

最近のビル用受変電設備における設置条件

Requirements for High Voltage Substation Equipment Installed Inside Buildings

受変電設備は用途に応じ安全かつ最も経済性の高い、システム、形態とする必要があり、特にビル用受変電設備は、居住性をもった建築物の一部に設置されること、設置スペースに制約があることなどから、特に留意すべき点が多い。

ビル用受変電設備全般については、昭和52年刊本誌第59巻9月号に既述したので、この論文ではビル用受変電設備機器の騒音、振動、耐震などの問題点について検討例を紹介しながら解説する。

吉川 功* Isao Yoshikawa
堀 康郎** Yasurô Hori
隈元和光* Kazumitsu Kumamoto

1 緒 言

近年、ビルの大形化、高層化や空調設備の普及、デパートでの照度増大、事務所やビルでのコンピュータの導入など、負荷密度の増大により消費電力は急増し、ビル用受変電設備も大容量、高電圧化してきている。

電気設備の事故はビルの機能を停止させ、停電が広範囲、長時間に及べばビル内の人々を混乱に陥れることになる。したがって、電気設備には高信頼性、安全性が要求され地震に対しても十分な耐震強度が要求されている。

一方、居住性向上の面から受変電設備から発する騒音、振動の対策も要求され、受変電設備とそれを収納する建築物を含め解決しなければならない問題が多くなってきた。

更に、省力化、小形化などの要求も高くなっており、最近では小形で保守・点検工数を節減できるSF₆ガス絶縁式受変電設備¹⁾が主流となっていることは、前稿(本誌第59巻9月号)でも述べた。

以下、ビル用受変電設備機器の騒音、振動、耐震などの問題点について述べる。

2 ビル内電気室の騒音

スポットネットワーク配電方式などのビル用特別高圧受変電設備では、比較的容量の大きい受電用変圧器があり、その変圧器から発生する騒音が問題となる場合がある。

一般に騒音の伝搬には、固体伝搬音と空気伝搬音が考えられるが、前者については、変圧器ベースと床面との間に防振ゴムなどを挿入することにより、その伝搬径路を遮断する方法をとっている。後者の伝搬音は、特にビル内の電気室では狭い領域での騒音発生となるため、反射音による音圧上昇が大きく、そのために室内騒音が大きくなって作業環境を悪化させ、更には、境界上での騒音を満足できない場合もあり、建屋配置・構造、電気室内機器配置などの計画段階で十分な

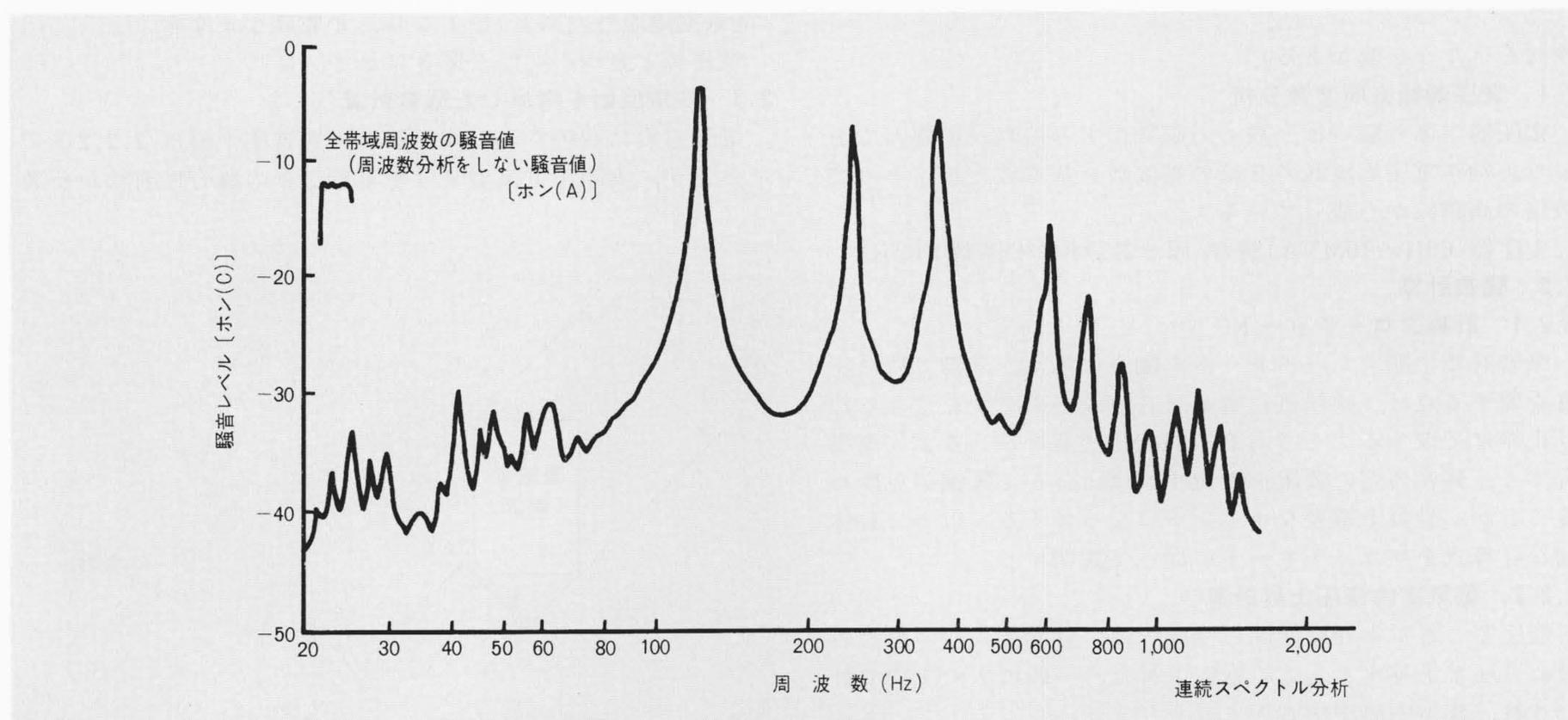


図1 変圧器騒音の周波数分析 60Hz, 10MVA変圧器を対象とした周波数分析の例を示すもので、120Hz, 240Hz及び360Hzの成分で音圧レベルは増大している。

