

平成 13 年度

卒業論文

歩行支援機における吊り上げ装置の制御実験

(仮想コンプライアンス制御を適用した場合)

指導教員

井上 喜雄 教授

甲斐 義弘 助手

高知工科大学 知能機械システム工学科

1020108 久壽米木 真也

# 目次

1.緒言	1
2.実験装置	2
2.1 歩行支援機	2
2.2 駆動装置	3
2.3 吊り上げ装置	3
2.4 制御装置	5
2.5 非常停止ボタン	5
3.予備実験	6
3.1 ウインチモータ速度検定	6
3.1.1 目的	6
3.1.2 検定結果	6
3.2 ロードセルによる荷重検定	8
3.2.1 目的	8
3.2.2 検定結果	8
4.仮想コンプライアンス制御による吊り上げ装置の制御	9
4.1 目的	9
4.2 仮想コンプライアンス制御	9
4.3 シミュレーション	10
4.3.1 目的	10
4.3.2 結果	10
4.3.3 考察	10
4.4 歩行支援機を使ったウインチ吊り上げ実験	11
4.4.1 目的	11
4.4.2 実験	11
4.4.3 実験結果および考察	12

5.仮想コンプライアンス制御の効果	13
5.1 目的	13
5.2 シミュレーション	13
5.3 結果および考察	14
6.結言	15
謝辞	15
付録	16

## 1 章 緒言

近年、国民全人口の 6 人に 1 人が 65 歳以上という状況になっており、2025 年には 4 人に 1 人、2050 年頃になると 3 人に 1 人になると言われている。その反面 2007 年から日本の人口は減り始め 2050 年には 1 億人を切ると予測されており超高齢少子社会をむかえる。高齢になると筋力が低下し歩くのが困難になり、歩く機会が減ってくる。そうすると筋力低下はますます進み、寝たきりになるのが早まってしまう。またパーキンソン症候群などの病気によって歩行障害を起こして歩行が困難になってしまった人もいる。どちらにも歩行リハビリテーションが必要になってくる。しかし少子化の影響でそれを介護する側の人間がこれからさらに少なくなっていく、歩行リハビリテーションを必要としている人に対して、介護者の人数が足りなくなり、十分に訓練を行えず寝たきりが増えていくということになる。高齢者や歩行障害者に対して質の高い介護を行うには、介護者の人数を増やすか、介護における単純な作業や雑用の機器を開発し、小人数で質の高い介護を行うということが考えられる。医療分野に使われる機械は直接介護者や患者に接触するので高い安全性が求められる。また作業が一定でなく、変化に応じた対応ができなくてはならず、動作のやり直しがきかない。専門的な知識が無くても容易に誰でも扱えるということも重要である。現在市販されている歩行訓練装置には天井から介護者を吊り下げて行う装置とキャスターのついた歩行器などがある。前者は吊り下げているので転倒することは無いが、動く範囲、方向が固定されてしまうという問題がある。後者では、介護者が自分の肘で体重を支えるので周りで人が注意していなくてはならない。安全性は重要で、それは患者のやる気にもかかわって来るからである。1 度転倒したことでけがをしてしまうと次の転倒を恐れるようになる。転倒などの危険な要素を取り除き、自己的に訓練を行えることが重要である。これらを踏まえた上で、リハビリを行う人だけでも安全に訓練できる歩行支援機の開発が望まれる。現在、当研究室で開発中の歩行支援機には患者を吊り上げるための装置が取り付けられている。歩行支援機にウインチを取り付けた目的は、歩行訓練中の転倒防止のためである。歩行支援機を使用し歩行訓練を行っている時に、膝から崩れ落ちたりする場合がある。崩れ落ち防止のためにウインチによって患者を吊り下げるのだが、単に吊り下げるのではなくモータの制御によって患者へ負担がかからないように受け止める様にするため、ウインチモータを仮想コンプライアンス制御によって制御をする。本研究では C 言語を用いて仮想コンプライアンス制御を組み込み、そのシステムが理論通りに作動するかどうかの確認実験をおこなう。衝撃が緩和についてシミュレーションを行いこのシステムの有用性について検討する。

## 2章 実験装置

### 2.1 歩行支援機

図 2.1 に歩行支援機の概観を示す．歩行支援機には，駆動装置，制御装置，非常停止ボタン，吊り上げ装置，その他各種センサがあり，それぞれセンサの情報をもとに制御を行っている．また支援機自体にコンピュータを搭載しており，プログラムを実行することによって動力部に命令を送り制御し，そしてセンサからのデータをディスプレイに表示することができる．バッテリーを積んでおり外部からの電源供給なしに動かすことができる．

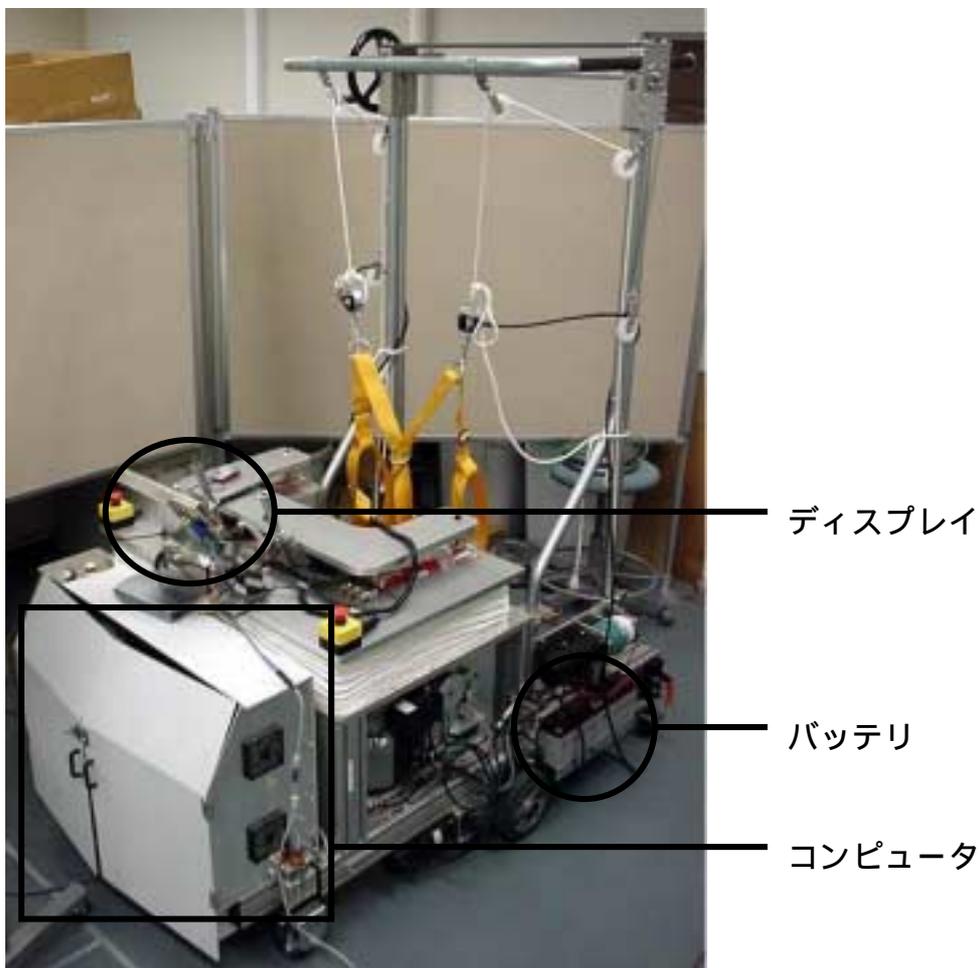
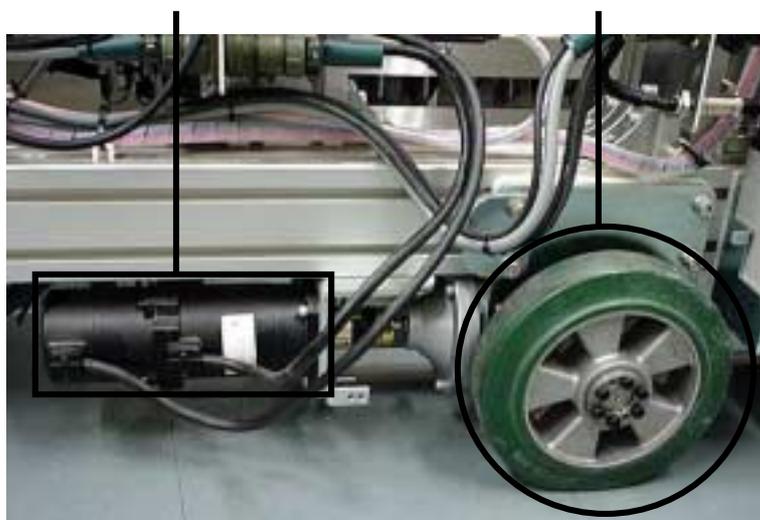


図 2.1 歩行支援機

## 2.2 駆動装置

図2.2にこの歩行支援機の駆動装置の概観を示す。ACサーボモータは株式会社ワコー技研製のANR020(B)を使用した。(付録表 2.1参照) これを駆動部の左右に1個ずつ使用した。そうすることにより左右それぞれ独立して制御を行うことができる。駆動装置には1:30の減速器がついている。そしてモータの動力は、駆動装置は車輪にウインチには巻き上げ部分に伝達される。



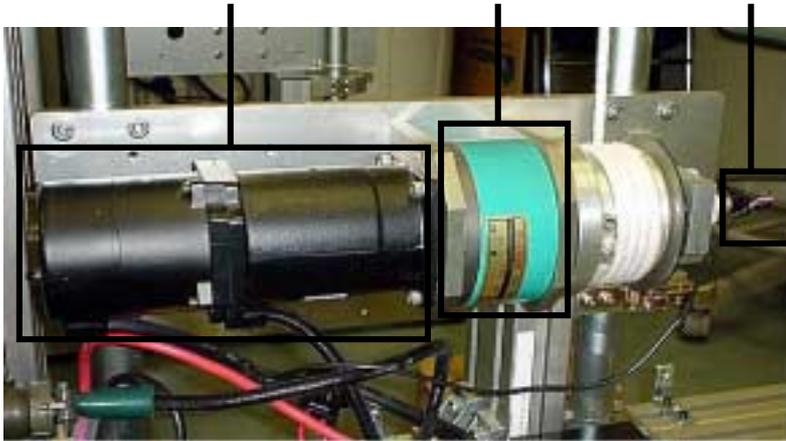
AC サーボモータ

駆動車輪

図 2.2 駆動装置

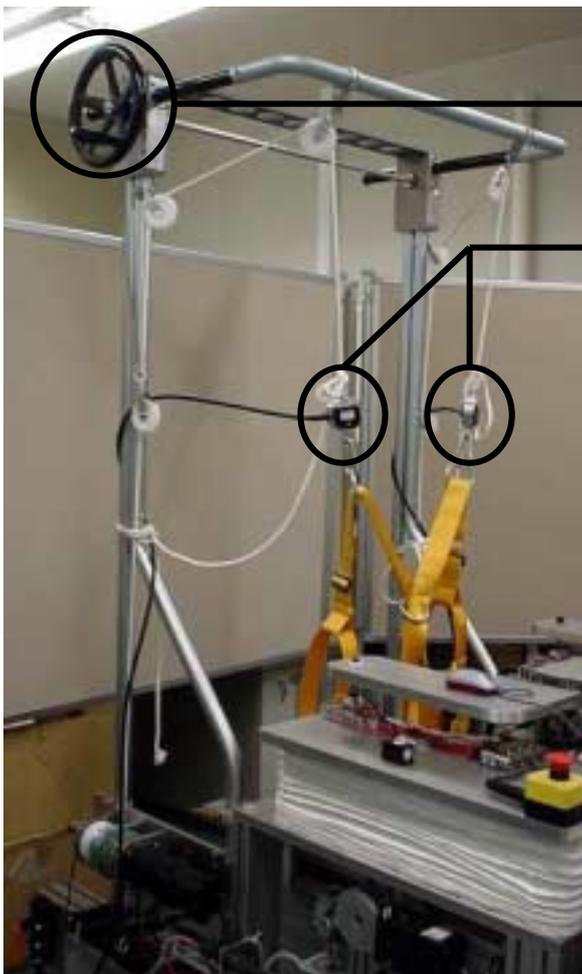
## 2.3 吊り上げ装置

図2.4に歩行支援機のウインチの外観を示し、図2.3にその巻き上げモータ部分の概観を示す。モータには駆動装置のところで説明した物と同じ物を使用している。モータの先には1:50の減速器をつけている。実際に巻き上げる部分の先にポテンシオメータをつけておりそれによってコンピュータにデータを送るようにしている。図 2.4を見てわかるように吊り上げの位置をハンドルによって前後に動くようになっており患者の体の位置を調整できるようになっている。患者を吊り上げるためのフックがついており、その上に吊り下げた過重を測定するロードセルがついていてこれによって患者の体重のかかり具合がわかる。



AC サーボモータ  
減速器  
ポテンシヨメ  
ータ

図 2.3 吊り上げ装置の動力部



ハンドル

ロードセル

図 2.4 吊り上げ装置

## 2.4 制御装置

ACサーボモータを制御するために、コンピュータからボードを通して株式会社ワコー技研製バッテリー対応、速度制御型ACサーボドライバABE Duo 460 (付録表 2.2参照)へと信号が伝達され、ここからモータの制御を行っている。

このドライバは1つで2軸分を内蔵しており、車輪駆動モータに1つウインチ駆動モータに1つ使用し、左右2つのモータを1つのドライバで制御している。

ドライバにより速度制御モードとトルク制御モードの切り換えができる。またドライバよりモータの回転をパルス信号によってコンピュータに送るようになっている。

## 2.5 非常停止ボタン

歩行支援機には、歩行訓練中にトラブルが起きた時のために非常停止ボタンを取り付けている。この非常停止ボタンはコンピュータへと信号を送り作動するのではなく、コンピュータに関係無く動力の電源をカットするようになっている。

## 3 章 予備実験

### 3.1 ウィンチモータ速度検定

#### 3.1.1 目的

ここでの目的は、仮想コンプライアンス制御を使った実験を行う際に速度の入力を行うので、正確に速度を出せるようにする。速度  $V$  [m/s] から 10 進数を求める式を導出し、速度入力によりモータが動くようにする。実際の速度をカウンタパルス数から求める式を導出する。この 2 つの式を使用し、入力した目標速度と実際の速度が一致するかを確かめる。

#### 3.1.2 検定結果

既知の数字

- ・ギヤ比(G) 1/50
- ・車輪直径(d) 81mm
- ・使用電圧(V) 10 ~ 0 ~ +10 V
- ・そのときの 10 進数 0 ~ 2048 ~ 4095
- ・回転数(rpm) 10V のとき 2000rpm
- ・エンコーダの分解能 軸 1 回転で 4096 パルスをカウントする
- ・割り込み間隔(t) 0.01 秒

式の導出

目標速度  $a$  [mm/s] を入力し、それに対する 10 進数  $D$  を計算する式を求める。

D より V を求める。

D と V の関係は使用電圧を 10 ~ +10V に設定した時 10V を 10 進数の 0 とおいて、0V を 2048、+10V を 4095 とおいているので D と V の式は、  
$$V = 20 / 4095 \times D \quad ( )$$

V より rpm を求める。

10V のとき 2000rpm なので、  
$$\text{rpm} = 200 \times V \quad ( )$$

( ) 式を ( ) 式に代入する。

$$\text{rpm} = 200 \times (20 / 4095 \times 10) \quad ( )$$

目標速度  $a[\text{mm/s}] = \quad \times d \times G \times \text{rpm} \times (1 \div 60)$  に ( ) 式を代入し  $D =$  の形にする .

$$D = \{60 \times 50 \times a / (3.14 \times 81 \times 200) + 10\} \times 4095 / 20 \cdots \cdots ( \quad )$$

式の導出

カウンタパルス数から , 実際の速度  $A[\text{mm/s}]$  を計算する式を求める .

