン大さ 日立 #5 $\frac{1}{2}$ ターボファン 10 kW 4 P

(2) 実験項目

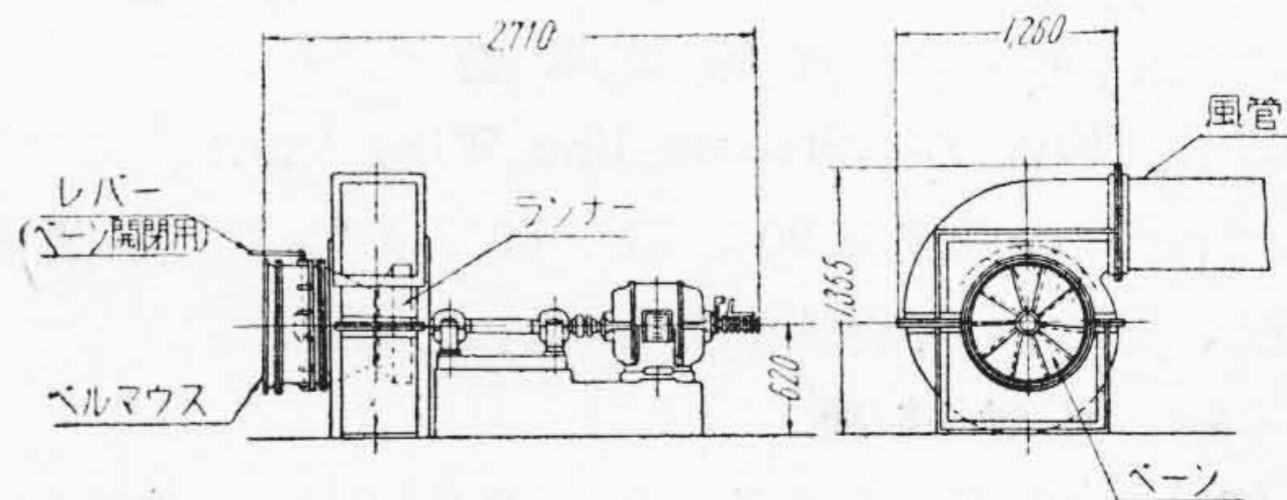
2.1 鉄板製ベーンをファン羽根車の回転方向に開くように取りつけたもので、使用したベーン形状は第6図(次頁参照)に示す。