* 日立製作所国分工場 ** 日立製作所日立研究所

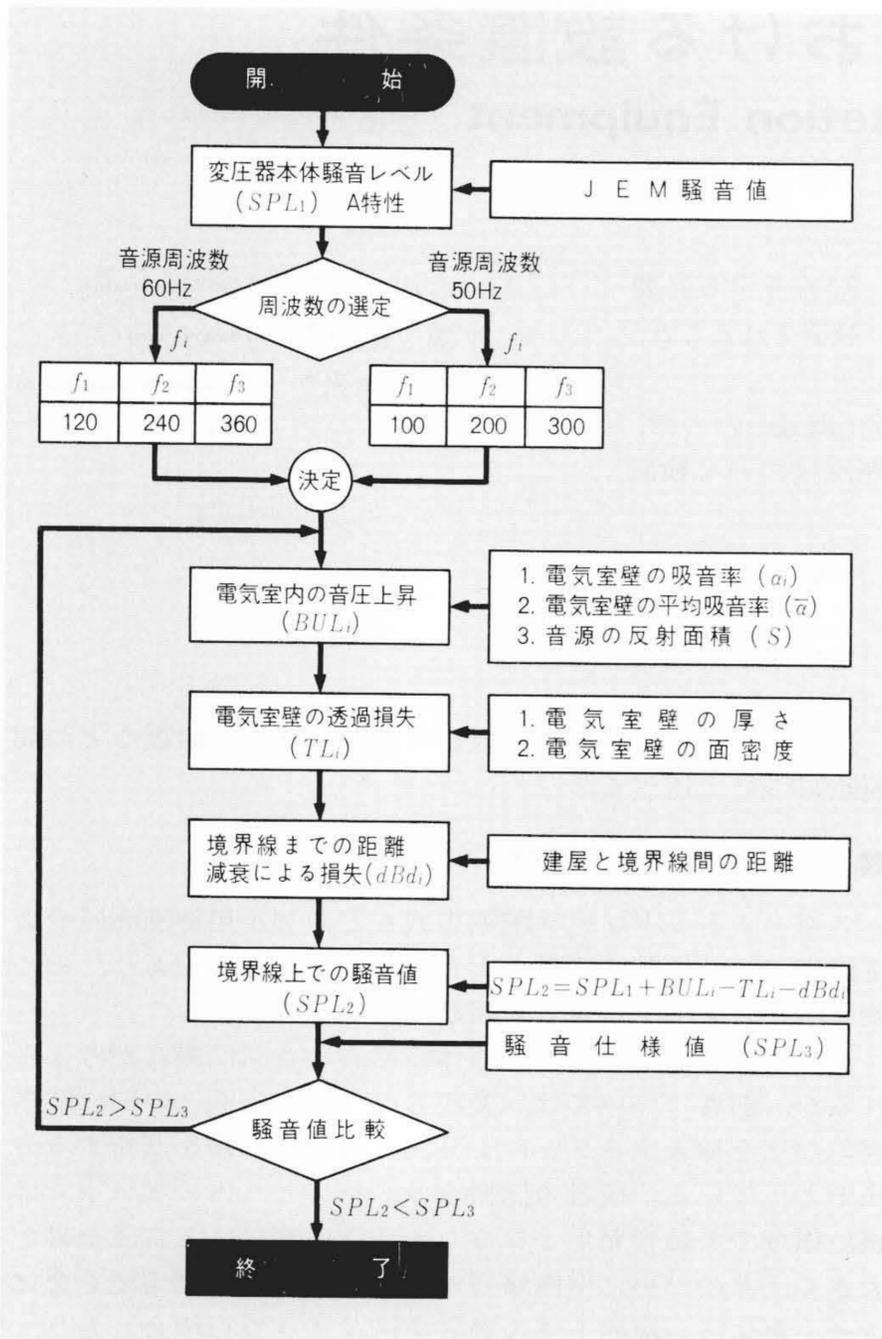


図2 騒音計算フローチャート 騒音計算の手順を示すもので、要素別騒音値を算出し、境界上の騒音値を満足するまで行なう。

検討を行なう必要がある。

2.1 変圧器騒音周波数分析

変圧器本体の騒音は、鉄心の磁気ひずみ振動が主要因であるため励磁電圧周波数の2倍の周波数を基本波とし、その整数倍の高調波から成っている。

変圧器(60Hz, 10MVA)騒音, 周波数分析の例を図1に示す。

2.2 騒音計算

2.2.1 計算フローチャート

騒音計算手順フローチャートを図2に示す。計算で特に注意を要する点は、建屋壁材質の吸音率及び面密度をできるだけ正確に把握することである。騒音仕様値を超えるような場合でも、騒音のどの要素を変更すればよいかを確実に見極めることが、計算上重要なポイントになってくる。以下、具体的な計算式をフローチャートに従って説明する。

2.2.2 電気室内音圧上昇計算

変圧器と電気室建屋壁間の空間では、壁面での音の反射のため音圧が上昇する。この音圧上昇は、一般に次の(1)式で計算され、建屋内の平均音圧上昇を与える。

変圧器表面の吸音率は通常零とするが、吸音材を取り付ける場合には、使用した吸音材の吸音率を用いる。

$$BUL_i = 10 \log \left(1 - \frac{16\pi}{2.3S \log(1-\bar{\alpha})} \right) \text{ (dB)} \dots\dots(1)$$

ここに BUL_i : 音圧上昇(dB)

S : 音の反射面積(m^2)

$\bar{\alpha}$: 平均吸音率

2.2.3 電気室壁の透過損失

電気室壁に入射する平面波は、垂直に入射するものとランダムなものとの2種類あるが、実際にはランダムに入射するときの計算式次の(2)式が使われている。

$$TL_i = 18 \log(f_i \cdot m) - 44 \text{ (dB)} \dots\dots(2)$$

ここに TL_i : 乱入射波に対する透過損失(dB)

m : 電気室壁表面密度(kg/m^2)

この計算式では、固体振動伝達及び漏音がないものとして与えられているが、実際の電気室ではこのような条件を満足できないため、補正係数 η を TL_i に乗じている。 η の値は、コンクリート建屋では0.7程度を採用する。

2.2.4 距離減衰による損失

距離減衰の計算式としては、次の(3)式による方法が一般に紹介されているが、(3)式は $d \geq K\sqrt{AH}$ の条件を伴うため電気室建屋のように大半が $d < K\sqrt{AH}$ となる条件の場合には適用できない。

$$dBd = dBS - 4.4 - 20 \log \frac{d}{\sqrt{AH}} \text{ (dB)} \dots\dots(3)$$

ここに dBd : 電気室建屋から境界線までの距離 d (m)

離れた点の騒音値(dB)

dBS : 電気室建屋外の騒音値(dB)

A : 境界点から見た音源の幅(m)

H : 音源の高さ(m)

K : 1.7~2.0

したがって、そのような条件の場合でも計算ができるように改良した次の(4)式が適用される。

$$dBd = dBS - 4.4 - 20 \log \frac{d+d_1}{\sqrt{AH}} \text{ [dB(A)]} \dots\dots(4)$$

