

3.1.2 キャスター機器の地震対策に関する評価

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

都市施設の耐震性評価・機能確保に関する研究は、首都直下地震に対する都市施設の被害を軽減し、建物の包括的な継続性を維持するための防災・減災対策に資することを目標としており、機能保持を目指した重要施設の地震対策指標と具体的な対策手法を取りまとめ、既存および新規施設の耐震対策として普及を促すガイドラインを示すことは重要な課題である。

このうち、大地震時における救急救命、被災後の生命維持の拠点となる医療施設など重要施設の機能保持および耐震性向上を目的として、医療機器などの地震応答低減が可能なシステム構築を目指す。

(b) 平成23年度業務目的

- ・医療施設など重要施設においては、キャスターを有する機器が多いことから、平成22年度までに震災時におけるキャスター機器の応答低減を行うために開発した制動システムの機能検証を行ってきた。本年度は、さらに小型のワゴンモデルとキャスターを使用した実験を行って、これまでに作成されたモデルの再検討を行うとともに、制御の汎用性についても検討を行う。また、検討結果等を平成23年度作成するガイドラインに資する基礎資料として整備する。さらに、防災・減災対策の向上に資するため研究成果の学会発表を行う。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京農工大学	教授	鎌田 崇義	kama@cc.tuat.ac.jp

(2) 平成23年度の成果

(a) 業務の要約

医療施設など重要施設においては、キャスターを有する機器が多いことから、平成22年度までに震災時におけるキャスター機器の応答低減を行うために開発した制動システムの機能検証を行ってきた。本年度は、さらに小容量のワゴンモデルとキャスターを使用した実験を行って、これまでに作成されたモデルの再検討を行うとともに、制御の汎用性についても検討を行った。また、検討結果等を平成23年度作成するガイドラインに資する基礎資料として整備した。さらに、小型なERキャスターを用いた成果についても学会発表を行った。

(b) 業務の成果

1) 改良された実験装置

小型化された車輪タイプの ER ブレーキとワゴン脚部を図 1 に、ワゴン全体の外観を図 2 に示す。ER ブレーキを車輪型に改造したことにより、キャスターワゴンの総重量は 19kg から 15kg へ若干軽くなった。図 3 に ER ブレーキキャスターの各印加電圧時におけるブレーキトルクの測定結果を示す。昨年度までのブレーキの 2 kV 印加時のトルクは約 3 Nm

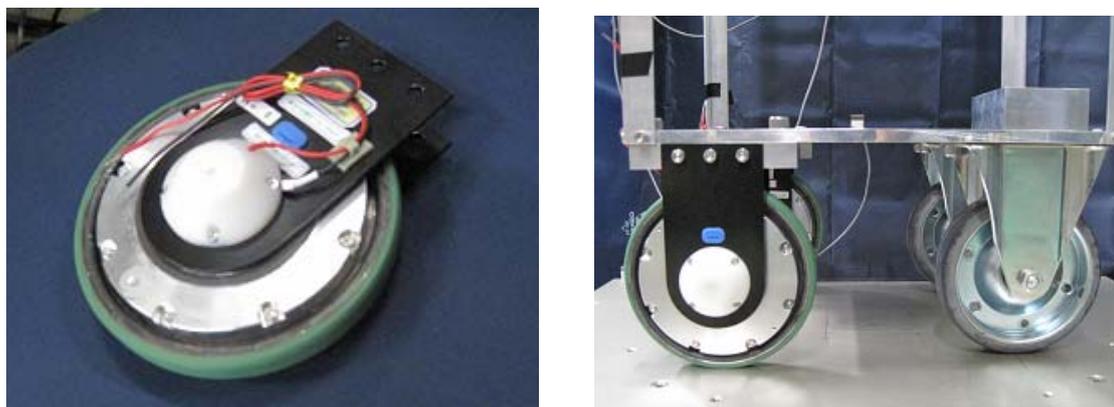


図 1 ER ブレーキ付車輪とキャスターワゴンの脚部



図 2 キャスターワゴン外観

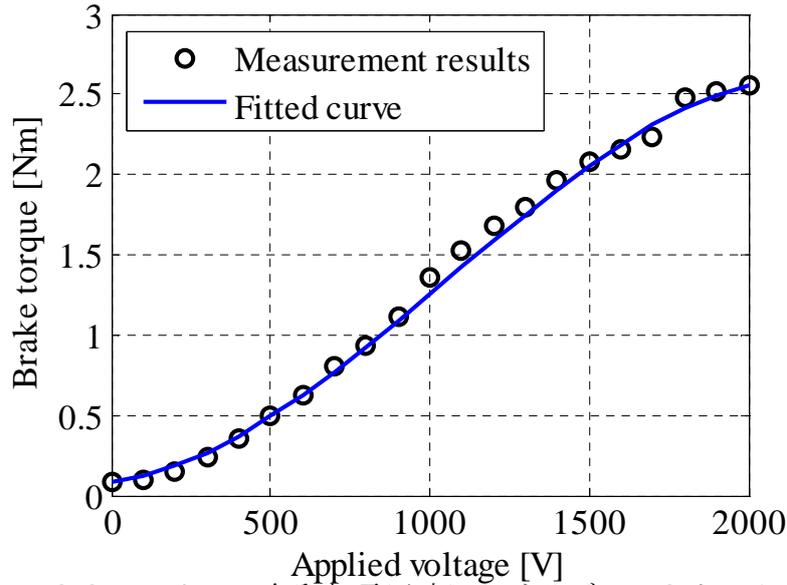


図3 ER ブレーキキャスターの各印加電圧時におけるブレーキトルクの測定結果

であり、発生トルクも若干減っている。

2) 新たなワゴンモデルの検討

昨年度までのワゴンモデルは、ワゴンを1つの剛体としてモデル化してワゴン下部の動きを表すものであった。キャスターのついた機器で特に高価なものは重量が大きいものも多く、このようなモデル化で十分であると思われる。ただし、本研究で用いたように2つの質量がL字のアンクル材連結されているようなものでは、ワゴン上部の応答は下部に比べて増幅されることになる。昨年度までの研究ではこのような場合、ワゴン下部の応答に伝達関数をかけることによってワゴン上部の加速度を求めていた。本年度はワゴン自体を二自由度系として扱ったモデルについても検討を行った。図4にモデルの簡略図を、以下にその数式モデルを示す。切り替え条件については昨年度と同じである。ばね定数についてはホワイトノイズを用いて同定したワゴンの固有振動数 9Hz より決定し ($K=9913 \text{ N/m}$)、減衰係数については上板加速度の FFT 結果より試行錯誤的に決定した。 ($C=22 \text{ Ns/m}$)

(Phase 1) ワゴンが停止している状態

$$\begin{cases} x_{\text{under}} = \text{const.} \\ \dot{x}_{\text{under}} = 0 \\ \ddot{x}_{\text{under}} = \ddot{z} \end{cases} \quad \begin{cases} x_{\text{upper}} = \text{const.} \\ \dot{x}_{\text{upper}} = 0 \\ \ddot{x}_{\text{upper}} = \ddot{z} \end{cases} \quad (1)$$

(Phase 2) ワゴンが運動している状態

$$M_1 \ddot{x}_{\text{under}} = -M_1 \ddot{z} - F \cdot \text{sign}(\dot{x}_{\text{under}}) - K(x_{\text{under}} - x_{\text{upper}}) - C(\dot{x}_{\text{under}} - \dot{x}_{\text{upper}}) \quad (2)$$

$$F = \frac{T}{r} \left(= \frac{T_0 + T_E + c|\dot{x}|}{r} \right) \quad (3)$$

$$M_2 \ddot{x}_{upper} = -M_2 \ddot{z} - K(x_{upper} - x_{under}) - C(\dot{x}_{upper} - \dot{x}_{under}) \quad (4)$$

