

変電所の防音対策

Noise Prevention for Substation Transformers

On the verge of enforcement of a noise control law instituted four years ago will be enforced shortly, almost every substation is confronted with the problem of establishing an adequate method of preventing noise originating from its transformers. And for transformer manufacturers completion of a design of noise-free transformers has become a task to be accomplished at all costs. This article introduces the calculation method of noise distribution at substations and some of the problems concerning prevention of transformer noise at existing substations.

土屋 敦* Tōru Tsuchiya

仰木義郎* Yoshirō Odgi

野田健裕** Kenyū Noda

堀 康郎*** Yasurō Hori

1 緒 言

「騒音規制法」が制定され、変電所においては変圧器の騒音対策は不可欠な問題となってきた。現状変電所の騒音対策には次のような問題がある。変電所の防音計画にあたってはまず騒音分布計算が必要である。一般に使用されている騒音の距離による減衰量の計算式はエネルギー計算で、実際の変電所のように山谷のある分布を計算することができない。場所によっては大きな誤差が生じ、防音計画にはそれだけ大きな裕度が必要である。既設の変電所においては環境の変化などによって変圧器の騒音対策の必要に迫られている変電所が多く存在していることである。このような変電所では、ちょっとした対策で意外な効果を示す場合もあるし、またどのような騒音対策をすれば、より効果的かつ経済的であるかは過去における事例が少ないために問題となるところである。本稿は変電所の騒音対策を行なうにあたり、重要となる上記の点に関し、現状の問題点と具体例を中心に述べて参考に供するものである。

2 変電所の騒音分布計算

変圧器の防音対策を行なうには、境界線上の騒音値が「騒音規制法」の規制値を満足するように変電所の騒音分布計算を行ない、変圧器の騒音レベルや設置位置を決定しなければならない。変電所の騒音分布を計算する方法としては、建屋の反射や変圧器の指向性などを考慮しないで騒音エネルギーを合成するものがほとんどである。

点音源より半無限空間に音が広がるとして導き出されたものに(1)式がある⁽¹⁾。

$$SPL = PWL + 10 \log \frac{1}{2\pi r^2} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 SPL ：観測点の音圧レベル(dB)

PWL ：音源のパワーレベル(dB)

r ：音源と観測点との距離(m)

音源が空間に広がりのある変圧器の場合JEM-1117の規格⁽²⁾による騒音測定値を PWL の代わりに使用できるようにするために(1)式を変形した式として(2)式がある⁽³⁾。

$$SPL = dB_{JEM} - 4.4 + 20 \log \frac{\sqrt{AH}}{d} \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 $d \geq (1.7 \sim 2) \sqrt{AH}$

dB_{JEM} ：JEM規格による測定値(dB(A))

A ：変圧器の横幅(観測点の方向からの幅)(m)

H ：変圧器の高さ(m)

d ：変圧器のJEM規格測定面から観測点までの距離(m)

(2)式を多数の音源の場合に拡張したのが(3)式である⁽⁴⁾。

$$SPL = 10 \log_{10} \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{A_i H_i}{d_i^2} \cdot 10^{\left(\frac{dB_{JEM_i} - 4.4}{10} \right)} \right\} \dots\dots(3)$$

ただし、 n ：音源の数

A_i ： i 番めの変圧器の観測点方向からみた幅(m)

H_i ： i 番めの変圧器の観測点方向からみた高さ(m)

d_i ： i 番めの変圧器のJEM規格測定面と観測点との距離(m)

dB_{JEM_i} ： i 番めの変圧器のJEM規格による騒音値(dB(A))

図1は(3)式を実際の変電所に適用した場合の計算と実測の距離特性を示したものである。両者を比較するとかなりよく合っていることがわかる。しかしこの計算方法では、平均的騒音分布としてはよく一致するが、境界線上における複雑な騒音分布を正確に計算することはできない。実際の境界線上の騒音分布は、図3で説明するように大きな山谷が存在するのが普通であり、(3)式の計算方法では山となる部分の騒音値としては5ホン(A)程度の誤差がでることがある。それだけ防音設計に裕度が必要となる。図1に示した変電所の例では全周870mに及ぶ大きなものであるため、変電所本館、民家などの反射もほとんど問題にならない。一方、敷地の狭い配電用変電所では変圧器と本館建屋および民家ならびに隣接する変圧器との距離も近く、反射を無視できないだけでなく、(2)式の条件も成立しない場合もあり、誤差が大きくなる。このような場合には建屋の反射を考える必要が出てくる。建屋の反射および変圧器の指向性ならびに位相を考慮したものとして

*中部電力株式会社 **日立製作所国分工場 ***日立製作所日立研究所

(4)式を開発した⁽⁵⁾。

$$P(t) = \sum_{i=1}^n \frac{Ai(\theta_i) e^{j[\omega t - \beta \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} + \Phi_i(\theta_i)]}}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \quad \dots\dots(4)$$

ただし、 $P(t)$ ：観測点の音圧(μbar)

$Ai(\theta_i)$ ： i 番めの音源の指向性($\mu\text{bar}\cdot\text{m}$)

$\Phi_i(\theta_i)$ ： i 番めの音源の位相特性(rad)

x_i, y_i, z_i ：観測点と音源との距離を示す x, y, z 成分(m)

図2は(4)式の音源の採り方を示すものである。反射については音源のイメージを採り、反射面の大きさ、位置によりイメージの存在範囲を定める。境界線上No.30の点については直接音源 I_1, I_2 およびイメージ音源 I_3, I_4, I_5 が存在し計算対象となる。図3の計算と実測の比較からわかるようにかなりよく一致している。(4)式を使用する場合、問題点の一

