

リニアモータを用いた単結晶引き上げ装置用アクティブ・パッシブ 切換え型免震装置 (第1報: 振動制御実験)

Seismic Isolation System with Convertible Active and Passive Modes Using Linear Motors for
Monocrystal Pullers (1st Report: Vibration Control Experiment)

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

現在, あらゆる設備機器は半導体チップを内蔵し高知能化が図られている. この知能化の根幹となる半導体チップの素材は単結晶シリコンであり, その9割以上がチョクラルスキー法 (Czochralski = CZ法) と呼ばれる製法により生産されている. ここで CZ 法とは, 原料である多結晶シリコンをルツボ内で熔融し, その液面に種結晶を浸して回転させながらゆっくりと引き上げていくことにより, 種結晶を起点とした単結晶に成長させる製法である (図1参照).

近年, 生産技術の向上により単結晶シリコンの大口径化が進み, 現在は $\phi 300$ mm ($\phi 12$ inch) が主流になりつつある. このサイズの単結晶は完成間近で数百 kg にもなるが, それに比べて成長の起点となる種結晶は $\phi 5 \sim 10$ mm と非常に細いうえにガラスのような脆性を持つため, 衝撃等により種結晶部分が破断する恐れがある. このことは, 比較的発生頻度の高い弱地震による小さな揺れであっても単結晶が種結晶部分から破断・落下するといった経済的損失を招く可能性があることを示している.

現在, 地震から製造設備を保護する目的でパッシブな免震装置が実用化されているが, 単結晶引き上げ装置への適用を考えた場合, 引き上げワイヤと単結晶 (質点) により比較的長周期な振り子が形成されるため, 免震効果が期待できないばかりでなく共振等によりかえって被害を増大させてしまう恐れがある. そのため, アクティブ制御にて成長中の単結晶シリコン自体を保護対象とした高度な免震を行うことが要望される. しかし, アクティブ制御を行う場合, アクチュエータには容量等の制約があり, それが装置製造コストやランニングコストへ反映してしまうため, 出来るだけ小さいアクチュエータを使用することが望ましい.

本研究ではこれらの問題点を踏まえ, 発生頻度の高い弱地震に対しては成長中の単結晶シリコンを保護対象とする免震効果の優れたアクティブ免震装置として機能し, 稀に

発生する強地震に対しては製造装置本体を保護対象とするパッシブ免震装置として機能する, アクティブ・パッシブ切換え型免震装置を提案し, 実験にてその性能を確認することを目的とした.

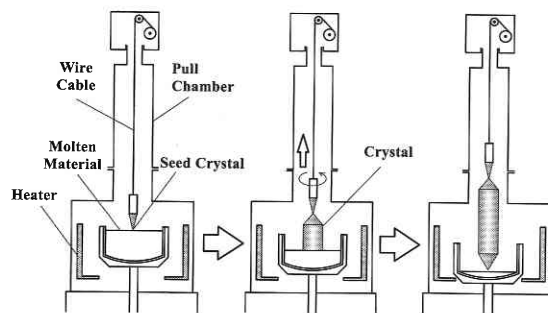


図1 Growth of monocrystal

2. 単結晶引き上げ装置とアクティブ免震装置

2.1 実験装置

実験装置の外観を図2, 3に示す. 実験装置はアクティブ免震装置, 単結晶引き上げ装置モデル, 単結晶シリコンモデルの3つの部分から構成される.

アクティブ免震装置は可動フレームがリニアベアリングにより支持され, 引張りばねおよびオイルダンパによりベースフレームに接続されている. ベースフレーム上には円筒形リニアモータが設置され, カラムが可動フレームに接続されている. 装置の最大変位は ± 0.245 m, フレーム寸法は $\square 1950$ mm, 質量 543 kg, 全搭載時の固有振動数は, 0.25 Hz である. 制御用の振動センサは可動フレーム上に設置した.

単結晶引き上げ装置モデルは高さ 2025 mm, 質量 538 kg の円筒構造で, 頂点の固有振動数は 18.5 Hz である.

