

# 微振動の解析システムの開発

——基本概念——

寺村 彰 武田 寿一  
吉原 醇一 蔭山 満

## Design Method for Microvibration Control and Countermeasures

——The Basic Concept for Design——

Akira Teramura Toshikazu Takeda  
Jun-ichi Yoshihara Mitsuru Kageyama

### Abstract

When constructing microvibration plants, for example, super LSI plants, it is important to take vibration control measures into consideration to obtain a working vibration environment which is directly related to product precision. In these microvibration control studies, the authors confirmed from various observation data that it is important to know the propagation of vibrations through ground and structural members and the vibration spectrum properties, which are different from structural analysis in relation to earthquake resistance. This report is a summary of the basic concept of vibration calculation methods for microvibration control, including some actual examples. A “Consistent Program of Microvibration-proof Design” was developed for structural design from these studies, the details of which will be reported in the next paper.

### 概 要

超LSI半導体工場に代表される微小振動の建物の建設にあたっては、高精度の作業環境を得るための空気清浄度、フレキシビリティなどを満たす空間である条件に加えて、製品精度に直接かかわる微振動の作業空間を得るための振動抑制対策の条件も重視される。この種の問題では一般の耐震評価とは異なり、ミクロンレベルにおける微小振動特有の性質があり、また、その振動スペクトル的な性状が重要な意味を持つことを実測調査により把握してきた。

この報告は微小振動の防振解析に関して地盤振動、設備機械による振動、作業時振動、また、これらの応答値の総合評価方法についてそれぞれ実記録と対比しながら述べ、微小振動特有の性状とその問題点に対する基本的な考え方を示す。なお、この概念は実務レベルでその対応を計るために新たに開発された防振解析システムに反映されているものである。

### 1. はじめに

ファインテクノロジーや高度情報化社会の発達に伴い、従来の先端技術産業分野を始めとして、さまざまな建物について多種多様の振動を制御する必要性が生じてきている。とりわけ、超LSI製作工場に代表される精密機器製作工場の建設にあたっては、空気清浄度、省エネルギー、空間のフレキシビリティなどに対する条件に加えて、製品の精度、ロス率減少に直接かかわるミクロン単位以下の微小振動の制御に対する要求が著しく高まってきている。今後、これらのあらゆる振動について総合的な把

握し、対策を講じる建設技術がさらに要求されてくるものと思われる。

### 2. 設計フロー概要

精密機器に発生する振動は、図-1に示すように、①常時微動、道路、交通、建設、工場など建物外部から地盤を伝達してくる振動、②建物内部の建築設備、生産設備から躯体構造を介して伝達する振動、③精密機器周辺部で作業に伴い発生する振動、の3種に大別される。

これらの振動源に対する解析は、図-2に示すようにそれぞれのルートに応じて計算し、精密機器の振動許容

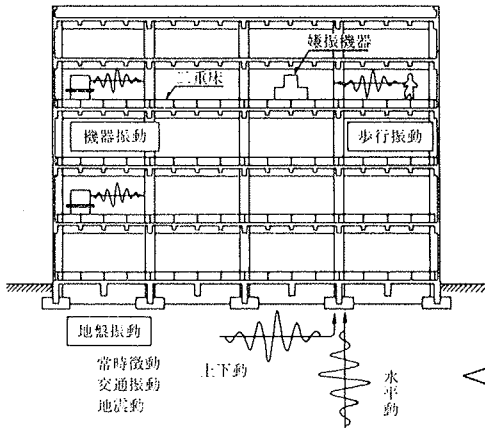


図-1 概念図

値と対比する方法で順次実施する。

解析システムの詳細は次回に報告する予定であるが、基本的には図-3に示すように、既存の構造振動解析プログラムに微小振動プログラムおよび微小振動用データベースが追加され、さらに作業の迅速化を計るための作図作表プログラムも付加された一貫プログラム構成である。

### 3. 立地配置計画 (環境調査)

微小振動の建物を作るには、予定地の振動環境が適しているか否かを判断しなければならない。そのためには地域の中におかれた予定地の環境、例えば道路、工場、鉄道などの位置関係、周辺の地形、地層構造などを調査し、また将来的に周辺の環境がどう変わるおそれがあ

