

3.1.4 単体機器のモデル化

(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し、今後の研究において機能保持を目指した重要施設の具体的な対策手法を検討するための基礎とする。

(b) 平成20年度業務目的

医療機器のうち、地震時の挙動が大きく、他の機器との干渉、衝突、接続部の破損等が問題となる、キャスト機器について数値解析モデルを作成し、耐震基準確立のため実験結果と比較してその妥当性を確認する。

(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
	教務職員	池西 俊仁
	大学院生	丸山 敦士

(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、ロックをしない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。制御器の設計や応答のシミュレーション解析を行うためには、機器のモデル化を行う必要がある。

本研究では、昨年度実施した機器単体の耐震実証実験より得られた結果を改めて精査し、機器単体（システム）においてモデル化が必要なものがキャスト機器であることを再確認した。本年度行った小型振動台実験データを元にキャスト機器の数値解析モデルを構築し、その妥当性を検証した。

(b) 業務の成果

昨年度、京都大学防災研究所において、医療施設の室内一部を模擬した構造体を 3m×5m の中型振動台に搭載し、その内部に各種医療機器を設置した振動実験を行った。実験では設置した機器が地震動を受けた時の挙動と機器単体での耐震性能等を評価するためのデータの収録が行われ、実験後の一次解析によってモデル化の必要な機器はキャスト機器程度であろうとの結論を得ていた。

本年度は、データを精査し、単体機器のモデル化の必要性について再検討を行うとともに、モデル化が重要と思われるキャスト機器のモデル化を行った。

1) 単体試験概要

昨年度京都大学で行われた試験の概要について下記に示すと共に、モデル化の必要性について検討した。

a) 設置した機器

実験で用いた医療機器を主な系統ごとに分類したものを表 1 に示す。計測は機器に設置された加速度計による加速度計測と、マーカーと撮影映像を利用したモーションキャプチャによる変位計測によるものとした。

なお、入力振動は 0.1~30Hz のホワイトノイズ、0.5~30Hz の正弦掃引波、1940 年インペリアル・バレー地震で記録されたエルセントロ波、1995 年兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測された JMA 神戸波であった。

表 1 医療機器の主な分類

系統	種類数	主な機器名
手術室	8	手術台, 人工心肺, 麻酔器, 電気メス等
診察室	5	エコー, 心電図計等
病棟	3	ベッド, 点滴台等
スタッフルーム等	6	テーブル, 薬品棚等
その他	4	搬送装置, 扉等

b) 地震応答に関する考察

機器の応答について、扉、一般機器、キャスト機器に分けて考察を行った。

i) 扉

スライド式の扉において、スライド方向に散発的に大きな加速度が発生していた。これは扉が地震動によりスライドし、壁に衝突しているためである。病院内のドアは非常に軽い力で可動できる構造となっているものも多く、地震時においてはドア付近の人や他の機器との衝突や、強い衝突による脱扉の危険性があることが確認された。

実験では、加振後も扉はスムーズに開閉し、扉自体に破損した箇所はなかった。ただし、構造物自体が地震により変形してしまうと、当然開閉ができなくなるという問題点は残る。

周波数応答では、開閉方向で揺れに合わせて若干の応答特性がみられたが、共振を起こすようなものではなく、機器の動特性が大きな問題になるものではない。

ii) 一般機器（キャスタのついていないもの）

キャビネットや棚などでは固定していないものが大きく振動し、壁面と衝突した。ハイキャビネットやオープンラックで転倒も発生している。これらは高さが2m程度あり、地震時に転倒した場合、周囲に大きな危険をもたらすと思われる。アンカーで固定したサーバーラックやハイキャビネットでは転倒は発生しておらず、ロックングにより構造物の壁面に被害を与えることを避けるためにも、利用時はしっかりと固定することが強く望まれる。また、書架付テーブルはJMA神戸波100%入力で書架の支持部が塑性変形して大破した。

棚関連ではいくつかの機器で水平方向の共振特性が見られ、JMA神戸波3軸100%加振の際に機器の短辺方向に転倒するものもあった。これらの機器は転倒した場合、周囲に与える危険は大きいと思われる。破壊した書架付きテーブルでは重い書物等が高い位置に置かれるため、片持ち梁のような応答を見せて破壊に至っている。書架や棚については、積載物の重量によって大きく共振点が変化するが、JMA神戸波以外では破壊に至っておらず、動特性の考慮以前に、機器の振動許容限界をどこに設定するかが重要である。病室等におかれるパーティションユニットでは、水平方向の共振特性がみられるが、破壊につながるようなものではなく、軽量で周囲へ与える危険性も低いことから特に問題にはならない。

iii) キャスタ機器

キャスタのロック状態については、JMA神戸波100%入力に対してロック状態をかえて実験が行われた。ロック状態はフリー(Free)、対角固定(2p-Locked)、全固定(all-Locked)の3種類である。ベッドの応答加速度はキャスタの固定方法によって大きく異なり、最大加速度は全固定時で最も大きく、フリーの状態でも小さくなった。ロックフリーの状態でも最大応答加速度が減少する傾向はキャスタ機器全般にみられ、キャスタの作用によって免震的な効果が得られ、応答加速度が低減されていることがわかる。なお、対角固定時の応答加速度は、多くの機器でフリーと全固定時の間の値となり、応答加速度と変位を低減できていた。フリーの状態では変位量が大きく、地震動の主要部後に壁への衝突が発生し、回転移動も顕著にみられた。通常ベッド周りには様々な機器があることから、加速度だけでなく、変位量の抑制も重要であることが確認された。

周波数応答では高周波帯域でゲインが低減されているものがあり、やはり免震のような効果があると思われる。キャスタの固定状態や初期状態によっても挙動が変化するが、基本的にはフリーの状態にしておき、周囲との衝突など変位量が問題になる場合にはロック状態を変えるなどの対応をとることによって有効な耐震対策になる可能性があり、動特性を含めたモデル化を行うことが重要であることが確認された。

2) 機器のモデル化の必要性

昨年度振動実験をおこなった機器の応答特性について改めて検討した。上下・水平方向に共振特性を示すものがいくつかあったが、ほとんどの機器は機能が壊れるような動特性は見せておらず、特別なモデル化は必要ないと思われる。大地震の入力に対しては塑性破

壊や転倒を起こした機器もあるが、個々の機器の耐震性を阪神淡路大震災クラスの地震を対象に考える必要があるならば、簡易なモデル化が必要になる可能性があるものの、特性が使用状態によって大きく変動するため、静的な破壊限界の考慮程度でよいと思われる。キャスト機器については、フリー状態では応答加速度自体は小さいが、変位量が大きくなる免震のような特性が得られており、その構造や床面との摩擦係数、初期状態によって応答が異なることが予想されることから、これらのことを考慮できるモデル化をする必要がある。

