

超精密機器の除振施設に適用した免震建物

武田 寿一 藤谷 芳男 寺村 彰
(本社 建築設計第7部)
中村 嶽 蔭山 満 野畑 有秀

Dynamic Characteristics of Base-isolated Building Developed for Super-precision Equipment

Toshikazu Takeda Yoshio Fujitani Akira Teramura
Takashi Nakamura Mitsuru Kageyama Arihide Nohata

Abstract

A research laboratory made super vibration-free by a base isolation system was completed at the National Institute for Research in Inorganic Materials in Tsukuba Campus City at the end of March 1988. Precision observations and analytical experiments by electron microscope, laser spectrometer, etc. are conducted at this laboratory. This building was designed to be isolated from ground motions of earthquakes and other noise vibrations using both a base isolation system for the horizontal direction and a phematic spring for the vertical direction. As a result, noise vibrations under the permissible levels for the precision equipment was successfully achieved. This paper describes the fundamental design concepts, the dynamic analyses, the measurement results of noise vibrations, and the results of isolation effects based on earthquake observation records.

概要

茨城県つくば市の科学技術庁無機材質研究所に昭和63年3月末に完成した無振動特殊実験棟は、積層ゴムによる建物免震技術と建物内部での除振技術を駆使して、地震に対する安全性及び超精密な振動環境の確保を目的として建設された世界で最初の研究施設である。この研究所では先端技術の基となる新素材の開発研究を行っており、超分解能の電子顕微鏡をはじめとした先端機器によって原子のレベルで物質構造の解明を行なっている。このような超高精度の分析機器の性能を限界まで発揮するためには一般的な除振装置では困難であったため、建物の免震装置と内部の除振装置を一体とした免震・除振システムにより、水平及び上下の振動を精密機器の許容レベル以下に設計した。

本稿では、この免震・除振建物の基本的な設計方針について述べると同時に、設計評価値と竣工後の実測による微動特性の確認、さらに、地震観測結果による免震効果について報告する。

はじめに

先端技術分野の新素材の研究開発では、電子線、X線、あるいはレーザー光などのビーム利用装置を用いて原子レベルで物質構造の解明を行なっている。これらのハイテク装置の性能を限界まで引き出すためには、雑振動を除去した静寂な環境条件を必要とし、この環境条件の良否が研究開発の成否を大きく左右する。この良好な環境条件の達成を目的として、科学技術庁無機材質研究所は建設省の設計監理のもとで茨城県つくば市に無振動特殊実験棟を免震構造を採用して建設し昭和63年3月に竣工した。本稿ではこの免震・除振建物の設計方法、微動特性と地震観測の結果について報告する。

1. 免震建物の建設理由

この実験棟には、80万倍透過式電子顕微鏡、X線、レーザー光利用の分析・分光装置、長期間連続測定を行なう高性能クリープ試験機など20数台の精密試験機器が収納される。このような実験施設の精密機器は日常的に微調整された使用状態を維持することが望ましく、また、機器設備が高価でもあるために地震時の影響が低減されることが必要である。計画時において既存の除振装置を使用する施設では将来的にも実験精度の向上が困難であると指摘されて、建物自体が除振設備である免震・除振建物にしてこれらの問題点を同時に解決する方法が採用された。

2. 免震・除振設計条件

免震装置の設計条件を表-1に示す。

地動の最大速度	免震装置の最大せん断力係数	最大相対変位
25カイン	0.15以下	15cm以下
50カイン	0.30以下	30cm以下

表-1 免震性能の設計条件

常時微動に対する除振性能の設計条件は、地盤側の振動量に対する精密機器側の振動量を表-2を満たすように低減すること、ま

振動方向	伝達関数(除振台/地盤側)
水平方向	振動数2Hz以上で1/3以下
鉛直方向	同, 3.5Hz以上で1/3以下

表-2 除振性能設計条件

た、精密機器の使用に障害の無い程度に、空調方式(防振, 防音, 気流など)配管, ダクト方法などを総合的に検討することである。

表-2の除振性能条件は次の考え方に基づいている。従来の同様の施設では電子顕微鏡は昼間使用できない場合が多かった。当地は振動が小さく静かな環境の場所であるが、調査の結果、昼間の地盤振動は当研究所内の車両走行と他施設からの機械振動、さらに、南方約300mに位置する国道を走行する車両に起因するものがあつた。特に、国道を重量車両が走行すると、水平方向が約3Hz以上、鉛直方向が約5Hz以上の振動数域で大きくなる傾向が観測され、この振動の抑制を対策上重視すべきであると判断された。性能条件はさらに電子顕微鏡等々の精密機器の振動許容値も検討して決められたものである。