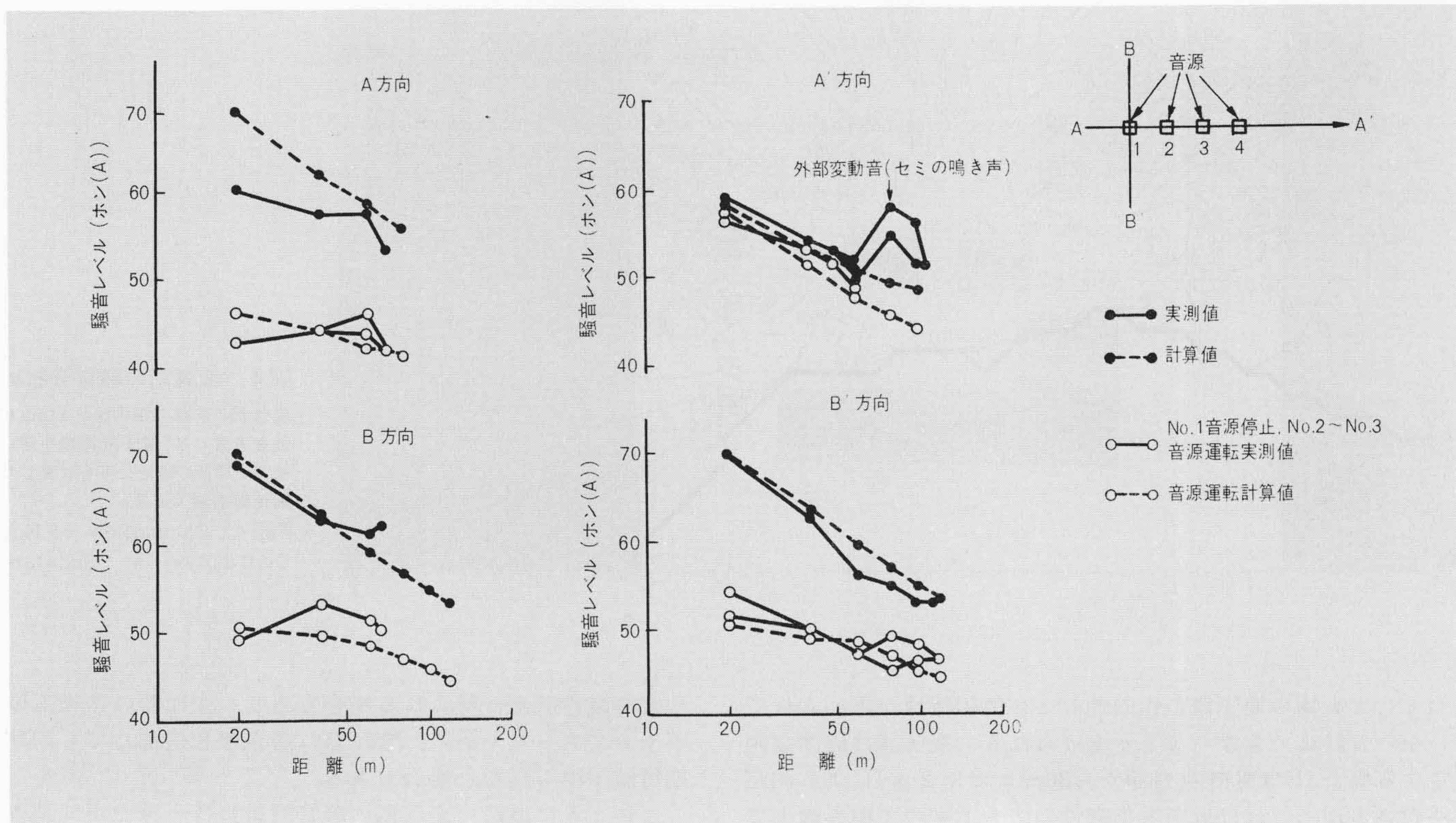


図1 変電所の騒音距離特性 変圧器が4台ある変電所の騒音距離特性について、(3)式による計算値と実測値の比較を示したものである。

Fig. 1 Noise Distance Characteristics of Substation

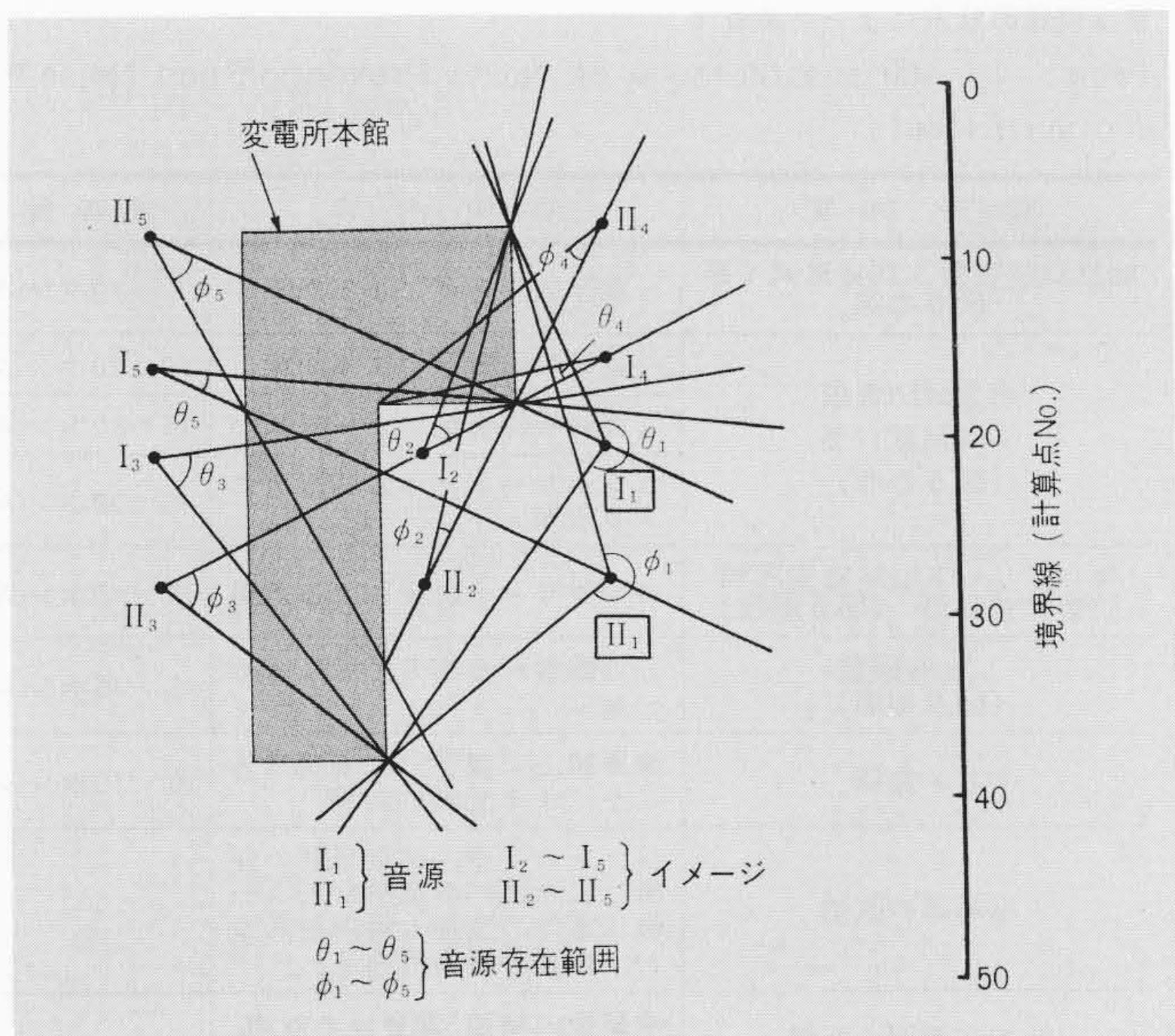


図2 音源とイメージの配置 反射面がある場合の騒音分布計算を行なうためのイメージ音源の取り方を示すものである。

Fig. 2 Arrangement of Sound Sources and Images

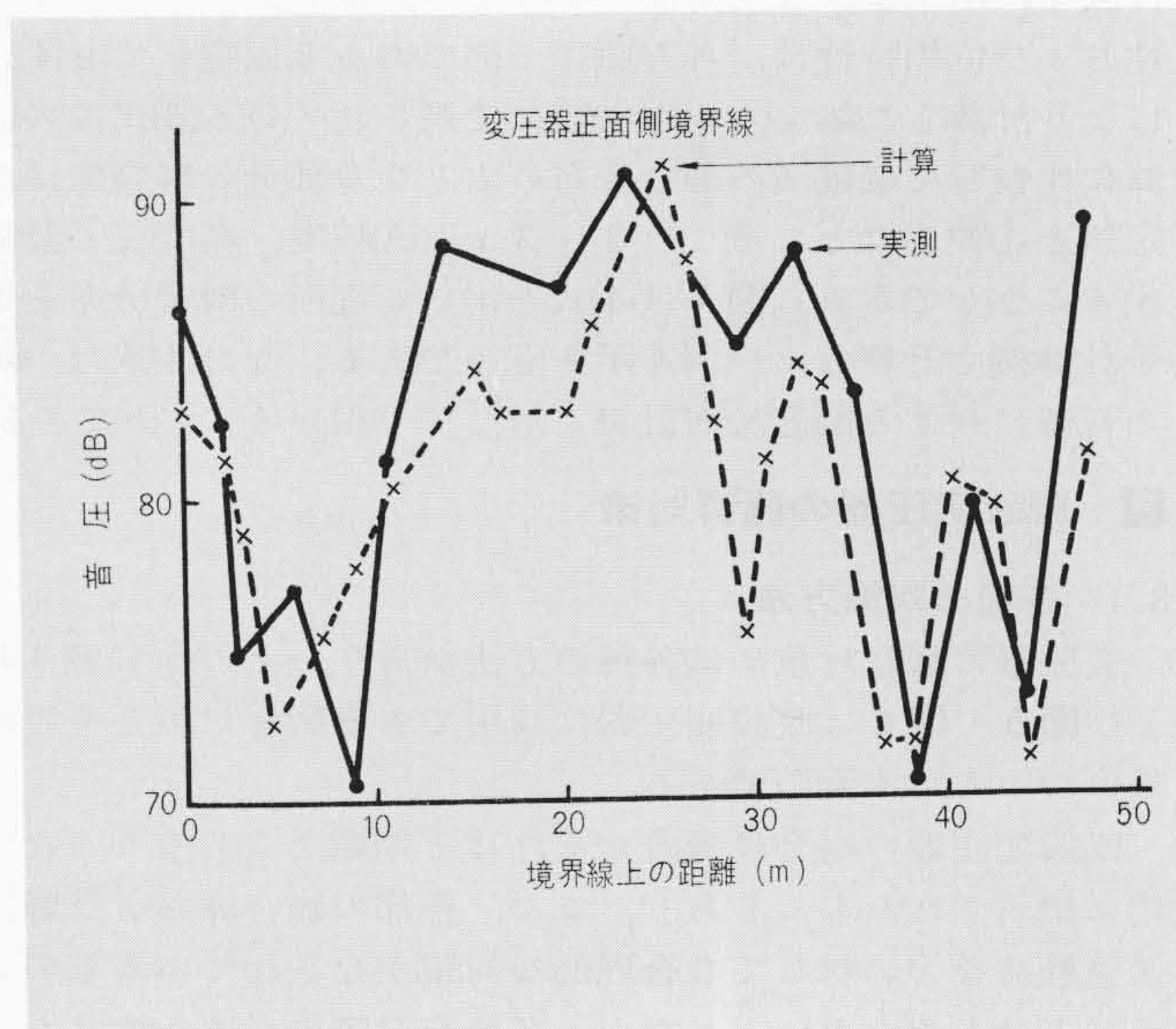


図3 計算と実測値の比較 (4)式で計算した境界線上の騒音値と実測値の比較を示したものである。

Fig. 3 Comparison of Calculated and Measured Values

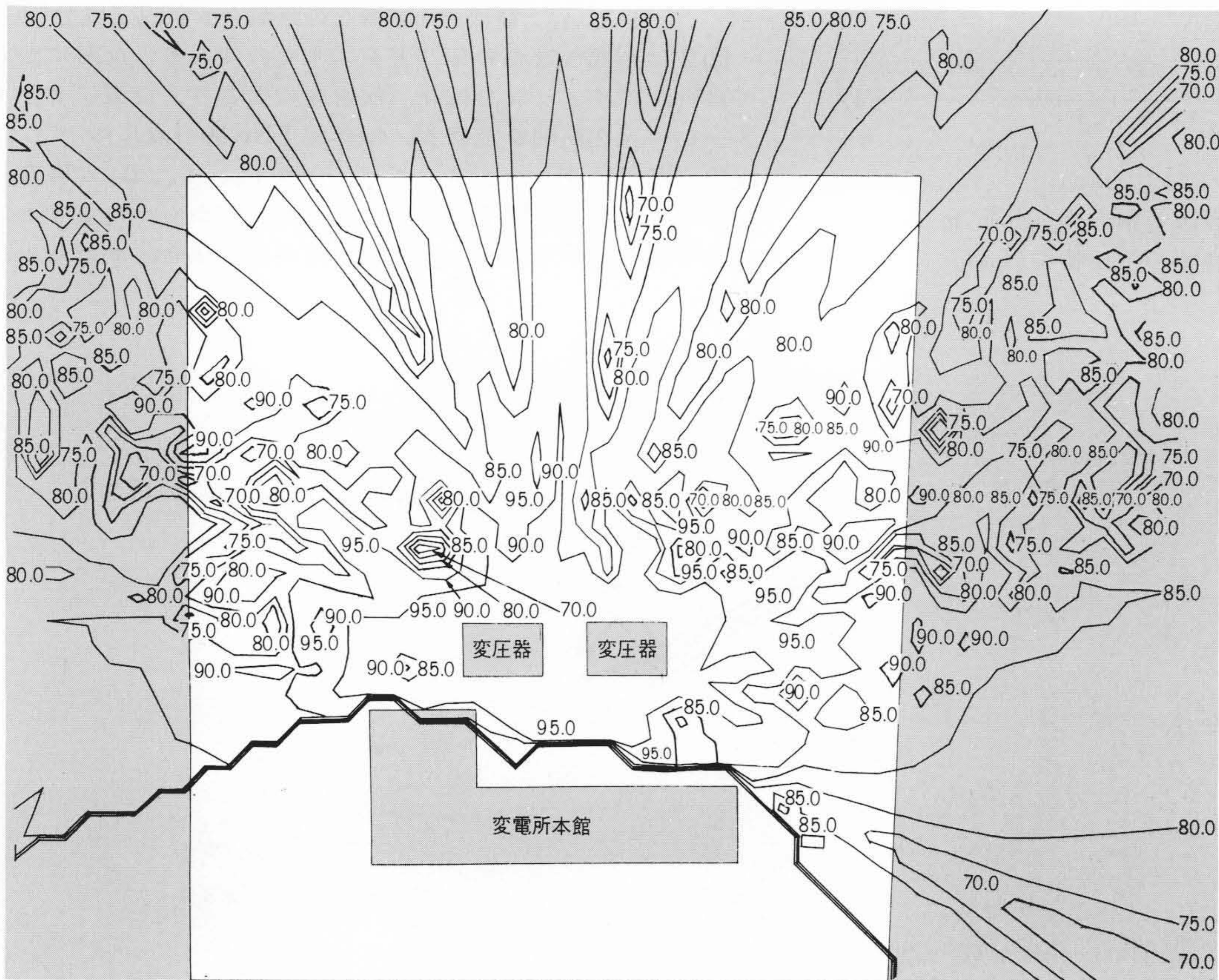


図4 変電所の騒音分布計算
反射面と音源の指向性および位相特性を考慮して、電子計算機を用い(4)式で変電所の騒音分布を計算した等騒音値曲線である。
Fig.4 Calculation of Noise Distribution at Substation

