

大容量焼結排風機用翼形ブロワ

Aerofoil Blade Type Exhaust Blowers for
Large-scale Sinter Plants

高 井 良 昌*
Yoshimasa Takai

要 旨

大容量焼結プラント用排風機の大形化に備え、高圧力係数、高効率の翼形ブロワを開発し、昭和44年3月以来、3台の大形排風機を稼働し良好な運転実績を得た。本機は最高効率87%、サージング限界40~50%で作動領域の広い使いやすい特性を有し、同時に騒音も低く、耐摩耗寿命の点でも予想を上回る実績を得た。

なお、大形化に伴う送風機模型試験の方法についても検討を加えた。

1. 緒 言

数年来、製鉄設備の急激な大形化とともに焼結用の主排風機は著しく大容量化した。昭和35年ころ、排風機1台の取り扱う風量は約10,000 m³/min、出力は3,000 kW級であったものが、現在、風量は30,000 m³/min、出力は10,000 kWに達し、この種低圧力遠心送風機分野では群を抜いて大形化している。

このため回転体の大形高速化に伴う強度、材料、生産技術の諸問題とともに、排風機の経済性や、操業上の運転特性についても新しい要求が生じた。これらの問題点を解決するため大形焼結排風機に最も適した特性を持つ高効率の翼形ブロワを開発し、昭和44年2月、川崎製鉄株式会社水島製鉄所に6,000 kW排風機を納入した。引き続き5,700 kW、7,700 kW排風機を完成して長時間にわたる運転実績を得たので、本機の概要について紹介するとともに、排風機大形化の問題点説明について述べる。

また、大形送風機の模型試験についても考察を加えた。

2. 焼結排風機大形化の傾向と問題点

2.1 大形化の推移

排風機の取り扱う風量は焼結面積の増加に比例して大きくなり、動力も比例して大きくなるが、最近では、さらに原料鉱石粒度の影響や操業上の理由から排風機に要求される圧力も上昇する傾向にあり、数年前には一般に1,200 mmAqの吸込圧力であったものが1,400~1,600 mmAqとなり、1,800~2,000 mmAqのものも製作されている。図1に最近10年間にわが国で製作された焼結排風機の風量、電動機出力の推移を示す。ちなみに同時期における火力発電所用押込送風機の風量の推移を同図に示した⁽¹⁾。

2.2 問 題 点

2.2.1 経 済 性

風量、圧力の増加により駆動電動機の出力は5,000 kWを越え、10,000 kWにも達するため、年間の動力費は大幅に増加し、排風機の効率1%あたりの動力費は200~300万円となって排風機の効率が焼結プラントの運転経費に及ぼす影響が大きくなった。一方、排ガス中の塵害(じんがい)を防止するため従来のマルチサイクロンなどの機械式集塵装置に代わって電気集塵装置が採用される傾向となり、排風機を通るガス中のダスト量が減少して摩耗条件が改善されるようになった。従来、焼結排風機は耐摩耗性を重視してラジアル形または後傾羽根のターボ形が採用されていたが、効率重視の考えが強くなり翼形(飛行機翼断面をもつ複翼構造の羽根車)羽根車が採用されるようになった。翼形羽根車はラジアル形に比べ、圧力係数が低く、かつ構造上耐摩耗性に劣るため、

* 日立製作所川崎工場

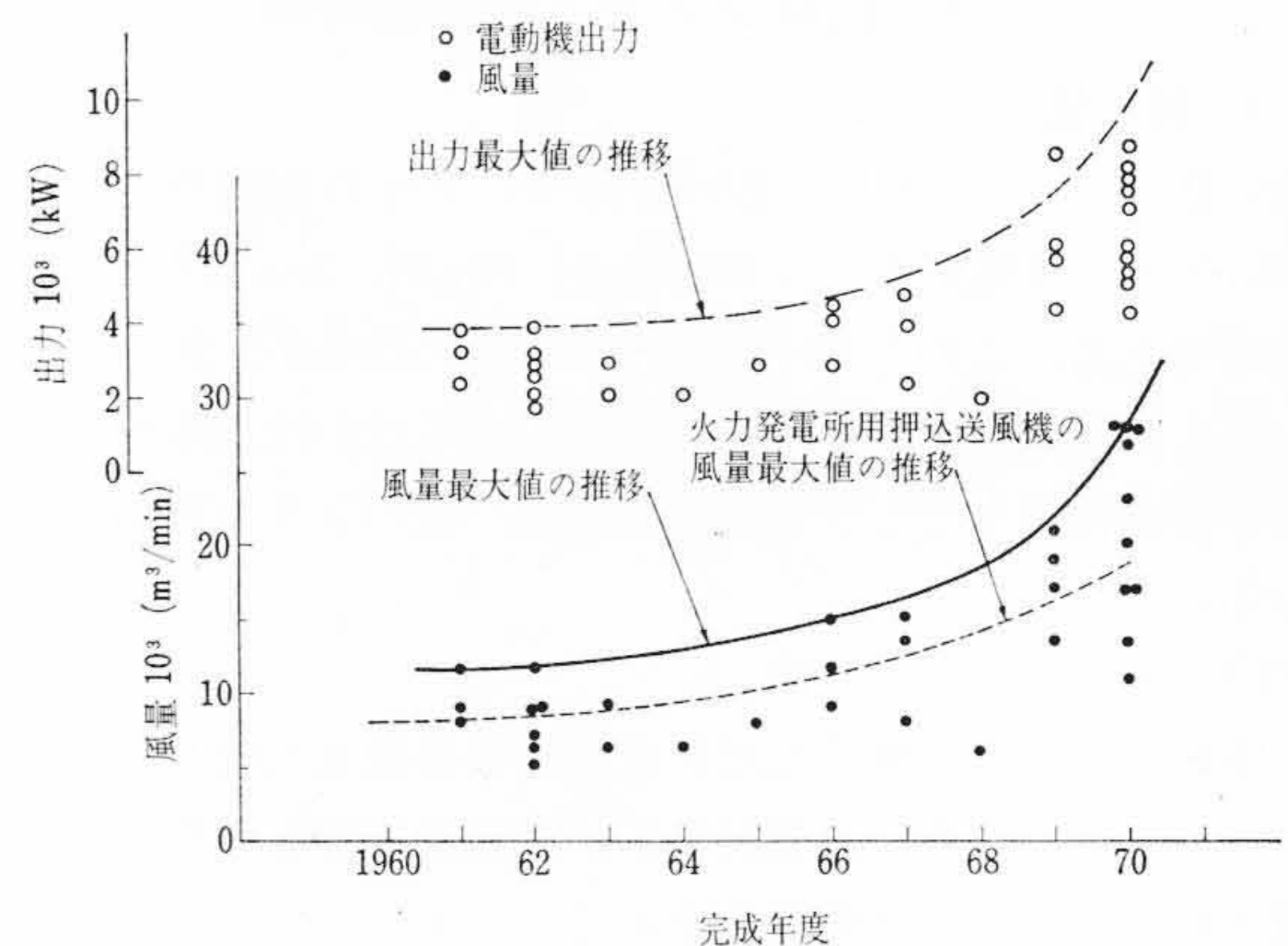


図1 焼結排風機大形化の推移

新たに焼結排風機に適した高効率耐摩耗性羽根車を開発する必要を生じた。ラジアル形やターボ形の効率は一般に75~80%で、翼形の効率は85%以上であるから、これによる効率差は5~10%となり、年間動力費として1,000~3,000万円の節減が可能である。これにより翼形羽根車の摩耗による補修費用はじゅうぶん償うことができると思われる。

2.2.2 特 性

焼結プラントの操業は原料鉱石の性状や層厚の設定などによって通気抵抗が必ずしも計画値どおりの一定値になし得ないことが多い。したがって排風機は広い範囲の風量にわたって安定した作動をすることが望ましい。すなわち、サージング領域ができるだけ小風量域に限られ、風量-圧力特性がいわゆる右下がりの安定垂下傾向であって、しかも作動領域において効率が良好でなければならない。また、同時に耐摩耗性を改善するため羽根車の外径円周速度をできるだけ低くすることが望ましいが、これはブロワの空力特性上前記の特性と相反関係にあるためこの二つの特性を調和させることが必要である。

2.2.3 材 料

大形高周速羽根車を構成する材料の選定には材料肉厚の増加に伴う材料品質、強度の低下が問題となるので、特に厚肉部の材料特性にじゅうぶん留意する必要がある。熱処理についても同様な点に留意せねばならない。

2.2.4 騒 音

排風機の騒音が高層化した煙突を通して市街地に影響を及ぼすおそれがあるため、排風機自身の発生騒音を極力低下させるとともに、必要によっては大形の消音器を設けて大幅な減音を行わねばならない。