3. 建物と地盤の概要

この施設はA棟(免震建物・写真-1:左側)と設備機械類を収納するB棟(従来構造の設備棟・写真-1:右側)の2棟から構成される。免震建物A棟の断面図、基礎伏図と免震装置の配置を図-1、図-2に示す。空調ダクトや設備配管は2棟間の地下ピットを経由して供給されている。

構造: 鉄筋コンクリート造免震構造, 1階建

建物規模: 16m×38.5m, 建築面積616m²

高さ: 軒高4.25m, 最高高さ6.30m(地上高さ)

構造形式: 外周部と内部適所に壁が配置され耐震壁付ラーメン架構

免震装置はハイテクR&Dセンター免震建物¹⁾と同様に積層ゴムと鋼棒ダンパーにより構成される。

積層ゴムは諸元を表-3に示すが、各柱下に65t用の

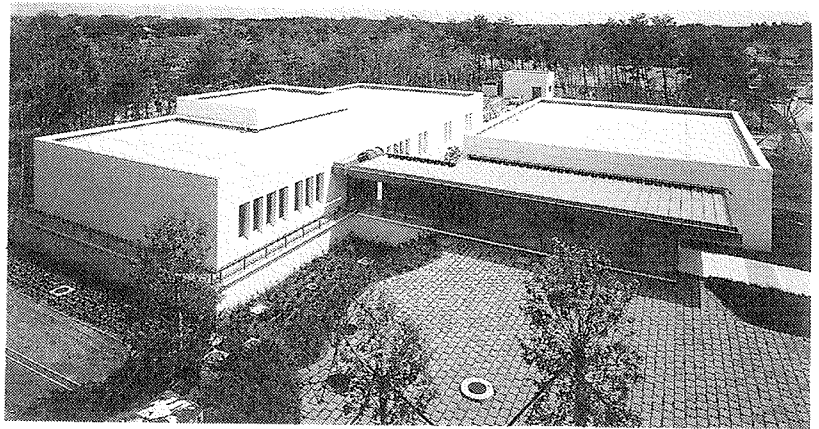


写真-1 無振動特殊実験棟外観

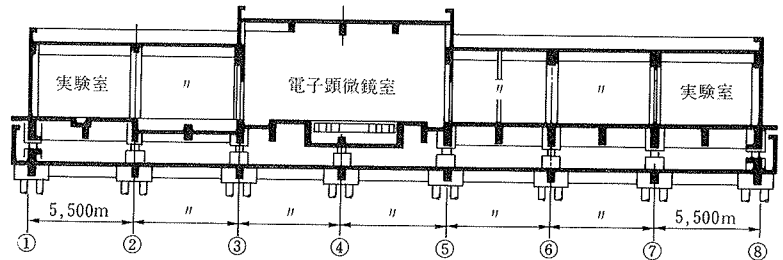


図-1 免震建物断面図

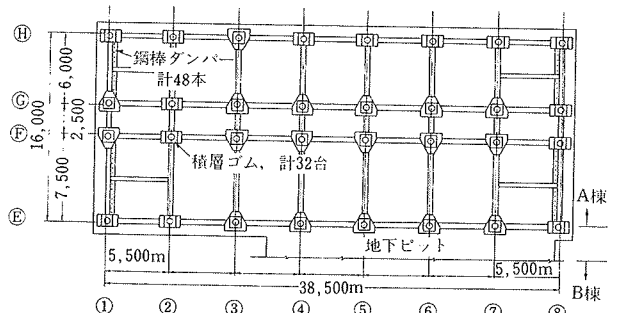


図-2 免震建物基礎伏図(積層ゴムと鋼棒ダンパーの配置)

呼称	積層ゴム			薄鉄板	個数
	直径	高さ	厚さ×層数		
65t	420	290	3.2×62枚	1.5×61枚	32個

(単位mm)

表-3 積層ゴムの諸元

ものが32個使用されている。鋼棒ダンパーは直径32mm、長さ450mmの上下端を上部構造と基礎構造にそれぞれ弾性固定された構造で合計48本配置されている。

基礎構造はGL-2.96mに設置され、RC造の底盤、基礎はり、基礎、PHC杭(支持層GL-9m)により構成される。

地盤構造は基礎下からGL-7.9mまで粘土、シルト層、GL-12.8mまでN値30~50の細砂層である。地盤振動は常時微動波形の周波数解析より2.6Hz~3.0Hz

