

中小地震に対する加速度低減と大地震に対する変位制御を両立させた摩擦切替型機器免震装置の開発

半導体製造装置向け機器免震装置 TASS ユニット®のラインナップ拡充

青野 翔^{*1}・松本 萌那^{*1}・山崎 喜郎^{*2}・渡邊 与幸^{*3}

Keywords : seismic isolation for equipment, small to medium earthquakes, switching friction, roller bearing, business continuity
機器免震, 中小地震, 半導体製造, 摩擦切替, ローラー支承, 事業継続性

1. はじめに

TASS ユニットは大成建設（株）と（株）エーエスの共同により、半導体製造装置向けの機器免震装置として 2009 年に開発され¹⁾、以後国内および台湾の半導体工場へ継続的に導入されてきた。機器免震装置を導入する主な理由としては、耐震性として強度が十分な半導体工場においても、機器免震等の対策を施さなければ震度 5 弱～5 強程度の揺れで製造装置内の再調達期間の長くかつ高価な重要部品が損傷し、事業継続に多大な影響を及ぼすためである。TASS ユニットを導入することで実際に地震被害を免れた例²⁾は多数あり、その効果が実証されている一方で、開発当初には想定されていなかった課題も顕在化している。具体的には、従来の TASS ユニットでは、震度 3 から震度 4 程度の中小地震で製造装置内に積載された仕掛品（ウェーハ等）に損害が生じる場合がある。半導体製造の高度化（微細化）により仕掛品の価値は年々高騰しており、発生頻度の高い中小地震から仕掛品を守ることは急務となつており、必要な対策が求められている。

そこで、著者らは免震装置の変位量によって摩擦係数が切り替わる免震支承を開発し、中小地震に対して加速度低減性能を高めつつ、大地震時の変位抑制性能を極力落とさない新たな TASS ユニットを開発した。本報では、摩擦切替型免震装置の概要、解析による仕様検討、模擬試験体を用いた振動台実験による性能確認結果について報告する。

2. 摩擦切替型免震装置概要

2.1 免震支承の基本構造

免震支承の基本構成は図-1 に示すように、上板－台車－下板の 3 層に配置された車輪とレールの組み合わせから成る。従来の免震支承は車輪とレールが 1 対になっているのに対し、摩擦切替型の免震支承は摩擦係数の異なる 2 つの車輪とクランク形状のレールの組み合わせから成っていて、変位量によって摩擦係数を切替える。摩擦係数が切替わる原理としては、図-2 に示すように中小地震時は摩擦係数が小さい車輪のみで鉛直荷重が支持され、免震装置上の加速度を低減し、大地震時に免震変位が増大するとクランクさせたレールによって摩擦係数が大きい車輪に鉛直荷重が移行し、変位の増大を抑制する。なお、免震支承としての摩擦