表1 火力発電所押込送風用翼形ブロワ納入実績
46年4月, 2,000 kW 以上

納入先	台数	風量 (m ³ /min)	圧力 (mmAq)	温度 (℃)	回転数 (rpm)	電動機 (kW)	備考
東京電力株式会社 鹿島火力発電所	2	17,500	1,070	20	985	3,760	600MW用
東京電力株式会社 鹿島火力発電所	4	13,700	1,310	20	985	3,700	1,000MW用(製作中)
東京電力株式会社 姉ヶ崎火力発電所	2	17,080	930	20	985	3,360	600MW用
東京電力株式会社 姉ヶ崎火力発電所	2	17,500	1,070	20	985	3,760	600MW用
関西電力株式会社 海南火力発電所	4	12,700	1,175	20	1,185	3,150	450MW用
中部電力株式会社 西名古屋火力発電所	4	9,740	1,040	15	1,180	2,150	375MW用(製作中)
東北電力株式会社 秋田火力発電所	2	9,650	1,084	12	1,485	2,300	350MW用
中国電力株式会社 玉島火力発電所	4	9,580	1,160	15	1,180	2,300	350MW用
中国電力株式会社 水島火力発電所	2	9,580	1,160	15	1,180	2,300	350MW用(製作中)

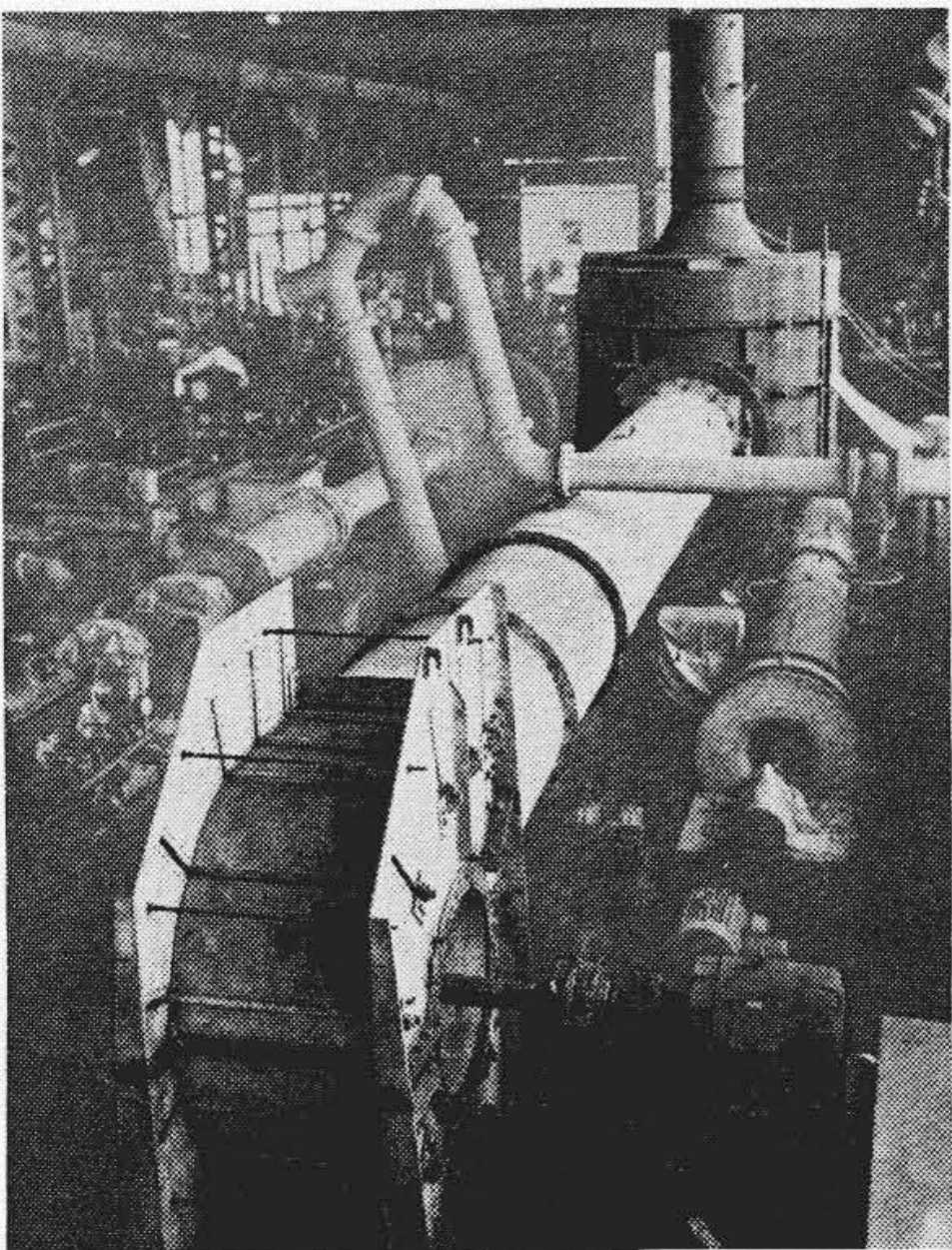


図2 模型試験機

2.2.5 その他

これらの技術的諸問題点のほかに大形化によって実機の工場試験が困難となっており、新たに模型試験などの手法による特性試験についても検討する必要を生じた。

3. 排風機大形化対策

3.1 焼結排風機用翼形ブロワの開発

火力発電所向け押込送風機として納入した大形翼形ブロワの実績は表1に示すとおりである。これらの送風機は大気を昇圧してボイラに押込む用途のもので、すべて効率の良い翼形羽根車を採用しているが、所要圧力ヘッドは1,000 kg-m/kg 前後である。これに対して焼結排風機は所要圧力ヘッドが1,800~2,400 kg-m/kg と高く、羽根車の負荷はほぼ2倍に相当し、その円周速度は170~210 m/s になるため、強度上からも耐摩耗上からも圧力係数の高い羽根車を開発して円周速度を低く設計する必要がある。また、同時に前述の使いやすい風量-圧力特性を得るためサージング限界を小風量域に押えることが望ましい。前記の火力発電所用押込送風機の経験をもとに、羽根車の羽根出入口角度、内外径比、羽根枚数、節弦比、羽根形状などについて諸元の理論解析を行ない、上記の特性に適合する数個の羽根車について、直径750φ、模型比1/5のブロワを試作し、模型試験を実施した。図2は模型試験機の外観を、図3は模型羽根車の外観を示したものである。図4は模型試験結果の一例を示すもので次の成果を得た。

- (1) 圧力係数は同種の翼形ブロワに比べ10~20% 上昇させることができた。
- (2) サージング領域は効率最高点風量に対し40~50% 以下となり、作動領域を10~20% 広げることができた。
- (3) 実機換算の予想効率83~85% を得た。
- (4) 比騒音値は従来の翼形ブロワに比較して5~6 dB 低下した。

3.2 模型試験方法の検討

わが国の慣行では送風機は製作工場における工場負荷試験を製作者側で実施するのが通例であり、JIS B 8330 にも詳細にわたって工場試験に関する規則が制定されている。しかし排風機における電動機出力はガス温度150℃、吸込圧力-1,200~-1,800 mmAq 程度の吸込条件に合わせて選定した値であるから、製作工場における通常の試験状態(20℃ 大気圧)の規定回転数における所要動力(1.6~1.7倍)では大幅な過負荷となり運転できない。したがって通常は試験用電動機や試験用歯車減速装置などを利用して回転数を20~30% 減速して運転することが多い。しかし排風機の出力が5,000 kW を