3) キャスタ機器のモデル化

前節で示したように、キャスト機器は医療関係機器にしめる割合が大きく、この特性をモデル化することは、危険性の予想、新たな耐震方法の検討を行う上で重要であると思われる。昨年度の単体実験では、他の機器との衝突等の干渉が見られる、キャスト角度等の初期条件については1通りの実験しか行われていない等、統一が取れていない部分がある上、モデル検証のための再試験を行うことも困難であるため、本年度新たに小型振動台を用いた加振試験を行い、キャスト機器のモデルを行った。

a) 実験装置概要

i) ワゴン

実際の医療現場で使用されているキャスト付きの医療機器は多岐にわたるため、本実験では、最もシンプルなワゴンを対象とした。実験に使用するワゴンは、市販されている医療用ワゴンの寸法を参考にして設計した。ワゴンの外観を写真1に示す。ワゴンはアルミ製で、寸法は400mm×300mm×500mm、キャスト部分を除いたワゴンの総重量は約7kgである。

ii) キャスタ

ワゴンに取り付けるキャストは首振り可能な自在キャストと、一方向のみの固定キャストの2種類を使用した。キャスト車輪の材質はラバーとナイロンの2種類とし、キャストタイプとの組み合わせで計4種類のキャストを用意した。自在ラバータイプのキャストの外観を写真2に示す。それぞれのキャストについて、ワゴンに取り付けた状態での振動台との静止摩擦係数を計測した。静止摩擦係数はキャストをワゴンに取り付けた状態で、フォースゲージでワゴンを引っ張り測定した。それぞれの静止摩擦係数 μ_0 を表2に示す。なお、今後キャストの呼称は表中の略称を用いるものとする。

表2 静摩擦係数

Caster type	μ_0
Free-Rubber (F-R)	0.0098
Free-Niron (F-N)	0.0064
Lock-Rubber (L-R)	0.0101
Lock-Niron (L-N)	0.0071



写真1 ワゴン



写真2 自在ーラバーキャスタ

iii) 実験条件

実験条件を表3に示す。使用するキャスタは自在キャスタ、固定キャスタのそれぞれについてラバー製とナイロン製を用意し計4種類とした。自在キャスタについては首振りによる挙動への影響を検討するため、図1に示すように加振方向に対する初期角度を、 0° 、 45° 、 90° の3通りとして配置した。なお、ワゴン本体の初期姿勢角はすべて加振方向に対して 0° とした。

加振入力には最大 3m/s^2 のエルセントロ波（NS成分）、および $0.5\sim 10\text{Hz}$ の周波数帯域を含むホワイトノイズ波を用いた。それぞれの波形を入力した時の振動台の応答加速度と周波数スペクトルを図2，3に示す。両波形とも 12Hz 付近に振動台の機械的特性によると思われるピークが存在しているが、主な周波数帯域の再現はされており、特に問題はないと考えられる。

本実験では加速度センサによる加速度計測と、モーションキャプチャによる変位計測をおこなった。図4に加速度センサとモーションキャプチャ用のマーカー設置位置を示す。

表3 実験条件

Input wave	El-Centro NS, White Noise
Caster type	F-R, F-N, L-R, L-N
Initial caster angle	0° , 45° , 90°

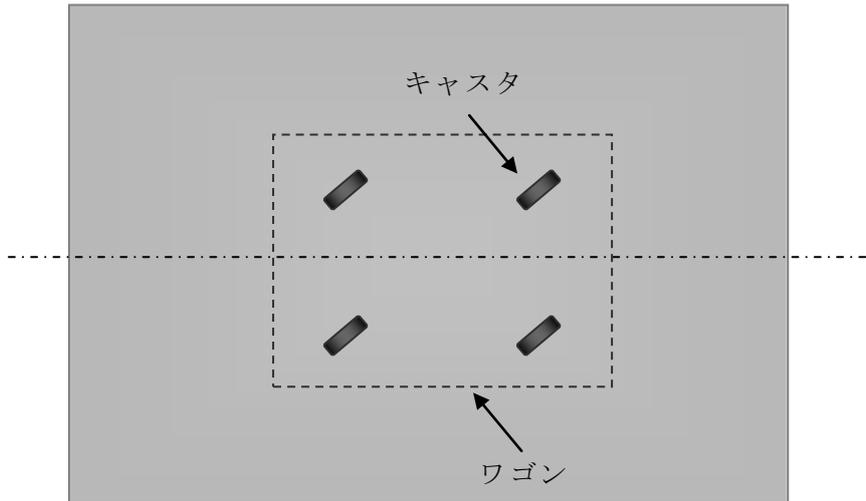
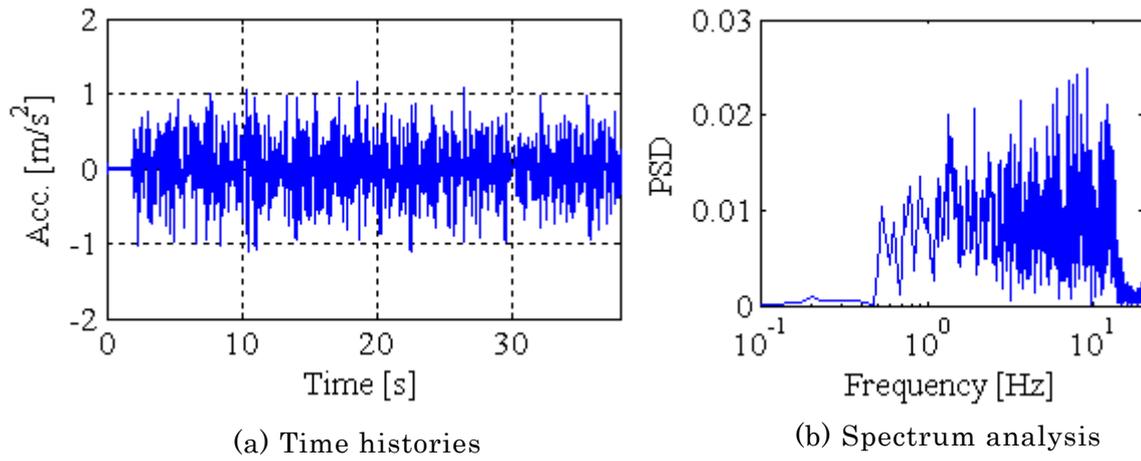
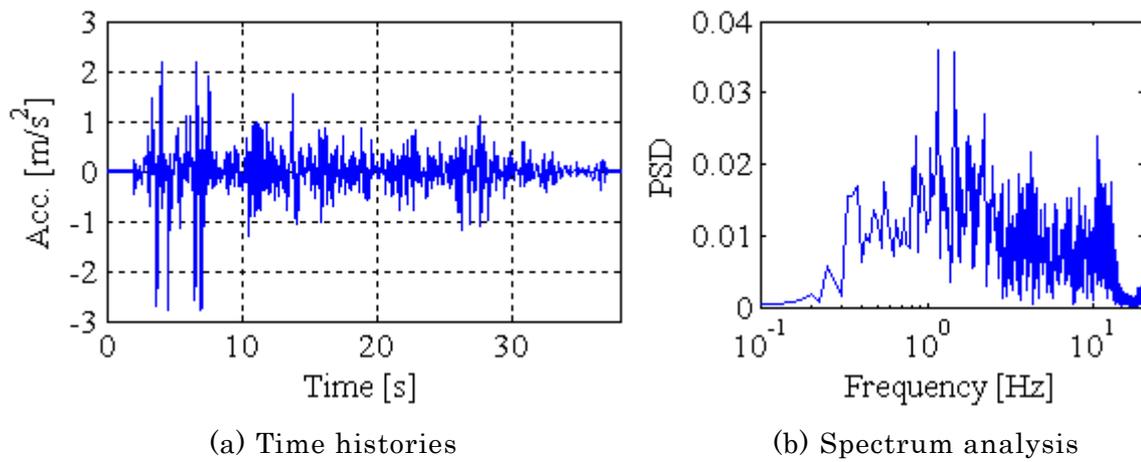