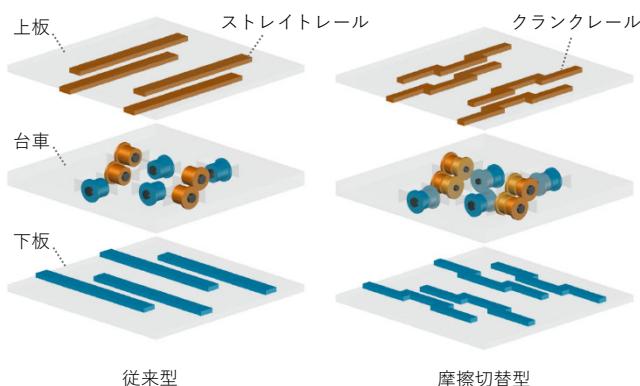


図-1 免震支承の基本構成
Fig.1 Basic configuration of seismic isolation bearing

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 防災研究室

* 2 エンジニアリング本部 建築ソリューション部

* 3 (株) エーエス

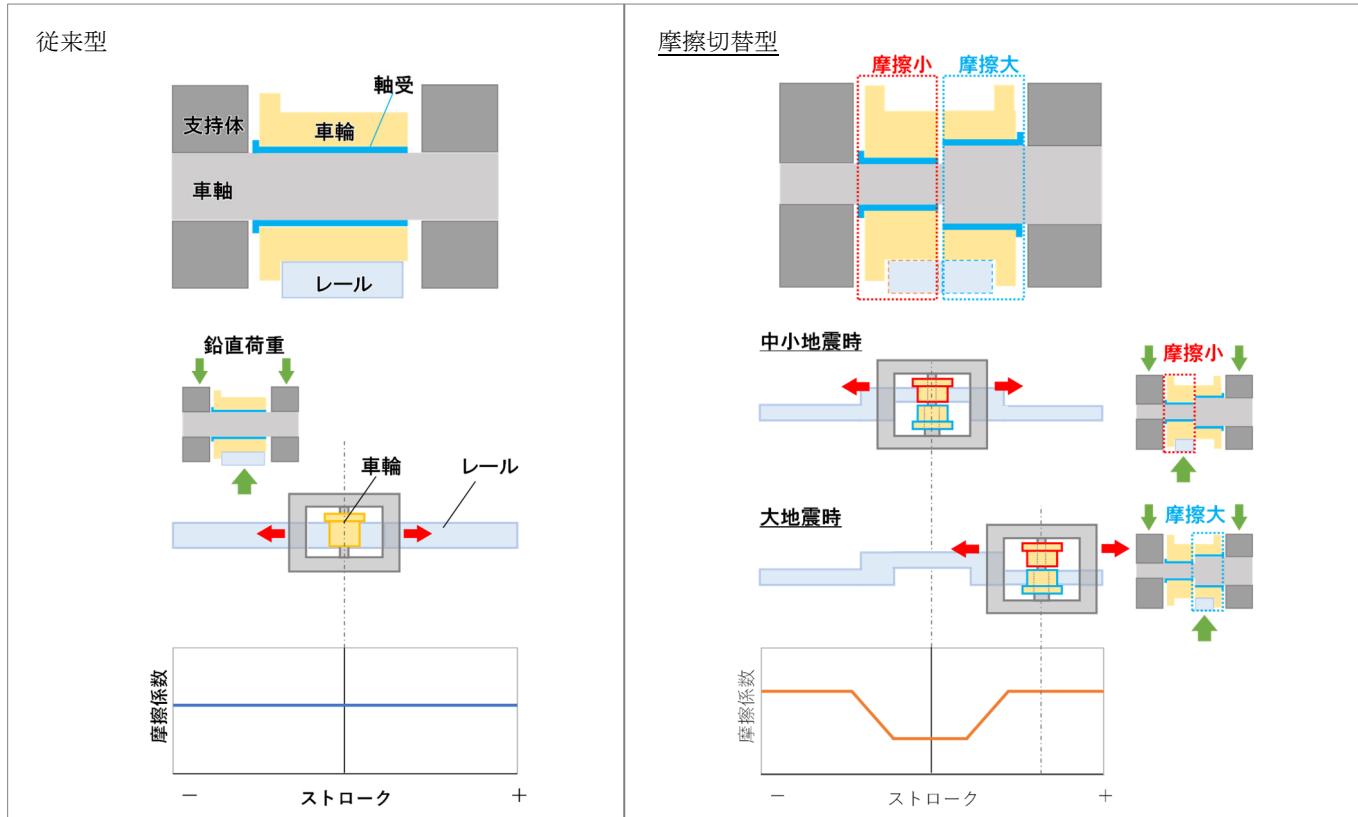


図-2 車輪の断面イメージと摩擦切替の原理
Fig. 2 Cross-sectional image of a wheel and the principle of switching friction

係数は軸受車軸間の回転抵抗と径比（車輪径：車軸径）から決定されるため、軸受の選定と径比の設定により摩擦係数を調整することができ、レールの形状によって切替わる位置および摩擦係数の勾配を調整できる。

2.2 性能コンセプト

摩擦切替型免震装置に関する性能コンセプトの模式図を図-3に示す。従来型では車輪の摺動特性により震度3程度で免震装置が作動し、免震装置下の地震動の大きさとして震度6弱程度まで製造装置の重要部品（石英部品）の損傷を低減することができるが、震度3~4程度の地震動に対しては加速度低減効果が限定的であり、仕掛け品の被害を防止できない場合がある。摩擦切替型は、従来よりも摺動抵抗の小さい車輪を使用することで震度3よりも小さい地震動で作動し、震度3~4程度の地震動に対して仕掛け品被害を防止する。さらに震度5弱以上の地震では摩擦係数を切替えることで、従来型と同程度に変位制御性能を保ち、震度6弱程度まで重要部品の損傷を低減することを目的とする。

3. 解析による摩擦係数の仕様検討

3.1 検討概要

前章で示した性能コンセプトに見合った摩擦切替特

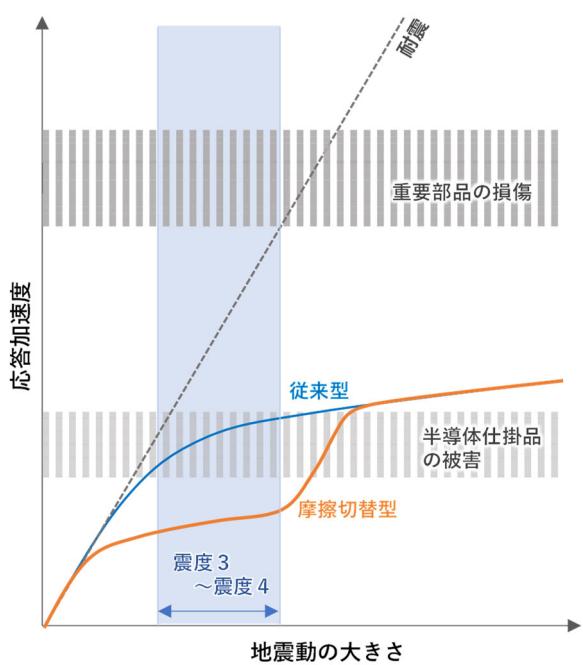


図-3 摩擦切替型の性能コンセプト
Fig. 3 Key concept of performance curve

性の検討のために、TASSユニットおよび製造装置を模擬した2質点系の時刻歴応答解析を行う。解析モデルの概要は図-4に示す通りであり、摩擦係数が d_1 および

d_2 を起点として μ_1 と μ_2 の2段階に変化するものとする。なお、 d_1 と d_2 の間は摩擦係数が線形に変化するものと仮定する。その他の各パラメータの設定は表-1 に示す。