$x$  パルスで軸が  $y$  回転するとおいて ,  $y =$  を求める .

$$y = x / 4096 \cdots \cdots ( \quad )$$

0.01 秒で  $y$  回転するとして 1 秒間の回転数  $z =$  を求める . ( $x$  パルスというのは 0.01 秒間に变化した値のことなので , ( ) 式の  $x$  を現パルス数  $x_1$  と旧パルス数  $x_2$  で表すと  $x = x_1 - x_2$  となる .)

$$z = 100 \times (x_1 - x_2) / 4096 \cdots \cdots ( \quad )$$

速度  $A[\text{mm/s}] = \quad \times d \times G \times z$  に ( ) 式を代入する .

$$A = 3.14 \times 81 \times 100 \times (x_1 - x_2) / (4096 \times 50) \cdots \cdots ( \quad )$$

この導き出した 2 つの式を使い歩行支援機のウインチモータ速度検定を行う .

入力数値  $v[\text{mm/s}]$  は 10~100mm/s まで 10 間隔でデータをとる .

付録の図 3.1 - 図 3.10 は入力数値と実際のモータの速度を比較したものである . 各図(a)のグラフは右の速度 , (b)のグラフは左の速度を表している .

## 3.2 ロードセルによる荷重検定

### 3.2.1 目的

ここでの目的は、仮想コンプライアンス制御を使った実験を行う際に荷重の入力を行うので、正確に荷重の値を出せるようにする。荷重をかけた時にロードセルから送られてくる 10 進数の値を記録しその結果より荷重と 10 進数の関係式を求め、ロードセルから送られるデータを kg に直す。ディスプレイの荷重表示、荷重計算の部分で kg の形で行えるようにする。

### 3.2.2 検定結果

荷重を 5kg ずつ増やしその時の左右の 10 進数の値を記録したものを表 3.1 に示す。

表 3.1 荷重をかけた時の 10 進数の値

荷重 [kg]	右	左
5	180	193
10	370	385
15	569	581
20	770	784
25	960	976
30	1152	1167
35	1350	1366
40	1552	1568
45	1754	1770
50	1962	1977

この値を SPSS を使用し回帰直線の式を求めた結果

右荷重=0.02546×(右 10 進数)+0.419……( )

左荷重=0.02535×(左 10 進数)+0.188……( )

( ) ( ) の式を導入して数値を表示させ荷重をかけたところ、誤差は ±0.1kg の範囲になったので、正確な荷重計算が行えていることが分かった。

## 4 章 仮想コンプライアンス制御による吊り上げ装置の制御

### 4.1 目的

歩行支援機を使って訓練中に膝から崩れ落ちた場合，ウインチによって使用者を受け止めるのだが，単に受け止めるのではなく，使用者に負担がかからないように受け止めるようにすることを目的としている．ここではコンプライアンス制御を使いウインチの制御をすることによってそれを行う．

### 4.2 仮想コンプライアンス制御

$M$  : 仮想質量 [kg]

$K$  : 仮想バネ係数 [N / m]

$C$  : 仮想粘性係数 [Ns / m]

$x$  : 偏差 [m]

$Q$  : 外力 [kg]

仮想コンプライアンス制御とは，力を加えた時に，図 4.1 のようにあたかもそこにバネが入っている様に自動的に動作するという制御方法のことで，力センサからの数値を元に，望みの剛性，粘性，慣性を実現するように，速度目標を与える方式である．

仮想コンプライアンス制御の式を変形させる．

基本式

$$Q = M \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx \dots\dots ( )$$

( ) 式を変形して速度の式と，偏差の式をつくる．

$$M \frac{dv}{dt} = Q - C \frac{dx}{dt} - Kx \dots\dots ( )$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{v_n - v_{n-1}}{\Delta t} \dots\dots ( )$$

( ) 式に( ) 式を代入する

$$M \left( \frac{v_n - v_{n-1}}{\Delta t} \right) = Q - C v_{n-1} - Kx \dots\dots ( )$$

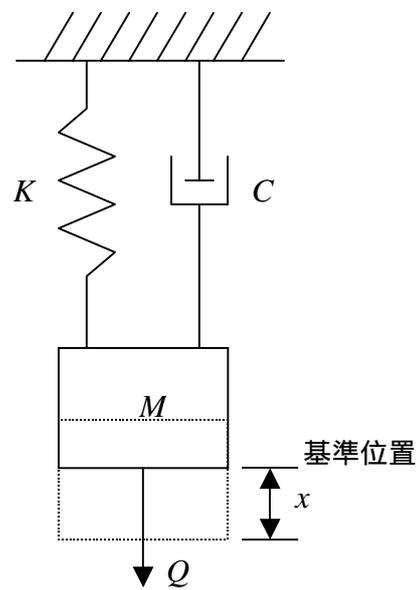


図 4.1

( )式を  $v_n =$  の形に直すと速度の式が求められる。

$$v_n = \frac{\Delta t}{M}(Q - Cv_{n-1} - Kx) + v_{n-1} \dots \dots ( )$$

( )は時間  $\Delta t$  内での変化なので、プログラムのループ 1 回を 0.01 秒と考えると、 $\Delta t = 0.01$  とおける。ループのたびに速度の値を出力することで時間ごとの値をだす。ポテンシオメータの値により変位をだす。

### 4.3 シミュレーション

#### 4.3.1 目的

$M, K, C, Q$  それぞれの値の変化によってどのように速度と変位が変化するかを調べる。

#### 4.3.2 結果

$M, K, C, Q$  の値による速度と変位の変化を知るために、基準になる値を決めておき、それを元に  $M, K, C, Q$  の値をそれぞれ比較する。 $M = 100$  [kg]  $K = 1000$  [N/m]  $C = 1000$  [Ns/m]  $Q = 10$  [kg] のグラフを基準に考える。 $M, K, C, Q$  の値をそれぞれ表のように変化させ、それをグラフ化し比較する。

表 4.1 シミュレーションのパラメータ

M [kg]	K [N/m]	C [Ns/m]	Q [kg]
300	100	100	20
500	300	300	30
1000	500	500	40
3000	3000	3000	50
5000	5000	5000	60

付録の図 3.3.1 図 3.3.4 は表 4.1 の数値を入れた時のシミュレーション結果を  $M, K, C, Q$  のそれぞれについて比較をした物である。

各図(a)のグラフは横軸に時間、縦軸に速度を表し、(b)のグラフは横軸に時間、縦軸に変位を表す。

#### 4.3.3 考察

シミュレーション結果より  $K$  と  $Q$  の値により変位のつりあう位置が決まり、 $M$  と  $C$  と  $Q$  の値が速度に影響を与えているということがわかった。

## 4.4 歩行支援機を使ったウインチ吊り上げ実験

### 4.4.1 目的

ここでは、歩行支援機を使い実験を行いシミュレーション結果との比較をし、モータによってコンプライアンス制御が行われているかを確認する。

### 4.4.2 実験

3章で出した数値を入力しウインチに荷重をかけてその時の速度と位置の変化をみる。実験は重りを吊り下げて行うものと、振動させて行うものの2つを行い、それぞれ仮想コンプライアンス制御が行われているかを実験結果とシミュレーションにより比較する。

実験1 片方のウインチを使い荷重をかけて実験を行う。

3章でのシミュレーション結果と実際の数値が合っているかを確認するため10kg、20kg、30kgの重りを吊り下げ実験してみた。重りを吊るした時に、10cm下がった位置でつりあうM、K、Cの値は、10kgの時を表4.2に20kgの時を表4.3に30kgの時を表4.4に示す。

表 4.2 10kgの荷重をかけた時のパラメータ

M [kg]	K [N/m]	C [Ns/m]
100	1000	1000
300		1500
500		

表 4.3 20kgの荷重をかけた時のパラメータ

M [kg]	K [N/m]	C [Ns/m]
100	2000	2000
500		3000
1000		

表 4.4 30kgの荷重をかけた時のパラメータ

M [kg]	K [N/m]	C [Ns/m]
100	3000	3000
500		5000
1000		

実験2 ここでは仮想コンプライアンス制御を行った状態で基準点から10cm下げた所までウインチを引っ張り手を離す．それによる実験の結果とシミュレーションを比較した．その時の M,K,C の値が表 4.5 である． $Q=0$  にするので基準点に収束する．

表 4.5 実験2のパラメータ

M [kg]	K [N/m]	C [Ns/m]
100	300	100
300		300
500	500	500

#### 4.4.3 実験結果および考察

実験1の結果を付録の図 4.6 - 図 4.23 に示す．

実験2の結果を付録の図 4.24 - 図 4.41 に示す．

各図(a)のグラフは横軸に時間，縦軸に速度を表し，(b)のグラフは横軸に時間，縦軸に変位を表す．

この実験結果より荷重をかけた時も，振動させた時もシミュレーションの数値とほぼ一致した．これよりウインチによって仮想コンプライアンス制御が行われている事がわかった．

## 5 章 仮想コンプライアンス制御の効果

### 5.1 目的

歩行支援機の吊り上げ装置に仮想コンプライアンス制御を使うことによる効果について、衝撃の緩和についてのシミュレーションを行い、その効果を見る。仮想コンプライアンス制御を行った場合とそうでない場合での比較を行う。

### 5.2 シミュレーション

ここでは図 5.1 のように上から速度を持った物体が落ちてきたと考えた時の衝撃について、2 自由度の式から Mathematica を用いて求める。

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2 (x_2 - x_1) = m_2 g$$

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_2 (x_1 - x_2) + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = 0$$

この 2 つの式より力[N]を求める計算を行う。

青の点線部分が仮想コンプライアンス制御の実行部分を表す。赤線は吊り下げる紐の部分で、紐の仮想バネ係数と仮想粘性係数を  $k_2$  と  $c_2$  とする。

を  $k_2$  と  $c_2$  とする。

$m_2 = 30$  [kg]  $k_2 = 60000$  [N/m]  $c_2 = 5000$  [Ns/m]  $v_2 = 1$  [m/s]をいれる。

仮想コンプライアンス制御を行わない場合は、 $m_1$   $k_1$   $c_1$  の値を大きくすることでその効果をなくすと考える。仮想コンプライアンス制御を行う場合は、 $m_1 = 300$  [kg]  $k_1 = 5000$  [N/m]  $c_1 = 3000$  [Ns/m]の値を使用する。

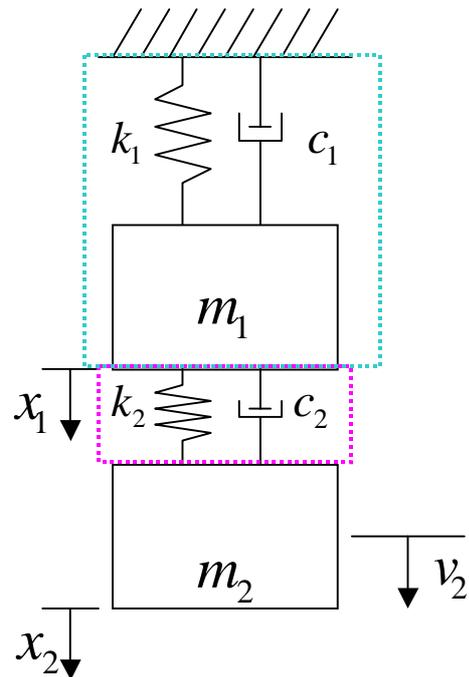


図 5.1

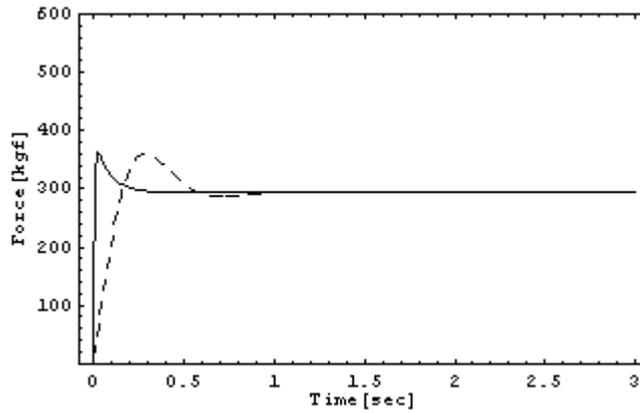


図 5.2 仮想コンプライアンス制御を行わない場合

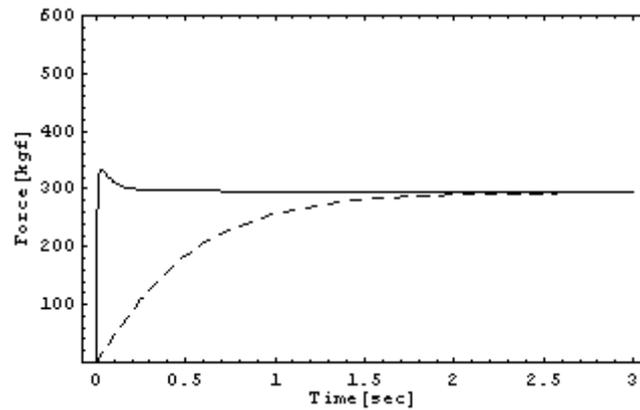


図 5.3 仮想コンプライアンス制御を行った場合

実線は吊り上げ側にかかる力で、破線は物体にかかる力を表している。

### 5.3 結果および考察

計算の結果，図 5.2 に仮想コンプライアンス制御を行わない場合，図 5.3 に仮想コンプライアンス制御を行った場合のグラフを表す。

この結果より，仮想コンプライアンス制御を行うことで衝撃の緩和が行えていることがわかる。

## 6章 結言

本研究では，歩行支援機の吊り上げ装置の制御実験ということで，仮想コンプライアンス制御を吊り上げ装置により行うことができるのかを，シミュレーションと実験をおこなった．