ただし、 $d_1 = \frac{\sqrt{AH}}{1.66}$

例えば $d=0$ の場合、(3)式では ∞ となるが、(4)式では dBS (電気室建屋外の騒音) 値となり、矛盾はなくなる。

境界線と音源の関係を図3に示す。

2.3 多重反射を考慮した騒音計算²⁾

電気室内に収納された変圧器の平均音圧上昇は 2.2.2項で述べたが、実際の電気室では配電盤などの騒音反射物が多数

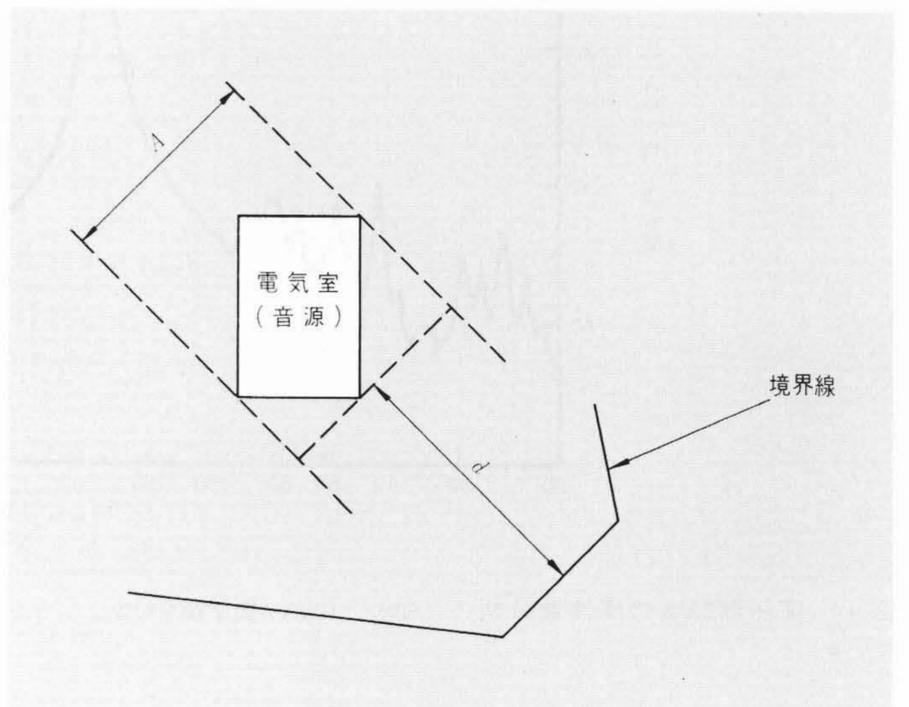


図3 建物と境界線の関係 音源幅は、境界上から見たA幅を採用し、境界上までの距離はdとする。

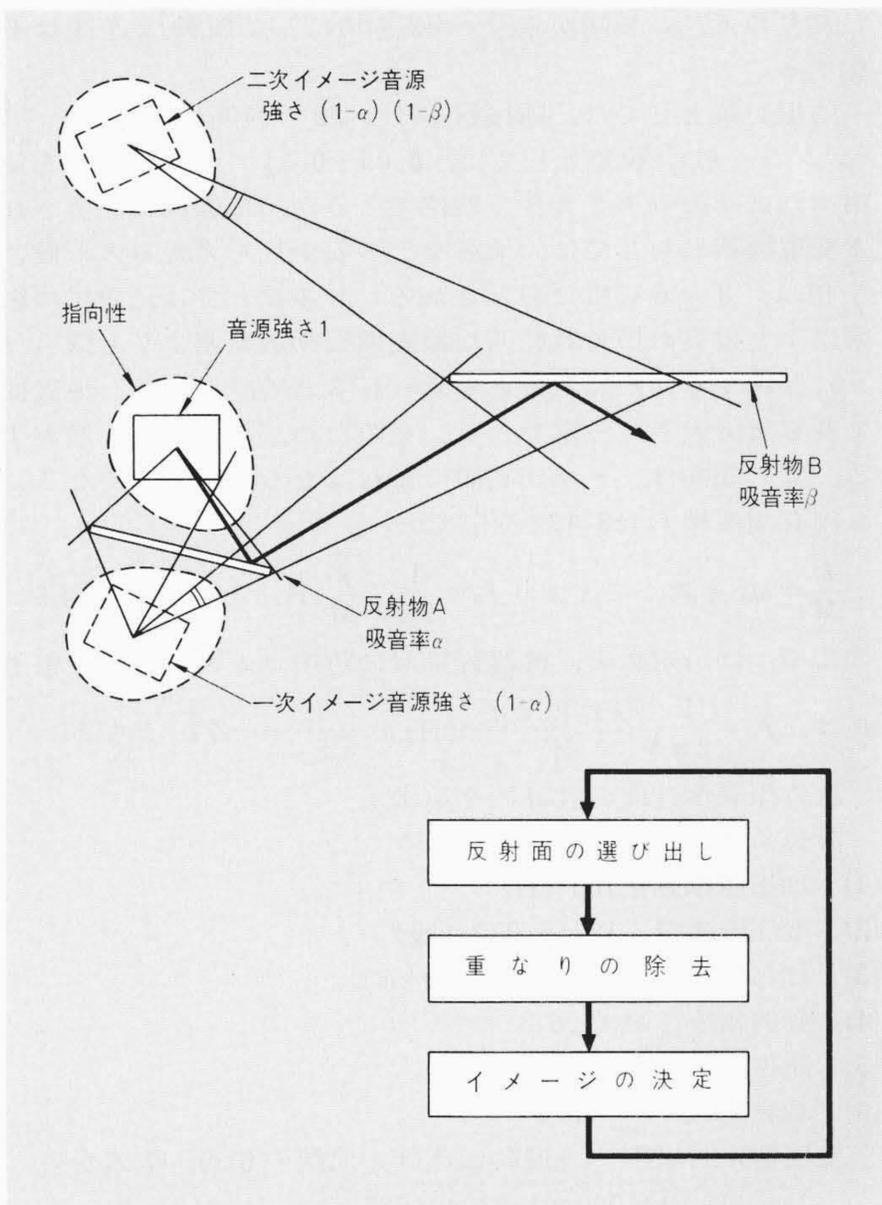


図4 多重反射の取扱い 音源に対し反射物がある場合の取扱いを示すもので、反射回数に対するイメージ音源を作成することにより、騒音の反射音を評価する。

あるため、これらの影響により電気室内音圧上昇は、平均音圧上昇と異なった値になる。このような反射物の影響を評価する方法を図4に示す。

このように、高次のイメージ音源を仮想することにより多重反射音を計算できるプログラムが既に開発され、騒音の詳細

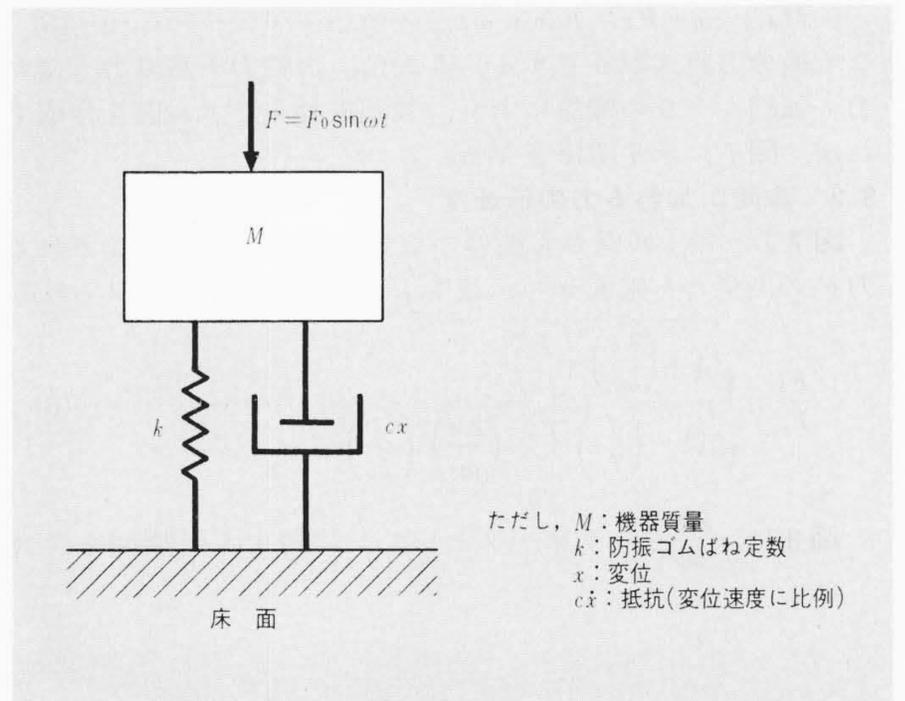


図6 強制振動の等価系 変圧器からの振動は、防振ゴムを通して床面に伝達される。このときの伝達度を検出するための振動系を示す。

細計算に利用されている。この方法で計算した騒音値の例を図5に示す。同図から、電気室内騒音が反射物により大きく変化している様子が分かる。

3 電気室内での振動伝達

電気室内の振動発生源は、変圧器が主体となる。ビル内では、変圧器の固体伝搬音は、床面を伝わり他の室内で拡散音になる可能性があるため、一般に変圧器の基礎部と床面には防振ゴムを挿入し、外部への振動伝達を防止している。この振動伝達力は、系の固有振動数を把握することにより決定することができる。

