

3.1.3 キャスター機器の地震対策に関する研究

(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。

本研究では、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、医療機器など重要機器およびシステムを含めた重要施設の耐震性評価が可能な数値解析モデルを構築するとともに、機能保持を目指した重要施設の具体的な対策手法の取りまとめより高度な機能保持技術の開発を目指す。

(b) 平成22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、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う。また、シミュレーション解析および小型振動台実験を行い、その効果を評価する。あわせて平成21年度までの成果をまとめて学会発表を行う。
- ・地震時におけるキャスターの揺れに対する応答量の低減技術に関し、これまでの研究開発成果を踏まえて、今後の実用化についての調査検討を行う。

(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22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、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た。検証では、シミュレーション解析および小型振動台実験を行い、その効果を評価した。あわせて平成21年度までの成果をまとめて国際学会での学会発表を行った。
- ・地震時におけるキャスターの揺れに対する応答量の低減技術に関し、これまでの研究開発成果を踏まえて、今後の実用化についての調査検討を行った。

(b) 業務の成果

1) 実験装置概要

昨年度まで用いていたブレーキキャスターの外観を写真 1 に示す。基底トルクと呼ばれる印加電圧ゼロでのトルクが大きかったため、制御可能範囲を広げるにはワゴン重量を重くする方法があったが、小型振動台への負荷が増えて加振限界が低くなってしまいうという問題点があった。本年度は、ブレーキに封入している液体を液晶均一系の ER 流体から粒子分散系の ER 流体に替えることで、同電圧で出力できる最大のブレーキトルクが約 1/5 になってしまうというデメリットがあるものの、電圧非印加時の基底トルクを約半分ほどに低下させることができるブレーキ（写真 2）を使用し、精度のよい制御によって性能を上げるための検討を行った。

印加電圧に対するブレーキトルクの値を図 1 に示す。印加電圧ゼロでのトルク（基底トルク）が 0.24Nm から 0.05Nm へと劇的に小さくなっているが、同じ印加電圧でのトルクも同程度の割合で小さくなっていることがわかる。新しいブレーキで大きなブレーキトルクを確保するためには、印加電圧を上げる必要があり、電源部も強化されている。

実験、解析に用いたワゴンの外観を図 2 に、パラメータを表 1 に示す。加振方向は図中赤矢印に示した方向で、パラメータは昨年度までのモデルより少し小さくなっている。また、ER ブレーキの構成を図 3 に示す。回転円筒と固定円筒の間に ER 流体が満たされており、円筒間に電圧をかけることによって主として流体の粘度を変化させることができる。

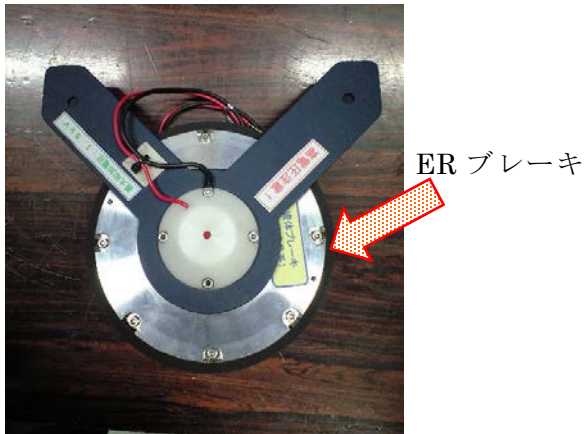
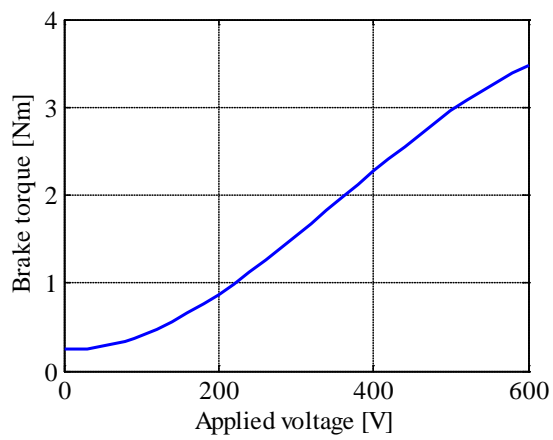


