

日立高圧モータルの低騒音シリーズの開発

Development of Hitachi Low Noise High Voltage Induction Motors

近年、騒音公害防止のため産業機械の低騒音化が強く要望されている。その要求に対して日立製作所は、高圧・大容量開放防滴形及び全閉外扇形誘導電動機に対して高性能サイレンサを取り付けることにより、低騒音ハイパクト4800シリーズ〔75 dB(A)級〕電動機を完成し、既に多数の製作実績をもっている。

開発に当たっては、サイレンサの圧力損失の検討、減音効果の解析を行ない、豊富な設計資料を整え、その結果を利用して簡単な構造で、減音効果が大きく、かつ圧力損失の小さいサイレンサを開発した。

西部邦彦* Nishibe Kunihiro

金子 真** Kaneko Makoto

1 緒 言

騒音公害防止のため、一般産業機械の騒音源の一つである誘導電動機(Induction Motor 以下、IMと略す)に対する低騒音化の要求は日々厳しいものになりつつある。日立製作所は高圧・大容量高速機に対しては、軸流通風冷却方式の採用により、ステータコアを透過してIM周辺に放射する透過音を大幅に低減するとともに、高効率ファンの採用などにより、IM自身の発生騒音低減を行なってきた。

しかし、開放防滴形及び全閉外扇形IMでは、機内で発生したファン騒音、電磁音などが空気伝搬により、冷却風の吸・排気口より直接機外に放出されるため、これらの騒音を大幅に減音するサイレンサの開発が急がれていた。

一般にサイレンサに要求される性能としては次のものがある。

- (1) 減音効果が大きいこと。
- (2) 通風路の圧力損失が小さく、冷却に必要な風量の確保ができること。
- (3) 構造が簡単で、小形軽量であること。

これらの要求に対処するため、吸音材を内張りした新しいサイレンサについて、通風路の形状、寸法に対するサイレンサ内の流れの観察、圧力損失の検討及び減音効果の解析を行なった。その結果を採り入れ、上記要求を満足するサイレンサの開発を行なった。

その成果を生かして、日立製作所では既に110～2,000kWまでのIMに対して、75, 80, 85dB(A)級の低騒音シリーズを完成させている。

本報告では、サイレンサ開発の概要及び低騒音シリーズIMの各枠番適用表などについて述べる。

2 低騒音形誘導電動機

今回開発した低騒音形IMの構造図を図1, 2に示す。図1に示した開放防滴形IMの場合、冷却風の吸気用と排気用のサイレンサを一体として組み込んだ構造とし、これをIM上部に設置してある。冷却風は同図中矢印で示したように、サイレンサ吸気口よりIM内部に吸い込まれ、ロータ及びステータの風穴、エアギャップ、ステータコアバックを通過してIM主要部を冷却した後、内部冷却ファンを通過して排気用サイレンサより外部に吐き出される構造になっている。

また、図2に示した全閉外扇形IMの場合、外部冷却ファ

ンの吸気口に吸気用サイレンサを、排気口に排気用サイレンサを取り付ける構造とした。この場合、冷却風は同図中実線矢印で示したように吸気用サイレンサからIM内に吸い込まれ、外部冷却ファンを通過して空気熱交換器のパイプ内を通過した後、排気用サイレンサから排気される。このとき、IM内をファンにより循環する内部空気(同図中破線で示した)は、IMの発熱により暖められ、空気熱交換器で外部冷却風により冷却される。このように、IMは間接的に冷却される。

図1, 2からも分かるように、IM本体及びサイレンサ、空気熱交換器などをそれぞれユニット化しており、用途、使用環境に応じて各ユニットの組み合わせを変えるだけで、各種の仕様に簡単に応じられるようになっている。このようなIM内部の冷却方式を軸流冷却方式と呼んでおり、主に高速機に採用している。

3 サイレンサの開発

ここで対象としているような高速機においては、冷却風の吸・排気口から直接機外に放出されるファン騒音、電磁音などの空気伝搬音が主体をなしている。

一般にサイレンサにはリアクタンス形と吸音形の2種類があるが¹⁾、本IMのように低周波から高周波数領域までの広い周波数範囲で減音効果を必要とし、かつ通風抵抗の小さなサイレンサとしては、吸音材を内張りした吸音形サイレンサが適当である。IM用吸音形サイレンサとしては種々の構造が考えられるが、減音効果と圧力損失の両者を十分検討した上で形状、寸法を決定しなければならない。

3.1 減音効果

リアクタンス形サイレンサは、波動理論に基づいて設計されるものであり理論解析はほぼ確立されている。一方、吸音形サイレンサの原理は、音響エネルギーを吸音材により熱エネルギーに変換させて減音するものである。一般的吸音ダクトに対してはBrüelやSabineにより減音特性を与える式が得られてはいるが^{1), 2)}、これらは実験公式的なものであり、図1, 2に示したようなサイレンサに対する吸音機構は必ずしも明らかではない。

このように、吸音形サイレンサの理論解析がまだ完全に行ない得ない現状では、基礎実験資料の集積が最も重要である。そこで、本研究では図3に示した方法で種々のサイレンサの