2.2 流線形翼型ベーンをファン羽根車の回転方向に開くように取りつけたもので、形状は第7図(次頁参照)に示す。

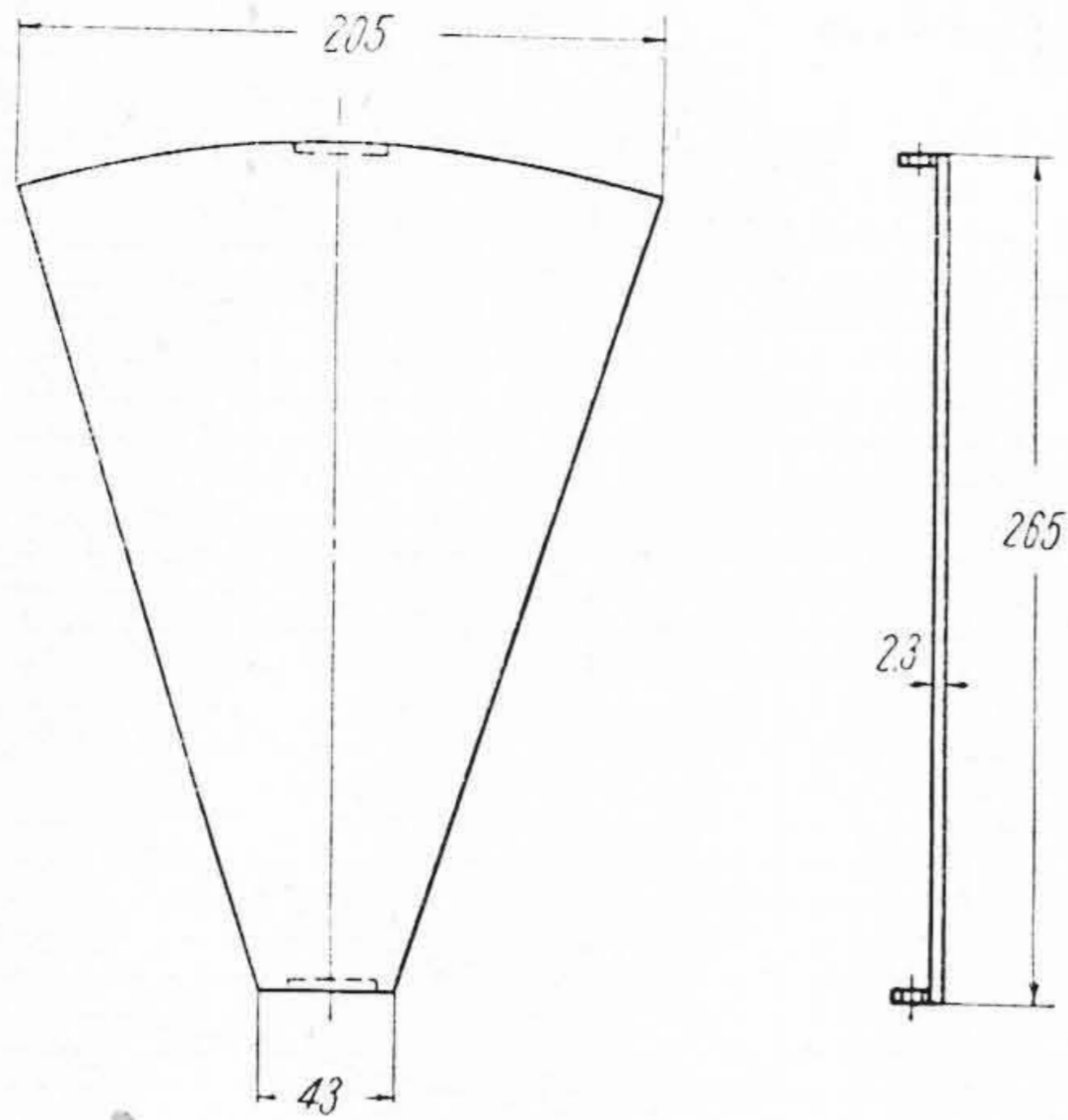
2.3 二次側水抵抗に依り、モータの速度制御を行い回転数を変えた場合

(3) 測定方法

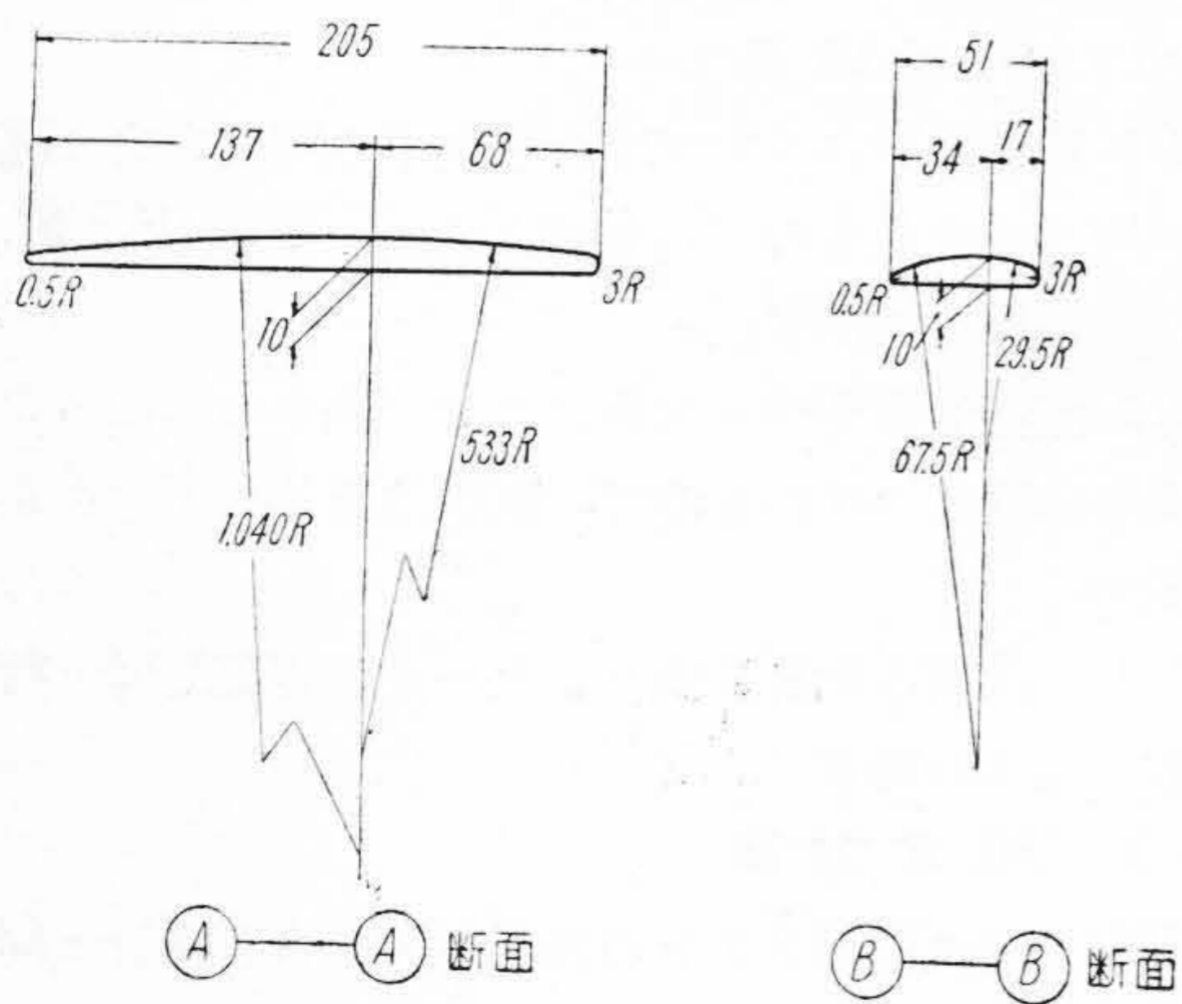
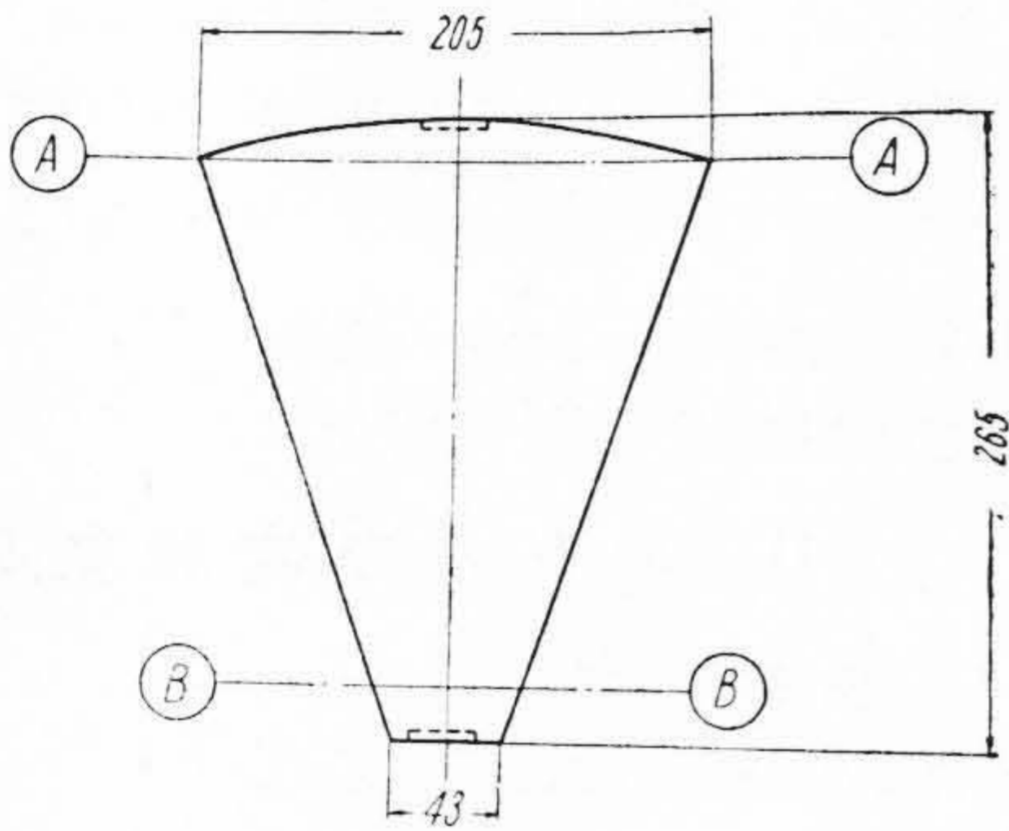
測定方法は通常ファンの性能試験を行う場合と同一に



