

ガスタービンの騒音対策

Gas Turbines and Acoustical Consideration

In the technical advancement concerning gas turbines noise control is engaging most public concern. Hitachi-GE package type gas turbines employ effective silencing equipment perfected through the company's continuous efforts for development and rich experience.

This article deals with the basic problems in the noise control field and some of the features of acoustical control techniques applied in these package type gas turbines.

平松 力* *Tsutomu Hiramatsu*

岩尾稔直** *Toshinao Iwao*

堀三千男** *Michio Hori*

1 緒 言

近年、ガスタービンは用途上の柔軟性に加え、技術の進歩に基づく信頼性、経済性の向上に伴い世界的な規模で需要の進展を示している。ガスタービンの周囲環境に対する高い順応性は用途上の柔軟性とあわせ大きな特質であるが⁽¹⁾、この特質が生かされ、広大な砂ばく地帯や極寒地帯あるいは孤立した辺地より比較的環境のよい住居地域、都市近傍地域に至るまであらゆる地域での採用を可能にしている。一方、周囲環境に与える影響については、環境汚染に対する要素は少なく住居地域や都市近傍地域でも多く設立されている。

しかし近年の環境保護に対する社会的関心は高く、規制も著しくきびしいものとなっている。このような状況下ではガスタービンとても環境に与える影響を無視することはできず、真剣な対策が図られてきており、さらに多くの開発努力もなされている。特にガスタービンは特有の音源を有しており、適正な処置を行なわないと騒音として境界付近での環境改善の対象になることがあるため、従来より防音に対しては比較的高い関心が持たれ検討が進められてきた。しかも、近年の騒音規制の強化および大形化に伴う音響出力の増大、さらには経済的見地より比較的環境のよい住居地域に近い位置での設立も可能にする必要があるなどの条件を考慮すれば、騒音防止のためのより完全な対策が必要である。

日立-GEガスタービンでは、運転時間および設置場所などの要求に適合し、かつ経済性を考慮した防音装置を採用しているが、本論文ではこれら防音装置の実施例および特長を紹介するとともに今後ますますきびしくなる騒音規制に対する対策について述べている。

2 騒音規制

騒音とは好ましくない音の総称であり、多分に心理的要素を含んでおり外部環境の状態に左右される面も多い。したがって騒音規制も画一的には行なわれず地域差、外部環境状況に応じて定められることが多く、また騒音の評価にも人間の心理的、身体的影響に対する条件が取り入れられている。ここでは、ガスタービンに関係する騒音規制法として諸外国で多く使用されているNEMA(アメリカ電機工業会規格)基準について述べる。

NEMAではガスタービンの設置区域および運転状況に応じ表1に示すような騒音レベルランクを設定している⁽²⁾、各レ

ベルランクでは周波数を1,000Hzを中心とする8個のオクターブバンドに分け、それぞれの中心周波数位置での値を図1に示すように規定している。NEMAでの許容騒音レベルの与え方は次のようになっている。

許容騒音レベル=騒音レベルランク(Composit Sound Rating)－運転状況に対する補正係数
－暗騒音に対する補正係数

騒音レベルランクは各騒音レベルに対する社会的反応を考慮し決定する。社会的反応は図2に示すとおりである。ガスタービンの使用者は、これらの反応を十分考慮に入れ、許容レベルを決定することになる。なお最終許容レベルは、表2に示す運転状況に対する補正および図3に示す暗騒音に対する補正を行ない決定する。

表1 NEMA基準による騒音レベルランク NEMAではガスタービンの設置区域、運転状況および時間によって表のような騒音レベルランクを設定している。

Table 1 NEMA Estimated Design Sound Pressure Level

地 域	運 転 状 況	騒音レベルランク
居 住 専 用 区	連 続 － 昼夜	A
	連 続 － 昼間のみ	C
	ピーク － 夜間のみ	B
	ピーク － 昼間のみ	D
郊 外 居 住 区	連 続 － 昼夜	B
	連 続 － 昼間のみ	D
	ピーク － 夜間のみ	C
	ピーク － 昼間のみ	E
都 市 内 居 住 区	連 続 － 昼夜	C
	連 続 － 昼間のみ	E
	ピーク － 夜間のみ	D
	ピーク － 昼間のみ	F
工 業 周 辺 地 域	連 続 － 昼夜	D
	連 続 － 昼間のみ	F
	ピーク － 夜間のみ	E
	ピーク － 昼間のみ	G
純 工 業 地 域	連 続 － 昼夜	E
	連 続 － 昼間のみ	G
	ピーク － 夜間のみ	F
	ピーク － 昼間のみ	H