つとして実物の変圧器の指向性および位相特性が求められていないと計算できないことがあげられる。変圧器の周囲を測定する場合JEM規格⁽²⁾(音源から30cmまたは2 m)による測定法があるが、これは近距離指向性の値を示すので境界線上での計算には、使用できない。(4)式に使用する変圧器の指向性としては変圧器から数十メートル離れた点で測定する必要がある。なお(3)式および(4)式の計算値で最も誤差の要因は反射の影響であり、次に指向性、位相特性の順である。たとえば図2に示すような反射面のあるとき、反射面を考慮し指向性および位相特性は、各方面に一様であると仮定しても(4)式により計算した場合、現在一般に使用されている(3)式での計算に比較して変電所の騒音分布の山となる部分の騒音値は測定値と比較したところでは2～3ホン(A)程度、精度よく計算することができる。図4は(4)式を用い変電所の騒音分布を電子計算機で計算した一例を示すものである。なお(4)式は一般の音源に対する騒音分布計算に対しても用いることができる。

3 既設変圧器の騒音対策

3.1 各種の対策方法

変圧器の騒音対策には各種の方法があり、そのうち表1および図5、図6は既設変圧器に適用できる騒音対策とその効果について示すものである。

既設変圧器の場合は騒音がそれほど問題とならなかった時代に納入されたものもあり、また、各部の騒音源および騒音伝達経路などに対しても合理的な対策がなされているものばかりとはかぎらない。したがって騒音対策の必要が生じたときには、現地を十分に調査して対策しないと思わぬ失敗をすることもあるし、意外に簡単に解決できる場合もある。たとえば冷却器の対策だけを行なうことにより、簡単に5ホン(A)

程度の騒音低減が得られる場合もあり、変圧器の基礎工事が不十分であったために、変圧器に防音壁を追加しても初期の期待値が得られない場合もある。

このように既設の変圧器の騒音対策には十分な現地調査と状況判断が重要であり、実際の対策にあたっては、その調査

表1 各種の騒音対策方法と減音量 既設の変圧器の騒音対策に適用できるとされる対策方法を示したものである。対策方法の採用可否および減音量は現地の状況によって異なる。

Table 1 Various Methods of Noise Prevention and Noise Reduction Effects

騒音対策	対策内容	減音量
組立式防音壁、防音形式Ⅰ形 (図5参照)	一重鉄板防音壁による対策	5～10ホン(A)
組立式防音壁 防音形式Ⅱ形 (図5参照)	一重鉄板防音壁による対策	10～20ホン(A)
	二重鉄板防音壁による対策	15～30ホン(A)
	コンクリートパネル防音壁による対策	15～30ホン(A)
コンクリートしゃ音変圧器 防音形式Ⅱ形 (図5参照)	コンクリート建屋による対策	25～40ホン(A)
しゃ音囲壁 (図6参照)	一方囲壁から四方囲壁による対策	5～15ホン(A)
しゃ音塀	境界線上に塀(へい)を建てることによる局部的対策	0～15ホン(A)
冷却器の改造	ファンの変更、防音風胴の採用、自冷式への変更など(一般に本体の改造と併用されるが、単独の場合もある)。	—
屋内変電所の対策	建屋壁の増強、漏音口の対策、吸音および防振処理	—
変電所敷地の拡大	特殊地形などにより騒音が問題となる地域が狭く、限られているときにその部分を買収する。	—

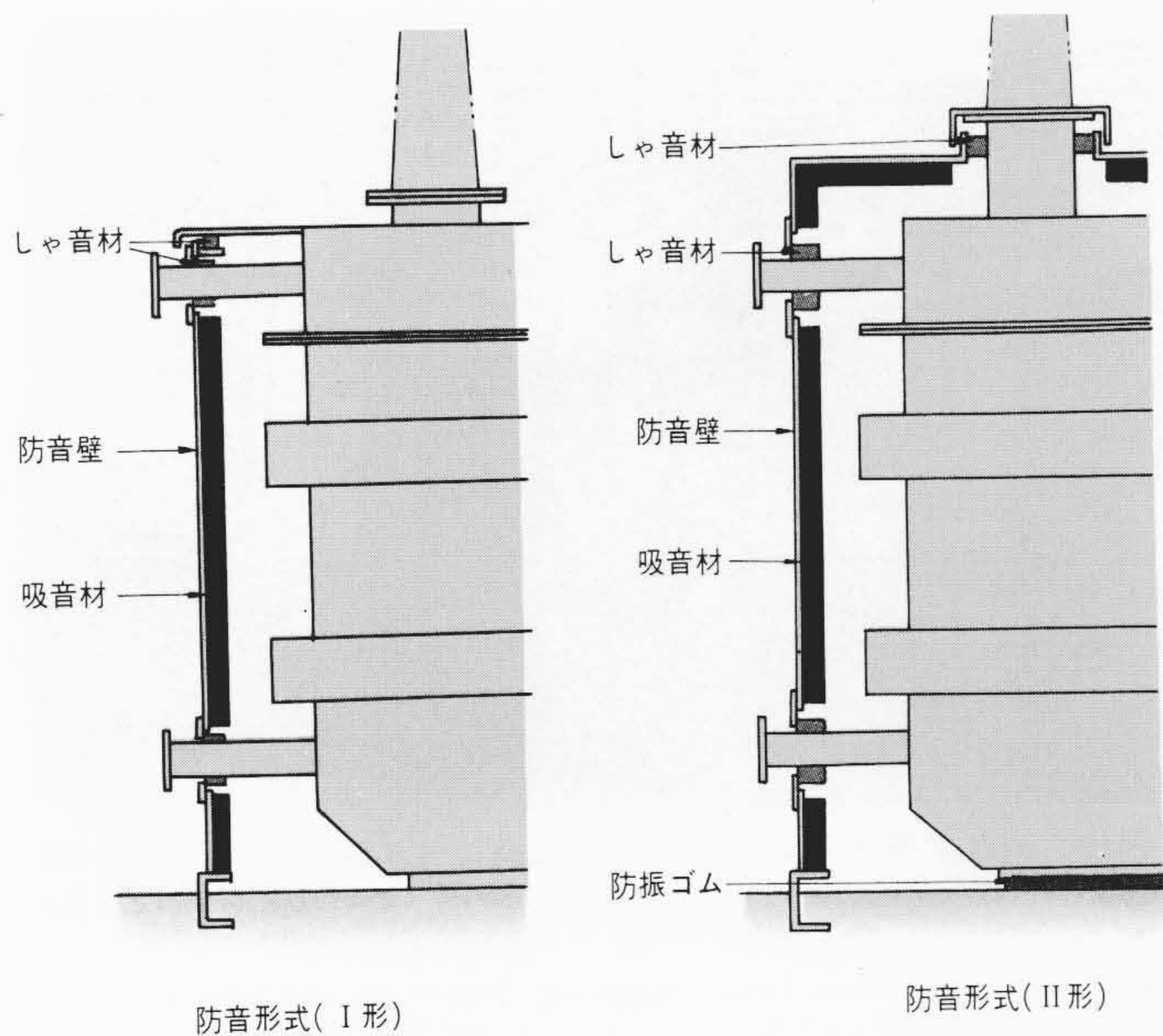


図5 低騒音変圧器構造図 変圧器の側面だけを防音する防音形式I形と、全面を防音壁でおおう防音形式II形の説明図である。
Fig. 5 Structural Diagram of Low Noise Transformer

結果に基づき、表1中から選択して対策を行なうことになるが、場合によっては平行して基礎の補強や他の音源の振動対策を行なう必要がある場合もある。具体的対策実施例については4で述べることにする。

次に既設変圧器の騒音対策としては工事期間が短く、また停電時間も短くかつ経済的なしゃ音囲壁による対策がある。これについて、その問題点と新しい試みについて紹介する。

3.2 しゃ音囲壁による対策

しゃ音囲壁は音源に対して騒音が問題となる方向に衝立（ついたて）を立てて、音波が衝立の頂部を回折する際の減衰によって、減音効果を得る方法である。

しゃ音囲壁による騒音の減音量は図7の音源Sと、受音点Pの間に壁を設置したとき、壁があるときとないときの受音点Pの騒音値の差により表わされる。その減音量を求める計算式は種々発表されているが、その中でも(5)式でNを求め、図8から減音量を求める方法が一般に用いられている⁽¹⁾。

$$N = \frac{2}{\lambda} \delta = \frac{2}{\lambda} \left\{ (A+B) - d \right\} = \frac{2}{\lambda} \left\{ \sqrt{R^2 + H^2} - R + \sqrt{D^2 + H^2} - D \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ただし、λ：音の波長

しかし変圧器の場合、まだ確実な計算方法が確立されているとはいえない。それは音源に大きさがあるためであり、また指向性や位相特性があるからである。さらに(6)式によって忠実に減音量を求めるには、変圧器騒音の周波数をオクターブまたは1/3オクターブバンド分析し、そのバンド中心周波数の波長を取ってバンドごとの減音量を求めてそれぞれ計算し、それを合成して全体の減音量を求める必要があることと、変圧器としゃ音囲壁の間の音圧上昇も考慮する必要があるのに対し、音圧上昇の影響は現代では正しく求める方法が確立されていない。最近発表された電気技術指針JEAG5001-1971⁽⁴⁾では、数件の実測例から音圧上昇を無視し、変圧器の基本波だけで、(5)式と図8から減音量を求めたほうがよいと提案している。