第5図 実験装置の概略
Fig. 5. Testing Machine Outline



第 6 図 鉄板製ベーン
Fig. 6. Flat Vane

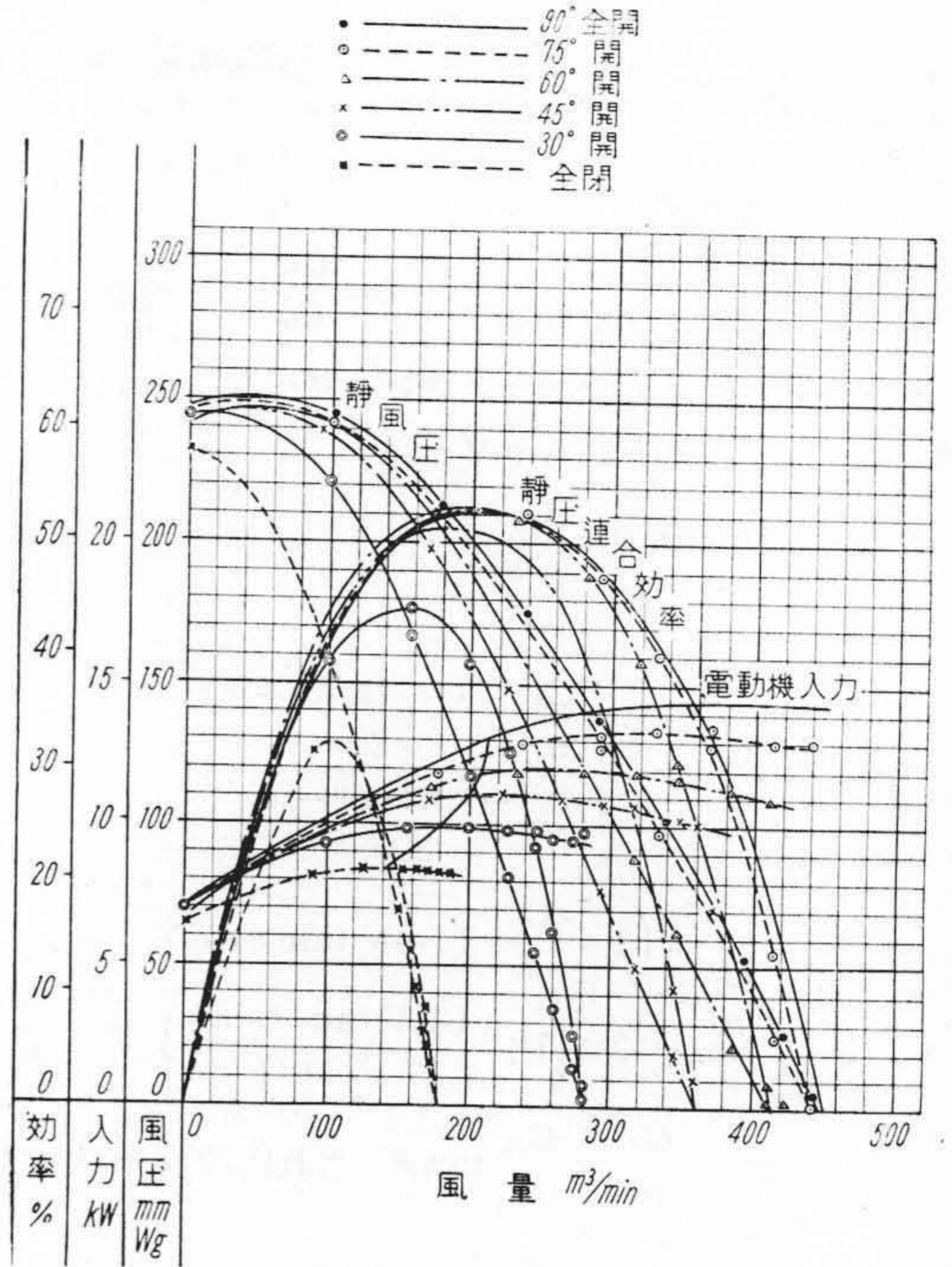


第 7 図 流線型翼型ベーン
Fig. 7. Stream-line Wing Vane

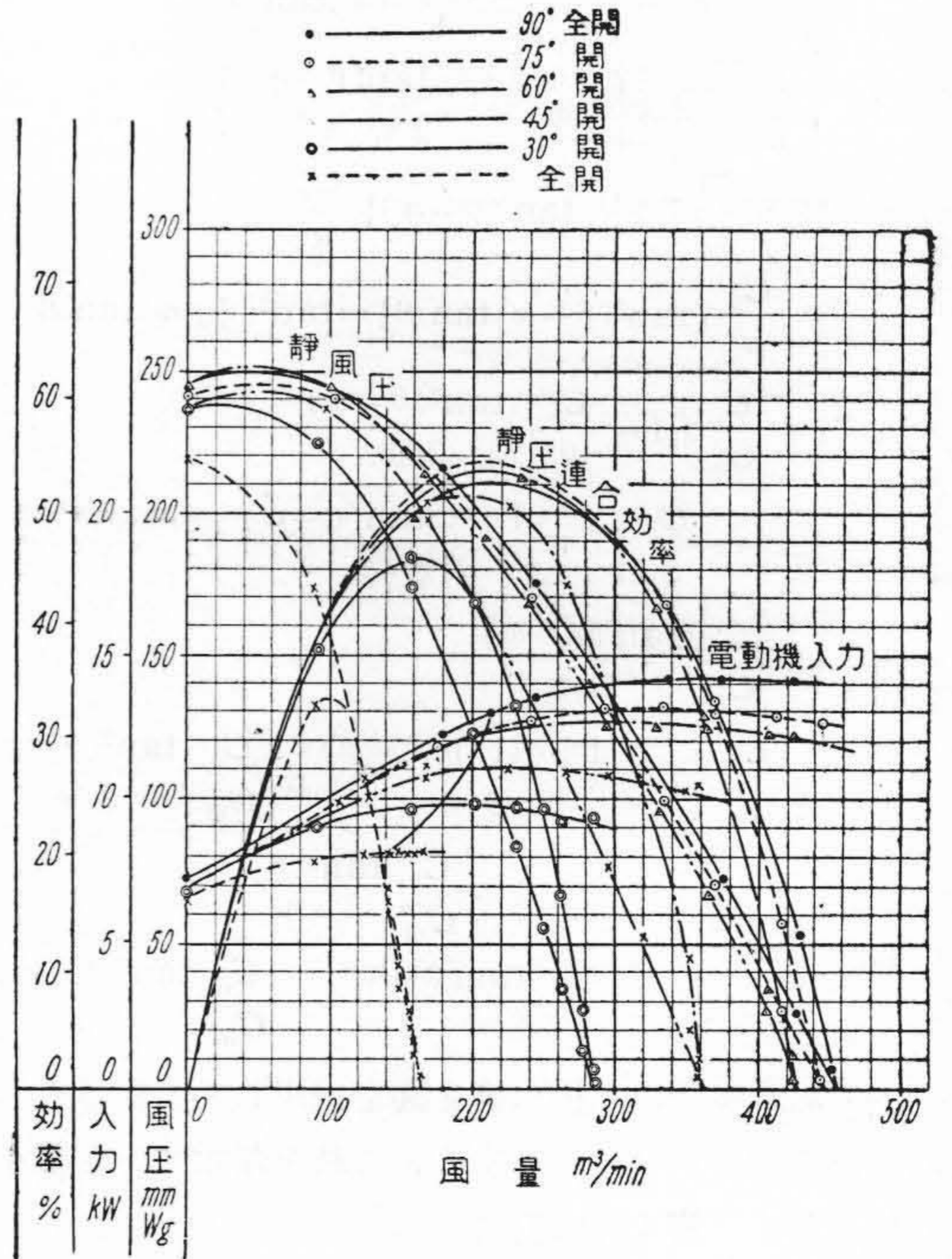
して、ベーン角度を 90°, 75°, 60°, 45°, 30° 全閉と
変え、それぞれの特性を求めたものである。

(4) 実験結果

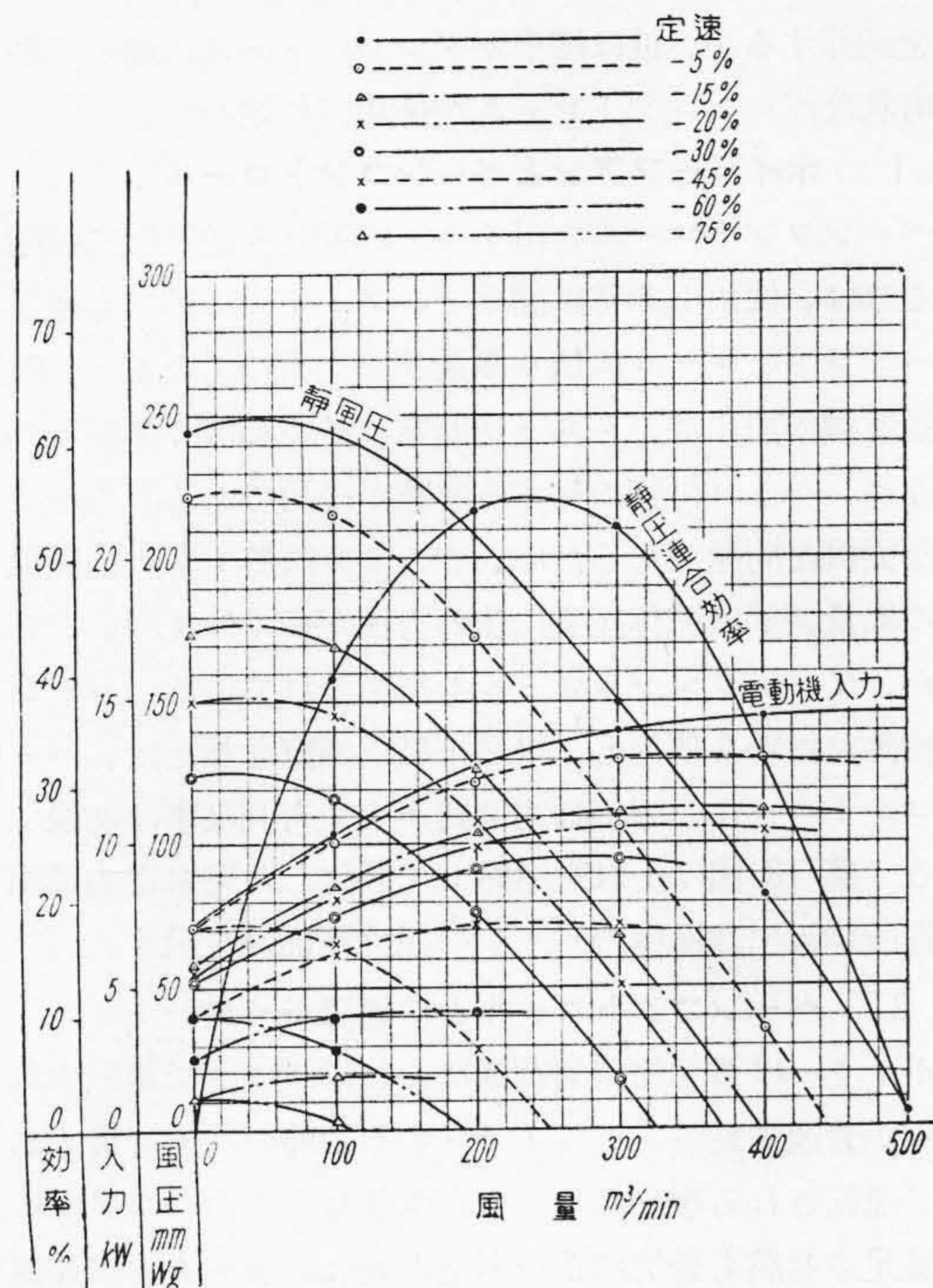
第 8, 9, 10 図はそれぞれ 2.1, 2.2, 2.3, の結果を示し
第 11 図は以上の実験結果に依るファン入力、吐出側
ダンパーコントロールに依る入力、前記計算式に依り求