* 日立製作所日立研究所 ** 日立製作所日立工場

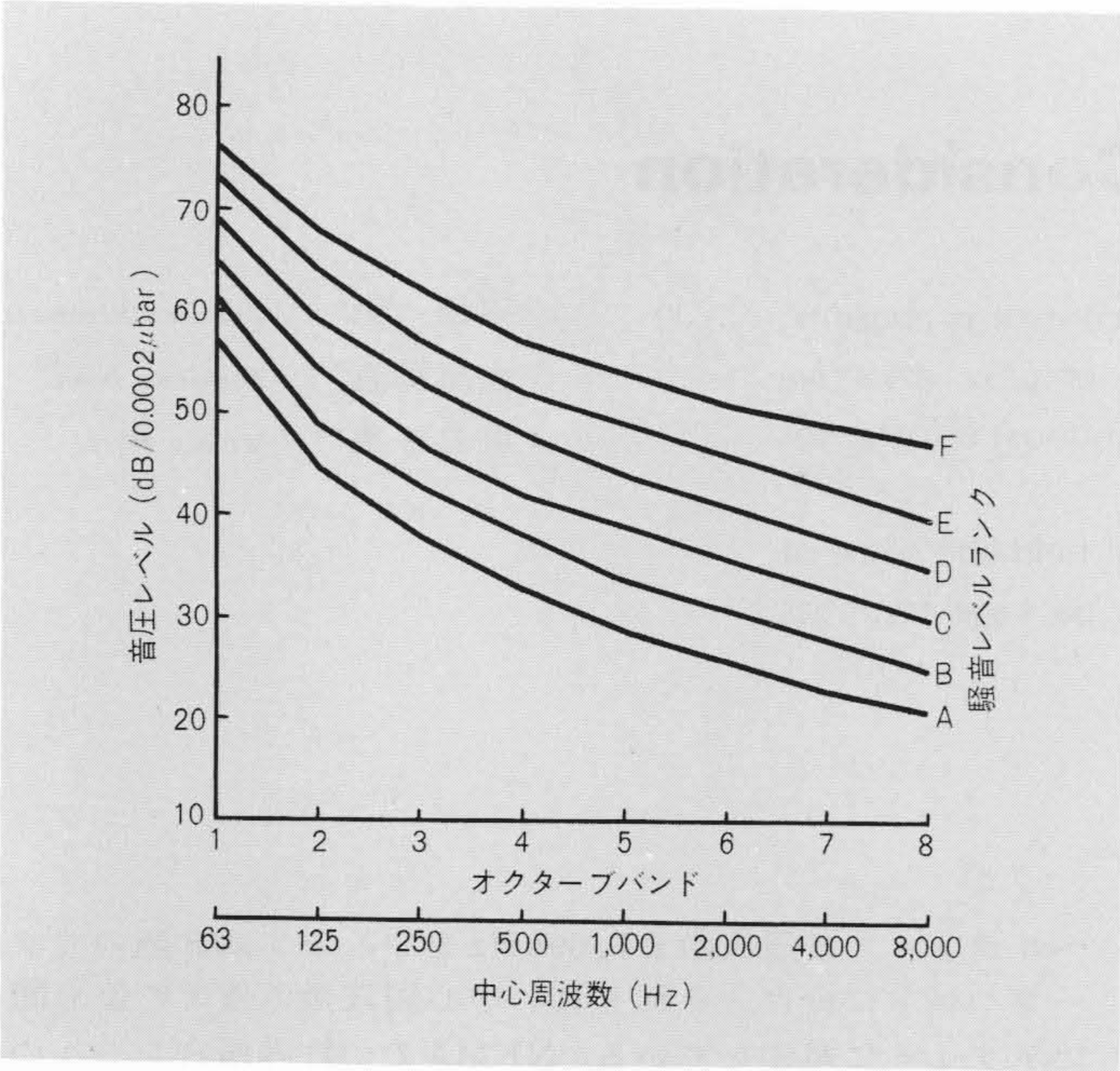


図1 騒音レベル NEMAにおける騒音レベルランクを示す。
Fig.1 NEMA Sound Pressure Level

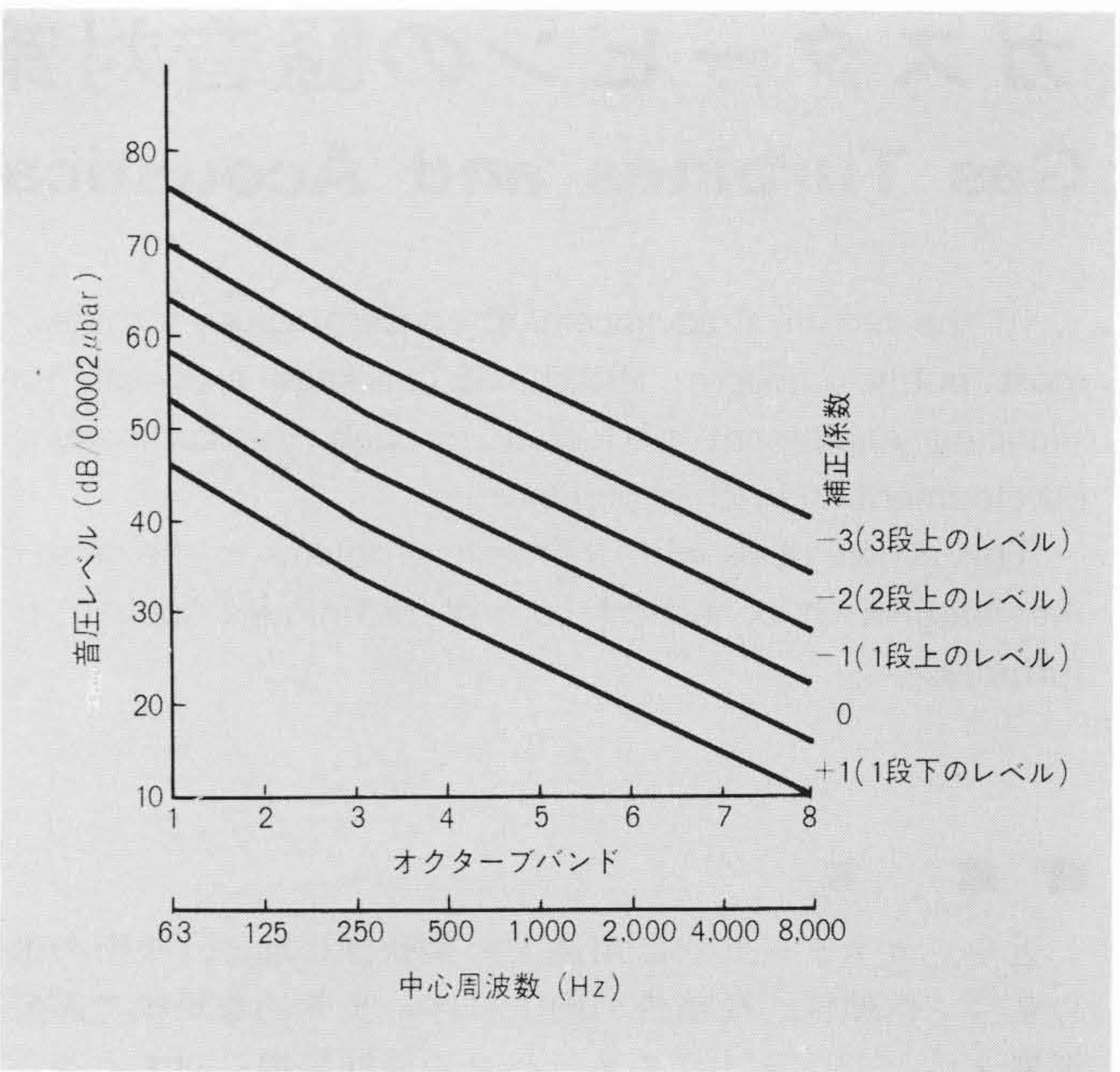


図3 暗騒音に対する補正係数 ガスタービン設置場所における暗騒音を測定し、本図によって暗騒音に対する補正係数を決定する。
Fig.3 Composite Sound Rating Correction Numbers

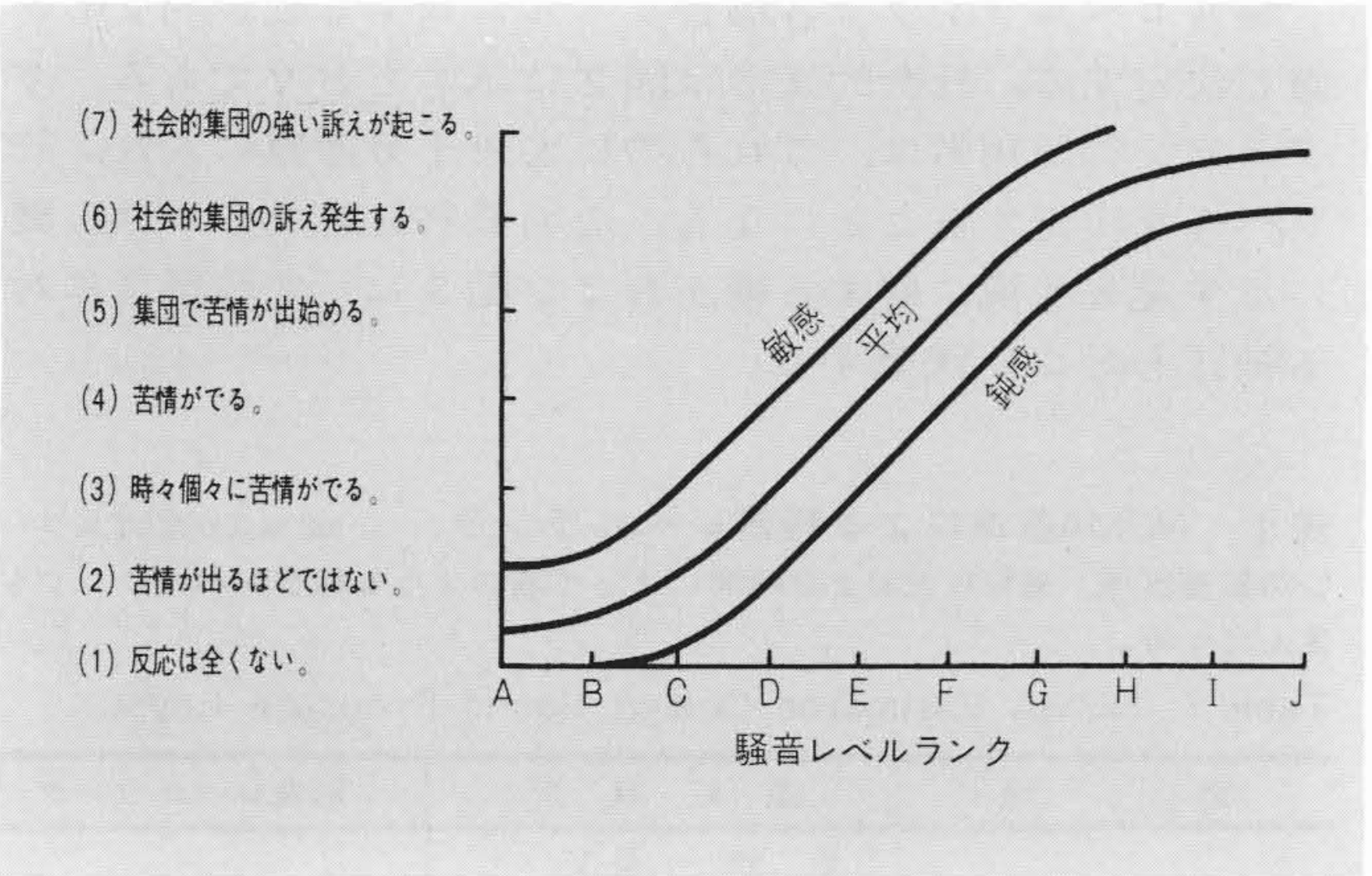


図2 騒音レベルランクと社会の反応 横軸のA, B, Cなどの記号はNEMAによる騒音レベルランクを表わし、縦軸は騒音に対する社会の反応を示す。
Fig.2 Composite Sound Rating and Community Reactions

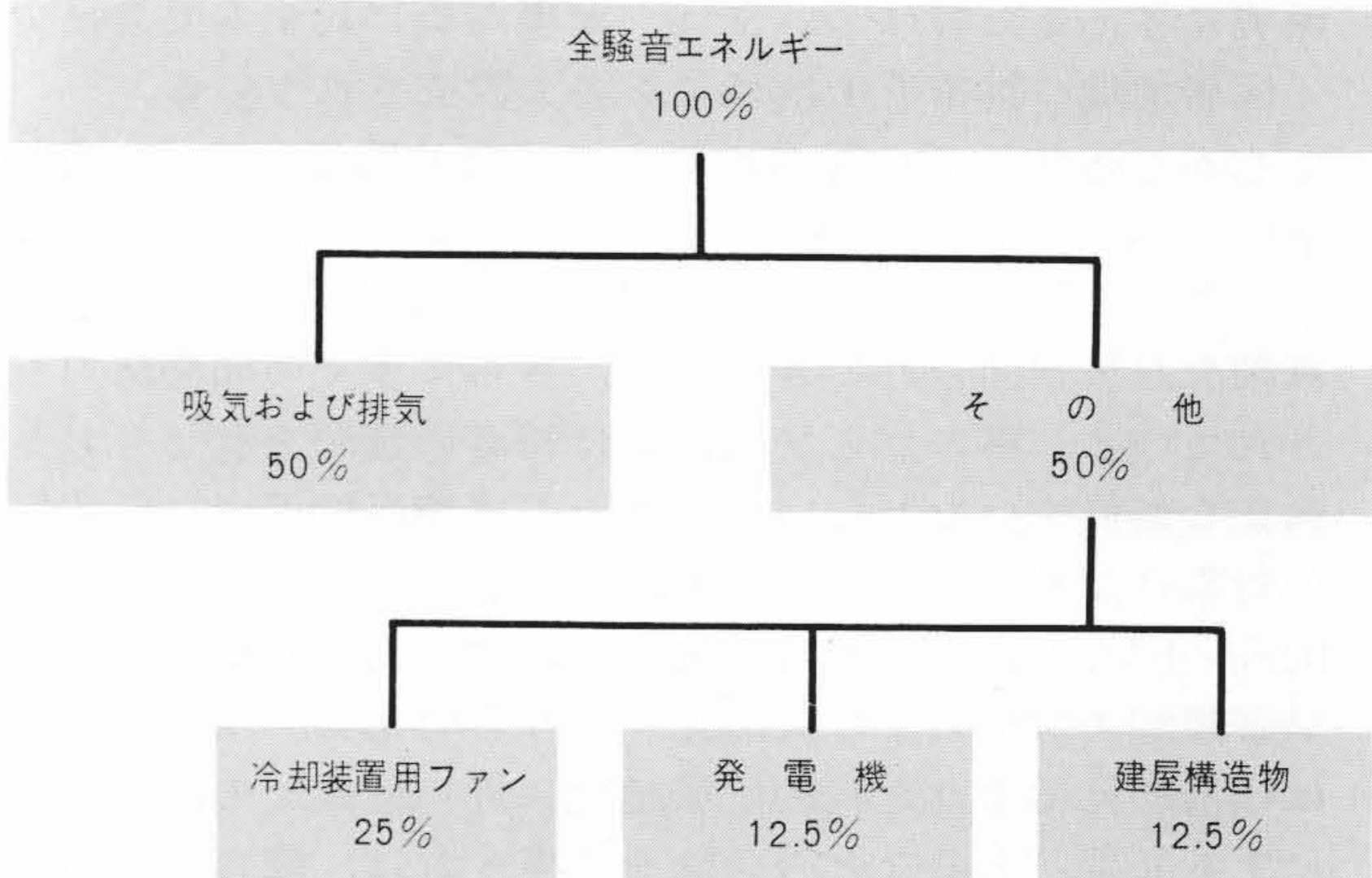


図4 ガスタービン騒音発生源分布 ガスタービンの騒音発生源の分布割合を示す。
Fig.4 Gas Turbine Acoustic Budget

表2 運転状況に対する補正係数 ガスタービンの運転形式により本表によって補正を行なう。

Table 2 Correction Number for Type of Gas Turbine Operation

運 転 の 形 式	補 正 係 数
昼夜間の連続運転	0
昼間のみの連続運転	-1 (1段上のレベル)
夜間のみのピーク運転	-1 (1段上のレベル)
昼間のみのピーク運転	-2 (2段上のレベル)