① (Phase 1) から (Phase 2) への切り替え条件

$$|M_1 \ddot{z}| \geq F \quad (5)$$

② (Phase 2) から (Phase 1) への切り替え条件

$$\dot{x} = 0 \quad \text{かつ} \quad |M_1 \ddot{x}_{under}| < 2F \quad (6)$$

x_{under} : ワゴン下板相対変位 x_{upper} : ワゴン上板相対変位
 M_1 : ワゴン下板及び車輪重量 M_2 : ワゴン下板及び車輪重量
 \ddot{z} : 地震入力加速度 F : ブレーキ力 K : ばね定数 C : 減衰係数
 $sign$: 符号関数 T : ER ブレーキトルク T_0 : 基底ブレーキトルク
 T_E : 付加ブレーキトルク r : ER ブレーキ半径

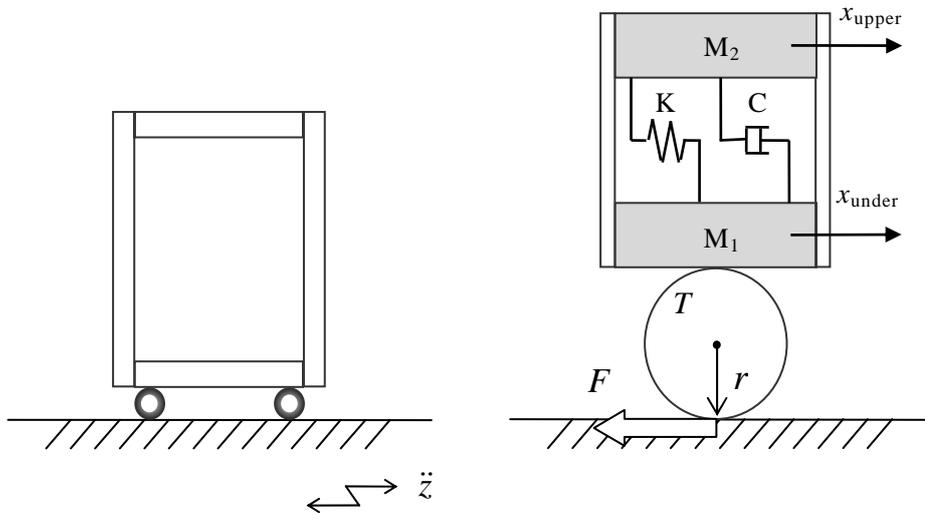


図4 ブレーキトルク等のモデル化

モデルの妥当性検討のためエルセントロ NS 波と神戸 NS 波を用いて加振実験を行った。今回作成した二自由度系の解析モデルによるシミュレーション結果と実験結果の比較を図5、6、7に示す。図5は各地震波入力時のワゴン上部の応答加速度のFFT結果で、良好な一致がみられる。図6、7は時刻歴応答であるが、下板、上板加速度共に波形、大きさがある程度模擬できていることが分かる。しかし応答変位について、波形は模擬できているものの実験結果のほうが一方向に大きく移動する結果となった。加振方向に対するキャスターワゴンの向きを入れ替えた実験でも変位が変化することが確認されている。以降の

切り替え実験でも同様の傾向がみられているが、トルクの測定時にはキャストの回転方向による違いはあまり見られなかったため、今後検討すべき課題となっている。エルセントロ NS 波の入力大きさを半分にした場合の結果を図 8 に示すが同様の傾向が確認されている。

ワゴンのパラメータとして調整できる値は式 (3) における速度に関する係数 c のみである。 c は ER 流体が電界をかけない状態ではニュートン流動を示すということに基づいて導入されたもので、車輪の回転速度が低速時にはトルクが大きく一定であるが、一定速度から徐々にトルクが下がるような形で c に切り替え条件を加えることによって変位をあわせること自体は可能となっている。