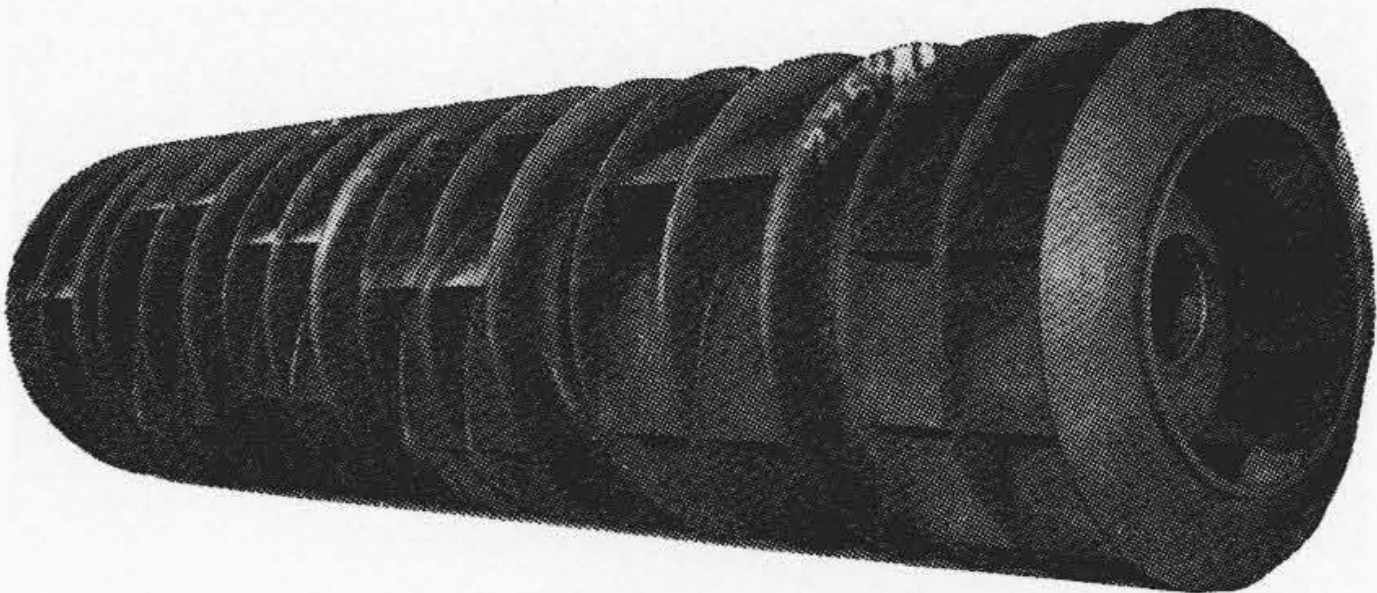


図3 模型試験用羽根車

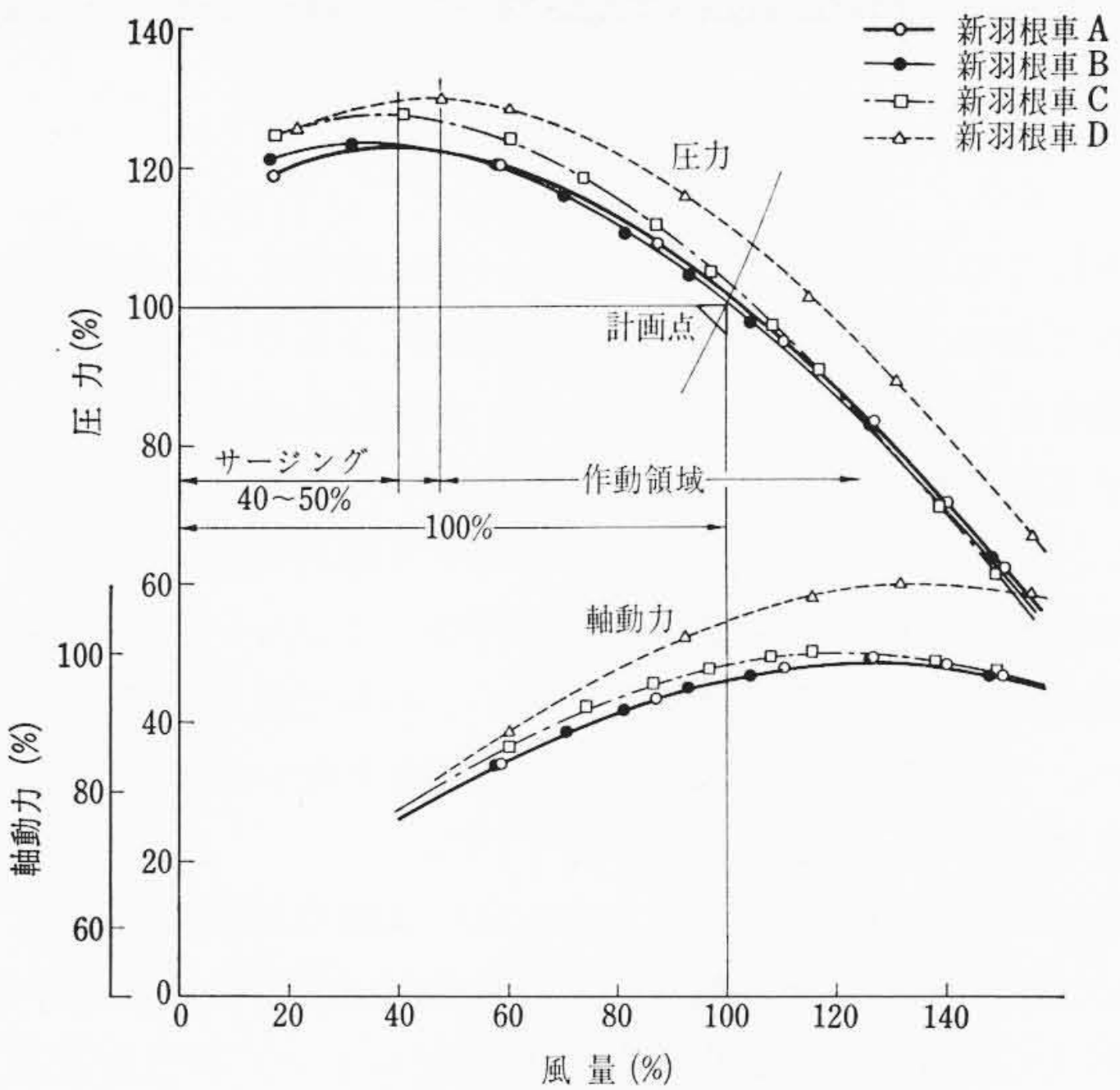


図4 模型特性試験結果の一例

越えて大形化するとこれらの試験装置や電源設備などの経済性から製作工場における負荷運転は制約されることが多く、実効果が少なくなっている。さらに電動機が大形化して電圧が特高電圧になったり、起動方法が複雑化してくると受変電設備の制約を受けて、事実上試験にふさわしい運転状態が得られない。図5は6,000 kW 排風機の工場における減速運転の状況を示したものであるが、試験用の大形減速装置をはじめ諸設備が大形化して経済的でない。

流体機械のうち、水車は工場試験が不可能なことから、すでに古くから模型試験の方案が考案されており商用に供されている。これらの場合には古くから使用されている MOODY, ACKERET あるいは HUTTON らの換算率が採用されており IEC, JIS などにも規