3.1 1自由度振動系の振動伝達

変圧器と防振ゴムの等価系(図6参照)は、ばね定数 k 、抵抗 $c\dot{x}$ をもつ1自由度振動系で模擬され、系の固有振動数及び振動伝達度を計算することができる。すなわち、

機器の振動変位を x とすれば、運動方程式として次式のよう

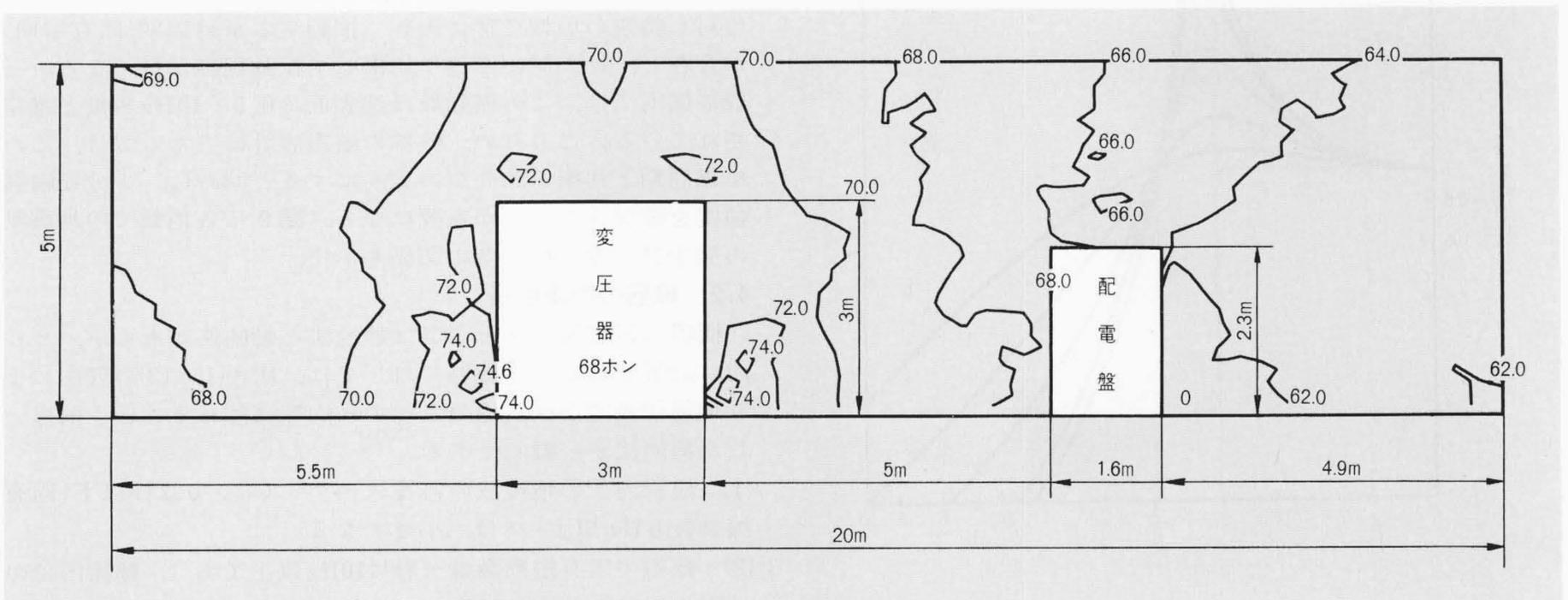


図5 建物内騒音分布図例 変圧器騒音は多重反射により音圧上昇し、室内騒音は複雑な分布を呈している(計算条件は、反射回数7回、イメージ音源380個)。

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \dots\dots\dots(5)$$

なる微分方程式が成立する。(5)式は、慣性力+減衰力+ばね力+強制力=0の関係にあり、強制振動ベクトル図を作成すれば、図7に示す関係となる。

3.2 床面に加わる力の伝達度

図7のベクトル図から機器の振動力 F_0 と床面に伝達される力 F_1 の関係から床面への伝達度 $\frac{F_1}{F_0}$ は、次の(6)式で与えられる。

$$\frac{F_1}{F_0} = \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2\varepsilon}{\omega_0}\right)^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2\varepsilon}{\omega_0}\right)^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \dots\dots\dots(6)$$