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所日立工場

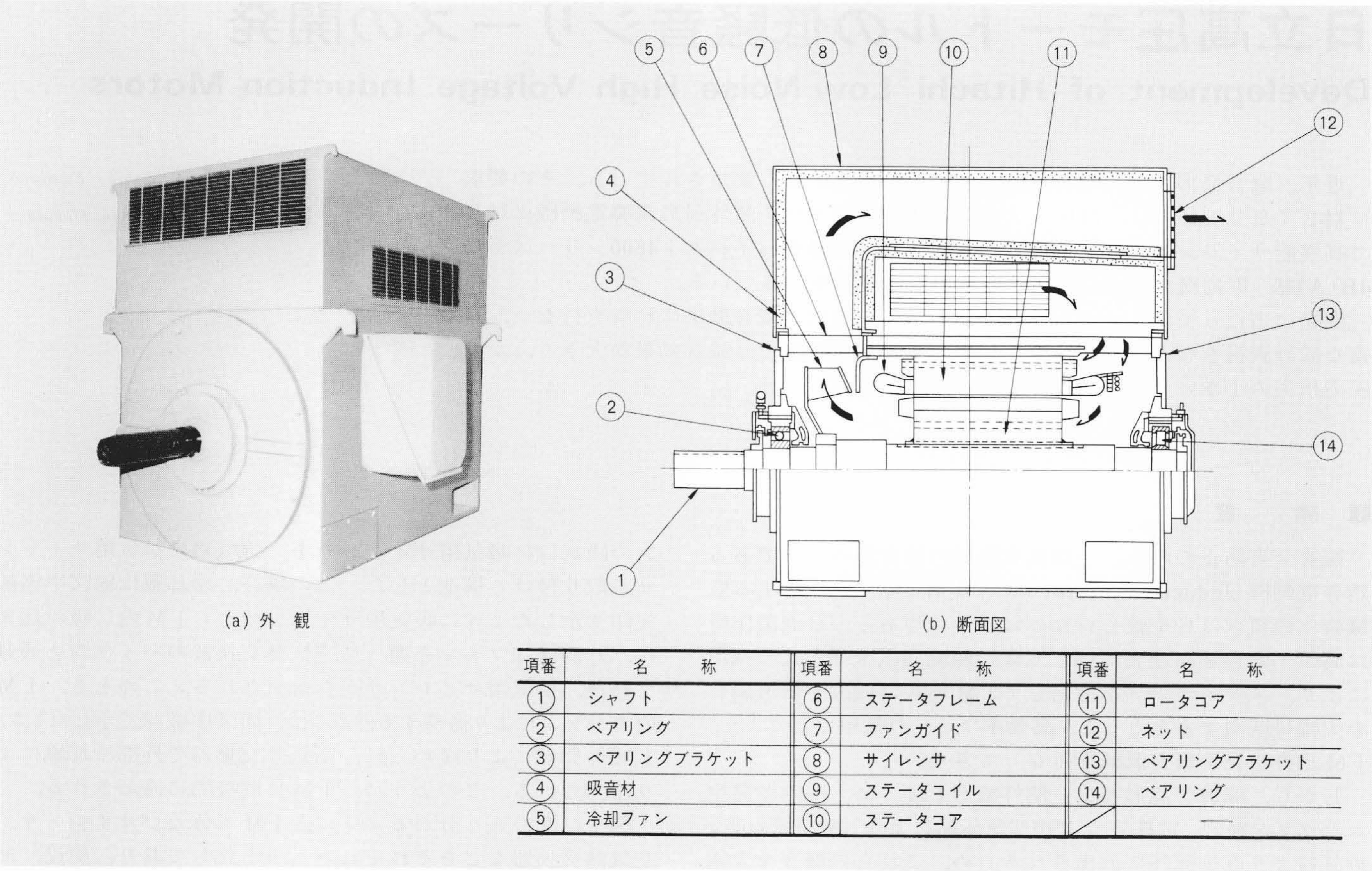


図 1 低騒音開放防滴かご形誘導電動機 IM内部で軸と平行に冷却風が流れるので、軸流通風冷却方式と呼んでいる。サイレンサは吸気用と排気用とを一体化した構造になっている。