結果，シミュレーションの値と実際の結果がほぼ一致したので，正常に仮想コンプライアンス制御が行えていることがわかった．

仮想コンプライアンス制御によってどれだけ衝撃緩和されるかシミュレーションを行った結果，衝撃の緩和が行えることがわかった．これにより吊り上げ装置に仮想コンプライアンス制御を使うことの有用性がわかる．

### 謝辞

本研究を行うにあたりご指導してくださった，井上喜雄教授，甲斐義弘助手に深く感謝いたします．また本研究を行うに伴い，お手伝いいただいた田能寿考氏，知能機械力学研究室の皆様にもこの場を借りて御礼申し上げます．

# 付録

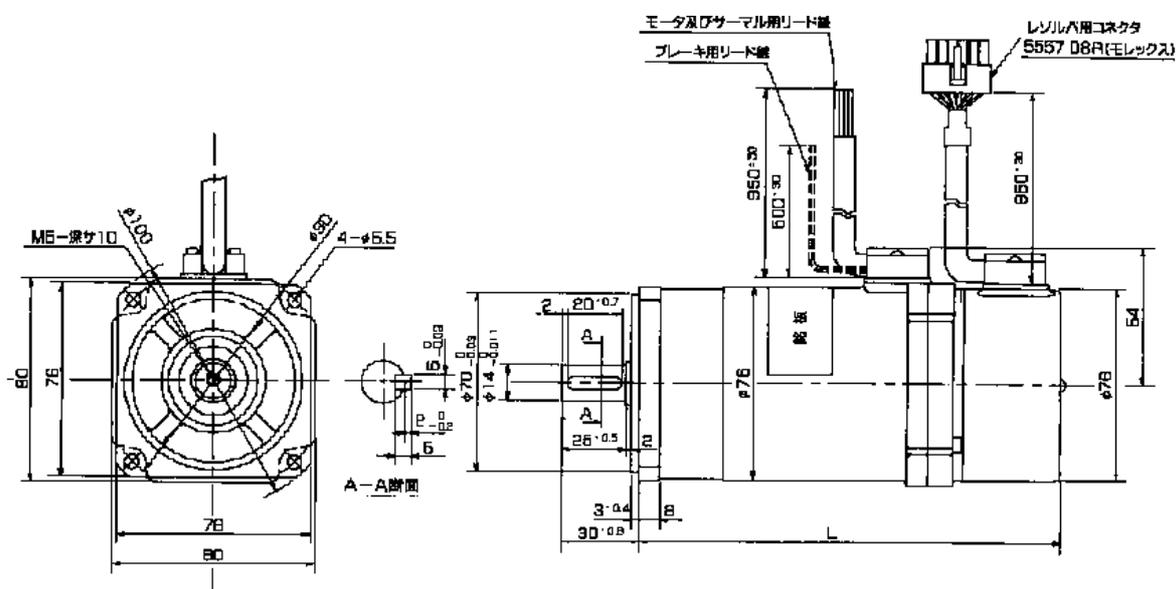


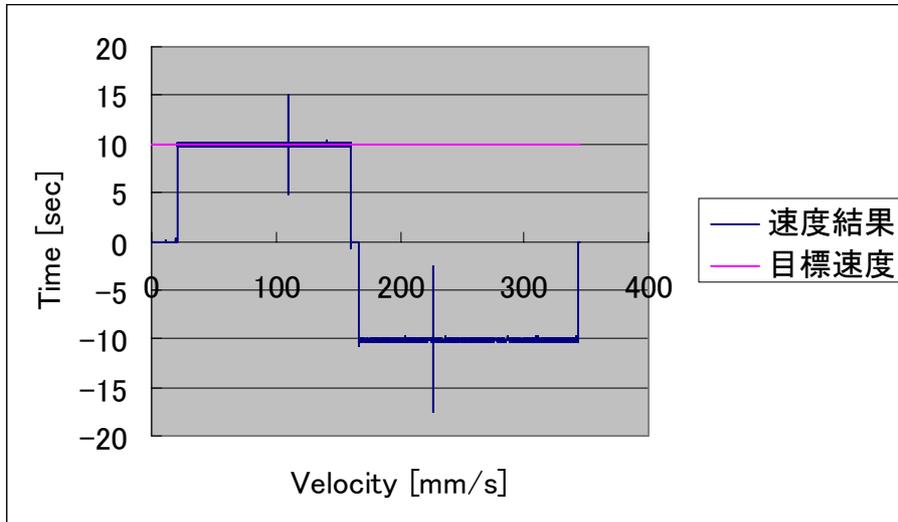
図 2.5 AC サーボモータ

表 2.1 AC サーボモータ仕様

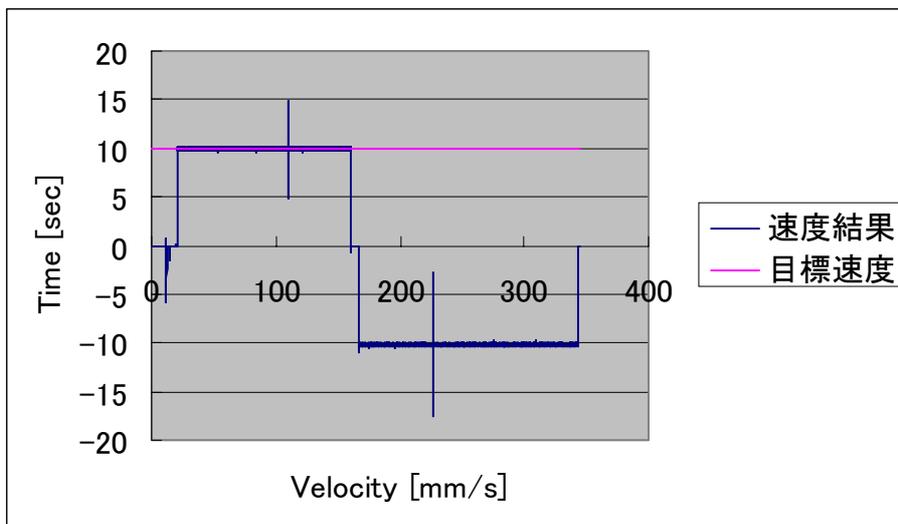
項目	仕様	
サーボモータ型式	ANR 020B	
使用バッテリー電圧	24V	
モータ部	定格出力	200W
	定格トルク	9.7kg $\cdot$ cm
	瞬時最大トルク	20kg $\cdot$ cm
	定格回転数	2000rpm
	最大回転数	2000rpm
	定格電流	14.5A
	定格電圧	16V
	瞬時最大電流	29A
	トルク定数	0.79kg $\cdot$ cm/A
	ロータイナーシャ	1.18g $\cdot$ cm $\cdot$ s <sup>2</sup>
	パワーレート	7.8kW/s
	概略重量	2.7kg
ブレーキ	定格電流, 電圧	DC24V, 0.42A
	静止摩擦トルク	4kg $\cdot$ cm
	ブレーキイナーシャ	0.015g $\cdot$ cm $\cdot$ s <sup>2</sup>
	概略重量	0.35kg

表 2.2 AC サーボドライバ仕様

項目		仕様
型式		ABE Duo-460
電源入力	主電源	DC20V~56V(DC24V, 48Vバッテリー対応)
	制御電源	DC20V~56V
定格相電流		22.1 Arms
瞬時最大電流		44.2 Arms
制御方式		パワーMOFETによる正弦波PMW制御
対応モータ, センサ		同期型三相モータ(標準8極, 正弦波着磁), ブラシレスレゾルパ1X
アナログ 入出力	速度指令入力	DC0~±10V, 入力インピーダンス10Kオーム以上, 速度設定 対応モータ定格回転数/10V±2%
	トルク指令入力(スレーブ入力)	DC0~±10V, 入力インピーダンス10Kオーム以上
	経路誤差指令入力(ステアリング入力)	DC0~±10V, 入力インピーダンス10Kオーム以上
	トルク指令出力(マスタ出力)	スレーブ軸に対するトルク指令が出力されます
制御 信号 入力	マスタスレーブ切替入力	入力コモン間を閉とすることでスレーブモード(トルクサーボ)となります
	正逆転切替入力	入力コモン間を閉とすることで回転方向, トルクの発生方向を反転できます
	サーボオン入力	入力コモン間を閉とすることでサーボオン状態となります
	リセット入力	入力コモン間を閉とすることでアラームリセット状態となります
	ブレーキ解除入力	入力コモン間を閉とすることでドライバの状態に関係無くブレーキ解除となります
	経路誤差オン入力	入力コモン間を閉とすることで経路誤差指令入力が有効となります
制御 信号 出力	エンコーダ信号出力	A, B, Z信号をオープンコレクタで出力します 出荷設定1024パルス/回転, Z信号はA信号に同期して1回転に1パルス出力
	レディ出力	モータ駆動状態にあるとき出力トランジスタがオンとなります(オープンコレクタ出力)
	エラー出力	保護機能が作動する事で出力トランジスタがオフとなります(オープンコレクタ出力)
	エラーコード出力	保護機能に対応するコードを3ビットで出力します(オープンコレクタ出力)
電源出力	+5V	外部論理回路用電源(+5V, 200mA max)
	±15V	外部アナログ回路用電源(+15V, 100mA max)
モニタLED		power, ready, error, error code(3ビット)
モニタ点検端子		電流制限モータ, 過速度判定値モニタ, 過負荷判定値モニタ
ユーザ調整機能	A, B軸別調整	速度調整, ゼロ調整, 速度ループゲイン調整
	A, B軸共通調整	電流調整, 経路補正ゲイン調整, 過速度判定値調整, 過負荷判定値調整
ユーザ設定機能		エンコーダ信号パルス密度設定, レゾルパ/モータ極数比, ケーブル長補正, 経路補正極性
保護機能		ステップアウト/過速度, 過負荷(電子サーマル), 過電流, 過熱(出力段), 過電圧
絶縁抵抗, 耐圧		50Mオーム以上, 1000VAC 1分間(電源-シャーシ間にて)
使用環境		0~45°C 85%Rh以下 熱対流のある雰囲気で使用します
付属品		端子台カバー, CN1用コネクタ(MR-34M, MR-34L:本多通信工業製), CN4, 5用コネクタ(5557-04R×2, 5556-PBT2L×8), 取扱説明書
重量		3.8Kg

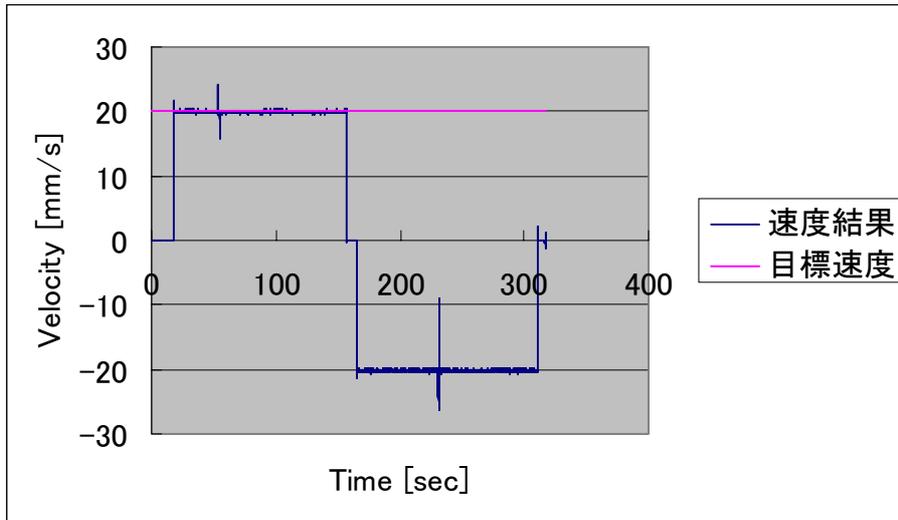


(a) 右速度

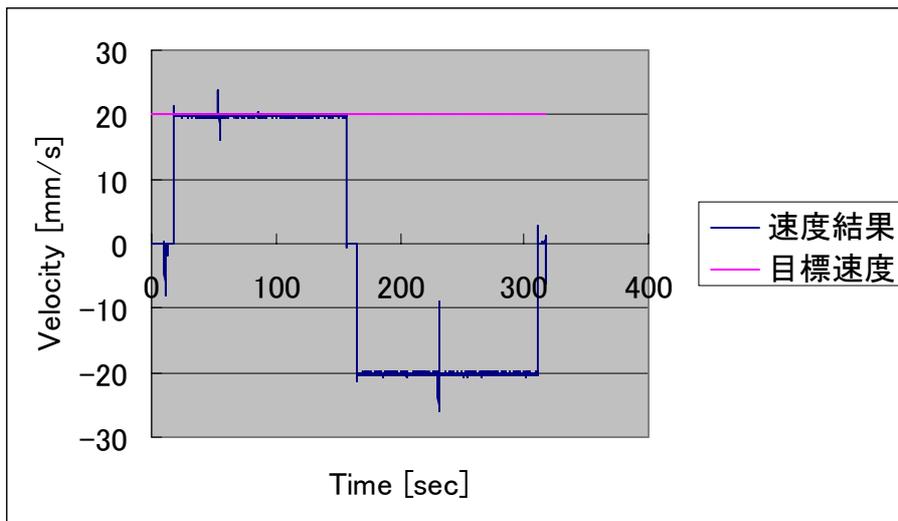


(b) 左速度

図 3.1 モータ速度検定 目標速度 10 [mm / s]