3.2 摩擦係数一定時の応答

まず摩擦係数を一定とした時の応答について確認する。検討用地震動は、告示波 (JMA 神戸 NS 位相と八戸 NS 位相の2種類) を用い、3通りの入力レベル (Level1×0.5, Level1, Level2) で検討を行う。摩擦係数 μ を 0.5%~3.0%の範囲で変化させた時の最大応答を表-2 に示す。なお表中の $\mu=\infty$ は非免震時を示している。ここで、質点 m_2 の加速度が半導体仕掛け品への入力に相当するが、Level1×0.5 および Level1 では、摩擦係数が小さいほど効果的に加速度が低減されており、 $\mu=3.0\%$ と比べ $\mu=0.5\%$ の最大加速度が 1/4 程度となっている。また八戸位相の Level1×0.5 における質点 m_2 上の加速度応答スペクトルを図-5 示すが、 $\mu=0.5\%$ とすることで、どの周期帯でも概ね入力以下になっていることがわかる。一方、表-2 より Level2 の結果に着目すると摩擦係数の差が加速度に与える影響は相対的に小さくなり、 $\mu=3.0\%$ と比べ $\mu=0.5\%$ の最大加速度は 3/4 程度となっている。また摩擦係数が小さいほど変位が増大する傾向にあり、 $\mu=2.0\%$ 以下で限界変位の 14cm に到達するため、変位を制御する対策が必要となる。

3.3 摩擦切替時の応答

前節の結果から、Level1×0.5 および Level1 に対する加速度応答を最小化し、Level2 における変位を最小化するために、摩擦係数の変化が最も極端な 0.5%から 3.0%への切替を考える。また表-2 より Level1 で摩擦係数の切替が発生しないように、第一切替変位 d_1 を 3.0cm と定め、第二切替変位 d_2 を変数に検討を行う。 d_2 を 3.1~9.0cm の範囲で変化させた時の告示波 Level2×0.5 と、Level2 に対する最大応答を表-3 に示し、八戸位相の Level2×0.5 および Level2 における質点 m_2 上の加速度応答スペクトルを図-6 および図-7 に示す。Level2×0.5 の場合、最大応答として d_2 が大きいほど加速度低減効果が高く、変位が増大する傾向にある。また応答スペクトルを比較すると、 $\mu=3.0\%$ 一定の場合に比べて、周期帯によらずどのケースも加速度が低減できている。一方 Level2 の場合、最大加速度はどのケースも大差なく、応答スペクトルも大きな差はない。変位は d_2 が大きいほどやや増大する傾向にあり、 $d_2=9\text{cm}$ のケースで限界変位の 14cm をわずかに超過するが、 d_2 に対する変化量は緩やかである。

以上の結果から、中小地震 (Level1×0.5~Level2×0.5) に対する加速度の最小化と、大地震 (Level2) に対する

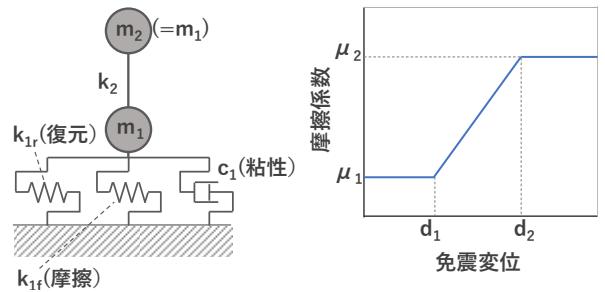


図-4 解析モデル

Fig.4 Analysis model

表-1 パラメータ設定

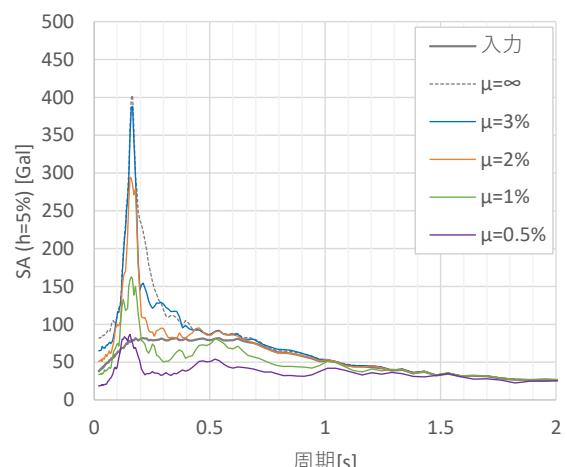
Table 1 Parameters of analysis

変数	解析諸元
m_1, m_2	$m_1 = m_2$
k_{1r}	$m_1 + m_2$ に対して $f=0.25\text{Hz}$ (1質点想定)
k_2	m_2 に対して $f=6.0\text{Hz}$ (減衰は 5%)
c_1	$m_1 + m_2$ と k_{1r} に対して $h=50\%$ 相当