図8は、 $\frac{2\varepsilon}{\omega_0}$ をパラメータとして $\frac{f}{f_0}$ に対する伝達度を計算

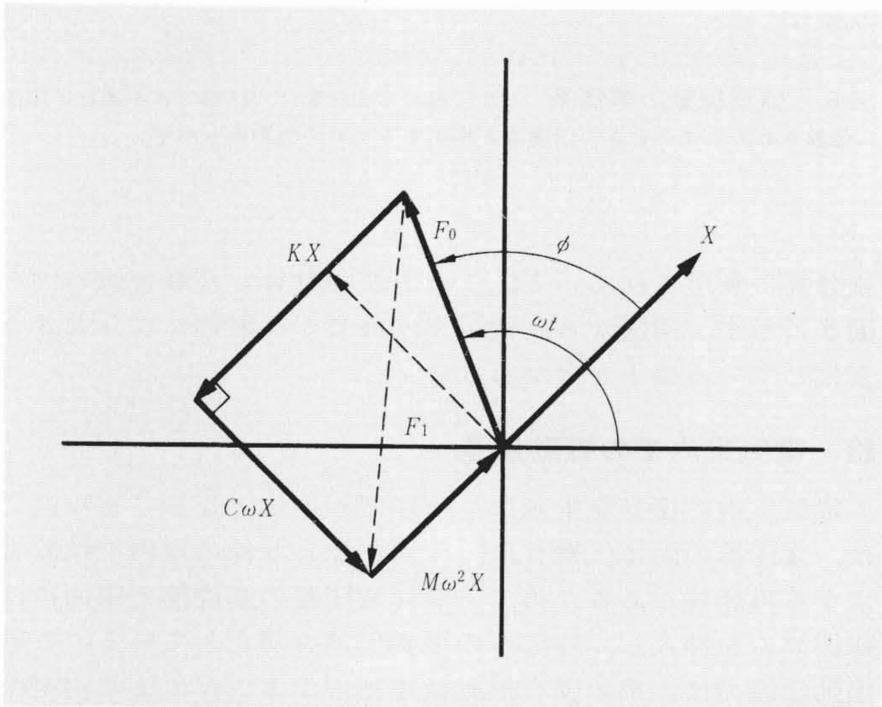


図7 強制振動ベクトル図 床面に伝達される力は、ばね力と減衰力のベクトル和で示される。

したもので、この図から $\frac{f}{f_0} = \sqrt{2}$ を境にして振動伝達度は変化する。

防振対策としては、防振材を $\frac{f}{f_0} > \sqrt{2}$ の範囲に設定し、 $\frac{2\varepsilon}{\omega_0}$ (ゴムの一般的数値としては、0.05~0.3)の小さいものを使用すれば防振効果を大きく期待できるが、地表面に設置される変電機器に対しては、地震などの安全性を考えると一般に $\frac{f}{f_0}$ 値は、3~6程度に設定される。ビルなどでは、建屋の影響により地震の振動数範囲が地表面振動数範囲よりも低いほうに偏在する傾向にあると考えられるため、 $\frac{f}{f_0}$ 値は、地表面よりも幾分大きく設定できる。そのため、防振効果も増大する。この傾向は、ビルが高層になればなるほど大きくなる。

固有周波数 f_0 は3.1項の(5)式から、

$$\frac{k}{M} = \omega_0^2 \text{と置くことより } f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \text{ (Hz) という式を得る。}$$

ここで、ばね定数 k 、機器質量 M に防振ゴムの定数を考慮すれば、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k s \cdot \gamma \cdot N \cdot g}{W}} \text{ (Hz) } \dots\dots\dots(7) \text{ となる。}$$

次に振動伝達度の計算例を示す。

計算条件は下記のとおりである。

- (1) 加振源振動数100 (Hz)
- (2) 変圧器重量： $W=9,000$ (kg)
- (3) ばね定数： $k_s=14,000$ (kg/cm)
- (4) 動的倍率： $\gamma=1.6$
- (5) 防振ゴム個数： $N=4$
- (6) 減衰定数： $\frac{2\varepsilon}{\omega_0}=0.2$

変圧器から床面への振動伝達は、前記の(6)式、(7)式から

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{14,000 \times 1.6 \times 4 \times 980}{9,000}} = 16 \text{ (Hz)}$$

$$\frac{f}{f_0} = \frac{100}{16} = 6$$

$$\frac{F_1}{F_0} = \frac{\sqrt{1 + 0.2^2 \times 6^2}}{\sqrt{[1 - 6^2]^2 + 0.2^2 \times 6^2}} = \frac{1.56}{35} = 0.044$$

したがって、床面への振動伝達度は4.4%程度となる。

4 ビル内設置機器の耐震強度

4.1 地震波

地下で発生した地震は、震央付近のものと地表面に現われるものとは全く異なったものとなり、後者のほうが大きく増幅されている。これはまた地盤の硬軟によっても変わり、地表面では複雑な振動を呈する。また地震波には、ある地盤に対し特定の周期で特に大きく振動する卓越周期(固有周期)が存在し、地表層の厚さに比例して振動周期が長くなる。一般に国内では、この振動数は地表面で0.5~10Hz程度と推定されている。このため、機器の耐震設計に当たっては、この卓越周期と共振をさせないようにすると同時に、十分な耐震強度を確保することが重要になる。図9に各地盤での地震動の発生ひん度と振動数の関係を示す。

4.2 機器の耐震解析

機器の耐震解析法としては静的法と動的法があるが、ビル内に設置される変電機器に対しては、次の(1)~(3)の理由により地震加速度が構造物のすべてに均等に加わることを前提とした静的法が一般的である。

- (1) 建物内での地震波の応答スペクトルは、0.2秒以下(固有振動数5Hz以上)では、小さくなる。
- (2) 機器の固有振動数は一般に10Hz以上であり、建物内での地震の振動数範囲は10Hzよりも低いほうに偏在する傾向にあり、機器との共振の可能性が小さい。
- (3) 機器構成の主な部材は鋼材であるため、最大応答値での

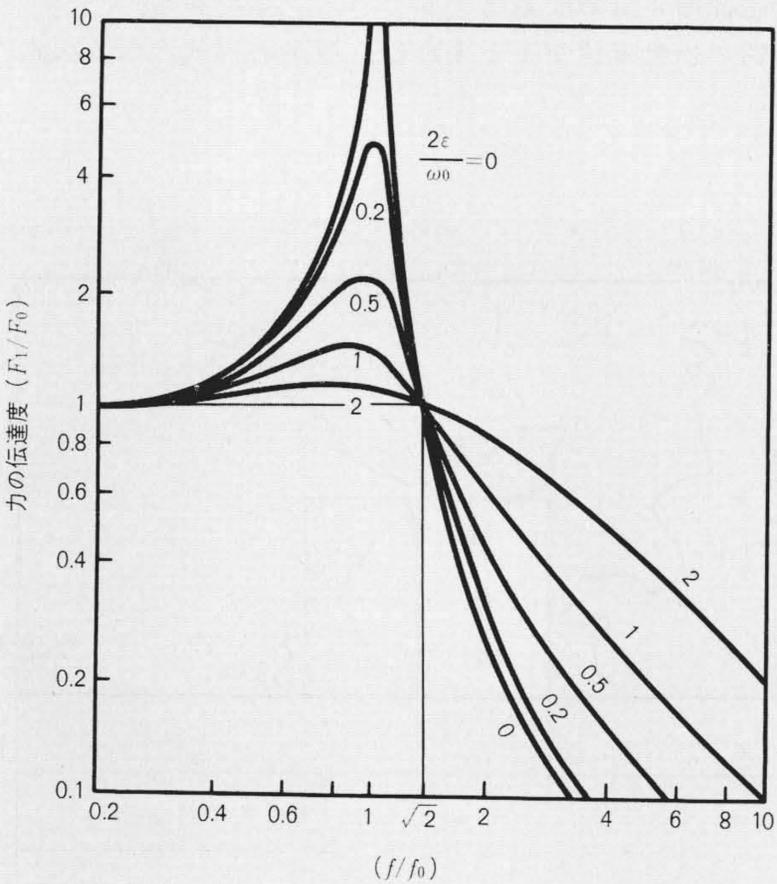


図8 力の伝達度 $\frac{f}{f_0} \geq \sqrt{2}$ を境として防振効果が期待される。特に $\frac{2\varepsilon}{\omega_0} < 1$ では効果が大きくなる。