一例として騒音レベルランクが“C”で、昼間のみの連続運転、暗騒音レベルの過半数が補正係数-1の位置に近い値となっている場合を計算すると、

許容騒音レベル=C-(-1)-(-1)=C+2
となり“C”より2段上のレベル“E”でよいことになる。

3 ガスタービンの騒音

騒音対策を考える場合、発生源の音の性質を十分に調査することは大事なことで、特にガスタービン発電設備のような一つのプラントの場合は、どのような音がどこから出てくるかをよく調査し、それぞれ必要かつ適切な処理を施せば経済性のよい対策が行なえる。

図4は日立-GEガスタービンの騒音発生源のエネルギー分布を経験的に示したものである。ここで吸気、排気口より発生するものはガスタービン内部より放出される空気伝搬音で、建屋構造物より発生するものは主として空気の振動により建屋が振動したり、あるいは軸受、歯車など回転体に関する部分の振動がケーシングに伝わり発生する構造伝搬音である。

吸気騒音は主として圧縮機の回転により生じ、明確に聞き分けられる音は翼騒音である。これは揚力を持って空間を通過する翼が、空間に圧力パルスを与えることにより発生する

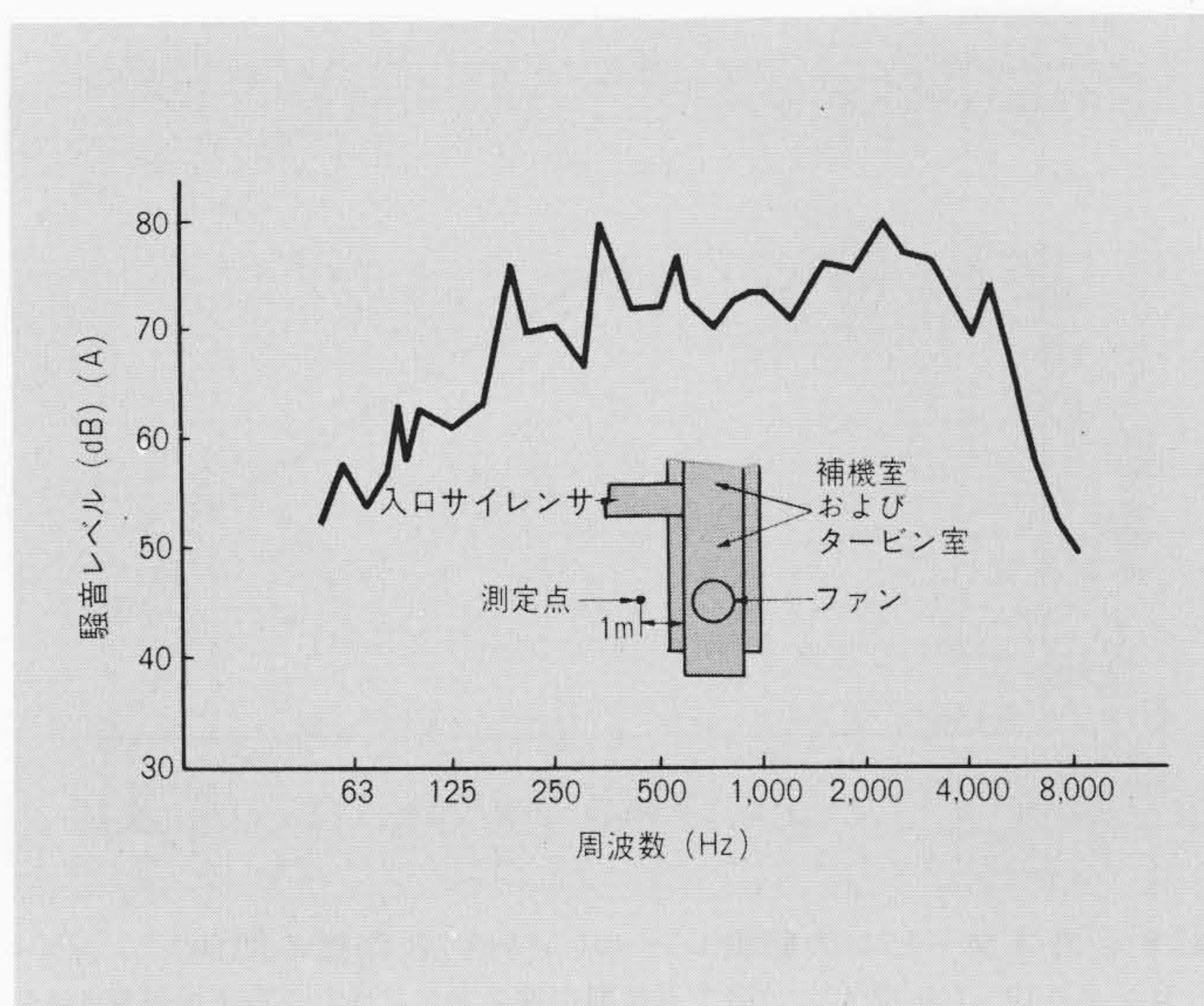


図5 ガスタービン騒音の周波数特性(吸気側) より効果的な騒音防止対策を行なう場合、周波数分析をして音の特性を把握することが必要であるが、本図は吸気側における周波数特性の一例を示す。

Fig.5 Inlet Sound Pressure Level for Gas Turbine Package Power Plant

音で、その周波数は、

$$f = \frac{Z \cdot n}{60} \dots\dots\dots(1)$$

f : 基本周波数 (Hz)

Z : 翼 数

n : 回転数 (rpm) で表わされる。

日立-GEガスタービンの圧縮機初段翼の枚数は26枚で、これを(1)式にあてはめると $f = 2,200 \text{ Hz}$ となり、その倍数は $4,400 \text{ Hz}$ であるが、図5のガスタービンの周波数分析実測結果によればピーク音圧は $2,200 \text{ Hz}$ および $4,400 \text{ Hz}$ と現われており、吸気の騒音がおもに圧縮機初段動翼によっていること

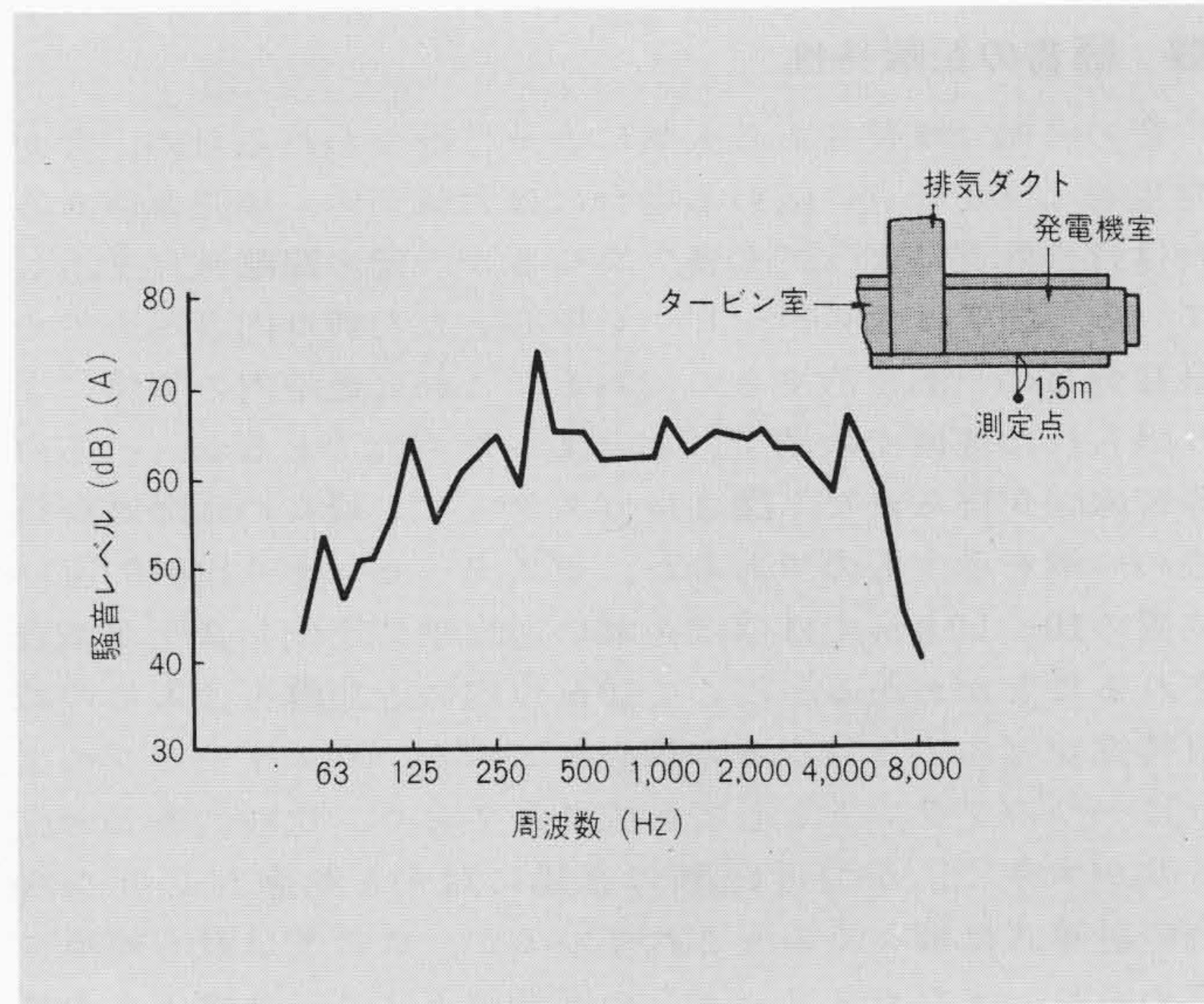


図6 ガスタービン騒音の周波数特性(排気側) ガスタービン排気近くの騒音周波数は分析の結果、種々の騒音を含むため、スペクトルも広範囲にわたっている。

Fig.6 Exhaust Sound Pressure Level for Gas Turbine Package Power Plant

を示している。

図6は排気室近くの騒音周波数分析実測結果を示すものであるが、排気騒音は燃焼音、タービンの翼騒音および燃焼ガスの乱流などにより生ずるため、騒音のスペクトルは広範囲にわたっているが、発電機の電磁音および歯車の回転数成分音、軸受振動に起因するロータ回転数(%)の倍数の周波数を持つ騒音もあることが示されている。

なお、冷却装置用ファンも騒音の原因となるが、図5に示すようにファンの回転周波数である 168 Hz の一次、二次および三次に相当する周波数にピーク音圧が出ていることより明らかである。

