

変圧器の騒音防止

阿部 春雄* 平野 三百里**

The Noise Prevention of Transformers

By Haruo Abe and Mihori Hirano

Hitachi Works, Hitachi, Ltd.

Abstract

The problem of noise prevention for transformers is acquiring importance in this country as many a city tends to have the fairly large capacity substation erected at its center area.

The prevention of noise in this case must be effected comprehensively. In other words, the countermeasure needs to be taken not alone for the transformer but also for accessory equipment and the station building which houses them all. In the first place, transformer constituting the source of vibration should be designed to be free from vibration as much as possible, and the surroundings of the transformer should be of such a construction that absorbs, abates, and isolates any vibration produced by the transformer most effectively.

Lately Hitachi designed and built two sets of 30,000 kVA main transformers for Tokyo Electric Power Co. for the service at the Hibiya Substation. In these transformers special care has been exercised in phase of mechanical design, in diminishing the magnetic flux density, in adoption of a special vibration-preventive construction. The location test carried out recently proved the success of the above ideas, as partly seen from the vibration wave form in oscillograms given in Figs. 10 and 11.

〔I〕 緒 言

人口の増加と都市への集中により、需要電力は急激に増加し、円滑な電力供給のため、変電施設は都心附近へ進出し、又据付機器は大型となつてきた。従つて、それ等施設から発生する騒音は、都市の騒音問題解決の為に決して等閑視する事の出来ないものとなつた。

米国に於ては、既に NEMA 標準によつて各容量、電圧及び冷却方式の変圧器に対する騒音基準を規定しているが、本邦に於ては未だその域に至つていない。

日立製作所に於て今回、製作、納入した東京電力株式会社日比谷変電所納 30,000 kVA 主変圧器は都心の変電施設用として騒音の少い事を要求され、その低減を期し

* ** 日立製作所日立工場

て種々の対策を試み、現地に於ける実測に於て、略々満足すべき成果を得たので茲に紹介する。

〔II〕 変圧器の騒音

先ず変圧器に依つて生ずる騒音の原因、伝播に就いて概説して見よう。

変圧器に供給された交流によつて、鉄心、巻線は電磁力の変動を受けて振動する。その振動は油、外函に伝わり、変圧器の表面から、直接音響として空気中に伝播し又ベースを通して建屋、或いは附属施設に波及して、他の適当な被振動体を励振し第二次的な音響を発生させる原因となる。

変圧器内部に振動を発生させる原因の主なものを列挙して見れば次の通りである。

- (1) 鉄心の磁歪現象による内部的伸縮
- (2) 鉄心の接目に起る吸引
- (3) 巻線電流による電磁的な吸引反撥

この内(1)によつて生ずるものが変圧器騒音の主なるものである。磁歪現象に依る鉄心寸法の変化は微少ではあるが、エネルギーは大きく、高速な振動を生ずる。

変圧器鉄心に使用されている珪素鋼板の磁歪は一般に磁束の方向に対し、第1図に示すような長さの変化を起す。⁽¹⁾ この値から鉄心の磁歪振動によつて発生する音位と磁束密度或いは鉄心重量、変圧器容量等との関係について、一般的に次のような事を知る。

L = 音位の増減

S = 任意の磁束密度に於ける磁歪(長さの変化%)

S_0 = 基準の磁束密度に於ける磁歪(長さの変化%)

W = 鉄心重量

l = 鉄心の長さ

(kVA) = 変圧器出力

K_1, K_2 = 常数

とすれば、同一変圧器に就いて

$$L = 20 \cdot \log_{10} \frac{S}{S_0}$$

又、磁束密度同一、相似の変圧器に就いて

$$L = 6.67 \cdot \log_{10} W + K_1$$

或いは重量が変圧器出力の約3/4乗に比例するとすれば

$$L = 5 \cdot \log_{10}(kVA) + K_2$$

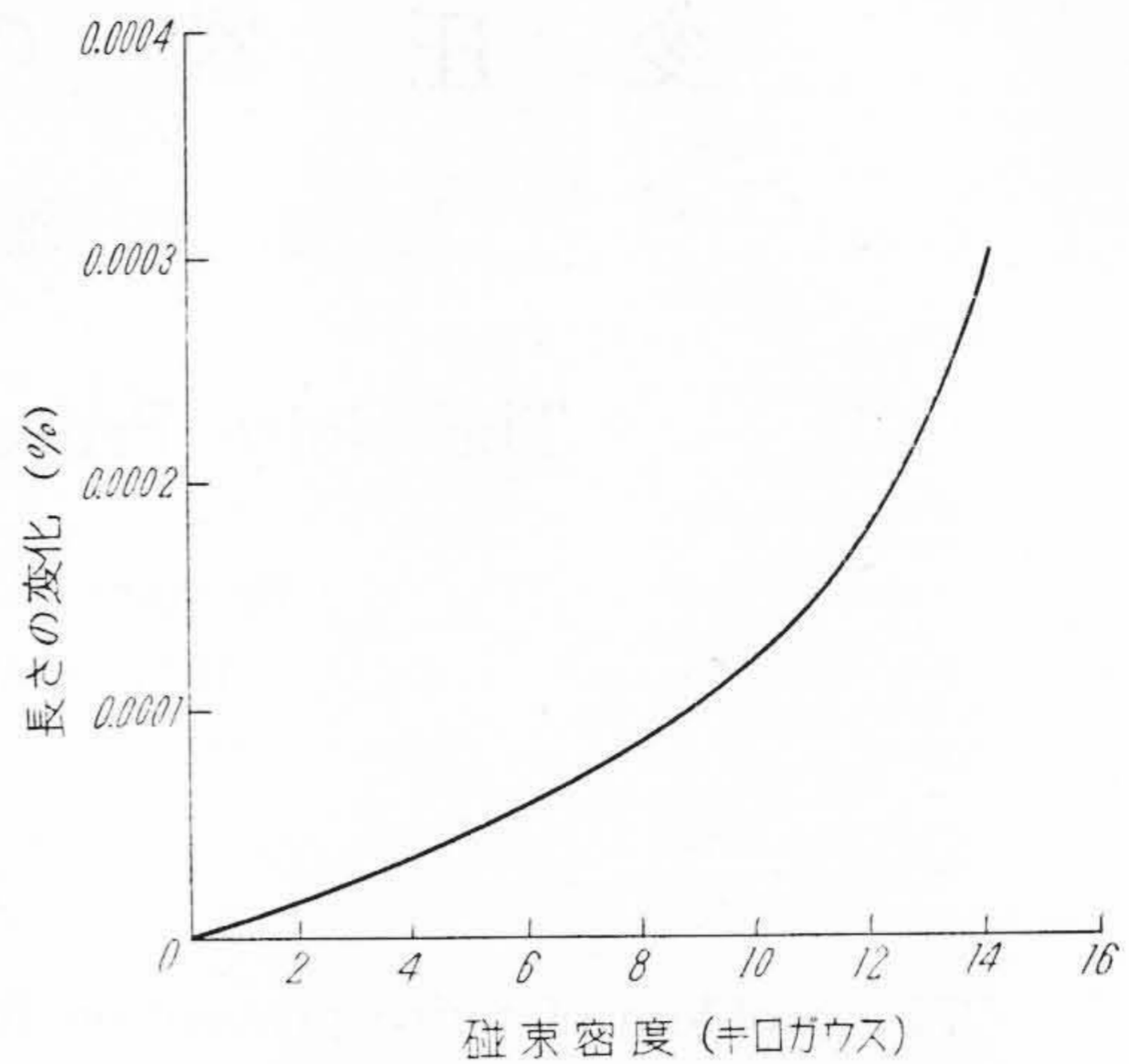
となる。

この磁歪によつて鉄心外部にあらわれる振動の様相は、一般の内鉄型変圧器に於ては、鉄心脚部の両端に負荷のかゝつた柱として考えられ、振幅は磁束密度、寸法、構造及び固有振動数によつて相違する。

