

3.1.7 新たな機能保持技術に関する基礎実験

(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、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20年度業務目的

地震災害時における重要施設内に設置された重要機器の機能保持を目指し、キャスト付き機器を対象としたブレーキ制御等の対策技術に関する基礎実験を行う。

(c) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京農工大学	准教授	鎌田 崇義
	大学院生	小方 康裕

(2) 平成20年度の成果

(a) 業務の要約

医療機器にはキャストのついた機器が多く、地震を受けた際に、その固定状態によっては大きく変位して他の機器との衝突や、転倒、接続部の破損が起こることが危惧されていた。実大建物モデルを用いた加振実験でも、ロックをしなきキャスト機器が大きく変位して危険な状態が確認されており、これらの機器の機能保持に関する振動制御技術が期待されている。

本研究では与える電圧を変化させることによって制動トルクを変化させることのできるERブレーキに注目し、これを用いた簡易実験モデルとしてワゴンを製作し、小型振動台を用いた実験を行ってその基礎特性を確認した。

(b) 業務の成果

1) キャスタ機器へのERブレーキの適用

a) ERブレーキの概要

昨年度の報告書にもあるように、キャストのブレーキ力を可変に調整することは、地震時のキャスト機器の機能保持に対して有効であり、本研究ではブレーキ力を指令によって電氣的に変化させることが可能なERブレーキに注目している。作動流体であるER流体は、分散系と均一系の二種類に大別され、図1に示すように、分散系と均一系では剪断速度－剪断応力特性が異なる。

電界をかけない状態では両者とも剪断速度に剪断応力が比例するニュートン流動を示すが、電界をかけると分散系 ER 流体は剪断応力が電界の強さに応じて一様に大きくなるビンガム流動を示す。一方、均一系 ER 流体は電界をかけると剪断応力の直線の勾配（粘度）が大きくなるニュートン流動を示す。これらの特性から、ER ブレーキには主に速度・位置の制御に適している液晶均一系 ER 流体が使用されている。

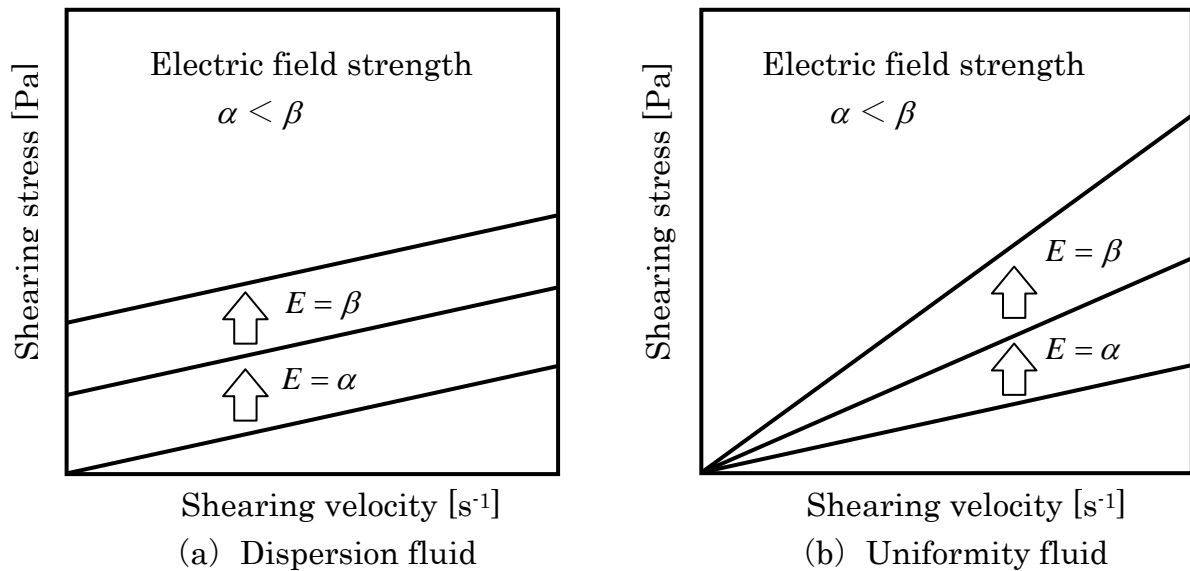


図 1 ER 流体のせん断応力の特性

b) ER ブレーキキャスト

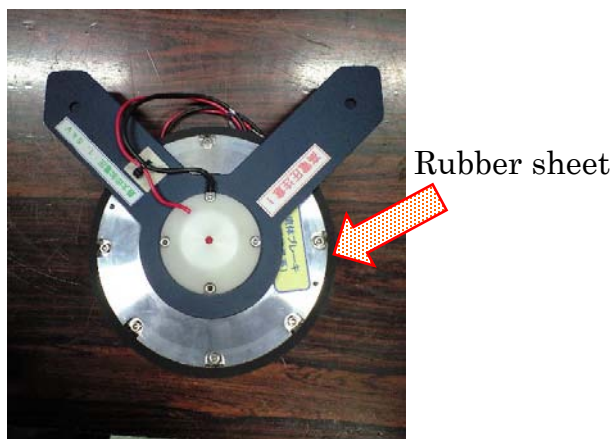


表 1 ER ブレーキのトルク [Nm]

		Rotational speed [rpm]	
		30	60
Applied voltage [V]	0	0.3	0.4
	500	1.2	1.0
	750	1.9	2.1
	1000	2.7	4.5
	1500	3.3	6.2

写真 1 ER ブレーキ

本実験で使用した ER ブレーキを写真 1 に示す。ER ブレーキの外周部分に厚さ 5mm のゴムシートを貼り付けることで、ブレーキを内蔵したキャストとして使用する。ER ブレーキのブレーキ性能表を表 1 に示す。本システムでの最大電圧は 1kV、最大電流は 1mA である。写真 2 は ER ブレー

キ 2 個と通常キャスタ 2 個を設置した実験用ワゴンである。右図において左が一方向キャスタ、右が ER ブレーキキャスタである。



写真2 ER ブレーキ付きワゴン

c) 小型振動台

加振に使用する小型振動台を写真3に、仕様を表2に示す。この振動台は昨年度購入したもので、機械式のサーボ制御機構を使用しており、駆動源にはパルスモーターを使用している。振動台のテーブル寸法がワゴンの予想移動量に対して不足しているため、その不足を補うためにアルミ製の板（以下、天板とする）と振動台上板とを接合させテーブル寸法を拡張し、図2のような形で実験を行う。天板のサイズは 1500mm×600mm×10mm、重量は約 24kg である。



写真3 小型振動台

表2 振動台仕様

Table size [mm]	700×400
Load weight [kg]	70
Max. acceleration [gal]	300
Max. displacement [mm]	±50
Frequency range [Hz]	0.01~10