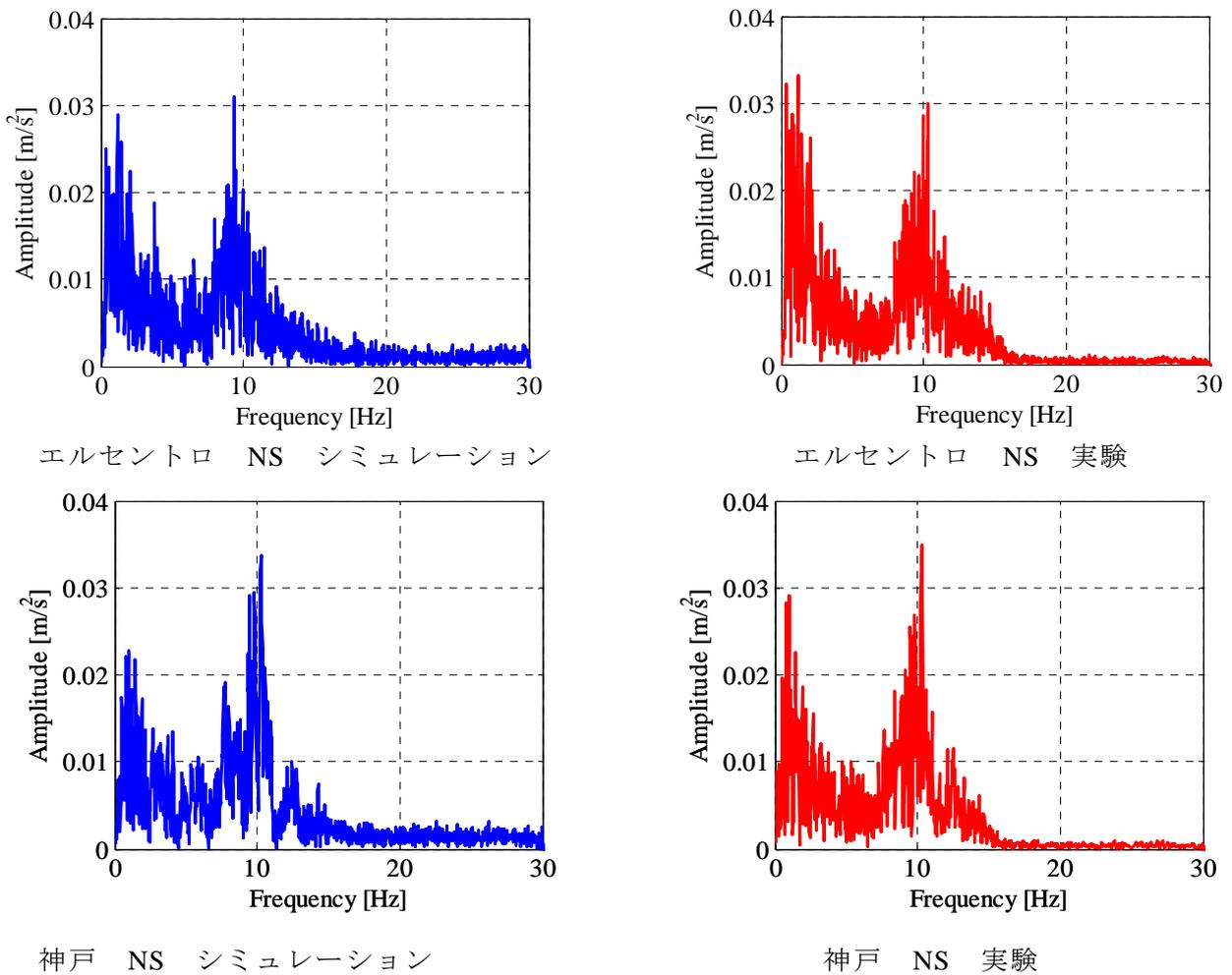


図 5 ワゴン上部の応答加速度の周波数解析結果

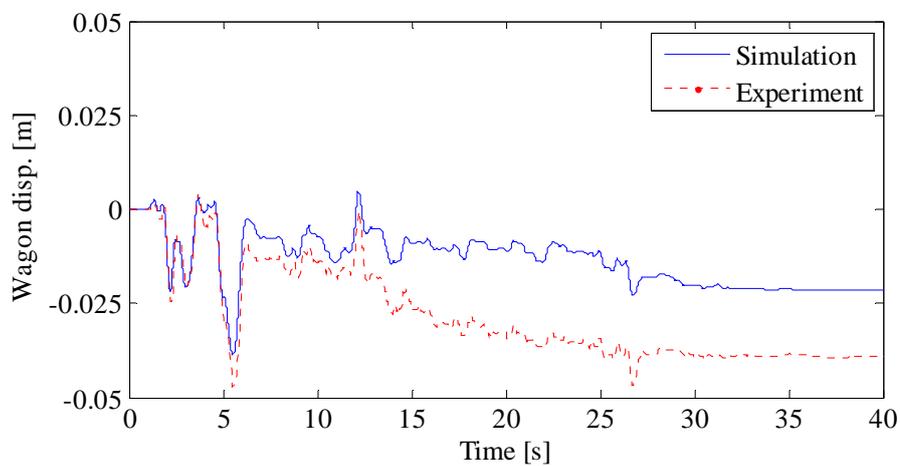
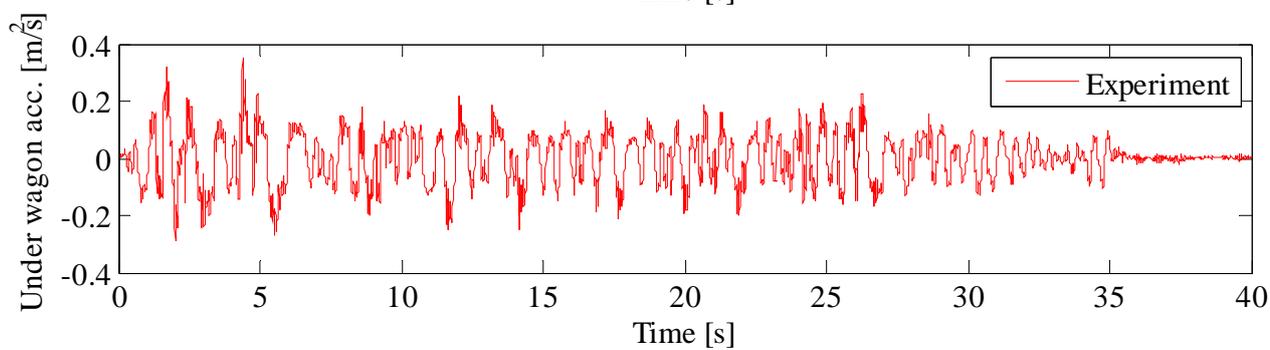
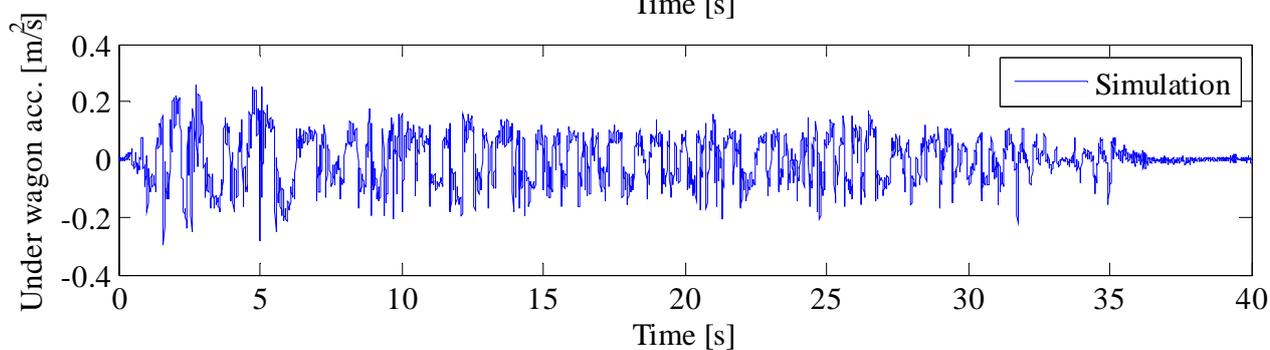
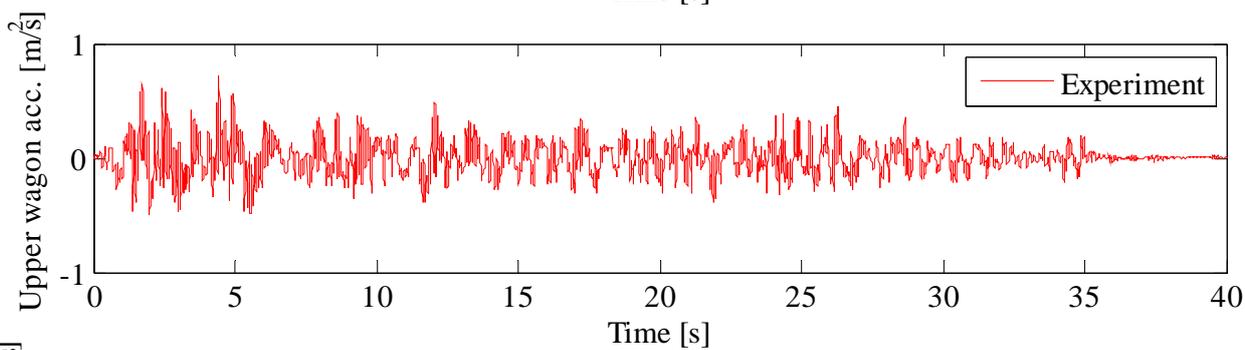
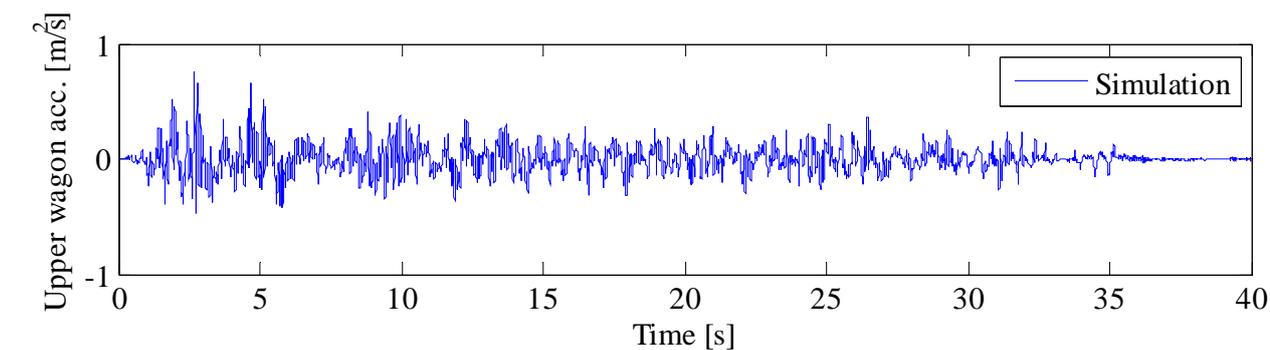