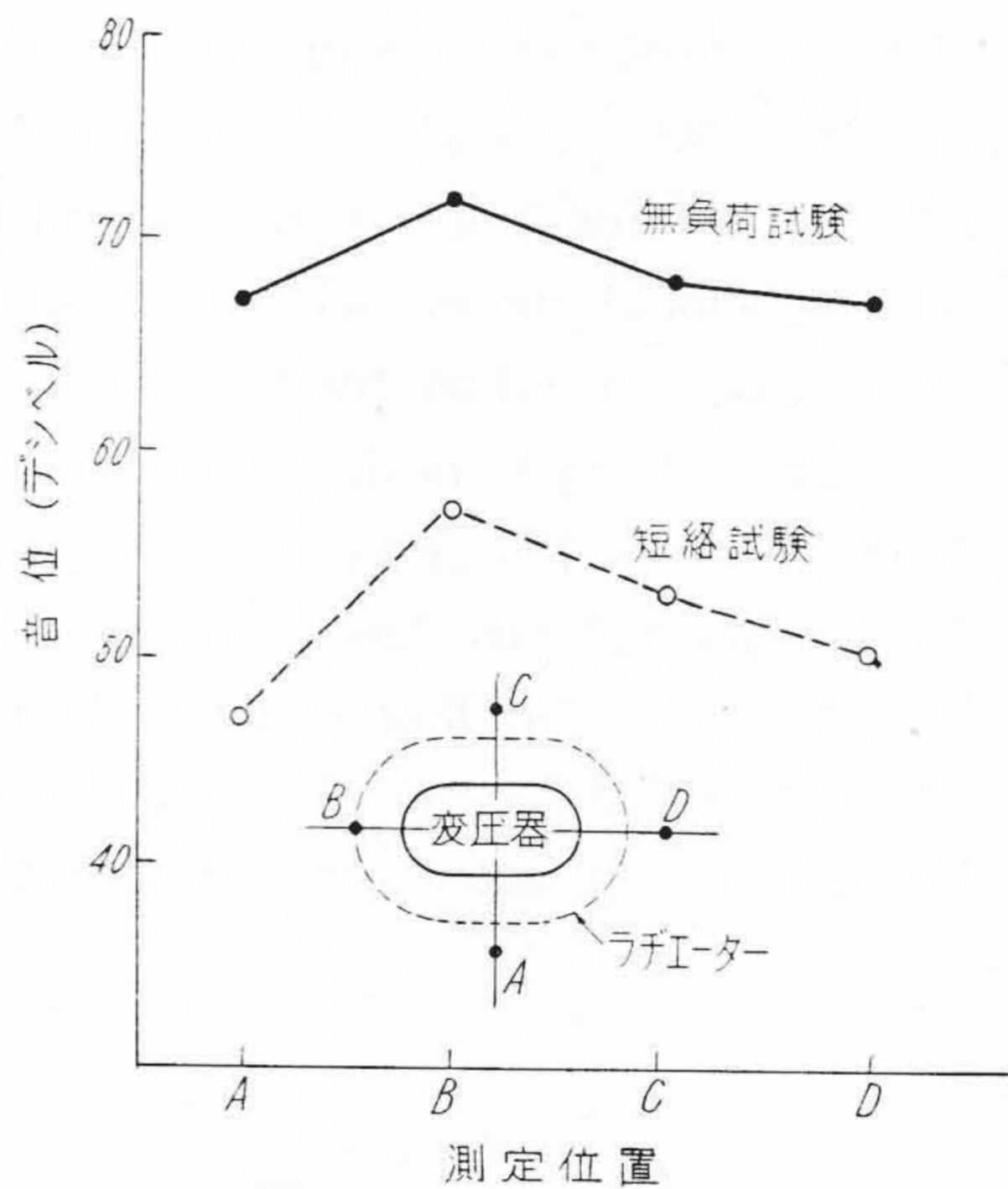
前掲(1),(2)による鉄心の振動の他、(3)によるものは比較的小さく、変圧器騒音の音位に与える影響は少い事が第2図に示す実測例によつてもわかる。即ち30,000 kVA 三相内鉄型自冷変圧器に於て、無負荷試験(定格電圧励磁、励磁電流)と短絡試験(インピーダンス電圧励磁、定格電流)時の騒音を比較すれば、前者の場合は殆ど(1),(2)によるものであり、後者に於ては鉄心の磁束密度が前者の10%以下に低下しているため殆ど(3)によるものと考えられ、15~20デシベル低い値となつている。

以上によつて発生する振動は変圧器に供給された交流の周波数の2倍を基本周波数とし、その他の高調波を含むが、振幅としては基本波が最大である。

その他変圧器の附属機器として、送油風冷式に於ける送風機の発生する騒音、振動が問題となる。それは一般



第1図 変圧器用高珪素鋼板の磁歪曲線
Fig. 1. Typical Magnetostriction Curve of High-Silicon Transformer Sheets



第2図 無負荷試験及び短絡試験に於ける騒音 (30,000 kVA 変圧器)

Fig. 2. The Sound Levels of 30,000 kVA Transformer at No Load and Short Circuit Tests

に変圧器内部より発生するものより大きいので普通であつて、ランナーの動的不平衡、翼端或いは送風路の渦流、剪断等によつて生ずる。そして回転数、並びにランナー径即ち翼端の周辺速度及び風速に大きな関係があつて、プロペラファンの例をとれば、周辺速度と凡そ直線的に増減し、15~20 m/sec 毎に約1フォンの音位の高低となつている。又その基本周波数は羽根数と回転数との

相乗積であらわされ、更に数次の高調波を含み、 n 次のものは基本波の $1/n^{1.5}$ 程度のエネルギーを持つものと考えられている。(2)

以上これらの原因によつて発生した音響、振動は周囲にある種々な媒体を通して伝播して行くのであるが、それは媒体となるものゝ音響に対する特性によつて種々な形をとり、それ等の配置、組合せにより或いは反射され、或いは透過し、或いは吸収される。主な材質の音響特性は第1表に示す通りであるが空気の音響抵抗は他のものに比較し、差が大きいので空気音の伝播は附近の建造物、樹木の影響を受け易く、又気象条件等によつてもその到達距離が違つてくる。標準状態の一例として空気音は振動源からの距離が2倍となる毎に4.5~6.0デシベル減衰するといわれている。(3)

[III] 騒音の低減

騒音を防止するにはその音源に於て、発生を防止する事が最も望ましい所である。しかしそれだけに依るのみでは、完全とは言い難い。発生した振動を吸収し、伝達を防止する事を変圧器自体のみならず、附属施設に対しても考慮する事によつて、より効果的になり、実際に則した騒音防止対策であると言ひ得る。

前章に述べた騒音の原因、伝播の状態から騒音低減の種々な方法がとられるわけであるが、その主なものを挙げれば次の通りである。

(1) 鉄心の磁束密度を低くする。

主振動源である鉄心の振動を少なくするには磁束密度をなるべく低くとり、磁歪現象を少なくすることが最も効果的な方法であるが、磁束密度を低下させると機器は大きくなるのでむやみに低くすることは出来ない。変圧器の寸法、重量、及び経済的な諸条件を勘案して磁束密度を決定せねばならない。