このようにしゃ音囲壁を変圧器に適用した場合の防音効果

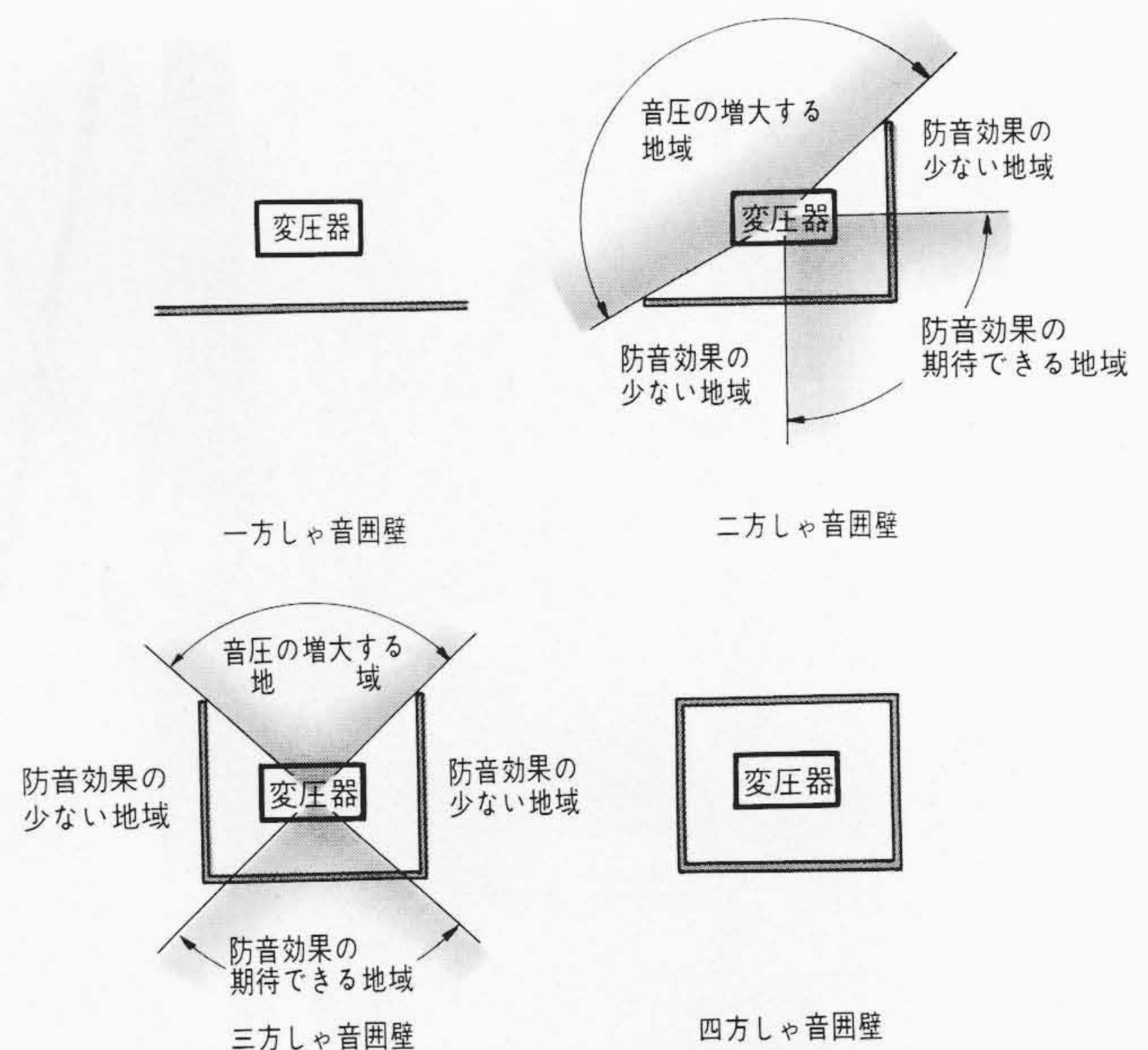


図6 各種のしゃ音囲壁 しゃ音囲壁の種類と音圧分布を示したもので(5)式と図8から求める。防音効果の数値は防音効果の期待できる地域に適用できる。
Fig. 6 Various Noise Isolating Shields

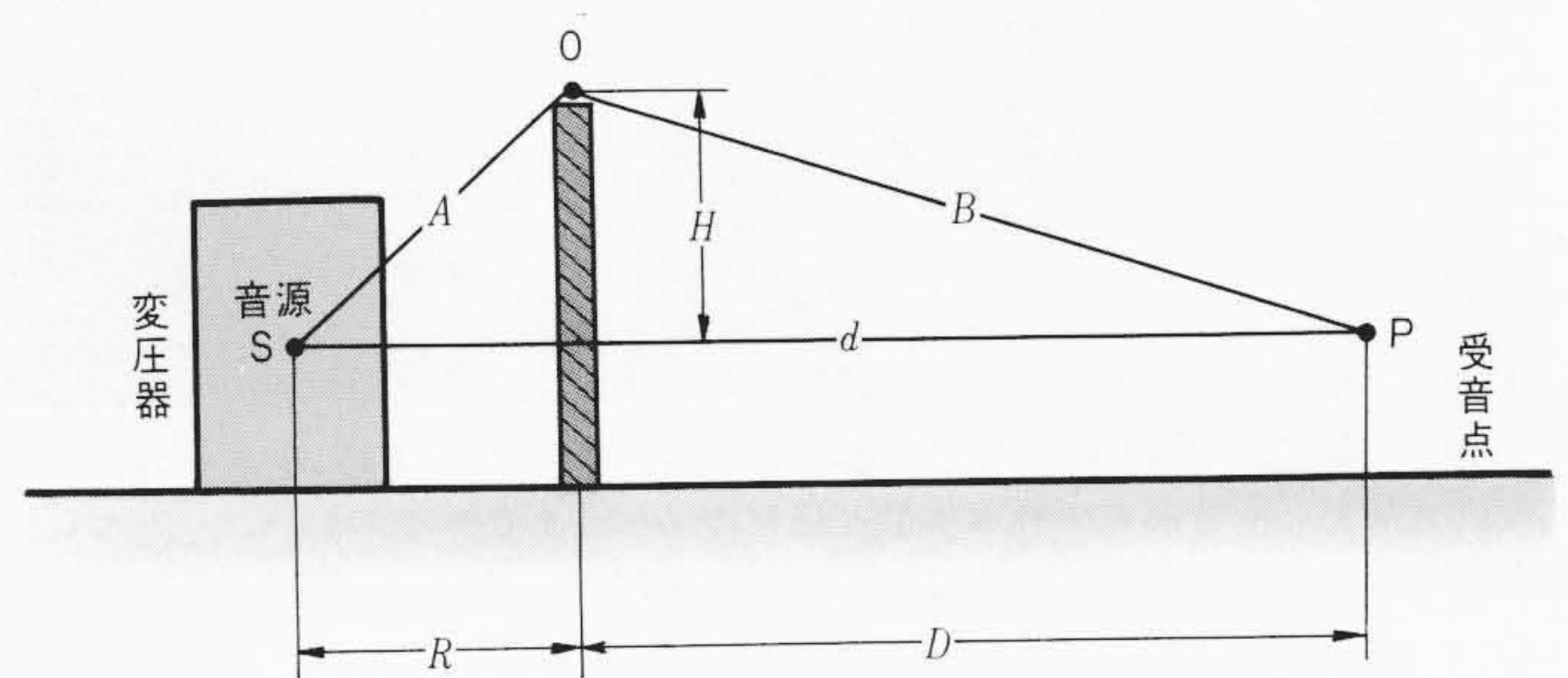


図7 しゃ音囲壁と記号 (5)式に適用する記号を示すものである。
Fig. 7 Noise Isolating Shields and Symbols

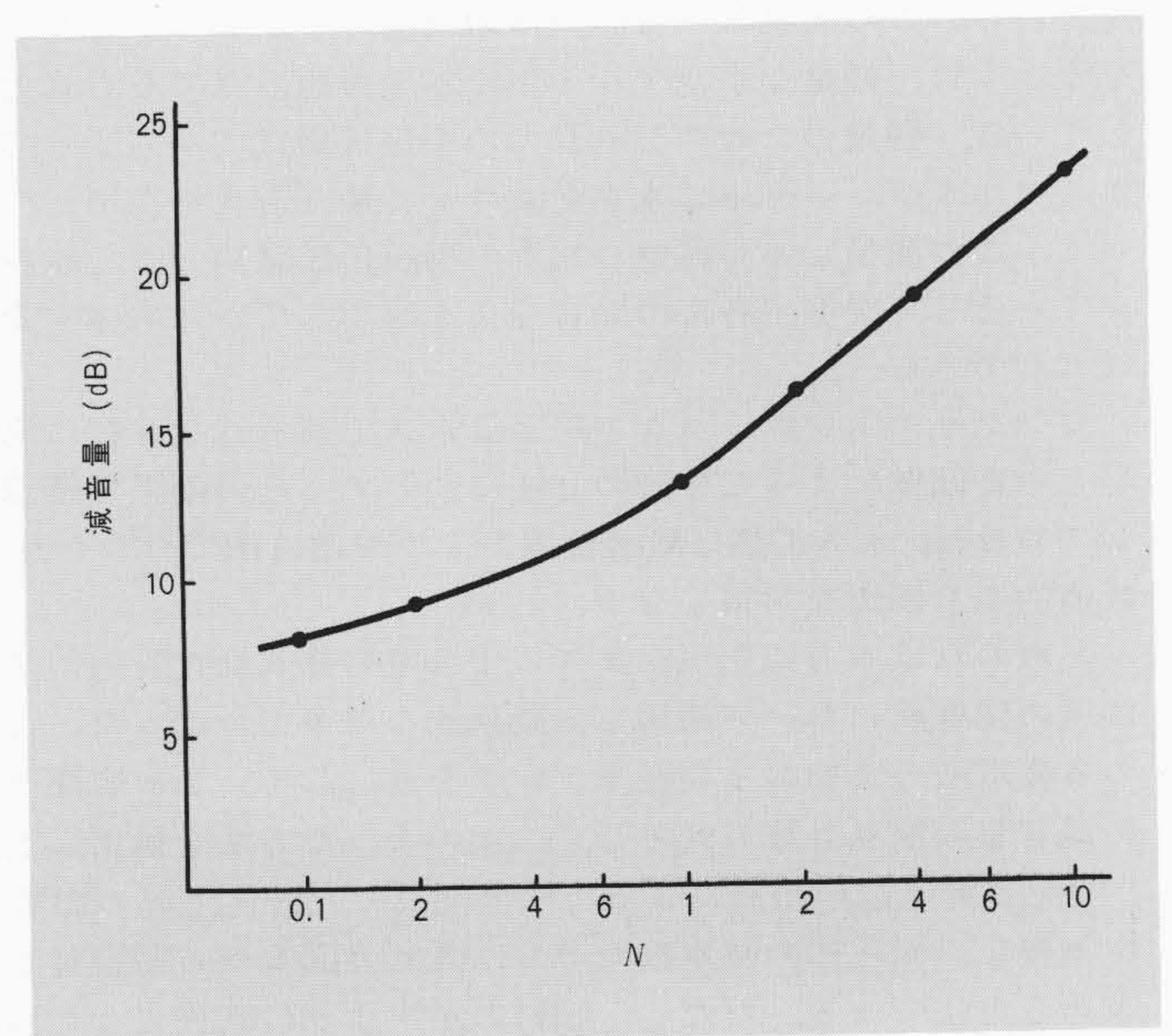


図8 しゃ音囲壁による騒音の減音量 (5)式から求めたNとしゃ音囲壁による騒音低音量との関係図である。
Fig. 8 Noise Reduction by Noise Isolating Shield