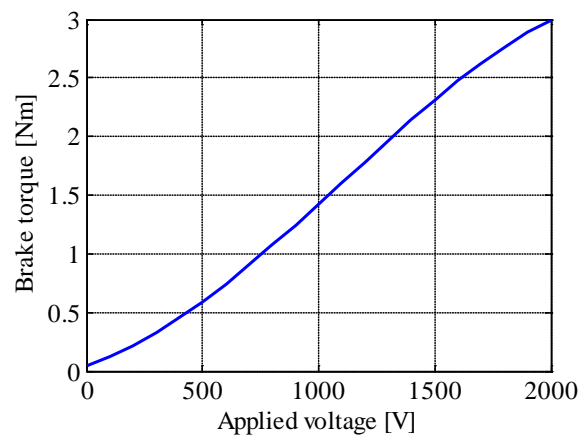
写真1 昨年度までの ER ブレーキ



写真2 新しい ER ブレーキ



(a) 昨年度まで



(b) 本年度

図1 印加電圧とトルクの関係



図2 ワゴン外観

表1 ワゴンパラメータ

幅	300 mm
奥行き	400 mm
高さ	870 mm
重量	19 kg

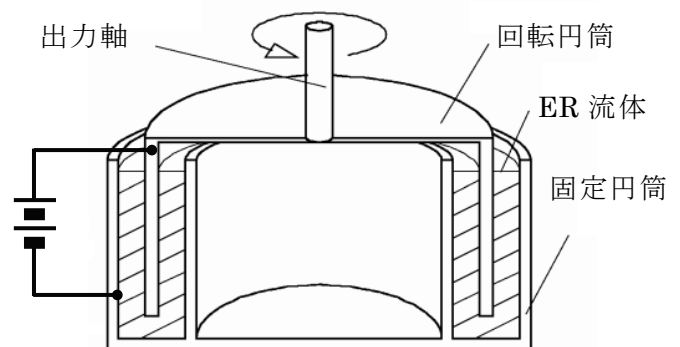


図3 ERブレーキの構成

2) ワゴンモデル

ワゴンのモデルに関しては昨年度までに得られた解析モデルに基づいて作成した。モデルは水平方向のみに運動する 1 質点系としており、運動方程式と切り替え条件を式(2)~(6)に示すとおりである。このモデルでは、Phase 1 のときにワゴンが停止している状態、Phase 2 のときにワゴンが運動している状態として考える。

(Phase 1) ワゴンが停止している状態

$$x = \text{const.}, \dot{x} = 0, \ddot{x} = 0 \quad (1)$$

(Phase 2) ワゴンが運動している状態

$$M\ddot{x} = -M\ddot{z} - F \cdot \text{sign}(\dot{x}) \quad (2)$$

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

① (Phase 1) から (Phase 2) への切り替え条件

$$|M\ddot{z}| \geq F \quad (4)$$

② (Phase 2) から (Phase 1) への切り替え条件

$$\dot{x} = 0 \quad \text{かつ} \quad |M\ddot{x}| < 2F \quad (5)$$

ここで、 M はワゴン質量、 x は相対変位、 \ddot{z} は地震入力加速度、 F はブレーキ力、 sign は符号関数、 T_0 は基底ブレーキトルク、 T_E は付加ブレーキトルク、 r はERブレーキ半径である。また、 c はERブレーキの回転速度のトルクへの影響を考慮したワゴン速度に関する係数である。