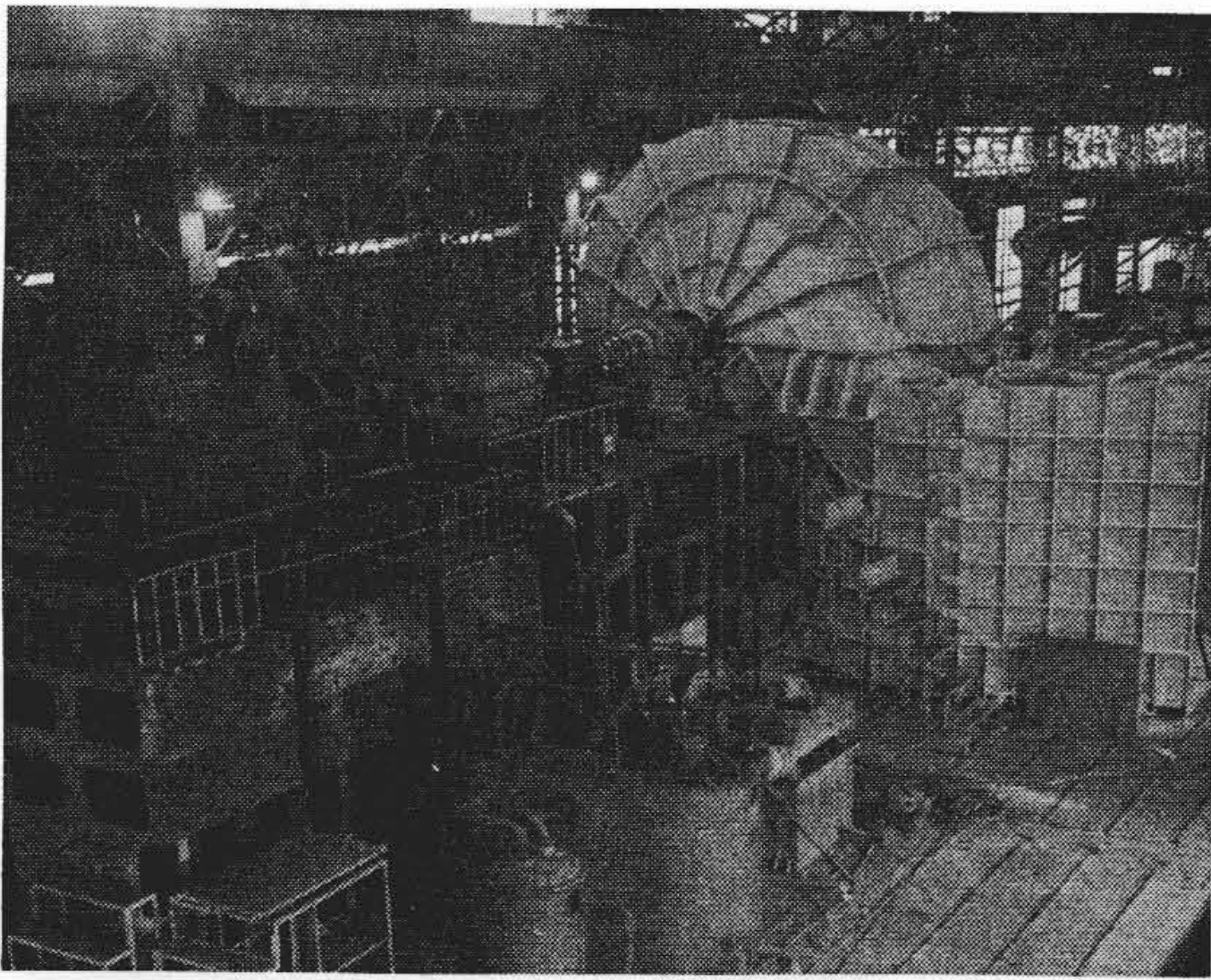


図5 6,000 kW 排風機の工場組立状況

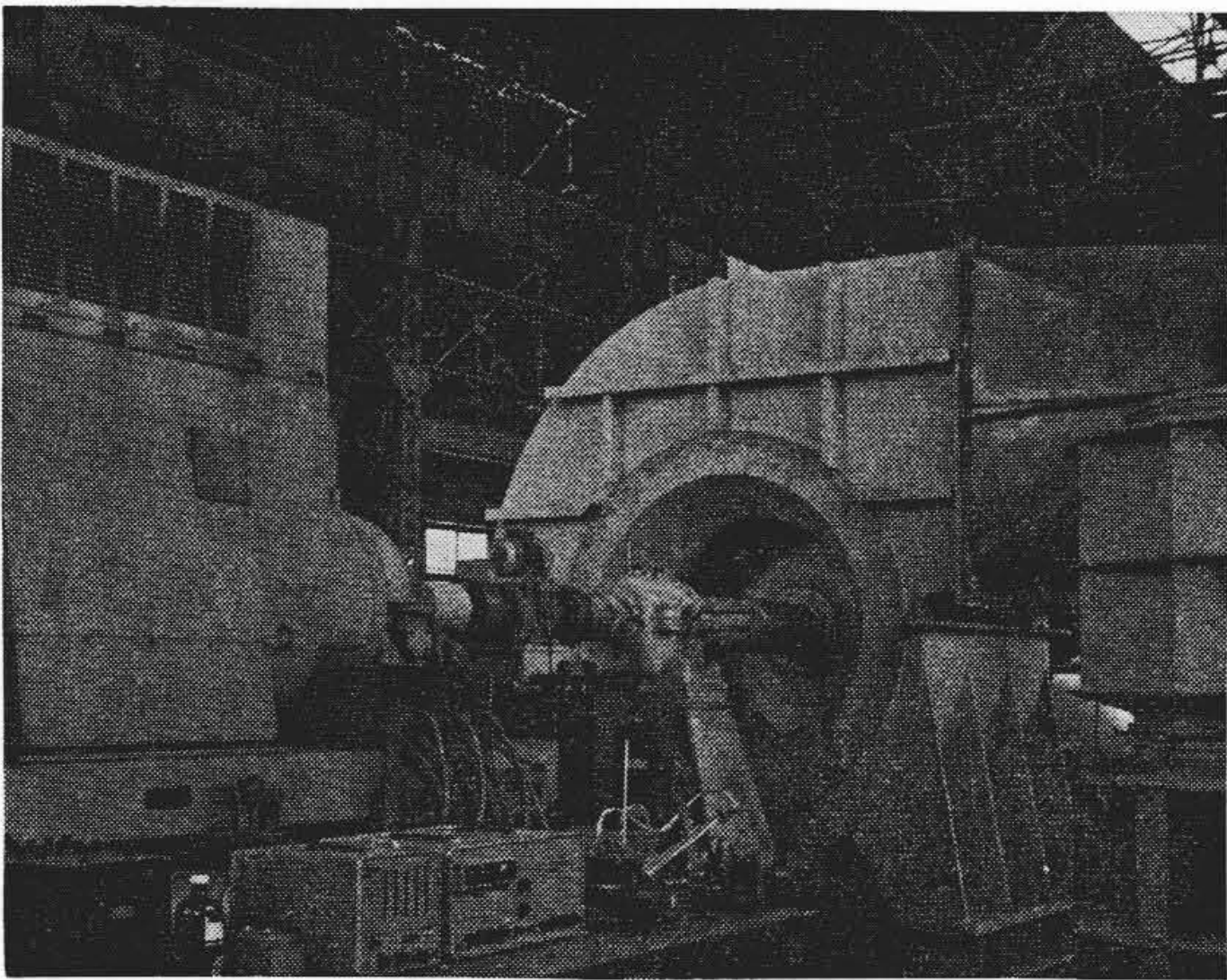


図6 フルサイズ試験機外観

格化されている。ポンプにおいても一部に模型による商用試験が行なわれており、機械学会においても模型によるポンプ性能試験方法が審議されている^{(3)~(5)}。これに対して送風機の場合には模型試験に関する文献も少なく、特性の換算についてもオーソライズされていない。しかしアメリカにおいてはボイラ用送風機をはじめ、ほとんどの大形送風機は工場負荷試験を行っていない実情であり、多くの場合は模型による「タイプテスト」のみで現地試験を実施していない。またBS規格では工場試験を行えない鉱山用ファンについて現地試験の規定を設けている^{(6)~(8)}。

焼結排風機の場合、工場における負荷試験は困難であるが、現地において煙道中でかなり精度の良い風量測定が可能なが多い。したがって現地における全負荷ガス運転によって特性を把握(はあく)する方法が最も正確と考えられるが、現地運転に先立ってあらかじめ工場において模型試験を実施し、実機の高精度で予測できることが望ましい。このような理由から模型と実機の流体的寸法効果についてじゅうぶんな実験データを収集することが有用である。寸法効果の内容については本報では触れないが、前述の直径750φの羽根車の模型を基礎に実機と、実機に近いフルサイズ試験機の工場試験データを照合して流体的寸法効果データの積上げを行なっている。前項に述べた焼結排風機の模型試験のデータもこれらの資料によって裏付けされている。図6はフルサイズ試験機の外観を示したものである。図7は一定の模型条件における模型と実機の流体的効率換算率の一例である。

