

波動エネルギー式地震感知器の開発

Development of the Seismic Waves Energy Sensing Earthquake Detectors

エレベーターの地震時管制運転に使用される地震感知器には、従来振動加速度を利用する方式が採用されてきたが、固有振動数の低い超高層ビルでは適切な動作をしない場合がある。

これを改善するため、特に超高層ビルのエレベーターに適した新しい地震感知器の開発を行なった。

まず、振動変位を利用する方式について検討したが、更に震度と十分よい相関があるとされる波動エネルギーを利用する方式について検討を進めた。そして波動エネルギーが振動変位と振動速度の積に比例することを明らかにし、世界で初めて波動エネルギー式地震感知器の開発に成功した。

本感知器の採用によって、エレベーターの地震時管制運転が一段と適切に行なわれるものと期待される。

小野田芳光* *Yoshimitsu Onoda*
山腰喬任** *Takatō Yamakoshi*
青木勝美*** *Katsumi Aoki*

1 緒 言

エレベーターには地震発生時にその地震の強さに応じた安全運転が行なえるようにするため、これを地震感知器で検出し、震度V程度未満の地震時には地震後の点検ののち引き続き運転を継続する指令を、また震度V程度以上の強い地震時には乗客の早期避難による安全が図れるようにエレベーターを最寄り階に停止させるといった指令を与えて、管制運転を行なうものが増加してきている。

この管制運転の指令を出す地震感知器には、従来、地震動の振動加速度を感知する方法が採用され、中、低層ビルでは有効であった。しかし、固有振動数の小さな柔構造の超高層ビルでは大きな地震動でも比較的ゆっくり揺動するため、振動加速度が小さく、加速度式地震感知器が感知しない場合があった。

しかし、ゆっくり動く反面、建物の揺れ幅すなわち振動変位の振幅は大きいので、従来の振動加速度の要素ばかりでなく、振動変位の要素を加味した地震感知器の開発が急務とされていた。

今回、この点について検討を進め、振動加速度と振動変位を併用する方式を開発するとともに、更に地震感知器について根本的に見直しを行ない、震度と非常により相関があるとされている波動エネルギーを利用した方式の検討を進めた。そして特に、超高層ビルのエレベーターの地震時管制運転に威力を発揮する波動エネルギー式地震感知器を、世界で最初に開発することに成功した。

2 従来の地震感知器の要改善点と変位感知器の開発¹⁾

表1に従来の超高層ビルのエレベーターの地震時管制運転の例を示す。

都内のAビルでは加速度式地震感知器の低加速度感知レベルを30Gal (Galとは加速度の単位でcm/s²と同じ)とし、これが感知するとエレベーターを最寄り階に停止させ所定時間経過後、自動的に運転を再開させる。また、高加速度感知レベルは60Galで、これが感知すると最寄り階に停止して休止し、点検後手動で運転を再開するようにしている。

Bビルの管制運転動作は、低加速度の感知レベルが80Gal、高加速度の感知レベルが100Galで、その他はAビルとほぼ同じである。

ところで、表2に示すように昭和58年5月26日の日本海中部地震で、上記のAビルの最上階では±10cmの大きな揺動があった。このように大きな揺動では、テールコードが引っ掛るなど事故発生のおそれがあり管制運転を行なうべきであっ

表1 超高層ビルの地震時管制運転の例 東京都のある超高層ビルに採用されている例を示す。

	低加速度感知	高加速度感知
Aビル	設定レベル30Gal 最寄り階に停止し、10分間待機、その後復帰する	設定レベル60Gal 最寄り階停止して休止、点検後復帰する。
Bビル	設定レベル80Gal、その他は上と同じ。	設定レベル100Gal、その他は上と同じ。

注：Galは、加速度の単位記号で、cm/s²と同じ。

表2 Aビルの振動の状況 ビルの振動に大きな差があるのに、加速度は13Galから30Galとあまり差がない。加速度が小さいほうが大きな地震動と感ずる場合もあることを示す。

	振 動 の 状 況	管制の状況
昭和58年5月26日 (日本海中部地震) ビル最上階	0.2Hz (周波数) ±16Gal (加速度) ±10cm (変 位)	管制すべきであったが、装置動作せず。
昭和58年8月8日 (神奈川県西部地震) ビル最上階	(3Hz, ±30Gal, ±0.08cm) →(0.2Hz, ±1.6Gal, ±1cm)	管制装置が不必要に動作した。
昇降路ビット (常時微振動)	50Hz ±13Gal ±0.13μm	—

* 日立エレベーターサービス株式会社 工学博士 ** 日立エレベーターサービス株式会社 *** 日立製作所水戸工場

たが、振動加速度が16Galであったため、30Galに設定されていた低加速度の感知レベルにも達せず、管制運転指令は出されなかった。

一方、昭和58年8月8日の神奈川県西部地震では、Aビルの最上階の振動が3 Hz, ±30Gal, ±0.08cmから0.2Hz, ±1.6 Gal, ±1 cmへ推移した後減衰していったが、地震動の初期の±30Galを地震感知器が感知して管制運転指令が出された。しかし、この地震動は管制運転を行なうほどのものでなかったため、更に管制運転に適した地震感知器の開発が望まれた。

その後このAビルには、地震観測を強化するため観測装置が増設された。この装置は、ビルの最上階の床面と最下階のエレベーター昇降路ピットの床面のいずれかの振動加速度が5 Galを超えると自動的に記録を開始するようにしていたが、全く静止していると考えられるピットの床面にセンサを設置すると、直ちに記録を開始するという現象が認められた。

調査の結果、近くのコンプレッサの振動が伝わり、床面に50Hz, ±13Gal, ±0.13μmの振動が発生していることが分かった。

以上述べたように、このAビルでは13Galから30Galの振動加速度が感知されたが、周波数により振動変位の振幅に大きな差が生じ、感じられる地震動にも差が生ずることが分かった。そこで、振動加速度だけでなく、振動変位を感知する変位感知器を開発して併用することを計画した。

表3に、開発した管制用変位感知器の構成と主な仕様を示す。すなわち、直角2方向に設置した加速度検出器の出力を、積分器で2回積分して変位を求め、比較器で設定値と比較して管制信号を発生させるものである。

この装置の開発では積分器で2回積分していることから、特にドリフトの抑制に注意を払った。

本感知器の感知範囲は0～10cm、周波数範囲は0.07～20 Hz、信号発生レベルは高低2段の設定が可能で、経時ドリフト、温度ドリフト、電源電圧の変動の影響などはほとんどない。

前述のAビルにこの変位感知器を設置するに当たっては、シミュレータで種々解析した結果、振動変位の振幅が3 cmを超えたときには減速運転、5 cmを超えたときには最寄り階に停止して10分間待機とした。

表3 管制用変位感知器の構成と主な仕様 管制用の感知器は、長年月にわたり安定して動作することが必要である。ドリフトの抑制に特に注意して開発した。

加速度検出 → 積分 → 積分 → 比較器 → 管制信号 加速度 a_1 速度 v_{y1} 変位 y_1 加速度検出 積分 積分 比較器 管制信号 a_2 v_{y2} y_2 注：a_1, a_2は平面内の互いに直角方向の加速度	
検出範囲	0～10cm, 平面内直角2方向
周波数範囲	0.07～20Hzで+5～-10%以内
信号発生レベル	2方向とも0.1～10cmの範囲で高低2段設定可能 (合計4信号出力)
経時ドリフト	8時間で0.003cm以内
温度ドリフト	-10～40℃で0.01cm以下
電源電圧変動	+10～-20%で影響なし