磁束密度の高低による音位の変化は前述した通り、大略の値を掴む事が出来るが、30,000 kVA 三相内鉄型自冷式変圧器に就いて測定した例を第3図に示す。

又その他鉄心の鋼板に磁歪の少ないものを採用するなど考えられるが、その特性を満足する鋼板に就いては幾多の研究が残され、その生産、採用には今後に俟つものが多い。

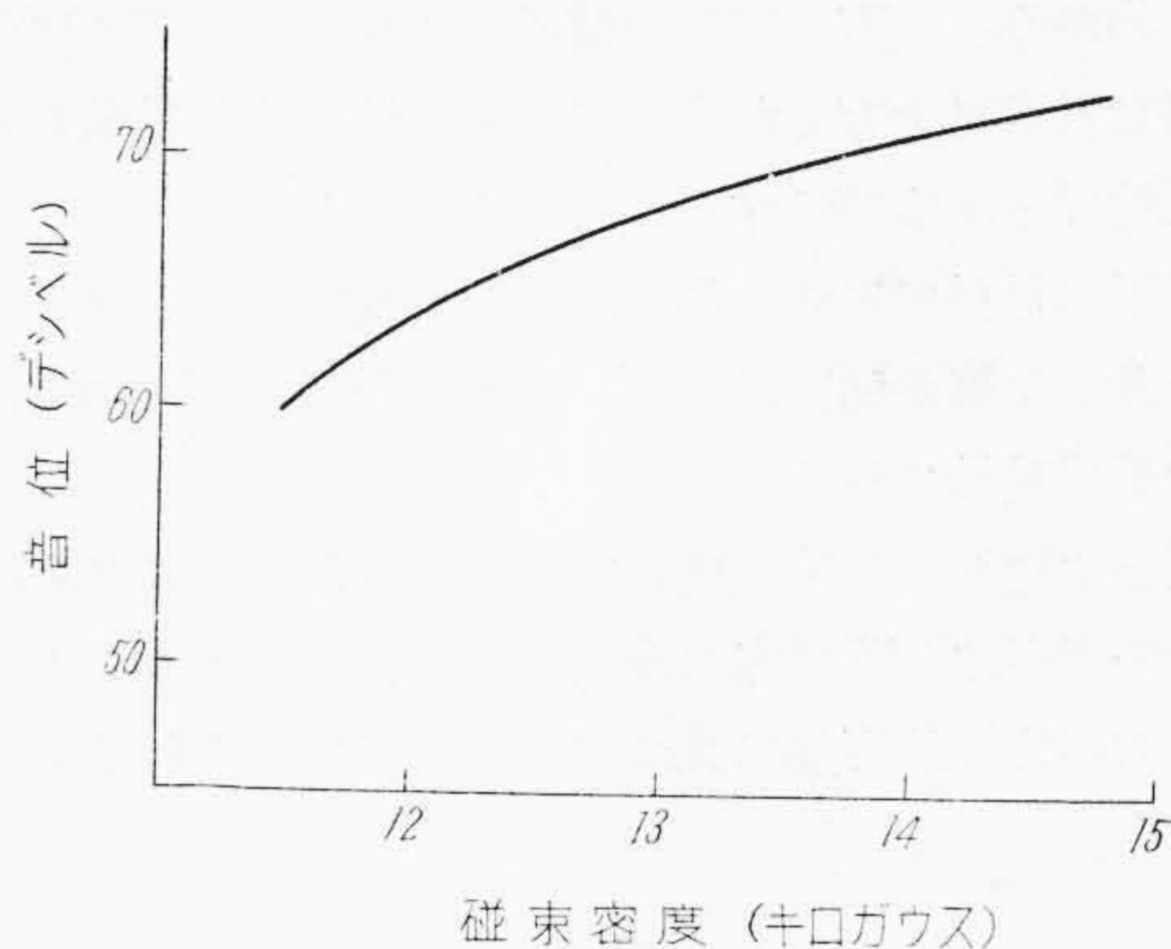
(2) 鉄心、巻線、その他組立部分の締付を完全にする。

鉄心鋼板の波打、接目部分の間隙を極力小として、堅固に締付け、鋼板箇々の自由振動を防止する。又巻線の支持、締付は堅固に、緩みなく、巻線相互の電磁的の平衡をとる事、或いはその他の附属品も同様に十分堅牢にして、振動に対する共振に就いて注意を払い振動し易い

第1表 各材料の防音特性

Table 1. Anti-noise Characteristics of Several Materials

材 料	音速 V (m/sec)	密度 ρ (g/cm ³)	音響抵抗 $V \times \rho$ (g/cm ³ /sec)
鉄	5,240	7.86	411×10^4
コンクリート	5,030	2.0	101×10^4
松	3,350	0.4	13.5×10^4
コルク	486	0.24	1.2×10^4
ゴム	61	1.23	0.75×10^4
空気	328	0.0015	0.004×10^4



第3図 磁束密度による騒音の変化 (30,000 kVA 変圧器)

Fig. 3. The Sound Levels for Various Magnetic Flux Density

部分を摘出して適当な処置を施す等組立に際し考慮すべき点である。

(3) 振動の原因となる附属機器を吟味する。

送油風冷式変圧器の送風機等がその対象であつて、それから発する騒音低減はランナーの動的平衡、流体力学上の合理的な形状、回転数の低下及び送風通路の妨害除去等を考慮し、その支持部より伝わる振動を防止しなければならない。

(4) 振動を遮断、吸収する。

変圧器中身から発生した振動を外部に伝えないために中身と外函の間に適当な防振部を設ける。又外函或いはベースに伝わる振動をその表面から空気音として放射させないように十分な剛性をもたせ、或いは床面、附属施設に更に伝えないような振動吸収の手段を講ずる事である。

変圧器の振動のように比較的周波数の高いものゝ防振には一般にゴムが優れた特性を有する。ゴムの振動減衰効果はゴムの硬度、形状、使用法或いは周波数等により異なり、ゴム独特の分子構造からその防振特性を高度に利用するよう留意せねばならない。

又建屋基礎の構造として据付床面に浮床式等を採用する事を考えられる。

(5) 空気音を遮蔽、吸収する。

振動面から発生、伝播する空気音を吸収、遮蔽するためには普通、壁が最も効果的なものとして採用されている。振動面をフェルトのような吸音材で包皮するとか、コンクリート、煉瓦等の防音壁でその周囲をかこむとか更にその内面を吸音材で張る等がその方法である。

壁の遮蔽効果は壁の構造によつて趣がかわつてくる。即ち単一壁ではその材料でなく、単位面積の重量がそれを決定するという事が第4図(4)に示した測定結果の例によりわかる。一方多重壁は幾重もの単一壁の間々に他の適当な吸音材を充したもので、単一壁に比し重量当りの遮蔽効果ははるかにすぐれている。

若干の材料で実際に作られた壁に就いて周波数と音響遮断量とを第5図(4)に示す。曲線中の数値 lbs/ft² は、壁の単位重量である。

以上主な防止対策に就いて述べて来たが、これら騒音低減の考慮は、建屋内に変圧器を据付ける所謂屋内用とする方が比較的容易に且つ効果的に行い得られる事がわかる。

〔IV〕 騒音防止変圧器の構造

具体的に騒音防止対策を取り入れた変圧器として製作した 30,000 kVA 変圧器に就いて、その概要を説明する。

主な仕様は下記の通りである。

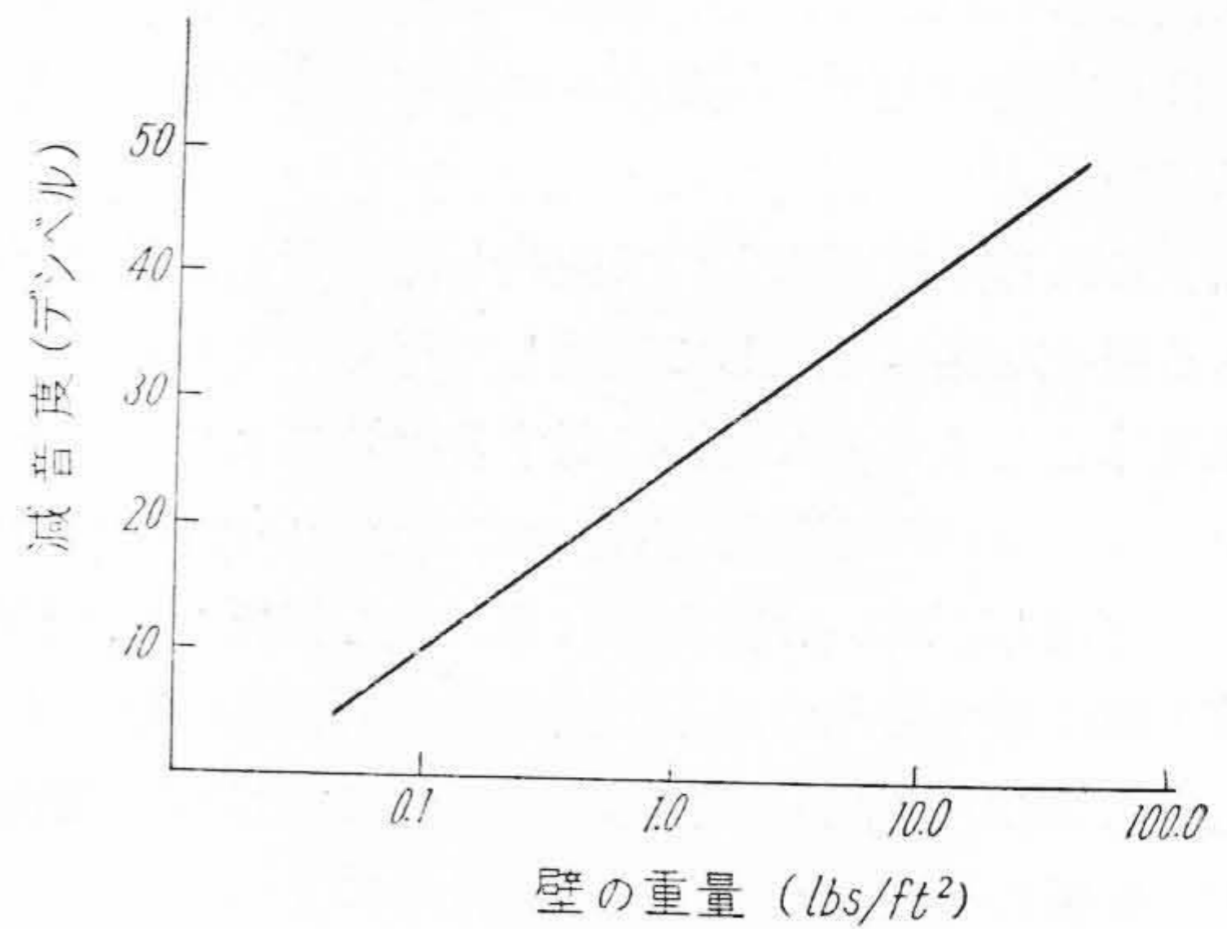
出	力	.....	30,000 kVA
電	圧	.....	63-60-57/22/(3.3) kV
相	数	.....	3
周	波	数	.....50~
結	線	.....	人/人/△(三次は内蔵)
合	数	.....	2
本	体	中	身重量..... 45,000 kg
本	体	重	量(含油)..... 64,000 kg
冷	却	方	式.....送油自冷式