表-2 摩擦係数一定の場合の最大応答値

Table 2 Maximum response values with constant friction

入力地震動	評価点	応答種別	摩擦係数 μ [%]				
			∞	3.0	2.0	1.0	0.5
告示L1×0.5 38Gal入力 (震度3~4相当)	神戸位相	m_2 Acc.[Gal]	84	63	44	26	16
		m_1 Disp.[cm]	—	0.1	0.3	0.8	1.1
	八戸位相	m_2 Acc.[Gal]	82	65	51	34	19
		m_1 Disp.[cm]	—	0.0	0.2	0.6	1.0
告示L1 76Gal入力 (震度4相当)	神戸位相	m_2 Acc.[Gal]	168	86	52	32	23
		m_1 Disp.[cm]	—	1.1	1.7	2.1	2.6
	八戸位相	m_2 Acc.[Gal]	164	86	67	37	26
		m_1 Disp.[cm]	—	0.6	1.2	2.1	2.5
告示L2 380Gal入力 (震度6弱相当)	神戸位相	m_2 Acc.[Gal]	839	124	109	99	95
		m_1 Disp.[cm]	—	12.3	14.0	15.7	16.5
	八戸位相	m_2 Acc.[Gal]	818	136	124	108	104
		m_1 Disp.[cm]	—	12.0	13.0	13.9	15.1

図-5 加速度応答スペクトルの比較
(告示 L1×0.5, 八戸位相)Fig.5 Acc. response spectrum in cases of Kokuji wave
Level1×0.5 by Hachinohe phase

る変位制御の観点から、今回の条件下においては d_2 を 6.0~9.0cm に設定するのが適切であると言える。

表-3 摩擦係数切替時の最大応答

Table 3 Maximum response values with switching friction

入力地震動	評価点	応答種別	μ 3.0% (一定)	切替変位[cm] d_2			
				9.0	6.0	4.0	3.1
告示 L2×0.5 190Gal 入力 (震度5強相当)	神戸位相	m_2 Acc.[Gal]	88	65	79	81	88
		m_1 Disp.[cm]	5.1	7.1	6.5	5.8	5.5
	八戸位相	m_2 Acc.[Gal]	108	65	81	92	90
		m_1 Disp.[cm]	4.6	6.8	6.6	6.4	6.2
告示 L2 380Gal 入力 (震度6弱相当)	神戸位相	m_2 Acc.[Gal]	124	125	118	117	123
		m_1 Disp.[cm]	12.3	14.1	13.6	13.3	13.2
	八戸位相	m_2 Acc.[Gal]	136	130	132	134	133
		m_1 Disp.[cm]	12.0	13.9	13.6	13.2	13.0

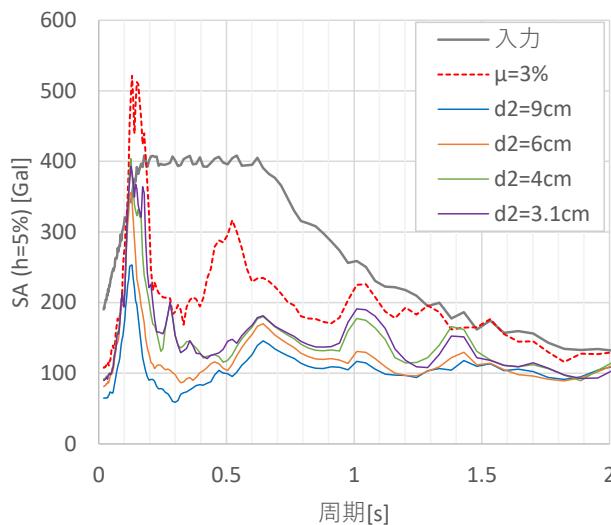
図-6 加速度応答スペクトルの比較
(告示 L2×0.5, 八戸位相)

Fig.6 Acc. response spectrum in cases of Kokuji wave Level2×0.5 by Hachinohe phase

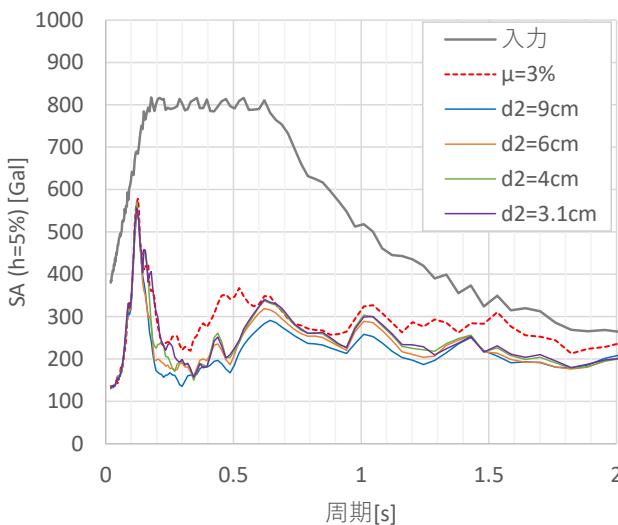
図-7 加速度応答スペクトルの比較
(告示 L2, 八戸位相)