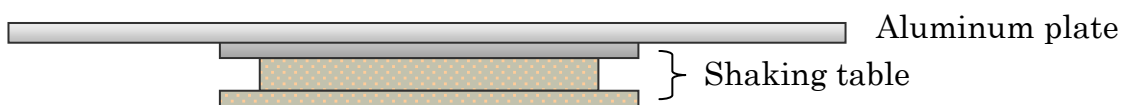


図2 振動台の拡張

d) 計測システム

計測項目はワゴンの変位、回転、加速度とした。変位、回転角は、図3のように実験装置の上方に固定されたビデオカメラから撮影し、モーションキャプチャにより測定する。マーカーはワゴン上に計測点を2点設定するが、この2点間の距離は既知であるため、これらの座標データを用いてキャリブレーションを行う。また、キャプチャした映像を使用して振動台の動きを観測することで、キャプチャした変位データと加速度計による計測データとの同期をとっている。ワゴンの加速度はワゴン中心点に取り付けた加速度計によって計測する。求めた回転角から座標変換を行い、XY方向それぞれの絶対加速度を算出する。

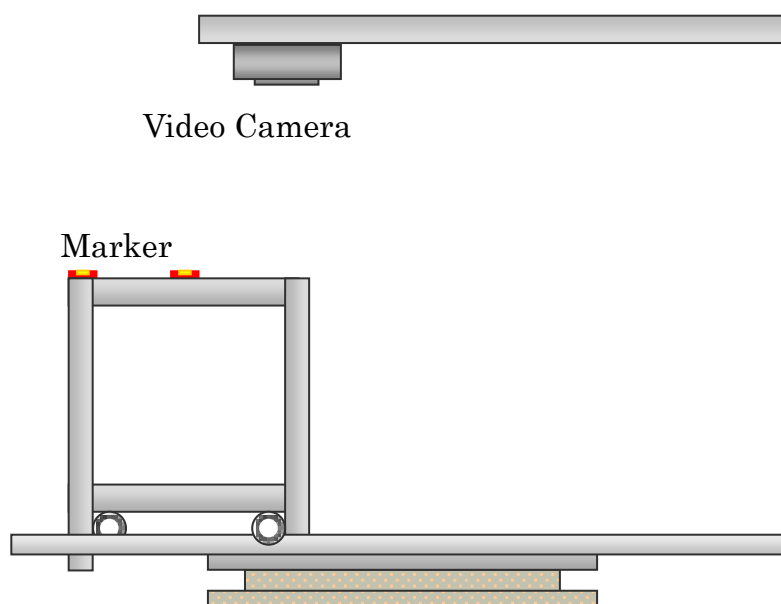


図3 計測システム

2) 加振実験

ER ブレーキへの印加電圧の違いによるワゴンの挙動の変化を調べるため、小型振動台を用いた加振実験を行った。ワゴン自身の固有振動数を調べるため、ワゴンの下板を直接打撃するハンマリングした際のワゴン加速度の周波数応答を図4に示す。8.5Hz付近にピークが見られており、これがワゴンの共振周波数であると考えられる。

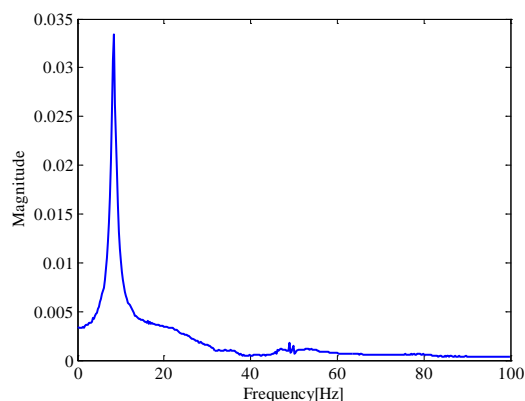


図4 ハンマリング試験結果

次に、エルセントロ NS 波（最大振幅 20mm）による加振実験を行った。実験結果を図 5、6 に、応答最大変位と最大加速度を表 3 に示す。ER ブレーキへは電圧を印加しない状態でも基底トルクと呼ばれる定常トルクが存在する。今回の実験では ER ブレーキの容量に比べてワゴンの重量が軽く、印加電圧が 0V の場合において最も加速度が低減される結果となった。これは、ワゴンの加速度を低減させるための理想的なトルクの値が、基底トルクの値を下回る状況が多かったためと思われる。ただし、変位は大きくなるため、他の機器との衝突やコード等の破損を避けるためには、変位を抑制することも重要であることは言うまでもない。

また、高電圧での応答では 100V 以上でほぼ同じ結果となった。これは、加振直後の大きな入力時を除いてほぼワゴンが静止状態となるトルクがかかっているため、今後制御に用いる電圧範囲を広く取るためには、ワゴンの重量をもっと重くするか、ER ブレーキの効きを弱くすることが必要であることが確認された。

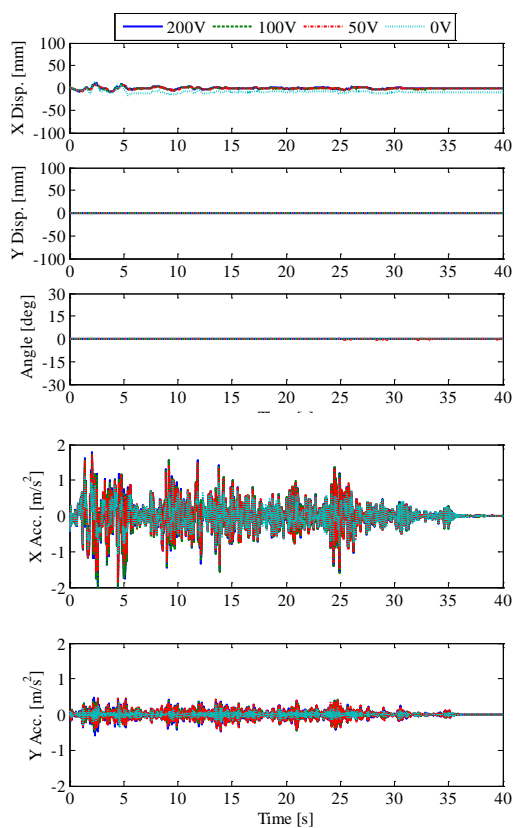


図 5 ER ブレーキワゴンの応答
(無負荷、電圧一定)