図6 エルセントロ NS 波に対するワゴンの応答

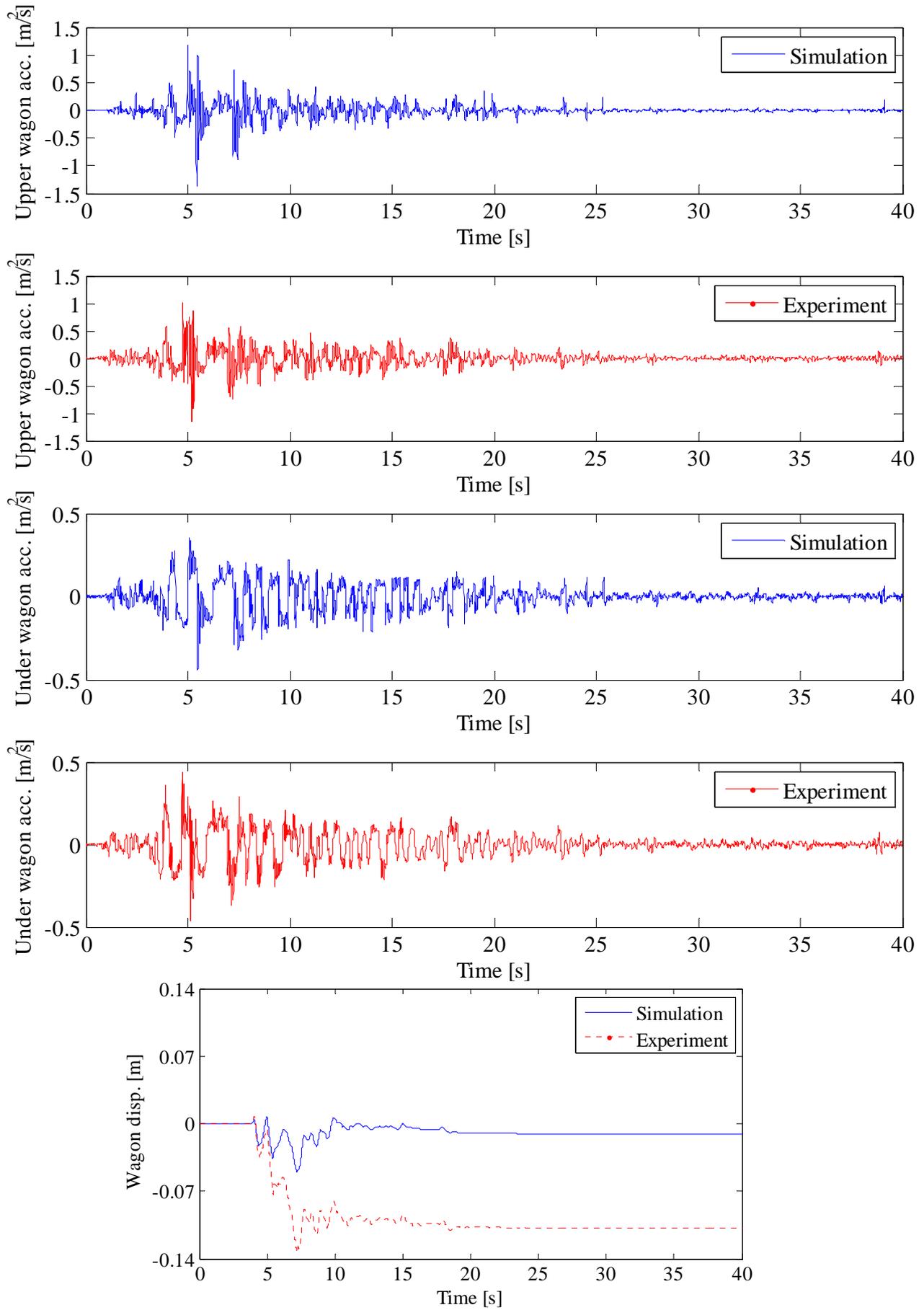


図7 神戸NS波に対するワゴンの応答

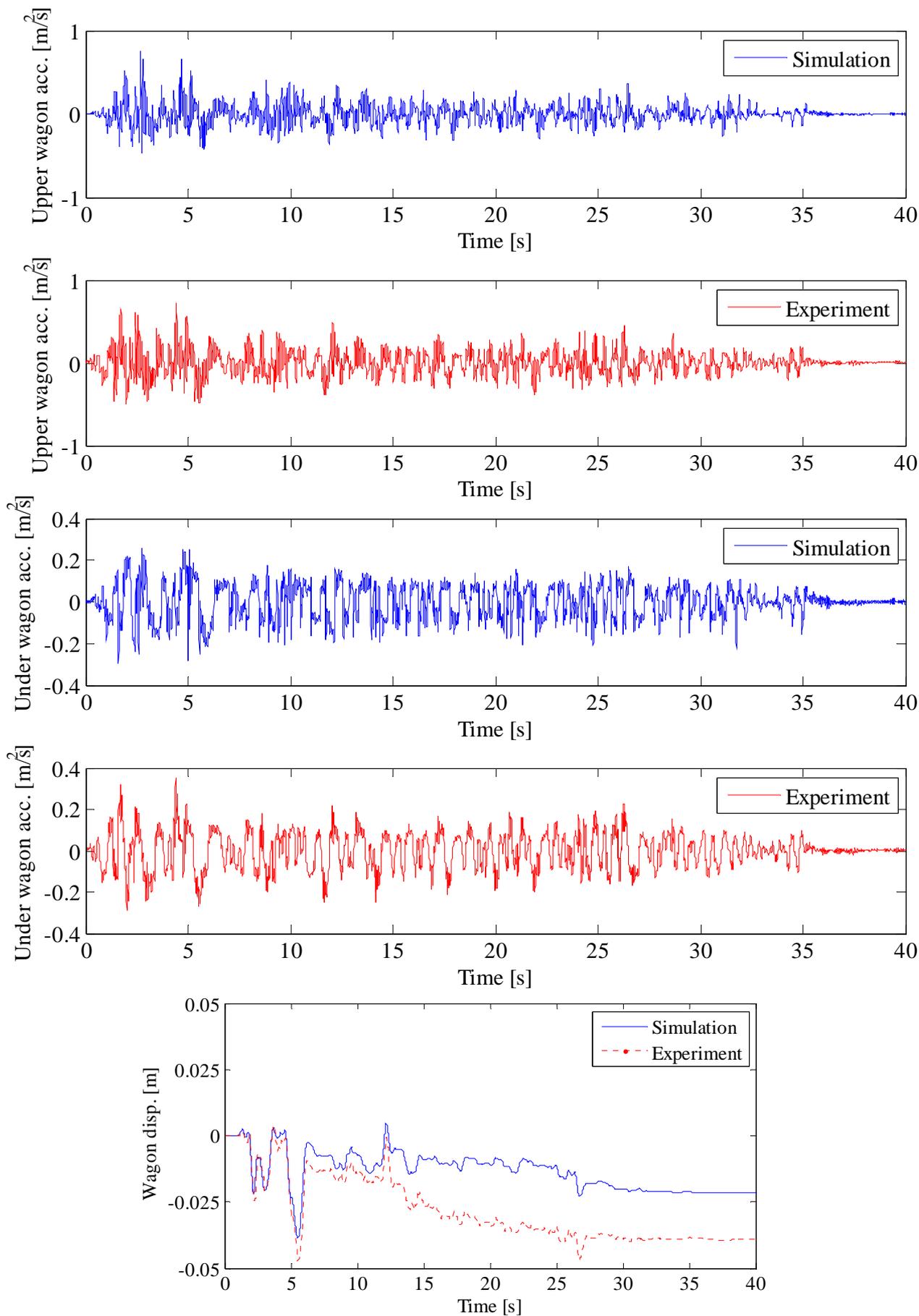


図8 エルセントロ NS 波 (大きさ 50%) に対するワゴンの応答

3) 制御実験

エルセントロ NS 波、JMA 神戸 NS 波、八戸 EW 波を用いて重み係数一定とした制御、設定加速度に応じて出力トルクを制限する制御の 2 パターンの制御実験を行った。制御系の設計には昨年度と同じ瞬時最適制御を用いている。