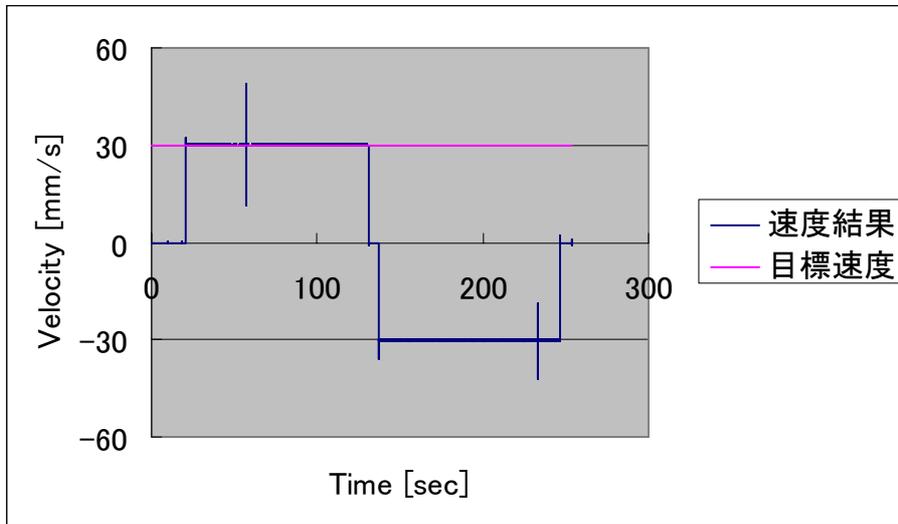


(a) 右速度

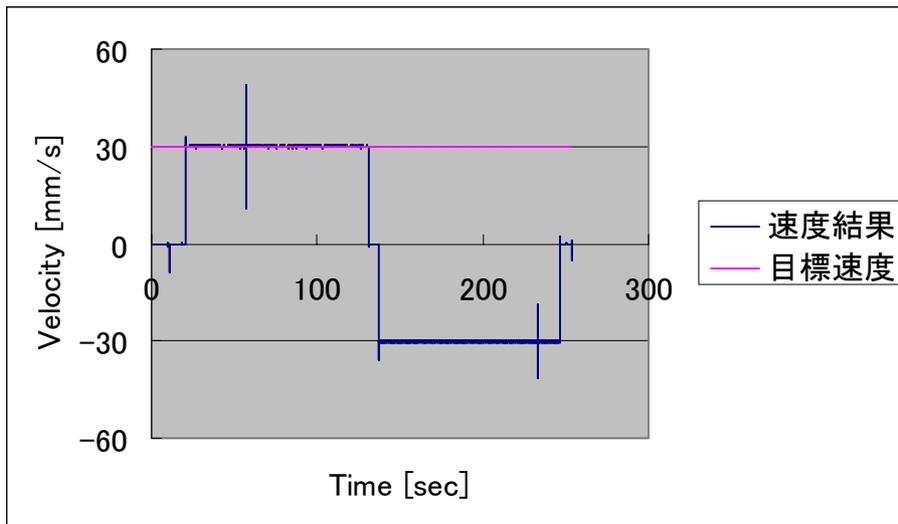


(b) 左速度

図 3.2 モータ速度検定 目標速度 20 [mm / s]

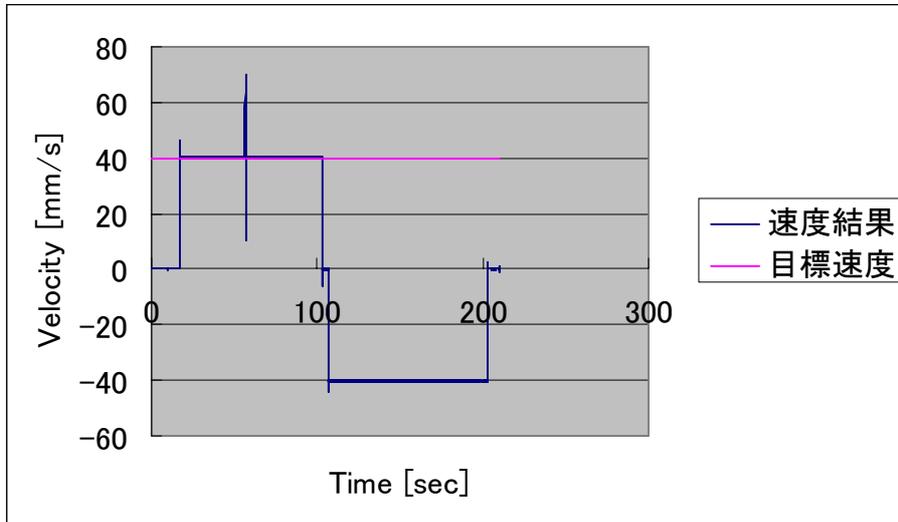


(a) 右速度

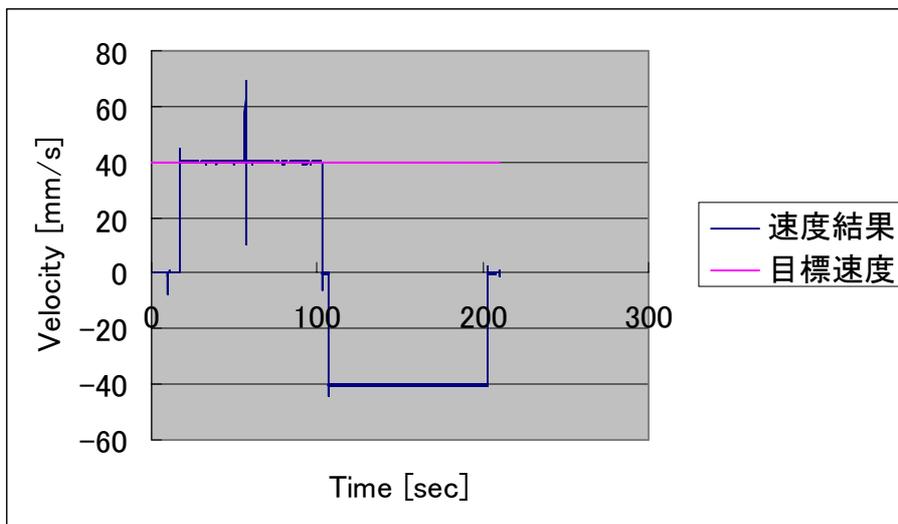


(b) 左速度

図 3.3 モータ速度検定 目標速度 30 [mm / s]

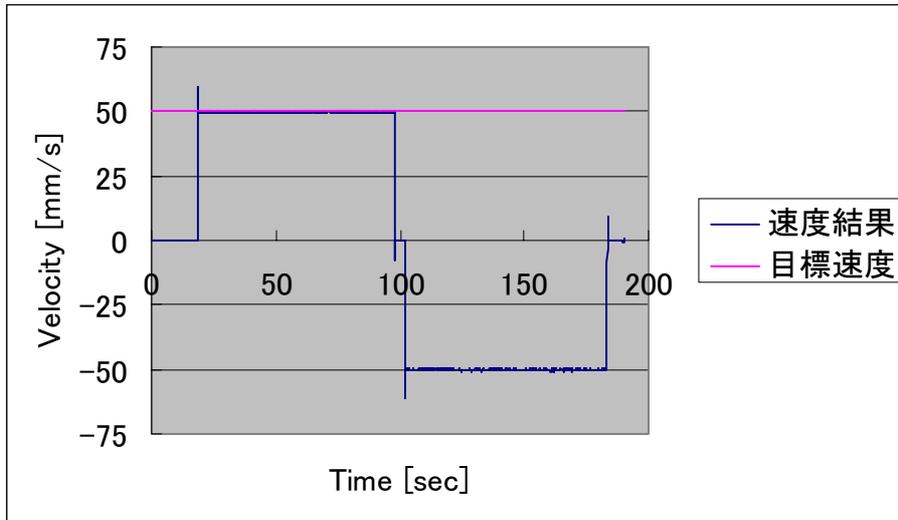


(a) 右速度

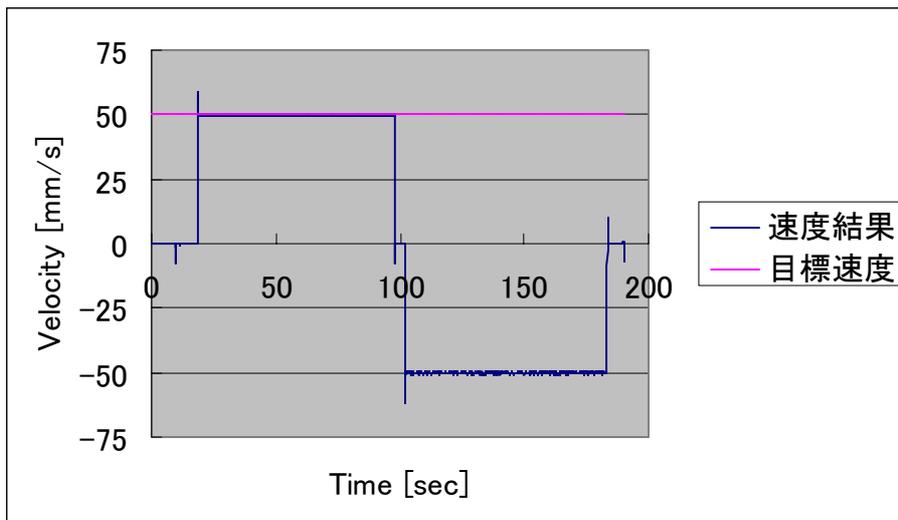


(b) 左速度

図 3.4 モータ速度検定 目標速度 40 [mm / s]

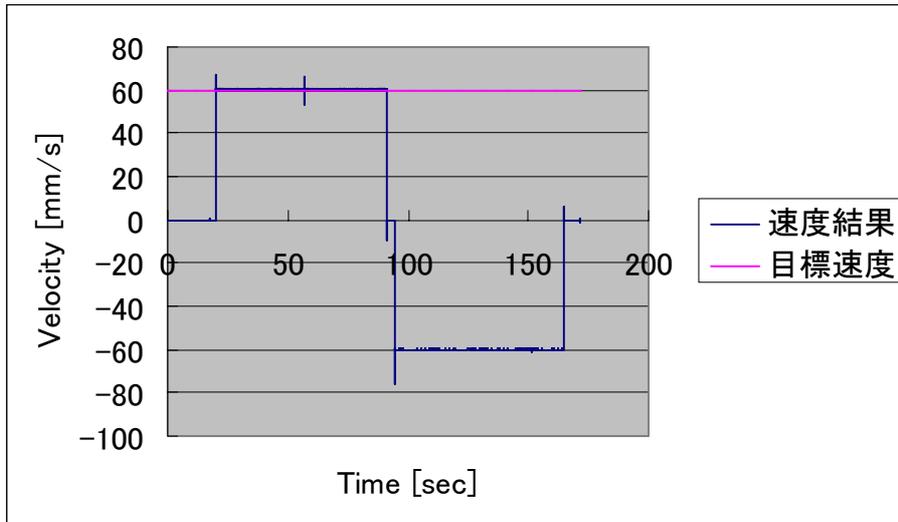


(a) 右速度

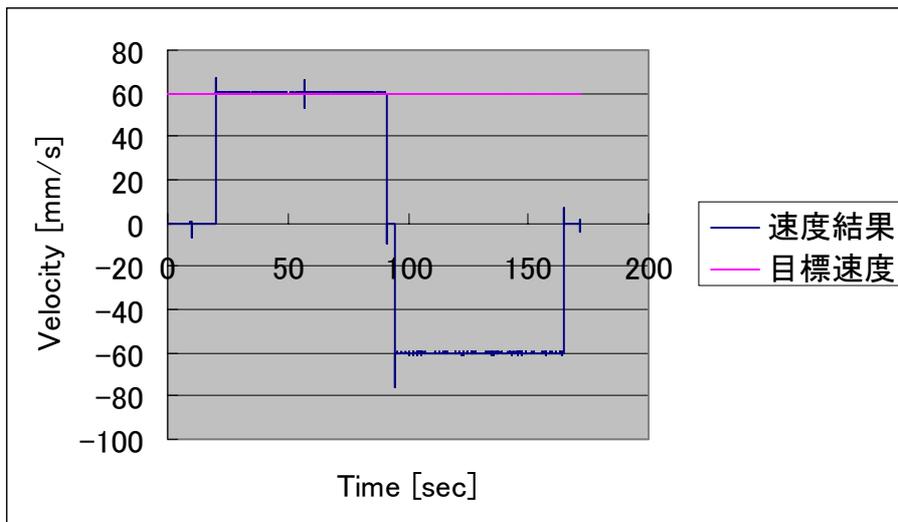


(b) 左速度

図 3.5 モータ速度検定 目標速度 50 [mm / s]

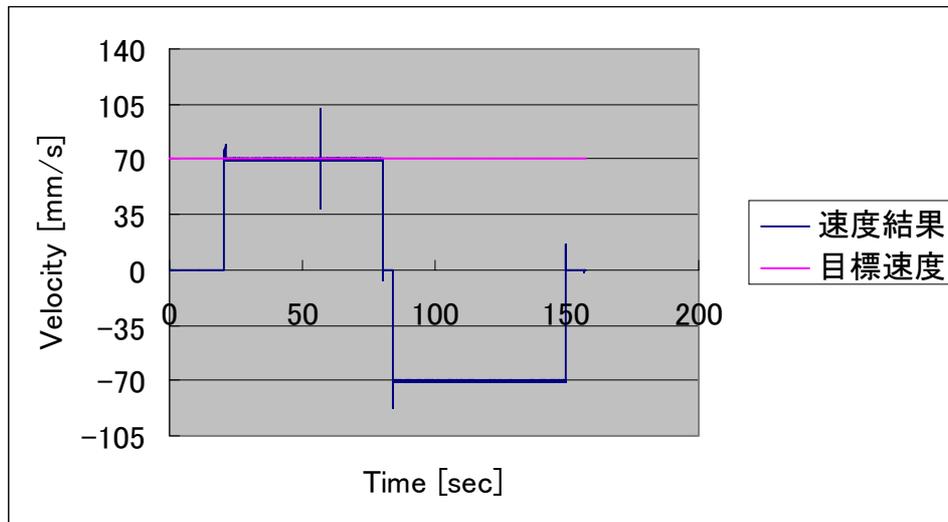


(a) 右速度

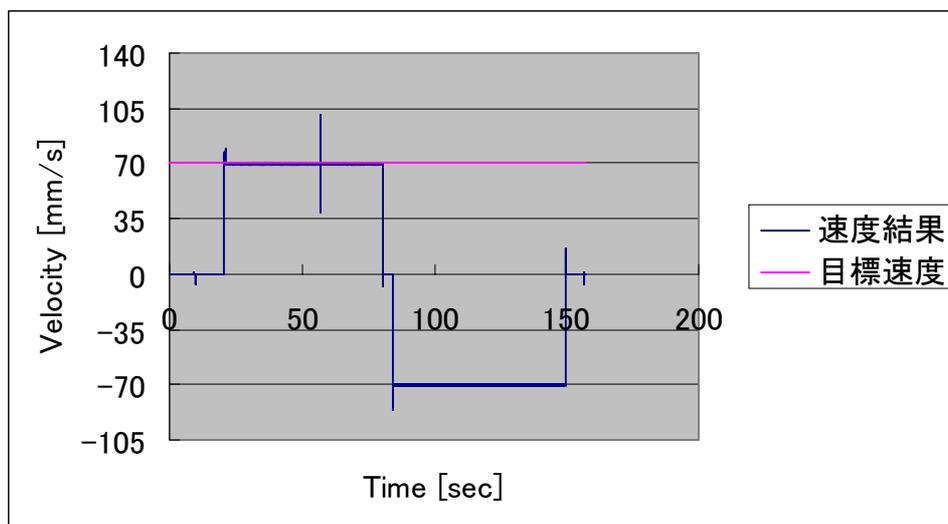


(b) 左速度

図 3.6 モータ速度検定 目標速度 60 [mm / s]