変圧器本体は変電所建屋内に設置し、冷却器は屋外に据付け、油を強制循環させる自冷式である。その外観写真を第6図に示す。

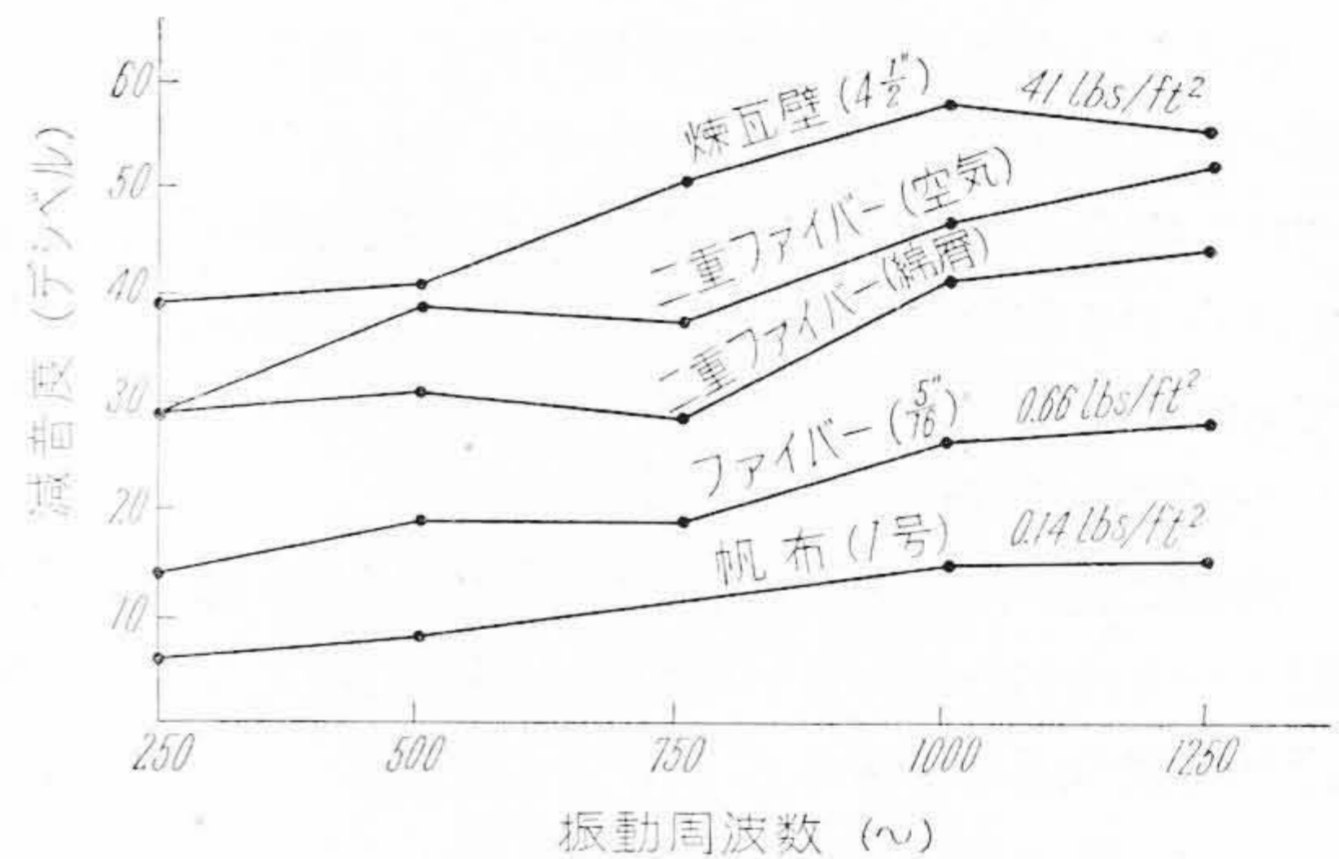
次にこれの騒音低減のためにとつた主な対策に就いて述べる。

(1) 鉄 心

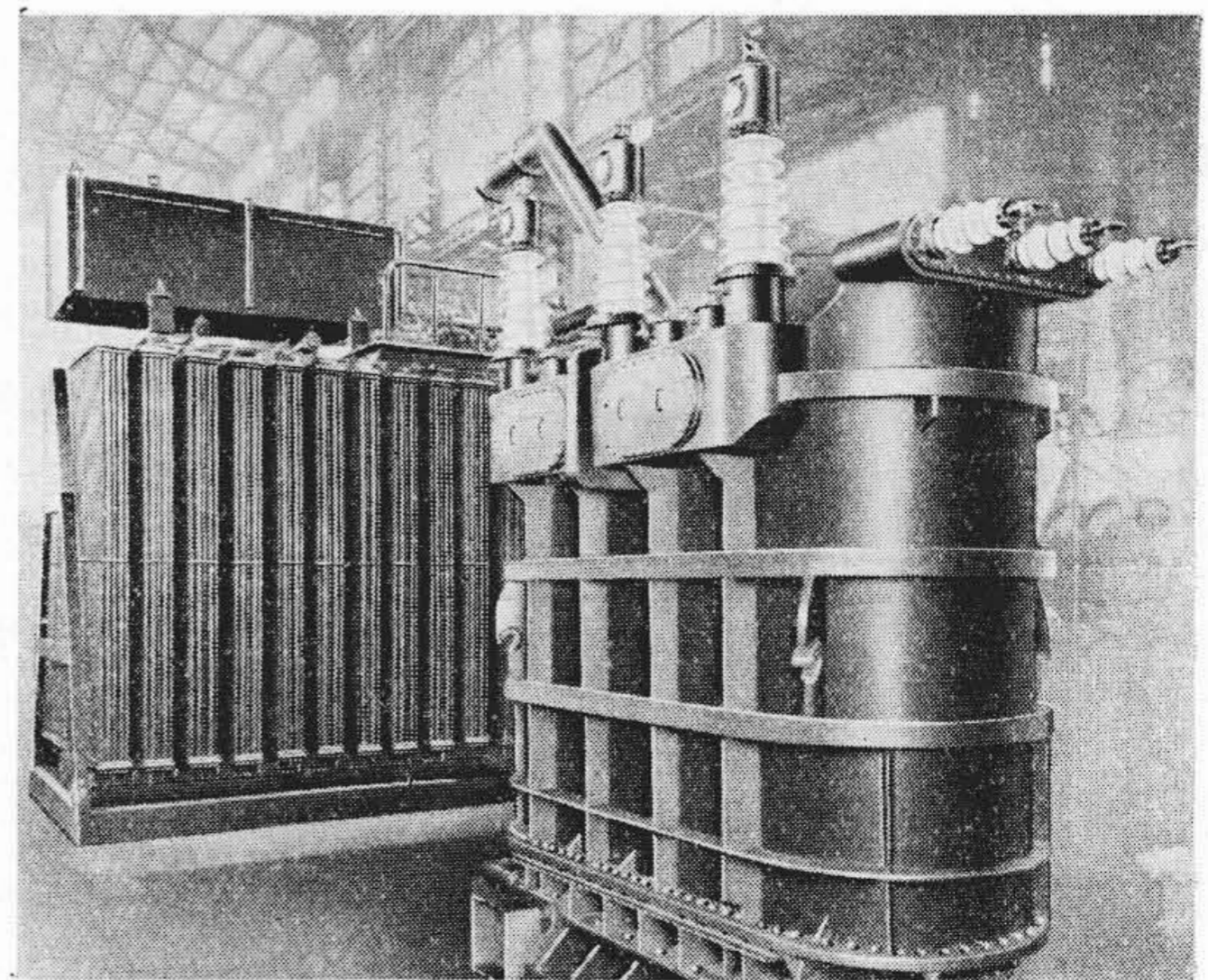
本変圧器は現地据付作業を簡略にするため、シキ60型落込貨車で組立輸送を行い又建屋を極力小とする必要から大きさ、重量に就いて制限をうけ、従つて鉄心の磁束密度はそれ等の制限が許す範囲で低く定められた。