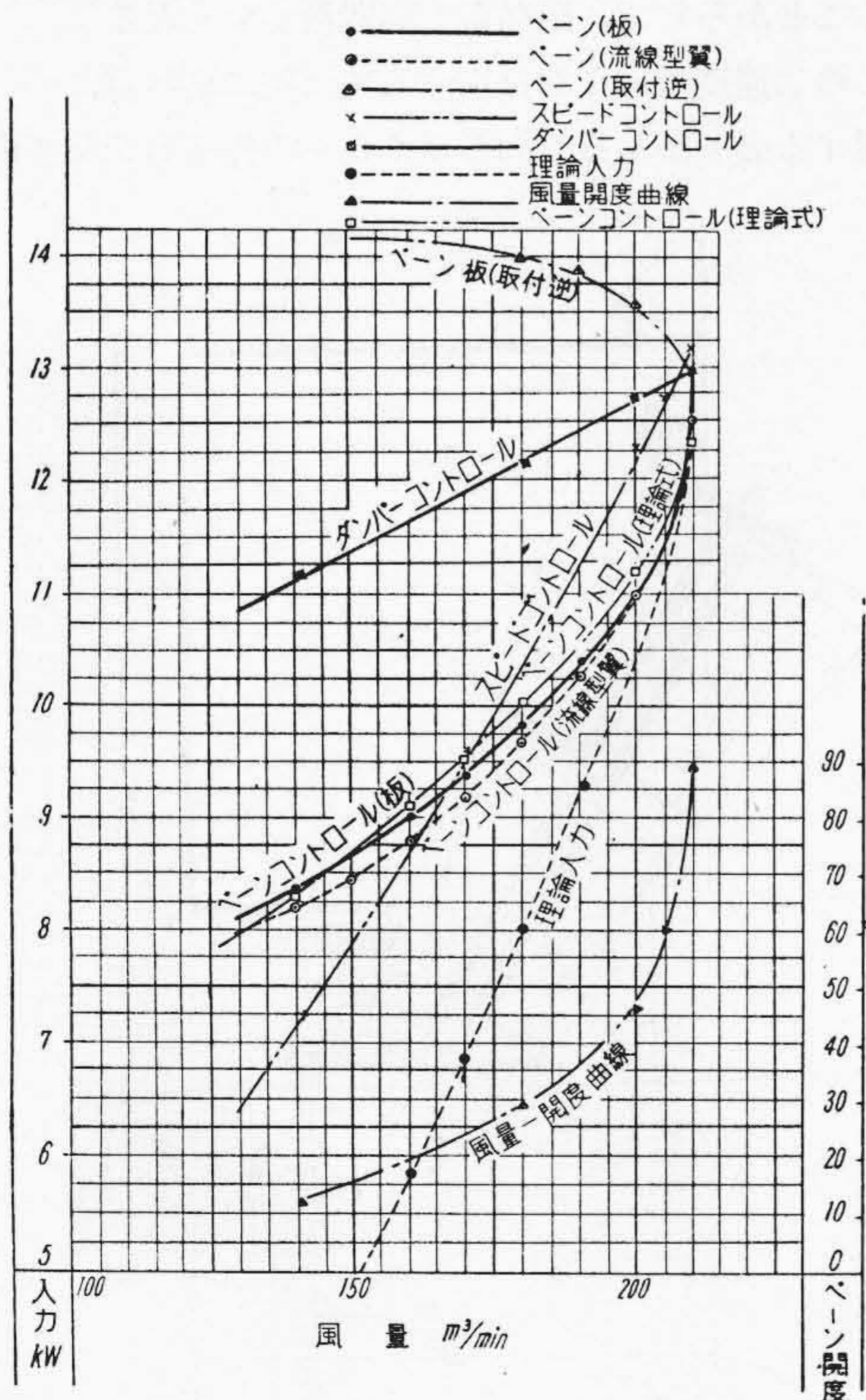
第 8 図 鉄板製ベーンを取付けた時の実験結果
Fig. 8. Result of Testing Done in Turbo Fan with Flat Vanes attached



第 9 図 流線型翼型ベーンを取付けた時の実験結果
Fig. 9. Result of Test Done in Turbo Fan with Stream-line Wing Vanes attached



第10図 電動機速度制御 Fig.10. Motor Speed Control



第11図 ベーンコントロールとスピードコントロールの入力比較
Fig. 11. Comparison of Input of Vane Control and Speed Control