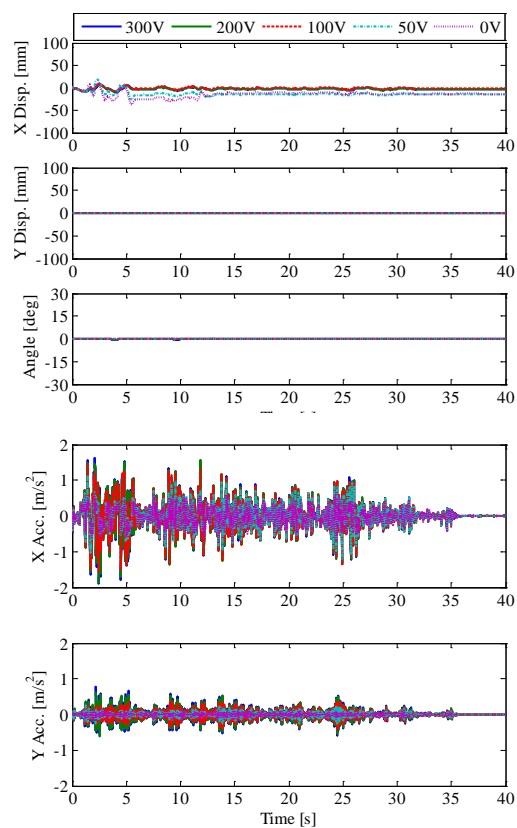


図 6 ER ブレーキワゴンの応答
(負荷 10kg、電圧一定)

表3 ER ブレーキつきワゴンの応答

		Max Disp. [mm]	Max Acc. [m/s ²]
No load	0V	17	1.11
	50V	8	1.89
	100V	10	2.05
	200V	9	2.09
With load	0V	38	0.73
	50V	27	1.20
	100V	9	1.57
	200V	9	1.91
	300V	10	1.98

3) ER ブレーキの改良

ブレーキの調整範囲を広げる方法としてワゴン重量を重くする方法は有効であるが、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うため、ER ブレーキの改良を行った。前節で行った実験で使用しているブレーキに封入している液体は、液晶均一系の ER 流体であったが、これを粒子分散系の ER 流体に替えることで、出力できる最大のブレーキトルクが約 1/3 以下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現在の約半分ほどに低下させることが期待できる。

そこで、ブレーキ内に充填されている ER 流体を今までの高分子液晶系から粒子分散系へと交換した。メーカー (ER テック社) から交換時に送付されてきた粒子分散系 ER 流体のせん断応力特性を表 4 に示す。ただし、これは一般的な値であり、実際には流体充填時の吸湿の度合いをコントロールすることが困難であるとのことで、吸湿度合いによって電流の流れやすさに違いが生じるため、各 ER ブレーキの正確なブレーキトルク性能を知るためには、トルク特性を評価するための測定が必要となる。

表4 粒子分散系 ER 流体を利用したブレーキのせん断応力

Applied voltage [V]	Shearing stress [Pa]
0	40
250	330
500	670
750	1020

1000	1820
1250	2630

(a) ER ブレーキのブレーキトルク測定

2つのERブレーキのブレーキトルク性能を知るため、以下の測定を行った。測定にはフォースゲージを使用し、ERブレーキの外周部に紐を取り付けて直接フォースゲージで引っ張った。各電圧印加時のブレーキ力を測定した結果を図7に示す。ブレーキBのブレーキトルクがブレーキAよりも大きくなっており、ブレーキAに比べブレーキBの流体の方が吸湿しており電流が流れ易くなっていると思われる。さらに高電圧印加時は低電圧時に比べ、ブレーキAとBのトルク差が大きくなる傾向にあることも分かった。現段階の実験装置ではキャストが回転しないため、ワゴンは一方向のみの移動しかできず、また移動量も特に大きくなるとは考えられないため、左右のキャストのブレーキ力の差は考慮せずに単純に加算して扱うとして実験を進めた。各々のブレーキトルクの測定結果を三次の多項式関数で最小二乗近似した結果を以下に示す。なお、近似多項式曲線は図7の中に実線で示している。

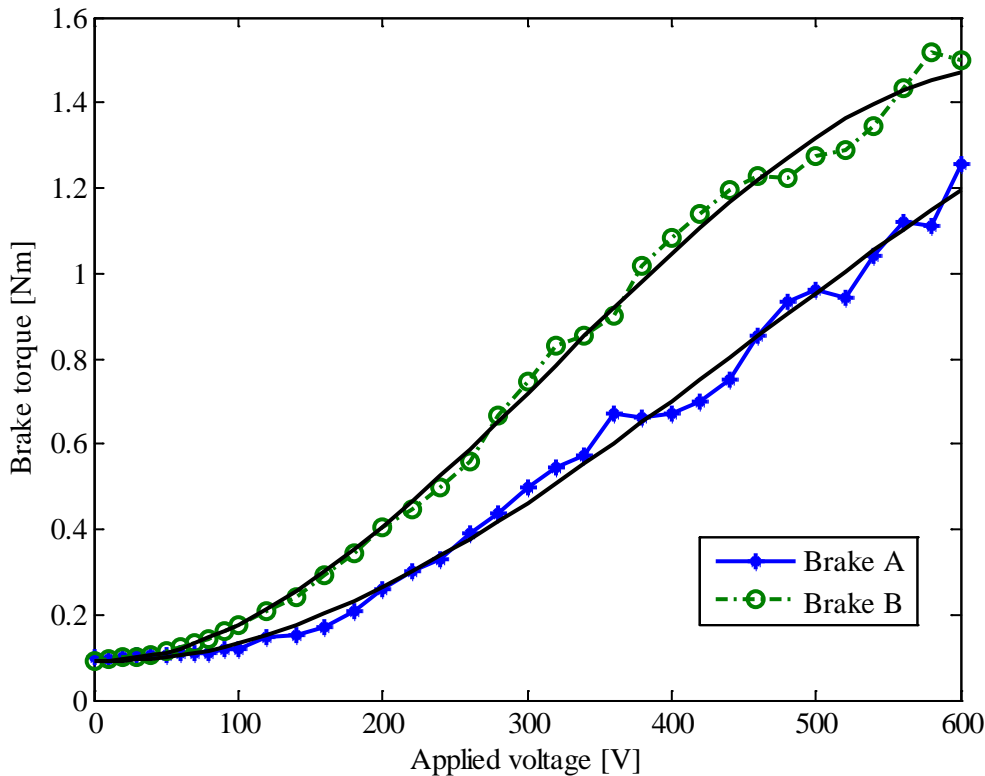


図7 ERブレーキのブレーキトルク

ブレーキA, Bのトルク

$$T_A = -5.5746 \times 10^{-9} E^3 + 7.6428 \times 10^{-6} E^2 - 1.9038 \times 10^{-4} E + 0.1211$$

$$T_B = -14.531 \times 10^{-9} E^3 + 14.000 \times 10^{-6} E^2 - 1.7992 \times 10^{-4} E + 0.1211$$

ここで T_A , T_B はそれぞれのブレーキトルクを、 E は印加電圧を表す。これらの式を今後のブレーキトルク算出や制御系の設計に利用する。

(b) ER ブレーキワゴン加振実験（無負荷）

粒子分散系 ER ブレーキを取り付けたワゴンの加振実験を行った。キャストは回転しないため、ワゴンは加振方向にしか移動しない。ワゴンに関するパラメータを表 5 に示す。ここで、ER ブレーキのブレーキトルク（2 個分）を表 6 のように変化させ、ワゴンにウエイトを付加せずに実験を行った。加振入力はエルセントロ NS 波とし、全 30 回の加振結果から求めた振動台最大加速度の平均値は 1.72m/s^2 であった。