単結晶シリコンモデルは $\phi 150$ mm \times 450^h mm で, 質量 63 kg である. 単結晶モデルは引き上げられている過程を想定し, 引き上げ装置モデルの頂点から $\phi 5$ mm のワイヤにて吊り下げられている. 用意したワイヤは2種類 Len1 (L = 1425 mm), Len2 (L = 345 mm) であり, それぞれの振り子の固有振動数は 0.36 Hz, 0.68 Hz である.

*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

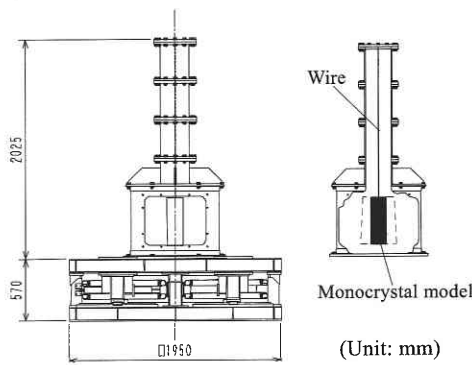


図2 Drawing of experimental model

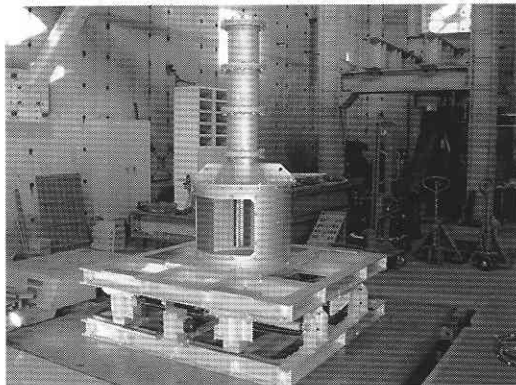


図3 Experimental model

2.2 リニアモータ

本研究で用いるリニアモータは一次側である円筒と、二次側であるカラム(シャフト)により構成されている。磁束の影響で非磁性体表面に渦電流が発生する性質を利用して、一次側で発生させる磁束を変化させて二次側に発生する渦電流を制御することにより推力を直接取り出せる。

図4に実験にて測定したリニアモータ動特性と、同定されたモデルにより計算された動特性を示す。

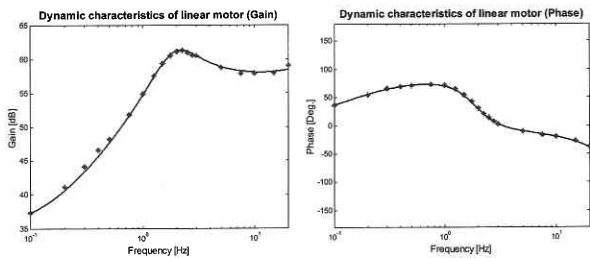


図4 Dynamic characteristics of linear motor

3. 制御系設計

3.1 制御系設計用1質点系モデル

単結晶引上げ装置では、免震保護対象となる単結晶シリコンは1400°C以上の高温状態にあるため、制御に必要なデータを直接センシングすることは困難と考えられる。このため単結晶引上げ装置用免震装置上の1箇所加速度デ

ータのみを利用して制御を行うこととした。この場合の制御系設計用の免震モデルは1質点系である。また制御器設計は非線形モデルに対して行うことが困難であるため、免震装置の摩擦を無視して線形モデルとして扱った。ただし、摩擦による見かけの減衰を考慮し減衰項を本来の値より大きい \tilde{c}_1 として扱うことで摩擦の状態を近似する。

$$m_1 \ddot{x}_1 + \tilde{c}_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = F_a - m_1 \ddot{z} \dots \dots \dots (1)$$