図1 キャスタ初期角度(45° の例) ←→
加振方向



(a) Time histories (b) Spectrum analysis

図2 ホワイトノイズ



(a) Time histories (b) Spectrum analysis

図3 エルセントロNS波

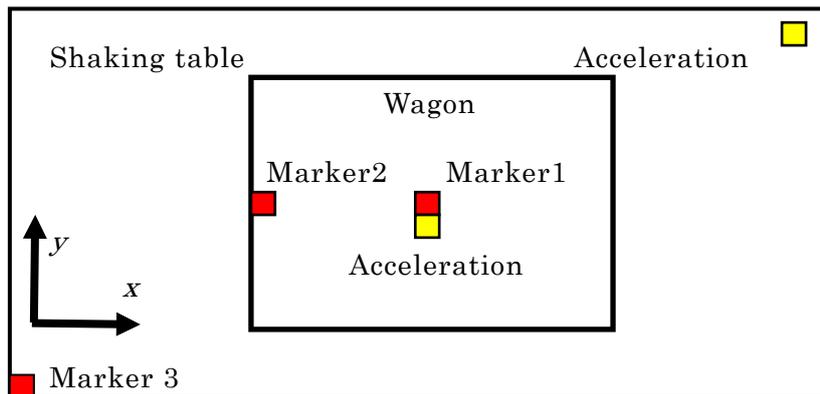


図4 計測の概要

b) 機器のモデル化

キャスタ付ワゴンのモデル化を行う。ワゴンは図5に示すように、ワゴン車体と4つの自在キャスタからなる水平面内運動モデルとして考える¹⁾。ワゴンの質量を M とし、それぞれのキャスタ軸から受ける力 f_i と外力 F_g を受けて運動するものとする。以下のように基本的な仮定を行い、ワゴンの運動に関する基礎方程式を導出した。キャスタ軸から受ける力 f_i については次節にて詳説する。

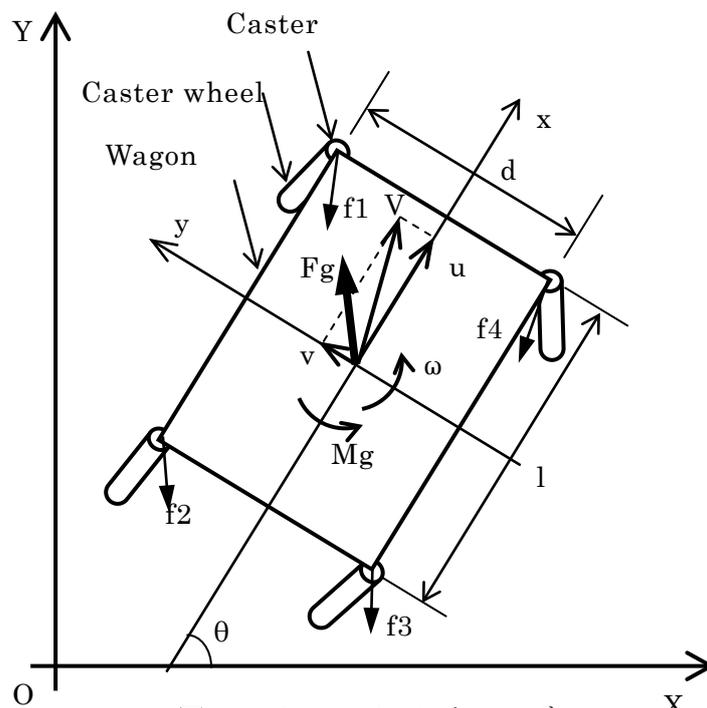


図5 キャスタワゴンモデル

< 基本的仮定 >

ワゴンは剛体であり、変形をしない

ワゴンの運動は水平面内の2次元運動 (x, y 方向並進と回転運動) のみとし、浮き上がりや、転倒をしない

ワゴンの荷重移動の影響は無視する

このとき、ワゴンに関する基礎方程式は以下のようになる。

(x 方向)

$$M(\dot{u} - \omega \cdot v) = f_{1x} + f_{2x} + f_{3x} + f_{4x} + F_{gx} \quad (1)$$

(y 方向)

$$M(\dot{v} + \omega \cdot u) = f_{1y} + f_{2y} + f_{3y} + f_{4y} + F_{gy} \quad (2)$$

(ヨ一方向)

$$I\dot{\omega} = (-f_{1x} - f_{2x} + f_{3x} + f_{4x}) \cdot d/2 + (f_{1y} - f_{2y} + f_{3y} - f_{4y}) \cdot l/2 + M_g \quad (3)$$

(位置と姿勢)

$$\dot{X} = u \cos \theta - v \sin \theta \quad (4)$$

$$\dot{Y} = u \sin \theta + v \cos \theta \quad (5)$$

$$\dot{\theta} = \omega \quad (6)$$

<記号>

X-Y : 路面に固定された座標系

x-y : ワゴンに固定された座標系

V : ワゴン速度

ω : ヨーレート

θ : 姿勢角

$f_1 \sim f_4$: キャスタ軸に作用する力

F_g : ワゴンに作用する外力

M_g : ワゴンに作用するモーメント

M : ワゴン質量

I : Z 軸まわりの慣性モーメント

l : キャスタ軸間距離 (長辺)

d : キャスタ軸間距離 (短辺)

キャスタはキャスタ軸とキャスタ車輪からなるものとし、以下のように仮定をした。質量の影響を無視しているため、キャスタ車輪はキャスタ軸の運動によってその動きが瞬時に決定される。