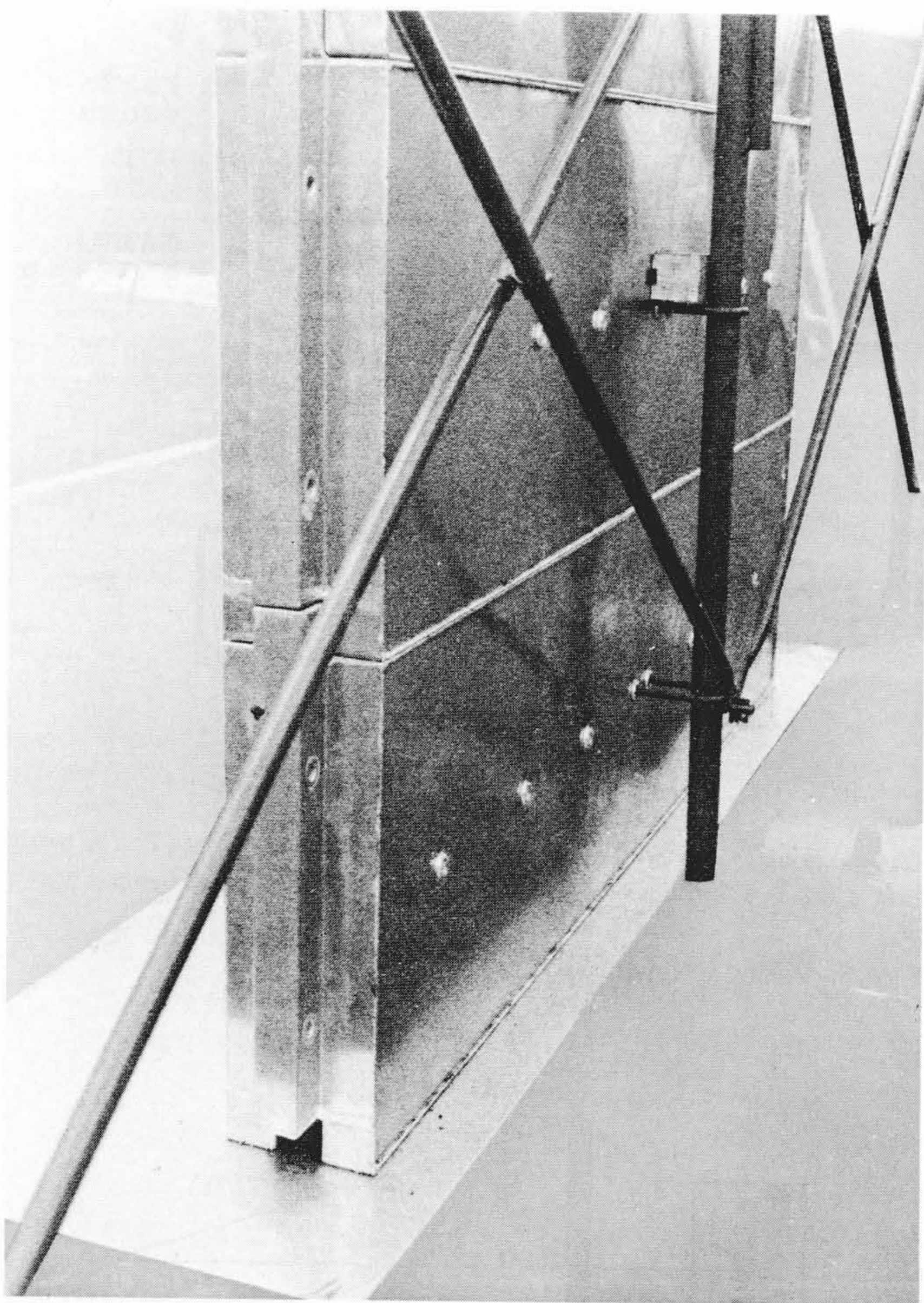


図9 組立式簡易しゃ音囲壁の単一ブロックのはめあい状況
組立式簡易しゃ音囲壁の基本単位と組立方法を示すものである。

Fig. 9 Installation of Simplified Noise Isolating Shield

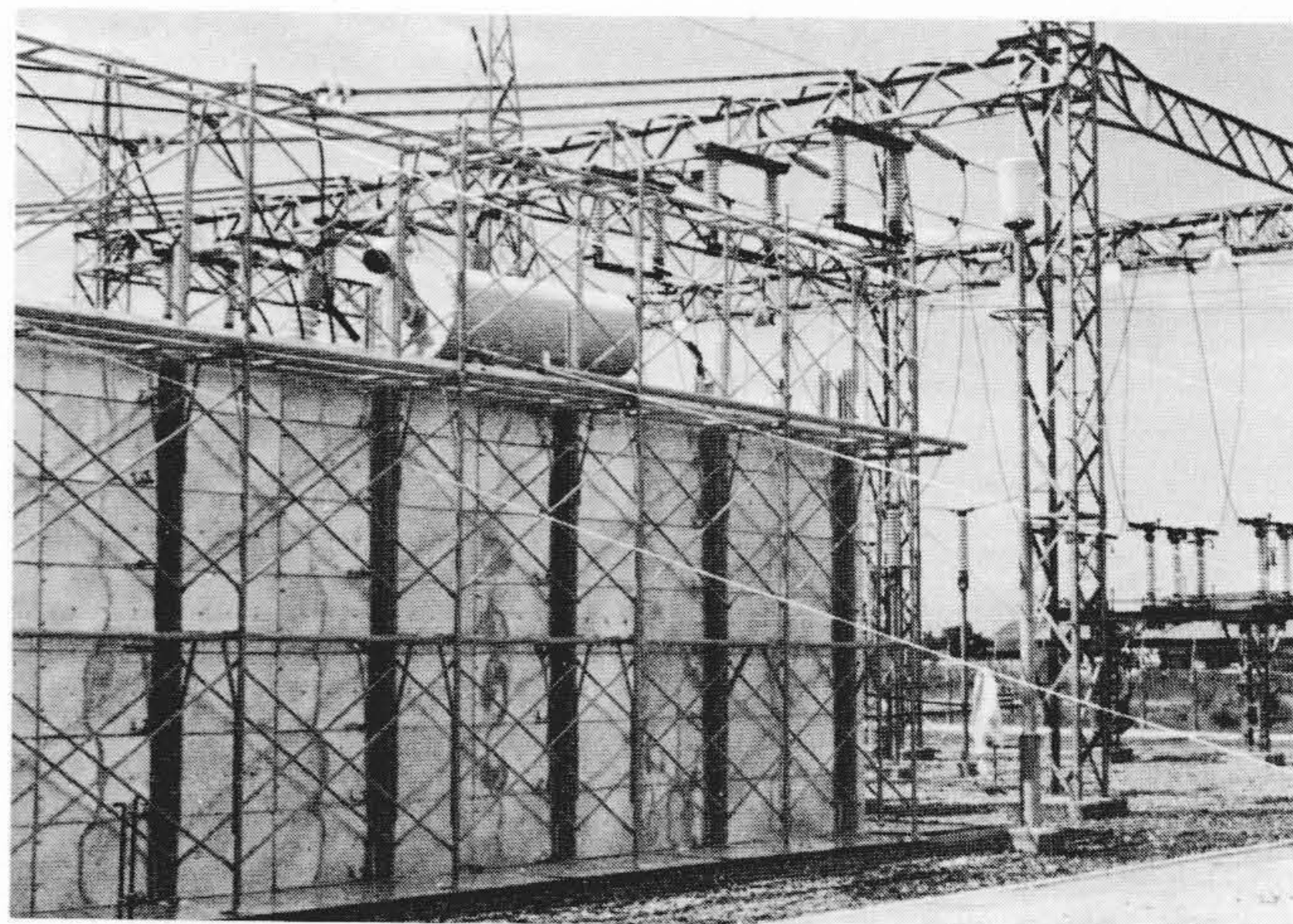


図10 組立式簡易しゃ音囲壁の完成姿 変圧器の周囲にしゃ音囲壁を設置した状況を示したもので、変圧器のコンサベータがしゃ音囲壁の上に見える。

Fig. 10 Simplified Noise Isolating Shield as Installed

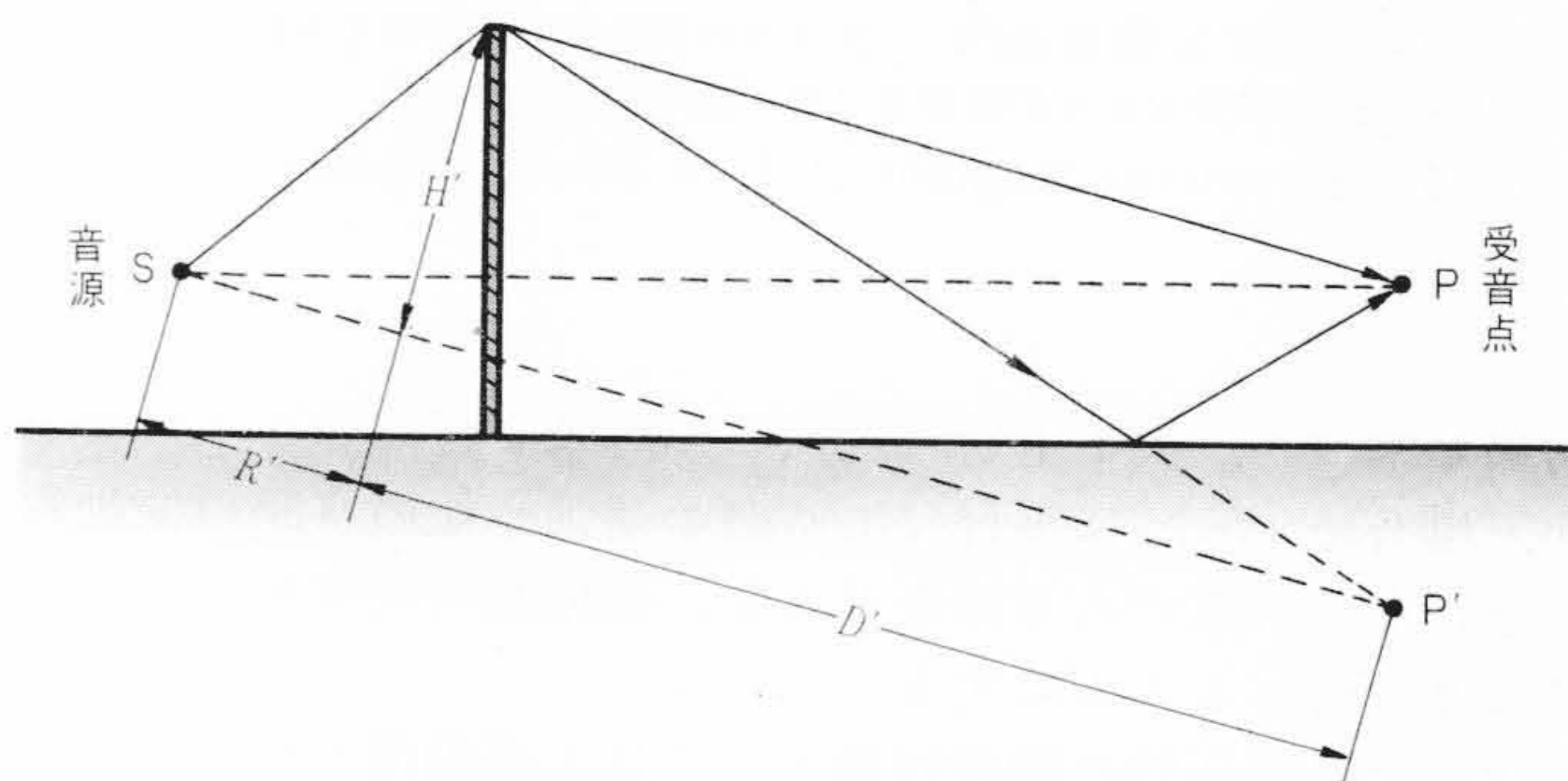


図11 しゃ音囲壁の直接音と反射音 反射音に対して(5)式を適用する場合に R' , D' , H' を適用する。

Fig. 11 Direct Sound and Reverberation by Noise Isolating Shield

に対する計算式の精度はまだ十分でないので、われわれは図9および図10に示す中空アルミブロックによる組立式簡易しゃ音囲壁を開発し、実験的事前検討方法として良好な結果を得ている。この簡易しゃ音囲壁は組立ておよび解体が容易となるように、軽量な中空アルミブロックを組み立てる方式としている。軽量のためのしゃ音力の不足は組立てが完了してからアルミブロック中に水を充満させて補う方式を採用している。この簡易しゃ音囲壁は任意の場所に任意の寸法で組み立て、そして変電所各部の騒音分布を確認してから解体することができる。

コンクリートブロックなどによる永久工事を行なう前に簡易しゃ音囲壁によって各種の寸法について、その効果を確認しておけば、永久工事は最適位置および最適寸法で行なわれ、経済的かつ確実な対策となる。

われわれは本方式を現在までに中部電力株式会社管内の7個所の変電所において適用し、効果的な対策を行なった。この各変電所の実績および従来データを基にして、しゃ音囲壁の減音量の簡易計算方式として、次のような方法を採用した。

前記の電気技術指針による方法と同じく、音圧上昇の影響を無視し、変圧器の基本波だけで、(5)式と図8から減音量を求める方法である。ただし、図11に示すように直接音と地面の反射音と二つが存在するとしてそれぞれ計算し、その和から最終減音量を求める。一般には直接音だけとして求めた結果より、1～3ホン減音量は小さくなる。ただし、ここで注

意を要することは、しゃ音囲壁の高さを変圧器カバーの高さより低くしないことである。

4 既設変圧器の騒音対策実施例

4.1 コンクリートしゃ音変圧器への改造例