3.3 羽根車用材料と溶接技術

従来、この種送風機羽根車には溶接用高張力鋼材が使用されており、材料管理、溶接強度、溶接施工などについてじゅうぶんな技術

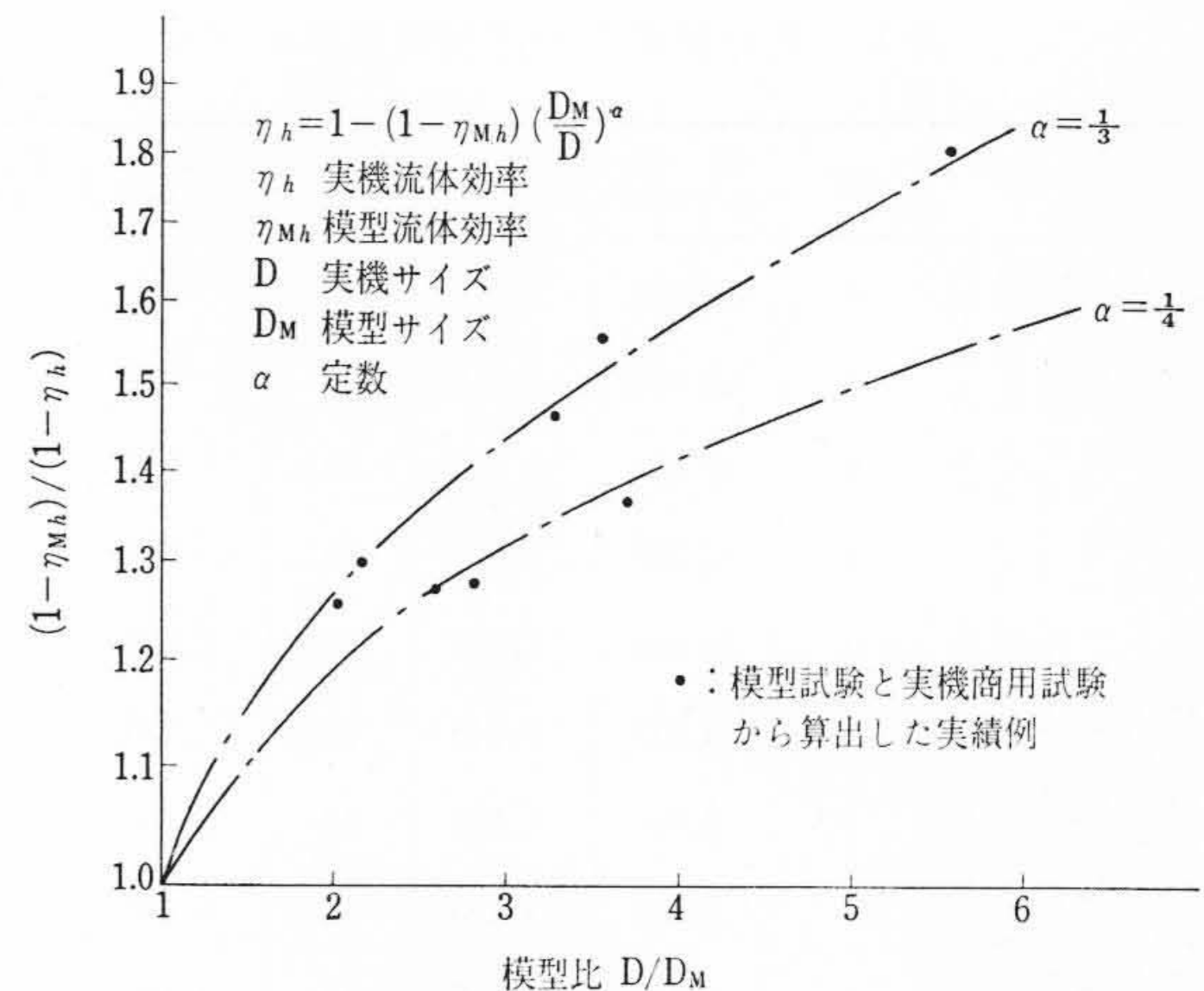


図7 流体効率寸法効果の一例

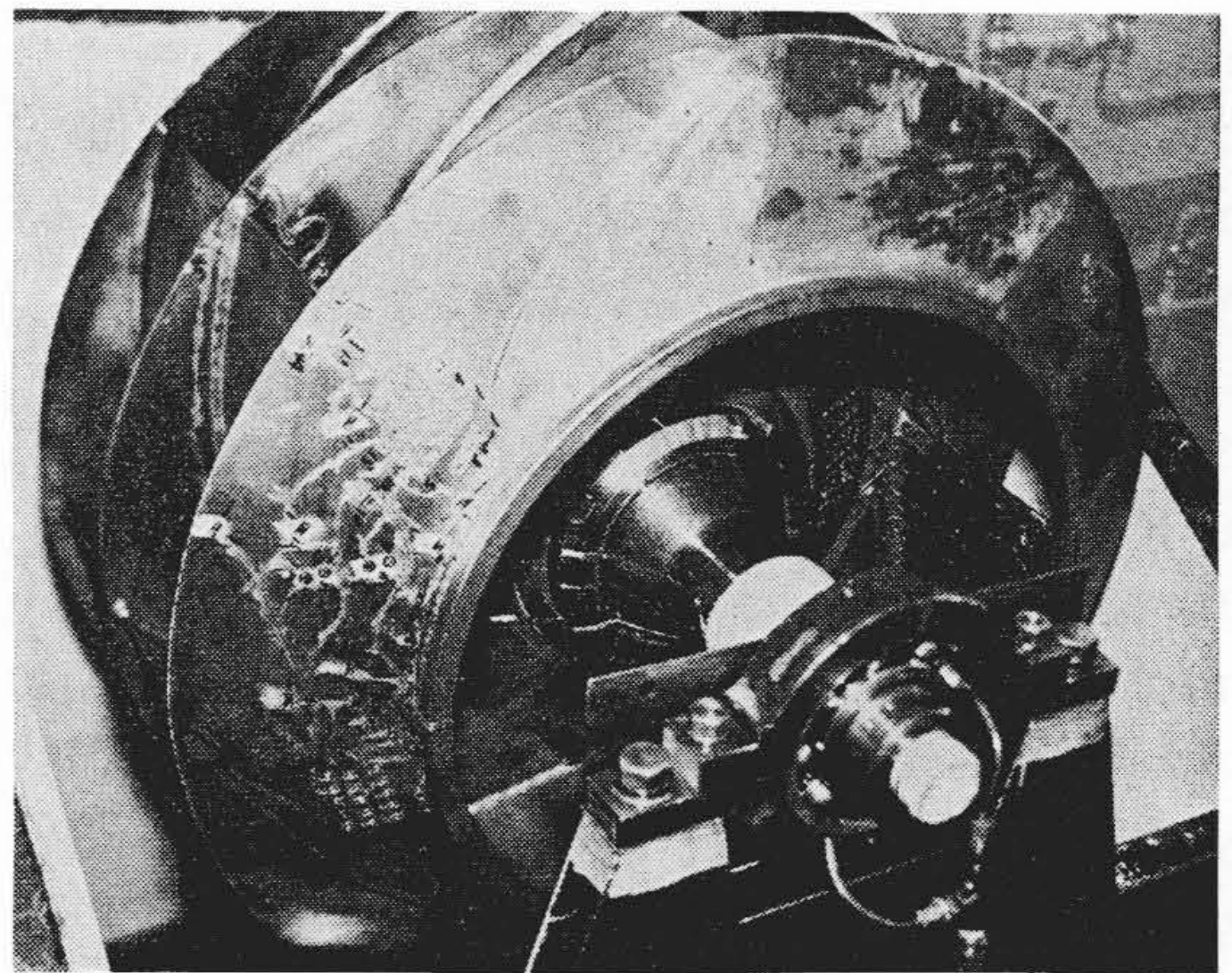


図8 応力解析中の供試羽根車

管理がおこなわれている。市販の高張力鋼は圧延方向の強度のみ規定されているため、回転円板のように圧延直角方向にも同一強度を要求する部材には適さない。また調査の結果、板厚が50~60mm以上に厚くなると板厚中層部の介在不純物が目立ち強度上有害である。ことに高速回転円板では外周に向かって薄く板厚のテーパ加工をするため溶接施工面に欠陥が現われ、溶接施工によりハクリ性割れの危険性がある。こうした厚板化の問題点を解決するため、材料メーカーの協力を得て、板厚方向ハクリ性、圧延方向性、溶接性について実験研究を行ない、特定成分の材料を開発し、材質上の規制、溶接施工条件などを確立した。

一方、最近、ひずみ測定技術の急速な進歩により、単純な回転円板でなく羽根車としての構造物が運転中に負荷される静的、動的応力の分布状況が解明されつつあり、高速羽根車の設計に貴重な資料を提供しつつある。近い将来、電算機を活用した高度の理論解析とこれらの実験解析の成果により、羽根車細部の応力分布状況の把握が可能になれば合理的設計に大きく貢献するものと考えられる。図8は実験応力解析の供試羽根車である。さらに大形厚肉化する羽根車についてはターボ圧縮機などの高速羽根車に使用している低合金鋼を適用していっそうの大形化に対処する見通しを得たが、これらの大形羽根車においては製作コストの大きな部分を占める回転体材料の選定と経済性が重要な課題となろう。

3.4 羽根車耐摩耗性の向上

機械式集じん装置に代わって電気式集じん装置が採用されるようになり、排風機に流入するガス中のダスト量は20~100 mg/Nm³程度に低減したため羽根車の寿命は延びる傾向にある。しかしなが