3 地震の震度と波動エネルギー式地震感知器の開発

前述の変位感知器を併用する方式が地震感知器として最適なものかどうか疑問が残るので、この地震感知器について根本的に見直すため、まず地震の震度について検討した。

気象庁で定めている震度階の定義によれば、建物に被害が発生するのは震度V以上である。

昭和59年3月に改訂されたエレベーター耐震設計施工指針²⁾では、表4に示すようにエレベーターの耐震設計の目標として、震度Vの下位レベルまでエレベーターの機能を保持し、地震後の所定点検後、直ちに運転を続けることができることなど、が述べられている。

しかし、この震度を的確に測定できる装置は現在のところまだなく、気象庁から発表される震度は観測員の体感によって決められている³⁾。

一般に知られている加速度と震度の関係は、昭和18年、当時東京大学教授であった河角 広理学博士が定めたもので⁴⁾、図1に示すように例えば震度IVは加速度が25Galから80 Galの範囲とされている。しかし、気象庁の観測調査によれば、この範囲の加速度は同図に示すように、震度がIIからIVの広い範囲にわたっている^{5),6)}。

このため、震度を的確に測定できる装置の開発が各方面で進められた。

岐阜大学教授の村松郁栄理学博士は速度と震度の関係を発表しており⁷⁾、加速度よりも良好な相関を得ている⁵⁾。

気象庁気象研究所の主任研究官高木 聖理学博士は震度と各種物理量の相関について研究し⁸⁾、震度が波動エネルギーの最大値と最もよい相関があることを発見したが、測定器に

表4 エレベーターの耐震設計目標 昭和59年3月に改訂されたエレベーター耐震設計施工指針²⁾に述べられている目標である。

気象庁震度階	エレベーターの耐震設計目標
震度Vの下位レベル	エレベーターの機能を保持し、地震後所定の点検ののち直ちに運転を続けることができる。
震度Vの上位レベル以上	地震感知器と連動の管制運転によって、かごを最寄り階に停止させる。 以下、略す。

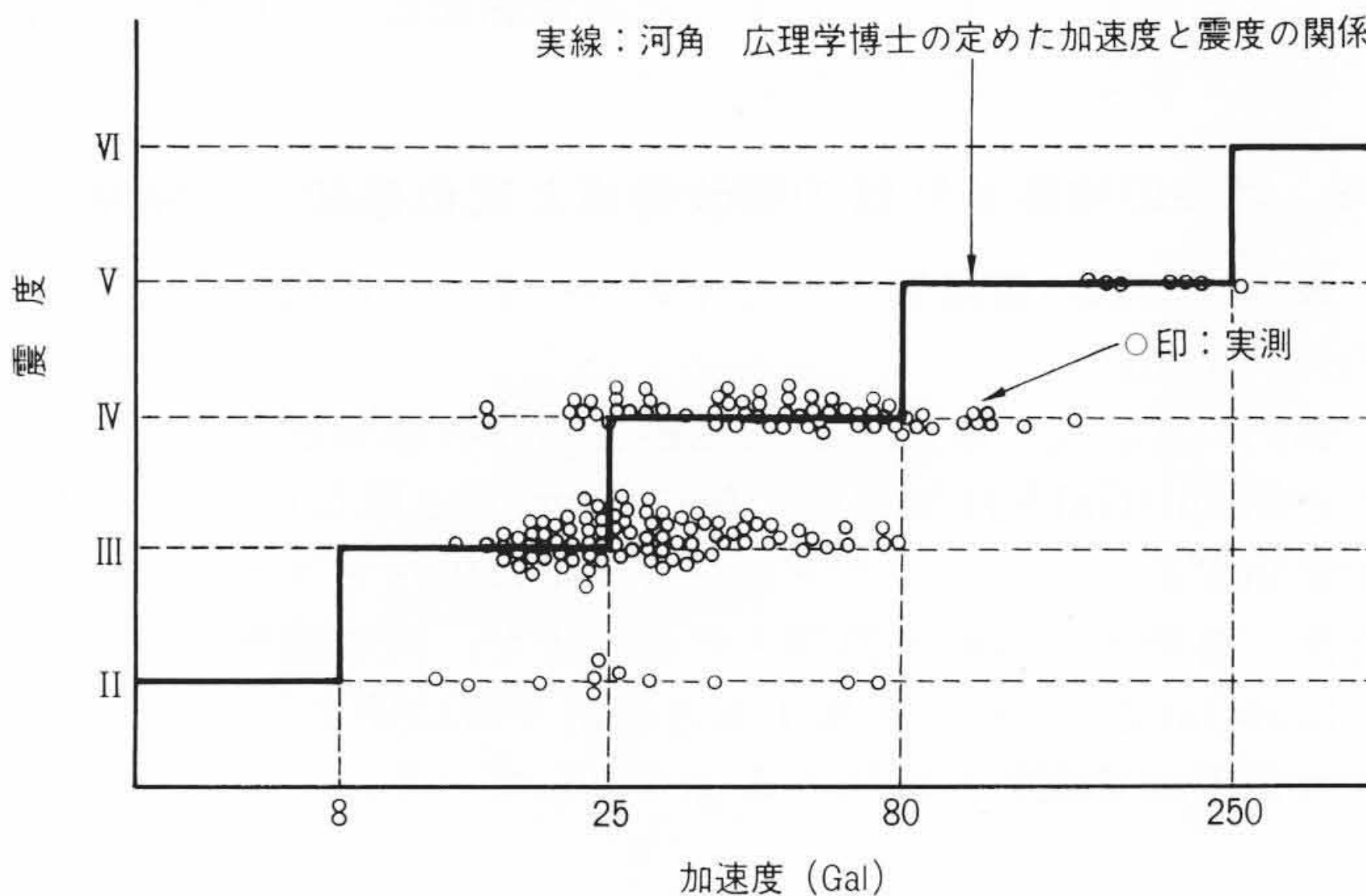


図1 加速度と震度の関係⁵⁾ 従来一般に知られている加速度と震度の関係について、気象庁気象研究所地震火山研究部長市川政治理学博士が調査した結果⁵⁾で、相関があまりよくないことが分かる。

これまで適当なものなかった。

波動エネルギーとは地震波動のもっているエネルギーである。図2に示すように地震波がある微小面積 ds に到達してから半周期経過すると、地震波動は半波長すなわち $\lambda/2$ (λ :波長)だけ前方へ進む。

地震波にはP波(Primary Wave), S波(Secondary Wave)などがあるが、エネルギー的にはS波だけを考えれば十分である。

S波は横波であるから、進行方向と直角の方向に変位 y が生じている。この y を時間 t で微分したのが、その点の振動速度 v_y である。

いま、 $ds \cdot (\lambda/2)$ の体積内の波動エネルギーを W とすれば、

$$W = ds \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{(T/2)} \int_0^{T/2} \left\{ \frac{1}{2} \rho \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} \mu \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right\} dt \cdots (1)$$