<基本的仮定>

キャスタ軸は垂直であるものとする

キャスタの質量による影響は無視するものとする

キャスタ車輪には路面からの摩擦力 $D1$ 、キャスタ軸には回転抵抗 $D2$ のみが働くものとする

$D1$ 、 $D2$ はワゴンの質量に比例するものとする

上記仮定に基づき、キャスタの首振り角 δ について考える。キャスタ車輪はキャスタ軸によって牽引されるため、車輪の運動は以下に示す追跡線にしたがったものとなる。

$$t(\omega + \dot{\delta}) = V_c \sin(\beta - \delta) \quad (7)$$

ここで図 5 より

$$\tan \beta = V_{cy} / V_{cx}, \quad V_{cx} = u - \omega d, \quad V_{cy} = v + \omega l \quad (8)$$

よって、 $\dot{\delta}$ は u, v, ω, δ の関数であることがわかる。

次にキャスタに働く力について考える。キャスタ軸が図 6 の様な状態にあるとき、作用する力 $f1$ の xy 成分は以下ようになる。

$$f1x = -D1 \cos \delta + D2 \cos \delta, \quad f1y = -D1 \sin \delta - D2 \cos \delta \quad (9)$$

ここで $D1$ は車輪と路面との間に働く摩擦力であり、測定したキャスタの転がり静止摩擦係数 μ_0 とワゴンの質量より決まる値である。また右辺第二項の $D2$ はキャスタの軸周りの回転抵抗を表す力である。具体的には、キャスタに用いられている転がり玉軸受けによる抵抗を表す。ここでは静止摩擦係数を λ_0 として、ワゴンの質量に比例するものとする。シミュレーション上では、ワゴンの速度によって静止状態と運動状態を判断し、 $D1$ 、 $D2$ の値を切り替えている。以下にその切り替え条件を示す。

< $D1$ の切り替え条件>

$$(I) \left| V_{cf} \right| \leq 0.001$$

$$(i) F_{gf} > \mu_0 mg$$

$$D_1 = \mu mg / 4 \quad (10)$$

$$(ii) F_{gf} \leq \mu_0 mg$$

$$D_1 = F_{gf} / 4 \quad (11)$$

$$(II) \left| V_{cf} \right| > 0.001$$

$$D_1 = \mu mg / 4 \quad (12)$$

<D2 の切り替え条件>

$$(I) |V_{cs}| \leq 0.001$$

$$(i) F_{gs} > \lambda_0 mg$$

$$D_2 = \lambda mg / 4 \quad (13)$$

$$(ii) F_{gs} \leq \lambda_0 mg$$

$$D_2 = F_{gs} / 4 \quad (14)$$

$$(II) |V_{cs}| > 0.001$$

$$D_2 = \lambda mg / 4 \quad (15)$$

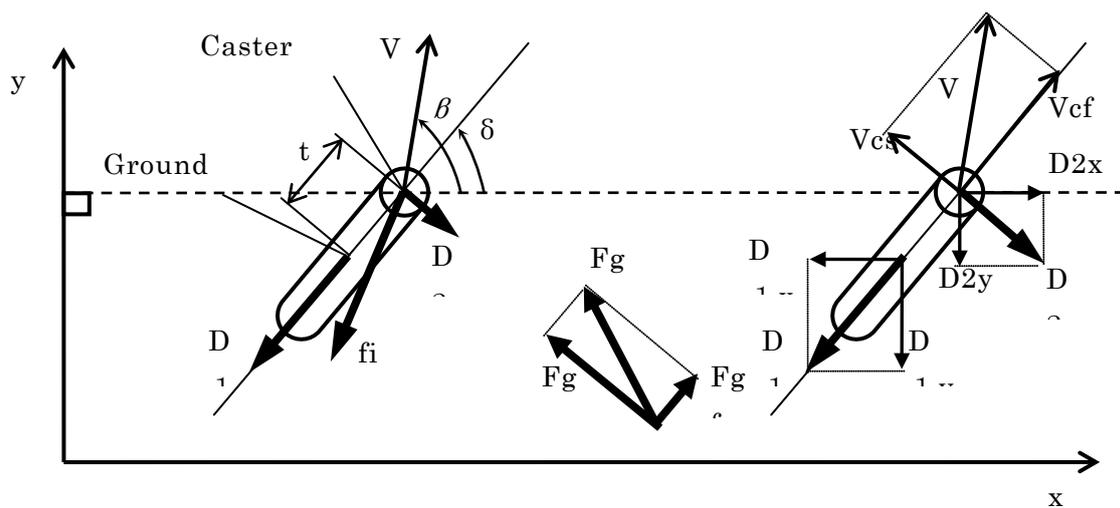


図6 キャスタモデル

<記号>

- V_c : キャスタ軸速度
- f_i : キャスタ軸から受ける力
- D_1 : 路面から受ける摩擦力
- D_2 : キャスタ軸にかかる回転抵抗
- β : キャスタ軸速度の角度
- δ : キャスタの首振り角
- t : キャスタトレール

4) モデルの妥当性の検討

シミュレーションに使用したパラメータを表4, 5に示す。静摩擦係数 μ_0 に関しては、前節で使用したキャストの値を用いた。また、 μ , λ_0 , λ に関しては正確な測定が困難だったため、シミュレーション上で実験結果に合う様同定した。

表4 ワゴン関係のパラメータ

Mass [kg]	6.9
Inertia moment [kg·m ²]	0.10
Trail [m]	0.28

表5 摩擦係数

	F-R	F-N
μ_0	0.0098	0.0064
μ	0.0090	0.006
λ_0	0.15	0.10
λ	0.15	0.10

前節までに提案したモデルの妥当性を検討するため、実験結果とシミュレーション結果の比較を行った。図7～9にF-Rキャスト、図10～12にF-Nキャストの結果を示す。図は上から振動台との相対変位、振動台との相対速度、絶対加速度を表している。シミュレーション結果は実線、実験結果は点線で示されている。なお、L-Rキャスト、L-Nキャストの結果に関しては、F-Rキャスト、F-Nキャストにおける0°の結果とほぼ同じであった。