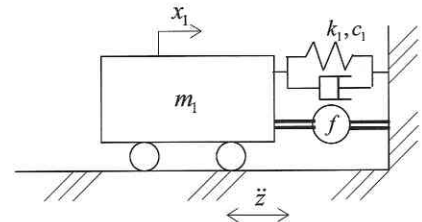
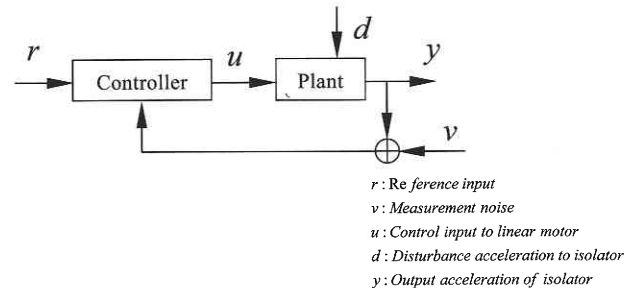


図5 Analytical model for control system design

3.2 モデルマッチング法

制御器の設計にはモデルマッチング法を用いた。同設計法はプラントの伝達関数を基準にして、目的とする閉ループ系の伝達関数を視覚的に捉えながら設定し、それを実現する制御系を逆演算によって算出するものである。



r: Reference input
v: Measurement noise
u: Control input to linear motor
d: Disturbance acceleration to isolator
y: Output acceleration of isolator

図6 Block diagram of control system

3.3 制御パラメータの決定

システム全体の極によって制御器が決定される。本研究でのシステム全体の極は、プラントに関する極が2つ、ハイパスフィルタに関する極が1つ、ローパスフィルタに関する極が2つ、リニアモータに関する極が4つ、任意に定める極が7つの計16個である。これらは W_{dy} , C_{yu} , W_{vy} の形状を見ながら決定した。決定した W_{dy} , C_{yu} , W_{vy} の形状を図7, 8, 9に示す。

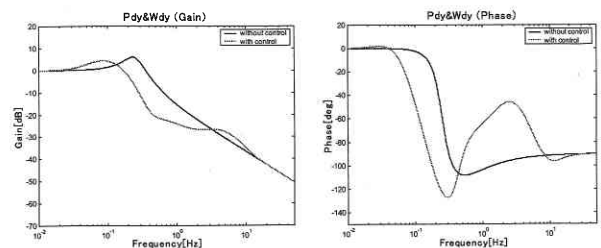


図7 W_{dy}

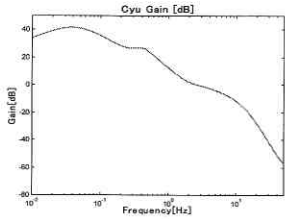


図 8 C_{yy}

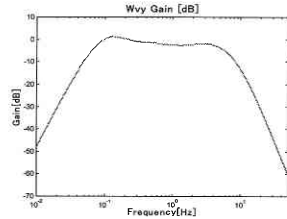


図 9 W_{yy}

4. 制御実験

4.1 地震波加振実験

実験装置に地震波を入力した場合の応答について以下に述べる。入力地震波は El centro NS 波, JMA 神戸 NS 波, 八戸 EW 波の 3 波であり, 入力加速度を 10, 30, 50 [gal] とした。ここで単結晶モデルを吊り下げているワイヤは Len1 である。 ($L = 1425, f_0 = 0.36$ [Hz])

入力加速度を変えて実験を行った全体的な傾向として, 入力加速度が大きくなるほど免震効果が高くなっていることが確認出来たため, 10, 50 [gal] 入力時について論じる。