となる。

ここに T : 地震動の周期

ρ : 媒質の単位体積当たりの質量

μ : 媒質の剛性率

であり、また(1)式の積分記号内の

$$\frac{1}{2} \rho \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 = w_v \cdots (2)$$

は単位体積当たりの運動エネルギーであり、

$$\frac{1}{2} \mu \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 = w_s \cdots (3)$$

は単位体積当たりのひずみエネルギーである。ところで、 w_s は

$$\begin{aligned} w_s &= \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot \left(\frac{dy/dt}{dx/dt} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot \frac{1}{v_s^2} \cdot \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \\ &= w_v \cdots (4) \end{aligned}$$

となって、 w_s と w_v とは等しい。ただし、上記の式で v_s はS波の伝播速度で、次の関係がある。

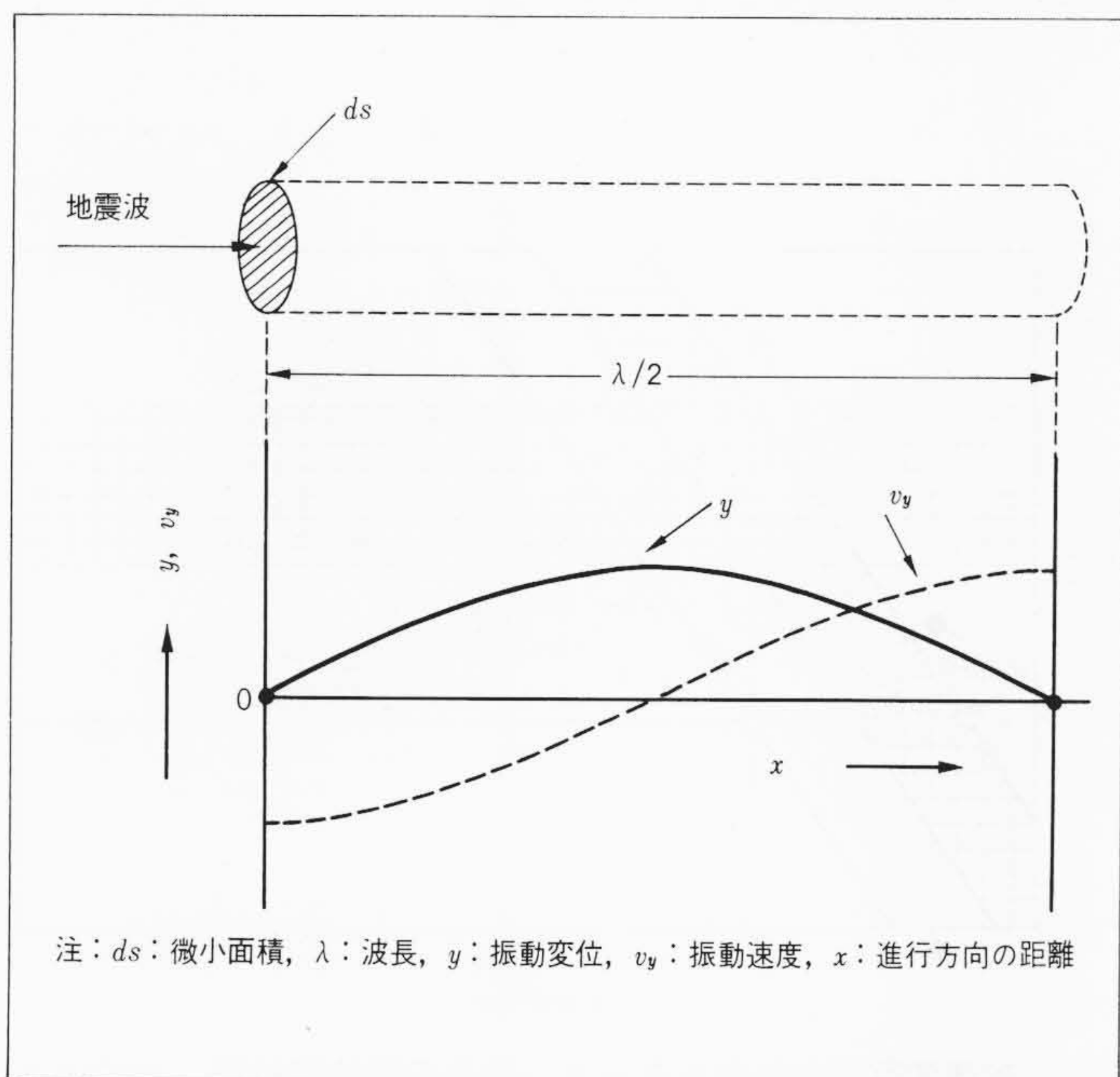


図2 地震波動の状況 地震波がある微小面積 ds に到達してから半周期経過したときの地震波動の模様を示す。

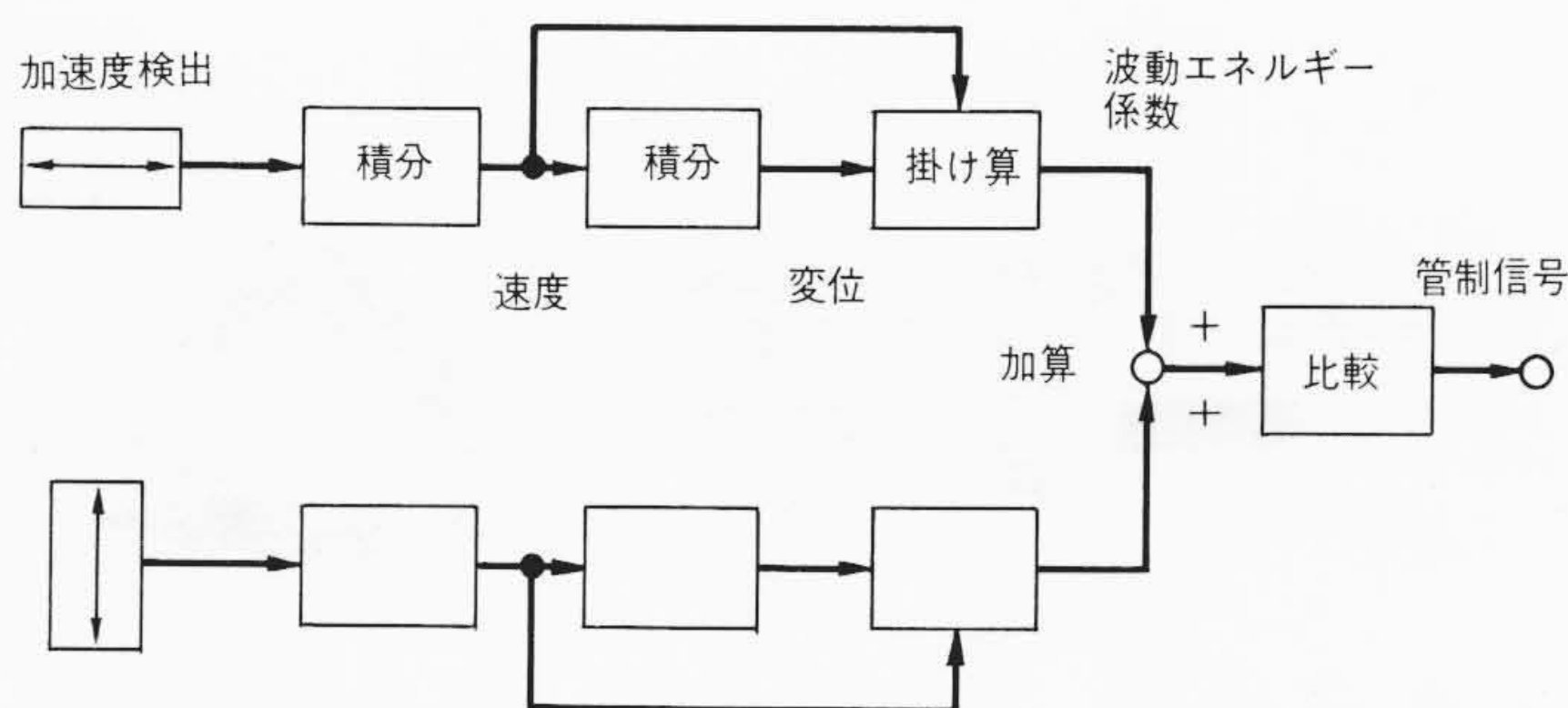


図3 波動エネルギー係数の検出 波動エネルギーを直接検出することが困難なため、波動エネルギーと比例関係にある波動エネルギー係数(速度と変位の積)を検出する回路の構成を示す。

$$v_s = \frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \cdots (5)$$

いま、振動変位 y が次式で表わされるものとする。

$$y = D \cdot \sin 2\pi f t \cdots (6)$$

ここに、 f は振動周波数で、

$$f = 1/T \cdots (7)$$

であり、 D は振動変位 y の振幅である。

(2)~(7)式の関係から(1)式は次のようになる。