A変電所は付近の民家より変圧器騒音に対する対策要望を申し込まれ、まず最初は民家付近の騒音値を45ホン(A)にすることを目標にしゃ音囲壁による対策を行ない、ほぼ満足できる結果を得た。しかし、なお引き続いて対策要望があったため、民家付近ではほとんど聞こえない程度にすることを目標にし、その騒音目標値として周囲暗騒音を考え25ホン(A)とすることになった。図12はこの変電所の配置を示したものである。音源としては、180MVA主変圧器のほかに、30MVA分路リアクトルと9MVA LRA(負荷時電圧調整器)があるが、検討の結果、主変圧器の影響が圧倒的に大きく、主変圧器を対策すればほぼ満足できるであろうとの見通しを得たので、まず主変圧器だけの対策を行なうことにした。主変圧器の減音量目標値は25ホン(A)程度でよいが、低騒音改造により、防音建屋がしゃ音囲壁の上に頭を出すため、しゃ音囲壁の効果が少なくなるので最終減音量目標値としては35ホン(A)とした。このような大きな騒音低減対策を行なうには、コンクリートしゃ音変圧器に改造するのが現状では最も確実な方法なので冷却器を送油自冷式としたコンクリートしゃ音変圧器に改造した。その結果、主変圧器の騒音値は36ホン(A)低減し、民家付近の

主変圧器 2 台の騒音値は23ホン(A)となり満足すべき結果を得た。またリアクトルを含む全運転時の民家付近の騒音値は28ホン(A)となった。これは予想していた騒音値よりも小さな値であり、110kV 引出し設備のある高台が、リアクトルに対してしゃ音効果を示したためと考えられる。この対策完了後は民家からの変圧器に対する要望は全くなくなった。なお、コンクリートしゃ音変圧器としての完成図は、**図13**に示すとおりである。建屋の基礎工事は停電せずに事前に行なうことにより、騒音対策工事による停電期間は1台あたり2ヶ月で完成することができた。

4.2 組立式防音壁による改造例

B 変電所は、約19年前に建設された古い配電用変電所であり、30MVA 変圧器2

台が設置されている。建設当時としては新しい試みである騒音対策がすでに考えられ、防音形式 I 形による低騒音変圧器が使用されている。これにより1号および2号器のJEM規格による変圧器騒音値は、それぞれ63ホン(A)、69ホン(A)になっている。なお1号器および2号器は防音壁の構造が違っている。建設時の騒音値としてはこれでよかったのであるが、その後、境界線に密接して民家が建設された結果、**図14**に示すA境界線に接している民家から変圧器音に対する対策要望が申し込まれたのである。

境界線上の騒音目標値としては、騒音条例に従って、50ホ

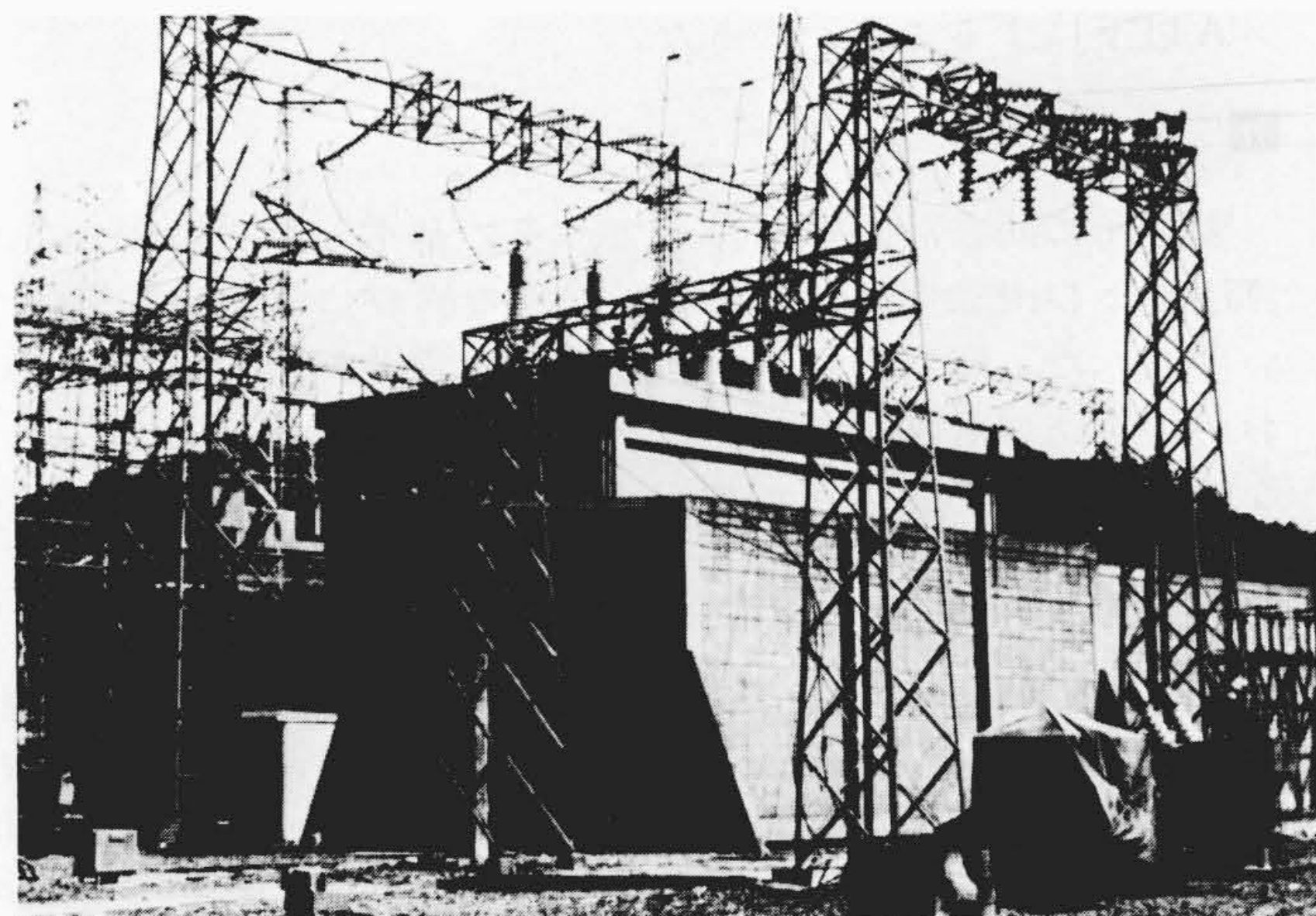


図13 コンクリートしゃ音変圧器に改造後の180MVA主変圧器
手前にコンクリートしゃ音変圧器に改造する前に騒音対策として行なったしゃ音囲壁がある。防音建屋がしゃ音囲壁より高くなり、しゃ音囲壁の防音効果は小さくなっているものと考えられる。