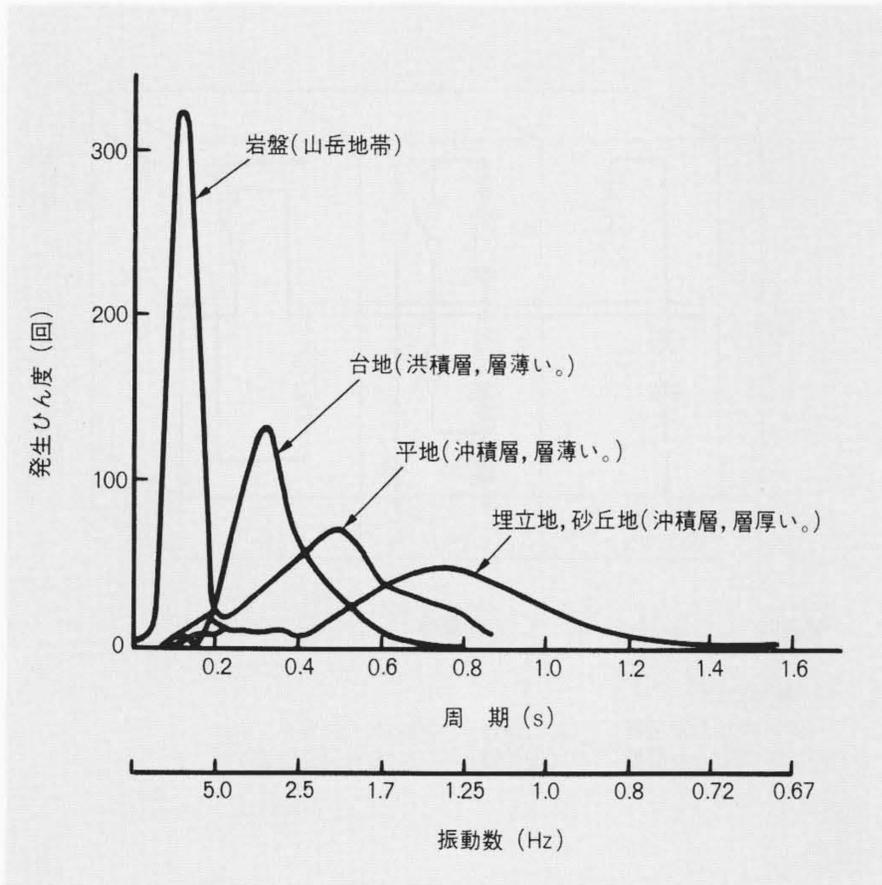


図9 各地盤の常時微動の振動特性とひん度 岩盤付近では、地震動の振動数は5 Hz以上であるが、地表付近では一般に1～4 Hz程度の発生ひん度が大半を占めている。

破壊はなく、繰返し荷重による疲労破壊が主体となる。建物の立地条件によって、設置される機器と共振する可能性がある場合には、コンピュータによる動的解析、若しくは振動試験により耐震強度を確認している。

4.3 建物内機器の静的加速度

静的加速度には、水平加速度と垂直加速度の両方が考えられるが、この両者には波形の相違及び襲来時間のずれがあることから、これらを分離して検討することが行なわれている。一般に、地震波の垂直加速度の建物での増幅率はごく小さいものと考えられ、水平加速度だけを用いる解析方法がとられている。このことから、建物内に設置される受変電機器に対する静的水平加速度は、次のように表わされる。

$$\text{機器に加わる静的水平加速度} = (\text{地表面静的水平加速度}) \times (\text{建物の増幅率}) \times (\text{装置の応答倍率}) \dots (8)$$

ビルが高層(柔構造は除く)になればなるほど地表面に対する振幅は大きくなるが、地震の振動数範囲が低いほうに偏るため、装置の応答倍率は小さくなる傾向にある。

地表面静的水平加速度を0.3gとすると、建物内(3階以下)では(建物の増幅率)×(配電盤類の応答倍率)は、従来の経験から5倍程度となるので一般に機器に加わる静的水平加速度は1.5gとなる。地震動での実際の建物の応答スペクトル例を図10に紹介する。本例でも振動数10Hz以上では、加速度、振幅共に小さくなっている。

4.4 電気室内設置機器の強度⁴⁾

受変電機器の地震に対して構造上最も注意を要する部分は、地震動により受ける力を支えるためにストレスの集中する基礎部の強度が問題になる。地震動により配電機器が受ける力は、転倒と滑動の二つが考えられ、いずれも地震動中の水平震度が直接の原因となる。したがって、機器の基礎部の耐震強度としては水平震度に十分耐える設計を行なう必要がある。図11に示す受変電機器に地震動が加わったときに機器がaを軸として転倒しない条件は次の(9)式で示される。

$$H \cdot K_h \cdot W \leq Lp + BW \dots (9)$$

- ここに H: 重心の高さ
- W: 総重量
- B: 重心線から据付ボルトまでの寸法
- L: 据付ボルト間の寸法
- K_h: 水平震動
- p: 据付ボルトに生ずる引張り力