めた入力、及び理論入力等を、このファンの効率最高点で比較したものである。

[IV] 実験結果に対する説明及び検討

(1) 第11図より次の事がわかる。

1.1 ホワールを与えないダンパーコントロールよりベーンコントロールの方が所要動力が少い。

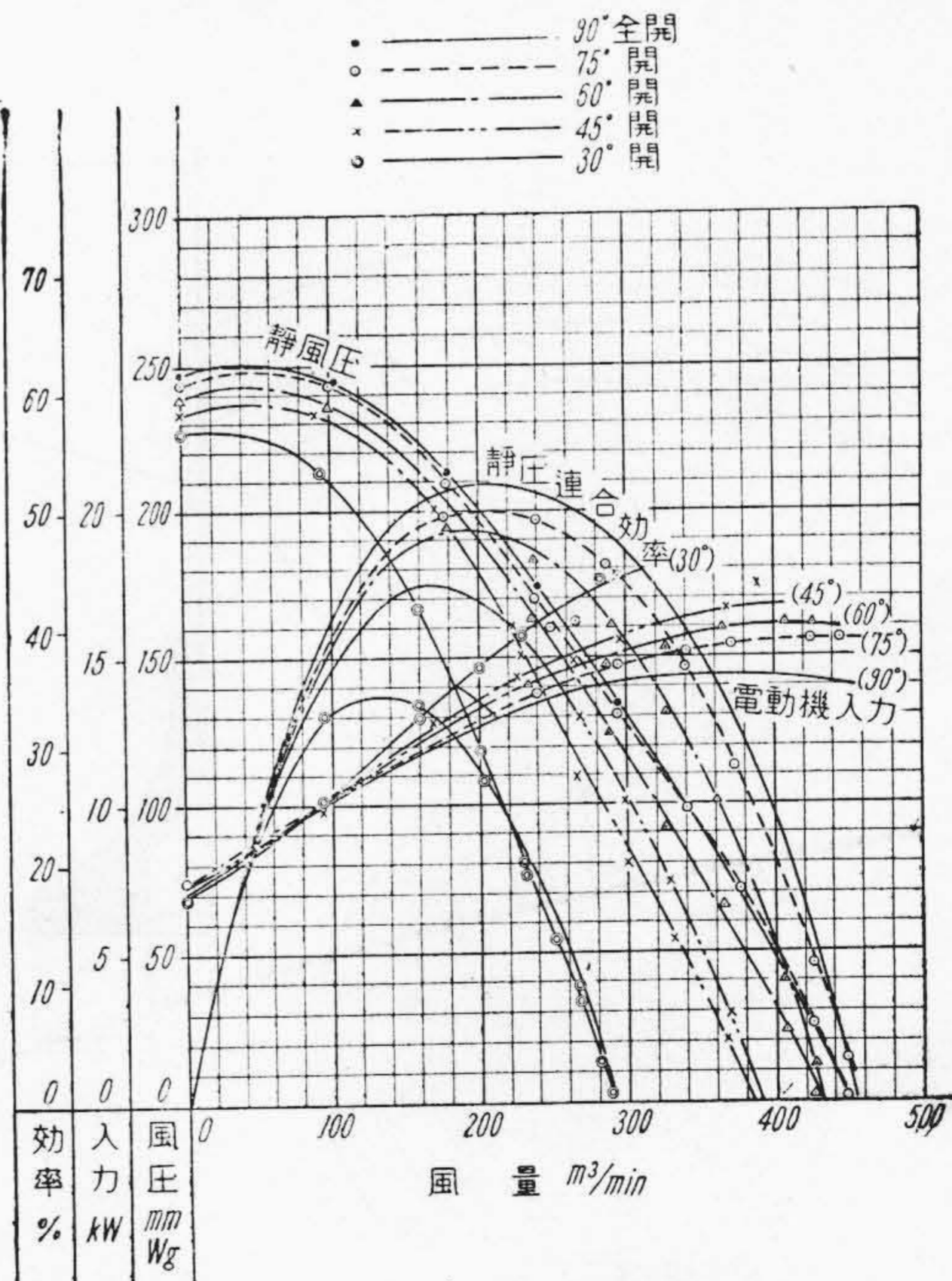
1.2 定速運転でベーンコントロールにより風量調節する場合、風量の20~25%程度(実験では流線形翼型で23%)迄はスピードコントロールに比較して所要動力が少い。

1.3 ベーンは板羽根よりも流線形翼型のものが僅かであるが有利である。この場合何れも与え得るホワールの大きさは変わらない故、動力の消費は変わらないが通る時の抵抗が少いたけ風圧が多く出る為効率がよいことになる。

1.4 実験によつた所要動力と、ホワールの大きさを計算し算出した所要動力が一致しないのは、ベーンコントロールにより与えられる角度がベーンの角度と一致しない為などである。

(2) ホワールの大きさを計算し風量の減少に伴い生ずるホワールをなるべく大きくさせる事が出来るから第11図に示す理論入力に近寄せるように下向に或る程度膨らませる事も出来る。

(3) 全閉消費動力即ち風量零のときの動力が小さい



第12図 鉄板製ベーンを逆に取付けた時の実験結果
Fig. 12. Result of Test Done in Turbo Fan with Inversely Flat Vane attached

ものほど他の条件が同じなら風量の減少に伴うベーンコントロールの動力減少が割合大きい故そのような性能の羽根車の方がベーンコントロールの効率がよい。

(4) 単に強制ホワールを与えればよいという事ではなく適当な羽根車と組合せることによつて優秀な成果が得られると思う。

(5) 実験は以上の他鉄板製ベーンを羽根車の回転方向と逆に開くように取りつけた場合を行つた。結果は第12図に示すように風圧の増加は僅かで「エック」の発表しているような大幅な増加は得られなかつた。所要動力は第11図(前頁参照)から判る通り、他の何れよりはるかに大である。

[V] ボイラーファンと自動燃焼調整装置(A.C.C)

ベーンコントロールに依る風量調節は、ボイラーの押込み及び吸出し送風機のように、風量の調節を絶えず必要とする場合は便利である。

過去に於ては、ボイラー用押込み、吸出し両送風機共ダンパーコントロールを主として採用されて来たが、近頃は電力消費問題が大きく取り上げられ、又ボイラーの負荷が絶えず変わる煩雑さに対し自動燃焼調整装置が採用され始めるに及び、風量調節もそれにともない自動的に行う事が必要になつた。それに対して低廉な定速度モータを使用し流体接手により送風機の回転数を変えて風

量を調節するか、或は機構がダンパーと同様に簡単で然も有利なベーンコントロールが使用され始めた。

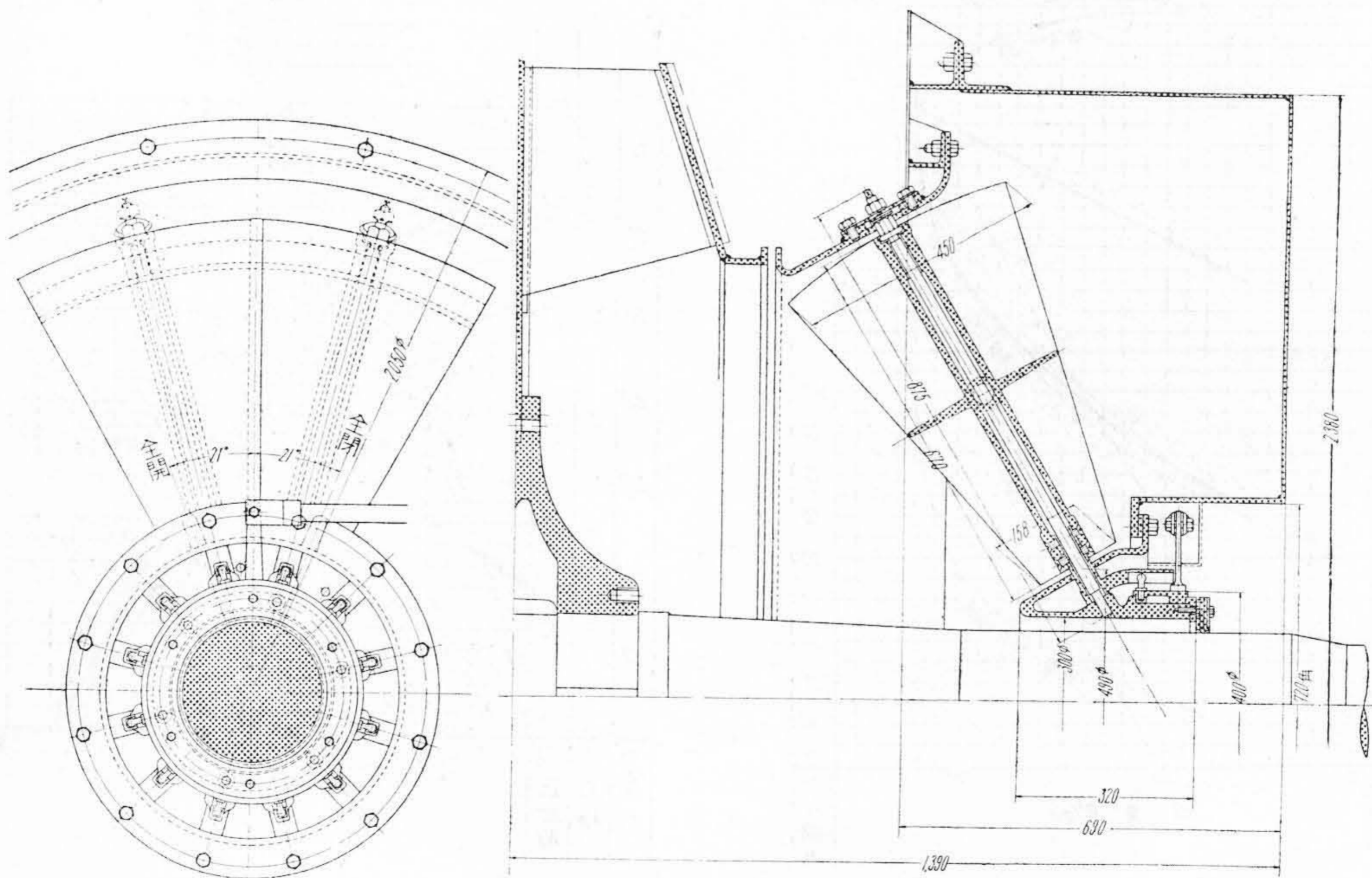
(1) ボイラーファンとベーンコントロール

ベーンコントロールをボイラーの押込み送風機に使用する事は、使用上非常に簡単で、アメリカに於ても殆どベーンコントロールに依り風量調節を行つているが、吸出し送風機に於ては、ダストが非常に多い高温ガスを取り扱う為、ベーン材質に対する考慮が必要である。このような面倒な問題があるため、アメリカに於ても吸出し送風機の風量調節は流体接手に依る方法が多く使われているが、又ベーンコントロールも採用されている。ベーンに特殊な材料を使用し、構造上種々考慮を払えば、ベーンコントロールの方が動力消費が少く有利な事は勿論である。第13図はそれを考慮して製作した東京電力潮田発電所納吸出し送風機のベーンの組立断面図を示す。