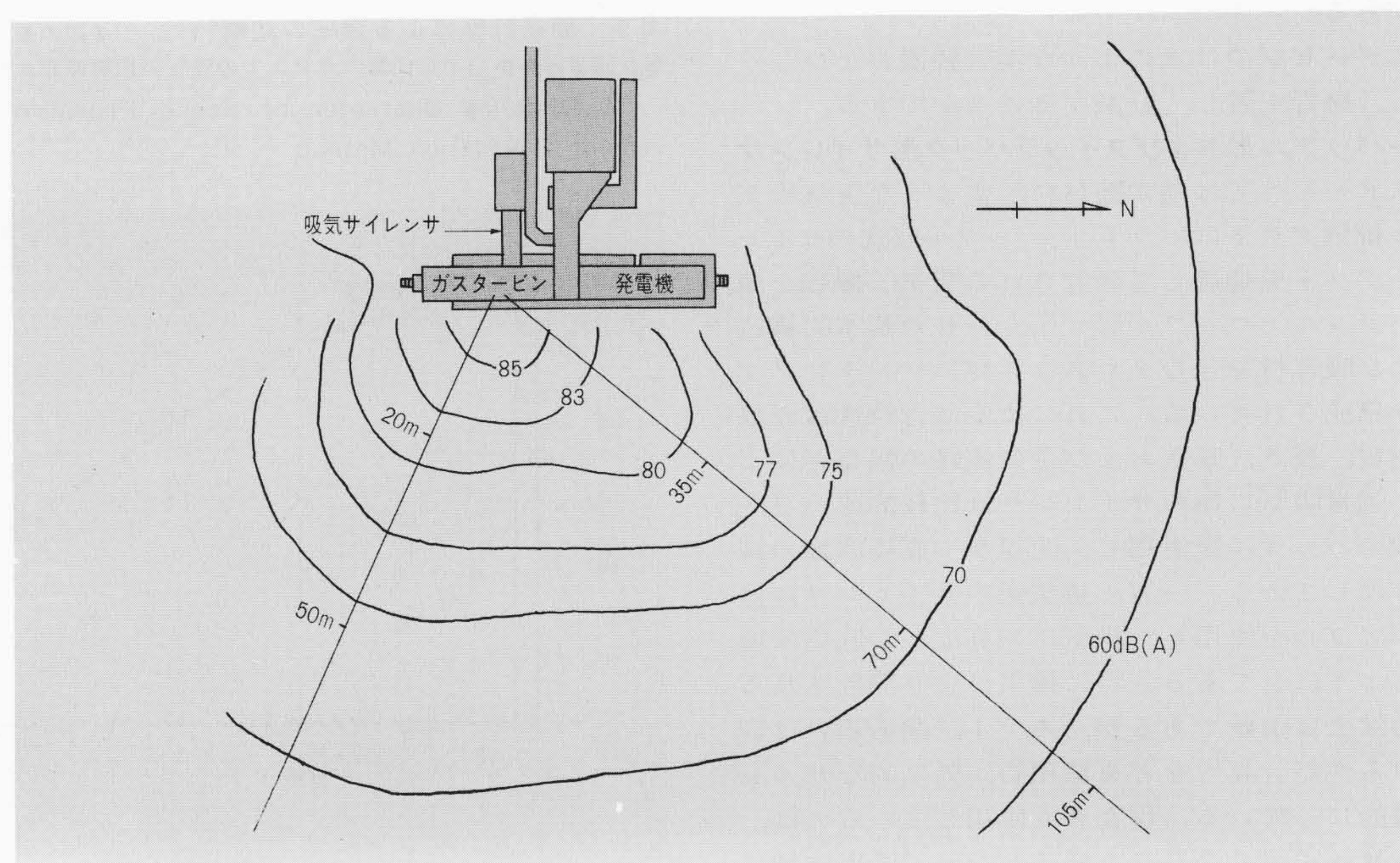


図7 ガスタービン周辺の等音圧線図 ガスタービン周辺の騒音レベルを測定し、等騒音レベル分布図を画いた例である。

Fig.7 Equi-sound Pressure Line of Gas Turbine Package Power Plant

4 騒音の距離特性

音の伝搬は媒質である大気によって行なわれるため、音が発生源より受音点に伝わる場合には大気条件、周囲条件あるいは音の性質によっても多少異なるが一定の距離減衰を示している。図7はガスタービンを中心とした敷地内各地点での騒音分布の一例を示すものである。これは敷地内の事情により限られた地域での測定にとどまったものであるが、一応の等音線図が得られた。図8はガスタービン騒音の距離減衰特性の一例を示すものであるが、ガスタービンより比較的遠い位置の10～100mではほぼ距離の逆自乗に比例し音圧が減衰されることがわかる。ここで10m以内の近距離を含んだ減衰特性がどのようなになるか調査してみる。ガスタービンのように一つのプラントとして形成されており、比較的音源の広がりが大きく、かつ近距離の音場に対する考慮が必要な場合の計算式は種々くふうされているが、ここでは最も簡単に求められ、またガスタービンの実測値とよく一致するものについて紹介する。

1mでの測定値を基準にして、ガスタービン正面の平面のみを考え、短辺 a 、長辺 b に対し次のような法則で減衰するとなす計算式がある⁽³⁾。図9において $1 \sim a/\pi$ では減衰なし、 $a/\pi \sim b/\pi$ では音圧 P は $1/R$ に、 b/π 以上では $1/R^2$ に比例して減衰する。これをガスタービンプラントの建屋高さ $a=3.8$ m、長さ $b=23.8$ mに適用すると、図10の2点鎖線に示すようになり、これに騒音実測値を丸点で充点してみると、実測値は計算値とよく一致していることがわかる。減衰の求め方は簡単であるが、原理は理論的過程を経て求められたものであり、ガスタービンのようなキュービカル形の騒音源に適しているものと考えられる。

5 騒音対策

ガスタービンを設置する場合、その騒音値が法令の規制値以内に収まるよう、またその周辺地域の住民に不快感を与えることなく十分共存できるよう適切な消音およびしゃ音処理を行なう必要がある。

日立-GEガスタービンでは次のような消音装置およびしゃ音装置を使用し、騒音を著しく軽減することができる。

5.1 パラレル・バッフル形およびスイッチバック形サイレンサ

日立-GEガスタービンでは通常図11に示すような空気吸気ダクトならびに排気ダクトにパラレル・バッフル形式のサイレンサを設置し、ダクトを通過して発散される空気伝搬音を減音している。パラレル・バッフル形サイレンサの基本的構造は、吸音材および吸音材を包むクロスならびにパンチングプレートなどより構成されている。これによる減音特性は周波数、吸音材の材質、長さ、厚さおよび空気流路の幅などによって異なるが、通常吸気口側のサイレンサは比較的薄いファイバーグラス製のバッフルを使用し、低温かつ高周波域の減音に適するようにしてある。一方、排気側のサイレンサには厚い石綿製のバッフルを使用し、排気口の高温かつ低周波域の減音に適するようにしてある。特に排気口より発散される低周波域騒音の除去は困難であるが、モデル試験あるいは音響回路を利用する性能計算⁽⁴⁾などを活用し、効果的なサイレンサの使用を可能にしている。現在多く使用しているのは、厚薄2種のバッフルを組み合わせたサイレンサで低周波域における減音効果も大きい。

図12は排気口にパラレル・バッフル形のサイレンサを使用し、排気ダクト出口近くで測定した場合の減音効果の一例を

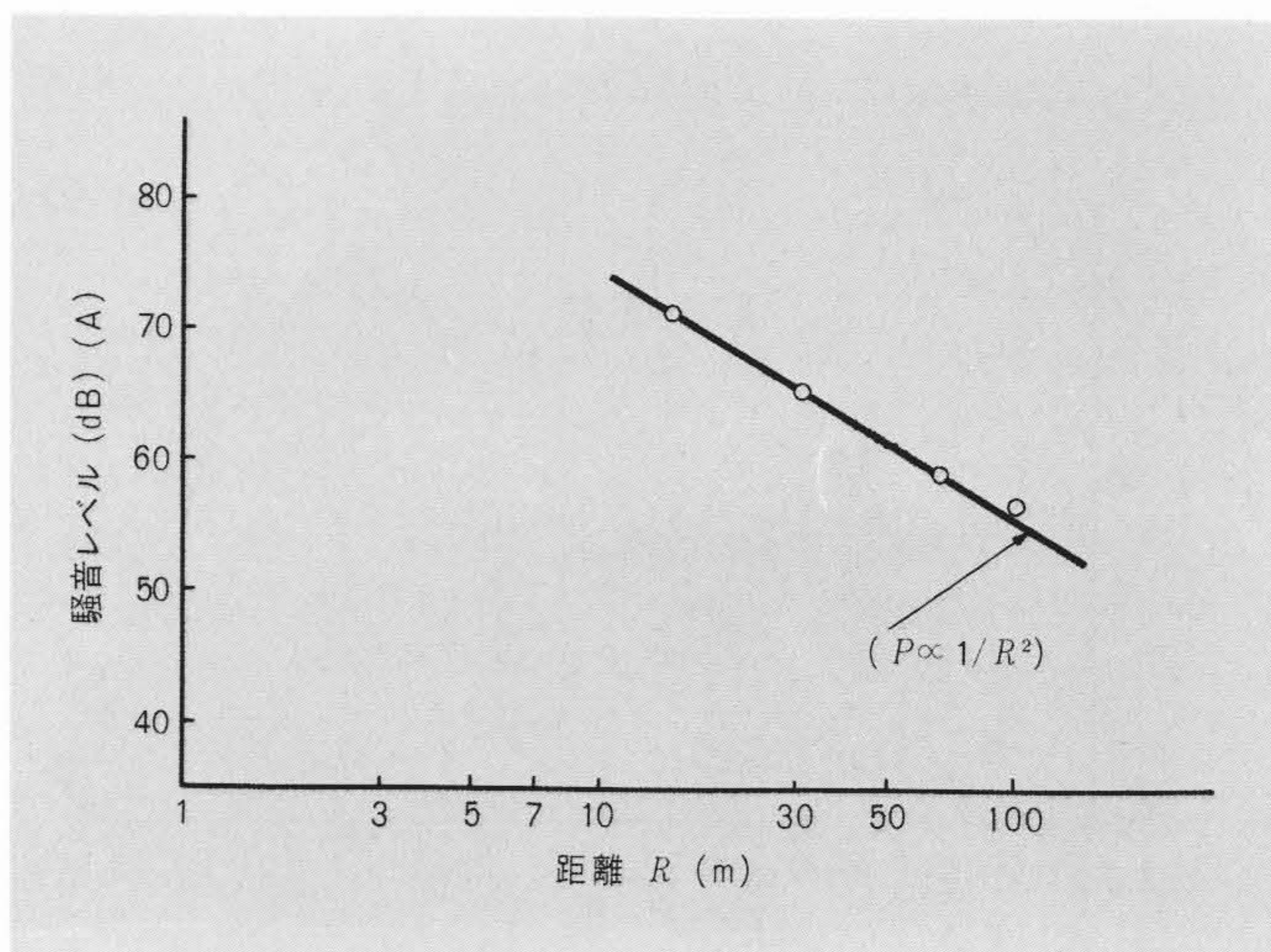


図8 ガスタービンの騒音レベル(A特性)と距離の関係 ガスタービンより10～100m離れた位置では距離の逆2乗に比例して音圧が減衰される。
Fig.8 Relation between Gas Turbine Sound Pressure Level and Distance