図4に示すエルセントロ NS 波を用いて加振実験を行ってモデルの妥当性を確認した。図5にシミュレーション結果と実験結果の比較を示す。なお、応答加速度はワゴン上板のものである。応答加速度について見ると実験結果がシミュレーション結果よりも大きくなっていることが分かる。これは図2のようにワゴンを簡易な構造としたことによる上板を支える L 字アングルのたわみが影響しているものと思われるが、波形については応答加速度、変位共に良く模擬できており、解析モデルが妥当であることが確認できた。よって、本実験での制御器の設計ではこのモデルを用いることとする。

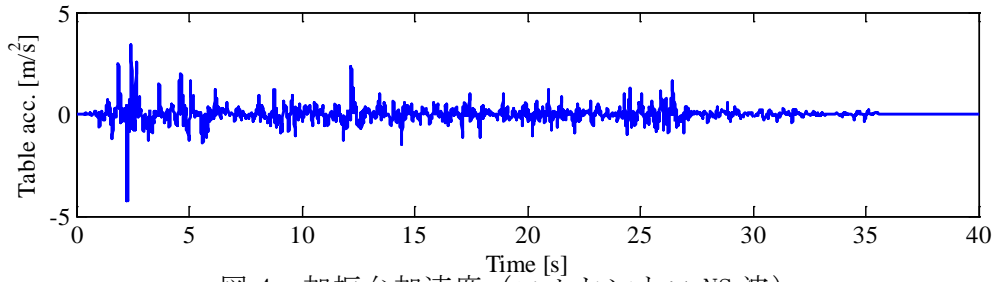


図4 加振台加速度 (エルセントロ NS 波)

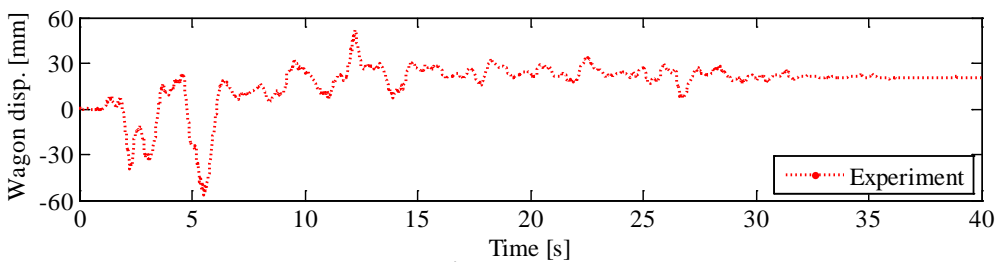
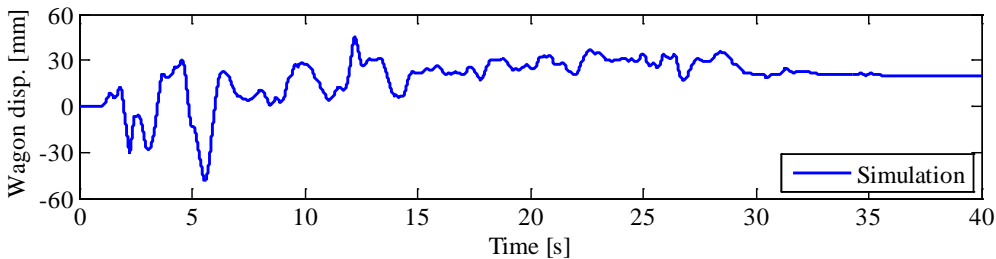
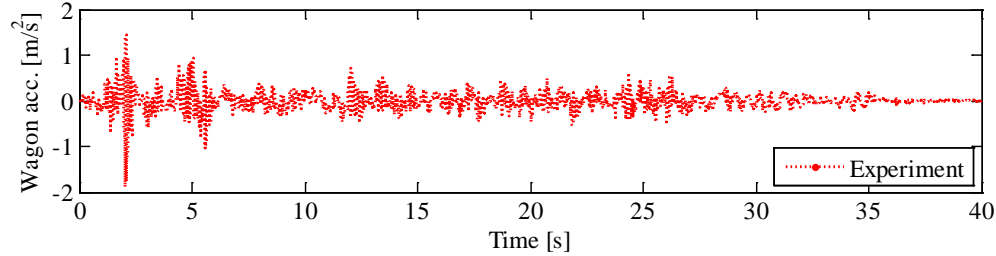
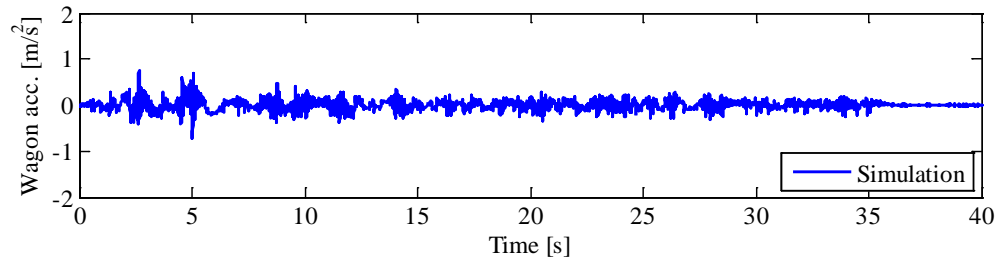