及び 4.5 Hz～5.0 Hz が卓越する。この振動は重複反射理論から求まる表層 GL-7.9 m までの固有振動数 2.7 Hz 及び 4.7 Hz に対応する。国道を重量車両が走行すると主にこれらの振動が刺激されて当地に伝ばっている。

大地震に対して建物の水平方向の固有周期は約 2.3 秒である。設計入力波は、標準地震波である EL-CENTRO 1940 NS, TAFT 1952 EW, やや長周期成分を含む八戸港湾波 1968 NS, EW と、サイトでの観測地震波である。入力レベルは速度によって規準化され、弾性応答解析用 25 カイン (cm/sec), 弾塑性応答解析用 50 カインである。25 カイン入力時の免震装置部の最大変形量は 8.72 cm, 50 カイン入力時には 19.2 cm であり積層ゴムと鋼棒ダンパーの許容変位に対して十分な安全率を有している。上部構造は保有水平耐力の検討を行ない耐震壁の平均せん断力度が充分小さいことを確認している。

4. 地盤振動の除振

4.1. 設計方法

A 棟の除振方法は、水平方向は建物全体を積層ゴムと鋼棒の組み合わせの免震装置で一挙に対応し、鉛直方向には精密機器ごとに空気ばね除振装置で対応するという新しい方法である。

図-6(a), (b) に示す振動解析モデルで、設計条件に対する検討を行なった結果、免震周期は微小振幅範囲で水平方向 1.5 秒 (0.7 Hz) 以上、鉛直方向 0.06 秒 (15 Hz) 以下、除振装置の周期は水平方向約 0.14 秒 (7 Hz) 以下、同減衰定数約 10%, 鉛直方向約 0.6 秒 (1.5 Hz) という免震・除振装置に関する設計目標値を得た。また、免震装置では積層ゴム、鋼棒ダンパーのミクロンレベルにおける動的特性の研究開発とサブダンパーの研究開発を行なった。詳細は省くがサブダンパーはせいぜい数 mm 程度

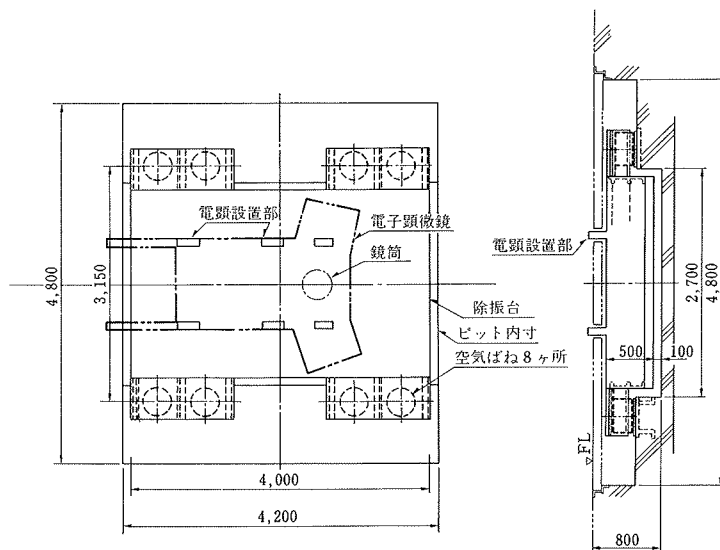


図-3 電子顕微鏡除振装置の平面図と断面図

までの振動に減衰性を発揮して大地震には装置部のすべり機構により建物の応答に影響しない構造である。

空気ばね方式の除振装置が水平方向に硬く鉛直方向に軟らかい点は、通常除振装置と比べて逆の考え方であるが、免震装置と除振装置との振動解析から得られる結論であり、今回の除振装置製作上の新しい試みである。また、電子顕微鏡など 5～6 台の背の高い機器を据える除振装置は、重心位置が高くその回転慣性によってロッキング振動が生じるので試料挿入高さなどの主要な位置の振動が最小になるように床スラブの剛性と共に工夫している (図-3)。以上の除振に関する検討結果が設計に反映された。

4.2. 測定結果

除振装置の性能として、図-4 に 1 階床面に対する電子顕微鏡除振装置上の鉛直方向の振動の伝達率を示す。除振装置の固有振動数である 1.5 Hz をピークとして 3.5 Hz 以上で -10 dB (1/3 以下) を満たしている。