表 5 ER ブレーキワゴンパラメータ

Brake torque [Nm]	Applied voltage [V]	Brake torque [Nm]	Applied voltage [V]
0.24	0	1.6	309
0.25	30	1.7	323
0.3	63	1.8	336
0.4	100	1.9	350
0.5	126	2.0	363
0.6	149	2.1	377
0.7	169	2.2	390
0.8	187	2.3	404
0.9	205	2.4	418
1.0	221	2.5	432
1.1	237	2.6	446
1.2	252	2.7	461
1.3	266	2.8	476
1.4	281	2.9	491
1.5	295	3.0	507

表 6 印加電圧に対するブレーキトルク

Measurement $2b$	25cm
Weight W	16kg
Limit angle of rollover α	22deg
Wagon height H	86cm
Height of center of gravity h	30.9cm
Limit acc. of rollover A_0	3.97m/s^2

各ブレーキトルクでの X 方向加速度・変位の時刻歴応答を図 8 に示す。また最大加速度と最大変位を表 7 に示す。この結果より、最大加速度と最大変位の間に相反する関係があることが改めて確認できた。また、ブレーキトルクが増加したにも関わらず、変位が増加してしまっているような場合（例えば 1.4Nm のとき）があるが、これにはモーションキャプチャの精度が大きく影響

していると考えられる。そのため、変位のデータは多少の誤差を含んでいることを念頭に置く必要がある。

表7 設定トルクに対する最大応答変位と最大応答加速度

Brake torque [Nm]	Max acc. [m/s ²]	Max disp. [mm]	Brake torque [Nm]	Max acc. [m/s ²]	Max disp. [mm]
0.24	0.95	31	1.6	1.65	16
0.25	1.02	28	1.7	1.81	19
0.3	1.08	28	1.8	1.74	16
0.4	1.15	23	1.9	1.83	20
0.5	1.24	23	2.0	2.05	12
0.6	1.42	24	2.1	2.04	15
0.7	1.42	15	2.2	1.69	14
0.8	1.63	16	2.3	2.07	16
0.9	1.74	14	2.4	1.73	15
1.0	1.81	16	2.5	1.61	15
1.1	1.81	17	2.6	2.01	19
1.2	1.57	14	2.7	1.65	13
1.3	1.67	15	2.8	1.99	11
1.4	1.68	19	2.9	1.70	15
1.5	1.84	12	3.0	1.76	15

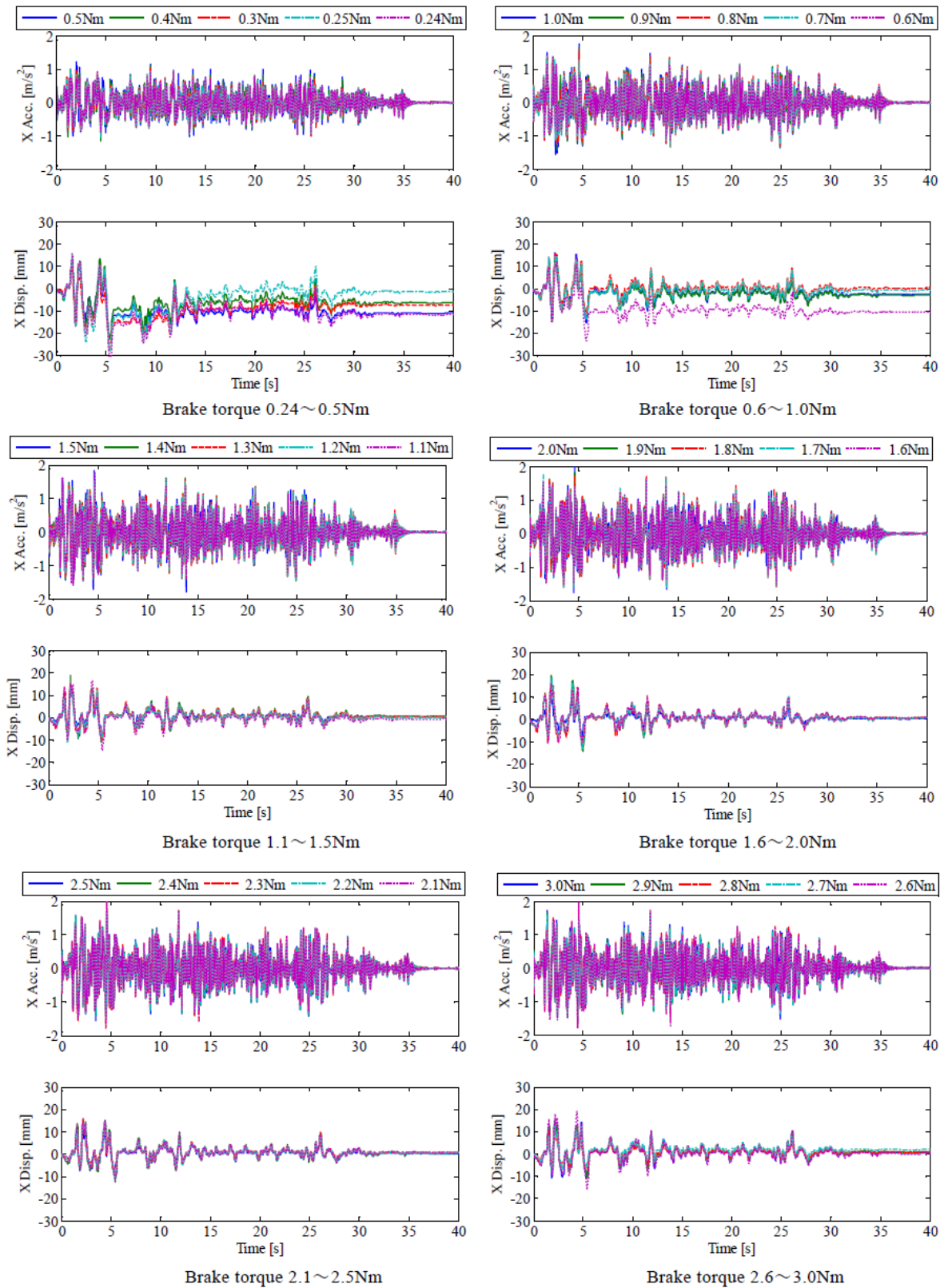


図8 ブレーキトルクの値によるワゴンの応答の違い

(c) ER ブレーキワゴン加振実験（負荷あり）

ワゴンの重量 W に相当するおもり（16kg）を負荷した場合とその二倍のおもり（32kg）を負荷した場合のワゴンのパラメータを表8に示す

表8 負荷を追加した際のワゴンのパラメータ

ここで、積載荷重 32kgのほうが 16kgに比べて重心が高くなっているが、これはワゴンの下板におもりを積み重ねているためである。振動台の加振入力は最大加速度約 1.7m/s^2 のエルセントロNS波とし、この最大加速度を基準として求めた評価用の転倒限界加速度 A'_0 を表 8 中に示している。各ブレーキトルクでの積載荷重別の X 方向加速度・変位の時刻歴応答を図 9～13 に示す。ま