図 10, 11 にパッシブ免震, アクティブ免震についての単結晶モデル変位時刻歴波形と振動台から免震架台までの伝達関数を示す。

アクティブ免震はパッシブ免震に比べて入力波の種類・入力加速度の大きさに拘らず単結晶モデルの変位と, 架台上への加速度の伝達を低減出来ていることが分かる。

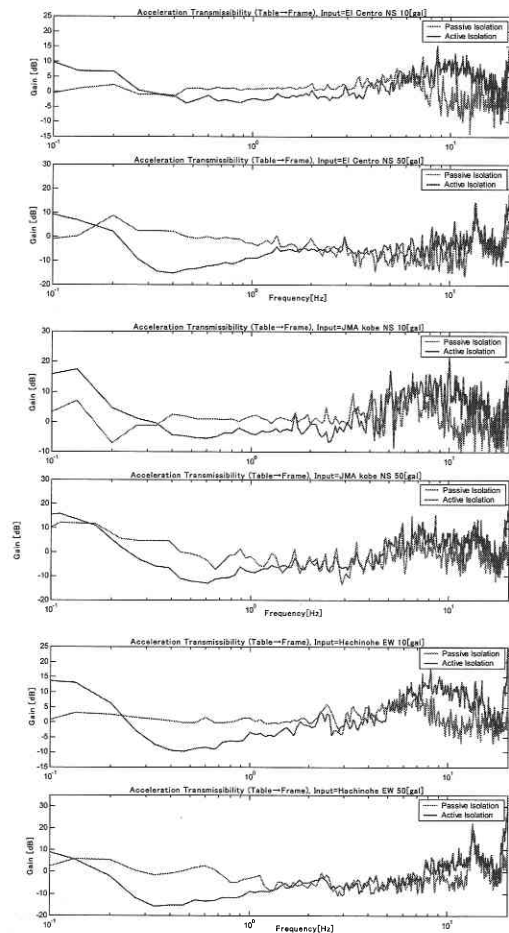


図 11 Acceleration transmissibilities

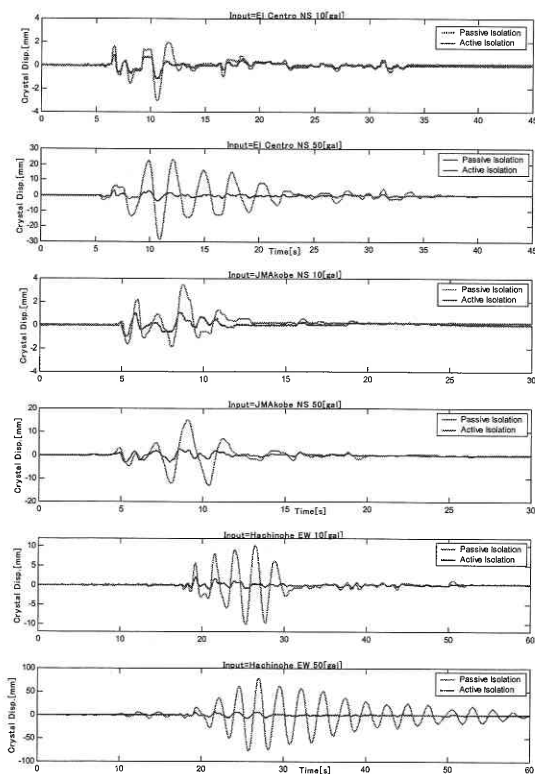


図 10 Time histories of displacement of crystal model

4.2 ロバスト性

実機への適用を考慮した場合, 単結晶がワイヤにより引き上げられていくに従い, 単結晶を質点とする振り子の固有振動数は変化していく。このため設計される制御器はこの振り子の動特性変化にかかわらず免震性能を実現できるロバスト性を有していなくてはならない。

ここではワイヤ長を 2 段階に調整することで, 単結晶引き上げ工程に伴う振り子の動特性変化を模し, それぞれの場合について免震効果を検証する。ワイヤを Len1 ($L = 1425$ mm, $f_0 = 0.36$ [Hz]) と Len2 ($L = 345$ mm, $f_0 = 0.68$ [Hz]) とし, 入力地震波の加速度を 10, 50 [gal] とした場合のパッシブ免震とアクティブ免震それぞれの単結晶モデル最大変位振幅の比較を図 12 に示す。

比較の結果, 変位振幅の最大値を 91.7% ~ 45.9% 低減させる免震性能が確認できた。これは制御器設計に際し, 低減を狙う周波数帯に Len1, Len2 の固有振動数が含まれるように幅を持たせたことで, 免震対象の動特性変化に対してロバスト性を有する制御器が設計出来たことを示している。