図5 モデルの妥当性の検討

3) 制御器の設計

a) 瞬時最適制御

前節で構築されたモデルに対して瞬時最適制御^[1]による制御器の構築を行った。この瞬時最適制御はYang, J.Nらによって提唱された制御理論であり、各離散時間において制御パラメータを最適化させるというものである。制御対象とするブレーキトルクモデルは非線形モデルであるが、この瞬時最適制御は非線形の系に対しても線形近似などを行わず制御器が構築できるという利点がある。制御器の詳しい導出については記さないが、高圧電源の制御電圧を発生させる際に生じる遅れとワゴンの下部に対する上部の遅れを考慮した

上で、重み係数

$$\mathbf{Q} = \text{diag} [q_d \quad q_v \quad q_a \quad q_t] \quad (6)$$

を試行錯誤的に与えることによって、制御器が設計される。本研究では、応答変位の低減を調整するために相対速度に対応する q_v を、応答加速度についてはワゴンの絶対加速度に対応する q_a を調整している。

制御効果の確認のため、制御時と ER ブレーキに一定トルクを付加した場合の結果の比較を行った。入力地震波はモデル確認に用いた図 4 に示すエルセントロ NS 波である。重み係数については一定トルク 1.0Nm および 2.5Nm を付加した際のシミュレーション結果の最大応答加速度を越えない範囲内で最大応答変位を最小にする値を試行錯誤的に求めた。ER ブレーキは 0-2000V の印加電圧に対して 0.05-3Nm のトルクを発生させることができ、測定した印加電圧-トルクの関係から求めた 3 次の近似曲線より印加電圧を最適トルクから逆算して求めている。