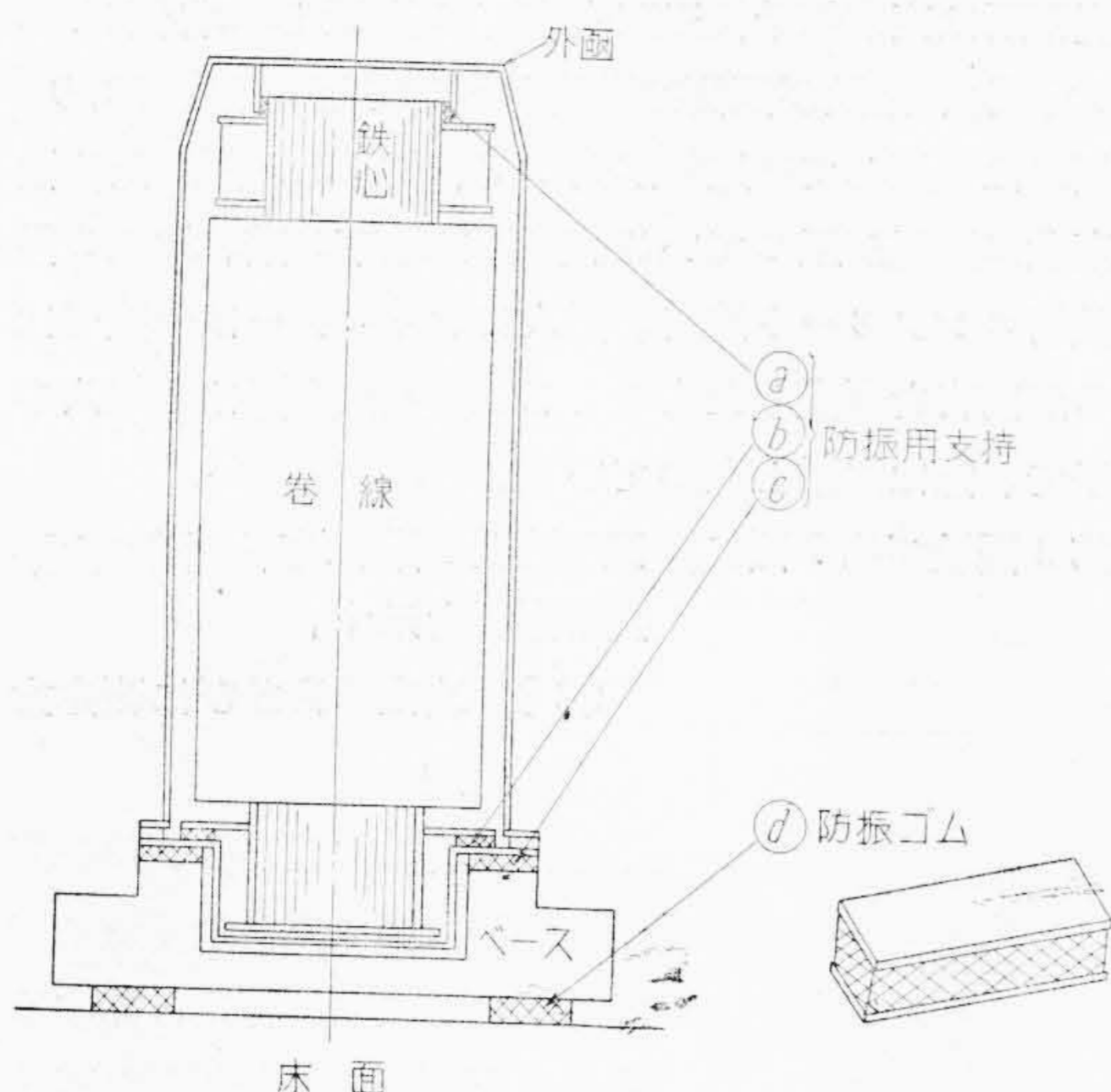
第4図 単一壁の音響遮蔽特性
Fig. 4. Anti-noise Characteristics of Single Wall



第5図 各種壁の音響遮蔽特性
Fig. 5. Anti-noise Characteristics of Several Walls



第6図 30,000 kVA 変圧器
Fig. 6. 30,000 kVA Transformer



第7図 30,000 kVA 変 圧 器 構 造 図
Fig. 7. The Construction of 30,000 kVA Transformer

珪素鋼板は1枚宛選別して、特に波打を除き、堅固な鉄心締金具により十分締付けて組立作業には特別な注意を払った。

(2) 巻 線

絶縁物の収縮によつて生ずる巻線の弛みを避けるため、絶縁物の経年変化を種々なモデル試験によつて究明し、その結果から絶縁処理、支持条件を見出して、念入りな真空乾燥処理を行い、強力なスプリングにより常に必要な力で締付支持するようにした。

(3) 中身の振動伝達防止

変圧器の主要部分の構造は第7図に示す通りである。中身は上部支持(a)及び下部支持(b)により外函に、又外函は(c)により、ベースに防振用ゴムを介して支持せられ、更にベースは(d)の防振ゴムを敷いて、基礎床面に据付けられている。即ち中身により発生した振動を床面に対し三重に吸収するような構造である。

これ等に使用した防振用ゴムの特性は第2表に示す通りで、吸収すべき振動周波数を100〜とすれば、防振ゴムの固有振動数との比が7.0以上となつているので、防振効果は十分期待出来る。尚ゴムは特に(a)、(b)部の油中に使用されるものに対して吟味を要し、必要な弾性を持ち、耐油、耐老化性のすぐれたものとして種々な試作実験の結果、この場合には珪素ゴムを採用し、又外部(c)、(d)用として、合成ゴムを使用して耐久性のあるものとした。

端子の引出部は、十分柔軟性をもたせるため、撚線或いは薄銅板の可撓接続子を用い、ブッシングから振動を伝達しないようにした。

第2表 防 振 坐 の 特 性

Table 2. Characteristics of Several Rubber Springs

防振坐	荷 重 (kg/cm ²)	ばね常数 (kg/cm)	固有周波 数 (〜)	外部周波 数/固有 周波数	撓み (cm)	摘要
(b)	5.25	19,000	13.8	7.25	0.13	内部用
(c)	4.82	13,000	11.9	8.41	0.17	外部用
(d)	3.34	10,000	12.5	8.00	0.16	外部用

[備考] 外部周波数は100〜とす。

(4) 変圧器表面よりの空気音発生防止

外函の振動を抑えるため、その強度を十分にとる事が必要であるが、輸送重量の制限から限度があり、現地にて簡単に取付けられる吸音壁により所要の外函表面を包んだ。即ち楕円形断面の外函で比較的振動が大きくあらわれると思われる長径方向の面を約12cm厚みのフェルト層の壁を取付け、外函表面から発生する空気音を遮断、吸収した。

(5) 附属施設物の防振

本変圧器の附属施設物として防振上問題となる部分は本体、冷却器間を連結する送油配管、パースチングチューブ及び22kV側ブスカバー等が主なるものである。

送油配管は本体上、下部より出て建屋の壁或いは床に支持され、壁を貫通し屋外の冷却器に連結されているので、本体の振動をその出口で吸収するために、珪素ゴムの防振接手を設け、又支持部、貫通部には防振ゴム坐及びブッシュを挿入し、建屋に対する防振を行つた。

パースチングチューブも機械的に頑丈なものとし、防振用のゴムブッシュを使用して壁を貫通し屋外に頭部を出した。

変圧器の22kV側ブッシングより地下室にあるキュービクルに配線する母線用カバーは変圧器上部から建屋の壁に沿つて一階の床を貫通し地下室に下つて附設され極めて振動し易い薄銅板製のダクトであるので、変圧器の接続部にゴムを使用して三重に防振部を設け、本体の振動をこれに伝えないようにした外、カバー自体の自由振動を防ぐため、締付けを十分にした。

(6) そ の 他

変圧器の組立、据付に際しては各防振部が効果的な機能を発揮するように十分注意を払い、又取付部分は一様に且つ堅固に締付け、振動によつて弛みのこないようにロックナット、スプリングワッシャ、その他ロックを完全に行つた。