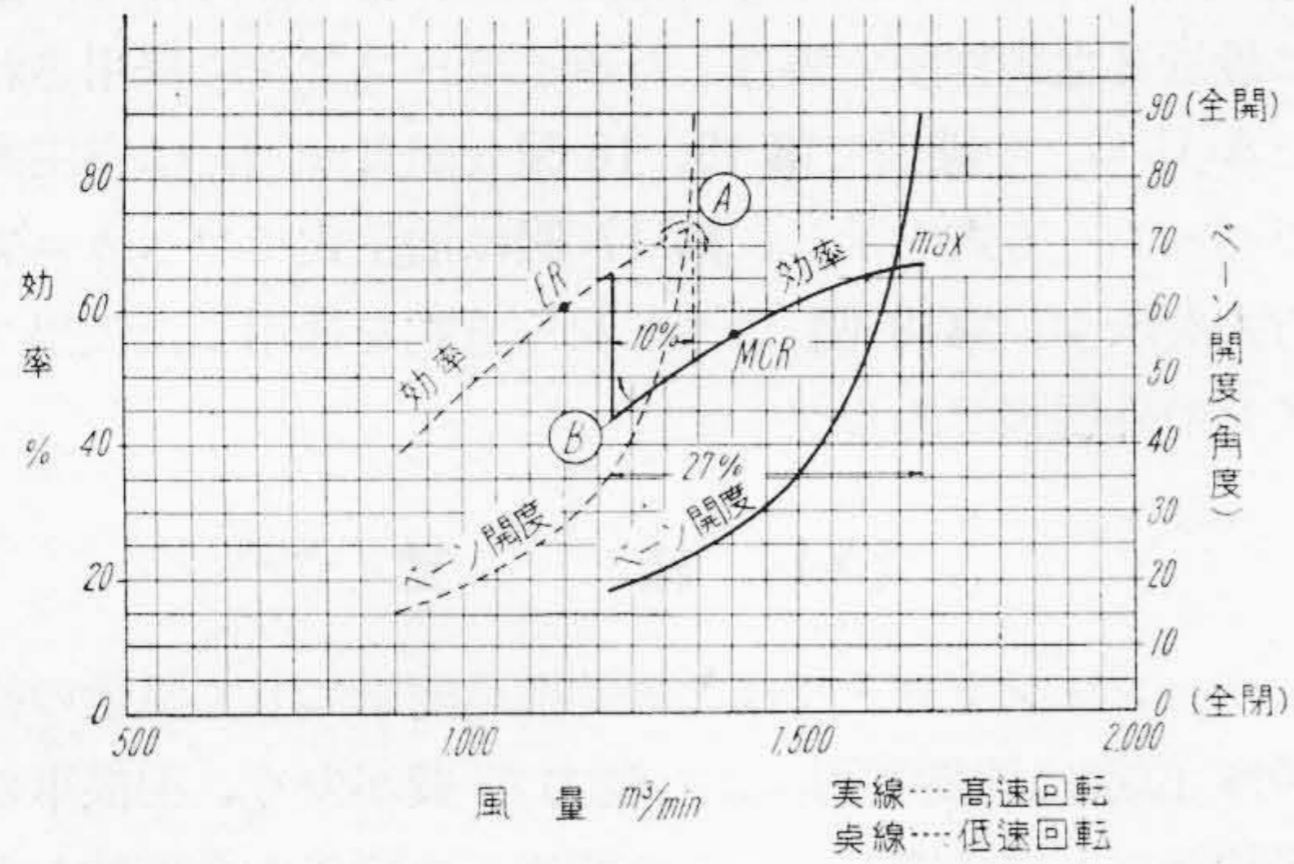
(2) ベーンコントロールと二速度モータ

ボイラーは最初経済負荷或はこれに近い点で運転されるのが普通であるが、ボイラーのその時の状態で最大負荷で運転される事もある。この両仕様を1台のファンにて満足させ然も動力消費を考えた時は、モータを二速度にすれば、ベーンコントロールの有利な部分が2箇所出来ることからして、当然電力消費量が少くなる。