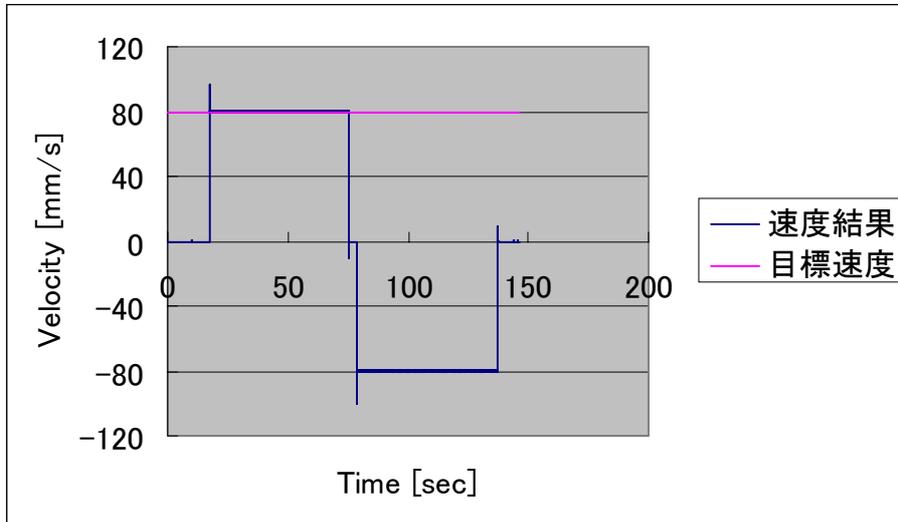


(a) 右速度

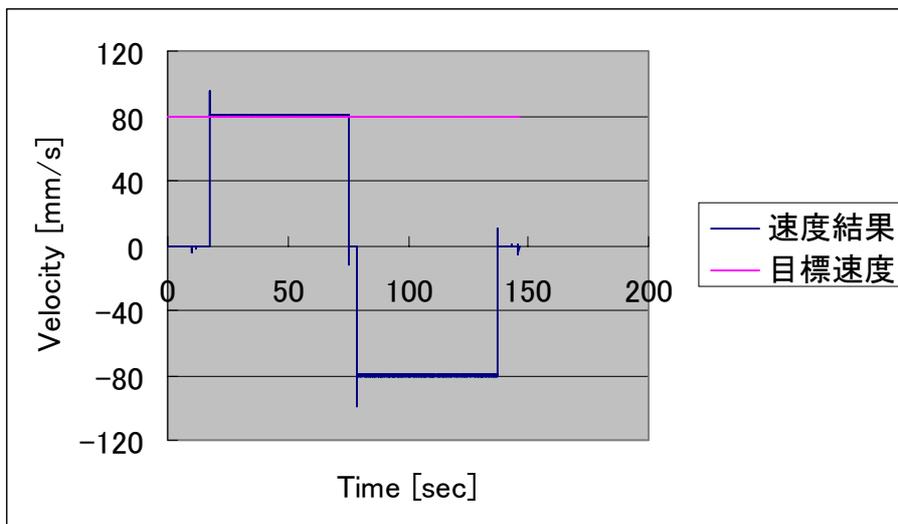


(b) 左速度

図 3.7 モータ速度検定 目標速度 70 [mm / s]

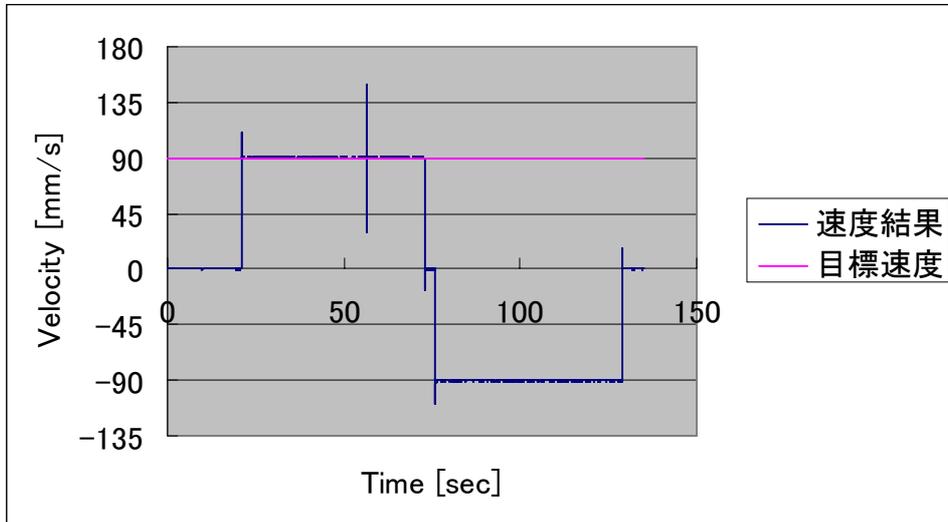


(a) 右速度

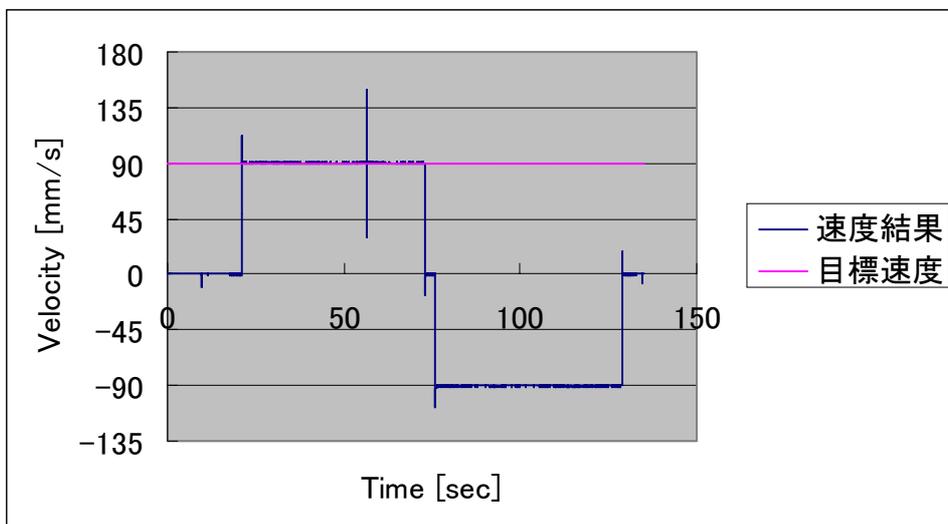


(b) 左速度

図 3.8 モータ速度検定 目標速度 80 [mm / s]

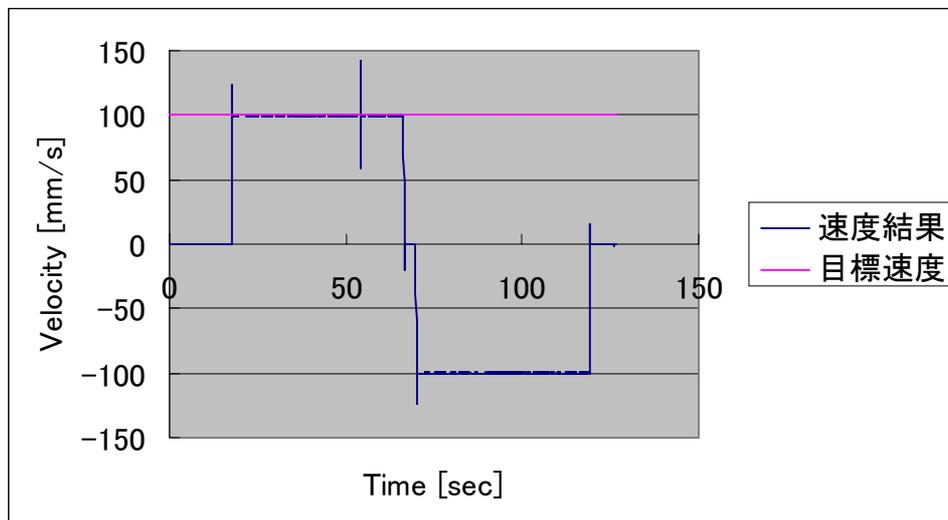


(a) 右速度

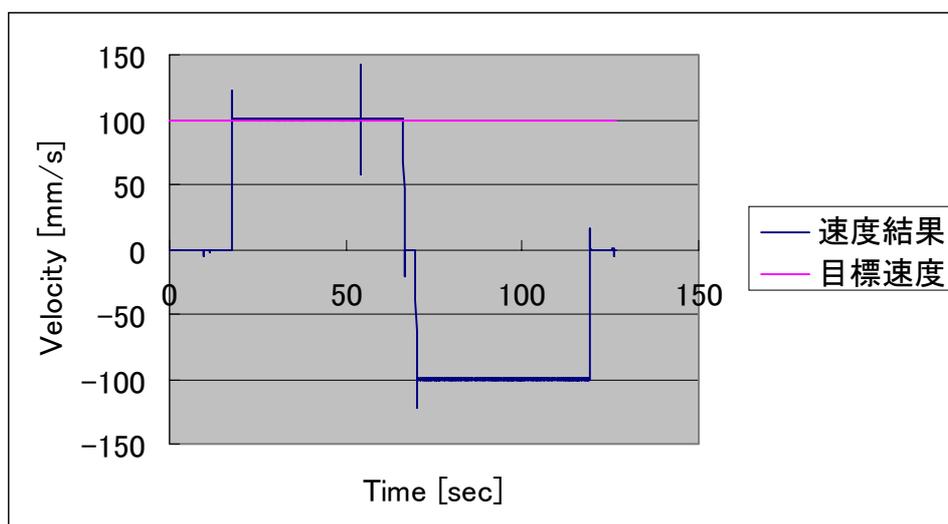


(b) 左速度

図 3.9 モータ速度検定 目標速度 90 [mm / s]

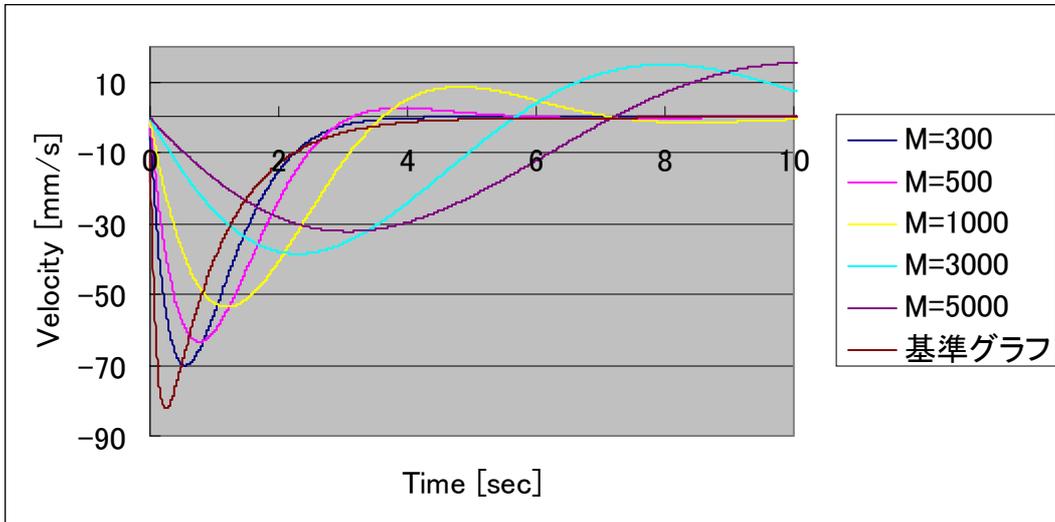


(a) 右速度

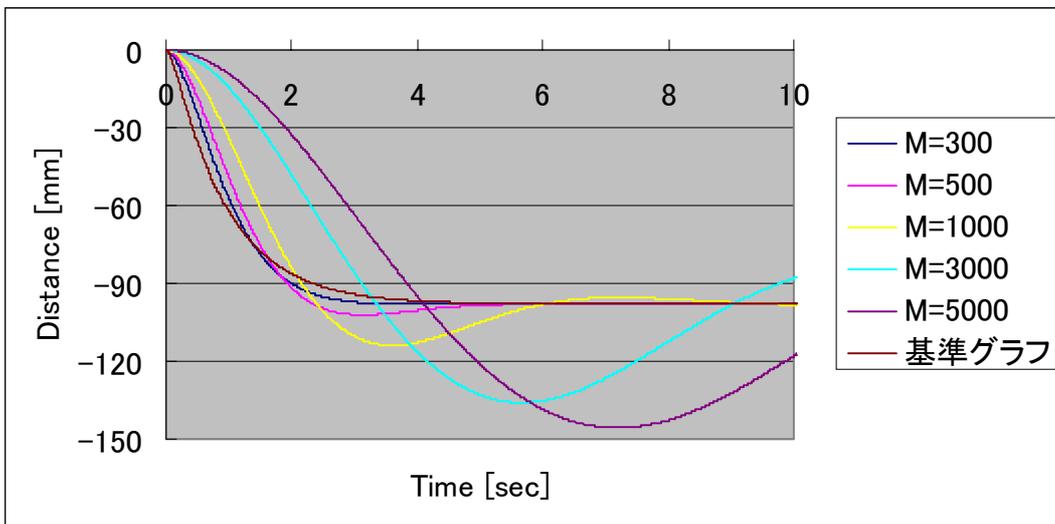


(b) 左速度

図 3.10 モータ速度検定 目標速度 100 [mm / s]