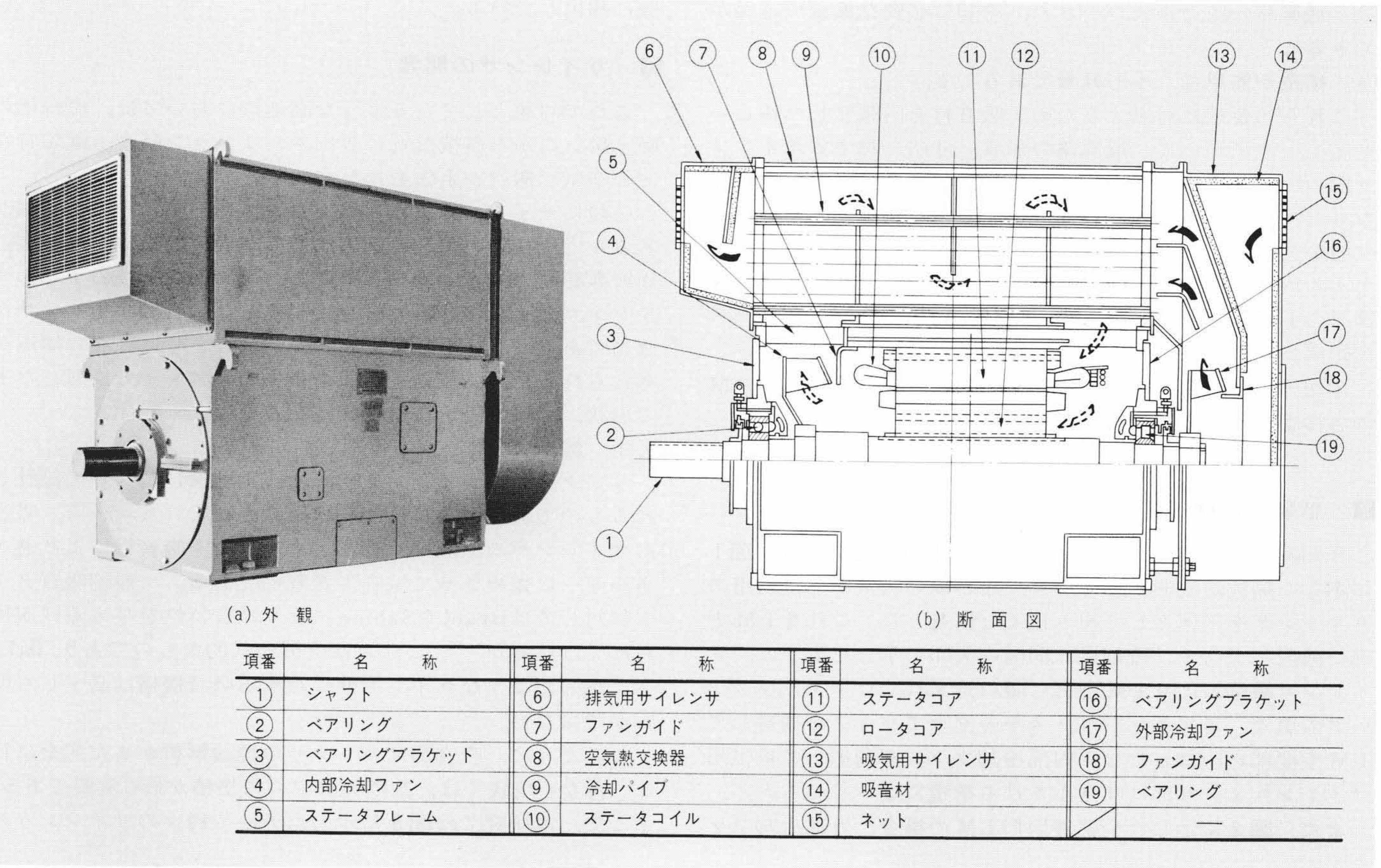


図 2 低騒音全閉外扇かご形誘導電動機 外部冷却ファンにより吸い込まれた外気と、内部冷却ファンによる内部循環流とが空気熱交換器で熱交換される。

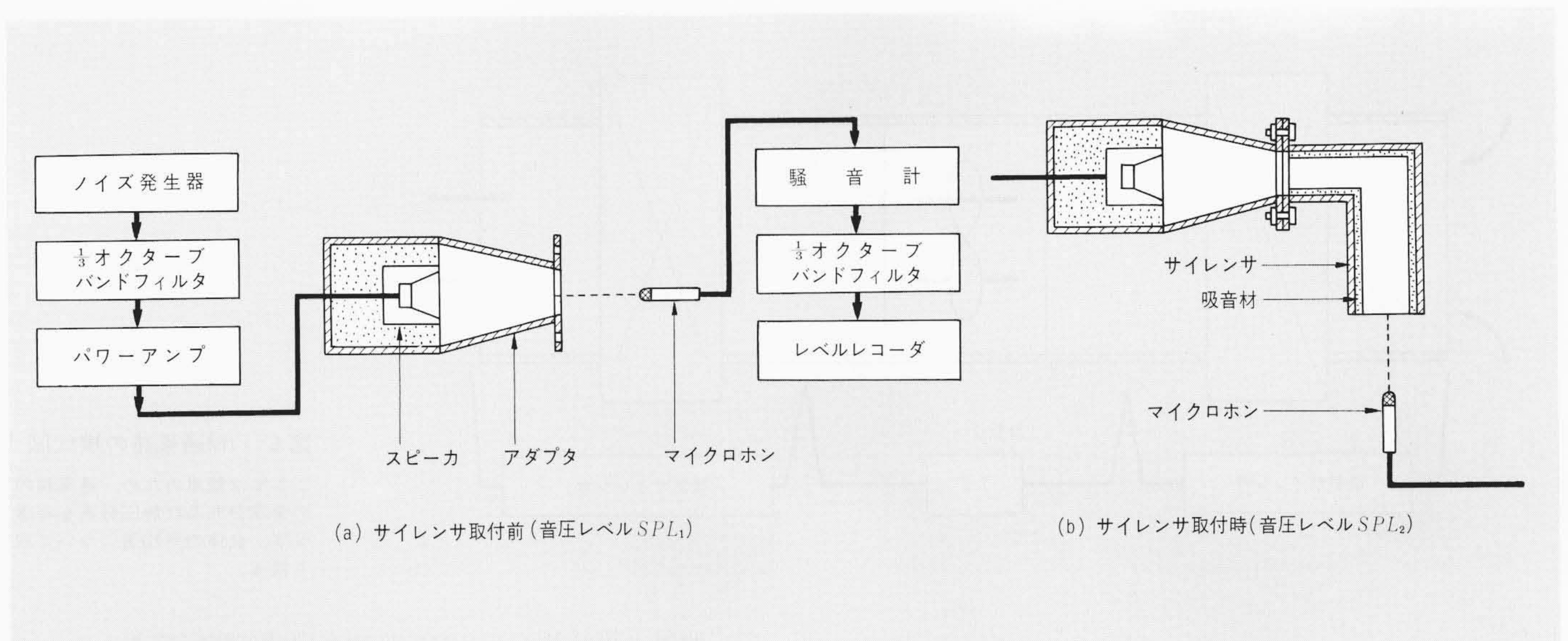


図3 スピーカによるサイレンサの挿入損失の測定 注意点として、スピーカ又はアダプタ自身からの透過音は十分小さくなるよう考慮する必要がある。

挿入損失を測定して設計資料を整えた。

なお、挿入損失とは、音源にサイレンサを挿入した場合と挿入しない場合との開口端からの音響放射の大小を比較するものであり、次式のように開口端から一定位置関係にある点の音圧レベルの差で表わされる。

$$\Delta L = SPL_1 - SPL_2 \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 ΔL ：挿入損失

SPL_1, SPL_2 ：図3 参照

この値はサイレンサだけの特性を示すものではなく、音源やサイレンサの開口端のインピーダンスの影響を受け、また受音点の位置により変わるものであるが、サイレンサ取付前後の効果の差を表わす実用的な量を示すものであるとすることができる。

本方法による曲りダクトの挿入損失測定結果の一例を図4に示した。

なお、実験を行なうに当たっては数多くのサイレンサを試作し、形状、寸法、ダクト長さ、吸音材の吸音率、内張面積などを変えて基礎実験資料を整えた。これらによってサイレンサの減音効果を、

- (1) 曲りの形状に基づく反射と干渉による自然減衰量
- (2) 吸音材内張ダクトとしてのエネルギー減衰量
- (3) 吸音材の吸音率と内張面積の積で与えられる吸音力による吸音効果

などの各因子から設計できるようにした。

3.2 圧力損失

IMにサイレンサを取り付けると、サイレンサの流れ抵抗により冷却全風量が少なくなる。したがって、所要冷却風量を流すためにはサイレンサの圧力損失が重要な因子となる。

通風ダクトの圧力損失は既に多くの人々により測定され、設計資料としてまとめられているが³⁾、IM用サイレンサのような形状に対しては十分な精度で圧力損失を求める手法はまだ確立されておらず、実測に頼るほかないのが現状である。

そこで、今回は試作サイレンサの圧力損失を測定し、次式の値で表わすことにした(図5の模式図参照)。

$$\Delta P_t = P_{t1} - P_{t2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\Delta P_s = P_{s3} - P_{s4} \quad \dots\dots\dots(3)$$