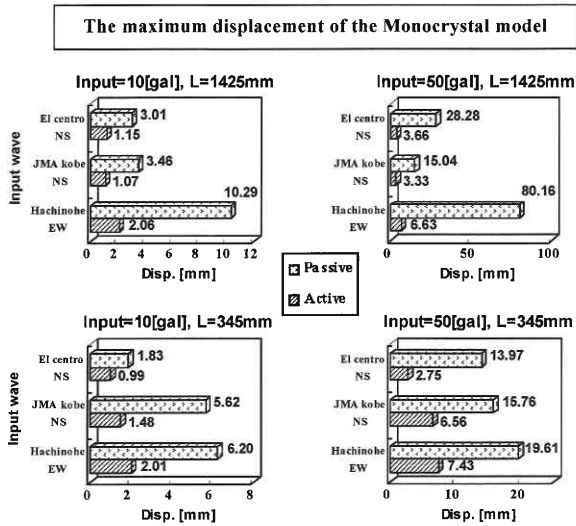


図12 Isolation performance

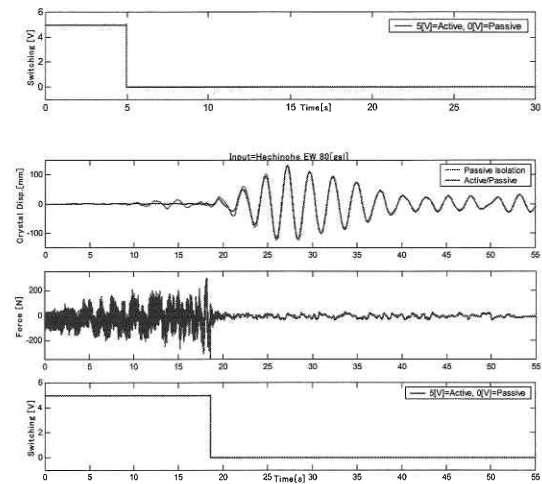


図13 Excitation experiment with Active-Passive Modes

4.3 アクティブ・パッシブ切換え実験

アクチュエータの容量を超えるような強地震が発生した場合には、パッシブ免震装置として機能させる必要がある。この切換えによる免震効果の変化を確認するため、アクティブ・パッシブ切換え実験を行った。地震波加振実験で用いた地震波の入力加速度を80 galに設定、アクティブ免震を行う中でリニアモータへの指令電圧がある一定値を超えた場合にパッシブ免震へ切換わるように設定した。

図13にパッシブ免震、アクティブ・パッシブ切換え免震による単結晶の変位振幅の時刻歴波形およびアクティブ・パッシブ切換え免震時のリニアモータの推力波形を示す。これを見ると、アクティブからパッシブへの切換えがスムーズに行なわれ、その後の免震性能はパッシブ免震実験結果とほとんど変わらないことが分かった。

5. おわりに

本研究では単結晶引上げ装置内で製造される単結晶自身の保護を目的としたアクティブ免震と、引上げ装置本体の保護を目的としたパッシブ免震とを地震の強弱によって区別して行うことができる、リニアモータを用いたアクティブ・パッシブ切換え型免震装置を提案し、その有効性について検証を行い、良好な結果を導き出すことが出来た。今後はシミュレーション解析結果と実験データとの一致、制御器の改良、及び汎用アクチュエータの適用検討等、製品化に向けて更なる研究を進めていく予定である。

最後に、本実験に協力いただいた東京農工大学学生林洋一君に感謝の意を表したい。

(2004年7月23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
- 2) 藤田ほか, ピエゾアクチュエータを用いたアクティブ微振動制御装置の研究(第1報, 一次元微振動制御を対象とした基礎的研究), 機械学会論文集, 57-540, C, 1991-8
- 3) 藤田ほか, リニアモータを用いた高層建物制振用アクティブ・パッシブ切換型マスダンパの大型モデル実験, 機械学会論文集, 62-594, C, 1996-2
- 4) 別所, リニアモータを用いた高層建物制振用アクティブ・マスダンパの制御手法に関する研究, 修士論文, 東京大学, 1997
- 5) 藤田ほか, リニアモータを用いた高層建物制振用アクティブ・マスダンパの制御手法に関する研究, 機械学会論文集, 64-620, C, 1998-4