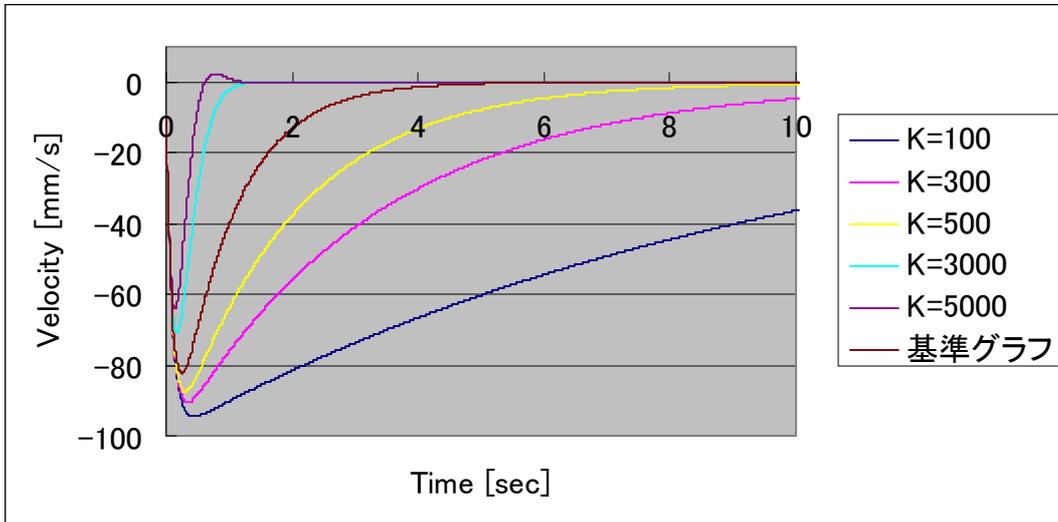


(a) 速度

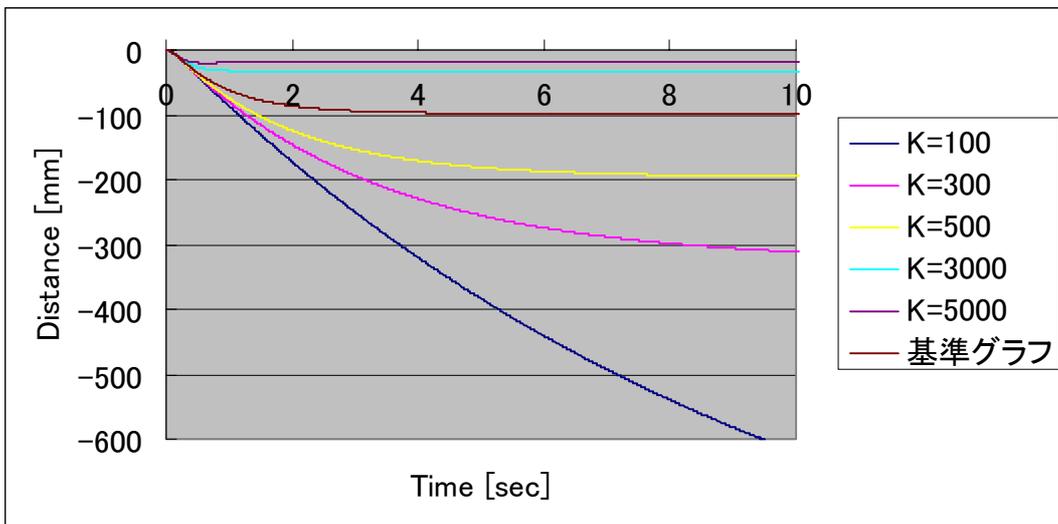


(b) 変位

図 4.2 シミュレーション結果 仮想質量  $M$  による比較

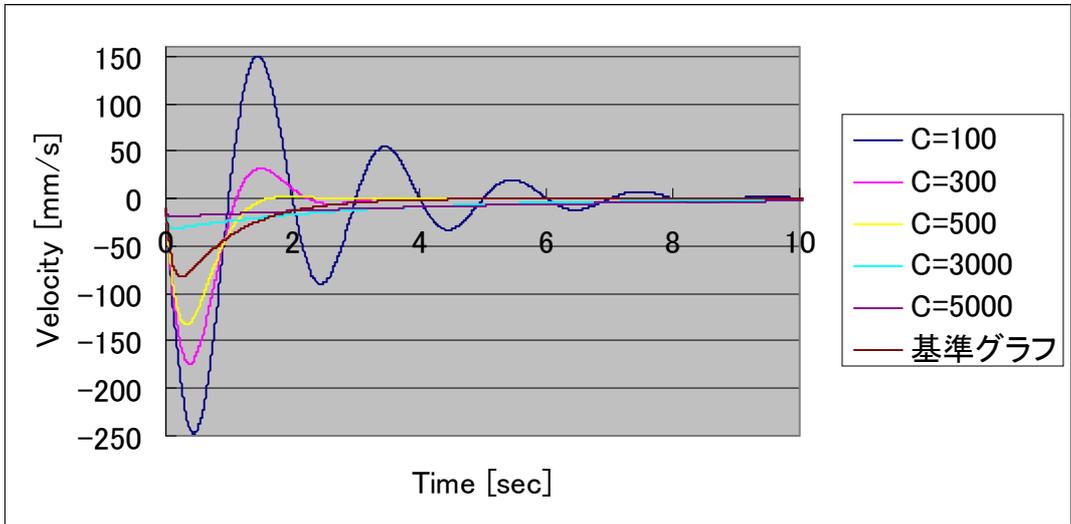


(a) 速度

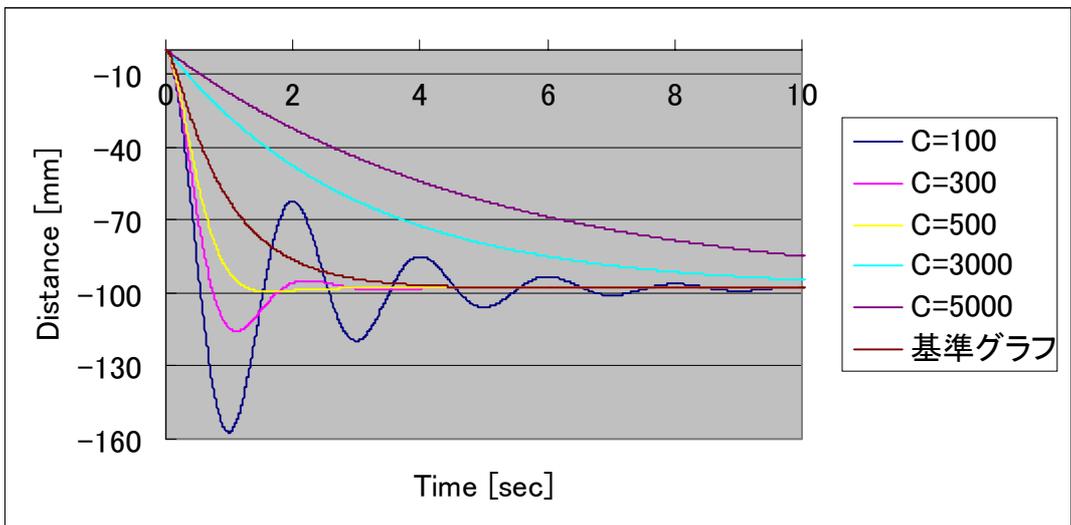


(b) 変位

図 4.3 シミュレーション結果 仮想バネ係数 K による比較

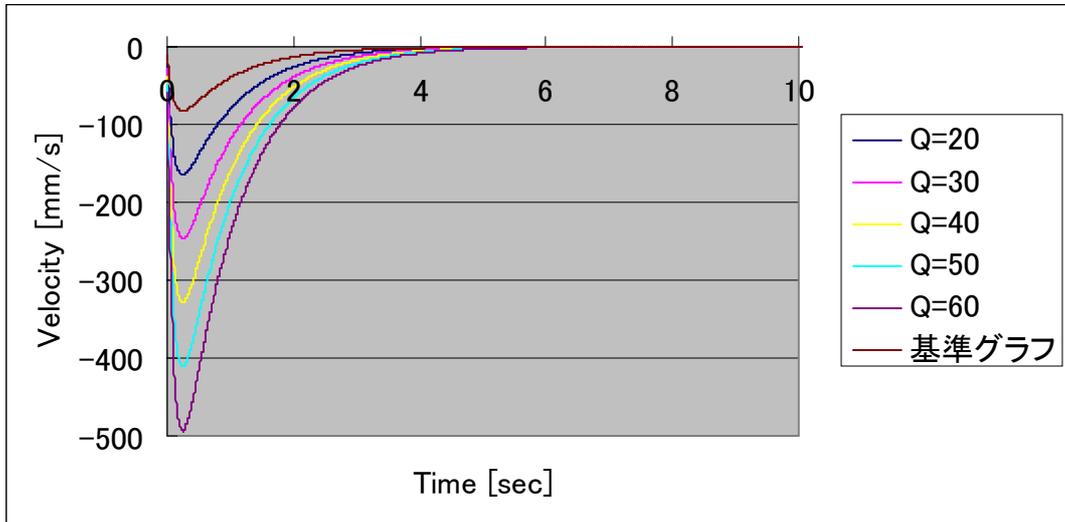


(a) 速度

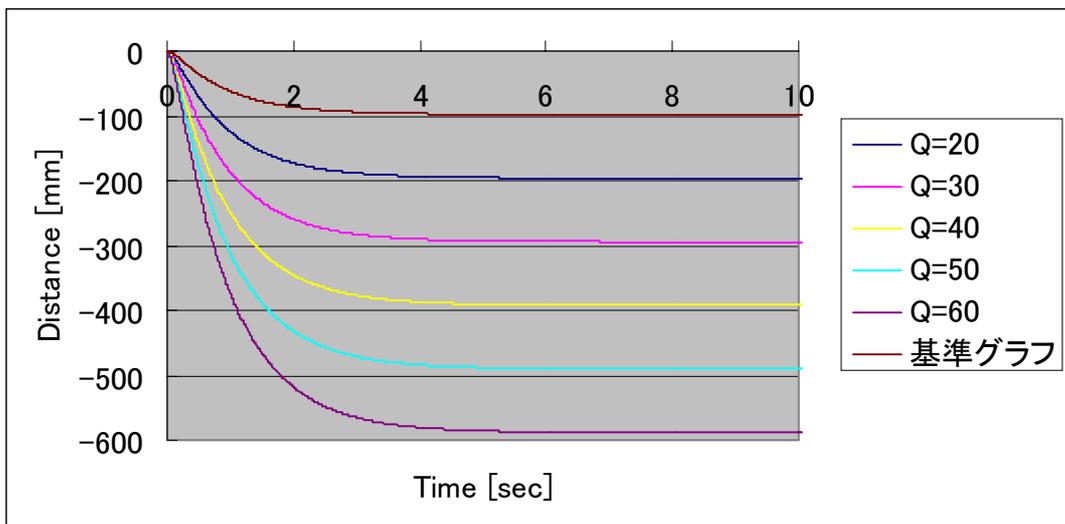


(b) 変位

図 4.4 シミュレーション結果 仮想粘性係数  $C$  による比較

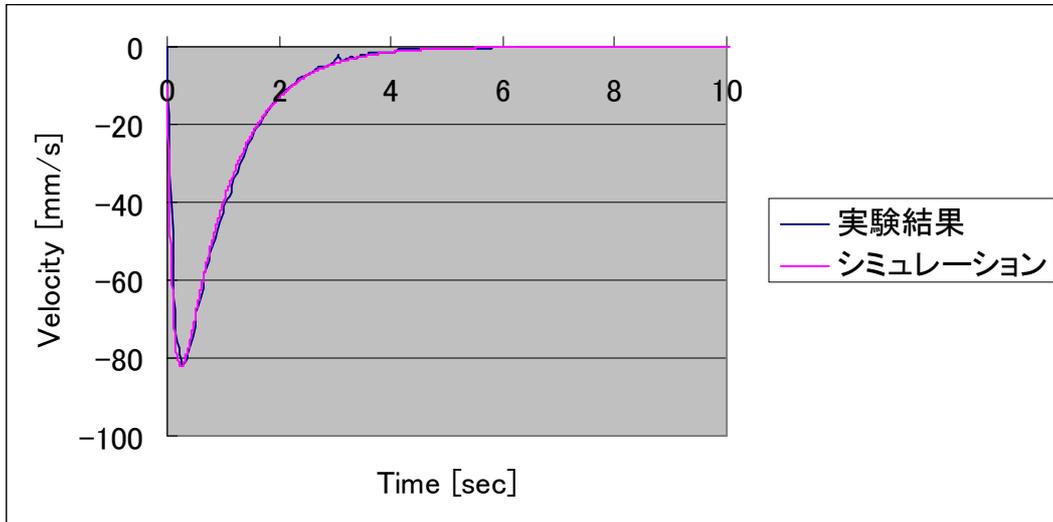


(a) 速度

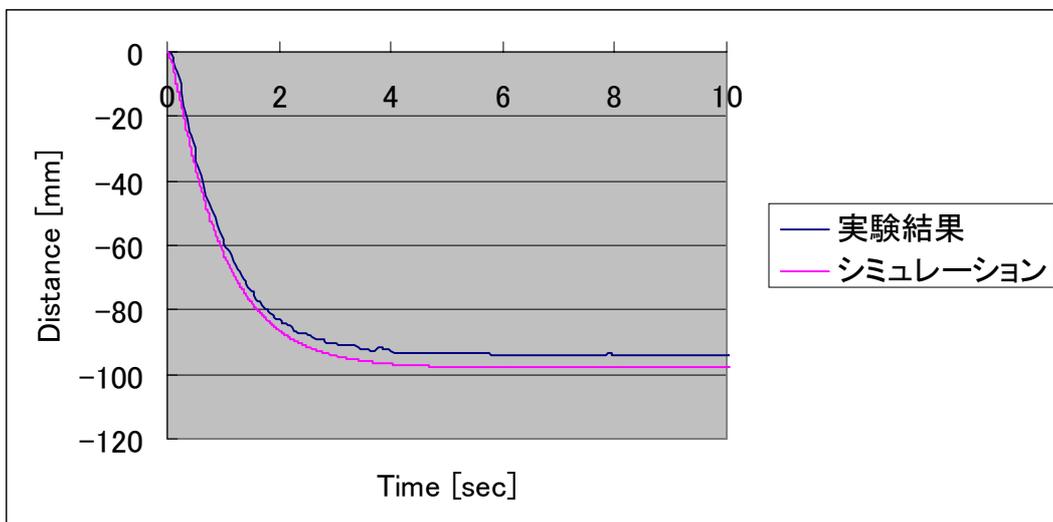


(b) 変位

図 4.5 シミュレーション結果 外力 Q による比較

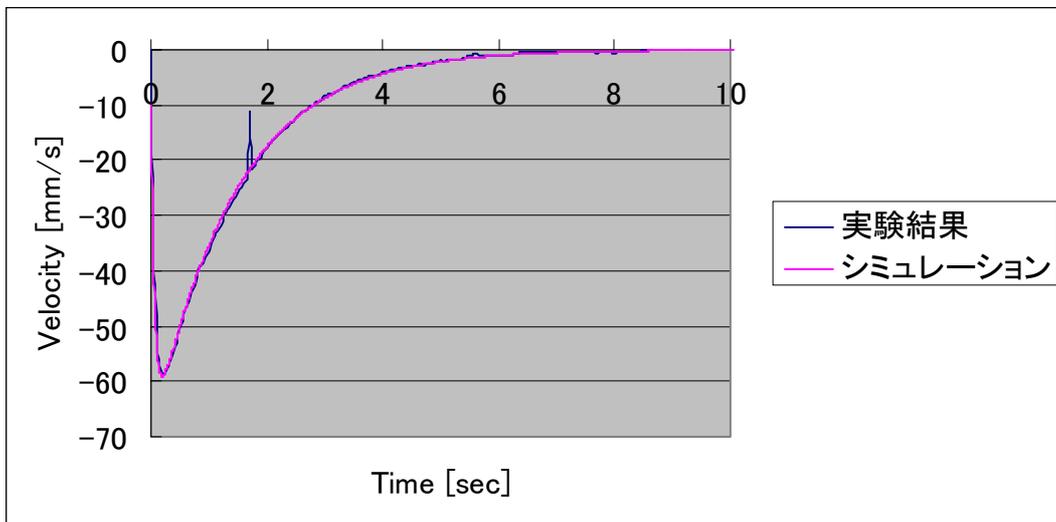


(a) 速度