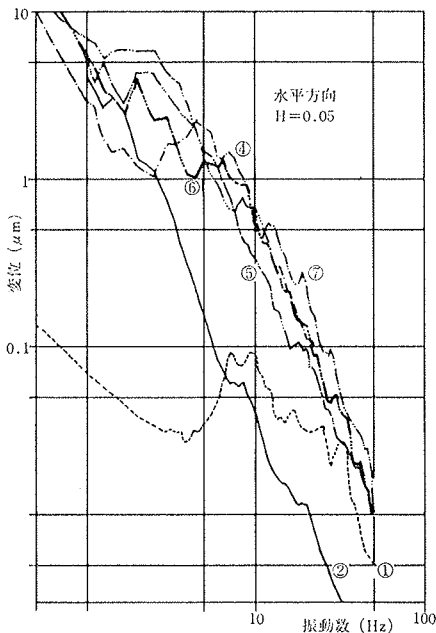


図-4 各種地盤の観測波応答スペクトル(1) (h = 5%)

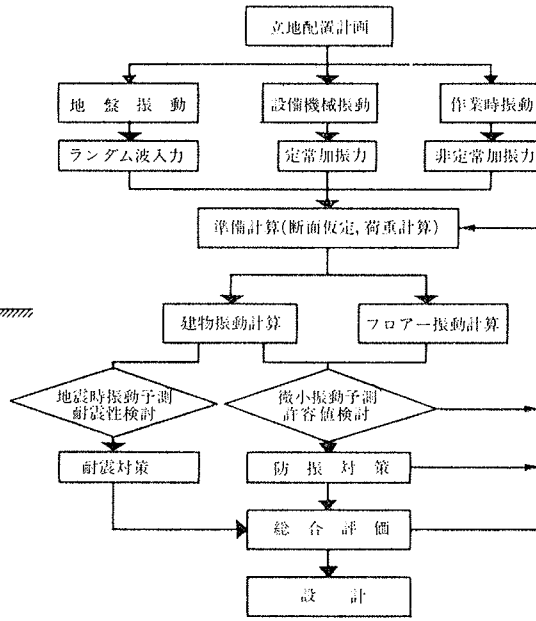


図-2 解析システムのフロー

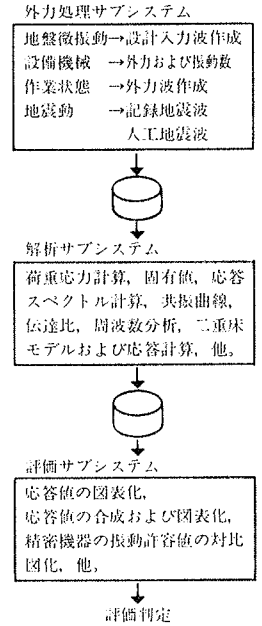


図-3 解析システム構成

るかなども事前に調査することが望ましい。

## 4. 地盤振動による建物の振動

### 4.1. 地盤振動の性質

このような周辺の環境条件に基づく地盤振動は、外乱源が主に地上にあるという特徴があり、①比較的浅い表層地盤を伝わる表面波成分が多い、②建設予定地までの伝達過程で周辺地盤の地形・地層構造の影響を受ける、という傾向にある。

図-4～図-5に、蓄積されている各地の観測 (GL-0m～-2m) 加速度波形の中から、

代表的な変位応答スペクトルを計算し重ね書きした例を示す。

①-②曲線は比較的地盤、④は関東ローム層、⑤-⑧曲線は比較的地盤の場合である。

また、道路、鉄道、などの影響として図-6に、同一地盤内GL-1mで観測した常時微動および他の外乱源(a), (b)に対する地盤振動観測波形から計算した例を示す。地表面で発生する外乱源が大きいほど4~8 Hz, 16 Hz付近の表層地盤の固有振動が刺激されその振幅も大きくなる例である。