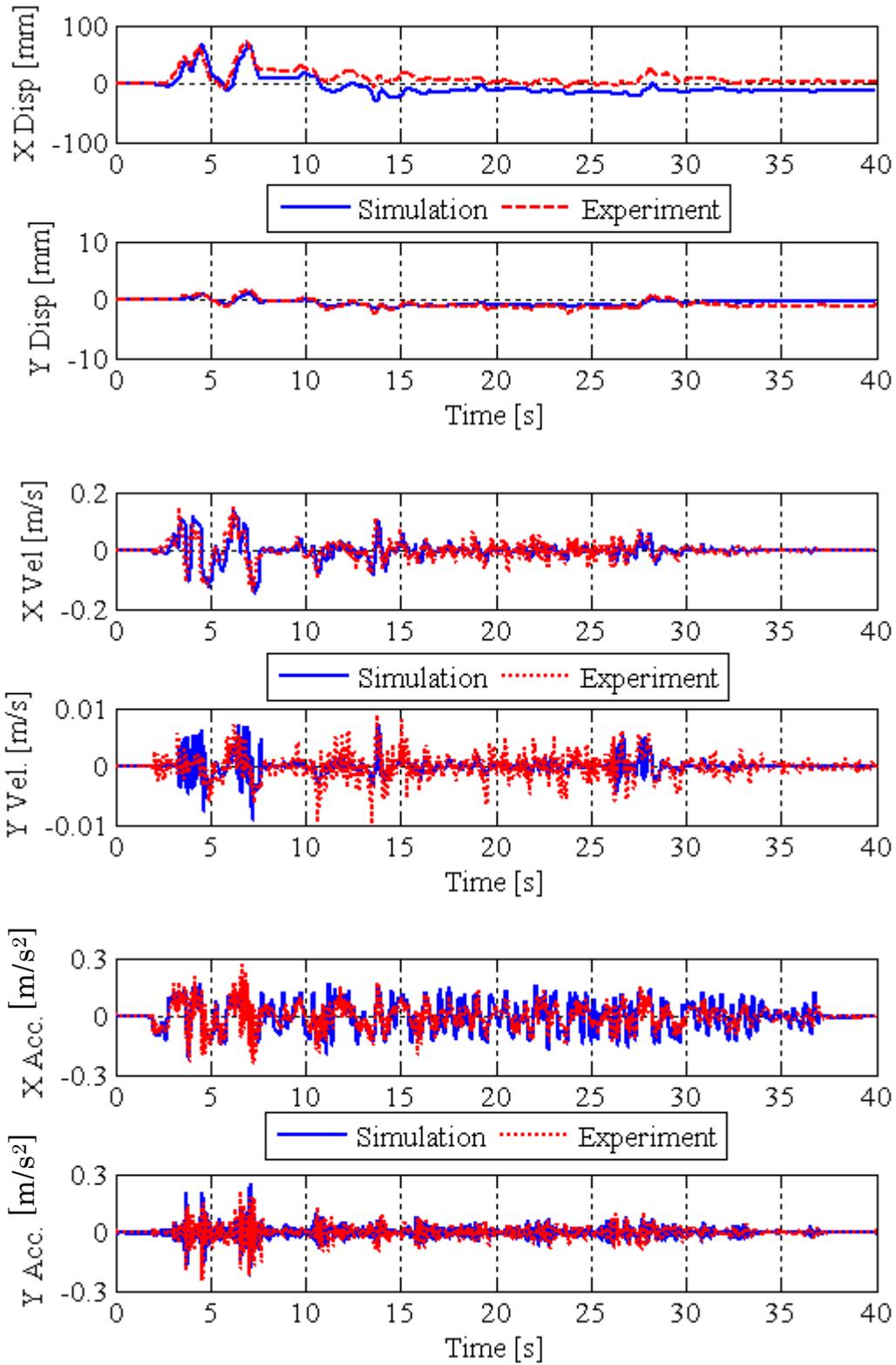


図7 F-R キャスタワゴンの応答（初期角度 0° ）

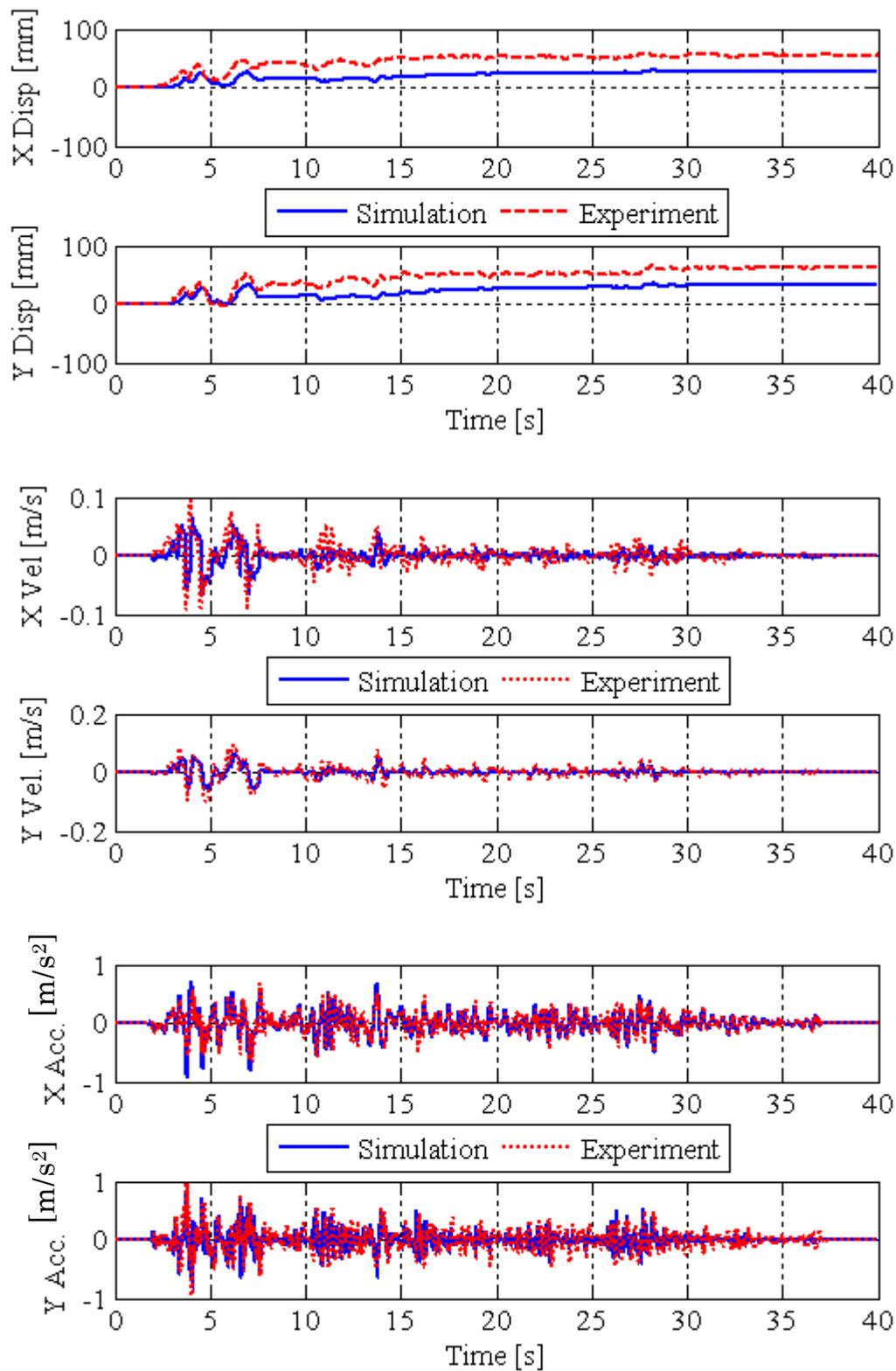


図8 F-R キャスタワゴンの応答(初期角度 45°)