Fig.7 Acc. response spectrum in cases of Kokuji wave Level2 by Hachinohe phase

4. 振動台実験による性能確認

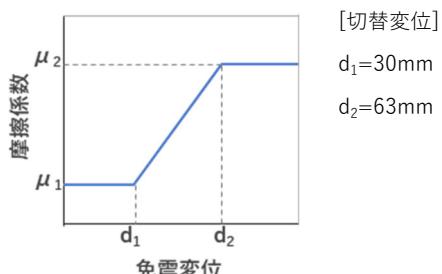
4.1 実験概要

摩擦切替型免震装置の性能確認として、半導体製造装置を模擬した鋼製フレーム試験体（以降、模擬フレーム）を用いた振動台実験を行った。模擬フレームの重量、外形および免震装置の諸元を表-4 に示す。また今回使用した摩擦切替型の免震支承の摩擦特性を図-8 に示す。ここで切替の起点となる d_1 と d_2 については Level1 相当の地震動に対して常に低摩擦を維持するために $d_1=30\text{mm}$ 、レールの製作上の都合と Level2 における変位抑制機能をなるべく高めるため、 $d_2=63\text{mm}$ と設定した。加速度計測にはひずみゲージ式加速度計を使用し、試験体上の加速度は免震架台上(FL+250)および模擬フレーム上(FL+2200)で評価を行った。変位計測はレーザー変位計を用いて、免震架台の振動台に対する相対変位を計測した。

なお実験施設は、日本海洋科学（横浜市磯子区）の大型三次元振動台を使用した。試験体設置状況を写真-1 に示し、図-9 に試験体概略立面を示す。模擬フレームは 2 体製作し、それぞれ従来型の免震支承および摩擦切替型の免震支承を 4 台ずつ使用し、2 体同時に加振を行った。

表-4 試験体諸元
Table 4 Characteristics of the test specimen

重量	模擬フレーム : 1800kg 免震架台 : 600kg
試験体外形 $B \times L \times H$	1100 × 2500 × 2200mm
免震周期	4sec (円弧レール)
摩擦係数	従来型 : $\mu = 2.5\%$ 切替型 : $\mu_1 = 0.5\%$, $\mu_2 = 3.0\%$
オイルダンパー	最大減衰力 : 1.5kN × 2 本/方向

図-8 摩擦切替型免震支承の摩擦特性
Fig.8 Friction characteristics of switching type

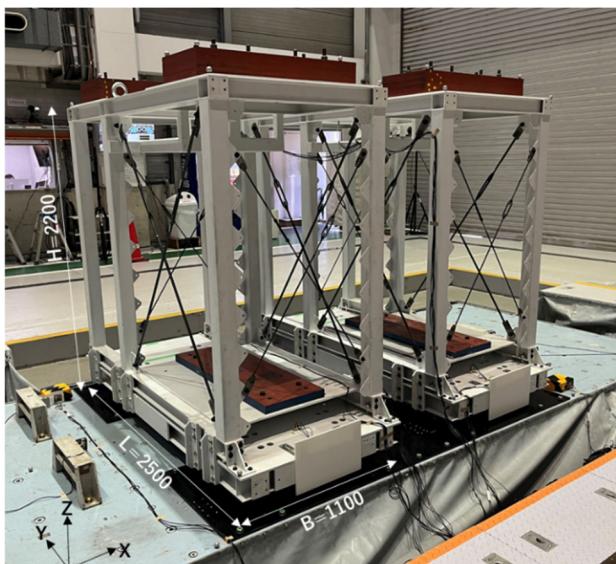


写真-1 試験体設置状況
Photo.1 Test specimens

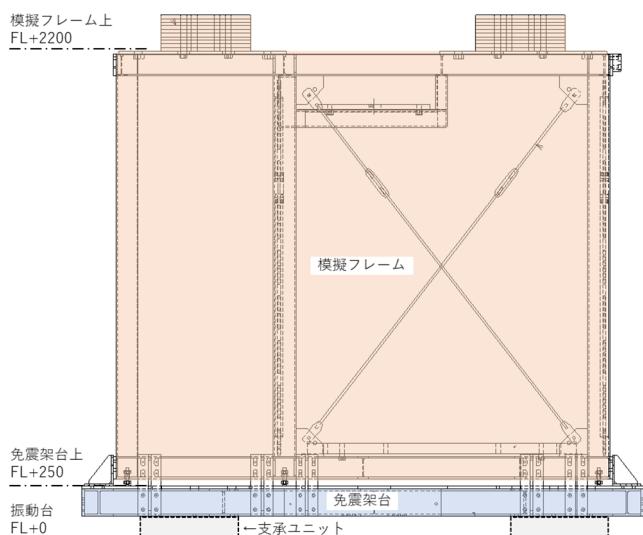


図-9 試験体立面図 (YZ面)
Fig.9 Elevation of specimen in YZ plane

表-5 加振条件および目標性能
Table 5 Shaking test conditions and target performance

加振波	呼称	加速度[Gal]			計測震度 <i>I</i>	摩擦切替型-目標性能	
		X	Y	Z		応答加速度	免震変位
告示 L1 相当模擬地震動 × 0.5	L1E-half	55	57	—	(3.8)	従来の 1/2 以下	—
告示 L1 相当模擬地震動	L1E	110	114	—	(4.4)		30mm 程度
2008 岩手宮城内陸地震建物応答波	I4	584	671	342	6.0	従来同等	140mm 未満