a) 一定の重み係数を用いた制御

二自由度系の解析モデル、ER ブレーキ変更後のキャスターワゴンのパラメータを用いて地震波（最大加速度 3m/s^2 のエルセントロ NS 波，最大加速度 3m/s^2 の JMA 神戸 NS 波）を入力として制御シミュレーションを行い、改めて重み係数と地震応答の低減効果の関係を調査した。その結果、前年度までと同様の傾向が見られることを確認した。そして各重み係数の組み合わせのうち、応答加速度・応答変位のそれぞれをおよそ 30%，70% に低減できる $(q_a, q_v) = (10^0, 10^3)$ (A)，50%，50% に低減できる $(q_a, q_v) = (10^1, 10^4)$ (B)，70%，30% に低減できる $(q_a, q_v) = (10^0, 10^4)$ (C) の 3 つの組み合わせの重み係数を用いて制御実験を行った。各制御シミュレーション結果、制御実験結果、及び基底トルク一定時 ($T=0.08\text{Nm}$) と最大トルク一定時 ($T=2.5\text{Nm}$) における最大応答加速度、最大応答変位を表 1 に、制御時と非制御時の時系列応答の比較（エルセントロのみ）を図 9、10、11 に示す。表中の最大応答加速度については上板加速度を示しており、図中の左がシミュレーション結果、右が実験結果である。

表、図より入力地震波によらずほぼ応答加速度については $T=0.08\text{Nm}$ 時 $> A > B > C > T=2.5\text{Nm}$ 時，応答変位については $T=2.5\text{Nm}$ 時 $> C > B > A > T=0.08\text{Nm}$ 時の順に低減できおり、重み係数による制御がシミュレーション通りの結果となっていることが確認できる。

表 1 一定重みでの制御結果

		エルセントロ				JMA 神戸				
		計算		実験		計算		実験		
		最大変位	最大加速度	最大変位	最大加速度	最大変位	最大加速度	最大変位	最大加速度	
制御なし	$T=0.08\text{Nm}$	60	1.36	100	1.03	64	1.94	180	1.66	
	$T=2.5\text{Nm}$	15	4.21	15	3.81	15	4.68	20	3.59	
制御あり (q_a, q_v)	10^0	10^3	38	1.60	72	1.40	38	2.11	131	1.87
	10^1	10^4	20	2.35	61	1.73	19	3.25	84	2.02
	10^0	10^4	9	3.93	32	3.17	9	4.56	31	3.21

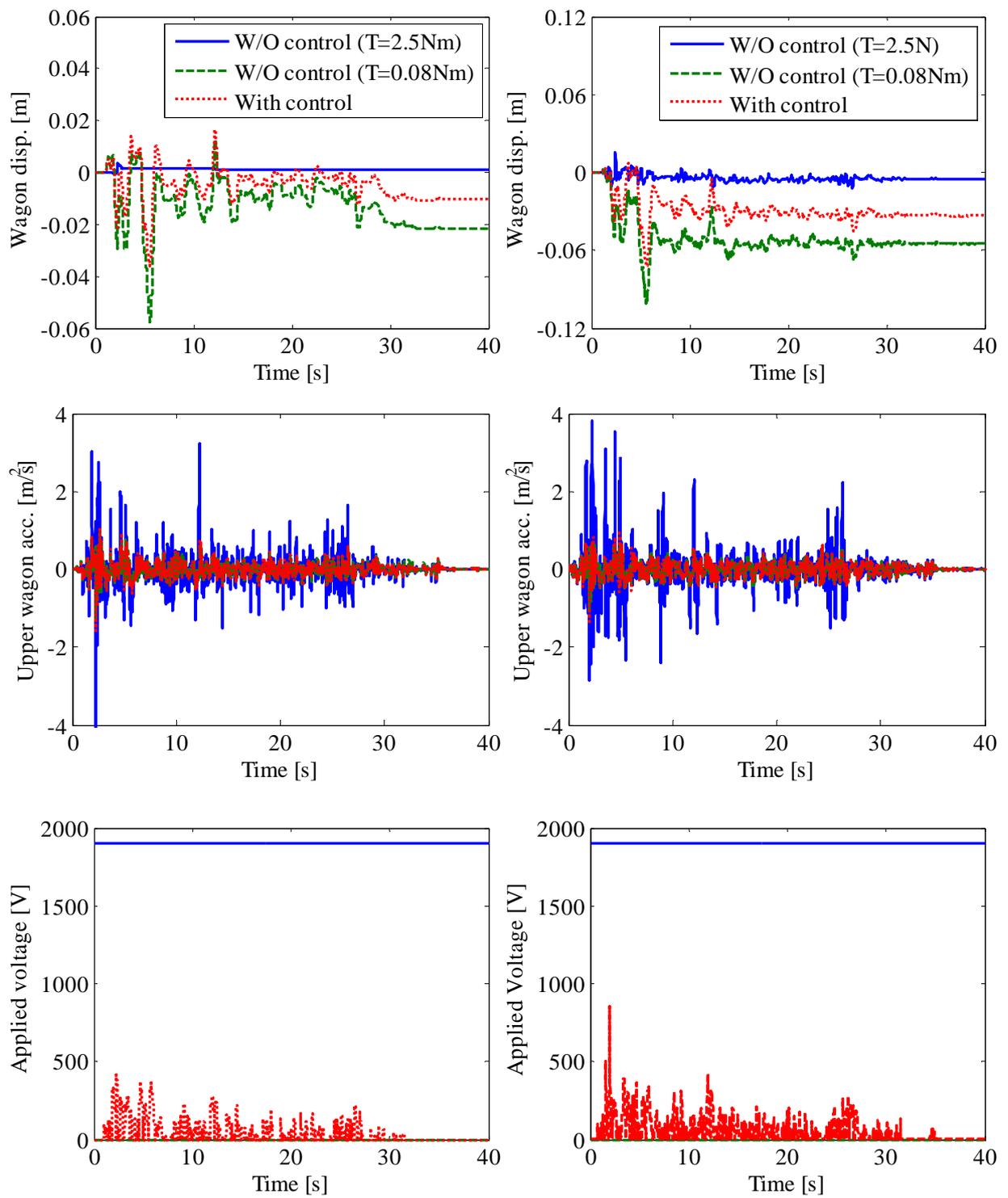


図9 一定トルクでの制御結果 (エルセントロ NS、ゲイン A)