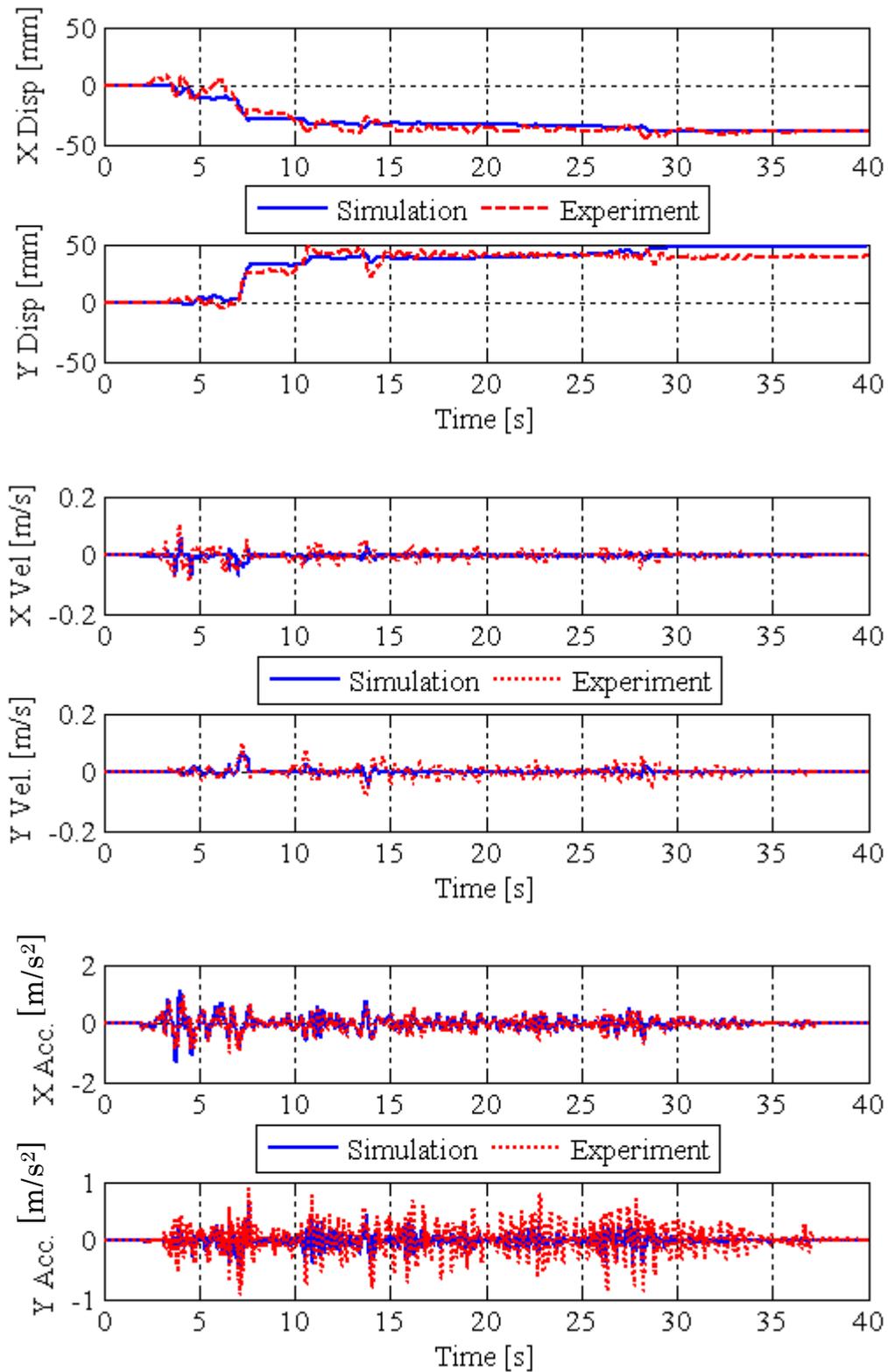


図9 F-R キャスタワゴンの応答（初期角度 90°）

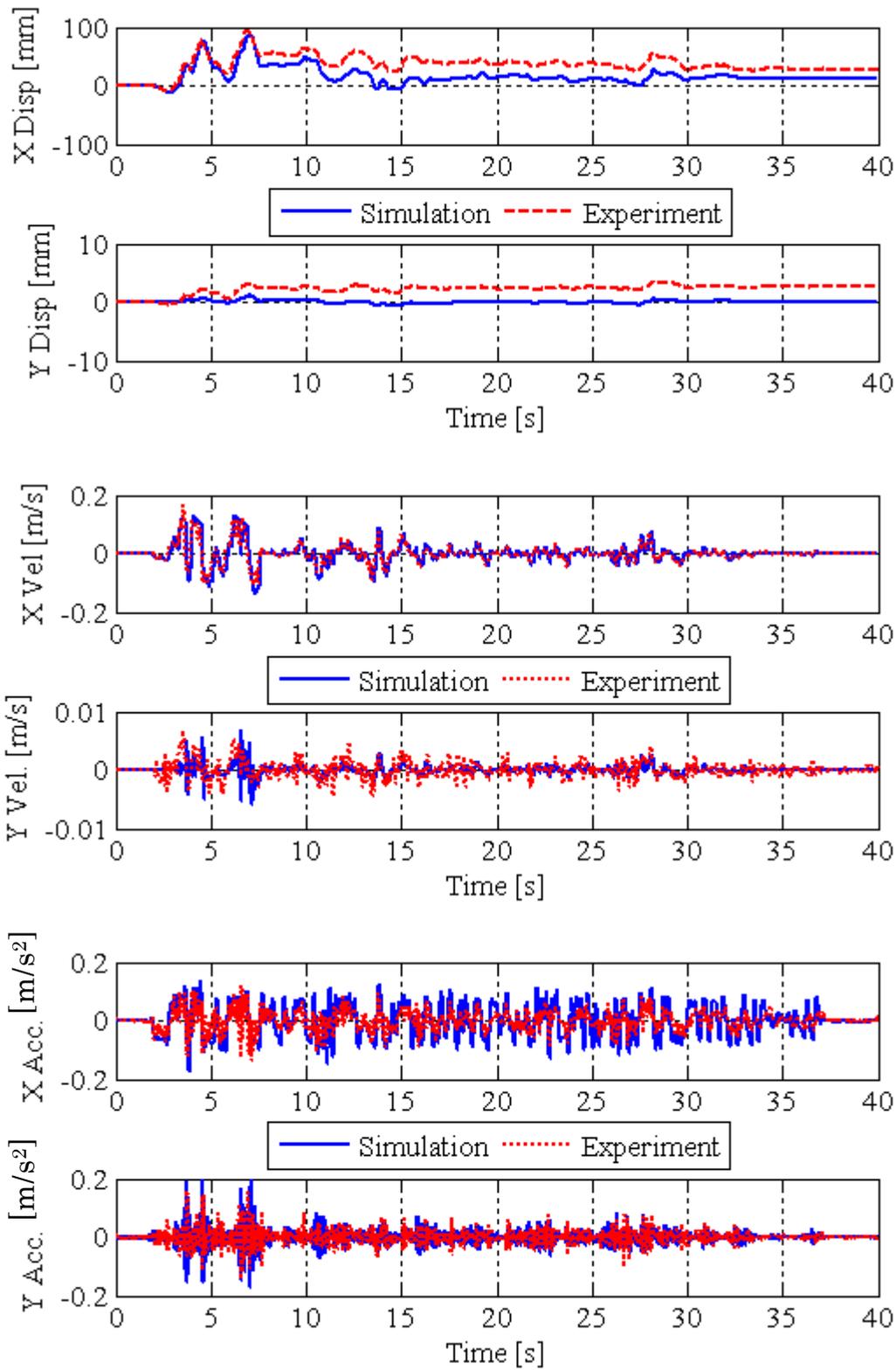