4.2 加振条件および目標性能

本実験における加振条件と切替型の目標性能について表-5 に示す。ここで評価対象とする加振波は表中に記載する 3 ケースとし、中小地震として L1E-half および L1E の 2 ケースと、大地震の再現波として既往の実験¹⁾⁻³⁾で使用した I4 を用いる。表中の計測震度⁴⁾の算定において、L1E-half および L1E については Z 方向の入力を 0 として求めた。ウェーハ被害の発生頻度低減効果の確認のために L1E-half および L1E において加速度低減性能を確認し、I4 に対して従来と同等のストローク制御性能および加速度低減効果が得られることを確認する。また、L1E および I4 の水平方向の加速度応答スペクトルおよび加振波形を図-10 および図-11 に示す。

4.3 実験結果

従来型と摩擦切替型の性能比較として、まず免震装置上の加速度応答スペクトルの比較を図-12 に示す。免震架台上(FL+250)、模擬フレーム上(FL+2200)について示しているが、入力の小さい L1E-half で従来型と摩擦切替型の差が最も大きく、特に模擬フレーム上の応

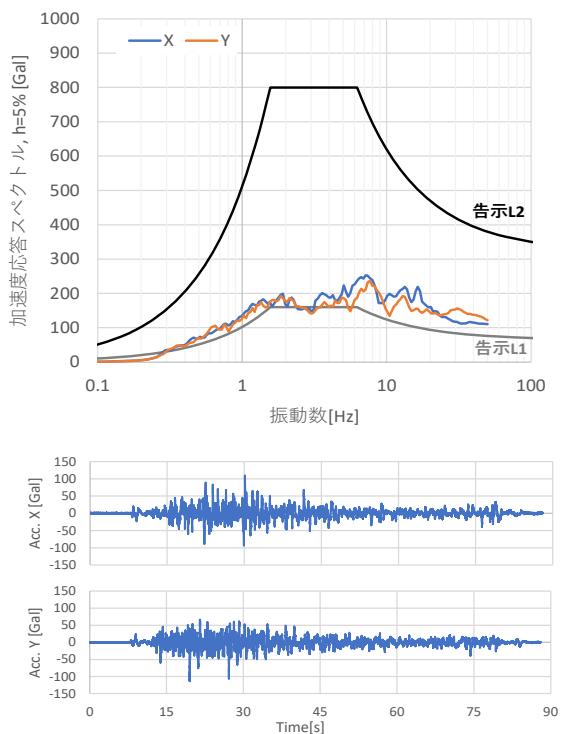


図-10 加速度応答スペクトルおよび加振波形 (L1E)
Fig.10 Acc. response spectrum and waveform of L1E

答の差が顕著である。従来型では免震架台上から模擬フレーム上の増幅が見られるが、摩擦切替型ではどのケースでも目立った増幅が生じていない。入力が大きくなると従来型においても応答低減効果が表れ、I4 では入力に対してどの帯域でも加速度を低減できている。

加速度と変位の最大値を表-6 に、時刻歴波形（免震架台のみ）を図-13 に示すが、表-5 で示した摩擦切替型の目標性能に対して以下の結果が得られた。なお、振動台固有の加振ノイズを除くため、加速度波形には 15Hz のローパスフィルターをかけて評価を行った。

- L1E-half および L1E において、摩擦切替型が免震変位 30mm 未満の範囲（ d_1 未満）でスムーズに動作し、免震架台上の最大加速度を従来型の 34～50%，模擬フレーム上で 30～53% に抑えられ、概ね目標を満足できた。
- I4 に対して、従来型と摩擦切替型ともに免震変位が 140mm 未満に収まり、目標を満足できた。

また、そのほか以下の知見が得られた。

- フレーム剛性の高い Y 方向（長辺方向）よりも増幅が大きい X 方向（短辺方向）で摩擦切替型の加速度低減効果が顕著であり、従来型よりも X 方向と Y 方向の応答量の差が小さかった。

