

# リニアモータを用いた単結晶引上げ装置用 アクティブ・パッシブ切換え型免震装置

—第2報：シミュレーション解析—

Seismic Isolation System with Convertible Active and Passive Modes  
Using Linear Motors for Monocrystal Pullers 2 nd Report: Simulation Analysis

古川 裕 紀\*・藤 田 隆 史\*\*・鎌 田 崇 義\*\*\*・晦 日 英 明\*\*\*

Hironori FURUKAWA, Takafumi FUJITA, Takayoshi KAMADA and Hideaki MISOKA

## 1. はじめに

第1報：振動制御実験では、大径化が進む単結晶シリコンを生産する単結晶引上げ装置を免震する場合に、引き上げワイヤと単結晶が形成する比較的長周期な振り子の共振問題等によるアクティブ免震の必要性、および振動制御実験の方法・結果を報告した。

本報では、実験結果とシミュレーション解析結果の一致を図ることで、制御器やアクチュエータの改良を試みた場合の免震性能予測が可能になることを目的とする。

## 2. 解析モデル

ワイヤに吊り下がってくる単結晶は縦に長く成長していくため、シミュレーションモデルは2自由度振り子として扱うこととした。また実機を考慮した場合、単結晶の下端は原料融液に浸っているため、単結晶の振り子運動に対する抵抗となることが考えられる。実験装置では、単結晶モデルと引上げ装置下部との相対変位を計るためのワイヤ式変位計がその抵抗に近い作用をもつと考えた。

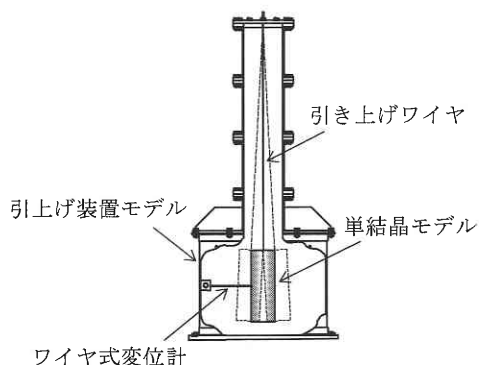


図1 単結晶引上げ装置

解析モデルは、以下に示すように単結晶モデルの回転運動を考慮した3質点4自由度モデルとした。

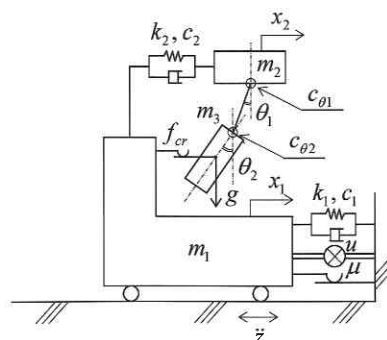


図2 解析モデル

以下に運動方程式の作成を記す。上図では単結晶に作用する減衰項を一定力  $f_{cr}$  としているが、引き上げ装置下部と単結晶との相対速度に比例する減衰係数  $c_c$  として計算を進めた後、式の変換を行う。

・単結晶引上げ装置の運動エネルギー

$$T_1 + T_2 = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1 + \dot{z})^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_2 + \dot{z})^2 \dots (1)$$

・単結晶の運動エネルギー

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2) + \frac{1}{2} I_c \dot{\theta}_2^2 \dots (2)$$

また、単結晶重心の  $x$  方向変位を  $x_c$ 、単結晶重心の  $y$  方向変位を  $y_c$ 、単結晶の慣性モーメントを  $I_c$  とすると

$$x_c = x_2 + z - l_1 \sin \theta_1 - \frac{1}{2} l_2 \sin \theta_2 \dots (3)$$

$$y_c = -l_1 \cos \theta_1 - \frac{1}{2} l_2 \cos \theta_2 \dots (4)$$

$$I_c = m_3 \left( \frac{r^2}{4} + \frac{l_2^2}{12} \right) \dots (5)$$

\*ヤクモ株式会社 (民間等との共同研究員)