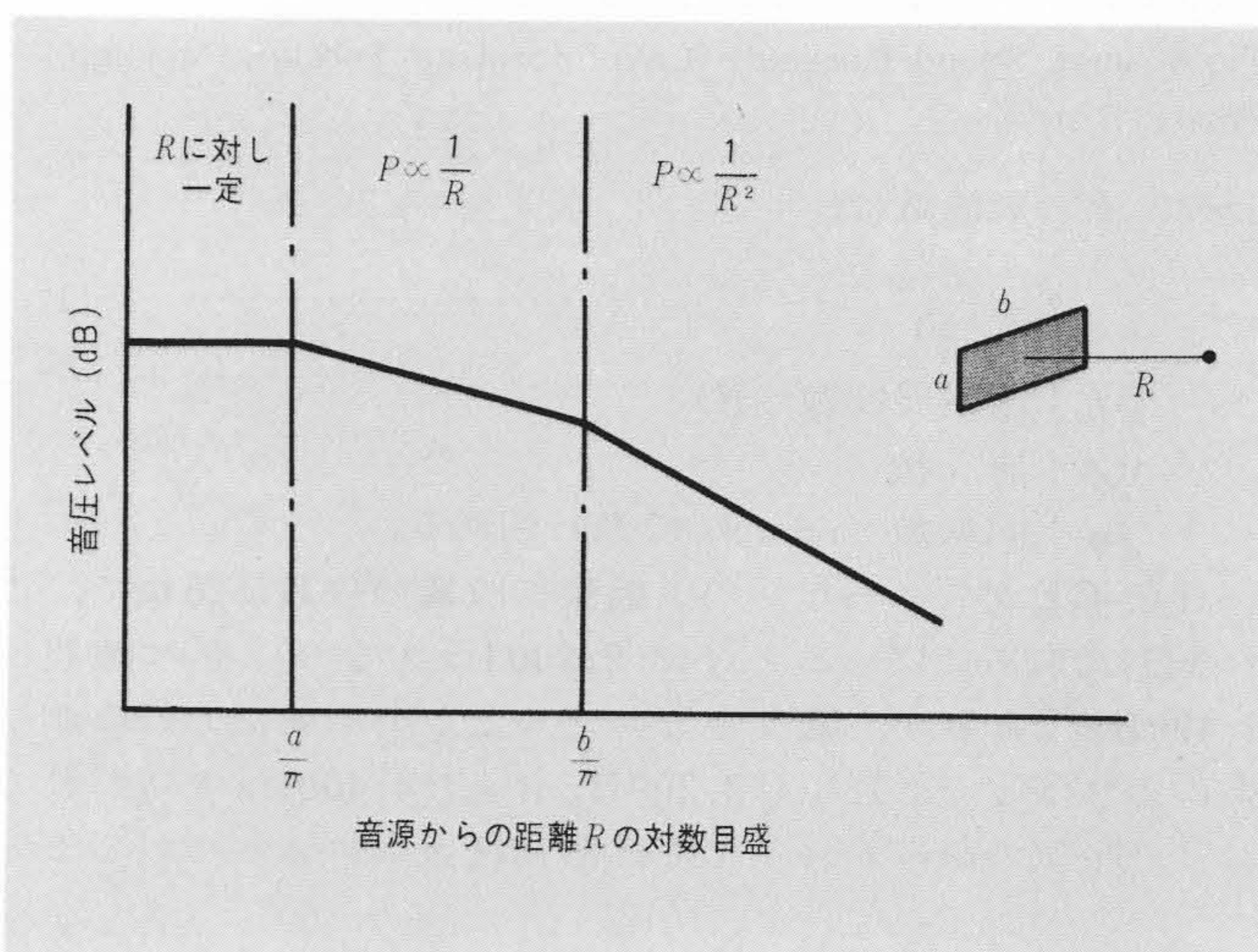


図9 簡易計算による音圧の距離特性 2辺の長さが a 、 b (m)の長方形形状面音源の中心から任意の点 R までの音圧の距離減衰を示す。
Fig.9 Distance Character of Sound Pressure Level by Convenient Calculation Method

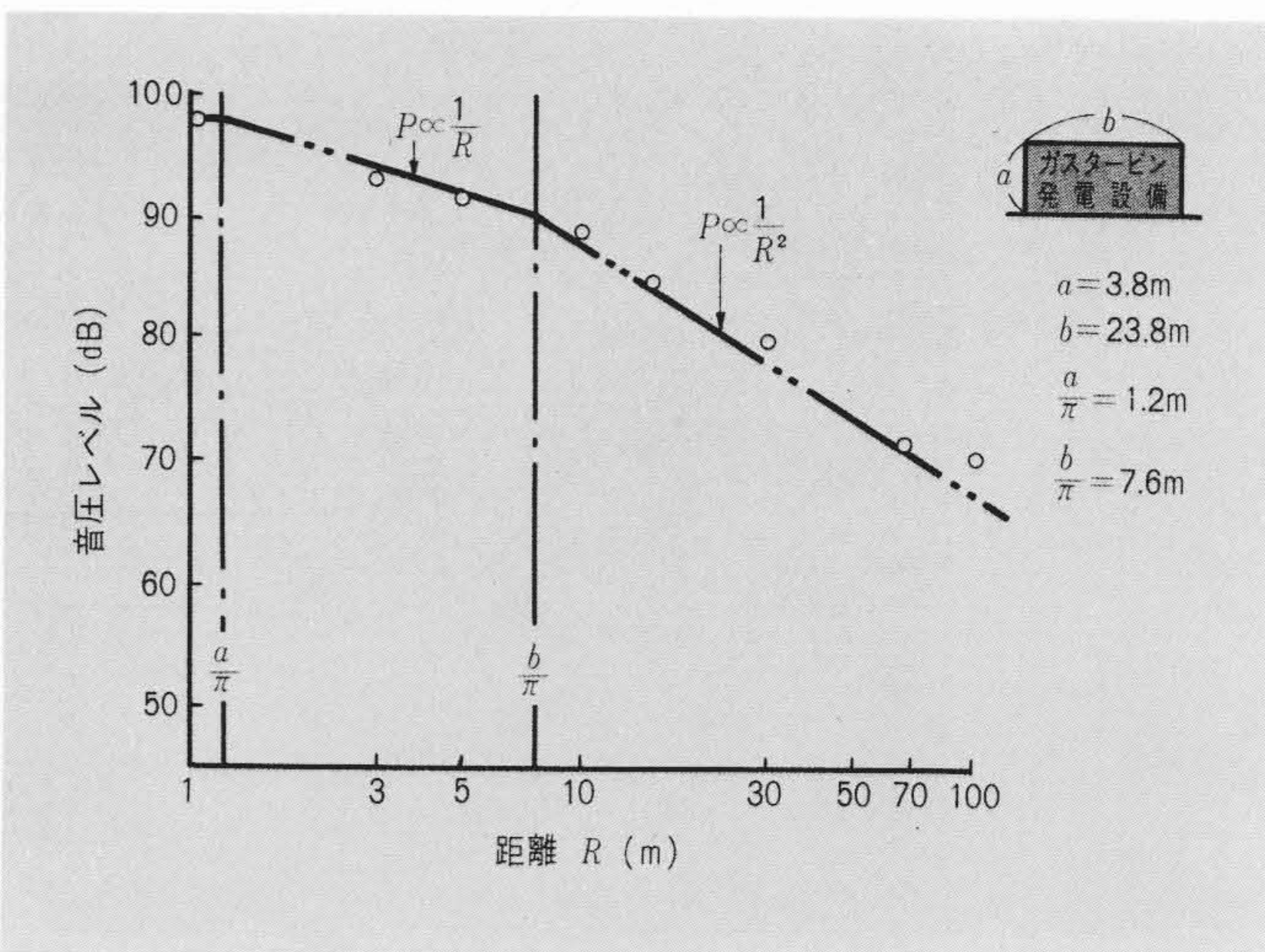


図10 ガスタービンの騒音の距離特性 簡易計算法をガスタービンに適用して、丸点で示す実測値と比較してみると、2点鎖線で示す計算値とよく一致する。
Fig.10 Measured Distance Character of Gas Turbine

示したものである。一般に本形式のサイレンサでは長さを増せば増すほど減音効果は上がるが、あまり長過ぎると圧力損失が増加し、高価になるので常に環境の適合に留意するとともに経済性をも考慮した選択を行なうことが重要である。

図13は排気口に使用される低周波域の減音特性にすぐれた

スイッチバック形サイレンサを示すものである。本サイレンサは吸音材を内ばりした屈折した室より構成されており、比較的排気時の流通はよいが、音の伝搬は伝わりにくい構造となっている。また、サイレンサの構造を小さくできる利点もある。