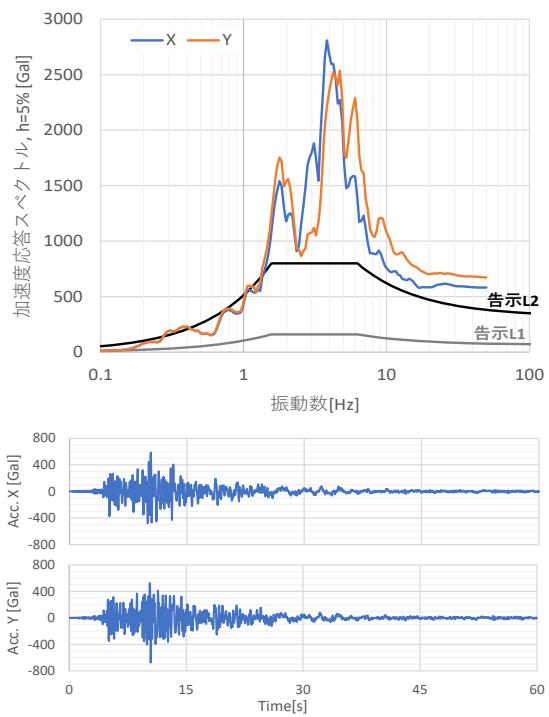


図-11 加速度応答スペクトルおよび加振波形 (I4)
Fig.11 Acc. response spectrum and waveform of I4

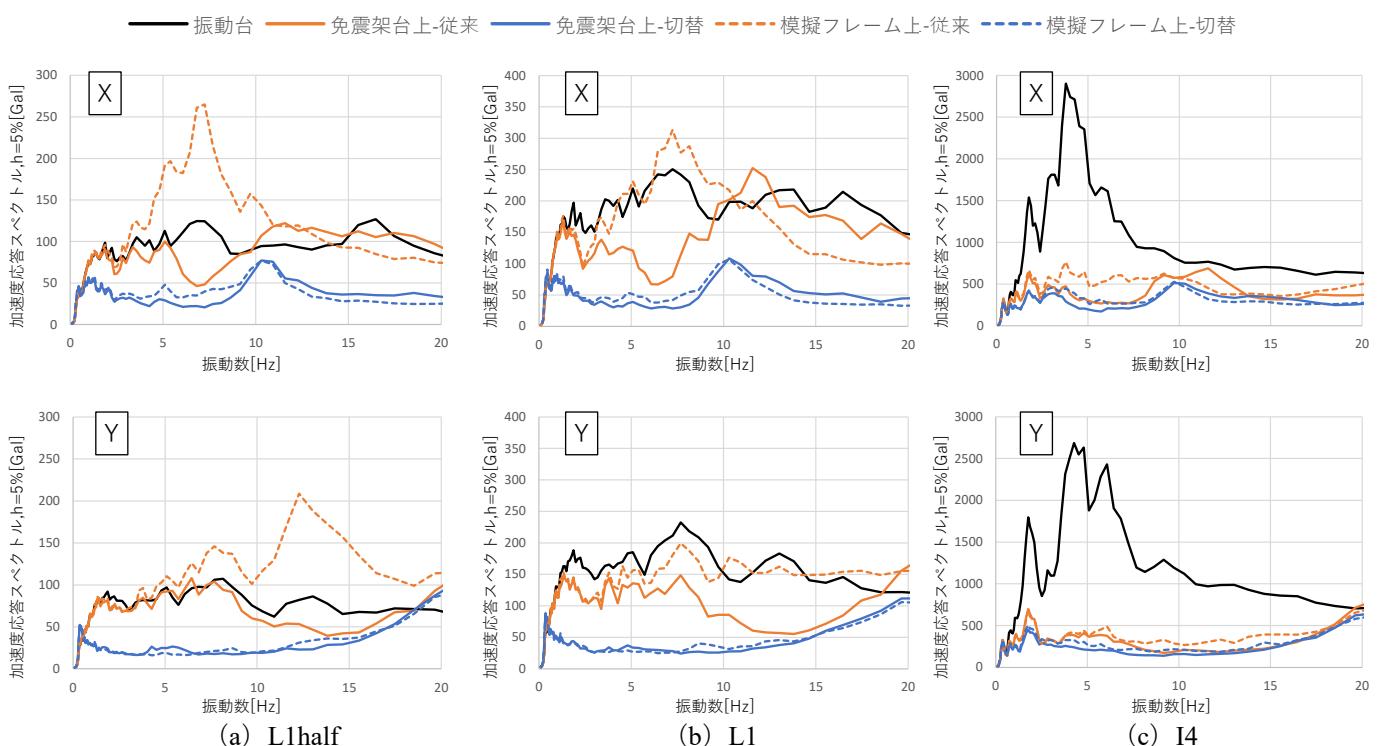


図-12 免震装置上の加速度応答スペクトルの比較
Fig.12 Acc. response spectrum above seismic isolation system

表-6 実験結果最大値
Table 6 Maximum values of test results

加振波	加速度[Gal]										免震変位[mm]			
	振動台		免震架台上 -従来型		免震架台上 -切替型		模擬フレーム上 -従来型		模擬フレーム上 -切替型		従来型		切替型	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
L1E-half	58	48	43	31	18	14	60	34	18	15	1.2	3.0	11.1	16.5
L1E	108	101	76	44	26	22	81	48	28	25	5.1	9.1	29.1	29.7
I4	610	708	182	144	143	117	204	162	146	133	51.9	55.7	67.2	72.0