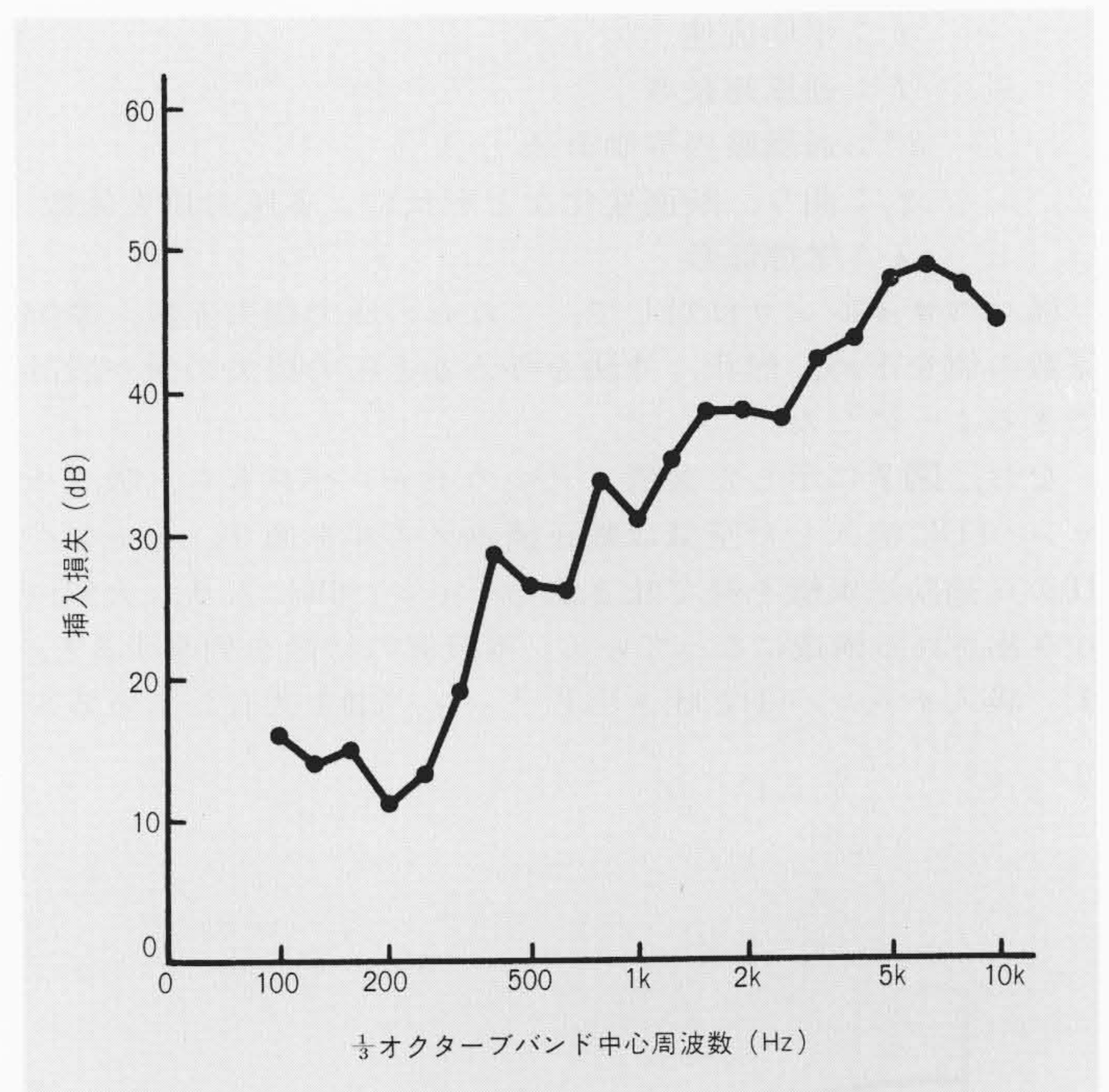


図4 サイレンサの挿入損失の実測例 本例では高周波数領域での減音効果が大きい。

ここで、 ΔP_t ：吸気用サイレンサの全圧損失

ΔP_s ：排気用サイレンサの静圧損失

P_{ti}, P_{si} ：各部全圧、静圧と大気圧との差

このとき、冷却ファンを含むIM全体のファン静圧を P_s とすると、

$$P_s = P_{s3} - P_{t2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$= \Delta P_t + \Delta P_s \quad \dots\dots\dots(5)$$

すなわち、図6に示すように冷却ファンを含むIM全体のファン静圧ー風量曲線とサイレンサの圧力損失との交点としてサイレンサ取付時の冷却全風量が求められる。

(2)、(3)式に基づくサイレンサの圧力損失及び冷却ファンの静圧ー風量曲線を、図7に示すチャンバ形流体性能測定装置⁴⁾を用いて測定し、サイレンサの圧力損失は次式を用いて整理

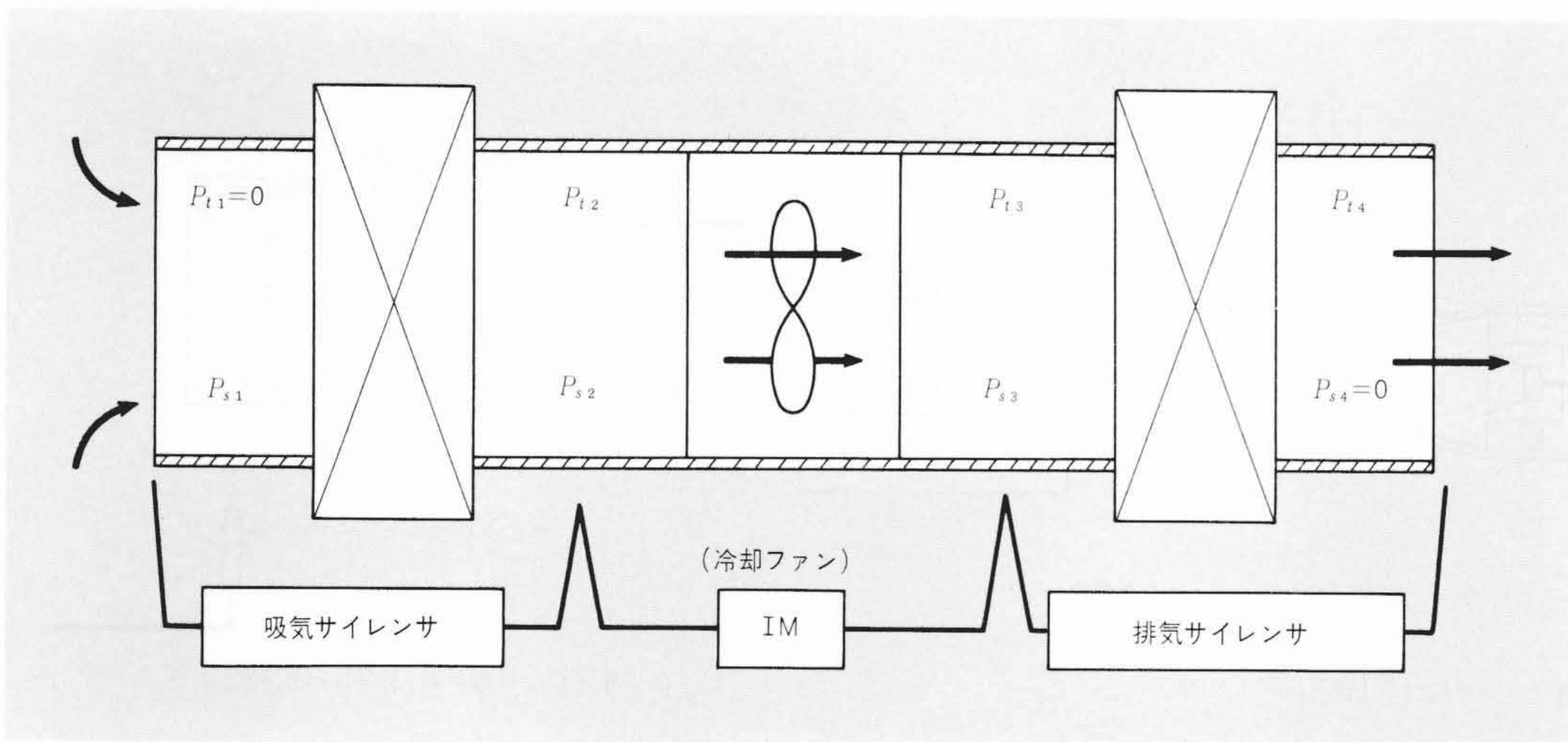


図5 IM通風路の模式図

ここでは簡単のため、通風路内の全圧分布及び静圧分布を考慮せず、全体の平均値について取り扱う。

した³⁾。

$$\Delta P = \frac{\rho}{2} v^2 \left(\sum \xi_i + \lambda \frac{l}{d^*} \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ΔP ：圧力損失