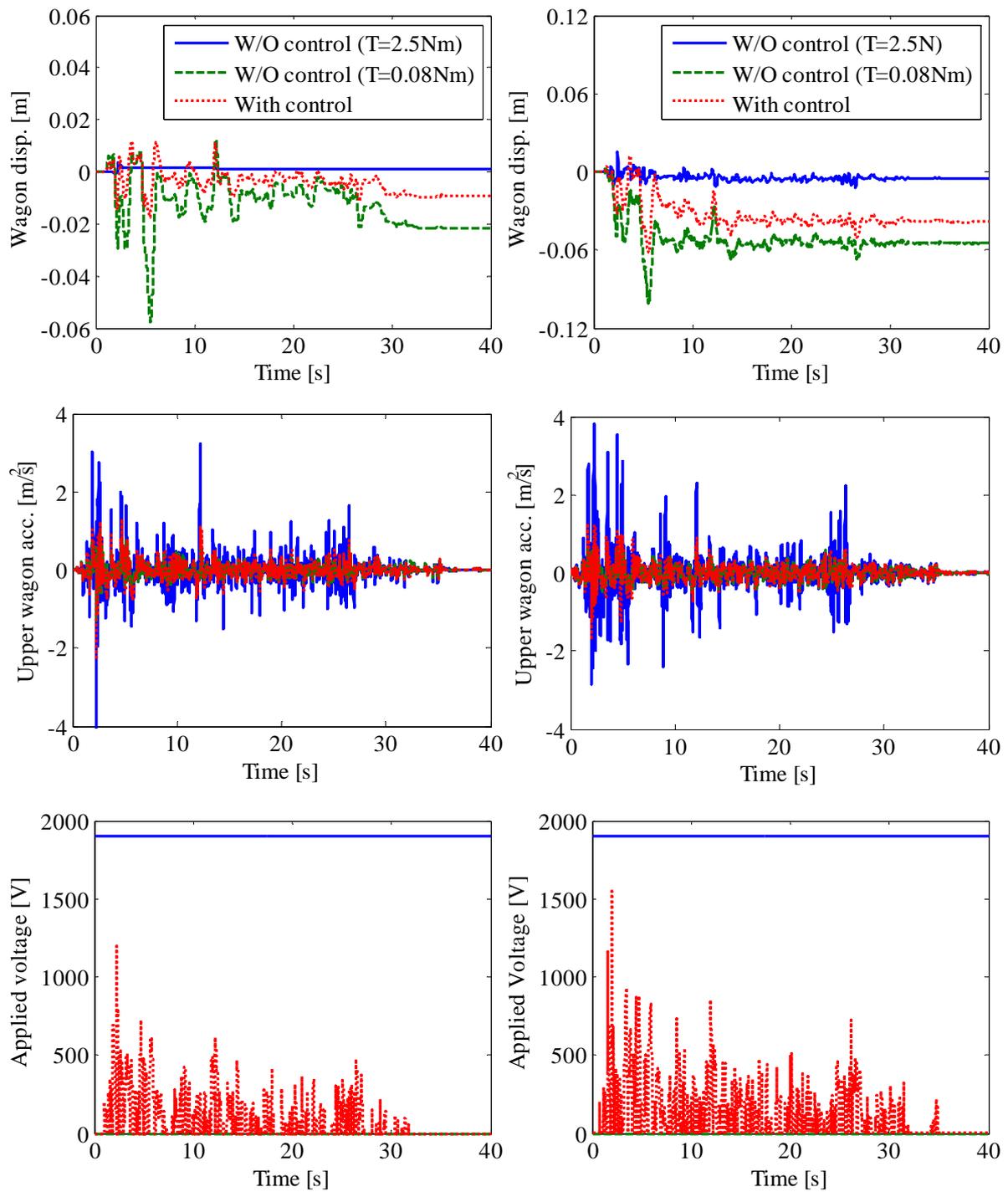


図 1 0 一定トルクでの制御結果 (エルセントロ NS、ゲイン B)

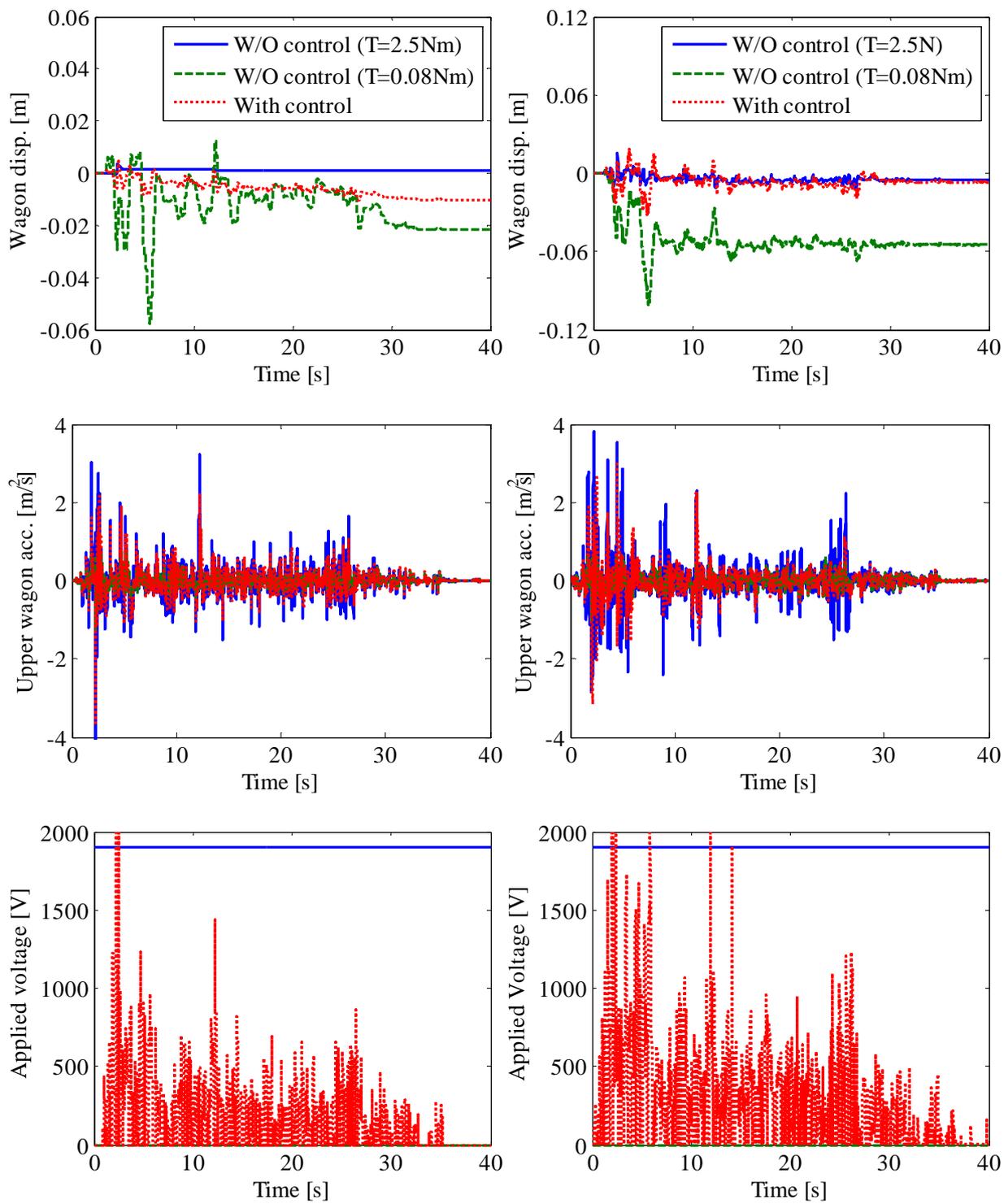


図 1 1 一定トルクでの制御結果 (エルセントロ NS、ゲイン C)

b) 加速度を制限した制御

単純化のためワゴン下板加速度が ER ブレーキによるトルクによってのみ決まると仮定し ($M\ddot{x} = F$)、トルクを制限することで下板加速度を設定値以下にする制御実験を行った。このときの重み係数は前節の(C)の応答変位を最も低減できる組み合わせを用い、設定応答加速度は 1.5m/s^2 とした。通常の制御時とトルク制限時の最大応答変位、最大応答加速度の比較を表 2 に、制御シミュレーション結果、制御実験結果例を図 1 2、1 3 に示す。表中の最大応答加速度のうち上欄が上板加速度、下欄が下板加速度の値である。