次に、滑動作用により据付ボルトに加わる力p_sは次の(10)式によって求めることができる。

$$p_s = K_h W - \mu W \dots (10)$$

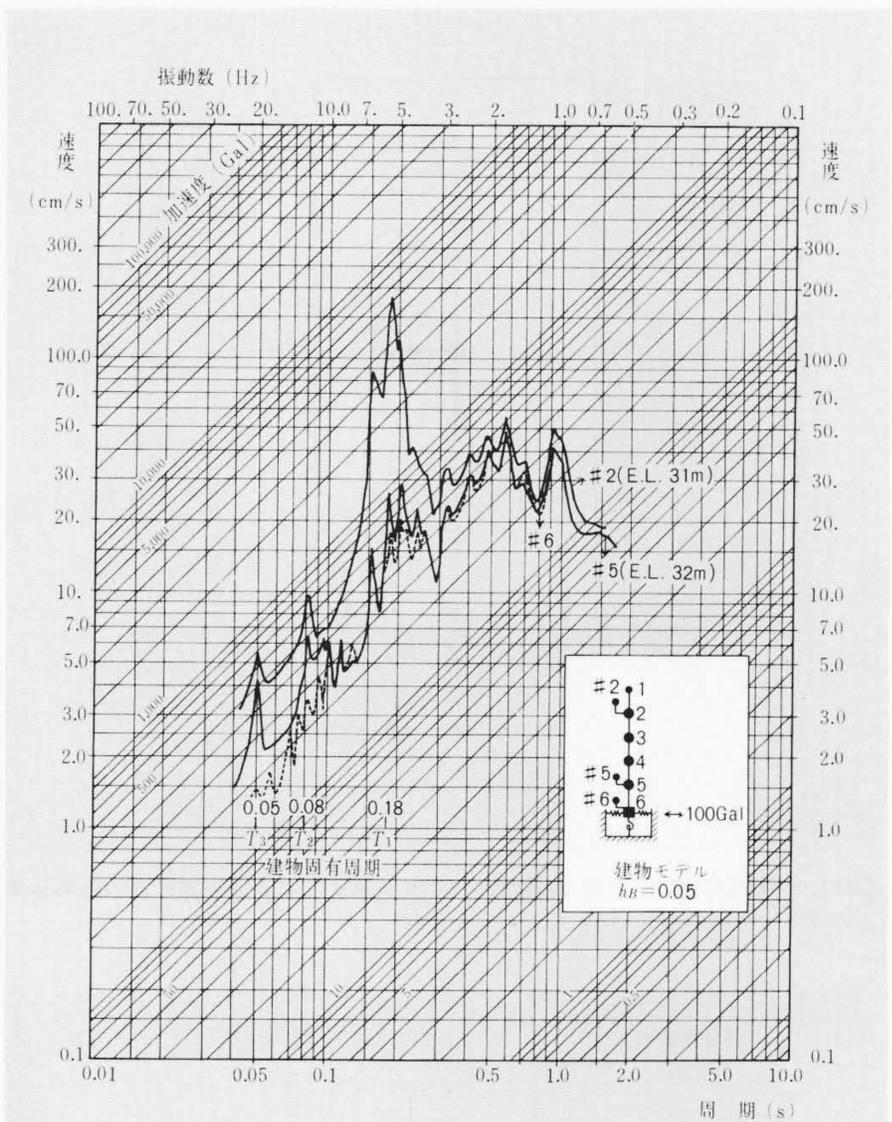
ただし、μは摩擦係数

ここで水平震動K_hは4.3項の(8)式で求められる値であり、建物の地震動によりその大きさは変化する。

4.5 動的解析例

4.5.1 三相一括形ガス絶縁開閉装置の計算例

図12は、立体骨組構造に模擬した計算モデルを作成して固有振動数を求め、その固有振動数でユニットを加振し変形状



建物モデル		入力地震動	
1. 全重量(t)	75,000	1. 波形	El Centro (NS) 1940
2. 固有周期(s)	一次 T ₁ 0.18 二次 T ₂ 0.08 三次 T ₃ 0.05	2. 最大加速度(Gal)	100
3. 減衰定数(%)	5	床上1質点モデル	
4. 支持地盤	花こう岩	1. 取付位置(図参照)	#2, #5, #6
		2. 減衰定数(%)	0.5

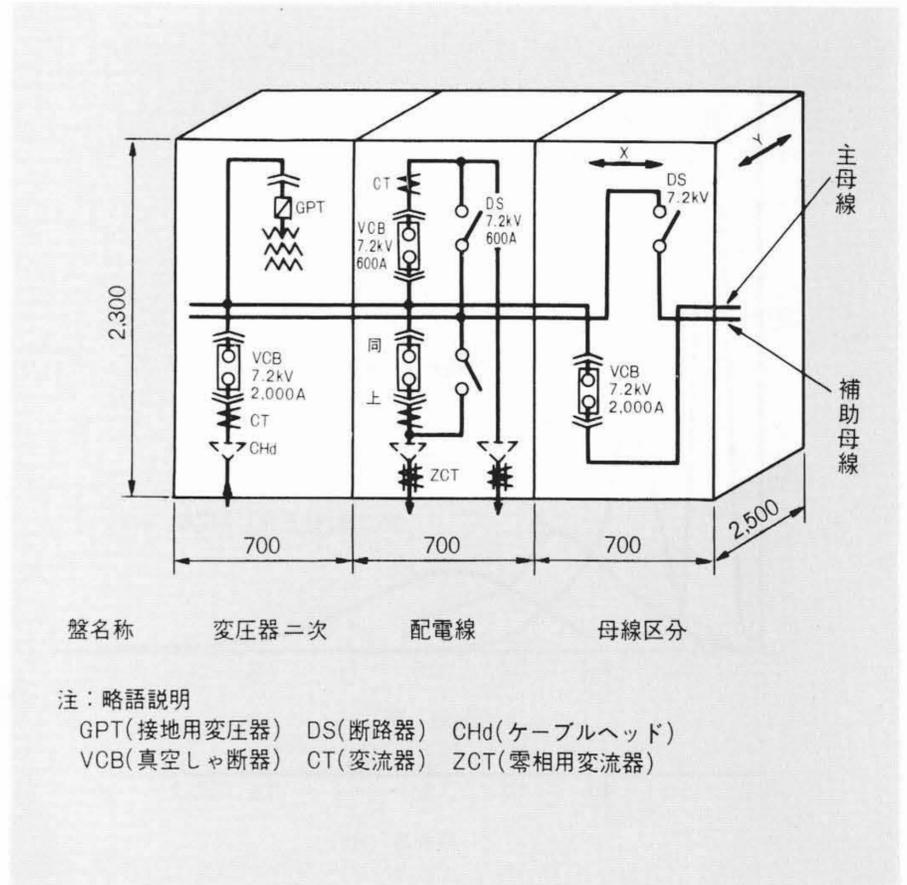
図10 建物モデルによる地震動の応答スペクトルの例³⁾ 地震波の振動数は、各高さ共に、1～7 Hz程度が大きく増幅され、#2の31mでは、6 Hz付近で最大の振幅となっている。10 Hz以上では小さくなっている。

態により各部の応力を求め、許容応力以下であることを確認している。なおこの有限要素法による動的解析精度は、汎用的に用いられる $\frac{1}{4}$ 縮小モデルユニットを製作し振動実験により検討した結果、85~135%の範囲にあることを確認している。

4.5.2 閉鎖配電盤での例

図13のブロックスケルトンに示す閉鎖配電盤3面を列盤構成とし、機器を実装した状態での共振試験及び加速度試験の実施結果を示す。共振試験では、左右方向(X)で10Hz以上、前後方向(Y)で12Hz以上の共振周波数であることを確認している。表1にその結果を示す。機器の応答倍率が高めに出ているのは正弦波連続試験のためであり、振動時間が長いこと大くなったものである。一般には振動時間は正弦波3波程度であるため、応答倍率は表1のデータよりも小さくなる。