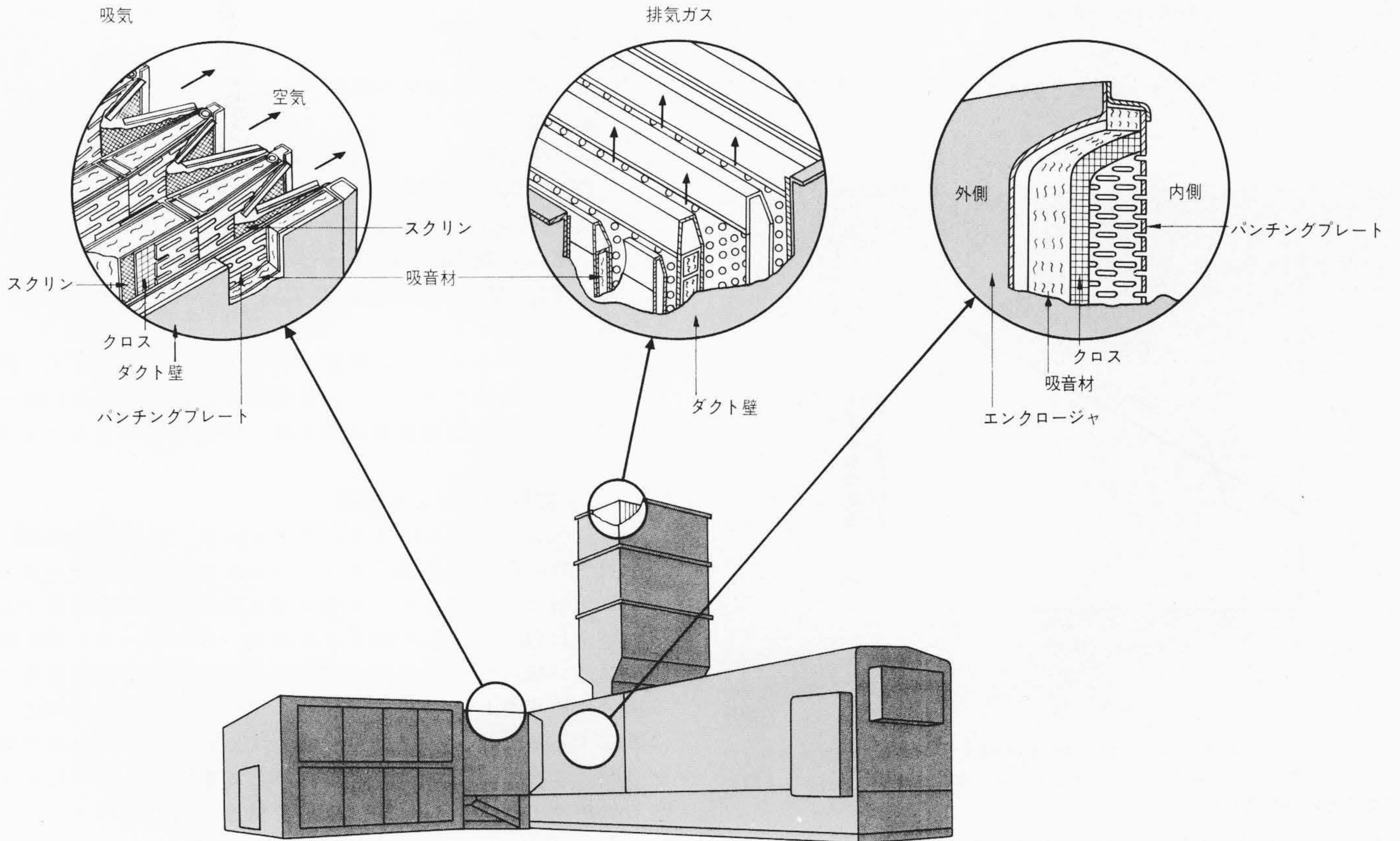


図11 消音装置の詳細 吸、排気ダクトに平行・バツフル形式のサイレンサ、エンクロージャにパネルを図のように設置し、ガスタービンの騒音を減音している。

Fig.11 Structural Detail of Silencer

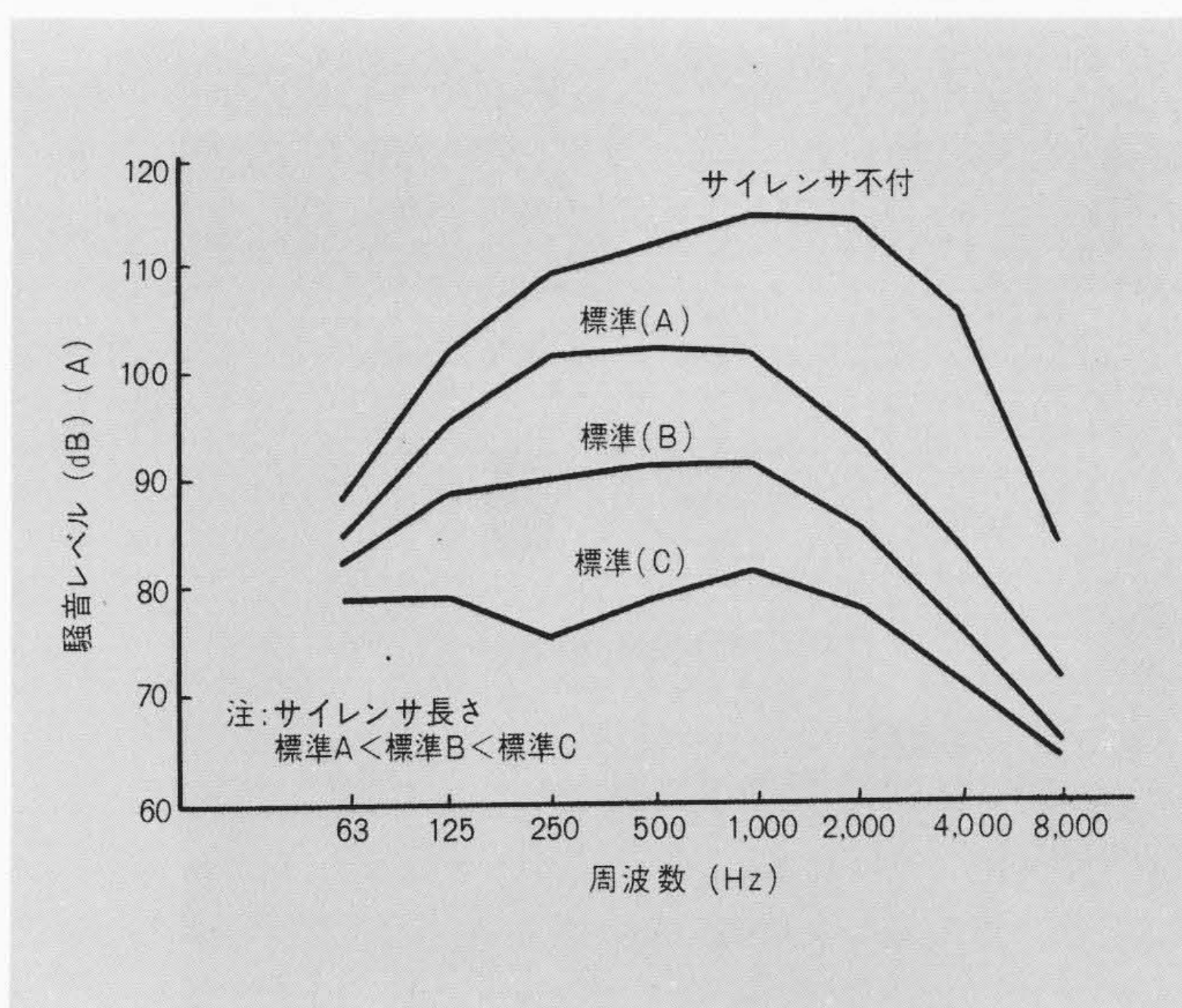


図12 サイレンサの長さと音圧レベル(排気) 一般に平行・バツフル形サイレンサは長さを増せば減音効果が現われるが、サイレンサの長さを変化させ排気出口近くで測定した例を示す。

Fig.12 Relation between Exhaust Sound Pressure Level and Silencer Length

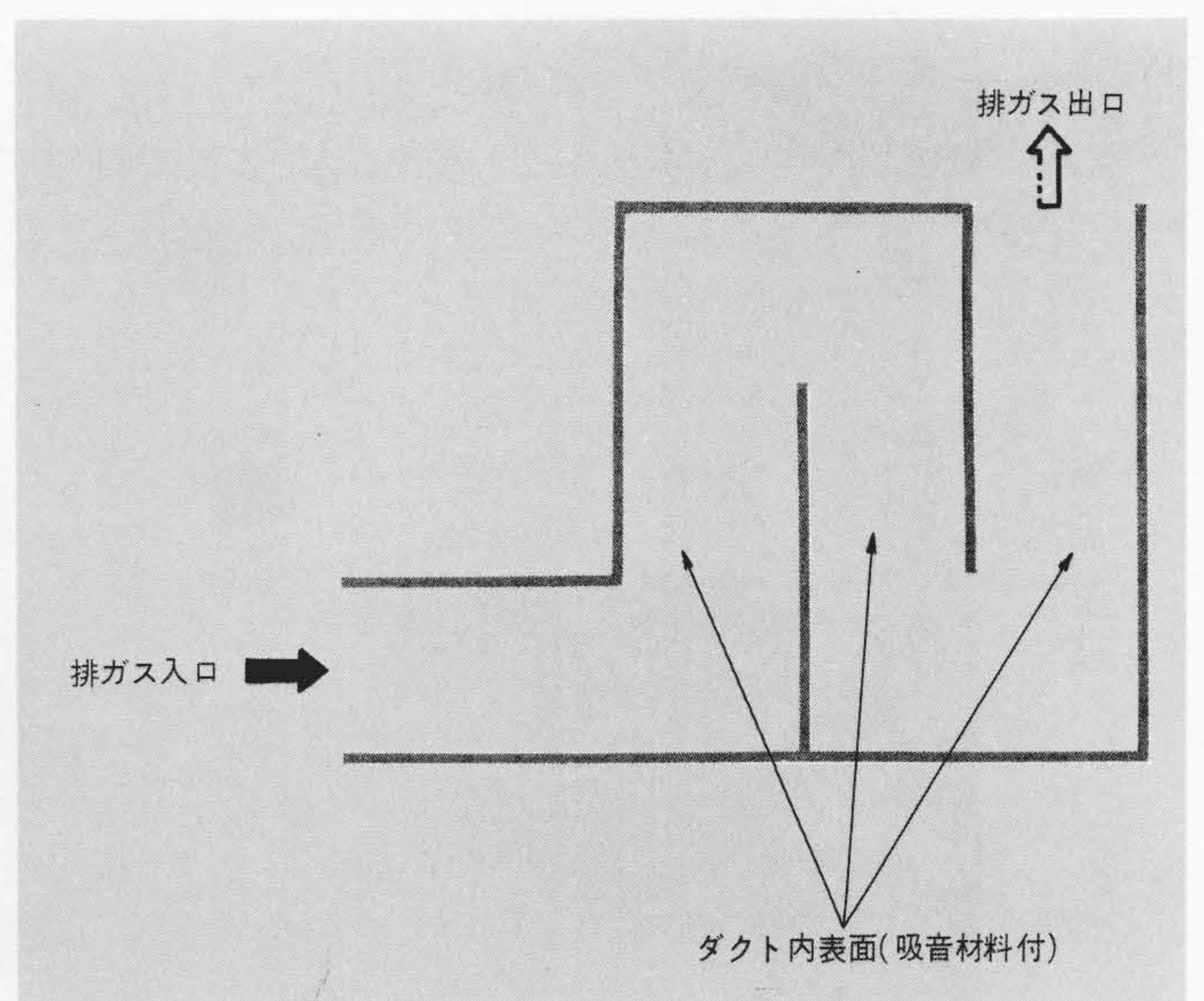


図13 スイッチバック形サイレンサ スイッチバック形サイレンサはおもに排気口に使用され、低周波域の減音特性にすぐれている。

Fig.13 Switch Back Silencer

5.2 エンクロージャ

日立-GEガスタービンではパッケージ形ガスタービンであることを特徴としている。これは発電設備そのものを小形コンパクトにまとめるとともに機器回りに屋根およびエンクロージャと呼ばれるパネルを張りめぐらし、そのまま屋外に設置できる利点も有している。この屋根およびエンクロージャには図14に示すような吸音材をはりつけてあり、各機器、すなわちタービンや圧縮機、補機あるいは発電機より放射される騒音をしゃへいしている。