$$W = \pi^2 \cdot ds \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu} \cdot \left(\frac{D^2}{T} \right) \cdots (8)$$

ここで、 $\pi^2 \cdot ds \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu}$ はほぼ一定であるから、 D^2/T を求めれば W が求まる。しかし、次に述べる問題がある。

(1) 周期 T は少なくとも1サイクル以上経過しないと分からない。特に波形が乱れていると求めるのは容易でない。

(2) また、周期 T が求まったとしても、 D^2/T の演算すなわち割算はめんどろで装置が複雑、高価となる。

そこで、この波動エネルギーを容易に求めることについて検討した。いま、振動変位 y と振動速度 v_y の積を e_t とすると、

$$\begin{aligned} e_t &= y \cdot v_y \\ &= D \cdot \sin 2\pi f t \cdot 2\pi f \cdot D \cdot \cos 2\pi f t \\ &= \pi \cdot (D^2/T) \cdot \sin 4\pi f t \\ &= e \cdot \sin 4\pi f t \cdots (9) \end{aligned}$$

ここに、 e は e_t の振幅で

$$\begin{aligned} e &= \pi \cdot (D^2/T) \\ &= (\pi \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu} \cdot ds)^{-1} \cdot W \cdots (10) \end{aligned}$$

$(\pi \cdot \sqrt{\rho \cdot \mu} \cdot ds)^{-1}$ はほぼ一定であるから、 e は W に比例する。そこで、 e を波動エネルギー係数と名づけたが、管制信号の発生は e_t と比較してもできるので、実際には e_t も波動エネルギー係数と考えることができよう。

波動エネルギー係数は図3に示すように、加速度検出器の出力を積分して得た速度と、それを更に積分して得た変位を掛算器で掛け算して求める。

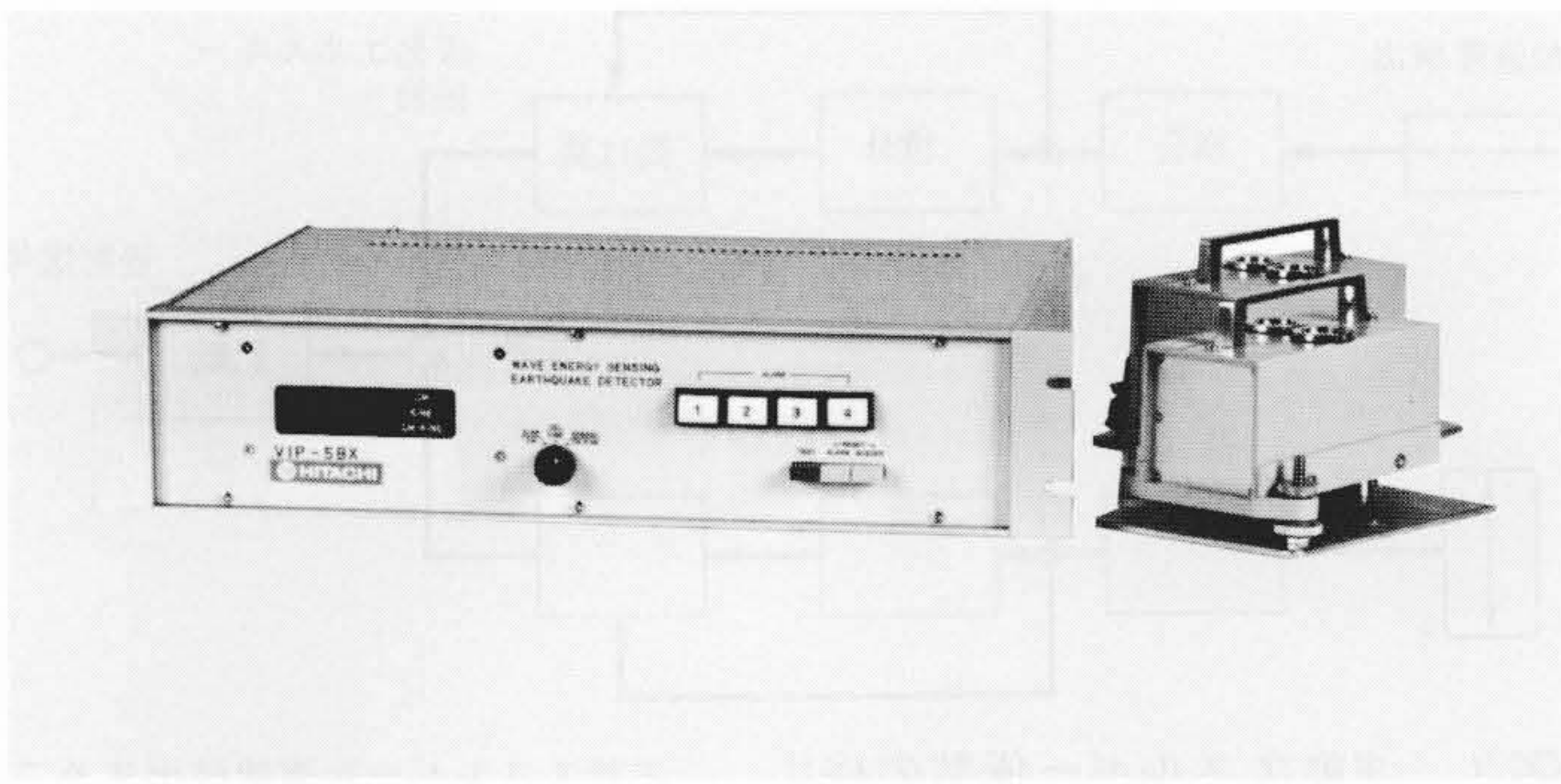
平面内の任意の方向の波動エネルギー係数は平面内直角2方向の波動エネルギー係数を加算器で加算して得られる。