ρ ：空気密度

v ：平均流速

l ：通風路長さ

d^* ：通風路の等価直径

ξ_i ：曲り、断面変化など形状による圧力損失係数

λ ：摩擦係数

種々のサイレンサに対して、これらの圧力損失係数、摩擦係数の値を求め、形状、寸法を与えると圧力損失の値が設計できるようにした。

なお、図7に示した装置は三つのチャンバをもち、吸入チャンバ(I)に流入した空気は校正済みノズルを通り、チャンバ(II)から補助送風機を経て吐き出しチャンバ(III)に入り、大気に吐き出される構造になっている。本装置の特徴を列挙すると、
(1) 吸入チャンバ(I)と吐き出しチャンバ(III)を共有しているの

で、吸気、排気サイレンサの性能を同時に測定できる。

(2) チャンバ内寸法は1.8m角の大きさがあり、かなり大形のサイレンサ、冷却ファンを組み込んだ測定が可能である。

(3) 補助送風機により、最大風量3.4m³/s、最大圧力2,350Pa {240mmAq}までの測定が可能である。

この装置を用いると、サイレンサの圧力損失を容易に測定できるが、実機でのサイレンサの流れと、本装置に取り付けたサイレンサの流れとを同一にする必要がある。そのために、実機の流れを可視化装置により解析した結果、サイレンサ内で流れが偏るような場合に対しては偏流板を取り付けるなどの工夫を施し、実際の流れと同等の流れに対して圧力損失を測定するようにした。

このような方法によるサイレンサ取付時の冷却全風量推定値を実測値と比較した一例を図6に示す。この例では誤差はわずか2%となり、実際の場合と非常によく一致する。

4 低騒音形シリーズ誘導電動機

以上得られたサイレンサに関する設計資料を基に、対象としている各IMごとに減音効果と圧力損失を検討した結果、図1、2に示したような最適なサイレンサの構造を決定した。

本低騒音形IMの騒音分析結果の一例を図8に示す。これは規格JEM-1020⁵⁾に基づき、無響室(図9参照)で測定したものである。

また、以上得られた設計資料を基に110~2,000kWのシリーズIMに対してサイレンサの設計を行ない、75, 80, 85dB(A)と3種類の低騒音形シリーズIMを完成した。

シリーズ化に当たって、各枠番の冷却ファン性能は次式の相似則などを使って求めた³⁾。

$$\frac{Q}{Q_0} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^3 \left(\frac{N}{N_0} \right) \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 Q ：風量