\*\*東京大学生産技術研究所 機械・生体系部門

\*\*\*東京農工大学大学院 専攻・機械システム工学

式 (3), (4) より

$$\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2 = (\dot{x}_2 + \dot{z})^2 + l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{4} l_2^2 \dot{\theta}_2^2 - 2(\dot{x}_2 + \dot{z}) l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - (\dot{x}_2 + \dot{z}) l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 + l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad \dots (6)$$

$$\begin{aligned} \therefore T_3 = & \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}_2 + \dot{z})^2 + \frac{1}{2} m_3 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{4} m_3 l_2^2 + I_c \right) \dot{\theta}_2^2 \\ & - m_3 (\dot{x}_2 + \dot{z}) l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}_2 + \dot{z}) l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \\ & + \frac{1}{2} m_3 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad \dots (7) \end{aligned}$$

式 (1), (7) より, 運動エネルギー  $T$  は以下のように定まる.

$$\begin{aligned} T = & T_1 + T_2 + T_3 \\ = & \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_1 + \dot{z})^2 + \frac{1}{2} (m_2 + m_3) (\dot{x}_2 + \dot{z})^2 + \frac{1}{2} m_3 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \\ & + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{4} m_3 l_2^2 + I_c \right) \dot{\theta}_2^2 - m_3 (\dot{x}_2 + \dot{z}) l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \\ & - \frac{1}{2} m_3 (\dot{x}_2 + \dot{z}) l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 + \frac{1}{2} m_3 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad \dots (8) \end{aligned}$$

同様に散逸関数は以下のように定まる.

$$\begin{aligned} D = & \frac{1}{2} c_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} c_{\theta 1} \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} c_{\theta 2} (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1)^2 \\ & + \frac{1}{2} c_c (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} c_c l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{8} c_c l_2^2 \dot{\theta}_2^2 \\ & - c_c (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - \frac{1}{2} c_c (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) l_2 \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 \\ & + \frac{1}{2} c_c l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad \dots (9) \end{aligned}$$

また, ポテンシャルエネルギーは以下のようになる.

$$U = \frac{1}{2} k_1 x_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (x_2 - x_1)^2 - m_3 g (l_1 \cos \theta_1 + \frac{1}{2} l_2 \cos \theta_2) \quad \dots (10)$$

ラグランジュの方程式 (下式) より, 運動方程式を求める.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = u_i \quad \dots (11)$$

式の展開の中で,  $\theta_1, \theta_2$  は微小として  $\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1, \theta^2 \approx 0$ , と近似する. また単結晶モデルに作用する減衰項をワイヤ式変位計による一定力  $f_{cr}$  として扱うことで, 減衰係数  $c_c$  を含む項が置換され, 運動方程式は以下のようになる.

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + \ddot{z} = & -\frac{c_1 + c_2}{m_1} \dot{x}_1 + \frac{c_2}{m_1} \dot{x}_2 - \frac{k_1 + k_2}{m_1} x_1 + \frac{k_2}{m_1} x_2 \\ & + \frac{1}{m_1} \{ u + \text{sign}(\dot{x}_c - \dot{x}_1) f_{cr} \} \quad \dots (12) \end{aligned}$$