すなわち、直角2方向の波動エネルギー係数を e_{t1} , e_{t2} とし、その和を e_t とすれば次式のようなになる。

$$\begin{aligned} e_t &= e_{t1} + e_{t2} \\ &= D_1 \cdot \sin 2\pi f t \cdot D_1 \cdot 2\pi f \cdot \cos 2\pi f t \\ &\quad + D_2 \cdot \sin 2\pi f t \cdot D_2 \cdot 2\pi f \cdot \cos 2\pi f t \\ &= \pi \cdot \left(\frac{D_1^2 + D_2^2}{T} \right) \cdot \sin 4\pi f t \cdots (11) \end{aligned}$$

ここで、 D_1 , D_2 は直角2方向の振動変位の振幅である。

この場合の e_t の振幅も e と表わすことにすると、



検出範囲	波動エネルギー係数(平面内全方位) 0～5,000kine・cm 振動速度(平面内全方位) 0～70kine 振動変位(平面内全方位) 0～70cm
周波数範囲	0.07～10Hz
信号発生レベル	波動エネルギー係数、振動速度、振動変位のいずれかについて高低4段レベル設定可

注：kine(速度の単位で、cm/sと同じ。)

図4 日立波動エネルギー式地震感知器 波動エネルギーが波動エネルギー係数と比例関係にあることを利用して、世界で最初に開発に成功したもので、マイクロコンピュータを主体に構成してある。

表5 震度と各種物理量の関係の比較 表中の波動エネルギー係数は岐阜大学教授の村松郁栄理学博士の研究などと整合させるため、気象庁気象研究所の高木 聖主任研究官が決めた波動エネルギーを $\frac{1}{2}$ にし、かつ波動エネルギー係数に換算して求めた。

震度階	0	I	II	III	IV	V	VI	VII
波動エネルギー係数 (kine・cm)	0～0.003	0.003～0.03	0.03～0.3	0.3～3	3～30	30～300	300～3,000	3,000以上
加速度* (Gal)	0～0.8	0.8～2.5	2.5～8	8～25	25～80	80～250	250～400	400以上
速度** (kine)	0～0.13	0.13～0.4	0.4～1.3	1.3～4	4～13	13～40	40～130	130以上

注：* 河角 広理学博士が発表、** 村松郁栄理学博士が発表

$$e=\pi\cdot(D_1^2+D_2^2)/T$$
$$=\pi\cdot(D^2/T) \dots\dots\dots(12)$$

となり、 e (もしくは e_t)が任意の方向の波動エネルギー係数であることが明らかである。実際にはこのようにして求めたものを、比較器で設定値と比較して管制信号を発生する。

図4は開発した波動エネルギー式地震感知器である。検出範囲は0～5,000kine・cm(kineとは速度の単位で、cm/sと同じ。)、周波数範囲は0.07～10Hz、信号発生レベルは高低4段のレベル設定が可能である。

本装置はマイクロプロセッサを主体に構成しており、スイッチの切換でプログラムを変更し、平面内全方位形の管制用速度感知器もしくは管制用変位感知器としても使用できる。

ところで、前述のように加速度と震度の関係を前記河角 広理学博士が⁴⁾、速度と震度の関係を村松郁栄理学博士⁷⁾が発表しているが、波動エネルギー係数と震度の関係について気象研究所の研究結果⁸⁾と村松郁栄理学博士の報告など^{5),7)}を参考にし、一つの案を定め、比較して表5に示す。また、上記気象研究所の報告⁸⁾を利用し、波動エネルギー式と加速度式の地震感知器によって松代群発地震を計測した場合のシミュレーション結果を図5に示す。波動エネルギー係数が観測員体感震度とよい相関があることが分かる。

4 エレベーターの地震時管制運転に対する比較

波動エネルギー式地震感知器が観測員の体感震度とよい相関があるとしても、実際のエレベーターの地震時管制運転に対してはどのようなになるか、これについて検討する。

いま、表5の加速度と震度の関係から得られる震度を加速度震度、波動エネルギー係数と震度の関係から得られる震度を波動エネルギー震度とすると、波動エネルギー式地震感知器は波動エネルギー震度で動作するものであるとも言える。