Fig. 13 180MVA Main Transformer Provided with Concrete Noise Isolating Shield

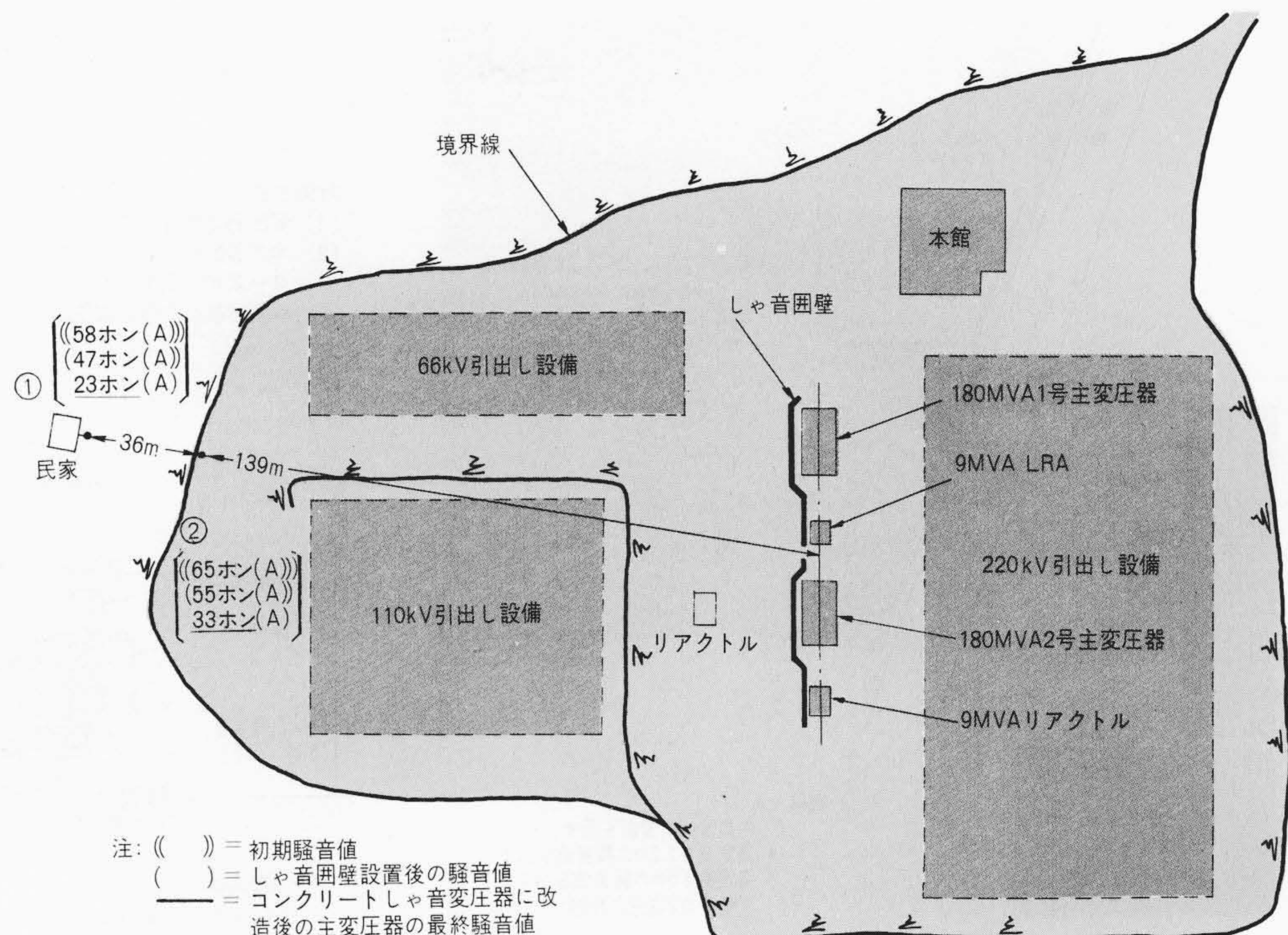


図12 変電所の配置と対策前後の騒音値 (1) 音源と問題点との位置関係および騒音低減効果を示すものである。

Fig. 12 Location of Substation and Noise Values Before and After Noise Prevention (1)

ン(A)以下にすることになった。変電所の騒音分布としては、**図14**に示すように、三方向について大きく、騒音低減量としては、11ホン(A)以上必要である。また、すでに防音形式をI形としているので、変圧器のカバー上から放射される騒音が主として対象となる。したがって、防音形式I形のままで変圧器本体で再対策すること、あるいはこれにしゃ音囲壁を加える方法などでは効果が小さく十分な対策にならないと推定された。

以上の検討により、防音形式をII形に変更し、一重鉄板防音壁による対策を行なうことにした結果、境界線上の騒音値

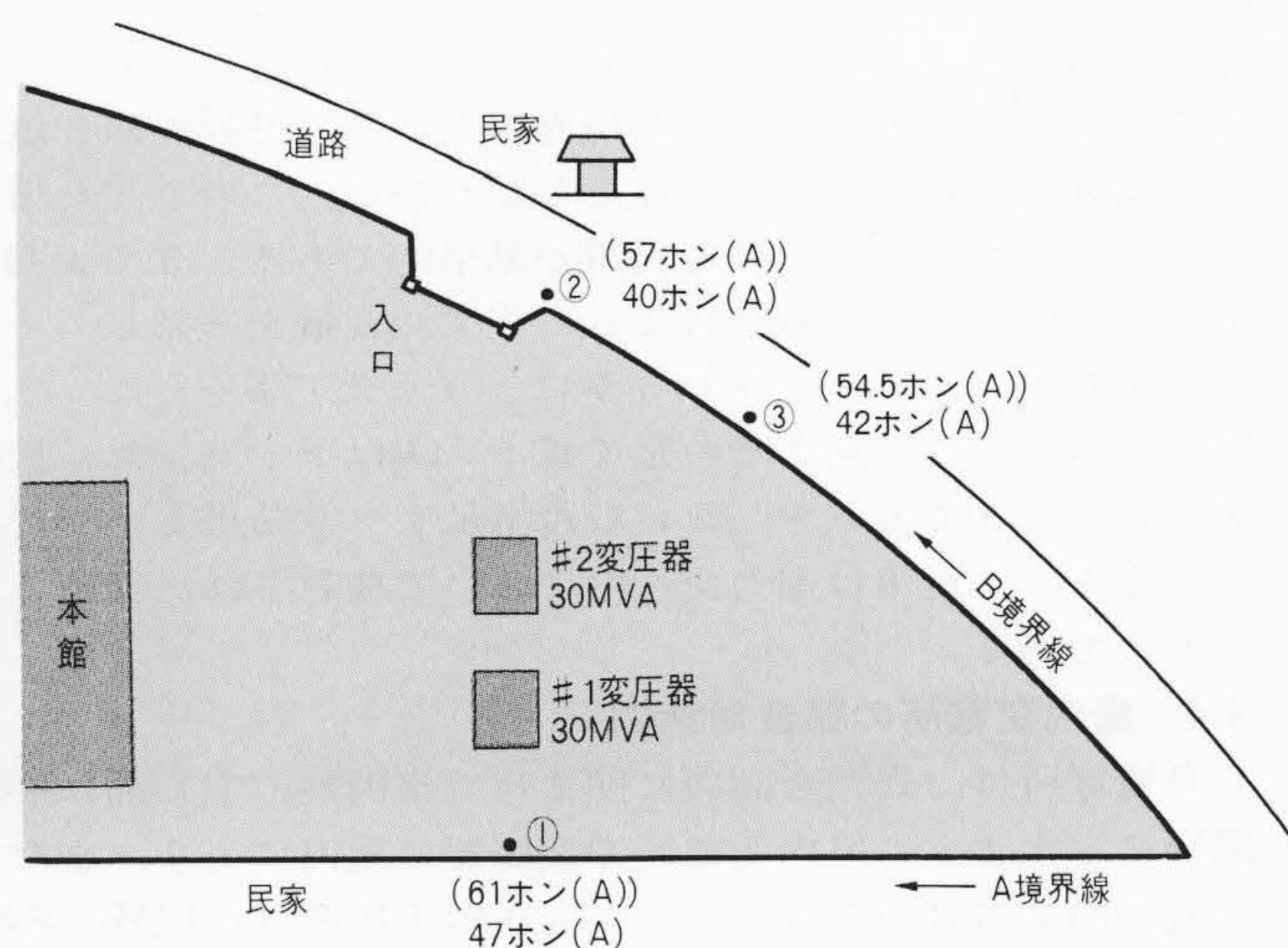


図14 変電所の配置と対策前後の騒音値 (2) 組立式防音壁、防音形式II形による対策例である。

Fig. 14 Location of Substation and Noise Values Before and After Noise Prevention (2)