	Without weight	Weight 16kg	Weight 32kg
Limit angle of rollover α [deg]	22	28	26
Height of center of gravity h [cm]	30.9	23.5	25.6
Limit acc. of rollover A_0 [m/s^2]	3.97	5.21	4.79
Evaluation limit acc. of rollover A'_0 [m/s^2]	1.59	2.08	1.92

た最大加速度と最大変位を表 9 に、それらの分布を図 14 に示す。なお、表 9 の網掛け部分は求めた最適ブレーキトルクである。

ワゴンに荷重を積載した場合、すなわち加振対象の重量が大きいかほど変位が増加する傾向にあることが確認できた。そして、積載荷重 32kg の場合には、ER ブレーキのブレーキトルクによりコントロールできる範囲が広がることも確認できた。しかし、16kg での最大変位は荷重なしの場合の最大変位と大きく変わらなかったことに関しては今後更なる検討が必要である。また、16kg と 32kg での最大変位の差が約二倍と大きいため (16kg では 30mm, 32kg では 61mm)、今回行った実験条件以外の荷重に対する最大変位、最大加速度について、確認のために今後追加で実験を行う予定である。

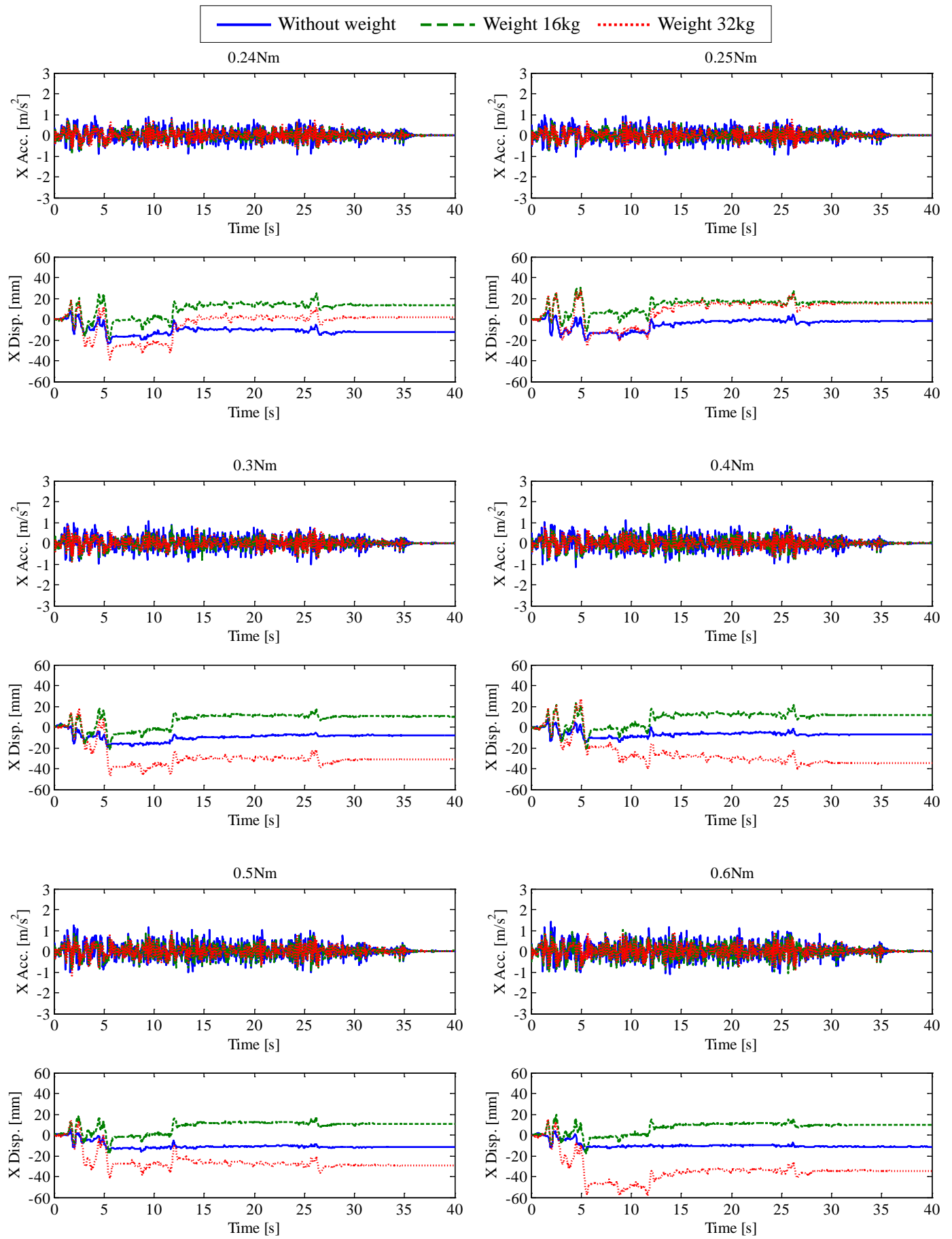


図9 エルセントロ NS 波に対するワゴンの応答 (トルク 0.24Nm~0.6Nm)