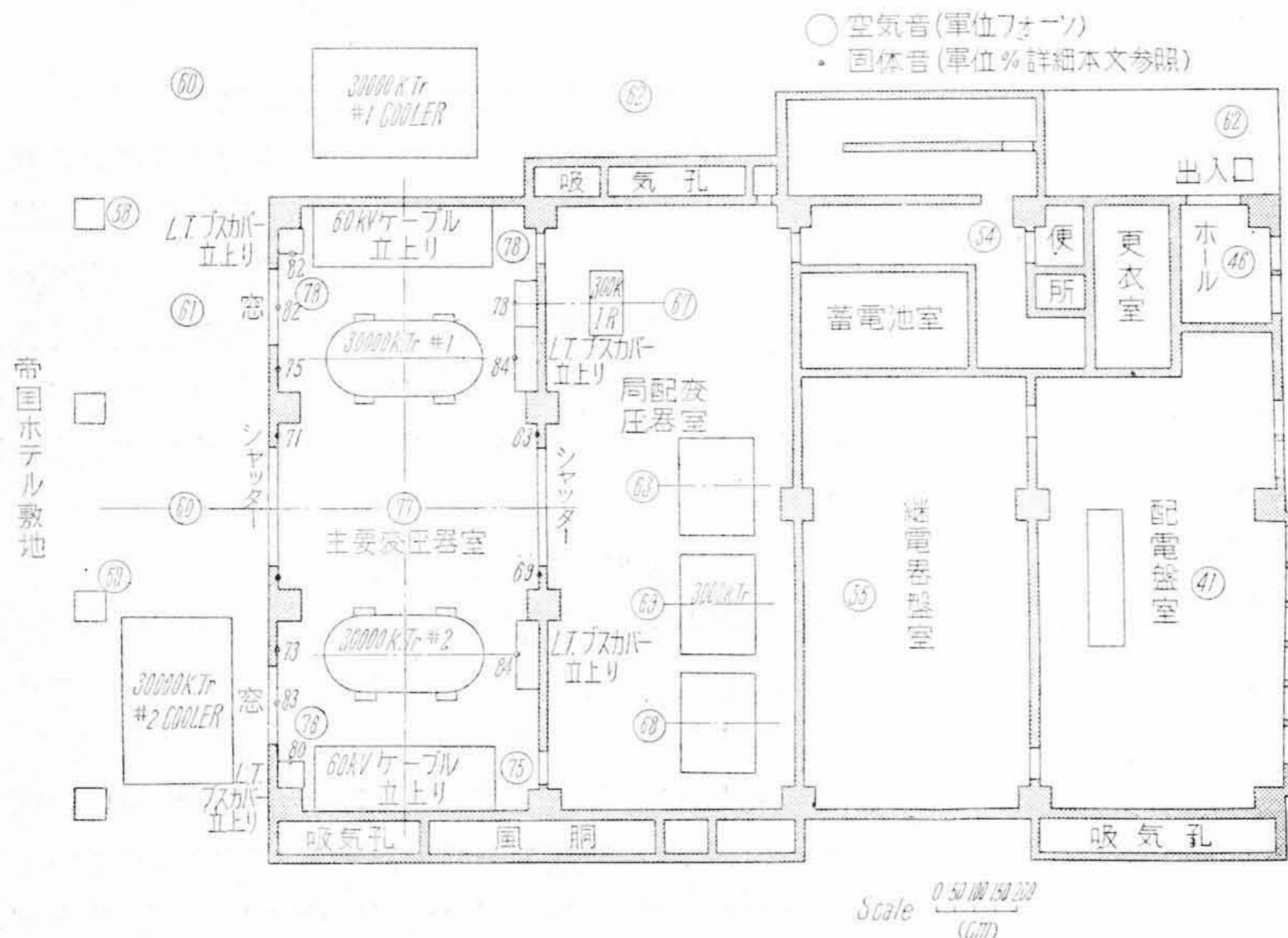
以上主に本変圧器の設計、製作に当つて騒音防止上考慮した点であるが、その他補助機器として、冷却器側に取付けた送油ポンプは騒音測定の結果、極めて低い値であつたので考慮外とした。

[V] 現地に於ける騒音測定

前記 30,000 kVA 変圧器が日比谷変電所に納入されて運転を開始した機会に、東京電力株式会社の御協力により、現地に於て総合的に騒音測定を実施する事が出来た。その目的とする処は対策した防振防音の効果を確認すると共に、変電施設全体として騒音防止の問題を検討する資料を得るにあつた。

変電所は東京都千代田区内幸町に位置し、北側は約 60 m 離れ、南及び西側は道路をへだてた建造物であり、東側には近接して建造物があつて、約 30 m 離れた位置を南北に国電が通つている。建屋は地下 2 階、地上 2 階の鉄筋コンクリート造で、出入口シャッターは一重ではあるが防音を考慮したものとし、変圧器室扉は金網入の硝子で、窓は二重となつている。

第 8 図及び第 9 図に変電所地上 1 階、地下 1 階の主要機器配置を示す。



第 8 図 変電所地上 1 階に於ける各部の空気音及び固体音
Fig. 8. Results of Measurement for Main Part of Substation

(1) 測定項目並びに測定方法

測定項目、測定部位、及び使用測定器は第 3 表に示す通りであるが、この内固体音と称するものは記事欄中に記載した方法により測定したもので、騒音計の読みそのものは何等定量的な意味はないが、各部位の振動伝達状況の比較を知るための有力な数値である。従つて変圧器外函の騒音計読みの最大値を 100 として、各部の読みをそれに対する % であらわしたものを結果として記録した。

主要変圧器 30,000 kVA, # 1, # 2 を交互に、或いは同時に、又他の局配用 3,000 kVA 変圧器、300 kVA 誘導調整器(共に日立製作所製)を同時に運転した各場合に就いて、更に各室仕切扉、出入口シャッターの開閉の状態 で測定を行う事が出来た。

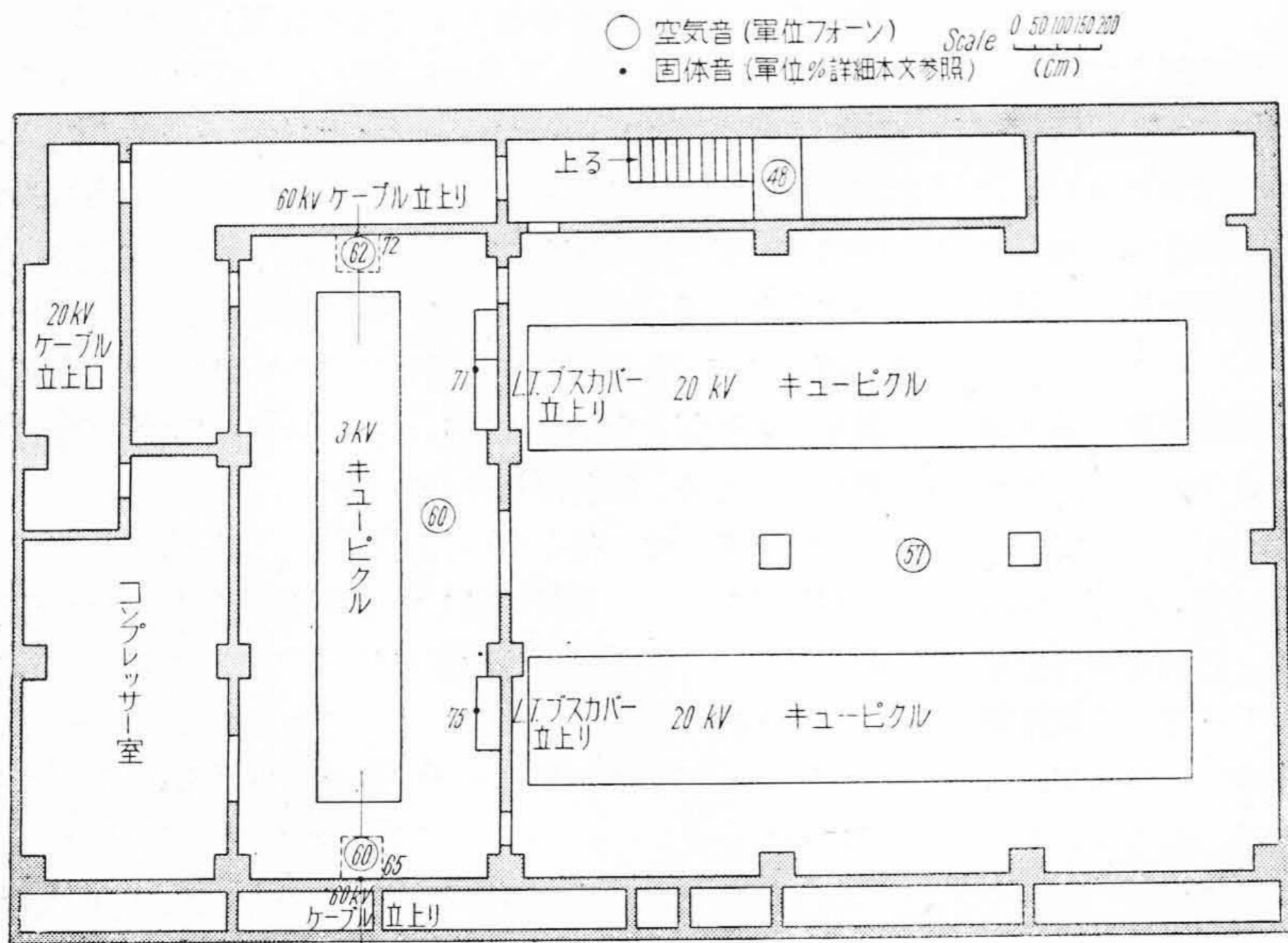
(2) 測定結果

前項により測定した結果中の主なものを挙げ、概略の説明、検討を加える。

(A) 変圧器の固体振動、固体音及び周辺の空気音

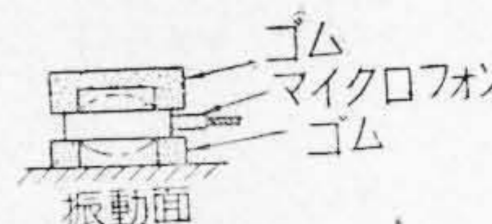
変圧器外函及びベースの振動状況並びに防振部の減衰効果を知る目的で、所要部位の固体振動、固体音を測定し、必要な振動波形をオシログラムに撮つた。それ等を第 10 図及び第 11 図に示した。