シミュレーション結果において下板加速度が設定値を上回っているのは、二自由度系モデルに変更したことから下板加速度への速度、変位の影響が大きくなったためである。実験結果においてはトルクを制限することで下板加速度を設定値以下に抑えることができている。また変位についてもほぼ同等の制御効果が得られていることが確認できる。

表 2 通常の制御時とトルク制限時の最大応答変位、最大応答加速度の比較

			エルセントロ				JMA 神戸			
			計算		実験		計算		実験	
			最大変位	最大加速度	最大変位	最大加速度	最大変位	最大加速度	最大変位	最大加速度
通常 制御	10^0	10^4	11	3.65	32	3.17	9	4.56	31	3.21
				2.39		1.84		2.45		1.91
加速度 限界有	10^0	10^4	8	3.10	31	2.16	14	3.40	48	2.36
				1.80		1.05		2.02		1.12

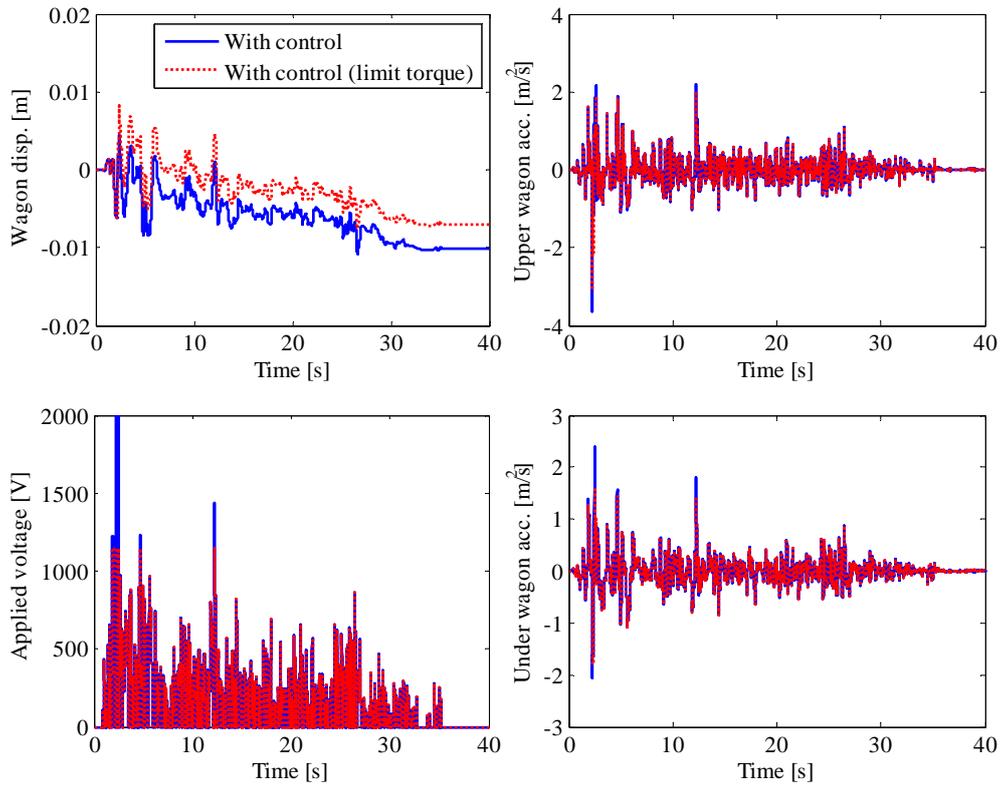


図 1.2 加速度制限があるときの応答 (エルセントロ NS、計算)

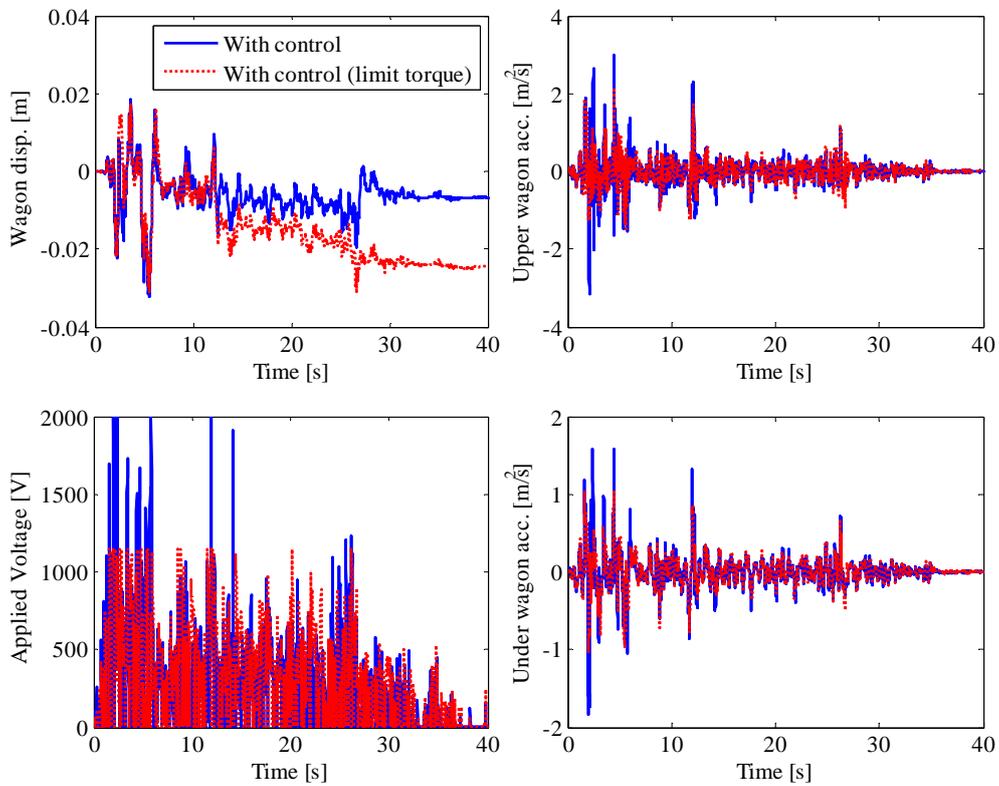


図 1.3 加速度制限があるときの応答 (エルセントロ NS、実験)

4) ワゴンの原点復帰制御について

ワゴンの変位に対抗するばね要素がないため、そのままではワゴンは原点復帰しない。ワゴンを原点に戻すことを目的として、応答変位の低減率の異なる二つの重み係数を切り替える手法を提案し、実験で効果を確認した。重み係数の切り替える方法としては、応答加速度をより低減する重み係数を弱ブレーキ重み係数、応答変位をより低減する重み係数を強ブレーキ重み係数として以下の条件で切り替えることとした。