これらの観測波は地層構造と

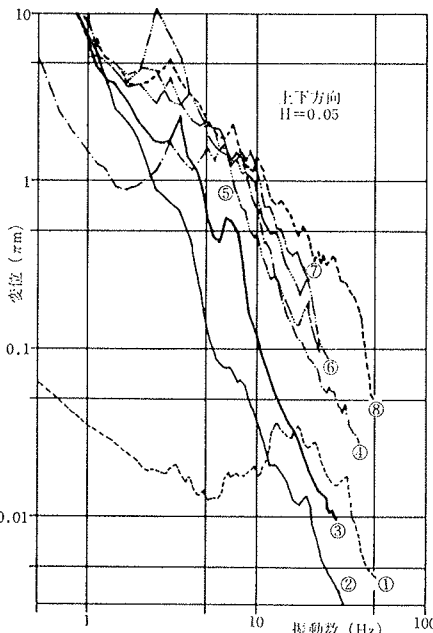
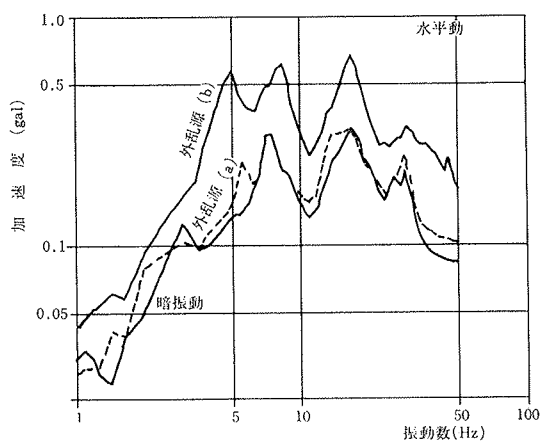
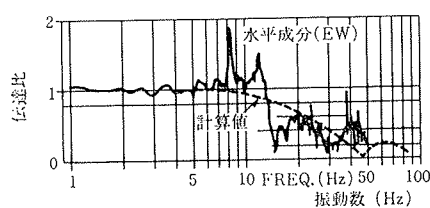


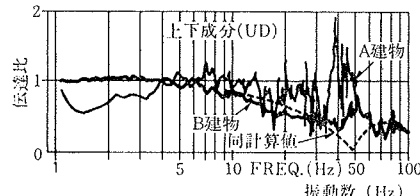
図-5 各種地盤の観測波応答スペクトル(2) (h = 5%)



図一6 地盤振動の応答スペクトル (h = 5%)



図一7 入力損失効果の実測例(1)



図一8 入力損失効果の実測例(2)

外乱源とを関係付けてファイルに蓄積されているが、基本的には予定地盤におけるデータ収集が信頼性の点から望ましいと考えられる。

#### 4.2. 設計入力波

地盤振動は建物に入力される時地盤、建物の大きさや形状によって幾分か小さくなる。この現象を図一7に示す。横軸に振動数  $f$ 、縦軸に自由地表面で観測された振幅 ( $X_0$ ) に対する建物底盤の振幅 ( $X$ ) の比をとっている。縦軸値が高振動数域で 1.0 より順次小さくなる現象を入力損失と呼ぶ。この入力損失の効果については実際の建物でさまざまな調査を行なってみると、水平成分については理論(1)式にほぼ対応する<sup>1)</sup>。

$$\frac{X}{X_0} = \frac{V_s}{\pi L f} \cdot \sin\left(\frac{\pi L f}{V_s}\right) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで

$X_0$ : 自由地表面観測波の振動

$X$ : 建物に入力される振動

$L$ : 建物長さ

$f$ : 強制振動数

一方、上下成分については、図一8に示す通り、A建物では入力損失効果がほとんど観察されず、B建物では水平成分に比べて劣るものの観察される、という傾向にある。この相違をさまざまな床スラブで調査した結果、主にスラブ、地中ばりなどで構成される底盤の面外剛性および面圧などに関係することが明らかになり、これらをパラメータにするR値の実験式を作成し、(2)式がシステムに組込まれている。

$$\frac{Z}{Z_0} = \left\{ \frac{V_s}{\pi L f} \cdot \sin\left(\frac{\pi L f}{V_s}\right) \right\}^R \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで

$Z_0$ : 自由地表面観測波の振動

$Z$ : 建物に入力される振動

$R$ : 上下動低減係数 ( $\leq 1.0$ )

である。観測波に入力損失効果を考慮して計算した波形をここでは入力波と呼ぶ。精密機器の防振対策においては高い振動数域まで対象になるため、この入力損失効果を正確に把握し積極的に設計に活用することになる。