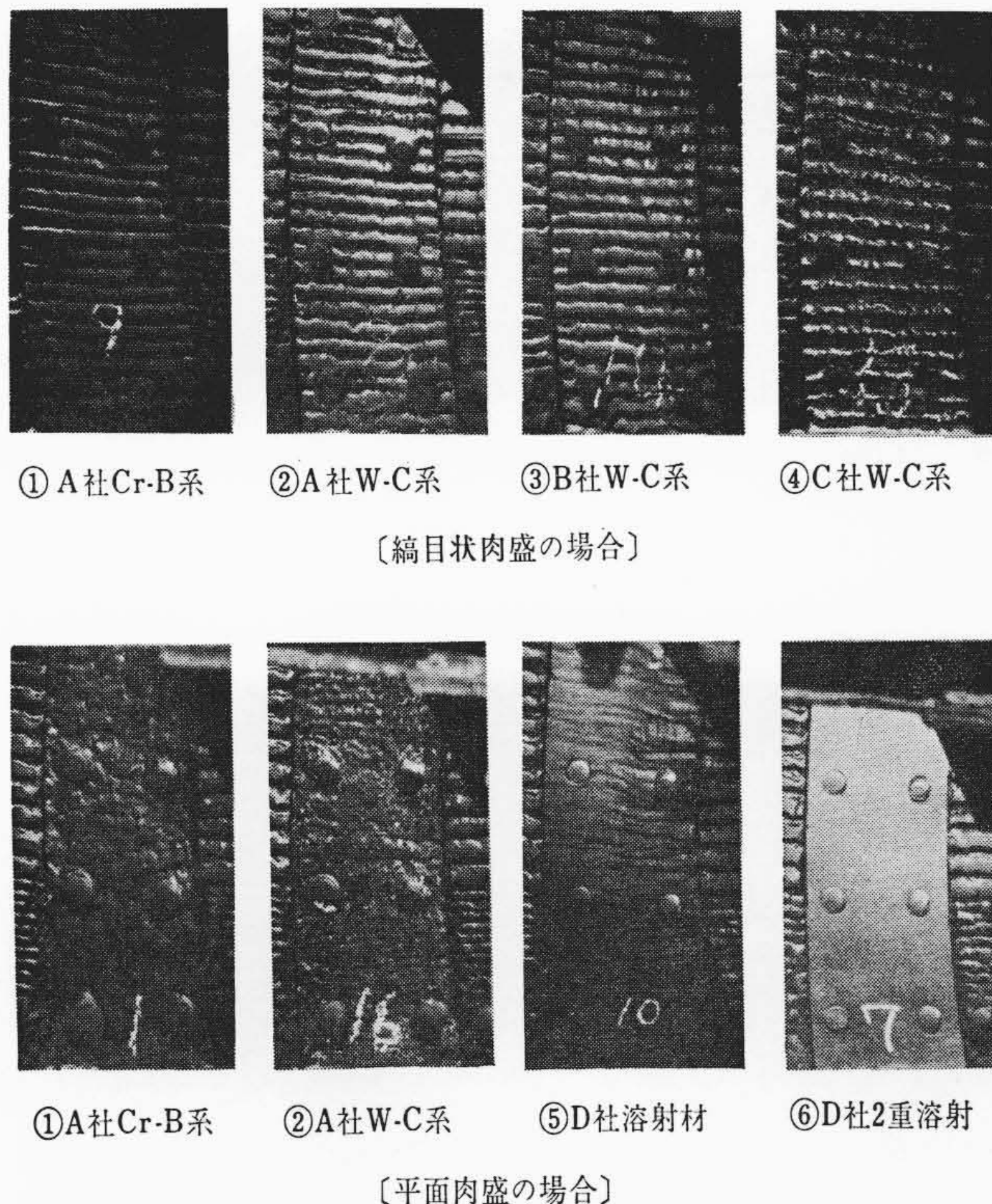


図9 耐摩耗材の耐久比較試験

ら焼結装置1ユニットの容量が大形化し、かつ排風機は予備機を持たないので、年間の装置稼働率を向上させるためには、羽根車交換などに要する不稼働時間を減らすことが要求される。したがって翼形の羽根車においてもできるだけ耐摩耗性を向上させることが望ましい。

翼形羽根は複翼の構造であり、ラジアル形やターボ形のようにライナを簡単にに取り付けることができない。このため羽根車のうち、最も摩耗しやすい羽根先端、羽根心板の付根寄りに部分的にライナを取り付けさらに硬化肉盛によってじゅうぶんな保護を加えた。

肉盛材の耐摩耗性については材料メーカーのカタログや文献にも報告されているが、粉体によるエロージョンに対しては必ずしも材料自身の機械強度や硬度だけでは判断できない。焼結排風機に適用した耐摩耗肉盛材は下記に示す摩耗耐久実験で非常にすぐれた耐エロージョン性を示したタングステンカーバイド系硬化肉盛である。

微細な粉体の衝突による摩耗実験では、供試材に対して常に同一の摩耗条件、すなわちダスト成分、粒度、密度、ダスト濃度、ガス温度、衝突速度、角度などを一定に保つことが困難で客観性を保ちがたい。このため実ガス中で運転される羽根車の多数の羽根の同じ位置にそれぞれ異なった供試片を、取り付けて長時間運転を行ない、幾つかの供試片相互の間で優劣を比較する方法が有効である。図9は温度350℃、10～20 g/m³のフライアッシュを含むFLUE GAS中で2,650時間の運転を行なった耐摩耗供試材の試験後の写真を示したものである。供試材は従来この種の用途に広く供されている①A社製クロムボロン系溶接肉盛材を基準にして、②A社製タングステンカーバイド材、③B社製タングステンカーバイド材、④C社製タングステンカーバイド材、⑤D社製セラミック系溶射材、⑥D社製二重溶射材ほか数種の材料とし、肉盛の形状を変えたものを含め、合計12種とした。このうち上記①～⑥の材料について、また①、②については肉盛形状を変えたものについて実験した。図9はその結果を示したものであるが、実験の結果、

- (1) 溶射材⑤、⑥は粉体摩耗については耐久性が劣る。
- (2) 高合金系肉盛材は硬度の割りに粉体摩耗に対して強い。

- (3) タングステンカーバイド系材料が他種材にまさるが、この材料のうちでも耐久力に大きな差があり、C社製の材料④はタングステンカーバイドの粒度分布、散在度などが粉体摩耗に適するように配慮されているため、ほかのタングステンカーバイド材に比べてはるかにすぐれた結果を示した。

焼結排風機羽根車は羽根の要部にライナを設け、さらに上記C社製タングステンカーバイド材の肉盛で保護しているため、摩耗によって肉盛が摩滅した場合には容易に補修が可能であり、予防保全を早期に実施することによってさらに寿命を延ばすことができる。

3.5 騒音対策

排風機の発生する騒音の一部はケーシング、風管などの鋼板を透過して周囲騒音となり、一部は吐出口から煙道を通り煙突から上空に放出される。前者は構内労働衛生環境に影響を及ぼし、後者は煙突の高層化によって思いがけない遠方の市街地に影響を及ぼすおそれがある。

翼形ブロワは従来のラジアル形、ターボ形に比べて比騒音値は10 dB程度低い⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、本機は前記のように翼形ブロワのなかでも一般のものより5～6 dB低く、遠心ファンのうちで最小の騒音レベルとすることができた。したがって発生騒音値は極力押えられているものの容量が大きいため、なおかなりの騒音対策を考慮することが望ましい。

ケーシングから透過する騒音を低減するため、ケース外周に防音ラギングを施し、機械周辺の騒音値を屋内で約85 dBとした。

また煙突から排出する騒音を低下させるためには排風機出口に消音器を設けて減音するのが有効である。消音器は減音効率がすぐれていると同時に通気抵抗が小さく、スペースをとらず高温に耐えるものでなければならない。これらの条件を満足させるには吸音式の消音器が適しており、スプリッタ形のような直通式で吸音効率のすぐれたものがよい。今回7,700 kW排風機に適用したユニットセル式消音器はスプリッタ形を円筒のユニットセル形に発展させた独自のもので、セルをハネカム状に組み合わせることにより所要の風量、減音量に適合させることができる点が大きな特長である。

4. 焼結排風用日立翼形ブロワの概要

新しく開発した焼結排風用翼形ブロワの納入実績は表2に示すとおりである。

4.1 特性

7,700 kW排風機の現地実ガスによる負荷試験結果は図10に示すとおりである。サージング限界風量は50%以下となり、広い負荷範囲にわたって操作が可能である。この範囲において効率特性はかなり平坦(たん)であり、実用範囲ではオフデザインの点でもほぼ80%を上回る効率で作動できて経済的である。軸動力は計画点付近で最大値となり、リミットロード特性であり、通気抵抗によってはさらに大きい風量の点で運転することも可能である。また、事前に行なった模型試験の特性との類似性は良好であった。

4.2 振動、騒音

本機は製作工場において厳密な動バランス試験を実施し、工場における運転は行なわず現地試運転を行なったが、軸受振動は軸受箱上で10μ以下でありじゅうぶん満足な成績をおさめることができた。図11は40 t動釣合試験機上でバランス作業中のロータを示したものの。図12、図13は外形図および外観写真である。

本機の主軸は中空構造の剛性軸に設計されているため、起動時はもちろん、摩耗などによるアンバランス発生に際してもきわめて安定した運転が保証されている。また、軸受メタルに起動用オイルリフト装置を装備しているため始動トルクは数パーセントで同期電動

表2 焼結排風用翼形ブロワ納入実績

46年4月

納入先	台数	風量 (m^3/min)	圧力 (mmAq)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	回転数 (rpm)	電動機 (kW)	備考
川崎製鉄株式会社 水島製鉄所	1	21,000	-1,400	150	900	6,000	
川崎製鉄株式会社 千葉製鉄所	1	20,000	-1,400	150	1,000	5,700	
川崎製鉄株式会社 水島製鉄所	1	27,000	-1,400	150	900	7,700	
住友金属工業株式会社 小倉製鉄所	1	11,500	-1,500	120	1,180	3,500	(製作中)
A社	2	23,000	-1,800	120	1,000	8,100	(製作中)