これら吸音パネルなどのしゃへい板の透過損失については

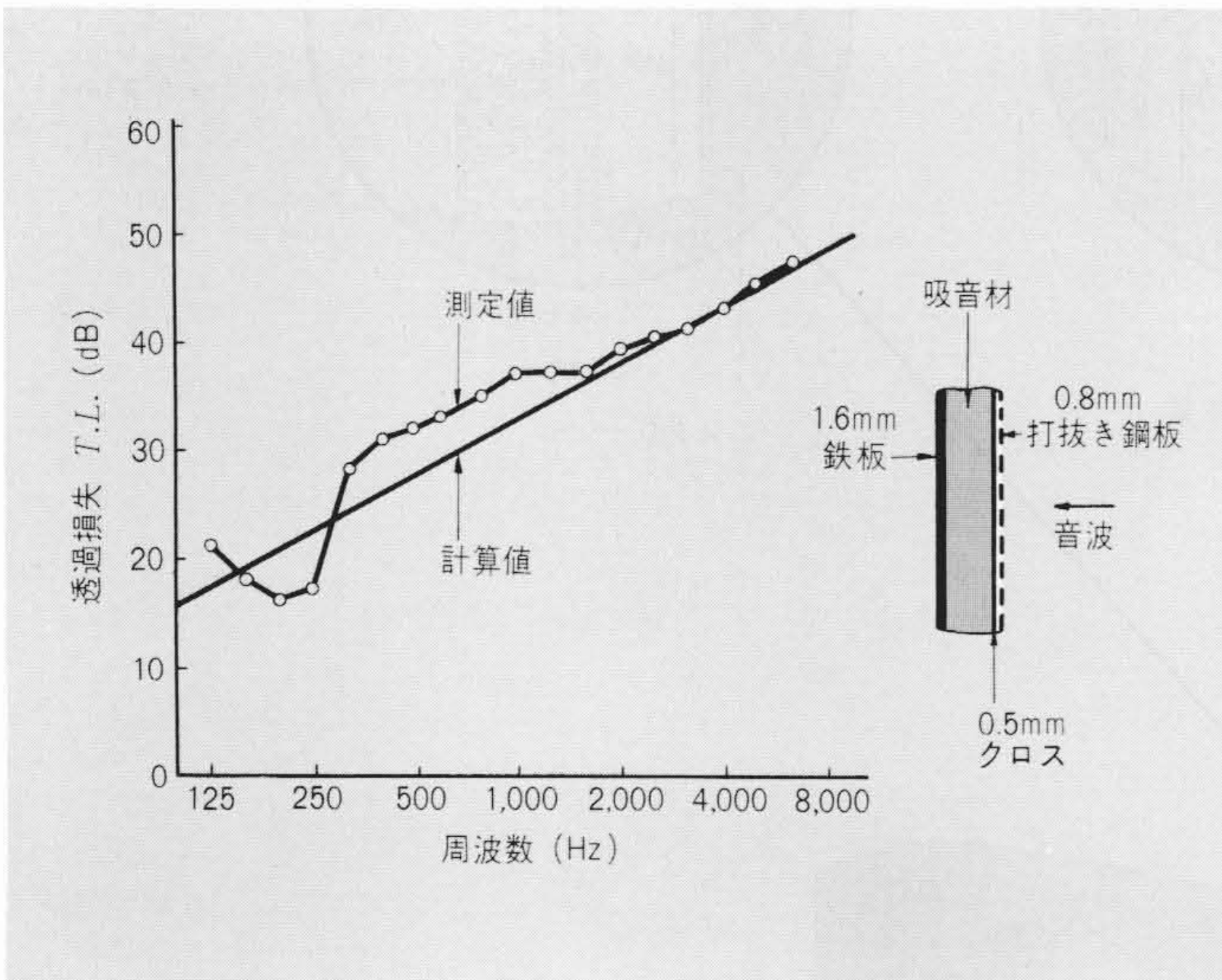


図14 エンクロージャ用パネルの透過損失 パネルの透過損失は、計算値と測定値はよく一致し、またガスタービンの各機器より放射される騒音に対し著しい効果がある。

Fig.14 Transmission Loss of Enclosure Panel

次に示す質量法則の計算によく一致することが知られているが、図14はガスタービンに実際に使用されているパネルの計算値と実験値とを比較して示したものである。

しゃへい板の透過損失⁽⁵⁾は垂直入射に対しては、

$$TL_0 = 10 \log_{10} (1 + a^2) \dots\dots\dots(2)$$

拡散音場に対しては、

$$TL = 20 \log_{10} a - 10 \log_{10} \{ \log_e \{ 1 + a^2 \} \} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{ここに、 } a = \frac{\omega m}{2\rho C}$$

m : 単位面積当りの質量 (g/cm^2)

ω : 角周波数 (rad/s)

ρ : 空気密度 (g/cm^3)

C : 空気中の音速 (cm/s)

ここで $\omega m \gg 2\rho C$ とおくと、

$$TL_0 = 20 \log_{10} a \dots\dots\dots(4)$$

$$TL = TL_0 - 10 \log 0.23 TL_0 \dots\dots\dots(5)$$

となる。

図14にみられるように計算値と実験値はきわめてよく一致している。またガスタービンの各機器より放射される100～8,000Hzに至る各周波数音に対し著しい効果があることも示されている。

5.3 しゃ音板およびしゃ音壁

しゃ音板は空気取入口より、サイレンサ、圧縮機入口部に至る吸気側の騒音発生部、タービンおよび補機パッケージおよび排気室より排気サイレンサに至る排気騒音発生部をそれぞれ完全に包み込みしゃ音するもので、ガスタービンが住居地域に近い場所に設立され、比較的きびしい騒音規制を受ける場合に使用される。特に大形ガスタービンを住居地域近くに設立する場合は、音響出力も増大するのでより完全な対策が必要となってくるが、この場合はしゃ音板にあわせしゃ音壁も採用する。このしゃ音壁は吸音材を内蔵するパネルによ