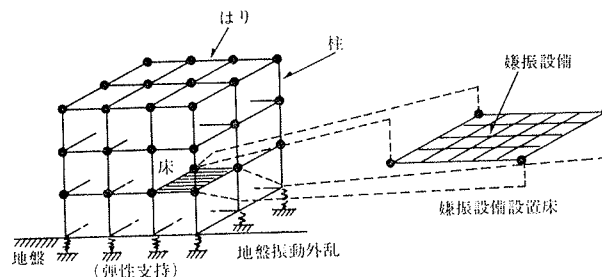
#### 4.3. 建物の応答

この入力波に対する応答は通常、建物底盤入力方式で計算される。

図一9に振動モデル概念を示す。嫌振設備設置用の対象床を詳細に検討することを表わしている。

設計にあたっては、クリーンルーム内任意の各場所に関して目標値を満たす条件で行なうことになり、そのため一般に柱・はり床・スラブなどの構造部材の伝達経路を考慮してかなりの拡がりをも有する架構範囲が解析対象になる場合が多い。また、半導体工場では建物の常時微動測定から得た基本固有モードなどを検討すると、地盤変形のしめる割合が比較的大きい。これは室内環境を保持するためのコンクリート造外周壁の剛な影響を受けて地盤の剛性が相対的に低下するためであり、振動モデル化において地盤および地下構造(底盤、くいなど)の変形を配慮して行なう。

また、精密機器の振動許容量が絶対変位あるいは絶対速度などで決められることなどからもこの変形を配慮し



図一9 地盤振動に対する対象床スラブの振動計算モデル(1)

て計算する必要がある。

下層地盤からの振動が大きい場合には別途に表層地盤の影響を考慮することになる。

## 5. 建築設備機械および製造設備機械の振動

### 5.1. 対象機器

半導体工場の建築設備機械の中で代表的な機械には、冷凍機、空調機、変電トランス、エレベーター、空調ダクト<sup>2)</sup>などがある。また、製造設備に関連する代表的な機械には、拡散炉など各種炉、酸・アルカリガス処理装置、小型冷却機、各種ポンプ、コンプレッサなどがあ

### 5.2. 解析モデルと応答

この機械振動の応答については図-10、図-11の振動モデルでほぼ対応付けられる傾向にある。

図-10の振動モデルは建物全体を対象にして点加振に対する柱、はりなどの構造体を伝わる振動および建物底盤の地下逸散を考慮する場合である。

図-11のモデルは或階を取出してはり、スラブなどの構造体を伝わる場合の解析モデルであり、その計算例として空調設備機械による或階の床ス

ラブ応答を図-12に示す。また、図-13に参考までに空調設備機械運転時に測定した或階の床スラブ中央における振動分布を示す。

なお、約30~120Hzの高振動数域において機械脚部の振動量から距離減衰式(デシベル式)を用いて計算する方法があり一部システムに組込まれているが、機会を改めて報告する予定である。

防振設計にあたっては、外力源が数多いため、代表的な各々振動数の単位動荷重応答(共振曲線)を線形範囲の問題として求めて、さらには許容されるであろう動荷重の概算値を前もって予測しておく方法などにより、手数を省き、かつきめの細かい配慮が必要であろう。

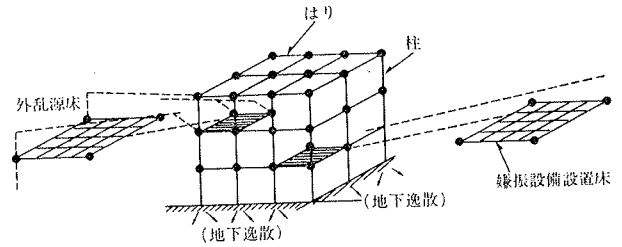


図-10 他階の機械振動に対する対象スラブの振動計算モデル(2)

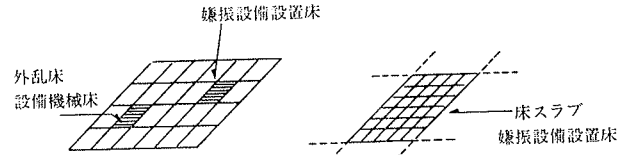


図-11 同一階の機械振動および作業時人的振動に対する対象床スラブの振動計算モデル(3)