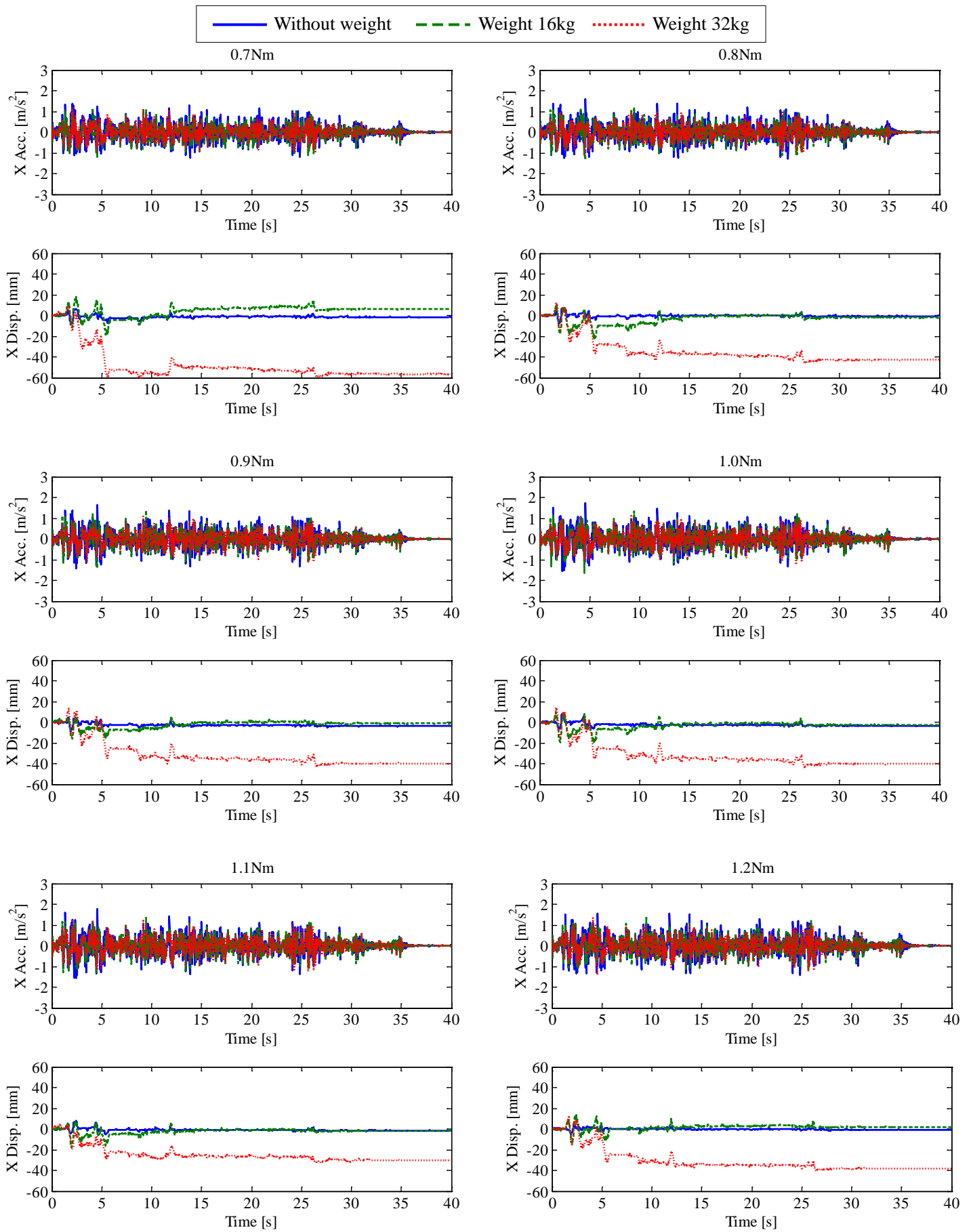


図10 エルセントロ NS 波に対するワゴンの応答 (トルク 0.7Nm~1.2Nm)

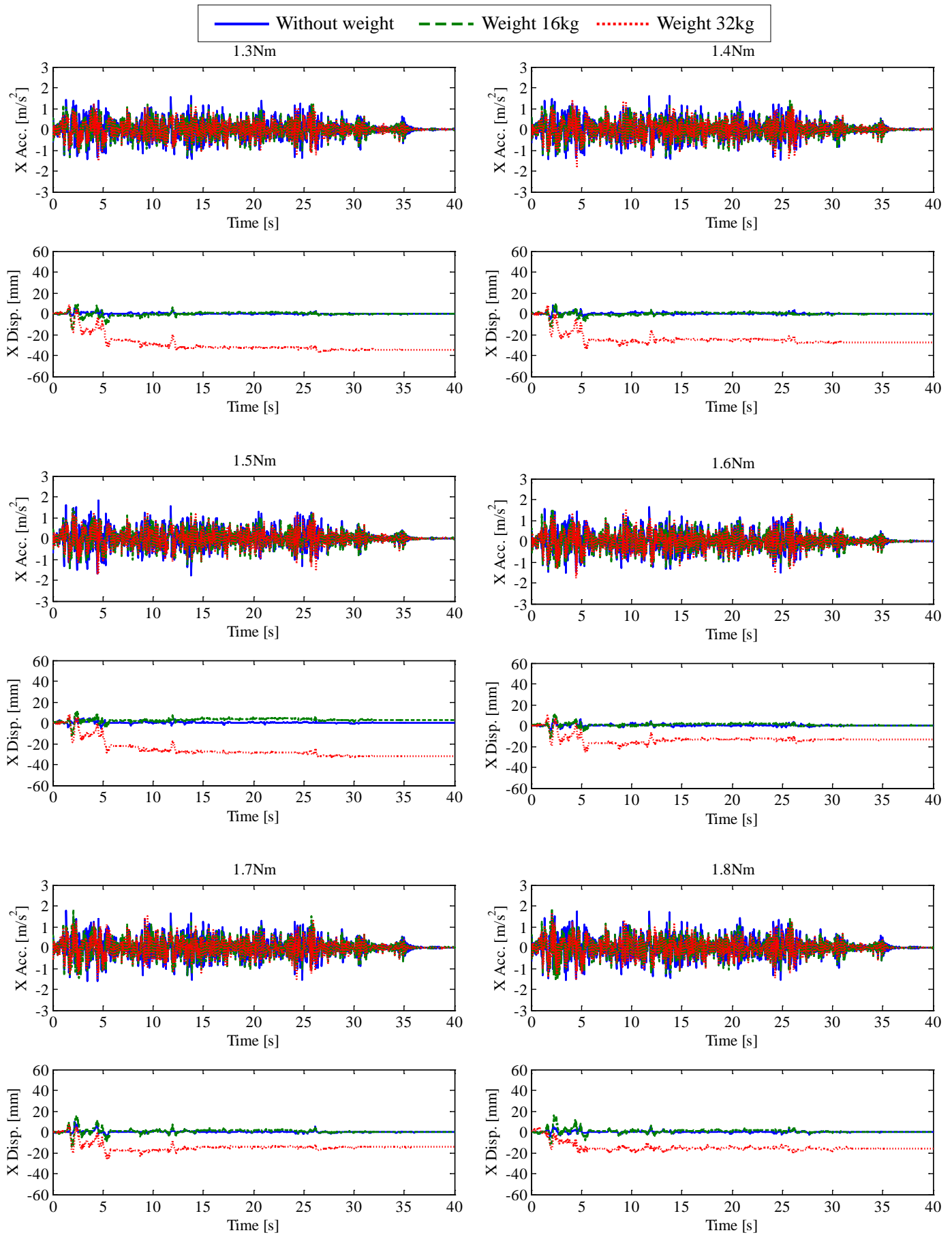


図 1 1 エルセントロ NS 波に対するワゴンの応答 (トルク 1.3Nm~1.8Nm)