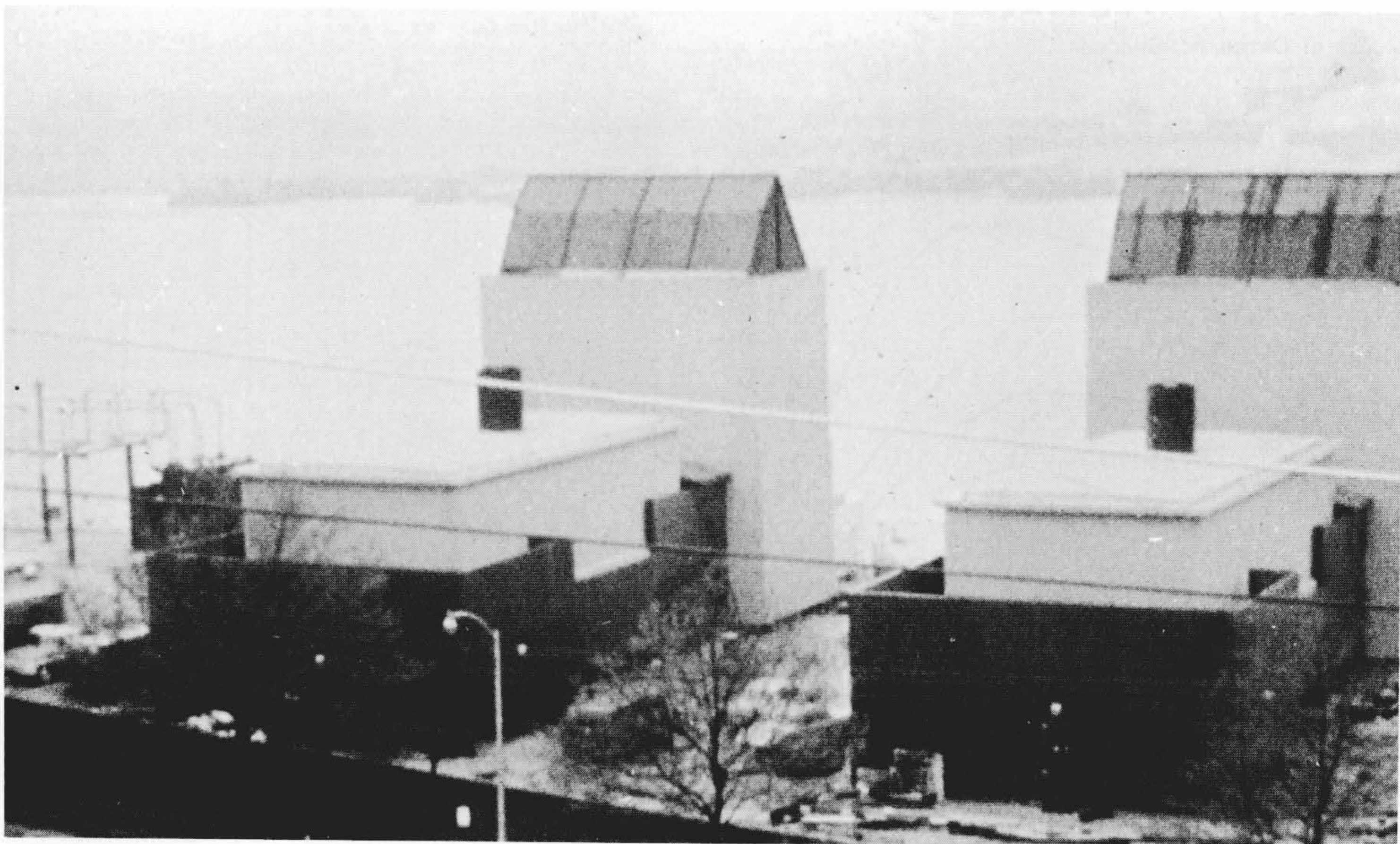


図15 完全エンクロージャ付ガスタービン 本図はしゃ音壁を施した70,000kWガスタービンの外觀図を示し、騒音レベルはNEMA“C”程度と非常に低い。

Fig.15 Gas Turbine Package Power Plant with Acoustical Wall



図16 18,000kW級ガスタービン外観 18,000kW級ガスタービンに標準のサイレンサを取り付けた外観を示す。

Fig.16 18,000kW Class Gas Turbine Package Power Plant

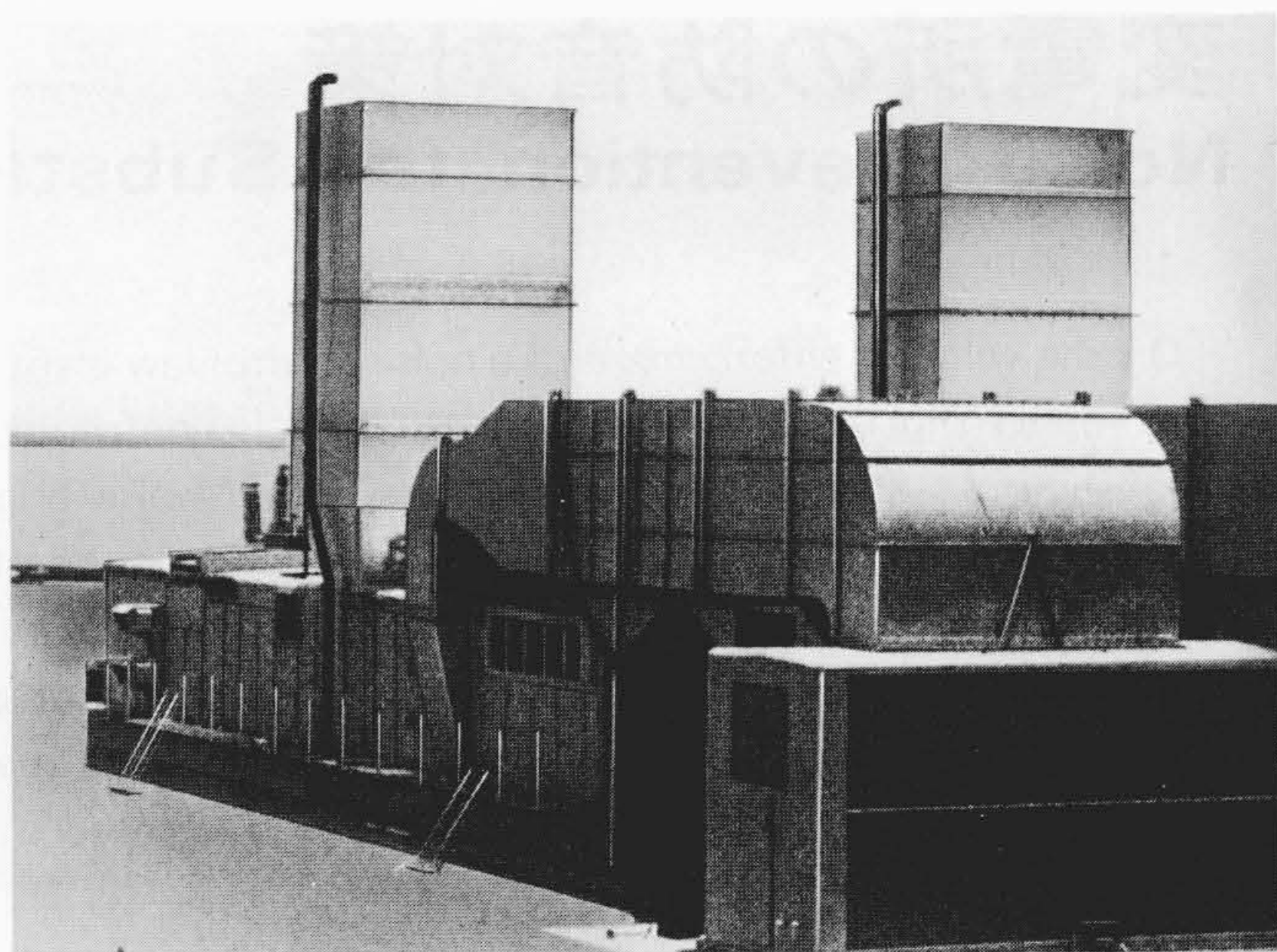


図17 25,000kW級ガスタービン外観 25,000kW級ガスタービンに標準のサイレンサを取り付けた外観を示す。

Fig.17 25,000kW Class Gas Turbine Package Power Plant

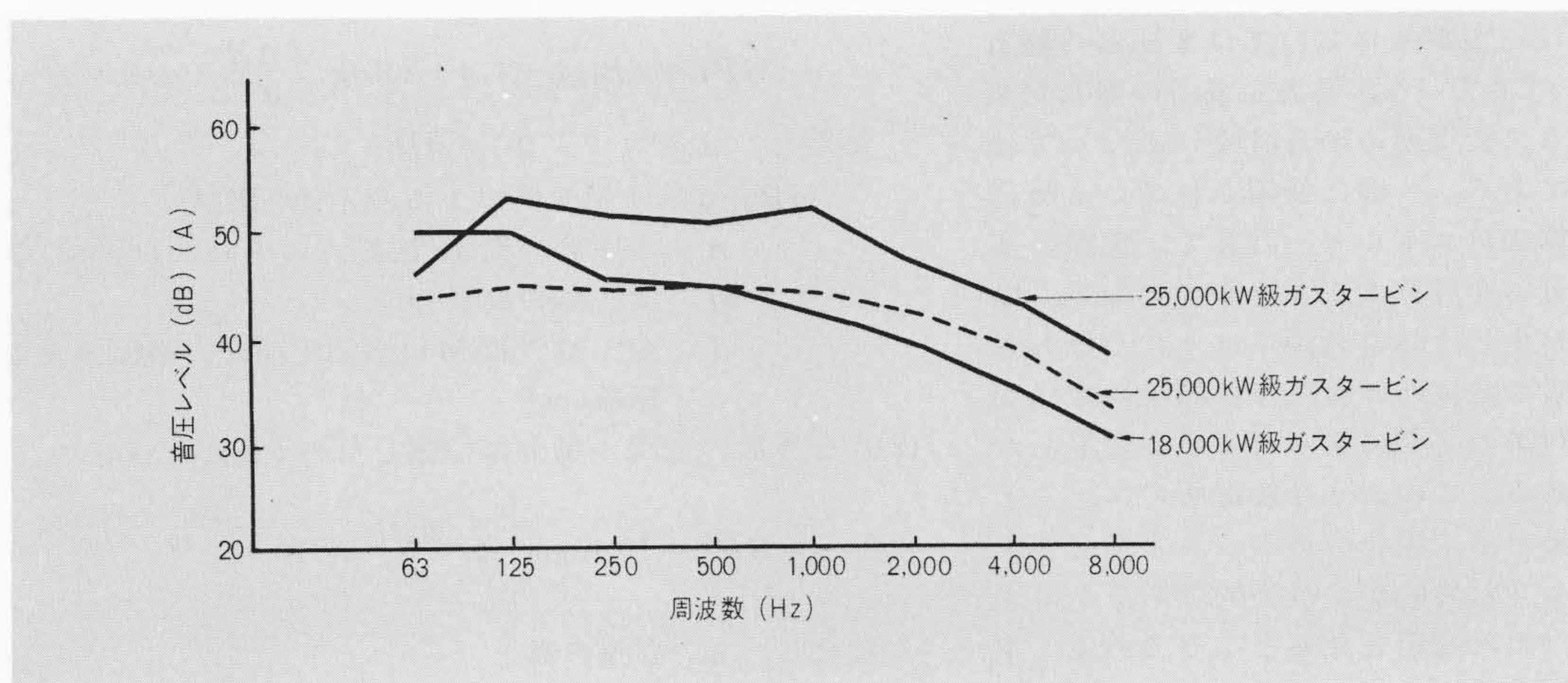


図18 ガスタービン騒音レベル 実線で示される騒音レベルは図17および図18に示すガスタービンより120m離れた位置での騒音性能で、点線で示される騒音レベルは最新のサイレンサを取り付けたガスタービンの騒音性能を示す。

Fig.18 Sound Pressure Level for Gas Turbine Package Power Plant

り構成されており、吸気部よりタービンパッケージ回り、および発電機パッケージ回りに設立されるもので、しゃ音効果は著しく大きい。図15は一例としてしゃ音壁を施した70,000kWガスタービンの外観図を示すものである。なお本ガスタービンは、しゃ音板はもちろん排気出口にも反射板を取り付け騒音が住居地域に及ばないよう細かい考慮が払われており、騒音レベルはNEMA“C”程度と非常に低くなっている。

6 実施例

図16および図17は標準のサイレンサを取り付けたガスタービンの外観を、図18はこれから120m離れた位置での騒音性能を示すものである。現地実測結果では両者とも予想どおりの低騒音レベルを示し十分顧客の要求を満たしている。なお吸排気サイレンサにはいずれも前述したパラレル・バッフル形を使用している。図18中に標準機種25,000kW級の最新サイレの低騒音レベルを示し十分顧客の要求を満たしている。なお吸排気サイレンサにはいずれも前述したパラレル・バッフル形を使用している。図18中に標準機種25,000kW級最新サイレ

7 結 言

以上、騒音対策についての基本的事項および日立-GEガス

タービンの実施例について述べたが、騒音規制は今後ますますきびしくなる傾向にあり、さらに大形化による音響出力レベルの増大化を抑制する必要も生じており、これらに対処すべき問題点が多い。しかし、日立-GEガスタービンにおいてはこれらの問題点を含めて完全防音の開発を着実に進めており、一部実施の段階に移している。

最後にわれわれが防音技術の確立を図るにあたっては、単に防音の完全化をめざすという技術的な面だけでなくさらに実施上の経済性をも考慮して開発を進めていることを付記しておきたい。

参考文献

- (1) 樗木：日立評論，51，78（昭44-3）
- (2) NEMA：Gas Turbine and Its Reduction，SM33.1964
- (3) E. J. Rathe：Note on Two Common Problems of Sound Propagation., J. Sound Vib. 10, 472 (1972)
- (4) R. J. Wells, R. B. Tatge：Journal of Engineering for Power (Oct. 1971)
- (5) 日本音響材料協会編：建築音響工学ハンドブック 366（昭38-6 技報堂）