加速度試験では、配電盤を加振速度0.3g、周波数10Hzで左右、前後方向に約10秒間加振しながらしゃ断器の投入、引外し動作を各2回行なって、継電器(誘導円板形)及びしゃ断器の誤動作、不動作のないことを確認している。



盤名称 変圧器二次 配電線 母線区分
 注：略語説明
 GPT(接地用変圧器) DS(断路器) CHd(ケーブルヘッド)
 VCB(真空しゃ断器) CT(変流器) ZCT(零相用変流器)

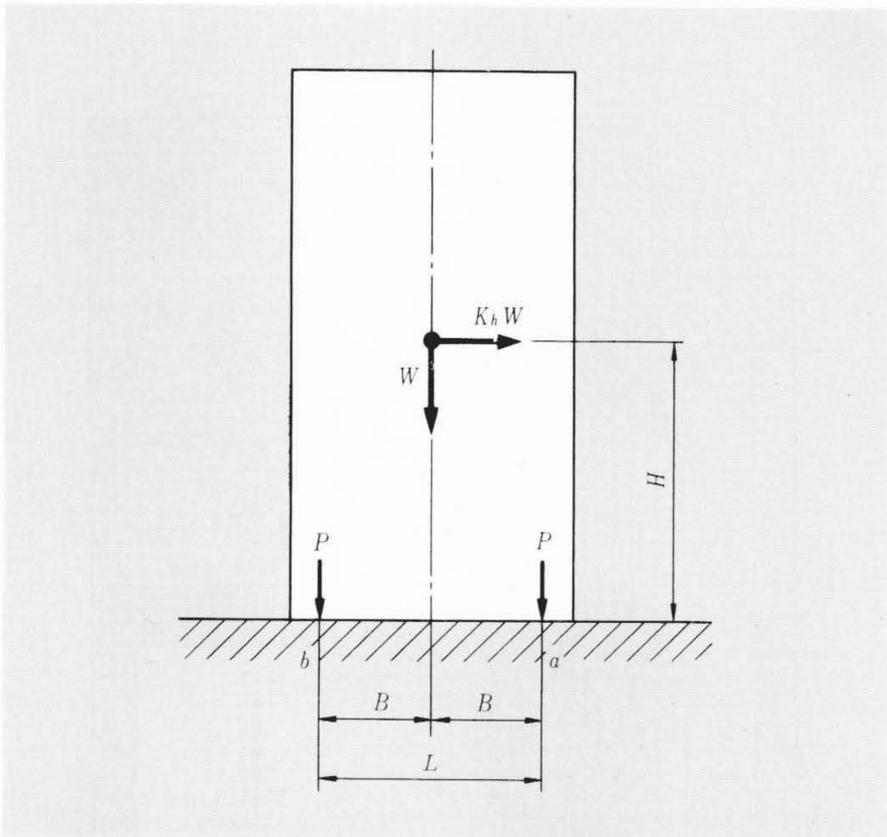


図11 機器に作用する地震力 水平震度による機器基礎部の耐震強度を示す。

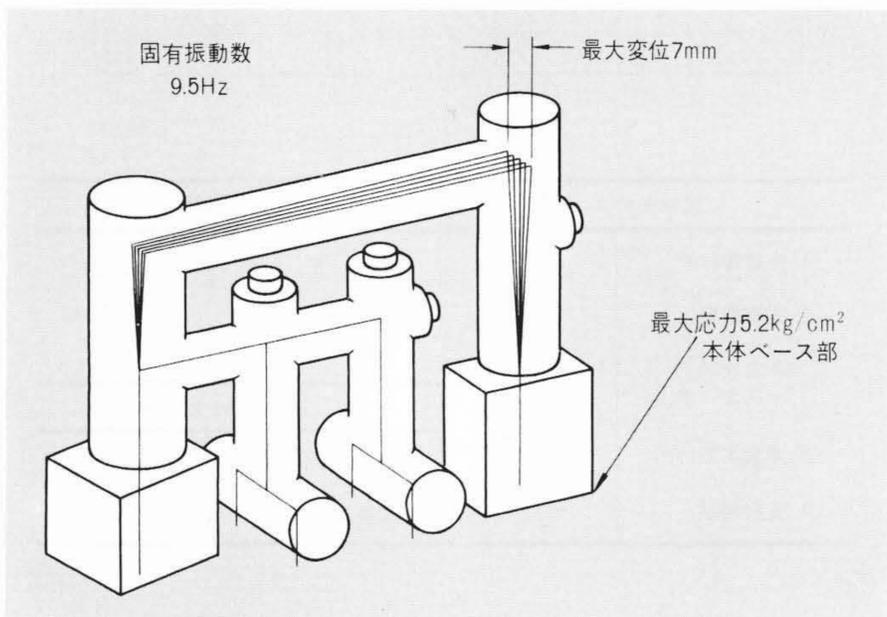


図12 ガス絶縁変電所耐震強度計算例 この例では、最弱部での応力は5.2kg/cm²<240kg/cm²であり、強度に対し十分な余裕をもっている。

図13 ブロックスケルトン 配電盤の内装機器を示す。

表1 共振試験結果 配電盤3面を振動台で加振し、加振周波数を1Hzずつ変化させて各点の応答倍率を測定し、共振周波数を求めたものである。

盤名称	測定点	共振周波数(Hz)		応答倍率	
		左右方向(X)	前後方向(Y)	左右方向(X)	前後方向(Y)
変圧器 2次	GPT自動連結部	10	14	8.5	7.5
	VCB導体接続部	14	16	3.3	9
配電線	フレーム上部	10	16	7.5	3
	上段リレー(OCRy)	"	12	8.8	10
	下段リレー(OCRy)	11	14	7.5	11
	可動盤表面 (下から200mm)	"	"	6	10
	上段VCB本体上部	"	20	3	6.5
	下段VCB本体上部	15	21	1.5	5.8
母線 区分	補助母線区分DS	11	16	3.7	6.5
	裏面扉上部	"	13	5	7

5 結 言

ビル用受変電設備で、最近特に要求されるようになってきた居住性向上のための騒音、振動、耐震などの問題を中心に解説した。これらの問題は機器単体の性能改善だけにとどまらず、建築物を含めて効率の良い解決を求める必要があるため、設備の計画時点から十分に検討を要するものとする。

参考文献

- 1) 石上, 外: ビル用受変電設備の計画, 日立評論, 59, 711~716 (昭52-9)
- 2) 堀: 多重反射を考慮したプラント騒音分布予測法の開発, 日本音響学会講演論文集 (昭53-5)
- 3) 電気技術指針: 原子力発電所耐震設計技術指針, 原子力編, JEAG 4601-1970
- 4) 電気協同研究会: 変電機器の耐震設計, 電気協同研究, 第34巻, 第3号 (昭53-8)