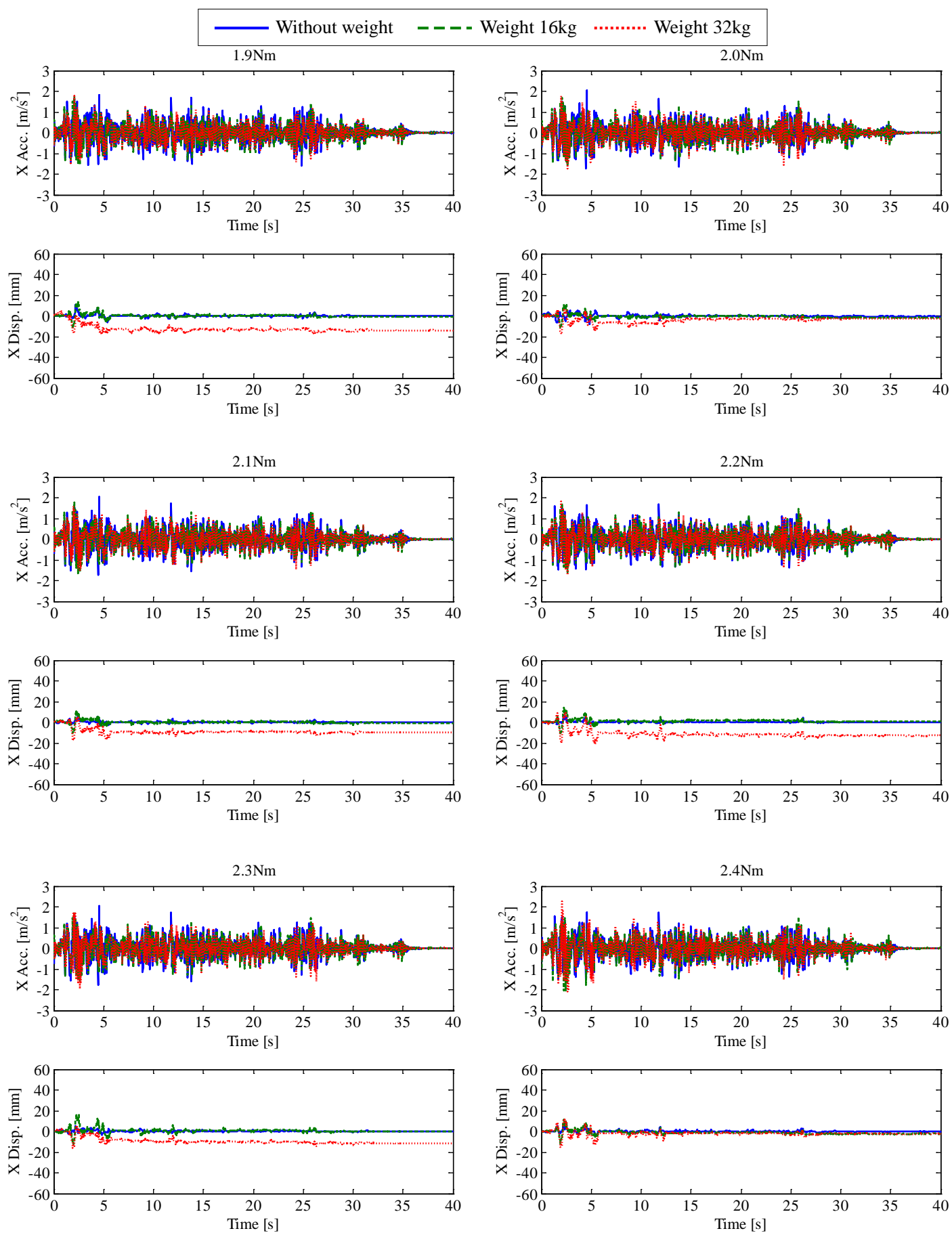


図 1 2 エルセントロ NS 波に対するワゴンの応答 (トルク 1.9Nm~2.4Nm)

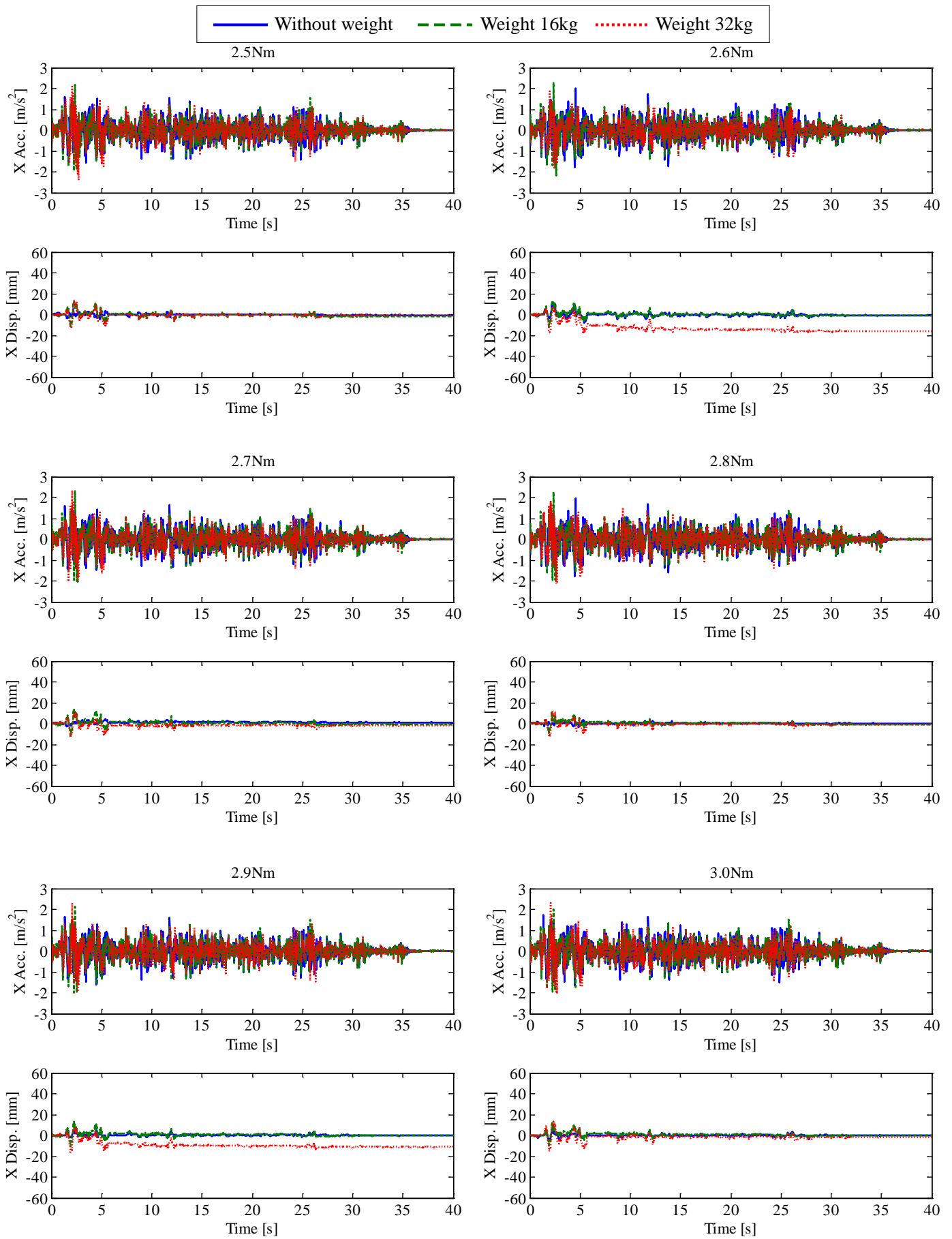


図 1 3 エルセントロ NS 波に対するワゴンの応答 (トルク 2.5Nm~3.0Nm)