研究速報

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 + \ddot{z} = & \frac{c_2}{m_2} \dot{x}_1 - \frac{c_2}{m_2} \dot{x}_2 + \frac{k_2}{m_2} x_1 - \frac{k_2}{m_2} x_2 - \frac{c_{\theta 1} + c_{\theta 2}}{m_2 l_1} \dot{\theta}_1 \\ & + \frac{c_{\theta 2}}{m_2 l_1} \dot{\theta}_2 - \frac{m_3 g}{m_2} \theta_1 \quad \dots (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 = & \frac{c_2}{m_2 l_1} \dot{x}_1 - \frac{c_2}{m_2 l_1} \dot{x}_2 + \frac{k_2}{m_2 l_1} x_1 - \frac{k_2}{m_2 l_1} x_2 \\ & - \left\{ \left( \frac{1}{m_2 l_1^2} + \frac{l_2^2}{4 l_1^2 I_c} + \frac{1}{m_3 l_1^2} \right) (c_{\theta 1} + c_{\theta 2}) + \frac{l_2}{2 l_1 I_c} c_{\theta 2} \right\} \dot{\theta}_1 \\ & + \left( \frac{1}{m_2 l_1^2} + \frac{l_2^2}{4 l_1^2 I_c} + \frac{l_2}{2 l_1 I_c} + \frac{1}{m_3 l_1^2} \right) c_{\theta 2} \dot{\theta}_2 \\ & - \left( \frac{m_3 g}{m_2 l_1} + \frac{m_3 l_2^2 g}{4 l_1 I_c} + \frac{g}{l_1} \right) \theta_1 + \frac{m_3 l_2^2 g}{4 l_1 I_c} \theta_2 + \frac{1}{m_3 l_1} \text{sign}(\dot{x}_c - \dot{x}_1) f_{cr} \quad \dots (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_2 = & \left( \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{c_{\theta 1} + c_{\theta 2}}{2 I_c} + \frac{c_{\theta 2}}{I_c} \right) \dot{\theta}_1 - \left( \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{c_{\theta 2}}{2 I_c} + \frac{c_{\theta 2}}{I_c} \right) \dot{\theta}_2 + \frac{m_3 l_2 g}{2 I_c} \theta_1 \\ & - \frac{m_3 l_2 g}{2 I_c} \theta_2 \quad \dots (15) \end{aligned}$$

次に免震装置に生じる摩擦について考慮する. これは摩擦の影響により免震装置が停止した場合 (PHASE 1) と免震装置作動時 (PHASE 2) とに分けてそれぞれの運動方程式を作成し, 切換条件により切換わるものとした.

< PHASE 1 >

$$\begin{aligned} \ddot{x}_2 + \ddot{z} = & -\frac{c_2}{m_2} \dot{x}_2 + \frac{k_2}{m_2} x_1 - \frac{k_2}{m_2} x_2 - \frac{c_{\theta 1} + c_{\theta 2}}{m_2 l_1} \dot{\theta}_1 \\ & + \frac{c_{\theta 2}}{m_2 l_1} \dot{\theta}_2 - \frac{m_3 g}{m_2} \theta_1 \quad \dots (16) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 = & -\frac{c_2}{m_2 l_1} \dot{x}_2 + \frac{k_2}{m_2 l_1} x_1 - \frac{k_2}{m_2 l_1} x_2 \\ & - \left\{ \left( \frac{1}{m_2 l_1^2} + \frac{l_2^2}{4 l_1^2 I_c} + \frac{1}{m_3 l_1^2} \right) (c_{\theta 1} + c_{\theta 2}) + \frac{l_2}{2 l_1 I_c} c_{\theta 2} \right\} \dot{\theta}_1 \\ & + \left( \frac{1}{m_1 l_1^2} + \frac{l_2^2}{4 l_1^2 I_c} + \frac{l_2}{2 l_1 I_c} + \frac{1}{m_3 l_1^2} \right) c_{\theta 2} \dot{\theta}_2 \\ & - \left( \frac{m_3 g}{m_1 l_1} + \frac{m_3 l_2^2 g}{4 l_1 I_c} + \frac{g}{l_1} \right) \theta_1 + \frac{m_3 l_2^2 g}{4 l_1 I_c} \theta_2 \\ & + \frac{1}{m_3 l_1} \text{sign}(\dot{x}_c - x_1) f_{cr} \quad \dots (17) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_2 = & \left( \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{c_{\theta 1} + c_{\theta 2}}{2 I_c} + \frac{c_{\theta 2}}{I_c} \right) \dot{\theta}_1 - \left( \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{c_{\theta 2}}{2 I_c} + \frac{c_{\theta 2}}{I_c} \right) \dot{\theta}_2 \\ & + \frac{m_3 l_2 g}{2 I_c} \theta_1 - \frac{m_3 l_2 g}{2 I_c} \theta_2 \quad \dots (18) \end{aligned}$$