この二速度モータを採用する時は特に切換点について考慮する必要がある。即ちボイラーの経済負荷及び最大



第13図 吸出し送風機のベーン組立断面図
Fig. 13. Section of Vane Equipped on Induced Fan

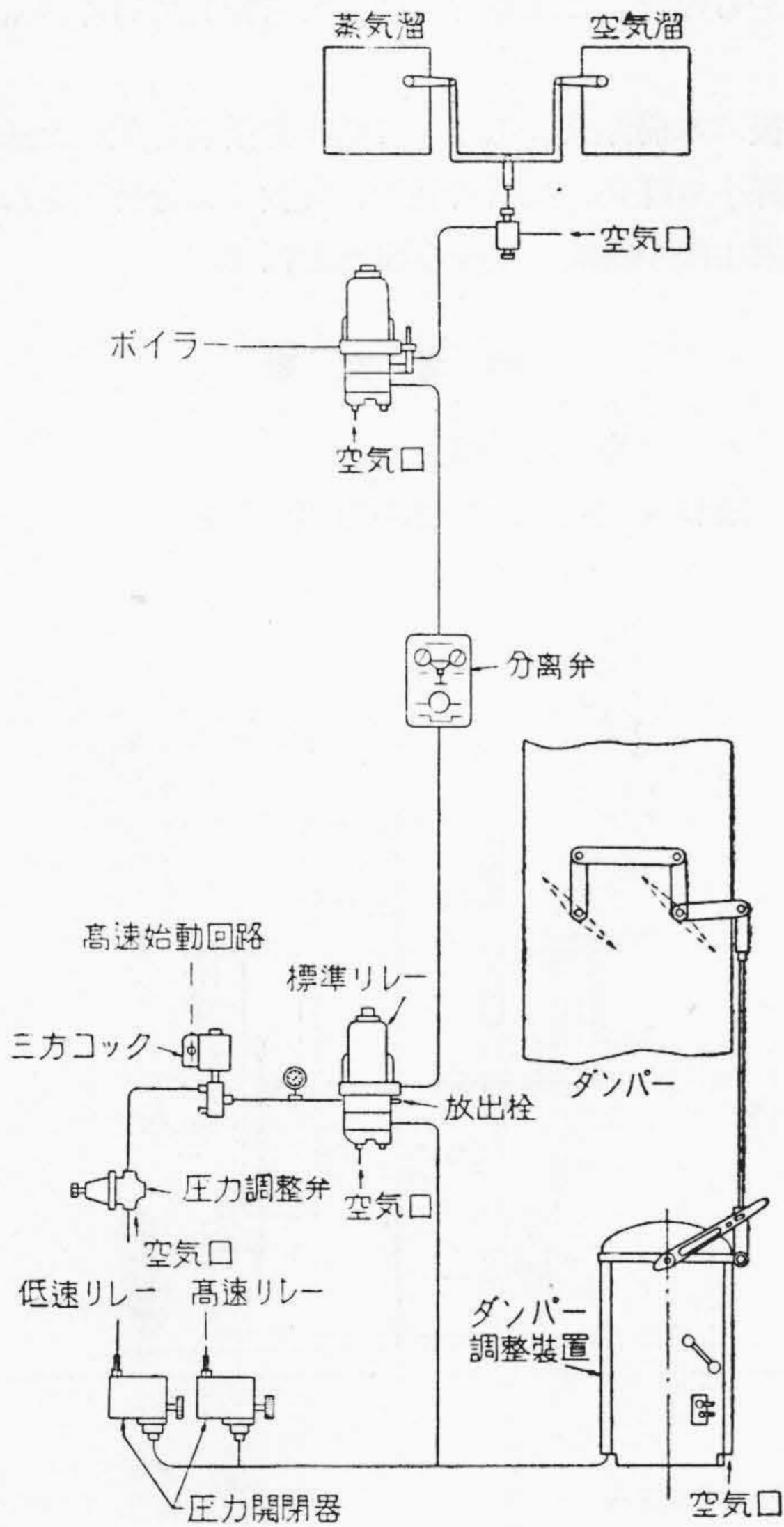


第 14 図 二速度電動機を採用した時のベーンコントロールと切替点との関係
 Fig. 14. Relation of Vane Control with Pole Change, When Two Speed Motor Control is Applied

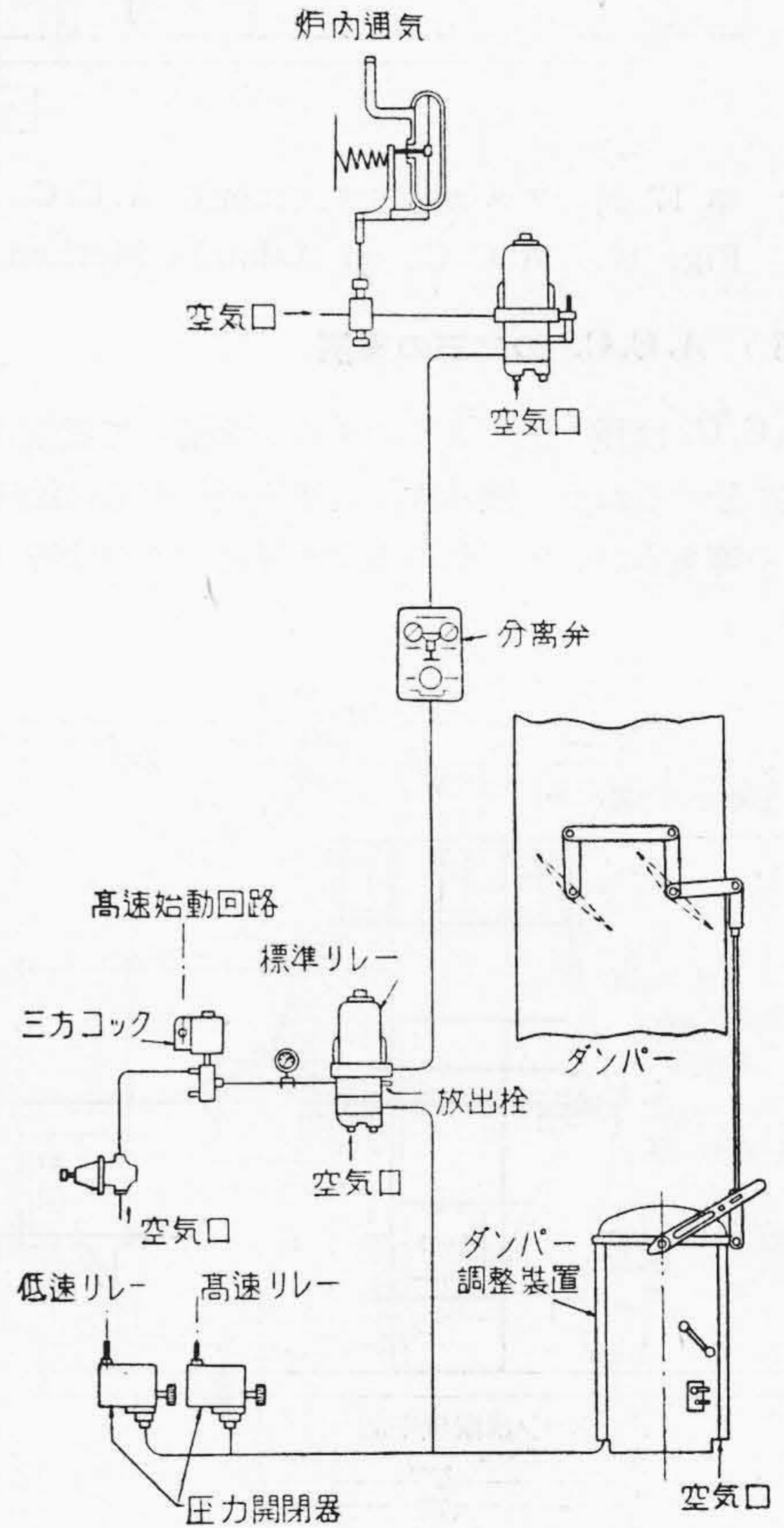
負荷が定まる事に依り、この切替点を定めるのに、勿論この両負荷の点がベーンコントロールを使用する事によつて得られる有利な範囲に入つておらねばならぬが、ボイラーの負荷の状態によつては切替点の所にてファンを運転する事も起りうる為、切替の頻度を少なくすることがモータにも又ボイラーとしても必要である。この切替点に対して次の如き方法が考えられる。第 14 図はその一例を示す。

ER=経済負荷 A=低速より高速に移る切替点
 MCR=最大負荷 B=高速より低速に移る切替点

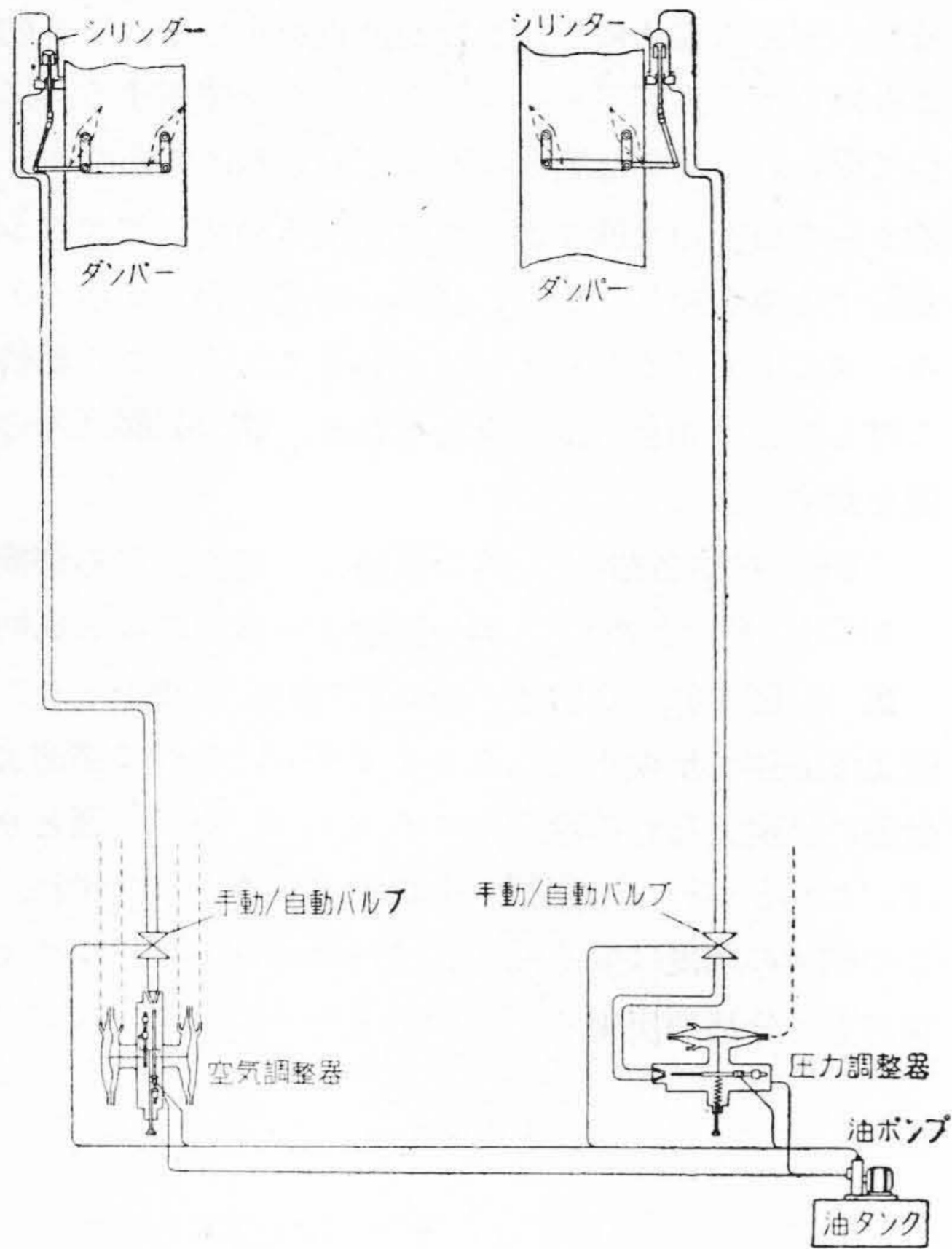
第 14 図の如く切替点の所に約 10% の幅をとり、低速より高速に切換えられるスイッチ A と逆に高速より低速に切換えられる場合のスイッチ B を各 1 箇所とりつけ、これとベーンの開閉とを聯動させるようにすれば、この切替の頻度は少くなり且ベーンコントロールによる利点も十分活用出来る。