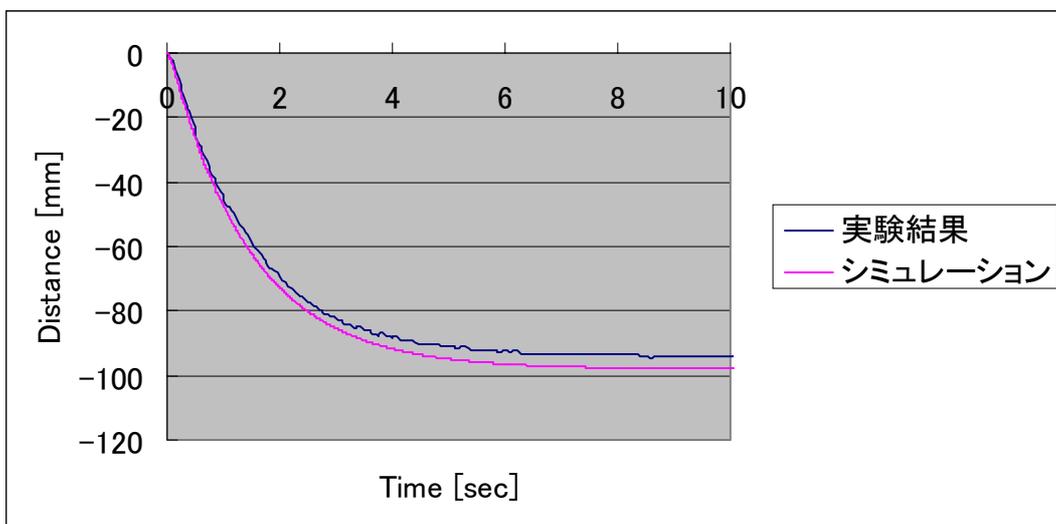


(b) 変位

図 4.6 実験 1  $M=100$  [kg]  $K=1000$  [N/m]  $C=1000$  [Ns/m]

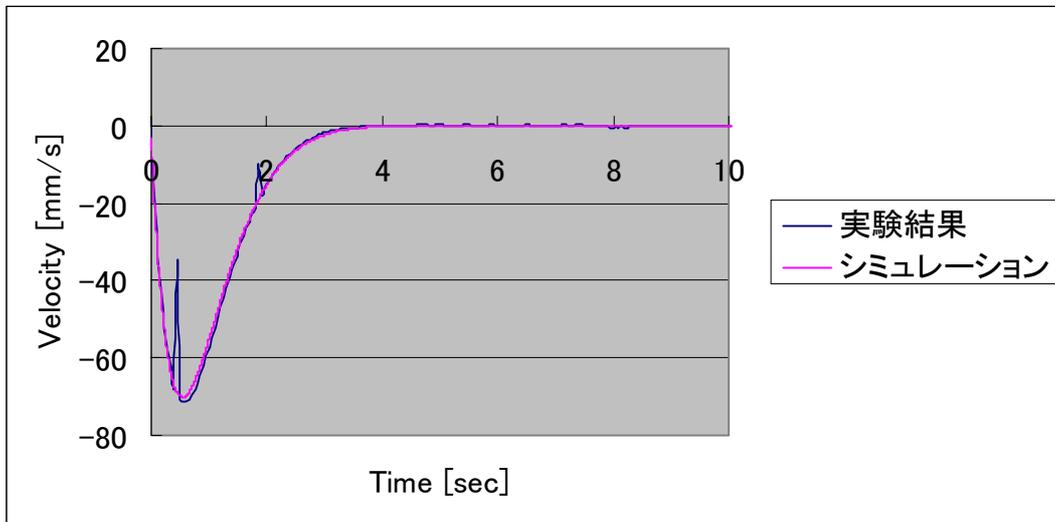


(a) 速度

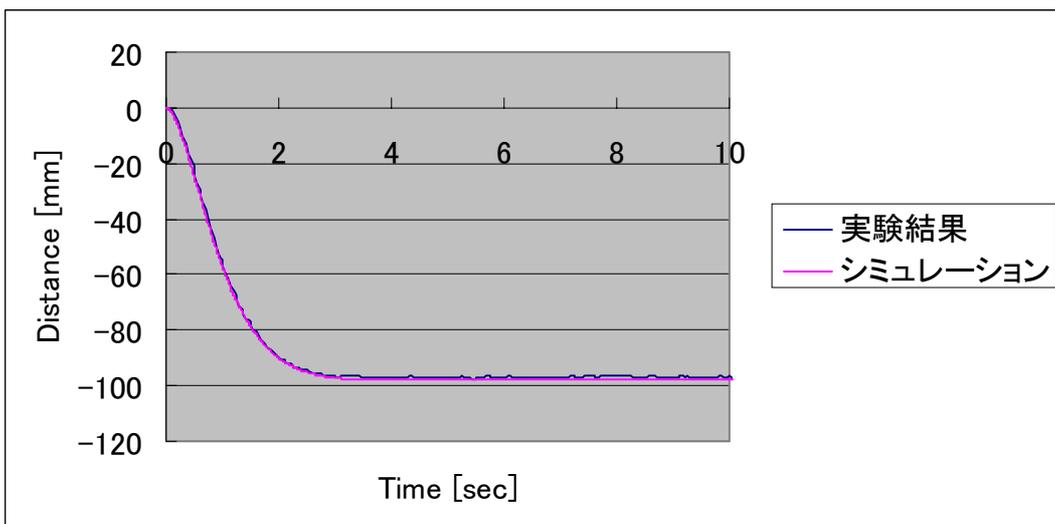


(b) 変位

図 4.7 実験 1  $M=100$  [kg] $K=1000$  [N/m]  $C=1500$  [Ns/m]

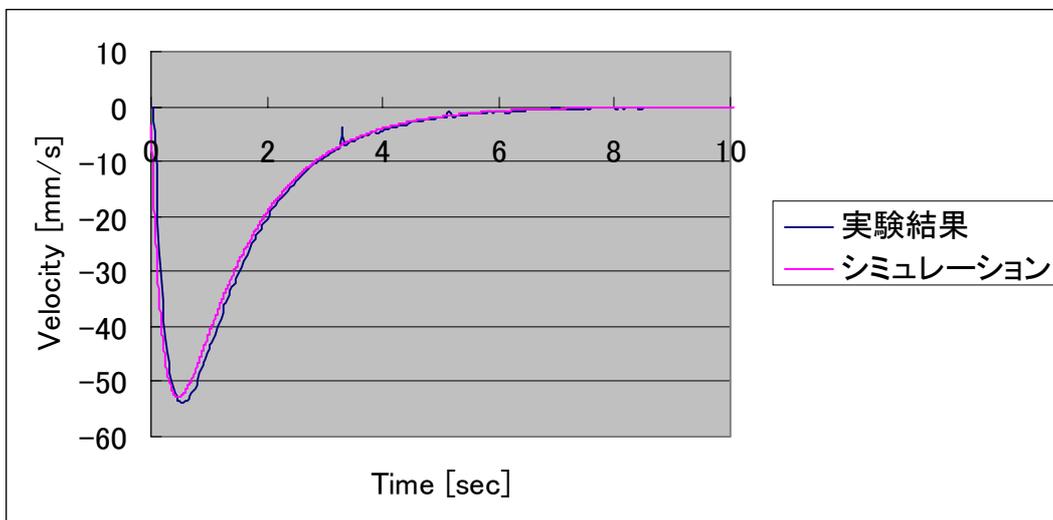


(a) 速度

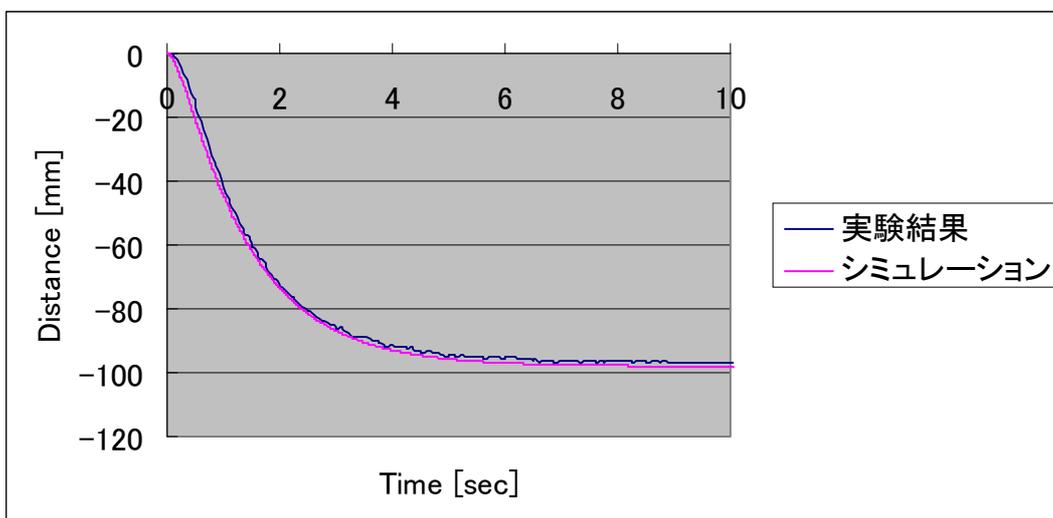


(b) 変位

図 4.8 実験 1  $M=300$  [kg]  $K=1000$  [N/m]  $C=1000$  [Ns/m]

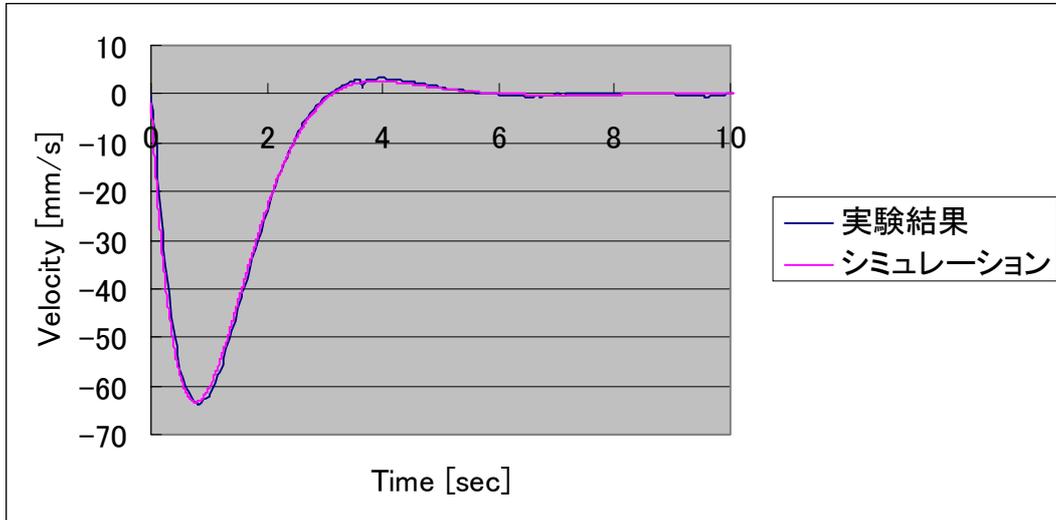


(a) 速度

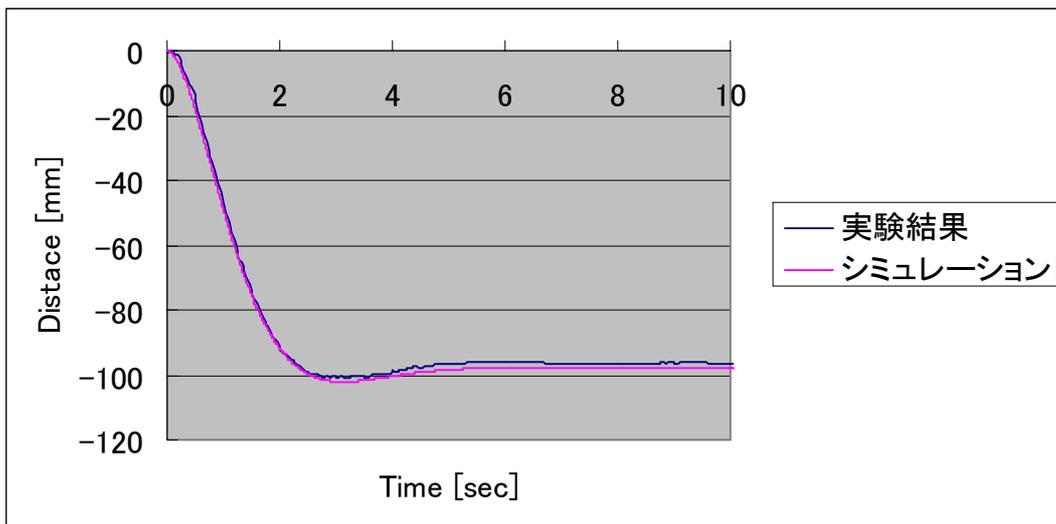


(b) 変位

図 4.9 実験 1  $M=300$  [kg]  $K=1000$  [N/m]  $C=1500$  [Ns/m]