研 究 速 報

< PHASE 2 >

$$\ddot{x}_1 + \ddot{z} = -\frac{c_1 + c_2}{m_1} \dot{x}_1 + \frac{c_2}{m_1} \dot{x}_2 - \frac{k_1 + k_2}{m_1} x_1 + \frac{k_2}{m_1} x_2 + \frac{1}{m_1} (u + \text{sign}(\dot{x}_c - \dot{x}_1) f_{cr} - \text{sign}(\dot{x}_1) \mu (m_1 + m_2 + m_3) g) \quad (19)$$

$$\ddot{x}_2 + \ddot{z} = \frac{c_2}{m_2} \dot{x}_1 - \frac{c_2}{m_2} \dot{x}_2 + \frac{k_2}{m_2} x_1 - \frac{k_2}{m_2} x_2 - \frac{c_{\theta 1} + c_{\theta 2}}{m_2 l_1} \dot{\theta}_1 + \frac{c_{\theta 2}}{m_2 l_1} \dot{\theta}_2 - \frac{m_3 g}{m_2} \theta_1 \quad \dots \dots \dots (20)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_1 = & \frac{c_2}{m_2 l_1} \dot{x}_1 - \frac{c_2}{m_2 l_1} \dot{x}_2 + \frac{k_2}{m_2 l_1} x_1 - \frac{k_2}{m_2 l_1} x_2 \\ & - \left\{ \left( \frac{1}{m_2 l_1^2} + \frac{l_2^2}{4 l_1^2 I_c} + \frac{1}{m_3 l_1^2} \right) (c_{\theta 1} + c_{\theta 2}) + \frac{l_2}{2 l_1 I_c} c_{\theta 2} \right\} \dot{\theta}_1 \\ & + \left( \frac{1}{m_2 l_1^2} + \frac{l_2^2}{4 l_1^2 I_c} + \frac{l_2}{2 l_1 I_c} + \frac{1}{m_3 l_1^2} \right) c_{\theta 2} \dot{\theta}_2 \\ & - \left( \frac{m_3 g}{m_2 l_1} + \frac{m_3 l_2^2 g}{4 l_1 I_c} + \frac{g}{l_1} \right) \theta_1 + \frac{m_3 l_2^2 g}{4 l_1 I_c} \theta_2 \\ & + \frac{1}{m_3 l_1} \text{sign}(\dot{x}_c - \dot{x}_1) f_{cr} \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_2 = & \left( \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{c_{\theta 1} + c_{\theta 2}}{2 I_c} + \frac{c_{\theta 2}}{I_c} \right) \dot{\theta}_1 - \left( \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{c_{\theta 2}}{2 I_c} + \frac{c_{\theta 2}}{I_c} \right) \dot{\theta}_2 \\ & + \frac{m_3 l_2 g}{2 I_c} \theta_1 - \frac{m_3 l_2 g}{2 I_c} \theta_2 \quad \dots \dots (22) \end{aligned}$$

切 換 え 条 件

< PHASE 1 から PHASE 2 >

$$\begin{aligned} & |m_1 \ddot{z} - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 - u - f_{cr}| \\ & > \mu (m_1 + m_2 + m_3) g \quad \dots \dots \dots (23) \end{aligned}$$

< PHASE 2 から PHASE 1 >

$$\dot{x}_1 \approx 0 \quad \dots \dots \dots (24)$$

$$\begin{aligned} & |m_1 (\ddot{x}_1 + \ddot{z}) - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 - u - f_{cr}| \\ & \leq \mu (m_1 + m_2 + m_3) g \quad \dots \dots \dots (25) \end{aligned}$$

3. シミュレーション解析

以上の運動方程式を用いてシミュレーションを行った。入力地震波は El centro NS 波, JMA 神戸 NS 波の 2 波を最大加速度 30 [gal] として用いた。シミュレーションでは, アクチュエータの動特性として第 1 報で報告した同定結果

を用いたのだが, アクティブ免震時の単結晶モデルの変位波形が実験結果よりも大きな値となった。そこで, 実験と解析それぞれの指令電圧と推力を FFT 解析し比較した。ここでは JMA 神戸 NS 波についての結果を図 3 に示す。