図6に示すように、加速度震度は周波数に無関係に加速度が一定となるが、波動エネルギー震度は周波数の1.5乗に比例して加速度が変化する。次にこれについて説明する。

振動変位 y が(6)式のように変化していると振動変位 v_y は y を時間 t で微分したものであるから、

$$v_y=2\pi f\cdot D\cdot\cos 2\pi ft \dots\dots\dots(13)$$

となり、振動加速度 a_t は v_y を更に微分し、

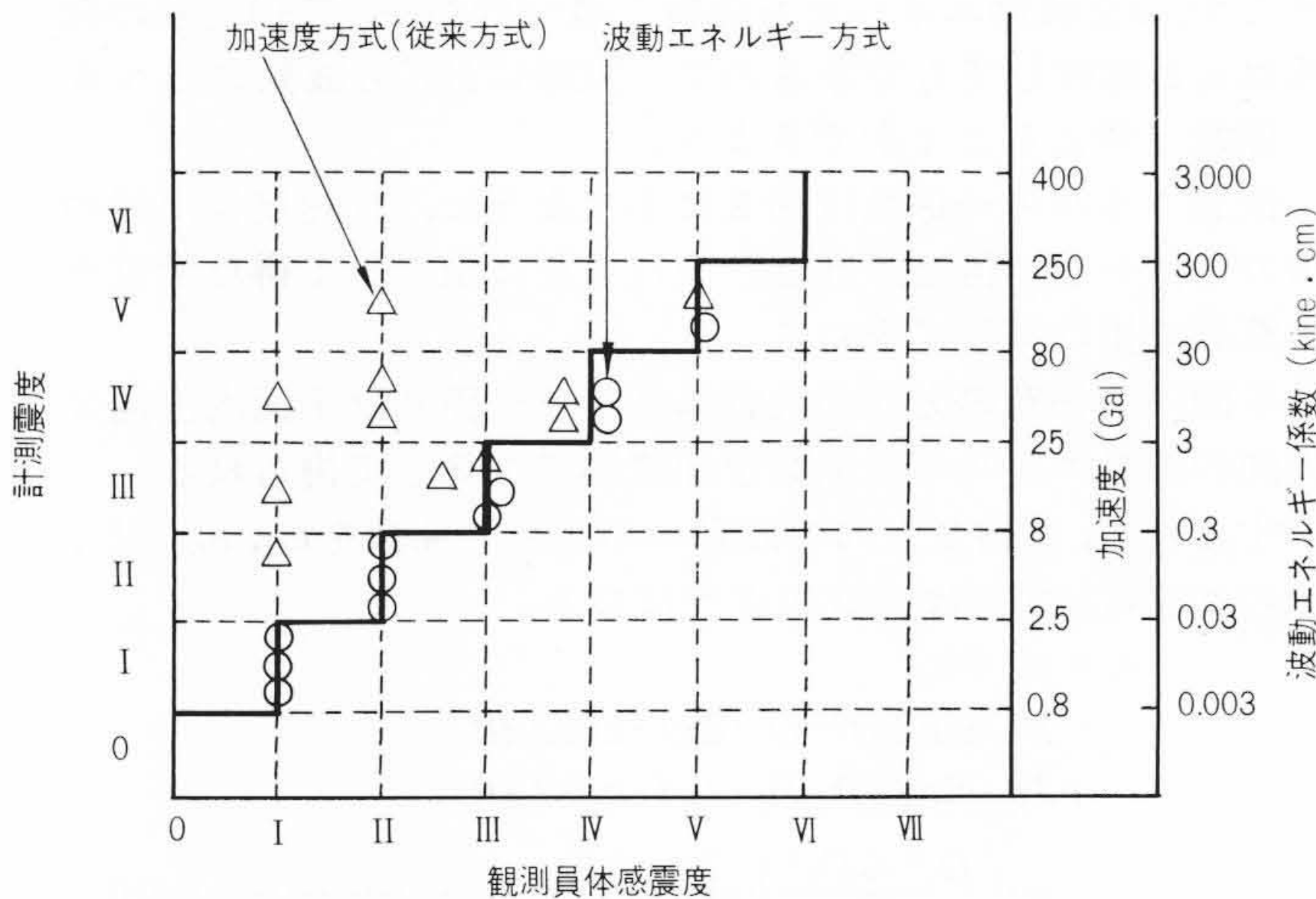


図5 松代群発地震のシミュレーション結果 加速度方式に比べて波動エネルギー方式は、観測員の体感震度と相関がよいことを示す。

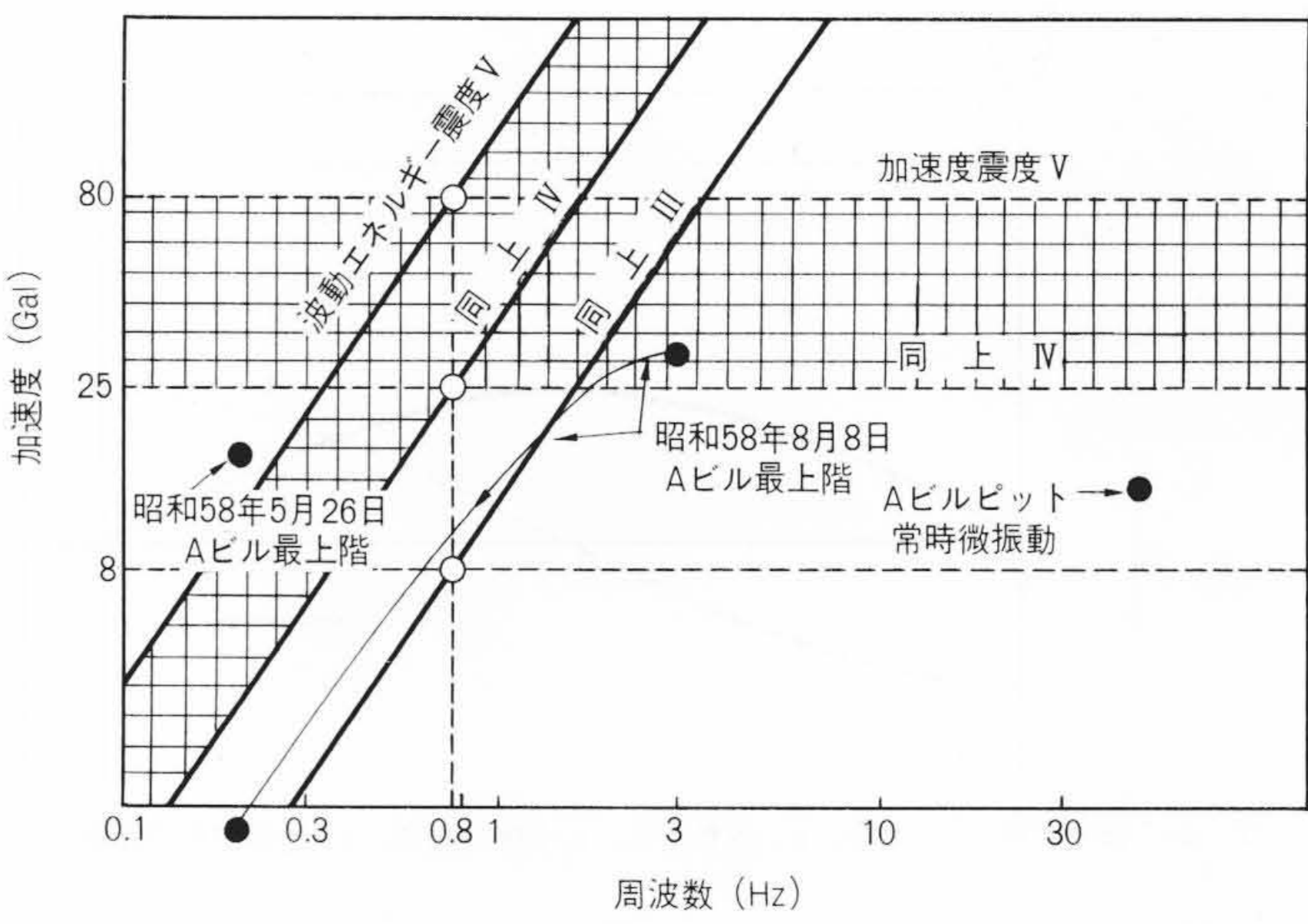


図6 加速度震度と波動エネルギー震度の周波数特性 波動エネルギー式地震感知器は、波動エネルギー震度によって動作する。周波数の1.5乗に比例して感知加速度が変化するを示す。

$$a_t = -(2\pi f)^2 \cdot D \cdot \sin 2\pi ft \cdots \cdots \cdots (14)$$

となる。 a_t の振幅を a とすると、

$$a = (2\pi f)^2 \cdot D \cdots \cdots \cdots (15)$$

である。(7), (12), (15) 式から

$$a = 4\pi \sqrt{\pi \cdot e} f^{1.5} \cdots \cdots \cdots (16)$$

が得られ、 e したがって波動エネルギー震度を一定とした場合、周波数の1.5乗に比例して加速度が変化することが分かる。

加速度震度と波動エネルギー震度は周波数0.8Hzの近傍で一致する。なお、図6に震度IVのみハッチングして示す。

前記Aビルの振動の状況が同図の黒丸である。表6にこの状況をまとめて示す。

すなわち、日本海中部地震のときは加速度震度がIIIのため加速度式地震感知器が感知せず、管制運転の必要があったにもかかわらず装置は動作しなかった。しかし、波動エネルギー震度はVと評価されるので、波動エネルギー式地震感知器の場合には適切に動作できることが分かる。