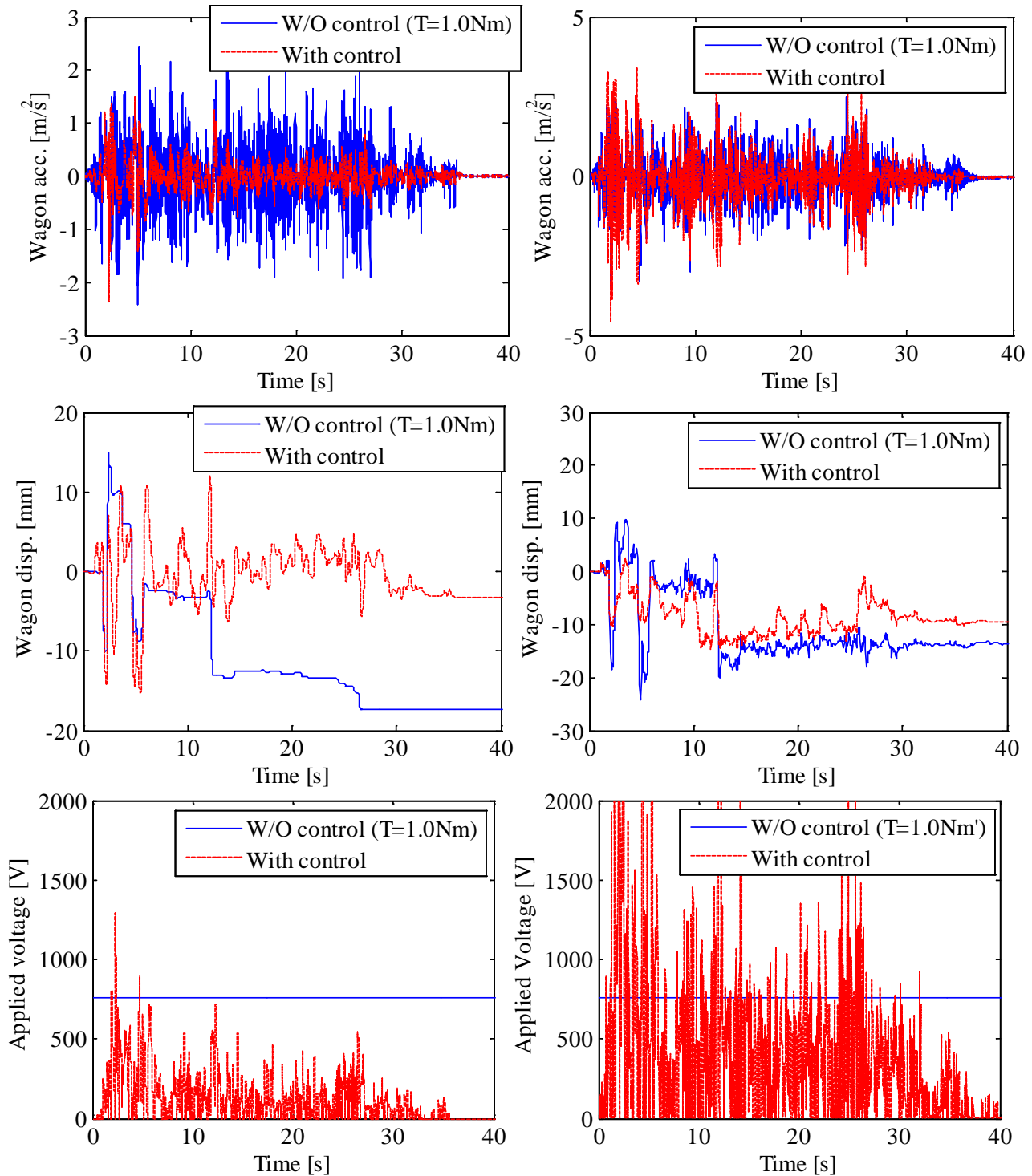
シミュレーション結果を図 6、図 7 に示す。図 6 は一定トルク 1.0Nm 付加時との比較で、シミュレーション結果の最大応答加速度である 2.44m/s^2 を越えない範囲内で最大変位が最小となるように瞬時最適化制御の重み係数を求めたもので、 $q_a=4 \cdot 10^{-1}$ 、 $q_v=3 \cdot 10^4$ が重み係数の値となっている。図 7 は一定トルク 2.5Nm 付加時との比較で、シミュレーション結果の最大応答加速度である 4.82m/s^2 を越えない範囲内で最大変位が最小となるように瞬時最適化制御の重み係数を求めたもので、 $q_a=4 \cdot 10^{-1}$ 、 $q_v=3 \cdot 10^4$ が重み係数の値となっている。下表 2 は各実験における最大値をまとめたものである。