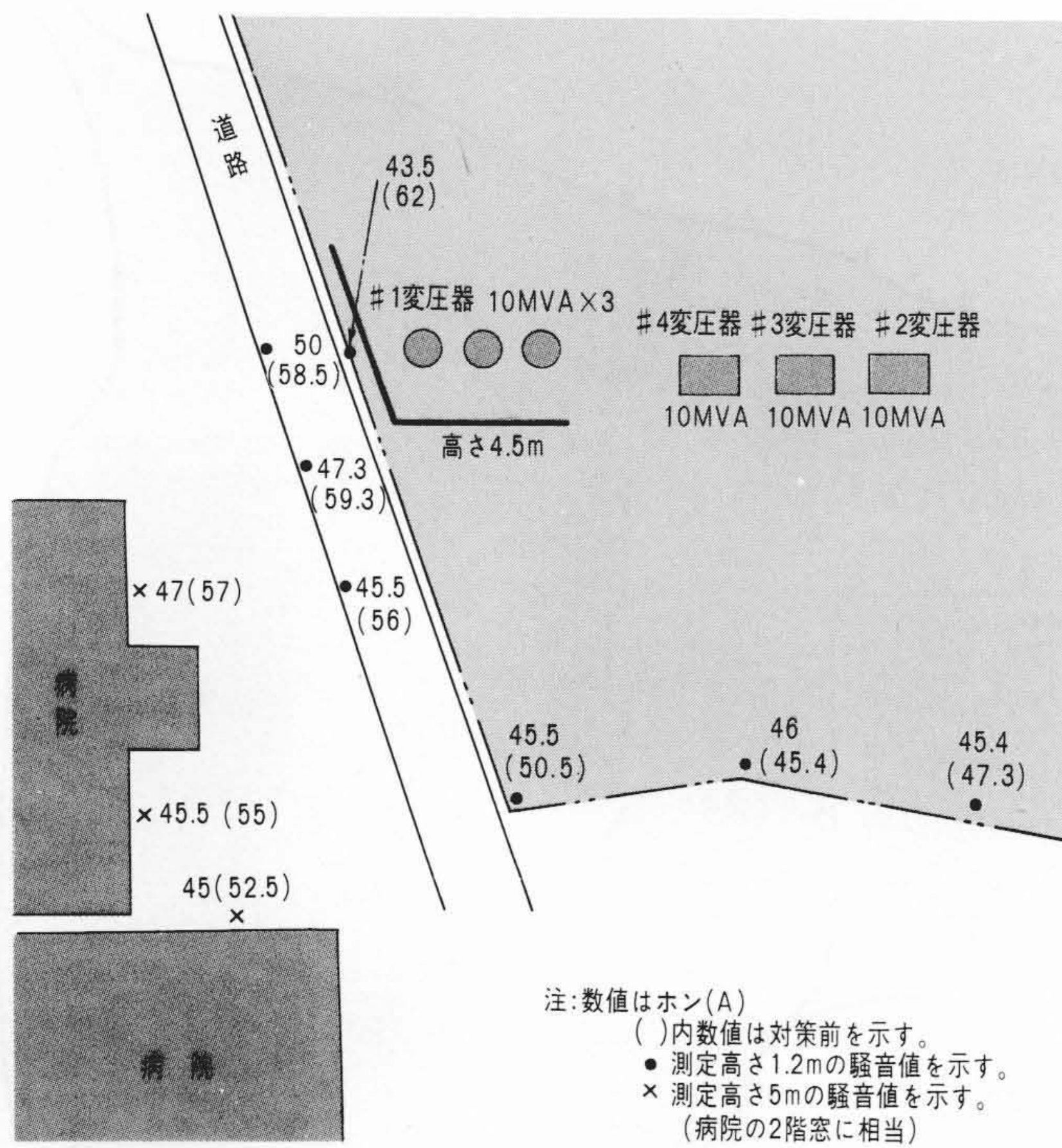


図15 変電所の配置と対策前後の騒音値 (3) シャ音囲壁による騒音対策実施例である。

Fig. 15 Location of Substation and Noise Values Before and After Noise Prevention (3)

を50ホン(A)以下にすることができた。工場で防音壁および新たに製作して交換する変圧器カバーを製作して現地に持ち込み、1台あたり停電期間約20日間で改造することができた。

4.3 シャ音囲壁による騒音対策例

図15に示すC変電所も一般の配電用変電所であり、2～4号変圧器は最近設置された低騒音変圧器である。1号変圧器は古いもので騒音値が高く、しかも境界線に近く、騒音が問題となる病院に対しても影響を与えている。付近住民や病院側から特に対策依頼を受けたわけではないが、境界線上および病院付近の騒音値が高いので、電力会社独自の考えから対策を行なうことになったものである。図15は変電所の配置と騒音測定結果を示すものである。これから騒音源としては1号変圧器だけとみられ、特に病院側の境界線近くに偏して配置されていることから、その境界線上と病院付近の騒音値を規制基準以上に高くしていることがわかる。このような場合にはシャ音囲壁による防音対策が効果的である。3で説明した組立式簡易シャ音囲壁によってまず減音量を確認し、その後、軽量コンクリートブロックにより永久工事を行なった。騒音対策結果は病院2階の窓で47ホン(A)以下であった。目標値は45ホン(A)であるが、おおむね満足すべき結果といえることができる。本対策は電力会社内において検討され、実施されたものである。

4.4 屋内変電所の騒音対策例

D変電所は、周囲を商店に囲まれた市街地の中心部にある。図16に示すように屋内変電所で変圧器は屋内にあり、また自冷式の冷却器は油配管によって変圧器と接続され屋外にある。付近の商店などから変圧器音の対策依頼があり、境界線上の騒音値を45ホン(A)以下にする必要が生じたものである。屋外の音は明らかに変圧器音であり、120,240,360,480Hzが主成分である。また変圧器室の壁ぎわの騒音値が、80ホン(A)弱で

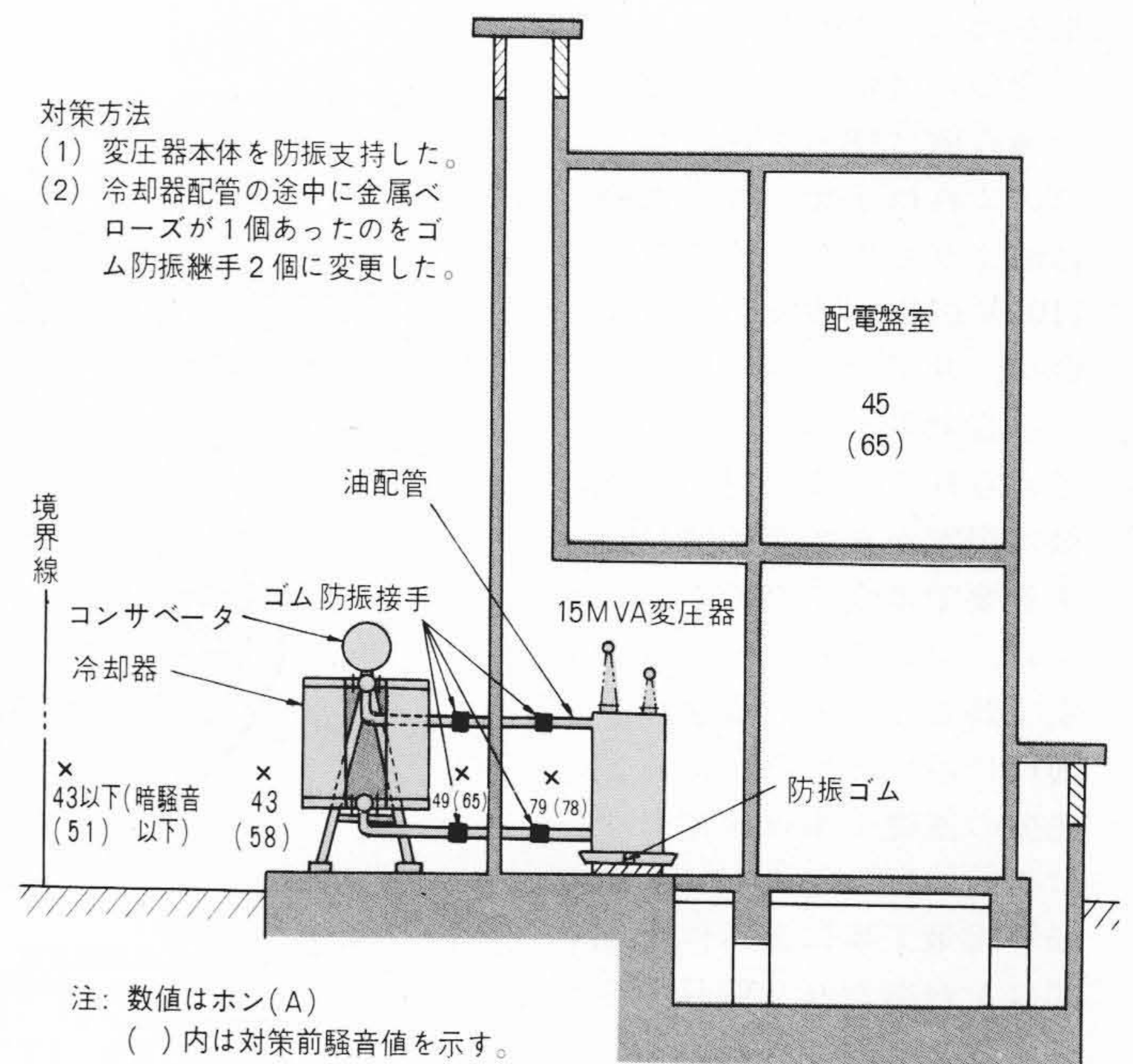


図16 変電所の配置と対策前後の騒音値 (4) 屋内変電所の対策方法と防音効果の例を示すものである。

Fig. 16 Location of Substation and Noise Values Before and After Noise Prevention (4)

あるのに屋外の壁付近の騒音値は65ホン(A)で、コンクリート壁の、みかけのシャ音力は約15ホン(A)と実際の壁のシャ音力40ホン(A)程度に対して非常に低い、このみかけのシャ音力が非常に低くなっている原因について対策すれば満足できる結果が得られるものとの考えから、その原因について調査した。その結果、次の振動伝搬経路に問題があることが判明した。

- (1) 変圧器支持基礎から建屋への振動伝達
- (2) 冷却器油配管から冷却器への振動伝達

この調査結果に従って、変圧器本体を基礎から防振支持することおよび冷却器配管の途中にゴム防振継手をそう入する対策を行ない、境界線上の騒音値を暗騒音よりも小さい43ホン(A)以下にすることができた。

5 結 言

変電所の防音計画にあたって、その基本となる騒音分布計算法および既設変圧器の騒音対策法ならびにその実施例について述べた。騒音規制法が本格的に運営され、どの変電所においても防音計画および対策が必要になってきた。このような時期に本稿がいささかでも役だてば幸いである。

参考文献

- (1) 日本音響材料協会編：騒音対策ハンドブック、(昭41-12、技報堂)
- (2) 日本電機工業会規格、JEM-1117、変圧器の騒音レベル測定法
- (3) M. W. Shuly, R. J. Ringlee: Some Characteristics of Audible Noise of Power Transformers and Their Relationship to Audibility Criteria and Noise Ordinance, Tr. of AIEE, 316, June 1960.
- (4) 電気技術基準調査委員会編：発電変電所等における騒音防止対策指針、(昭46-12、日本電気協会)
- (5) 堀：変電所騒音分布の計算、昭和45年電気四学会東海支部連合大会講演予稿、20P-E-6.