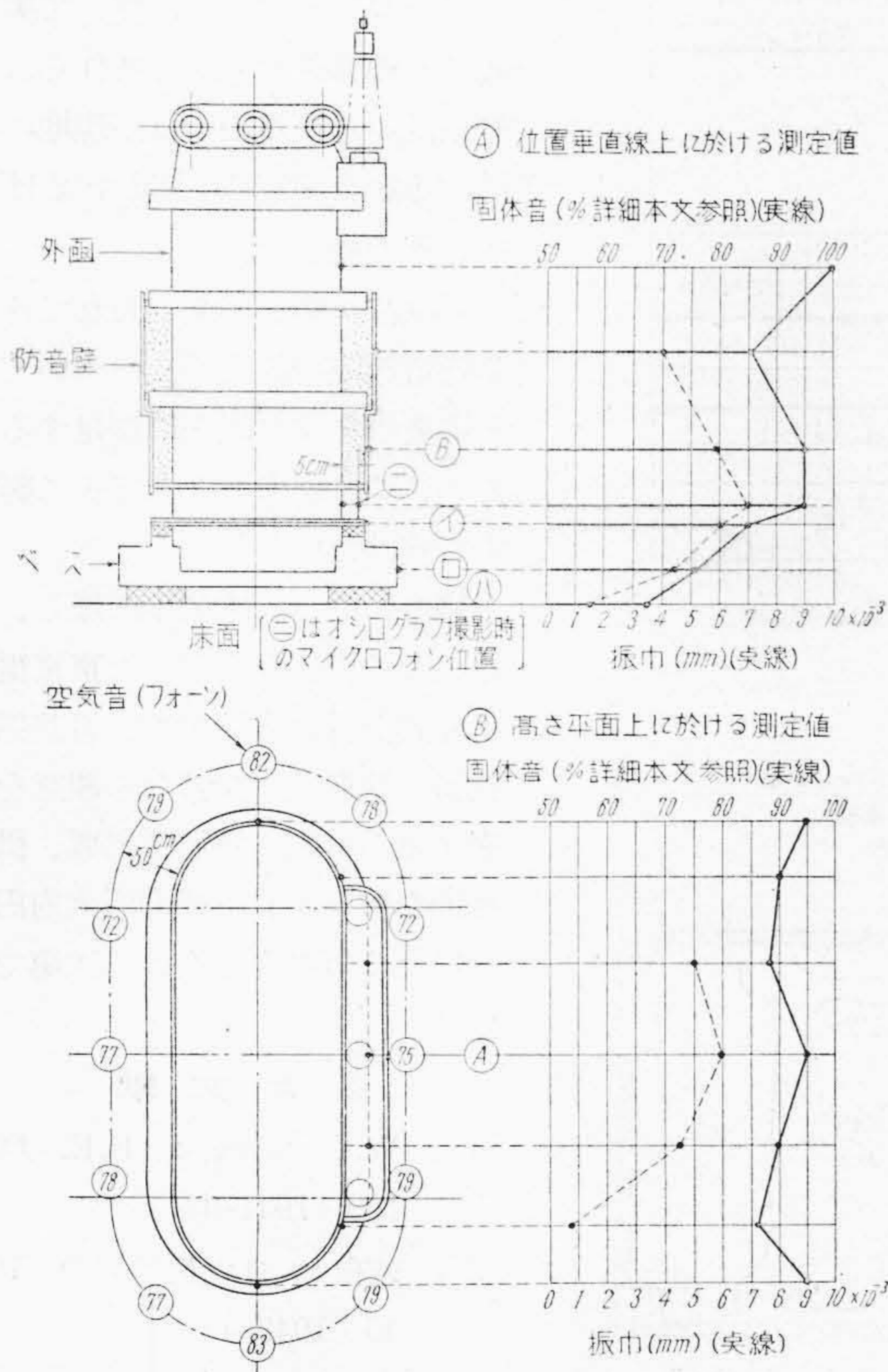
外函各部にあらわれる振動



第 9 図 変電所地下 2 階に於ける各部の空気音及び固体音
Fig. 9. Results of Measurement for Main Part of Substation

第3表 測定項目及び測定法
Table 3. The Item and Method of Measurement

測定項目	測定部位	測定器	記事
固体振動	1) 変圧器外函、ベース 2) 変圧器冷却器間配管	アスカニヤ手持振動計 (明石製作所製) VT-2Z 型微小振動計 (日本電子測器製)	振幅周波数及び波形をとる
固体音	1) 変圧器外函、ベース 2) 防振部の前後 3) 変圧器冷却器間配管 4) ブスカバー 5) 建屋の壁、窓、床	SL-4 型指示騒音計 単位はフォン 1 気圧 0°C の空気中で 1000~ の純音 0.0002 μ bar を零とするデシベル尺度	 <p>上図の如く外部空気音を遮蔽しマイクロフォンを振動面に圧着して騒音計の指示及び波形をとる</p>
空気音	1) 変圧器周辺 2) 建屋内外主要位置		マイクロフォンの高さ床面上約 1.5 m にて騒音計の指示及び波形をとる



第10図 変圧器の振動及び騒音
Fig. 10. The Vibration and Sound Levels of Transformer

は、外函の機械的な剛性によつて、円弧部より、直線部に大きく出ている事から、防振上からも外函強度の検討が必要となつてくることがよくわかる。

振動の最も大なる直線部中央附近の防振部前後の測定

結果を見れば、④—⑩間に於て 9%、⑩—⑪間に於て 9%、④—⑪間で 18% の固体音及び ④—⑪間約 75% の固体振動振幅の減衰が見られる。固体音、固体振動共に基本周波数は電源のその 2 倍即ち約 100² となつている。

又外函表面から約 50 cm 離れた位置の周辺音位は第 8 図の機器配置図に見られる通り、変圧器から 90~120cm 離れた位置に建屋の壁、ブスカバー等が三方にあつて、それ等の反射、干渉の影響を多分に受けて、最高値 89フォン、平均値 86 フォンとなつたが、外函面の所要部に吸音壁を取り付ける事により平均値 77 フォンに下り 9 フォンの遮蔽効果を得た。