表 2 エルセントロ波に対する応答

		El-Centro	
		Max. acc. [m/s^2]	Max. disp. [mm]
1Nm	W/O control (Simulation)	2.44	17.38
	With control (Simulation)	2.37	15.25
	W/O control (Experiment)	3.47	24.24
	With control (Experiment)	4.58	14.80
2.5Nm	W/O control (Simulation)	4.82	6.60
	With control (Simulation)	4.36	5.38
	W/O control (Experiment)	3.70	8.57
	With control (Experiment)	4.41	15.76

まず図 6 のシミュレーション結果を見ると、一定トルクでは入力の大きい初期でワゴンが少し動いた分加速度が逃げて小さくなっているが、後半はかなりロック状態に近くなっており、加速度も大きくなっている。これに対して制御時はほとんどの時間で ER ブレーキへの印加電圧が一定トルク時の値 (770V) を下回っており、ワゴンがロックすることなく動き続けることによって加速度を大きく低減させており、瞬時最適制御を行うことで応答加速度と応答変位を効果的に低減できていることが分かる。しかし、実験では最大変位

は低減されているものの、加速度に関してはシミュレーションほどの効果がでていない。制御電圧を見ると、シミュレーションに比べ大きな制御電圧が入っていることが多く、このためにワゴンが急激にロックして加速度が大きくなってしまっていることが考えられ、このために制御電圧がまた大きくなるといった悪循環をしている可能性が高い。