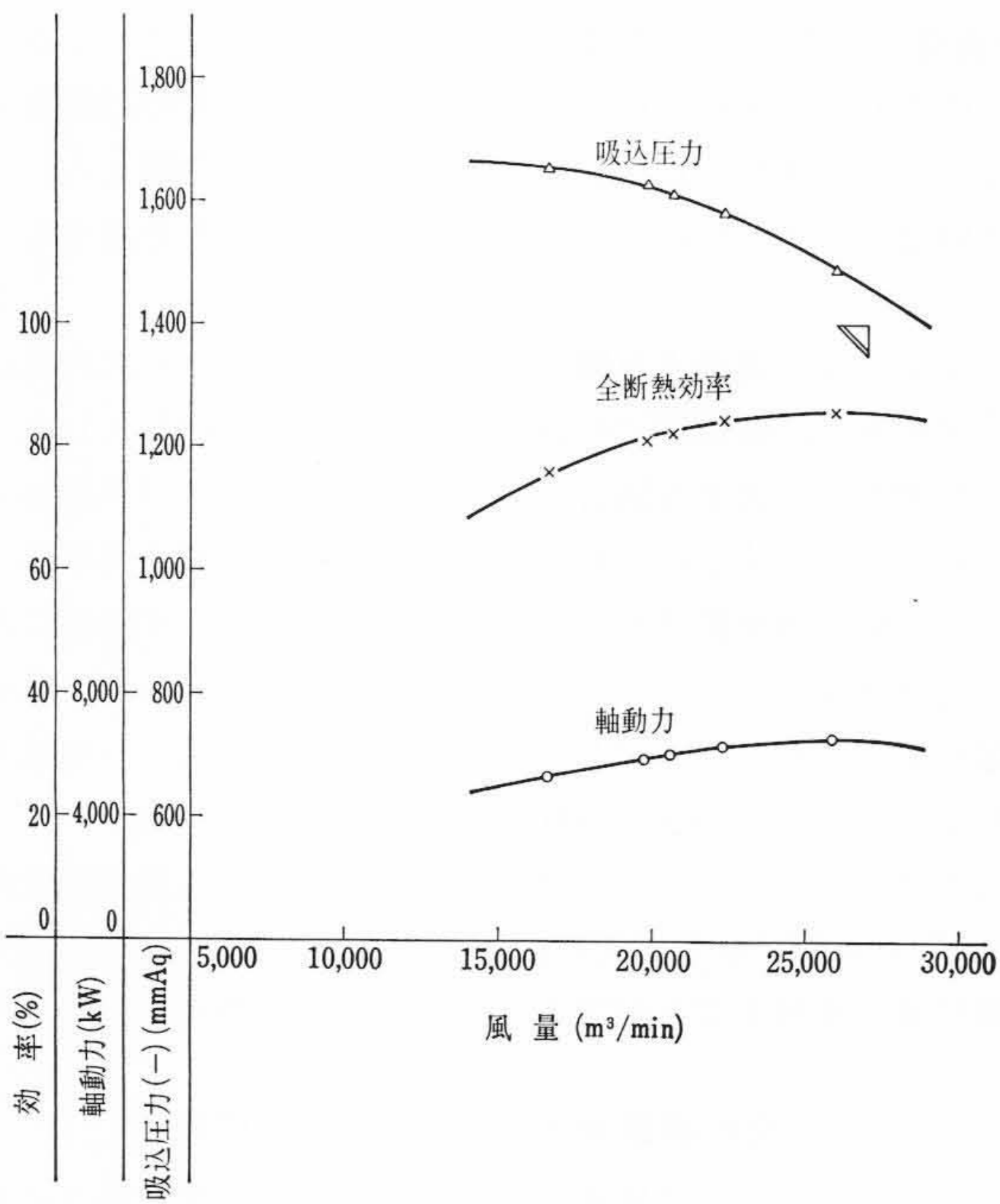


図10 7,700 kW 排風機特性曲線

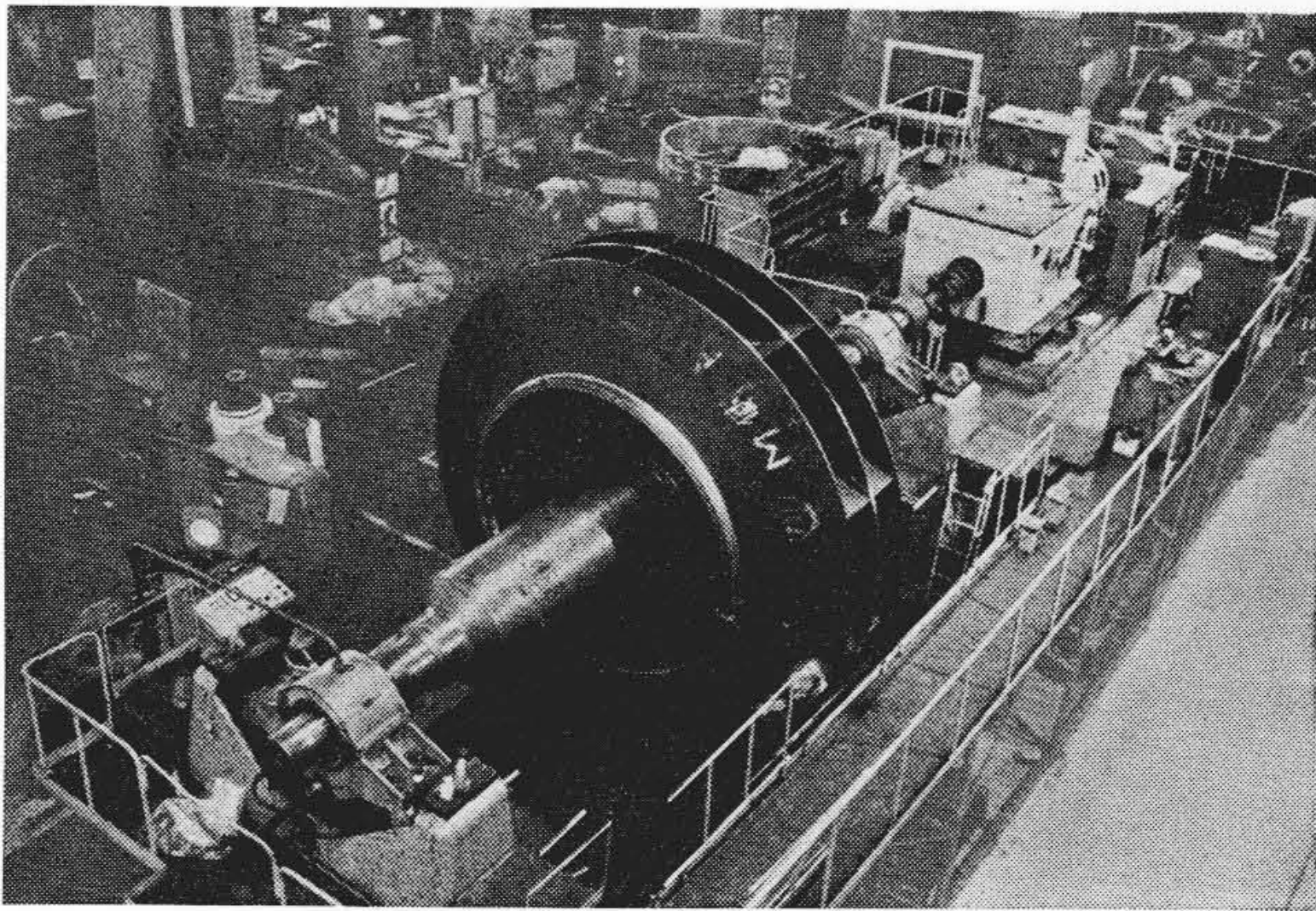


図13 7,700 kW 排風機

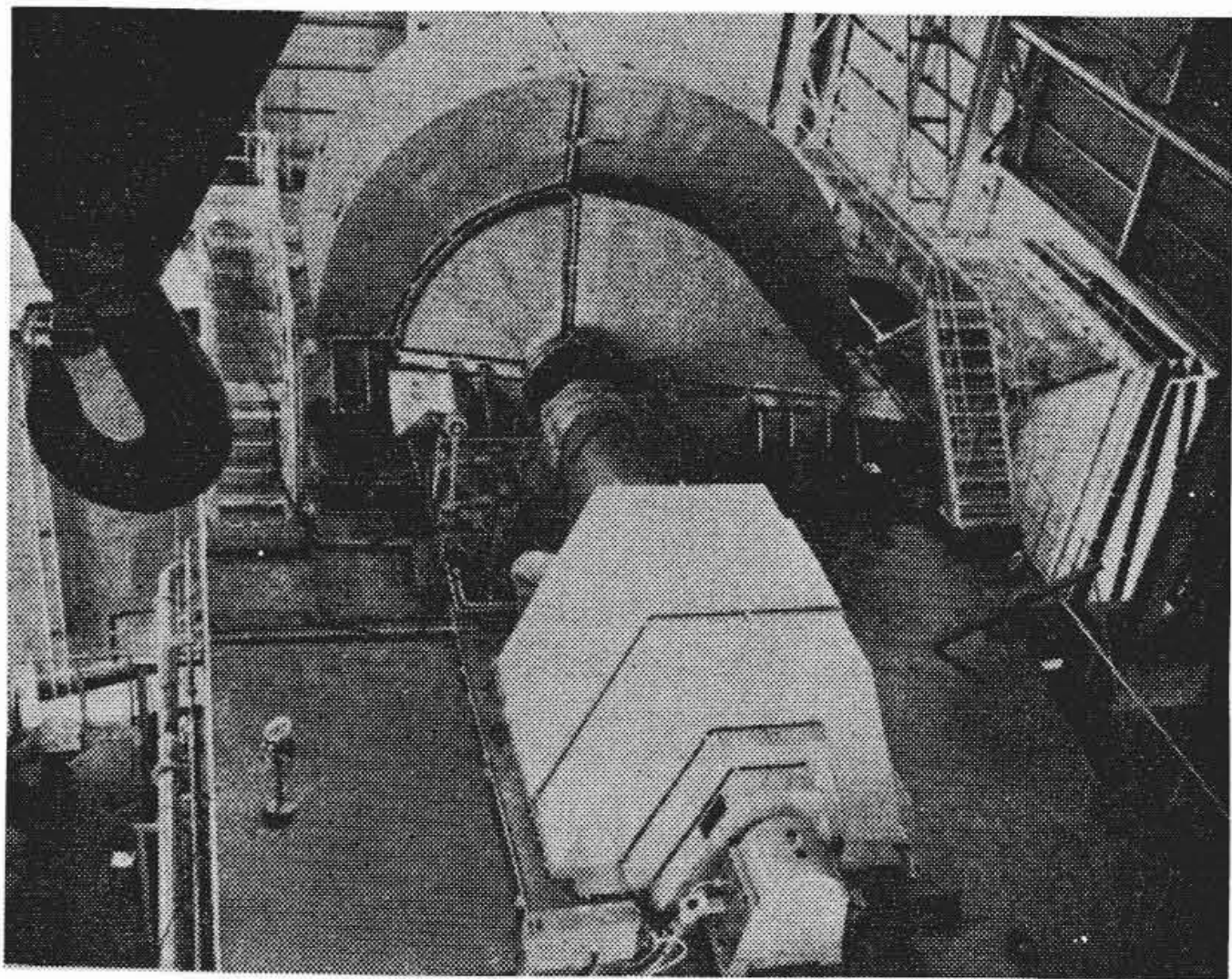