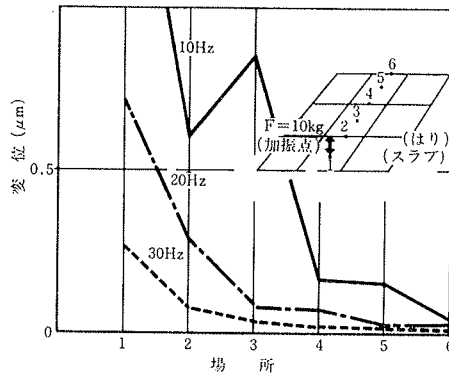


図-12 空調機械振動の床応答計算例

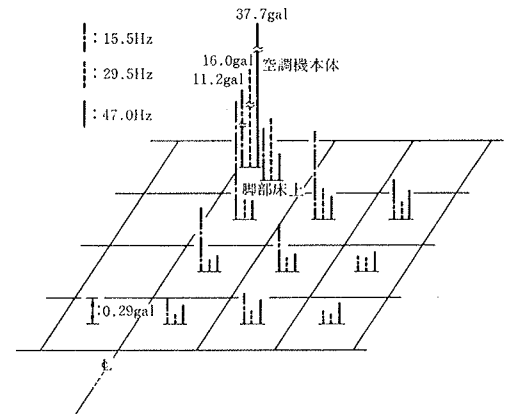


図-13 空調機械運転時のRCスラブ中央測定結果

## 6. 作業振動

作業時のクリーンルーム内の歩行、ロボットの作業、自動搬送車走行、などに発生する振動は作業者にしか分らないかくれた振動障害として数多いように思われる。

二重床構造はフリーアクセスだけの背の低い場合、床スラブから長尺脚あるいは鉄骨架構を組立ててその上にフリーアクセスを設ける場合などがある。

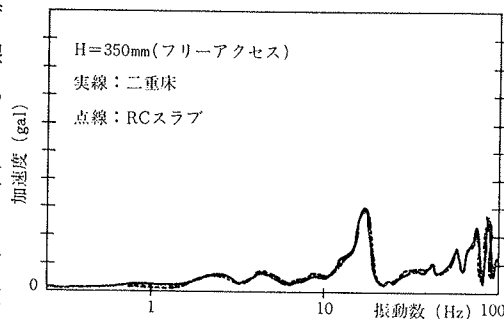


図-14 衝撃試験時の二重床とRC床スラブとの振動量比較

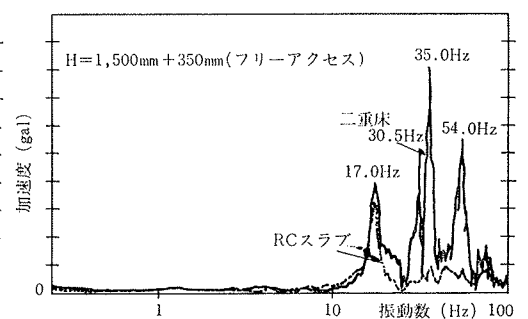


図-15 衝撃試験時の二重床とRC床スラブとの振動量比較

ある建物で小さなハンマーを使い衝撃力を RC 床スラブに与えて測定した。この結果では、背の低い場合には図-14に示すように二重床と RC 床スラブとの振動量の相違が少ないが、後者の架構を組立ててその上にフリーアクセスを設ける

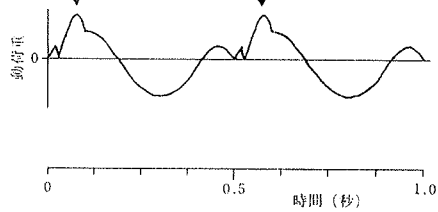


図-16 歩行時の動荷重

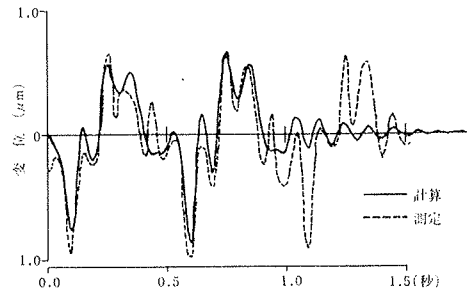


図-17 歩行時変位変形

場合にはスラブ中央で図-15のように架構部材の固有振動が刺激され数十 Hz の振動を発生する。二重床はスラブからの振動増幅と精密機器周辺の床で作業するときの振動とが重なり合って複雑な振動性状が現われる。また、前記の通り各種設備器械の振動数が混在する領域でもあり、二重床構造の工夫、などの防振の配慮が必要とされる。