免震装置の除振性能として、図-5 に地盤に対する 1 階床面の水平方向の振動の伝達率を示す。伝達率は 2 Hz

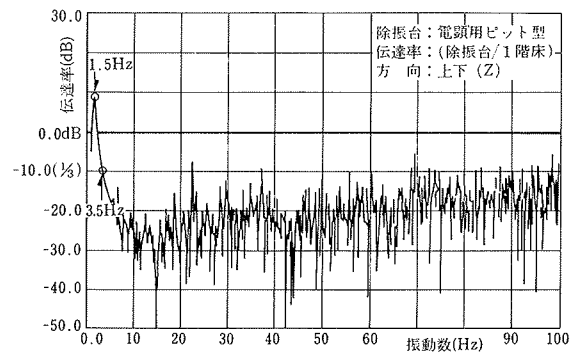


図-4 除振装置の 1 階床面に対する振動の伝達率 (鉛直方向, 除振装置性能)

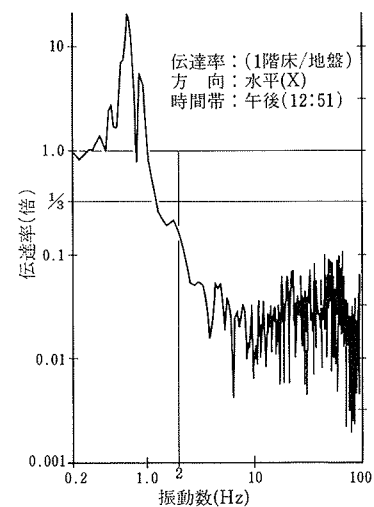


図-5 1 階床面の地盤側に対する振動の伝達率 (水平方向, 免震装置性能)

以上1/3以下を満たしている。

免震装置と除振台とのトータルな振動伝達率の予測値と測定値とを図-6(a), (b)に示す。両者の伝達率はよい対応を示しており、微振動レベルにおける設計評価の妥当性が検証され、表-2の除振設計条件を満たすことが確認された。

5. 設備機械振動の除振

主な振動発生源になる設備機械は全てB棟に收容され、空調ダクトや配管が地下ピットを經由してA棟に供給される。B棟の設備機械の影響はA棟構造体への振動伝達量の計算をして十分小さいものと予想された。

A棟内では空調ダクトが振動源になると予想されたので事前に実験した。実験は、(1)ダクト材質(鉄板、グラスウール、木製サンドイッチ、フェライト塗布鉄板の各ダクト)、(2)風速(0~15 m/sec)、(3)風量調節装置(単板型、対行翼型)をパラメータにしてそれぞれ、ダクトを柔らかいコイルばねで浮かしコイルばねの動的変位量と、その周波数分析から床スラブへの振動伝達力を測定したものである。

実験の結果、(1)単位長さ当たり重量の大きい木製サンドイッチ、フェライト塗布鉄板の各ダクトは床への伝達力が小さい。(2)軽量のグラスウールダクトはダクト内に発生する脈動や曲がり部分に発生する風圧変動がそのままダクトを揺らし、風速が早くなるとその傾向がより一層強くなり、床への伝達力も大きくなる。(3)鉄板ダクトは鉄板補強用リブが従来タイプでは鉄板の面外振動が刺激され床への伝達力も大きくなる。(4)乱流源となる風量調節装置は単板型より対行翼型の方が伝達力は小さい。(5)ダクト内風速は5 m/sec程度までの場合には図-7に示すように伝達力は小さい。

以上の性能及びコストを検討して、今回、リブ補強した鉄板ダクト方式、風速5 m/sec、対行翼型調節装置を採用している。設計では実験で得られたつりボルト1箇所当たりの主要な周波数ごとの伝達力から建物内のつりボルトの配置状況に沿い、精密機器の除振装置上へ伝わる振動量を計算している。空調機100%運転時の電子顕微