神奈川県西部地震では、加速度震度はIVからIへ変化した。が、地震初期のIVを加速度式地震感知器が感知して、 unnecessary 管制運転が行なわれた。しかし、波動エネルギー震度はIIからIIIなので、波動エネルギー式地震感知器の場合には、 unnecessary 管制運転を行なうことはなかったと考えられる。

昇降路ピットの常時微振動の場合は、加速度震度はIIIであるが、波動エネルギー震度は0なので、これも波動エネルギー震度で考えたほうが実際の状況とよく合う。

エレベーター耐震設計施工指針によると、地震感知器の設定値は建築物の高さに応じて表7に示すように選ぶべきことが述べられている。

いま、建築物の高さを表8に示すように40m, 80m, 120m, 200mとする。建物の固有周期 T_0 (秒)は一般に建物の高さ h (m)の $\frac{1}{40}$ で近似できる場合が多いので、それらの固有周期 T_0 を1秒, 2秒, 3秒, 5秒とする。

特低設定値には表7の最も低い値を選ぶことにすると、80Gal, 30Gal, 25Gal, 5~8Galとなる。ただし、5~8Galは前述の変位感知器を用い、感知レベルを3~5cmにしたときの0.2Hzに対する加速度であり、0.2Hzは固有周期が5秒のときの固有振動数である。

一方、波動エネルギー式地震感知器を用い、その設定値を13kine・cm一定として建屋と地震動が共振したときの感知加速度を a_0 とすると、(16) 式で $f=1/T_0$ とすることにより、

$$a_0 = 80 \cdot T_0^{-1.5} \cdots \cdots \cdots (17)$$

となり、これを計算して示すと表8最右欄のようになって特低設定値とよく似た値となる。

すなわち、波動エネルギー式地震感知器を採用すると、建屋の高さや固有周期などを考慮することなく感知レベルを適切に設定することが期待できる。

この場合、地震動の卓越周波数と建屋の固有振動数が一致していると、加速度式も波動エネルギー式も同様な動作となるが、地震動の卓越周波数が常に建屋の固有振動数と一致することはありません。前述の神奈川県西部地震の場合がその例で、このときは地震初期の3Hz, 30Galを加速度式地震感知器が感知して、 unnecessary 管制運転を行なった。

従来の加速度式地震感知器が超高層ビルで問題を生ずる大きな理由の一つは、地震動の卓越周波数が1Hz程度の場合が多いのに対し、超高層ビルの固有振動数が0.2Hz程度と大きく外れていることによるものであろう。

先に、Aビルの例を挙げて説明したが、これまでの超高層ビルの例をまとめてみると表9に示すようになる。

表6 Aビルにおける加速度震度と波動エネルギー震度 波動エネルギー震度は、実際の建屋の揺れの実態とよく合っていることを示す。

	振動の状況	加速度震度	波動エネルギー震度
昭和58年5月26日 (日本海中部地震) ビル最上階	0.2Hz ±16Gal ±10cm	III (管制運転の必要あるも装置動作せず。)	V
昭和58年8月8日 (神奈川県西部地震) ビル最上階	(3Hz, ±30Gal ±0.08cm)→ (0.2Hz, ±1.6Gal ±1cm)	IV→I (管制装置が不必要に動作)	II→III
昇降路ピット 常時微振動	50Hz ±13Gal ±0.13μm	III	0

表7 地震感知器の設定値 昭59年3月改訂されたエレベーター耐震設計施工指針²⁾に掲載されているものを示す。

建築物の高さ	特低設定値	低設定値	高設定値
60m以下	80Gal 又は P波感知	120Gal	150Gal
60m超え 120m以下	30, 40, 60Gal 又は P波感知など	60, 80又は 100Gal	100, 120又は 150Gal
120m超え	25, 30Gal 又は P波感知など	40, 60又は 80Gal	80, 100又は 120Gal

表8 従来方式と波動エネルギー方式の感知レベルの比較 波動エネルギー方式を採用すると、建屋の高さや固有周期を考慮することなく適切に設定できることを示す。

建屋の高さ (m)	固有周期 T_0 (s)	特低設定値 (Gal)	$a_0 = 80 \cdot T_0^{-1.5} **$
40	1	80	80Gal
80	2	30	28Gal
120	3	25	15Gal
200	5	5~8*	7Gal

注：*の値は、変位感知器を設け3~5cmに設定したときの0.2Hzに対する加速度である。
**は、波動エネルギー式地震感知器の設定値を13kine・cmとし、建屋と地震動が共振したときの感知加速度である。

表9 超高層ビルにおける地震感知器の動作 波動エネルギー式を採用すると、すべての地震動に対して適切に動作することを示す。

	加速度式	波動エネルギー式
震源が遠い大規模地震で 管制が必要なとき (例：日本海中部地震)	× (動作した例なし)	○ (動作)
震源が近い小規模地震で 管制が不要なとき (例：神奈川県西部地震)	× (動作する場合あり)	○ (動作せず)
震源が近い大規模地震で 管制が必要なとき (例：関東大震災時の地震)	○ (動作)	○ (動作)

注：○(動作適切), ×(動作不適切)

すなわち、従来の加速度式地震感知器は震源が遠い大規模地震や震源の近い小規模地震では動作が適切でないが、波動エネルギー式地震感知器は、それらの地震動に対して適切に動作できるものと言える。

関東大震災時の地震のように、震源が近い大規模地震の場合で管制運転が必要な場合にはどのようなになるか、これまで経験していないのではっきりとは言えないが、シミュレーションの結果から見れば加速度式と波動エネルギー式のいずれも適切に動作するものと考えられる。

5 ビルが地震動と共振状態にあるときの波動エネルギー

地震波動は大地を経てビルの基礎部に伝わり、ビル内を伝搬する。このとき図7で運動方程式は、

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \mu \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (18)$$