図 10 F-N キャスタワゴンの応答 (初期角度 0°)

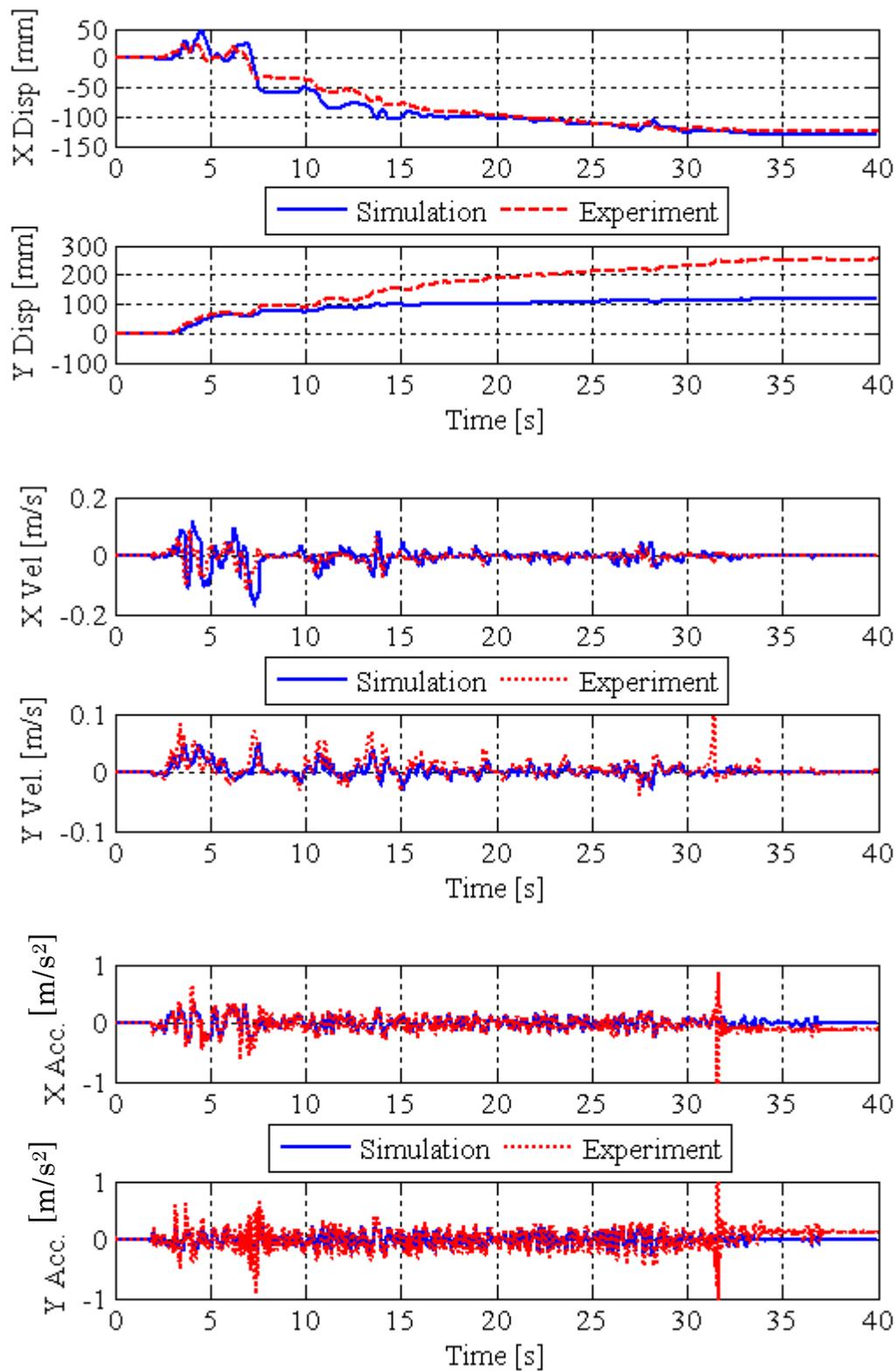


図 1 1 F-N キャスタワゴンの応答 (初期角度 45°)