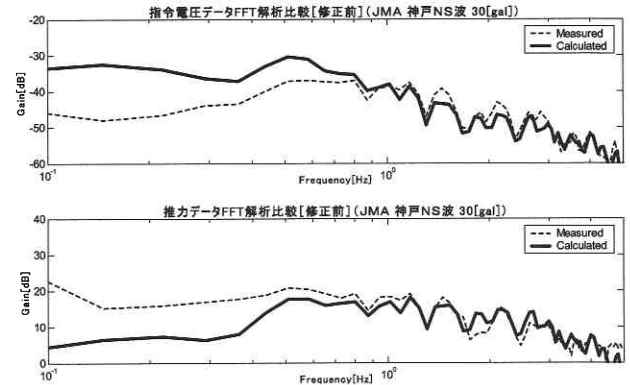


図 3 指令電圧・推力データの FFT 解析比較 (修正前)

これを見ると, 指令電圧 FFT 解析比較については 1 [Hz] 以下の領域で実験値が下回っているが, 推力データでは逆転してシミュレーション値の方が小さい値になっていることが分かった。このためアクチュエータの動特性を修正して推力データの FFT 解析値を近づけてみた。修正した結果を図 4 に示す。

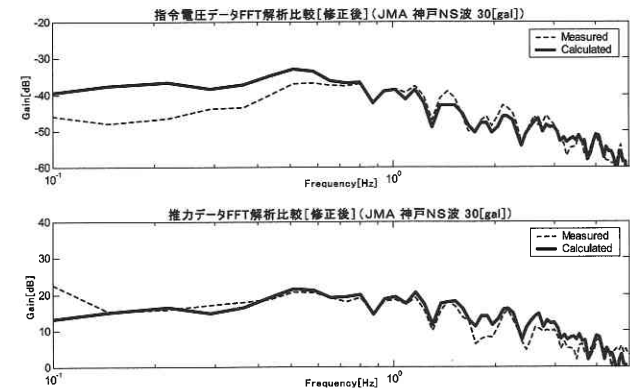


図 4 指令電圧・推力データの FFT 解析比較 (修正後)

ここで, アクチュエータの動特性を修正した詳細を示す。図 5 において \* 印を通るリニアモータ同定値に対し, 修正した動特性を太線にて示した。1 [Hz] 以下の領域を持ち上げた形になっているのが分かる。

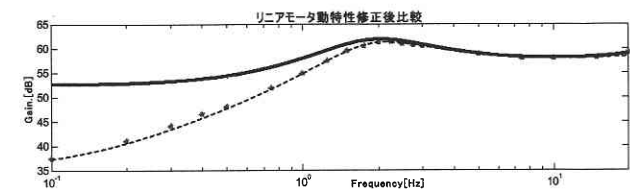


図 5 リニアモータ動特性修正後比較

この修正については、リニアモータ同定試験は免震架台のバネ・ダンパを外した状態にし、リニアモータにて免震架台のみを周波数ごとに加振した時の指令電圧から推力までの伝達を計測して行った。この方法では、バネ・ダンパ系に影響を受けない純粋な推力を測定出来る反面、0.1 [Hz] といった低周波域ではリニアガイドにて支持された免震架台のみを押すために必要な推力が小さくなってしまい、指令電圧から推力までの伝達関数は実際よりも小さい値になる傾向があると考えられる。これに対し、振動実験時には免震架台にはバネ・ダンパおよび搭載物（単結晶引上げ装置）が付加されているため低周波域での必要な推力が小さくて済むとは考えられない。モーターの再生抵抗等も含めさらに追求していく必要がある。

#### 4. 解析結果

以上の修正を行ったシミュレーション解析結果と実験結果について、免震架台と単結晶モデルの変位の比較をそれぞれ示す。これを見ると単結晶モデルの変位についてはおおよその一致が見られたが、架台変位については特にアクティブ免震結果について変位の不一致が見られた。これは、アクチュエータのドリフト現象が原因である。この現象は、実機適用時には安全確保のため架台変位データを制御器にフィードバックさせる必要があるために改善が見込める。