作業振動を代表する歩行時を例にして RC スラブで検討すると次の通りである。歩行時の動荷重については各種の考え方があがるが、ここでは図-16に示す様に 2 歩分の足着地時に床面が受ける荷重変化をそのまま動荷重として評価する。約 10 Hz の RC 床スラブ 1 枚を取出してモデル化し計算したスラブ中央歩行時に中央付近に発生する応答変位波形を図-17に示す。

### 7. 微振動の総合予測と判定

以上の振動外乱源に対する応答値のまとめは各振動数ごとに加算する方法で行なう。この例として図-18にある建物の 1 階 3 階の床微振動の予測値と確認測定値を示す。さらに顕微鏡装置に対する予測は、例えば 3 Hz の固有振動特性をも

つ空気ばね防振装置が使われている場合、その伝達率を考慮して行なえる。ただ、防振装置の振動低減率(伝達率)に関して実装置で各種の測定を実施してみると、高い振動数範囲になると理論値ほど低下しない傾向にあり若干注意を要する点である。これらの各振動数ごとに加算す

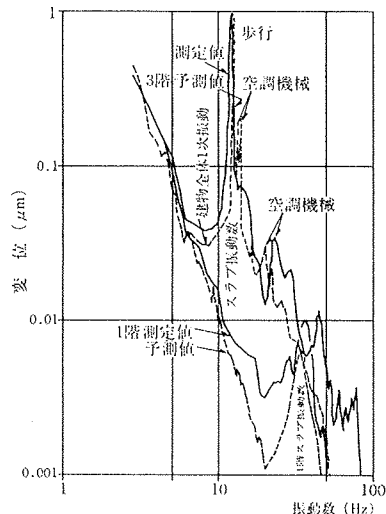


図-18 スラブ中央上下振動の確認測定値(実線)と予測計算値(点数)

る作業はプログラムでは自動的に行なわれる。

### 8. 精密機器の振動許容値

嫌振精密機器の振動許容値は、実際の使用状態で実機で実験的に調査してみると、機器の種類によって異なり、またそれぞれ振動数に依存する傾向にある。これらは機器の用途と構造に関するものと推察される。

微振動領域においては目標値をあまり小さく設定すると膨大な費用をかけることにもなりかねないため、嫌振設備の振動許容量を正確に知ることが防振設計の基本方針を立てる上で重要になる。

### 9. 結び

今日、微小振動に対する防振設計の機会は著しく増加してきた。これらの微小振動に対する防振設計においては基本的には各種外乱源に対してきめ細かく設計対応することが大切と思われる。しかし限られた時間の範囲内で対応するには作業量が多かった。このたび開発された微振動評価システム (V. I. P.) プログラムは、解明された範囲内ではあるが成果を取込み、新しい各種プログラムが導入され、かなり迅速に対応(従来時間の約1/5)出来るものと期待される。また、研究用としても活用できるため新たな問題を解明する手段として使用されるであろう。

ここでは今までの成果に基づく微小振動の防振解析の考え方を述べたが、次回には、詳細なプログラム紹介と実際の適用例について報告する予定である。なお、V. I. P. プログラム開発にあたっては、次の部門および担当者との協力で実施された。

樋口元一、板垣勝善、深野 慶、鈴木勝博、田中達彦(本店 建築設計第四部)、渡辺清治(本店 技術部)板橋 瑩二、三橋英二(本社 電算センター-大阪電算課)

### 参考文献

- 1) 土と構造物の動的相互作用, 土質工学会, (昭和48. 10.)
- 2) 山本, 伊勢: 半導体工場建築設備の防振設計, 建築設備士, Vol. 15, No. 5, (昭和58. 5)