となる。

いま(18)式の解を、

$$y = D \cdot \sin(2\pi ft - 2\pi x/\lambda) \quad (19)$$

とすると、ビル内の地震動の伝播速度 v_s は次のようになる。

$$v_s = \lambda \cdot f = \sqrt{\mu/\rho} \quad (20)$$

一般にビルが大きく揺動するのは、地震動の周波数とビルの固有振動数がほぼ等しく共振状態にあるときである。

このときのビルの振動状態は図7(b)に示すように、一端固定、他端自由の条件から、

$$x=0 \text{ で, } y=0 \quad (21)$$

$$x=h \text{ で, } \partial y/\partial x=0 \quad (22)$$

ここで、 h はビルの高さである。また、

$$t=0 \text{ で, } y=0 \quad (23)$$

$$t=T_0/4 \text{ で, } \partial y/\partial t=0 \quad (24)$$

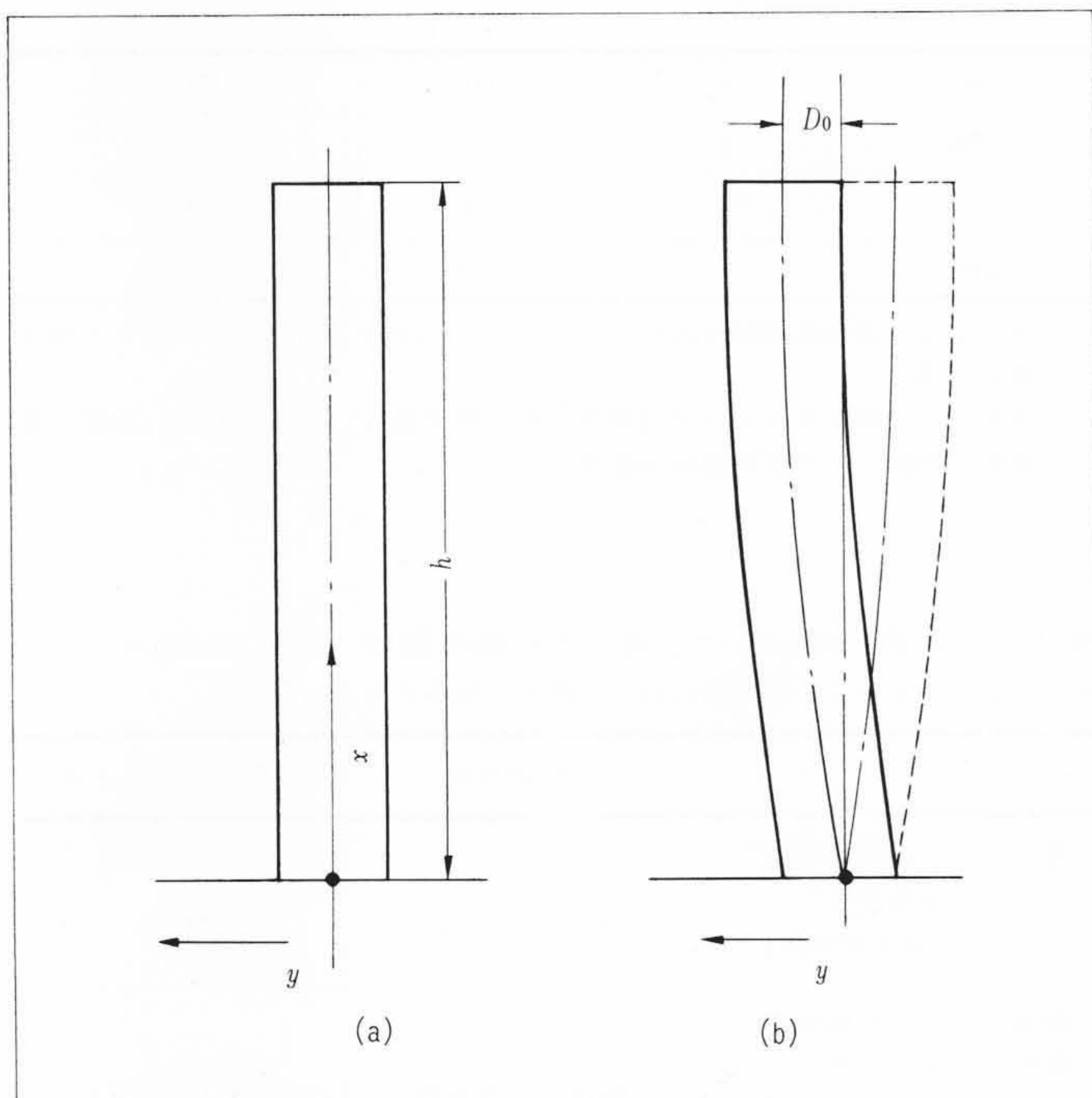


図7 地震動によるビルの揺動 図の(b)は地震動の卓越周波数とビルの固有振動数が共振したときの状態を示す。

とする。ここで、 T_0 はビルの固有周期である。

(18)式及び(21)~(24)式を満足する y を次のように仮定する。

$$y = B \cdot \sin(2\pi ft + \phi - 2\pi x/\lambda) + C \cdot \sin(2\pi ft + \phi + 2\pi x/\lambda) \quad (25)$$

(25)式を(18)式に代入すると(20)式と同様に、

$$\lambda \cdot f = \sqrt{\mu/\rho} = v_s \quad (26)$$

が得られる。また、(21)~(24)式から B 、 λ 、 ϕ 、 f が定まり、

$$y = D_0 \cdot \sin(\pi x/2h) \cdot \sin(2\pi t/T_0) \quad (27)$$

となる。ここに、 $D_0 (=2B)$ はビルの最上端の振動変位の振幅である。ビルに与えられる波動エネルギーを W_0 とすると、

$$W_0 = S \cdot \frac{1}{(T_0/4)} \int_0^{T_0/4} \int_0^h \left\{ \frac{\rho}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial t} \right)^2 + \frac{\mu}{2} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right)^2 \right\} \cdot dt \cdot dx \\ = (\pi^2/4) \cdot S \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho} \cdot (D_0^2/T_0) \quad (28)$$

ここで、 S はビルの水平断面積である。 $(\pi^2/4) \cdot S \cdot \sqrt{\mu \cdot \rho}$ はビルの構造により定まり、また、 T_0 もビルの固有周期で一定であるから、地震動と共振状態にあるビルの波動エネルギーは振動変位の振幅 D_0 の2乗に比例する。この波動エネルギーは前述の波動エネルギー式地震感知器で感知できることは言うまでもないが、変位感知器でも感知できる。しかし、変位感知器の場合は震源が近い大規模地震のように、地震動がビルと共振しなくても大きな波動エネルギーになるような場合など、共振状態にないときは小変位でも危険となるので適当ではない。

6 結 言

以上、従来の加速度式地震感知器の問題点とそれを改善するために開発した波動エネルギー式地震感知器について述べた。

この波動エネルギー式地震感知器は、超高層ビルのエレベーターの地震時管制運転装置に対してだけでなく、その他のエレベーター及び構造物に対しても将来かなり普及することが期待される。

終わりに、本研究に対し御指導をいただいた岐阜大学教授村松郁栄理学博士、気象庁気象研究所地震火山研究部第2研究室長の勝又 護理学博士をはじめ地震火山研究部の各位に対し厚く御礼申しあげる。

参考文献

- 1) 小野田, 外: 地震時管制運転, 波動エネルギー式地震感知システムの導入, 設立35周年昇降機技術講演会講演論文集, 53~68, 日本エレベーター協会(昭60-1)
- 2) 建設省建築指導課監修, 日本建築センター, 日本昇降機安全センター編: 昇降機の技術基準の解説附エレベーター耐震設計施工指針, 日本エレベーター協会(昭59-3)
- 3) 市川: 震度階について, JSEEP News 75, 9~13(1984-3)
- 4) 河角: 震度と震度階, 地震, 15, 6~12, 187~192(1943)
- 5) 市川: Digital Seismogramsによる震度の推定, Journal of Meteorological Research, 35, 6, 221~251(1983-6)
- 6) 勝又, 外: 震度IVの範囲と地震の規模および震度と加速度の対応, 験震時報, 36, 3, 4, 89~96(1971)
- 7) 村松: 地震危険度——(地震工学), 地震第2輯, 20, 281~290(1967)
- 8) 高木: 地震動の最大エネルギーと震度の関係, 気象研究所研究報告, 20, 1, 79~89(昭44-4)