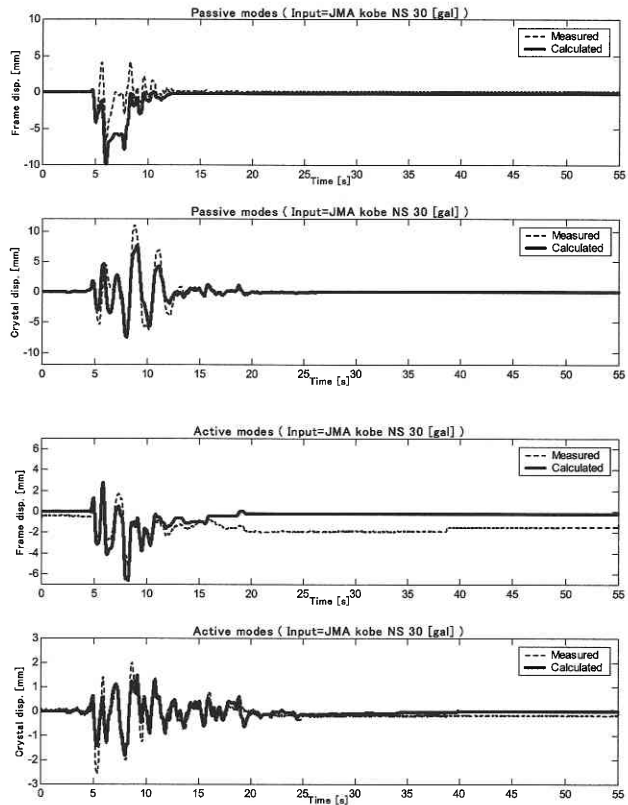


図7 実験結果との比較 (JMA 神戸 NS 波 30[ga])

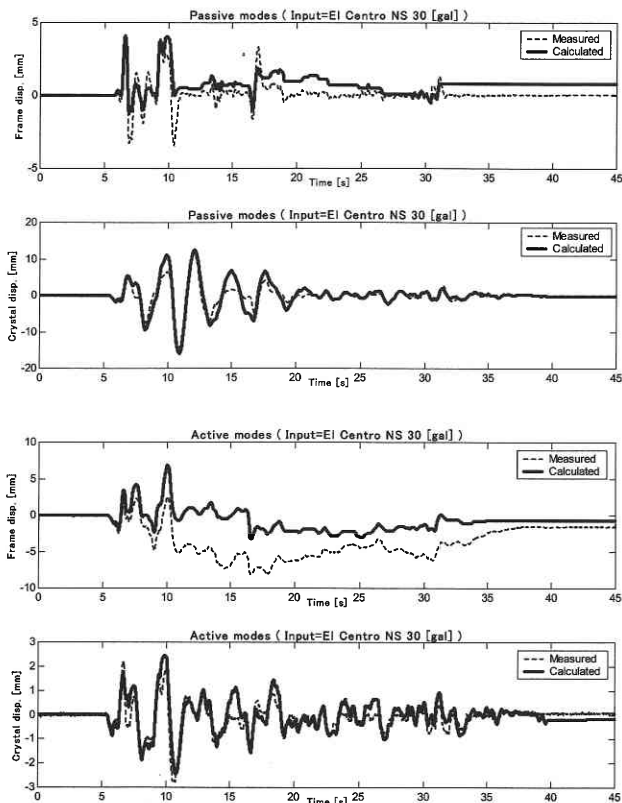


図6 実験結果との比較 (El centro NS 波 30[ga])

#### 5. おわりに

本報では、振動制御実験結果とシミュレーション解析結果との一致を図ることを目的としたが、完全な一致には至らなかった。その要因として上述したアクチュエータに関すること以外にも、実験装置の単結晶モデルとワイヤに作用する不確定要素が多数存在していることも考えられる。しかし、本研究の目的は実機への適用であるため、実機の実情が把握できていない現段階においては、この程度の一致が見られれば制御器およびアクチュエータの改良のための性能予測は十分に可能であるといえる。今後、本報にもとづいたシミュレーションによる制御器およびアクチュエータの改良を行うことで、更なる免震性能の向上に努めたい。

(2004年9月30日受理)

#### 参考文献

- 1) Fujita, Active Isolation of Sensitive Equipment for Weak Earthquakes, Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, 1988-8, Vol. 8, SE-10