第 15 図 ベーラー方式による A.C.C. (押込ファン)
 Fig. 15. A.C.C. (Forced Fan) on Bailey Method



第 16 図 ベーラー方式に依る A.C.C. (吸出ファン)
 Fig. 16. A.C.C. (Induced Fan) on Bailey Method



第 17 図 アスカニア方式に依る A.C.C.
Fig. 17. A.C.C. on Askania Method

(3) A.C.C. の二三の実例

A.C.C. は種々あるようであるが大別して電気式と機械式に分けられる。機械式にも空圧利用のもの油圧利用のもの等あるが、いずれの方式を採用するかは種々の条

件に依つて定められることであるが、第 15, 16, 17 図は最近日立製作所で製作したボイラーファンに採用された A.C.C. の線図で第 15, 16 図 (前頁参照) は空圧式でベーレー方式を示し、第 17 図は油圧式でアスカニア方式を示す。第 18 図はベーレー方式を採用した吸出ファンの外観図である。

[VI] 結 言

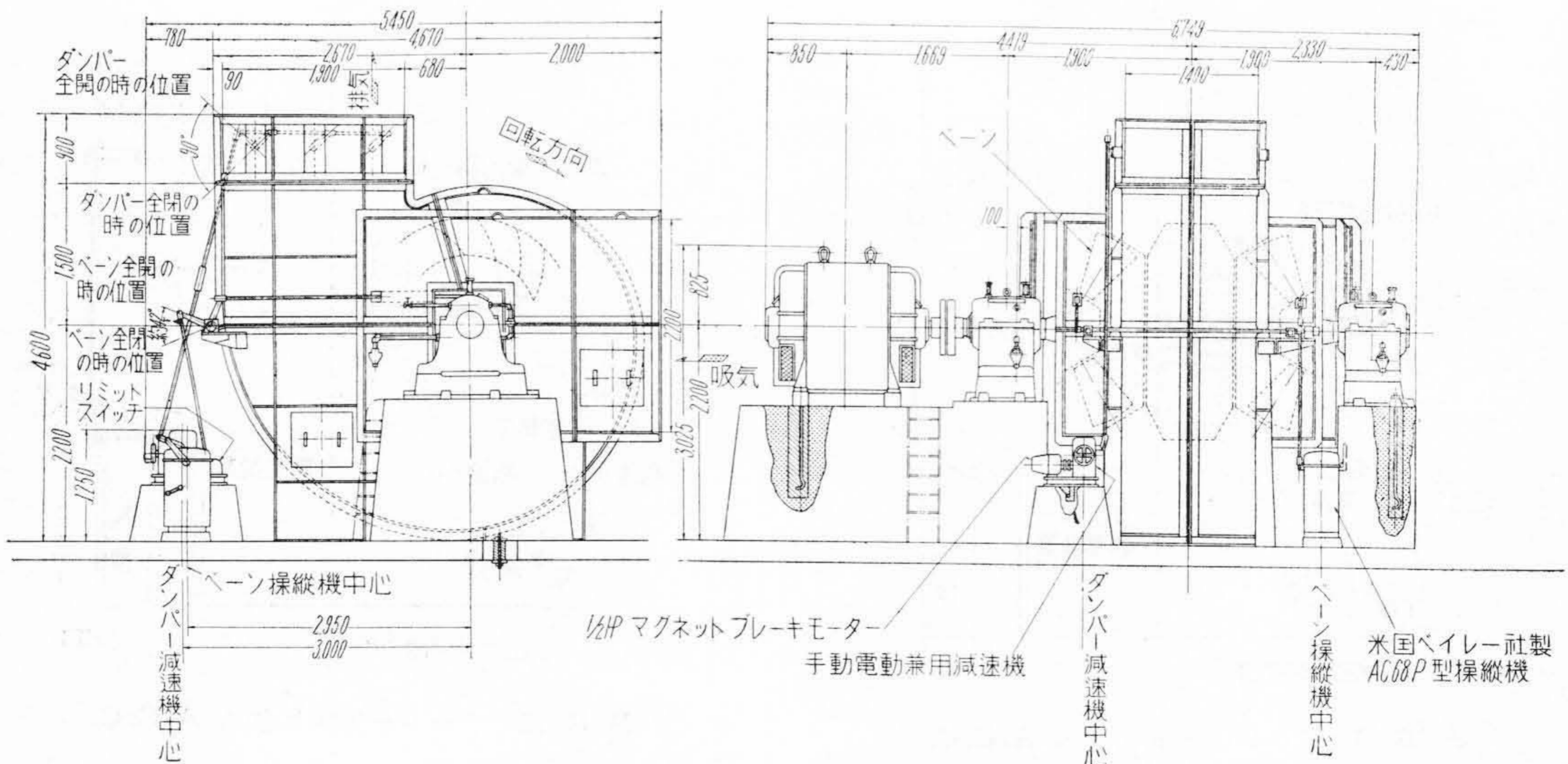
ベーンコントロールは比較的構造簡単にして風量の約 25% 位迄は速度制御に比し動力消費が少く、羽根車の形状及び入口角度とベーンの開度との関係を合理的なものにすれば 30% 位迄は有利で、この有利な範囲を活かして、ボイラーファンに於ては A.C.C. と關聯させ得る。吸出送風機に於ても材質と構造上十分な考慮を払えば大いに利用されてよいと思う。

以上の如くベーンコントロールと羽根車の関係、ベーンコントロールと A.C.C. との関係は非常に面白い問題であるので、これ等を引続いて考究して行くつもりである。

最後に本稿作成にあたって種々御指導を戴いた送風機設計課小橋課長、菰田広利氏、実験にお骨折下された検査課堀主任小西氏に深甚の謝意を表す。

参 考 文 献

1. エック著「送風機」
2. 昭和 7 年 日立機械評論 第 7 卷



第 18 図 ベーレー方式を採用した吸出ファンの外観図
Fig. 18. General View of Induced Fan on Bailey Method