- (i) (ワゴン速度 $> 0.02\text{m/s}$ かつ ワゴン変位 $> 0.001\text{m}$) または
(ワゴン速度 $< -0.02\text{m/s}$ かつ ワゴン変位 $< -0.001\text{m}$) のとき
→ 強ブレーキ重み係数
- (ii) それ以外するとき
→ 弱ブレーキ重み係数

この制御により、ワゴンが原点から遠ざかる場合に変位を抑制する強ブレーキトルクを出力し、ワゴンを原点から遠ざけることを避ける制御が行える。またその際に応答加速度が大きくなることを防ぐため、前節の加速度制御も同時に行っている。

今までの計測システムで制御実験を行ったが、変位測定を行っているモーションキャプチャの精度が悪く、切り替えが適切になかったため、レーザ変位センサを用いて確認実験を行った。エルセントロ NS 波、神戸 NS 波に対する実験結果を図 1 4 に示すが、加速度低減性能を維持したままワゴンを原点付近に復帰させることができていることがわかる。

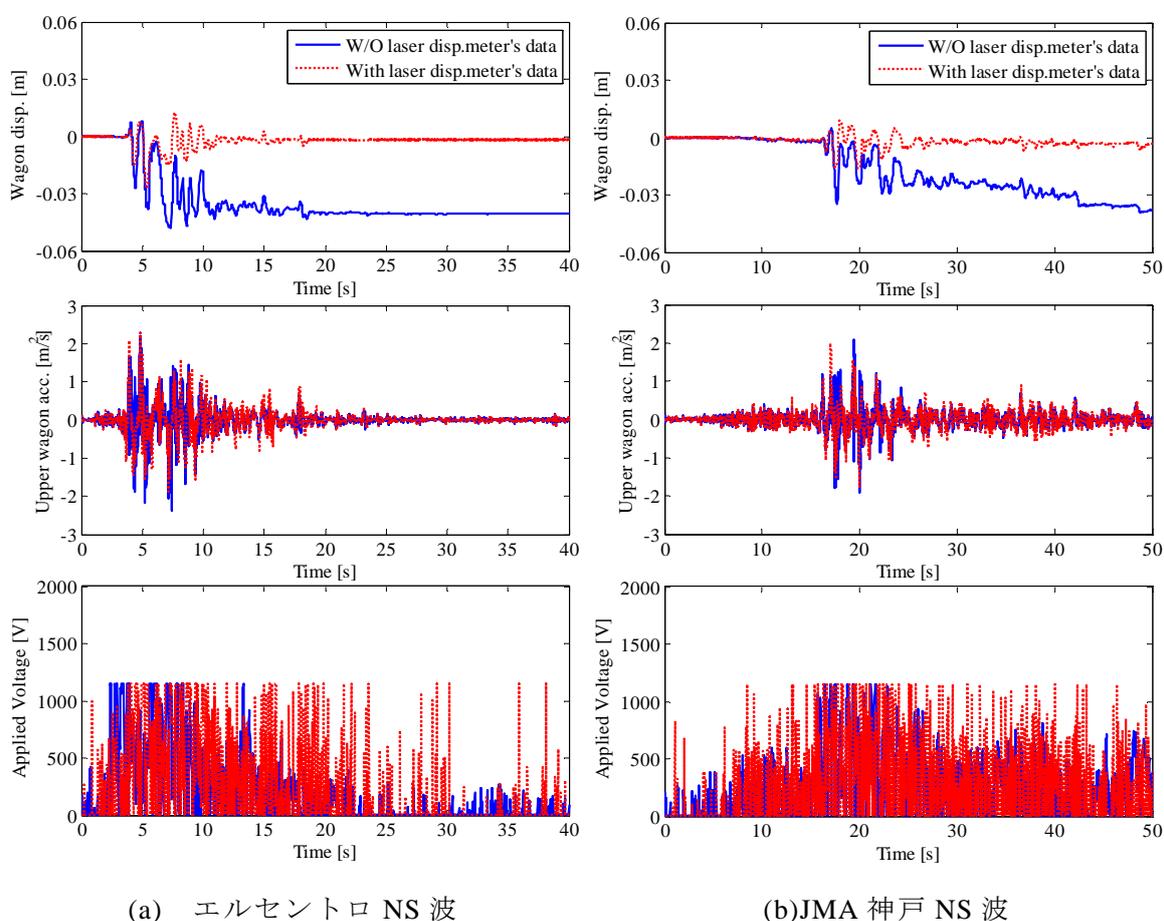


図 1 4 原点復帰制御の効果

(c) 結論ならびに今後の課題

本年度はキャスターワゴンの地震応答の低減効果を向上させるため、容量が小さく基底トルクが小さいブレーキを用いて、シミュレーションと加振実験を行って制御効果を検証した。以下に、本年度で得られた主な知見を示す。

- 1) 改良された ER ブレーキを使ったワゴンを用いた制御実験を行い、昨年度までに提案した制御が、シミュレーションと実験の両方において一定のブレーキトルクを付加した場合に比べ、応答加速度と変位を効果的に低減することができた。入力地震波の大きさを変えても制御が有効であり、汎用性があることも確認した。
- 2) キャスターワゴンを二自由度系でモデル化し、制御効果を確認した。同様の手法で多自由度系にも対応が可能である。
- 3) キャスター機器を原点復帰させるための切り替えを提案し、効果を確認した。

なお、キャスターワゴン自体は地震によって簡単に破壊するものではないが、搭載している物体の落下、ワゴンの転倒を考慮すると許容できる加速度には限界がある。また、機器には電源、ガス類等外部との接続があるものも多い上に、他の機器との衝突を避ける必要があるため変位にも限界が存在する。両者は相反する要求であり、大きな地震動に対しても両者を満足させる制御システムの設計は不可能であるが、通常落下、転倒による被害の方が大きい場合が多いと思われるので、機器が健全性を保つべき地震レベルに対して、加速度を限界値内に抑えつつ変位をできるだけ抑える設計を簡便に行うことが、キャスター機器に対する制御の完成形である。

また、医療機器には高額なものも多く、本研究で用いている ER ブレーキのコストが制御結果に対して相応であるような機器を選定し、耐久性、信頼性についての検討を行っていくことによって、実用化への検討につながると思われる。ブレーキによって回転体の加速、移動を制限する研究自体は医療機器に限らず需要のある技術であり、コストとの兼ね合いにはなるが、車輪を使って移動を行う機器への応用も期待できると思われる。

(d) 引用文献

- [1] Yang, J.N., Akbarpour, A. and Ghaemmaghami, P. : New Optimal Control Algorithms for Structural Control, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.113, No.9,(1987), pp.1369-1386

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表場所 （学会等名）	発表時期	国際・国内の別
ERブレーキを用いたキャストワゴンの地震応答抑制 口頭発表	松本拓也、 鎌田崇義	メルパルク長野 日本機械学会 第12回「運動と振動の制御」シンポジウム (MOVIC2011)	2011年7月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載論文（論文題目）	発表者氏名	発表場所 （雑誌等名）	発表時期	国際・国内の別
なし				

マスコミ等における報道・掲載

報道・掲載された成果 （記事タイトル）	対応者氏名	報道・掲載機関 （新聞名・TV名）	発表時期	国際・国内の別
なし				

(f) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