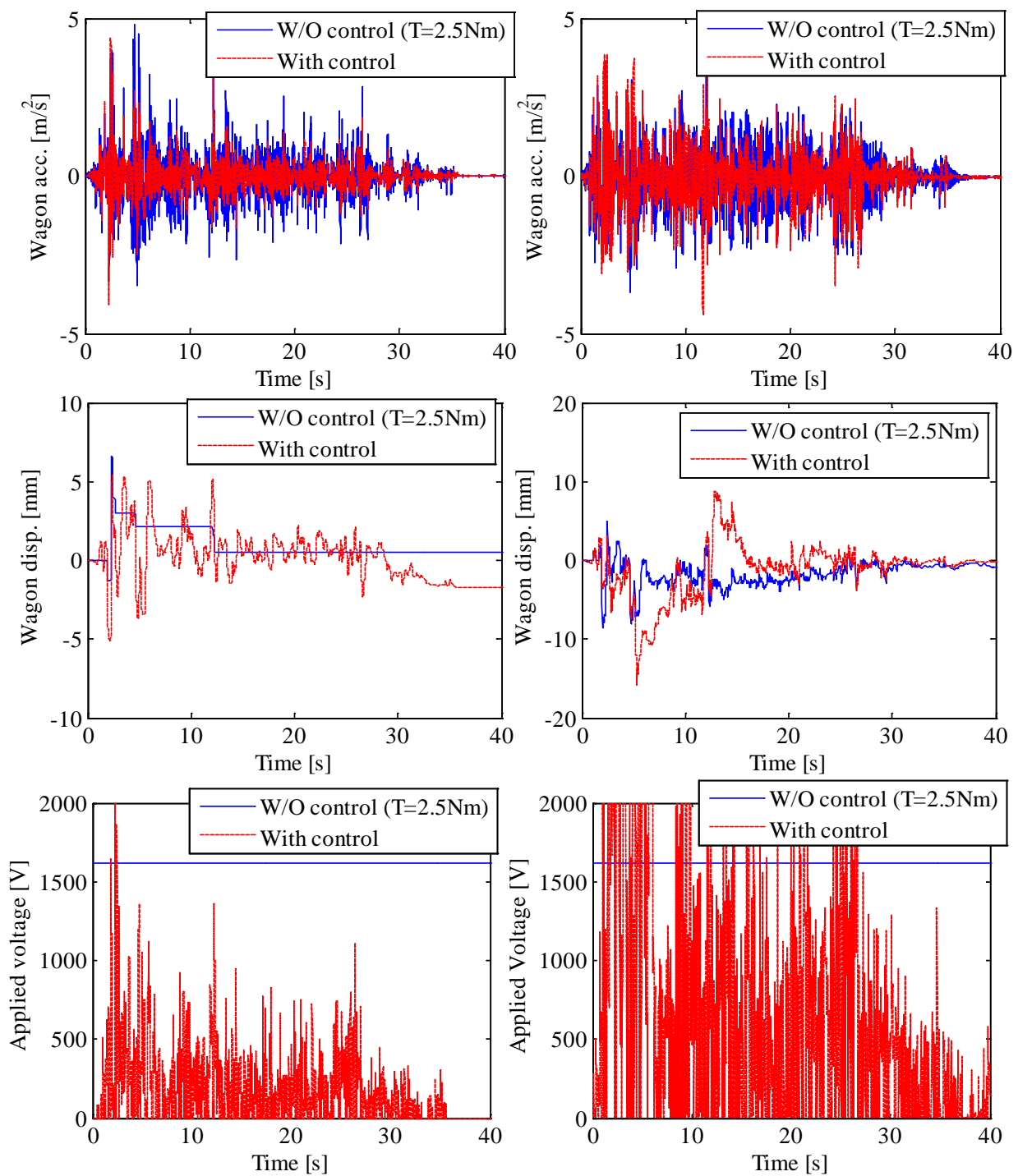


(a) シミュレーション結果

(b) 実験結果

図6 一定トルク $T=1.0\text{Nm}$ での制御に対する制御効果

図7では比較対象が一定トルク 2.5Nm となったこともあり、さらに実験での制御時の電圧が大きくなる場合が多く、加速度、変位とも一定トルクの場合より悪くなっている。



(a) シミュレーション結果

(b) 実験結果

図7 一定トルク $T=2.5\text{Nm}$ での制御に対する制御効果

4) キャスター機器の振動低減技術の実用化について

本研究では ER ブレーキを用いた振動低減に関する研究を続けている。技術的な面では地震を特定した場合の制御効果についてはシミュレーション、実験をつうじて確認されており、今後のさらなる研究によって性能は上がってゆくと思われる。

実用化に対して問題となってくるのは信頼性とコストであろうと思われる。本研究での成果をそのまま実在の機器に使用するためには、ER ブレーキ本体はもちろんのこと、電源、センサ、CPU 等が必要になってくるため、ある程度のコストが必要になる。CPU を簡易なものにしても、システムとして数十万程度にはなってしまう。これだけのコストをかけても振動を抑えたい機器としては一台数千万以上のものが考えられる。

たとえば MRI だと一台数億円以上になるが、現在は搬入後周りとは縁を切って固定する方法がとられることが多く、キャスターのまま利用されることは少ない。X 線装置や人工透析装置等への適用ができるような価格の検討が必要である。

また、ベッドやワゴン等簡易で価格も安いものは、病院内に多数設置されており、これらに対して安価で効果のある応答低減装置の開発も今後の課題であると思われる。

(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、瞬時最適制御を用いた制御が、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。ただし、実験では大きな一定値入力でもキャスタがロックされず、加速度が小さくなることもあり、最適な制御についてはさらなる検討が必要である。
- 2) キャスター機器の地震応答低減技術が実用化されるためには、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の選定を行う方向と、よりコストの低い制御手法の開発を行って実用化できる機器のすそ野を広げていくことの二つの方向があると思われる。

なお、本年度の制御においても入力地震波の種類や加速度の大きさによって最適な重み係数が変化している状態であり、今後実際のキャスターワゴンに瞬時最適制御を導入する場合には、地震波自身の観測結果等を反映して最適な重み係数を変更するような機能を制御器に組み込む必要がある。

(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
Seismic Response Mitigation of Medical Wagon with Casters by ER Brake 口頭発表	Takayoshi KAMADA Yasuhiro OGATA Eiji SATO Atsuo KAKEHI	東京大学生産技術研究所 The 10th International Conference on Motion and Vibration Control	2010年8月	国際

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

(3) 平成23年度業務計画案

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。来年度は、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。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う。