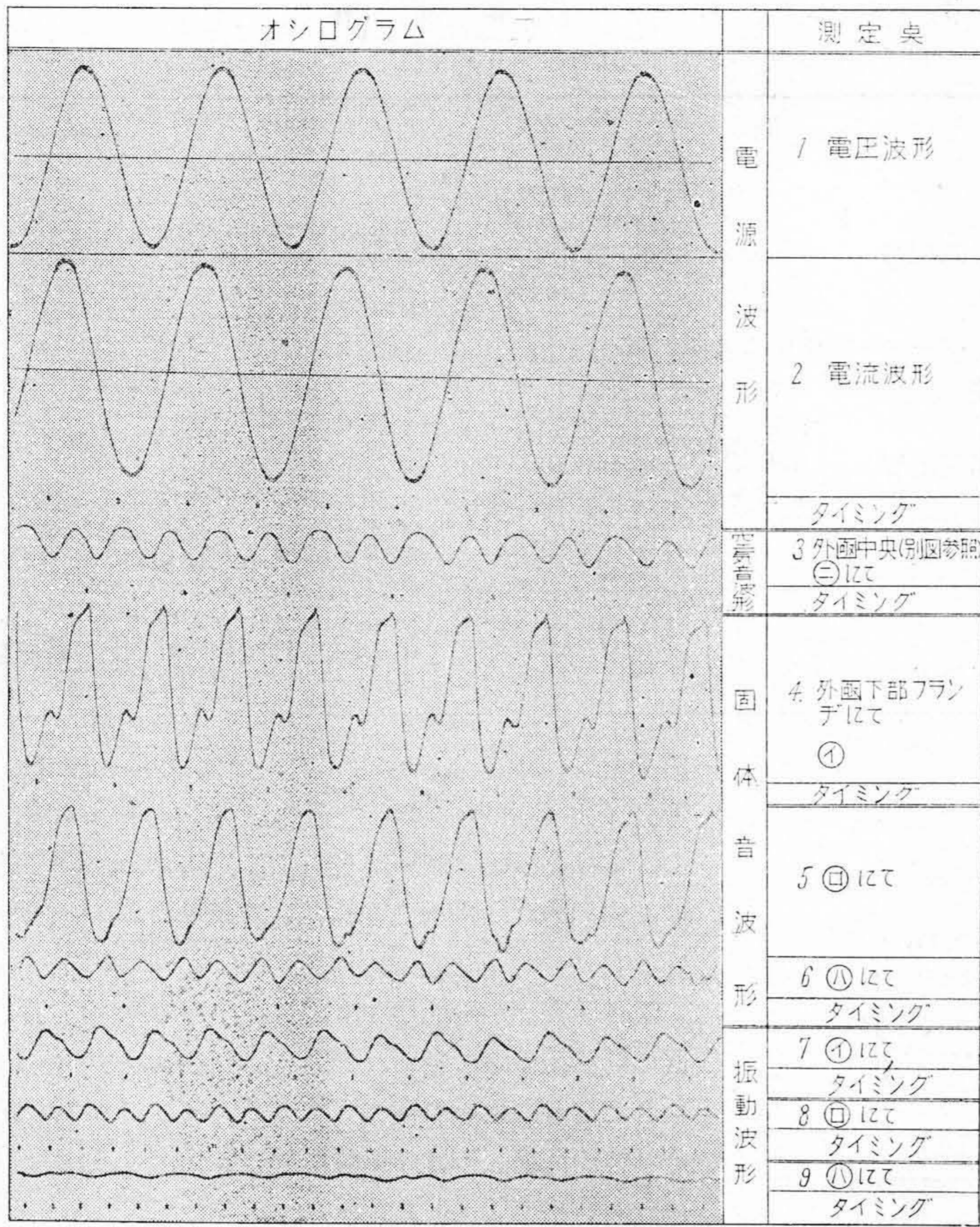
(B) 建屋壁、窓及びブスカバーの固体音

変圧器からの振動伝達の状態を知り、附属施設に対する防振効果を確めるため第 8 図及び第 9 図に示す主要位置の固体音を測定した。その結果を見ると、変圧器外函の最大値に対し建屋壁は 25~47%、窓、ブスカバー等は 16~18% 減衰しているが、変圧器直下の床面に対しては壁 8% 程度、ブスカバーが 17% 程度高くなり励振されている事がわかる。振動し易い附属施設に対する防振について十分考慮を要する処である。

(C) 変圧器附近の音位分布及び主要位置の音位

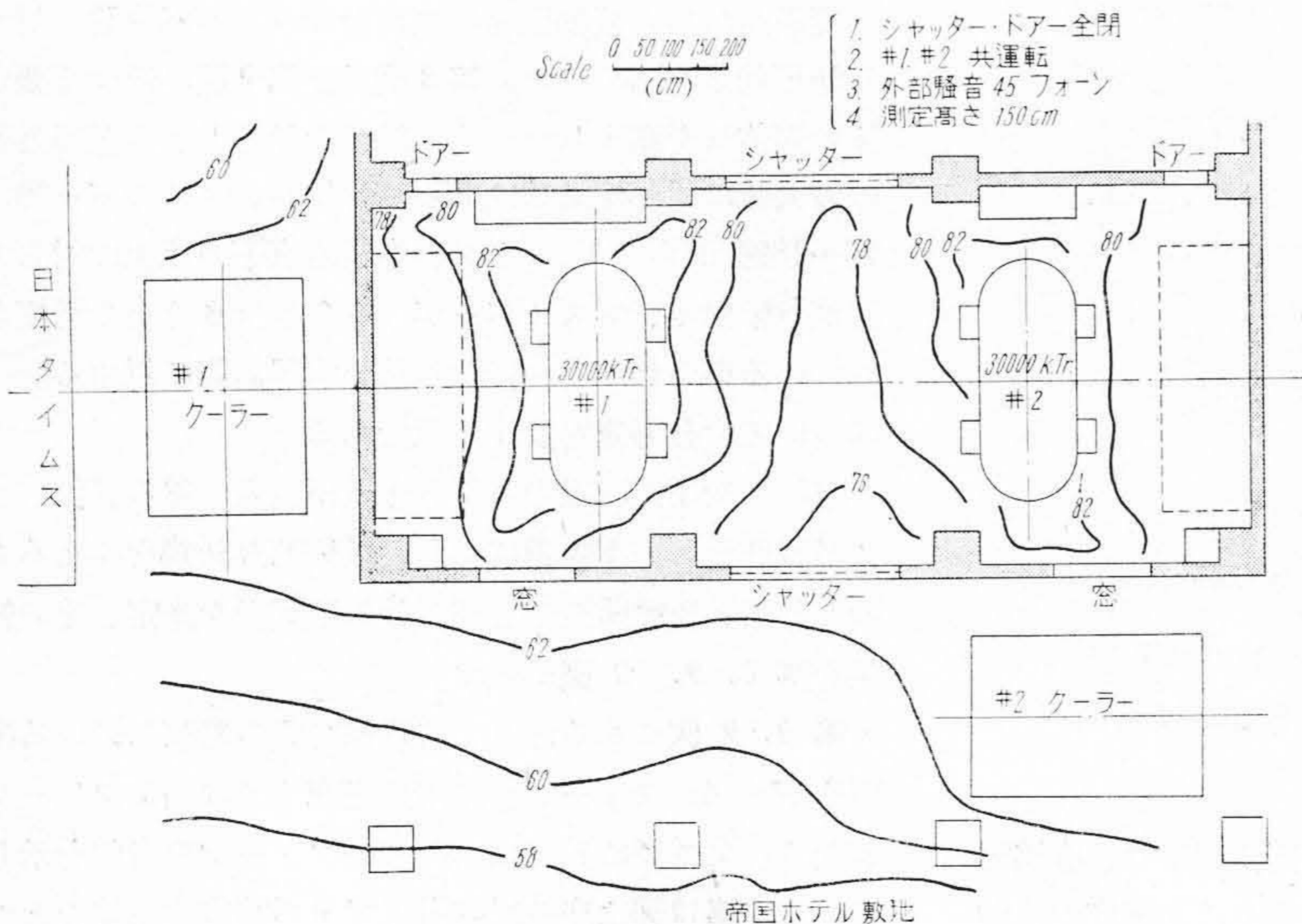
騒音防止という課題に対し、最終的な結論を与えるものとして、変電所内外主要位置の空気音を測定、その結果を第 8, 9, 12 図に示す。

第 8, 9 図にある通り、常時保守員の勤務している配電盤室は 41 フォン、二階住宅廊下では 46 フォンとなり、又外部に於ては 58~60 フォンの音位を示している。第 12 図は変圧器室附近屋外の等音位曲線をとつたもので、建屋壁は約 15 フォン、出入口シャッターは約 13 フォン程度の遮蔽効果が現われている。



第11図 オシログラム

Fig. 11. Oscillograms



第12図 変圧器室及び屋外騒音分布

Fig. 12. Distribution of Sound Levels

(3) 考察

測定結果を総合検討して見るに、音位の絶対値の低減に就いては尙研究の余地が残っている。即ち変圧器の振動抑制、附属施設に対する防振等更に検討すべき問題を提供したが、建屋の壁による空気音の遮蔽、又変圧器の建屋に対する防振等の効果が相俟つて、問題となるべき主な部位の騒音を一応支障なき値に低減する事が出来たと云い得られるであろう。

[VI] 結 言

以上変圧器の騒音に就いて実際にその低減を意図して作られ変圧器の防振対策、及び現地に於ける騒音測定の結果を挙げて、その検討を試みた。

将来益々関心が深められてくる変電施設の騒音防止についてその要求をより以上に満足するため、これを参考として更に努力を続けたいと思う。

終りに臨み、本測定に際し、絶大なる御援助を賜つた東京電力株式会社高木課長殿、岩井係長殿、他各位に深甚なる謝意を表すると共に、終始御指導、御援助を戴いた日立研究所大内田氏に厚く御礼を申上げる次第である。

参 考 文 献

- (1) W.C. Sealey: E.E. 60 109 (1941-3)
- (2) 菰田: 日立機械評論 16 45 (1943-4)
- (3) An Investigation of Audis Noise in Substation Type Transformer: A.I.E.E. Technical Pa- 51~55 (1950-12)
- (4) 守田: 騒音 94. 98 (昭 12)