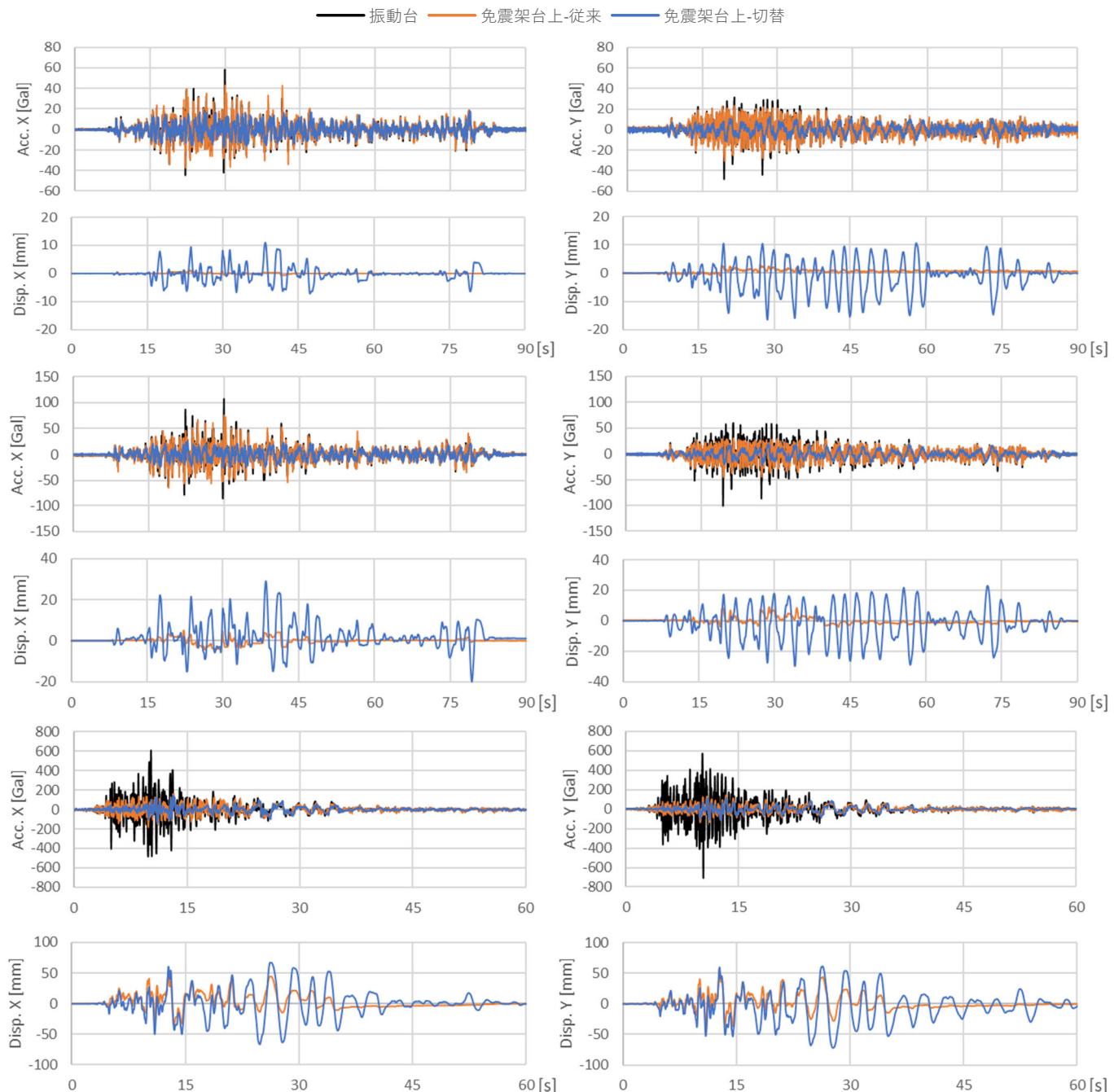


図-13 免震装置の時刻歴応答波形（上から順に L1E-half, L1E, I4）
Fig.13 Time history on seismic isolation system (from top to bottom: L1E-half, L1E, I4)

5. まとめ

半導体製造装置の中小地震に対する被害低減のため、変位量によって摩擦係数を切替える新型の TASS ユニットを開発した。時刻歴応答解析により適切な摩擦切替特性の検討を実施し、告示の Level1 相当の地震動で低摩擦を維持でき、Level2 において過大な変位が生じない設定として、 $d_1=30\text{mm}$ 、 $d_2=63\text{mm}$ を採用し、振動台実験による性能確認を実施した。

振動台実験の結果、Level1 相当の模擬地震動 (L1E) およびその半分の入力 (L1E-half) に対して摩擦切替型の変位は 30mm 以下に収まっており、低摩擦領域でスムーズに動作することで、従来型の応答に対して加速度を 30~53% に低減することができた。また、震度 6 強相当の I4 に対して、摩擦切替型の変位は最大 72mm であり、目標の 140mm 未満に十分収まることが確認できた。以上の結果から、今後は今回開発した摩擦切替型免震装置を TASS ユニットの新たなラインナップに

加え、製造装置の種別を問わず製品化を進めて適用拡大を図る予定である。

謝辞

振動台実験の計画および実施にあたっては、(株)日本海洋科学 YOKOHAMA LAB の協力を得ました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中真弥、日比野浩、長島一郎、出雲洋治、小野森司：既存半導体製造装置向け機器免震装置の開発、大成建設技術センター報、第 42 号、2009
- 2) 日比野浩、青野翔、長島一郎、出雲洋治、小野森司：半導体製造装置向け機器免震装置 (TASS ユニット) の開発と適用、大成建設技術センター報、第 44 号、2011
- 3) 渡邊与幸、青野翔、櫛木龍大、柳坂祥希、薦田香織、日比野浩：汎用型機器免震ユニットの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II, pp.509-512, 2021.7
- 4) 気象庁：気象庁震度階級の解説、2009.3.