表9 ER ブレーキワゴンの応答（最大加速度、最大変位）

Brake torque [Nm]	Without weight		Weight 16kg		Weight 32kg	
	Max acc. [m/s ²]	Max disp. [mm]	Max acc. [m/s ²]	Max disp. [mm]	Max acc. [m/s ²]	Max disp. [mm]
0.24	0.95	24	0.94	25	0.74	39
0.25	1.02	21	0.79	30	0.76	29
0.3	1.08	19	0.92	21	0.94	47
0.4	1.15	14	0.91	24	0.85	40
0.5	1.24	16	0.93	18	1.25	41
0.6	1.42	14	1.07	19	0.91	59
0.7	1.42	9	1.21	19	1.19	61
0.8	1.63	8	1.33	22	1.05	47
0.9	1.74	9	1.44	16	1.15	43
1.0	1.80	8	1.65	21	1.23	43
1.1	1.81	8	1.36	18	1.26	32
1.2	1.57	5	1.36	14	1.41	41
1.3	1.67	5	1.35	15	1.51	37
1.4	1.68	8	1.37	14	1.79	34
1.5	1.83	5	1.44	12	1.73	33
1.6	1.64	6	1.49	13	1.80	26
1.7	1.81	10	1.83	15	1.53	26
1.8	1.74	6	1.89	16	1.68	21
1.9	1.83	11	1.73	13	1.79	18
2.0	2.05	8	1.68	12	1.77	17
2.1	2.04	6	1.80	11	1.61	18
2.2	1.69	6	1.73	14	1.84	21
2.3	2.07	6	1.73	17	1.94	16
2.4	1.73	6	2.04	12	2.26	15
2.5	1.61	8	2.19	14	2.41	14
2.6	2.01	5	2.28	14	1.88	18
2.7	1.65	11	2.33	14	2.35	14
2.8	1.99	4	2.27	11	2.15	13
2.9	1.70	7	2.16	14	2.33	16
3.0	1.76	6	2.01	13	2.30	15

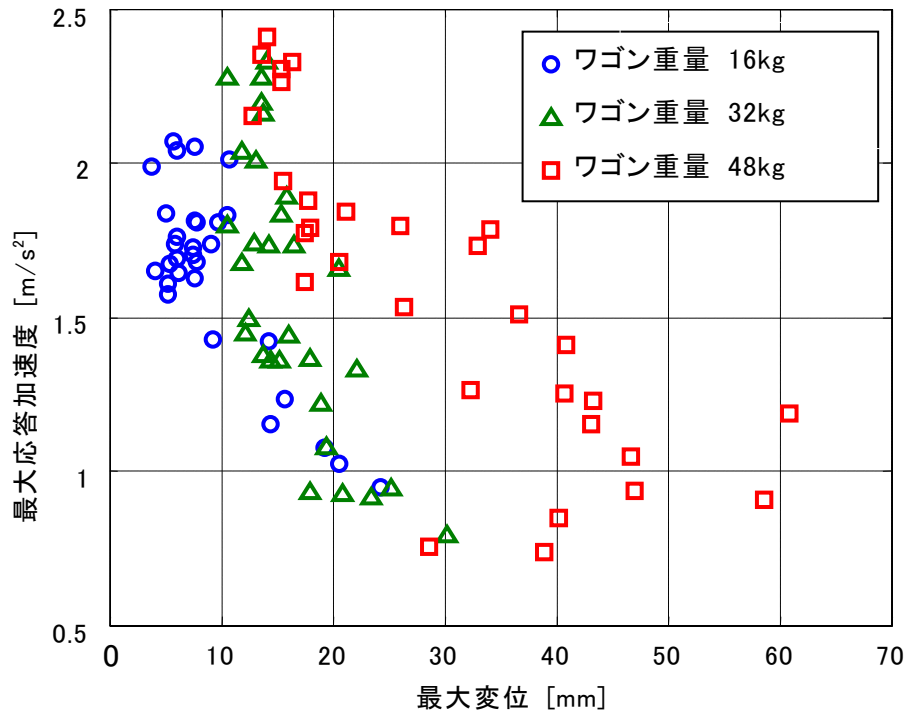


図 1 4 最大変位と最大加速度の分布

(c) 結論ならびに今後の課題

医療機器にはキャストのついた機器が多く、地震を受けた際に、その固定状態によっては大きく変位して他の機器との衝突や、転倒、接続部の破損が起こることが危惧されていた。実大建物モデルを用いた加振実験でも、ロックをしなきキャスト機器が大きく変位して危険な状態が確認されており、これらの機器の機能保持に関する振動制御技術が期待されている。本研究では与える電圧を変化させることによって制動トルクを変化させることのできる ER ブレーキに注目し、これを用いた簡易実験モデルとしてワゴンを製作し、小型振動台を用いた実験を行ってその基礎特性を確認した。

ワゴンに対して ER ブレーキの基底トルクが大きいため、今後はワゴン重量を増やした場合、今回の設定値以外の電圧での基礎実験を行った上で、ワゴンの絶対加速度をリアルタイムで計測し、ER ブレーキの電圧を切り替えて、変位、加速度を効果的に低減する制御について検討を行う予定である。

(d) 引用文献

なし

(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
キャスター付き医療機器の地震応答に関する研究 －震災時における建物の機能保持に関する研究開発（その4）－ 口頭発表	小方康裕、鎌田崇義、佐藤栄児、井上貴仁、笥淳夫、小林健一	広島大学 2008年度日本建築学会大会（中国）	2008年9月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

マスコミ等における報道・掲載

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21年度業務計画案

現在実験に用いているワゴンでは、その重量に対してERブレーキの基底トルクが大きいため、ERブレーキに与える電圧の違いによる応答の差が少ない。振動台の限界があるため大きく重量を増加させることは困難であるが、今後はワゴン重量を増やした場合と、本年度行った設定値以外の電圧での基礎実験を行って詳細な特性を把握した上で、ワゴンの挙動に応じて相対変位と絶対加速度を効果的に低減する方法について検討を行う。具体的には、ワゴンの絶対加速度をリアルタイムで計測し、最適レギュレータ等で設計した制御則によってERブレーキの電圧を切り替える方法についてシミュレーション、実験による検討を行う予定である。