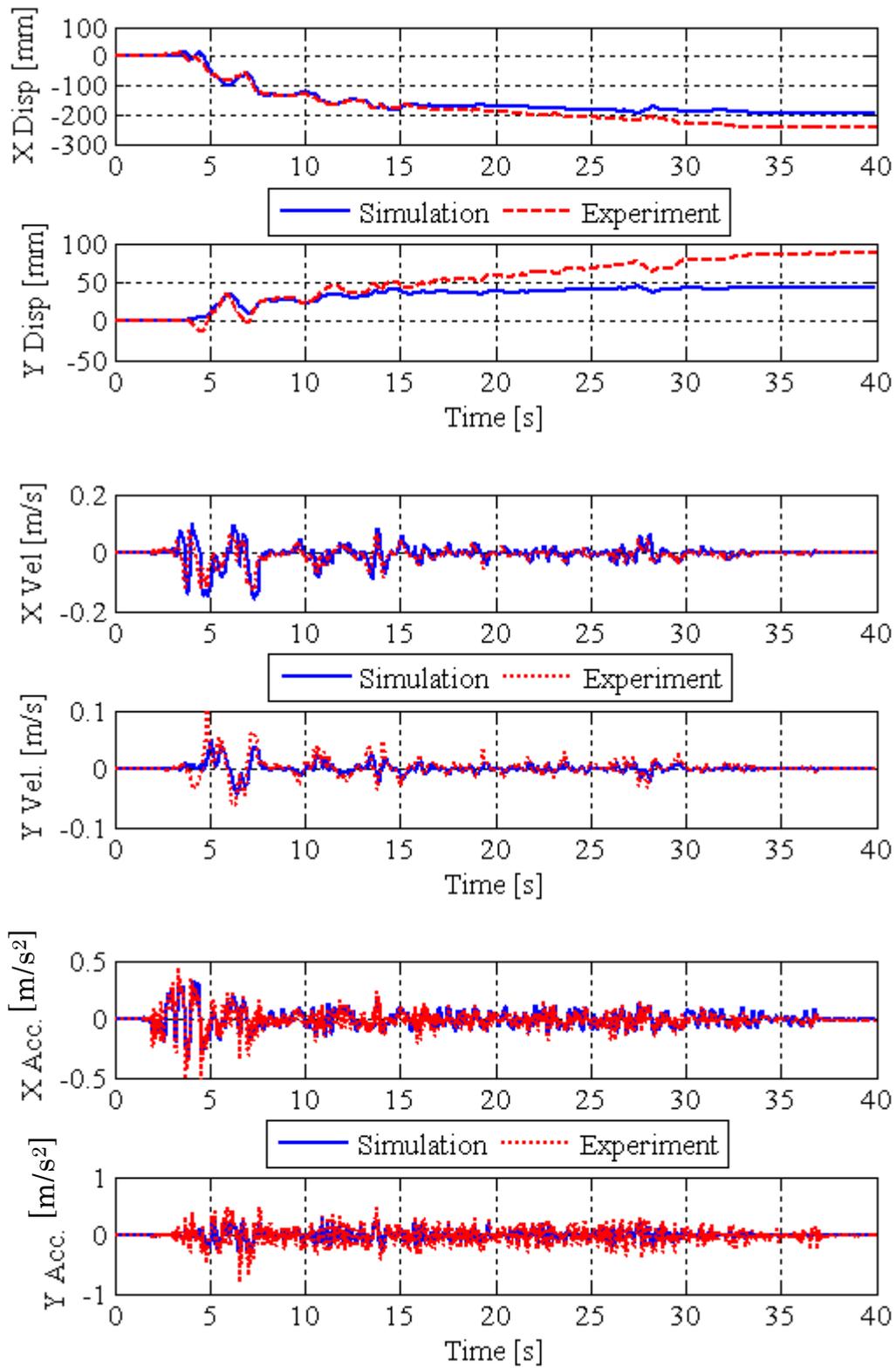


図 1 2 F-N キャスタワゴンの応答 (初期角度 90°)

a) 変位

変位の実験結果はモーションキャプチャで計測したものであり、20mm程度の計測誤差が存在する。そのため、F-R キャスタの変位のシミュレーション結果は、実験結果との差が最大で28mmとなったが、十分な精度で再現できているといえる。しかし、F-N キャスタの変位は45°で128mmの差が生じた。初期角度がある場合は、首振りが起こりやすくキャスタ軸の回転抵抗の値が影響してくると考えられる。そのため、今後更なるモデルの精度向上のためには、キャスタ軸の回転抵抗を精密に求めることが重要であるといえる。

b) 速度

速度に関してはモーションキャプチャで得た変位から微分して算出している。シミュレーション結果は実験結果によく追従しており、特に5秒付近の強い加振の場合も再現できている。

c) 加速度

加速度に関しては初期角度により再現性に差が見られる。0°、45°の場合はよく追従しているが、90°の場合はシミュレーション結果が実験結果より小さく算出されてしまった。変位、速度での誤差は少なく、ワゴンがほとんど移動していない停止時での加速度の誤差が大きくなっていることから、今後切換え条件と切換え時の過渡応答について詳細に検討する必要があると思われる。

以上より、このモデルによるシミュレーション結果は、実験結果をよく再現しており、地震時のワゴンの挙動を推定するのに有用であるといえる。

5) 実験の総括

モデル化の妥当性検討を主目的とした実験であったが、キャスタ機器の応答について注目すべき結果も得られたため、以下にその2点について考察する。

a) 摩擦係数の影響

表2に示したように、RキャスタとNキャスタではキャスタと路面との摩擦係数が約1.5違う。この差がワゴンの挙動に与える影響の比較を行った。変位に関しては、Rキャスタの方がNキャスタに比べて小さくなっており、静止摩擦係数が高くなると変位量が抑えられることがわかる。また、応答加速度に関しては、全体的にNキャスタの方が小さくなっており、摩擦係数が小さい方が応答加速度は小さくなっている。これにより、キャスター路面間の摩擦係数を小さくすることでキャスタの免震的な効果が増加する傾向があることがわかる。また、摩擦係数による変位の差は初期角度が90°の時が最も大きく、0°の時が最も小さかった。これらの傾向は、京都大学での単体実験におけるキャスタ付医療機器の挙動でもみられている。

b) 初期角度の影響

加振開始時のキャスタの加振方向に対する初期角度によって、加振開始直後の首振りのしやすさが変化している。90° が最も首振りがおこりやすく、0° が最もおこりにくい。本年度の実験では、キャスタ車輪を加振方向に対して 0° , 45° , 90° と配置し、エルセントロ NS 波で加振しているが、F-R キャスタ、F-N キャスタ共に 0° の時に変位が最小となっている。これは 0° の時は首振りが起こり難く、Y 方向への変位が発生しなかったためである。逆に 45° , 90° では Y 方向にも変位が発生したため、移動量が大きくなった。ただし、摩擦力の大きい F-R キャスタの 90° の時は、キャスタが首を振るだけでワゴン自体は大きく移動しなかった。応答加速度に関しては、F-R、F-N キャスタ共に 0° で最小となった。

ホワイトノイズ加振の場合でも、45°、90° で首振りが激しくおきたが、ワゴンの移動量は小さく、その他の傾向もエルセントロ波加振の場合と同様であった。加振直後の首振りによって挙動が大きく変化する場合もあるが、実地震では初期角度がいくつになるかの予想は不可能であるため、本年度作成したモデルを平均的なモデルと考えて今後の考察をすすめるのが妥当であると思われる。

(c) 結論ならびに今後の課題

医療機器にはキャスタ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タ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。本研究ではキャスタ機器の数値解析モデルを作成して、小型振動台を用いて行った実験結果と比較をし、その妥当性を確認した。

作成されたモデルは、来年度以降 3.1.7 で示す ER ブレーキの制御器設計に生かされる予定である。

(d) 引用文献

- 1) 鈴木曠二, 「路面傾斜の影響とキャスタの運動を組み込んだ車椅子のモデル」, 日本機械学会論文集, 68 巻, 675 号, (p. 207-p. 212), 2002-11

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

なし

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

本課題については課題終了のため計画はないが、本年度の成果は継続課題である新たな機能保持技術に関する研究において、カスタ機器の制御系設計に活かされる予定である。