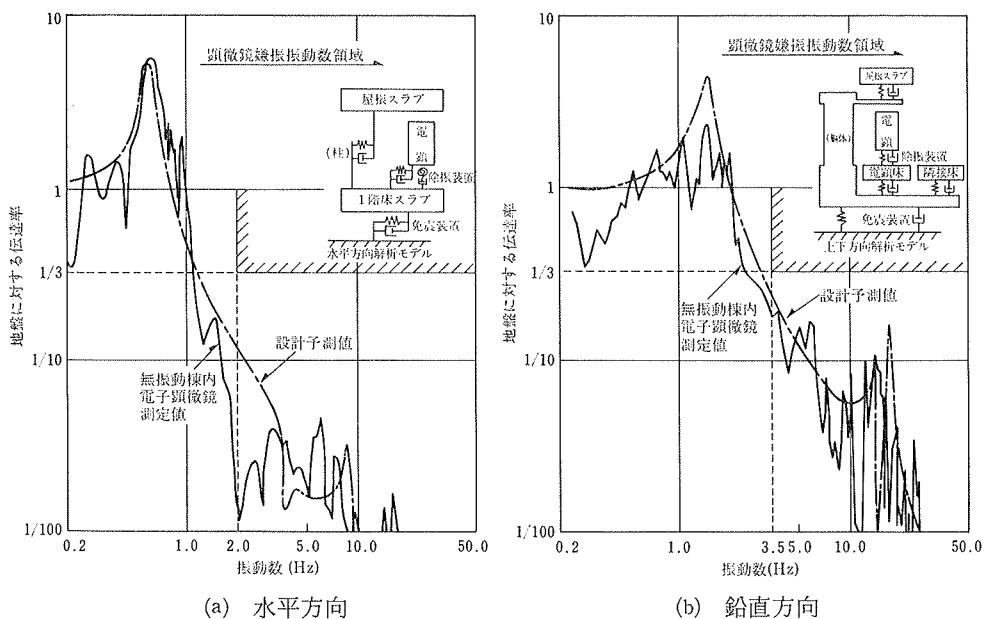


図-6 電子顕微鏡除振装置の地盤側に対する振動の伝達率

鏡上の測定結果では図-9に示すように、常時微動レベルを大きく越える振動は生じておらずほぼ予測通りである。

免震装置部の絶縁継手はピアノ線入りグラスフレキシブルダクトなどを使用し、乱流を発生する風量調節装置などは建物底盤に設置している。この施設においては、各種精密機器の中でも特に電子顕微鏡の室内環境条件が厳しく、室内の温湿度、気流の速度と方向、磁界、騒音などにも注意が払われている。

6. 使用時の測定結果

図-8~図-9に昼間の実使用時の地盤及び電子顕微鏡の常時微動観測波から4秒間ずつ約5分間、ランニン

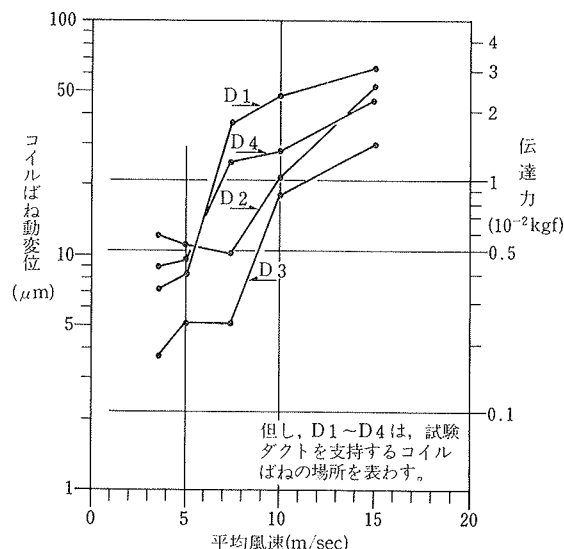


図-7 鉄板ダクトの風速と床伝達力の実験結果

グスペクトルを計算して各周波数の最大加速度を求めた結果を示す。横軸に振動数、縦軸に振動速度を表わし、右上がり軸が各振動数の変位量を、右下がり軸に加速度量を示す。

地盤振動は3 Hz～70 Hzの周波数帯域で右下がりの加速度軸に関して大きくなっているが、電子顕微鏡除振台上の振動は地盤で卓越する振動が除かれてほぼ測定器の限界値であった。従来、夜間には加速度が昼間の約半分であったが、今回、それ以下の振動量になっており、電子顕微鏡などの精密機器は昼間でも十分使用できるものと考えられる。他の20数台の除振装置もほぼ同様の設計を行ない、測定結果もほぼ同様であった。

7. 地震観測結果

建物完成直後の昭和63年3月末から地震観測を実施している。同年8月末現在までに数回の地震が観測されている。いずれも小地震であるが電子顕微鏡の加速度は上下、水平共にGL-1.8 m地盤での観測値に対して1/4～1/10に低減されており、地震時の精密機器の保護に対しても効果的であることを示している。代表的な観測例を図-10に示す。