P ：ファン静圧

D ：ファン径

N ：回転数

サフィックスは基準値を表わす。

なお、冷却ファンによる流体音、電磁音、及び機械音については別途理論計算を行ない、各枠番IMの発生音を推定した。

完成した低騒音シリーズIMの各枠番適用表を表1、2に示す。これらの表では極数、電圧及び電源周波数ごとに整理

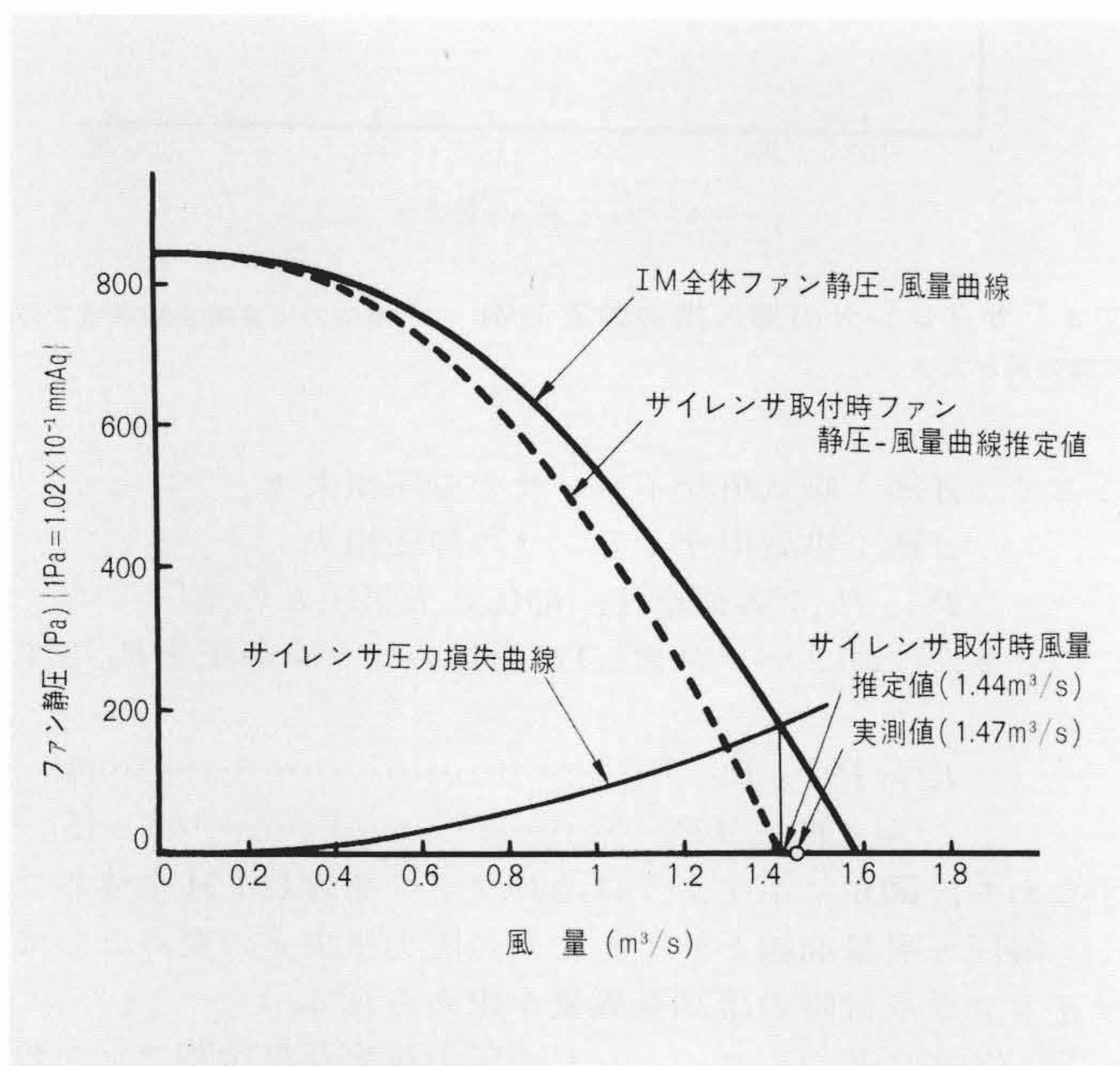


図6 サイレンサ取付時の風量推定 冷却ファン性能としては、IM自身の内部抵抗を含んだものとして取り扱っている。

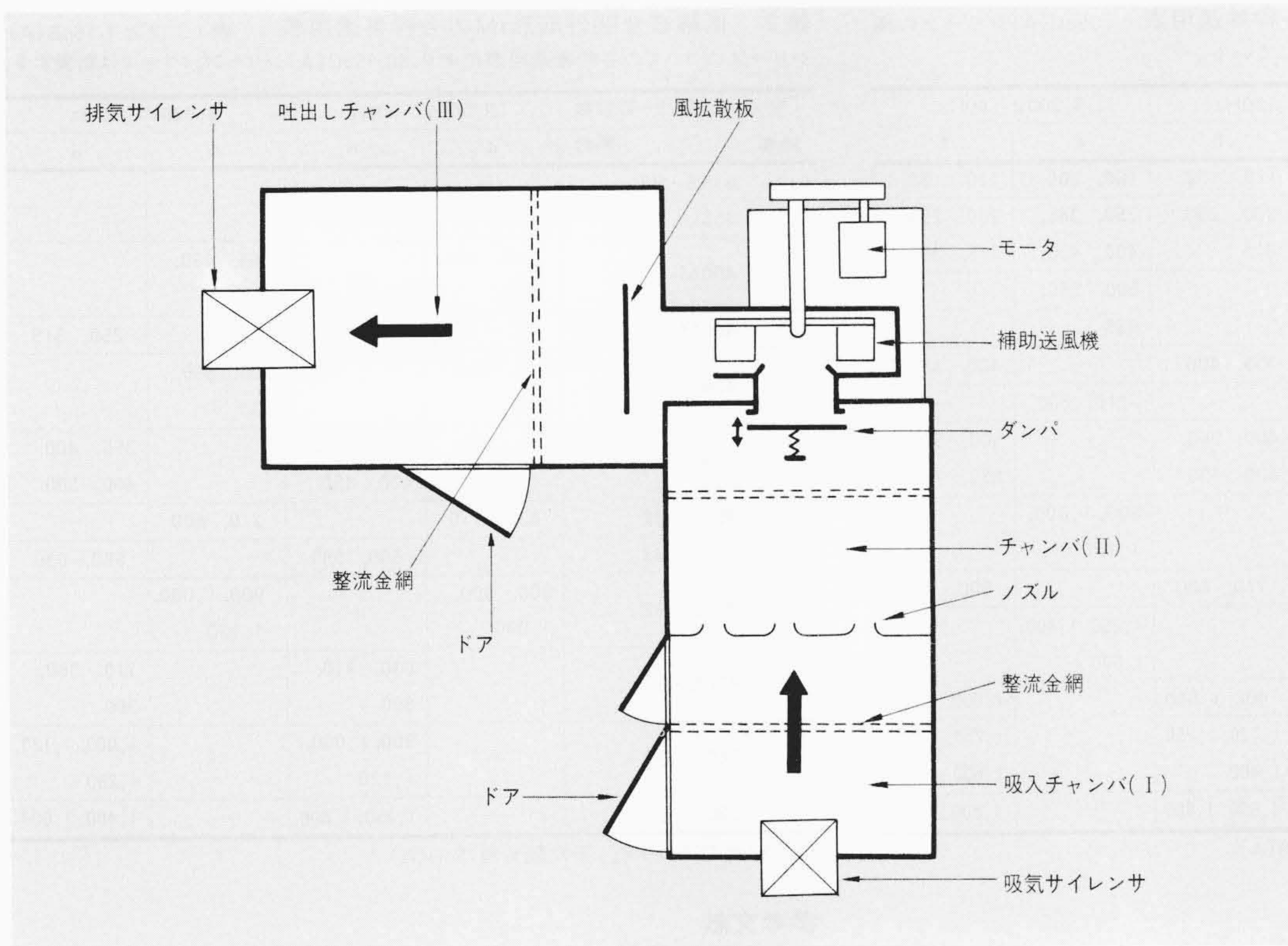


図7 チャンバ形流体性能測定装置 本装置により、ノズル前後の圧力差を測定するだけで、容易に正確な風量を算出できる。

した適用枠番ごとのIM容量(単位はkW)を示してある。各枠番の記号を、315E-B3を例に取って説明すると、最初の数字315は軸中心高さ、Eはフレーム長さの分類記号、B3は軸受種別をそれぞれ表わす。

なお、ここでは75dB(A)級低騒音シリーズIMを示したが、80、85dB(A)級についても、サイレンサのユニット化に基づくオプション方式によりシリーズ化を完成している。