図11 7,700 kW 排風機ロータの動釣合試験

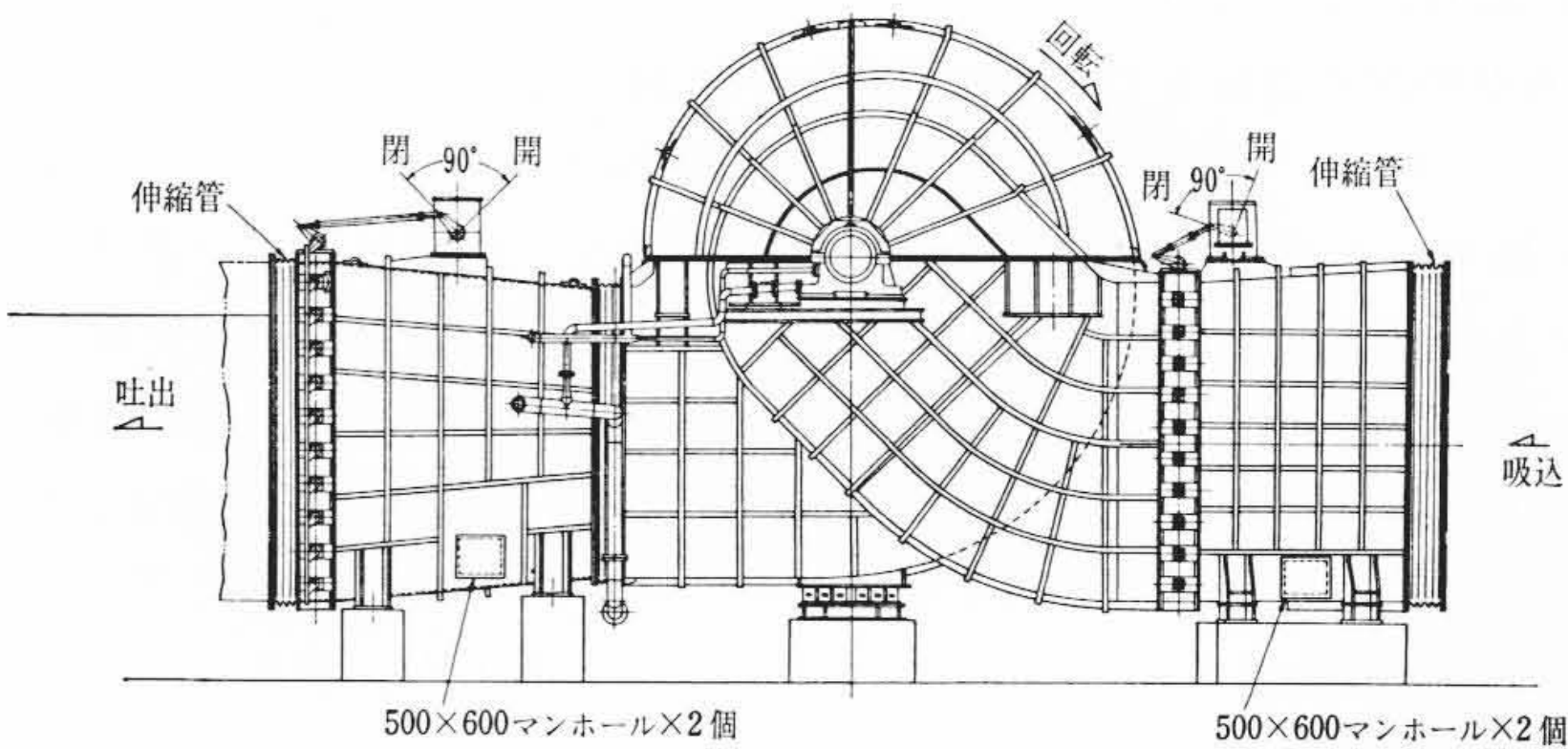
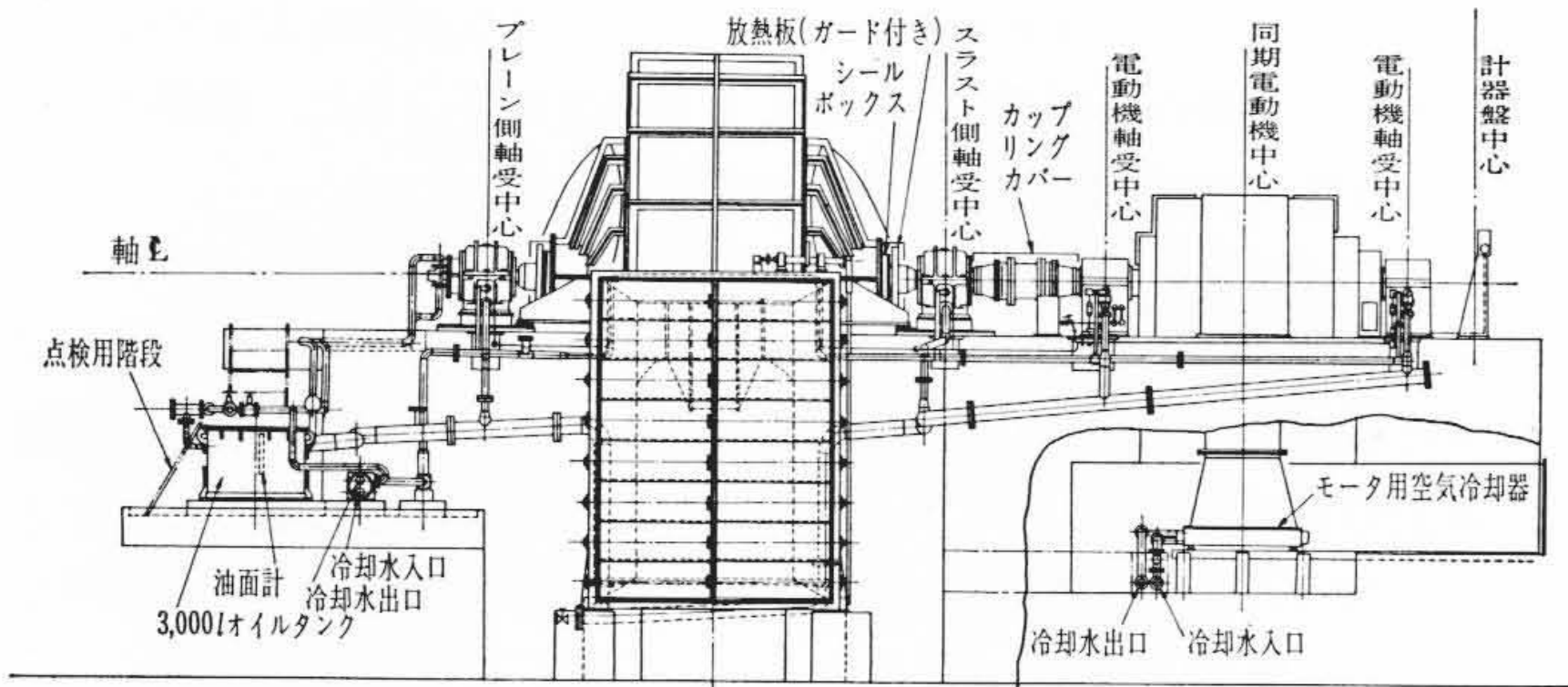


図12 7,700 kW 焼結排風機外形図