結び

免震建物の免震効果はハイテクR&Dセンター¹⁾、澁谷清水第一ビルなどで確認されつつある。今回、積層ゴム免震装置を用いて、高価な精密機器を震害から守る免震と同時に、80万倍電子顕微鏡などの微振動を嫌う施設の除振にも免震建物に適用し、初期の目標が達せられたことを確認した。なお、この工事は建設省官庁営繕部課

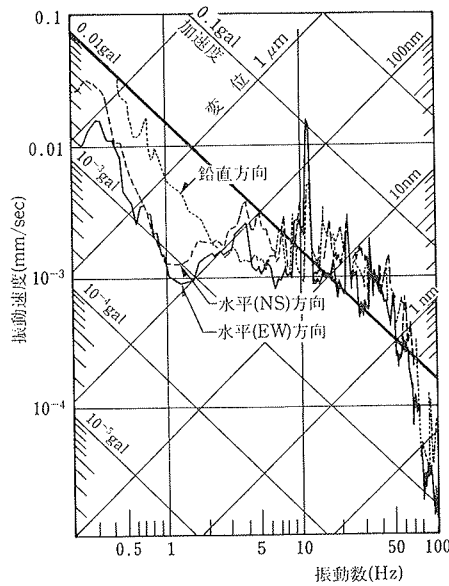


図-8 地盤の常時微動測定値

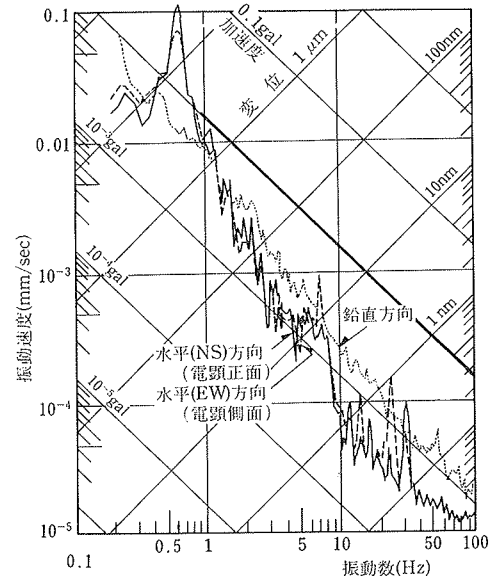


図-9 電子顕微鏡除振装置の常時微動測定値

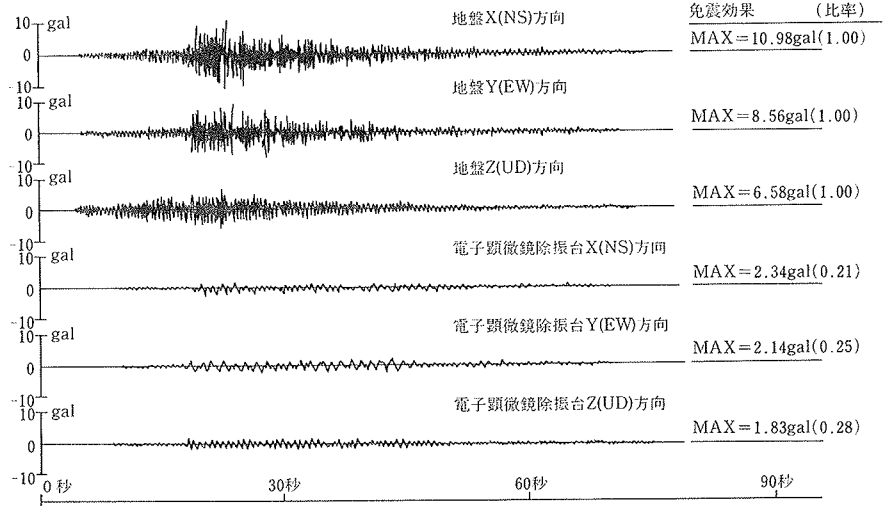


図-10 地震観測波形 (1988.8.12.)

震源：千葉県南部，深さ70 km，東京震度4，M=5.3

長補佐 秋葉善美氏，新宅浩明氏，藤田典正氏のご指導のもとで実施されたものであり感謝の意を表します。社内では免震プロジェクト部，設備設計第一部，特殊工法部共同で実施されたものである。

参考文献

- 1) 武田，岡田，他：構造物の免震に関する研究(その3) -ハイテクR&Dセンターの設計概要と性能確認のための実験と観測について-，大林組技術研究所報，No. 36, (1988), pp. 83～93