また、本シリーズIMにはいずれも高信頼度絶縁方式であるハイパクトF種絶縁を採用しており、「ハイパクト4800シリ

ーズ」として現在まで相当数の納入実績を挙げている。

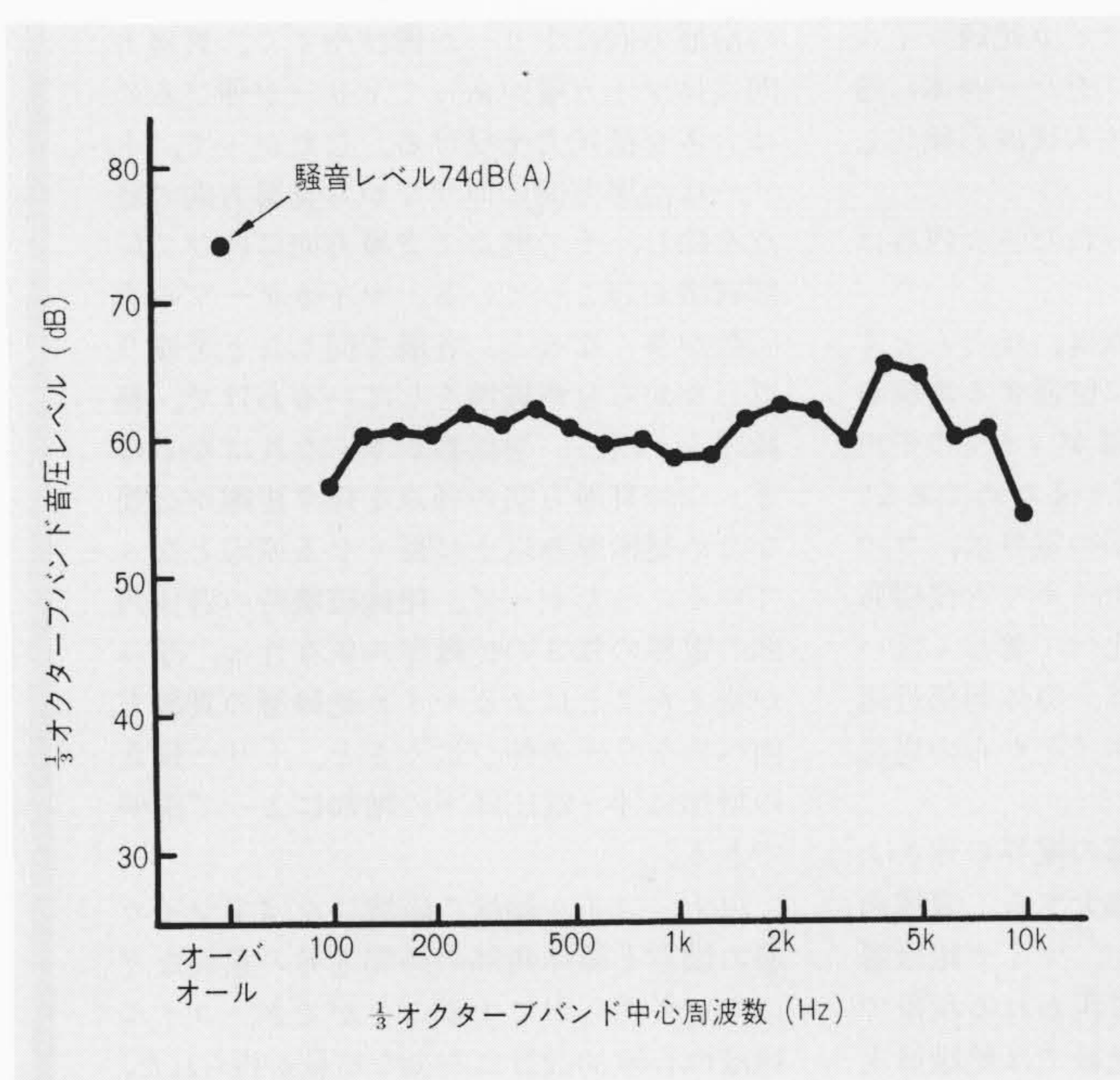


図8 騒音分析結果(一例) これは騒音計のA特性をかけて分析したものであり、オーバオールは騒音レベルを示す。

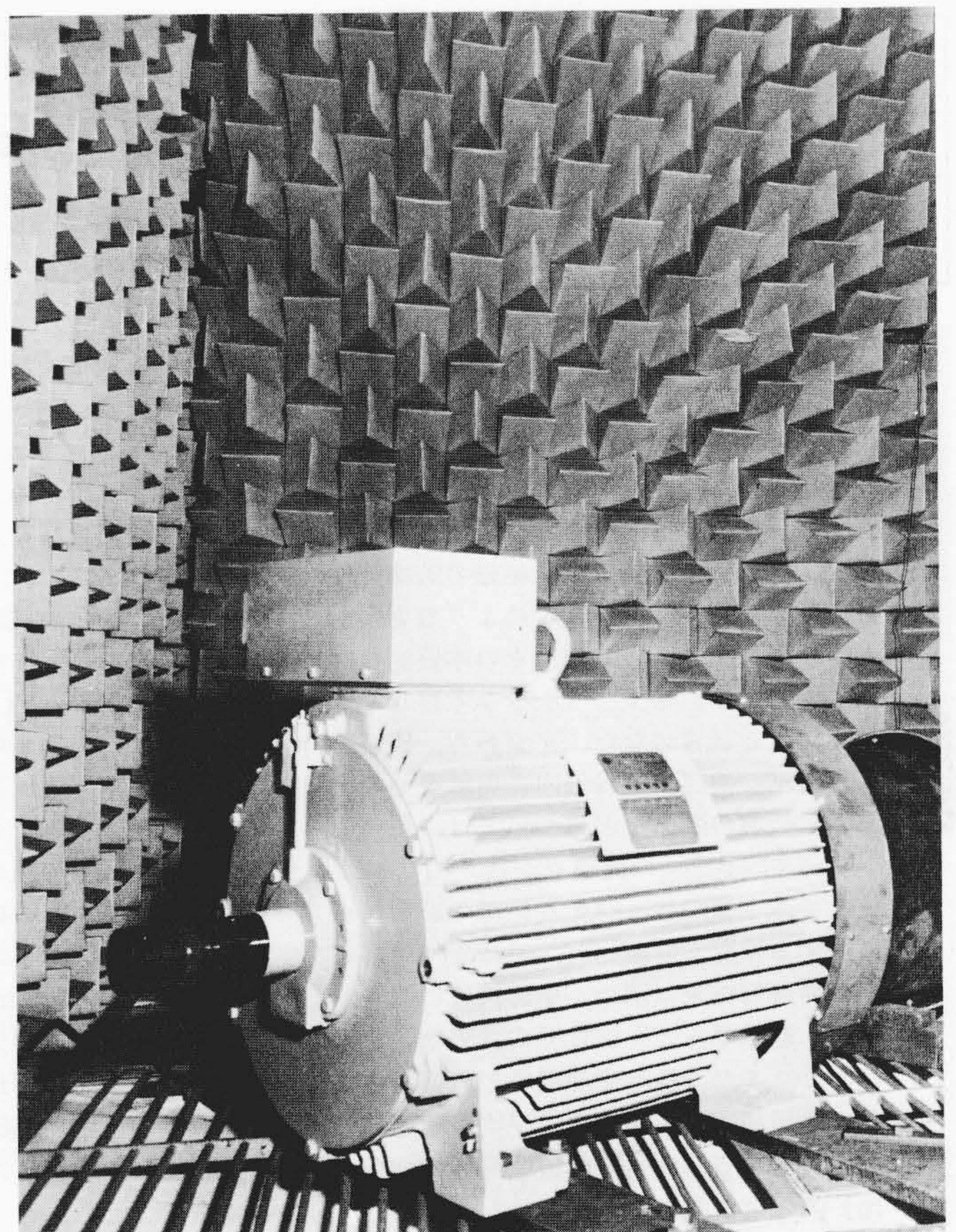


図9 無響室 本無響室では1,000kWのモータを直接持ち込んで運転することが可能である。

表 1 低騒音開放防滴形IMの各枠番適用表 75dB(A)シリーズの極数, 出力(kW)と各枠番の適用表を示している。

電圧・周波数 枠番 極数	3,000V 50Hz		3,300V 60Hz	
	4	6	4	6
315E-B3	160, 200	110, 132	160, 200	110, 132
355L-B3	250, 315, 355, 400	200, 250, 315	250, 355, 400, 450	200, 250, 315, 355
400M-B2	450, 500, 560	—	500, 560, 630	—
400M-B3	—	355, 400	—	400, 450
400D-B2	630, 710	—	710, 800	—
400D-B3	—	450, 560, 500, 630	—	500, 560, 630, 710
450C-B2	800, 900, 1,000	—	900, 1,000, 1,120	—
450C-B3	—	710, 800	—	800, 900
450E-B2	1,120, 1,250, 1,400	—	1,250, 1,400, 1,600	—
450E-B3	—	900, 1,000	—	1,000, 1,120
560C-B3	—	1,120, 1,250, 1,400	—	1,250, 1,400, 1,600
560E-B3	—	1,600, 1,800	—	1,800, 2,000

注：形式EFOUN-KK, 平均騒音値75dB(A)

表 2 低騒音全閉外扇形IMの各枠番適用表 表 1, 2とも75dB(A)シリーズについての各枠番適用表であり, 80,85dB(A)シリーズについては割愛する。

電圧・周波数 枠番 極数	3,000V 50Hz		3,300V 60Hz	
	4	6	4	6
315E-B3	—	—	—	—
355L-B3	—	—	—	—
400M-B2	315, 400, 355	—	355, 450, 400	—
400M-B3	—	250	—	250, 315
400D-B2	450, 500, 560	—	500, 560, 630	—
400D-B3	—	315, 355, 400, 450	—	355, 400, 450, 500
450C-B2	630, 710	—	710, 800	—
450C-B3	—	500, 560	—	560, 630
450E-B2	800, 900, 1,000	—	900, 1,000, 1,120	—
450E-B3	—	630, 710, 800	—	710, 800, 900
560C-B3	—	900, 1,000, 1,120	—	1,000, 1,120, 1,250
560E-B3	—	1,250, 1,400	—	1,400, 1,600

注：形式TFON-KK, 平均騒音値75dB(A)

5 結 言

高圧・大容量開放防滴形及び全閉外扇形誘導電動機に高性能サイレンサを取り付けることにより, 低騒音ハイパクト4800シリーズ誘導電動機〔75, 80, 85dB(A)級〕を完成した。
今後は, 更に減音効果の大きいサイレンサの開発により, 70dB(A)以下の超低騒音機のシリーズ開発を行なう予定である。

参考文献

- 1) 例えば, 日本音響材料協会：騒音対策ハンドブック, 技報堂(昭42-3)
- 2) 飯野：防音装置の設計, 理工図書(昭41-6)
- 3) 例えば, 生井：送風機と圧縮機, 朝倉書店(昭45-7)
- 4) JIS C 9603：換気扇(昭47)
- 5) JEM 1020：三相誘導電動機試験法(昭40)



マイカ絶縁高圧コイルの絶縁破壊特性

日立製作所 津久井 勤・磯貝時男・他 2 名
電気学会論文誌 96A—11, 519 (昭51-11)

大形発電機の高電圧, 大容量化に伴い, コイル絶縁の高性能化と長期寿命に対する信頼性の向上が強く要望されている。コイル絶縁は, 一般に不飽和ポリエステル樹脂, エポキシ樹脂, マイカなどから成る複合絶縁システムである。コイル絶縁の破壊特性は, 従来から多くの研究者により着実に明らかにされてきているが, その本質的な機構に関しては, 必ずしも十分な考察がなされているとは言えない。すなわち, 破壊経路の詳細な検討, 絶縁層内の局部電界の大きさと破壊の関係などについては, 更に明らかにすべき多くの問題点が残されている。そこで, 本報では, コイル絶縁の破壊起点に関する検討から開始し, 絶縁層内の詳細な電界解析結果に基づく局部破壊に関する考察, 絶縁厚みと局部電界の関係を考察した。また, 長時間課電時の破壊特性に及ぼす局部電界の集中率(平均破壊電界の強さに対する導体角部の破壊電界の強さの比)の効果に関する考察を行なった。

なお, 本報で使用したマイカ絶縁コイルは, フレークマイカテープをバー導体に巻回し, エポキシワニス注入後成形硬化したバーコイルである。
以上の検討の結果, 得られた主な内容は次のとおりである。
(1) 高圧コイルの破壊起点は, ほとんどすべての場合, コイル角部に位置する素線導体の角部である。これは角部がコイルの平坦部に比べて電界が集中しているためである。
(2) 絶縁破壊時の導体角部の電界は, コイル絶縁の構成要素であるマイカや含浸樹脂本来の破壊電界の強さに比べて著しく低い値である。コイルの破壊は, 導体角部近辺に存在する極めて小さいボイドからの局部破壊の進展と考えられる。
(3) 絶縁破壊時の導体角部の電界の強さは, 絶縁厚みが増すにつれて増大する。導体角部から進展した局部破壊が, マイカ絶縁層によって遮ぎられるために現われる現象である。すなわち, マイカ絶縁では絶縁層内

の沿層方向にトリリーが伸びやすく, 貫層方向にはマイカ層があってトリリーが伸びるには大きな抵抗力を受ける。したがって, トリリーは沿層方向に伸びながら貫層方向の弱点を探し, その弱点で貫層方向に伸びて局部破壊が起こっている。マイカテープの巻回数が多くなると, 各層で同じことを繰り返しながら全路破壊をしているわけで, 絶縁厚みが増し, 巻回数が多くなればなるほど, この貫層方向の弱点を探す距離が必要なたため絶縁厚み以上に長くなる原因となっている。したがって, 絶縁破壊時の導体角部の電界の強さの絶縁厚み依存性は, 厚みが増えたことによるマイカ絶縁層の貫層方向へのトリリーの伸びにくさと, トリリー長さの増加に伴う電圧降下の増加によって説明できる。
以上, コイル絶縁の破壊に及ぼすマイカ層の役割と導体角部の局部電界の意義などについて明らかにすることができ, コイル絶縁の合理的設計に有効な知見が得られた。