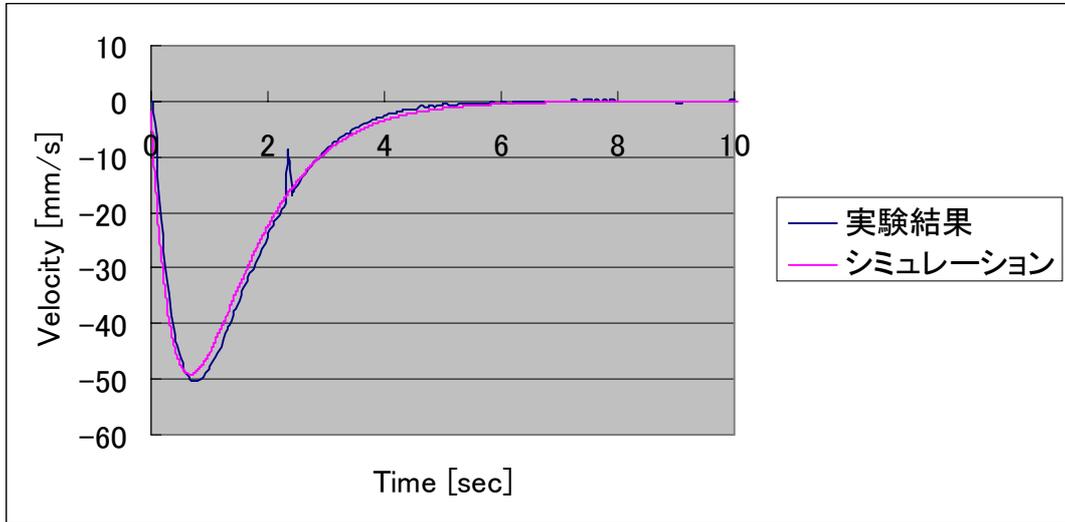


(a) 速度

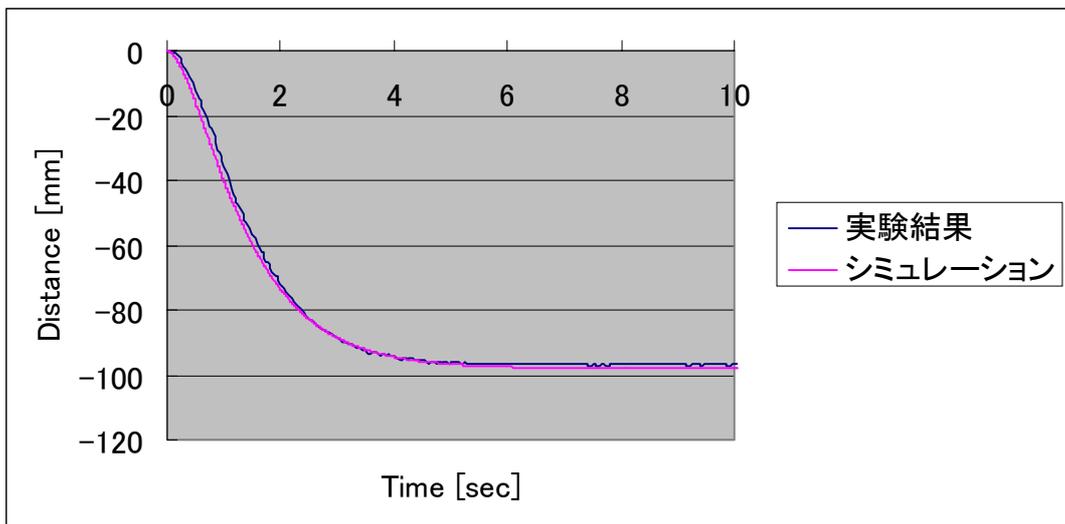


(b) 変位

図 4.10 実験 1  $M=500$  [kg]  $K=1000$  [N/m]  $C=1000$  [Ns/m]

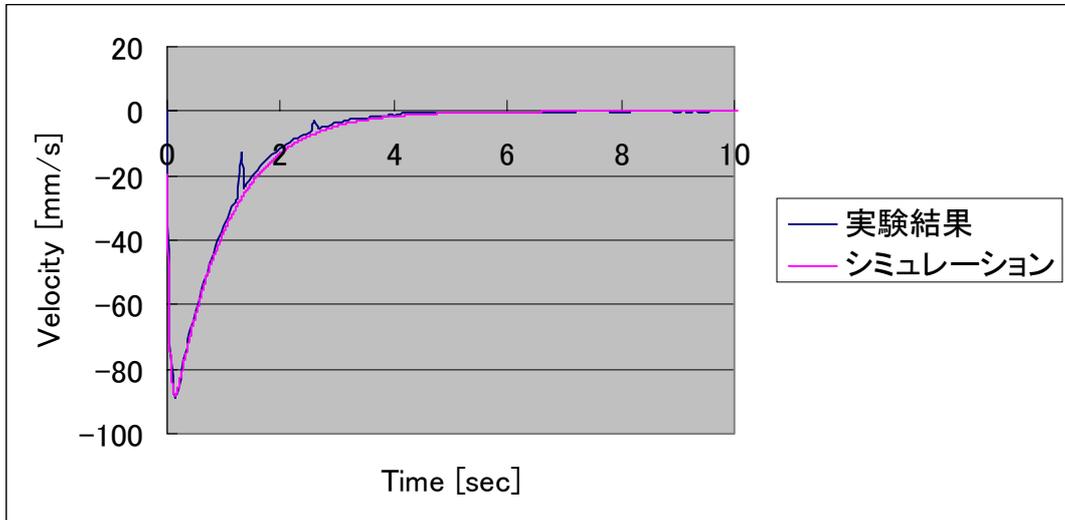


(a) 速度

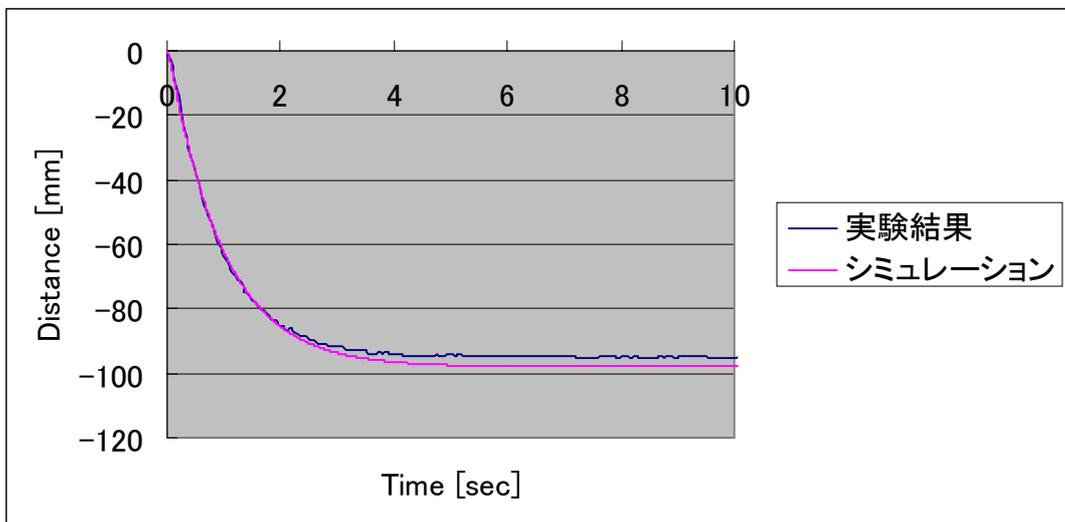


(b) 変位

図 4.11 実験 1  $M=500$  [kg]  $K=1000$  [N/m]  $C=1500$  [[Ns/m]]

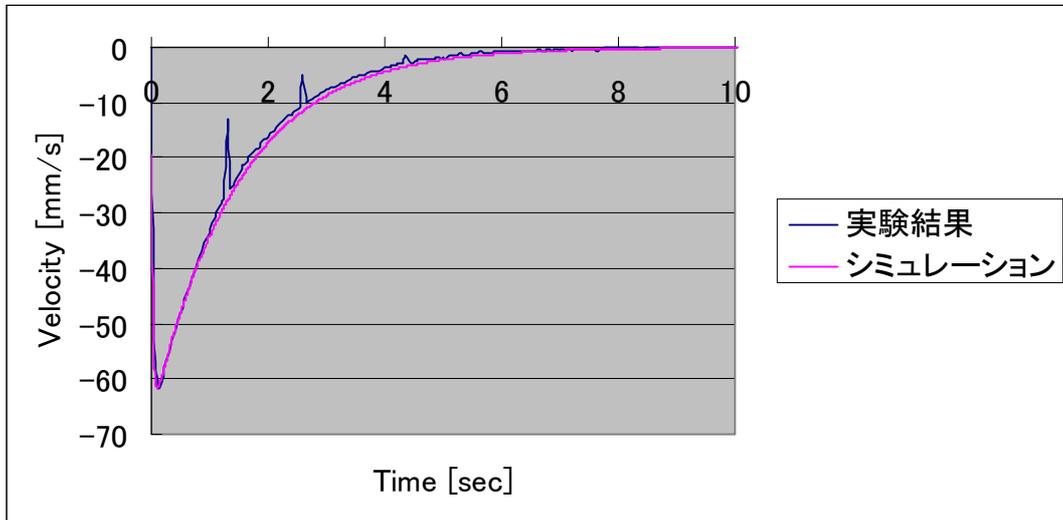


(a) 速度

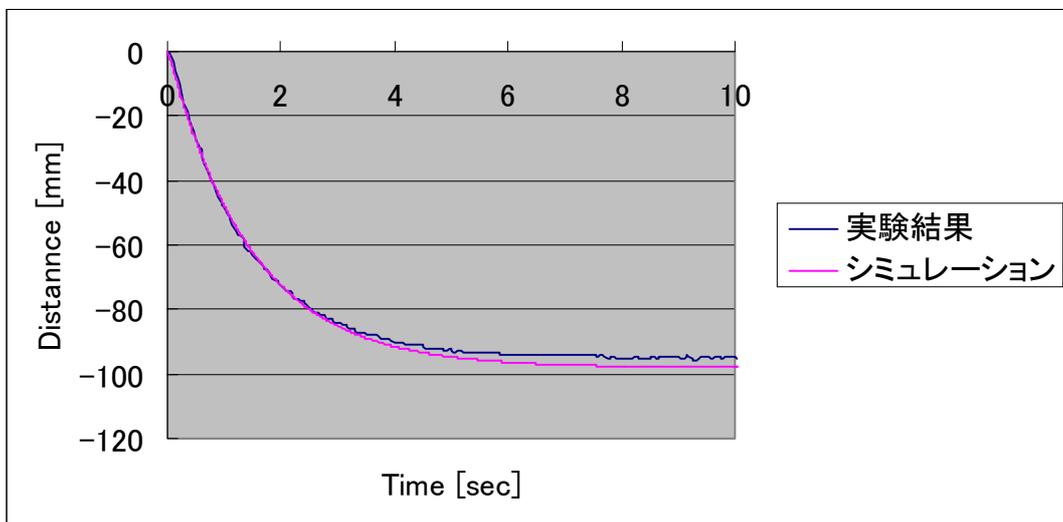


(b) 変位

図 4.12 実験 1  $M=100$  [kg]  $K=2000$  [[N/m]]  $C=2000$  [Ns/m]

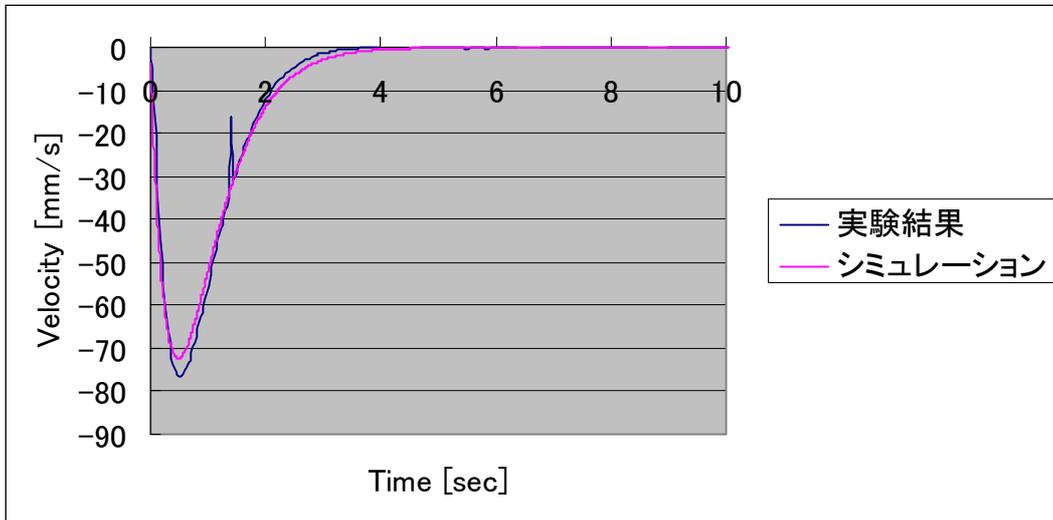


(a) 速度

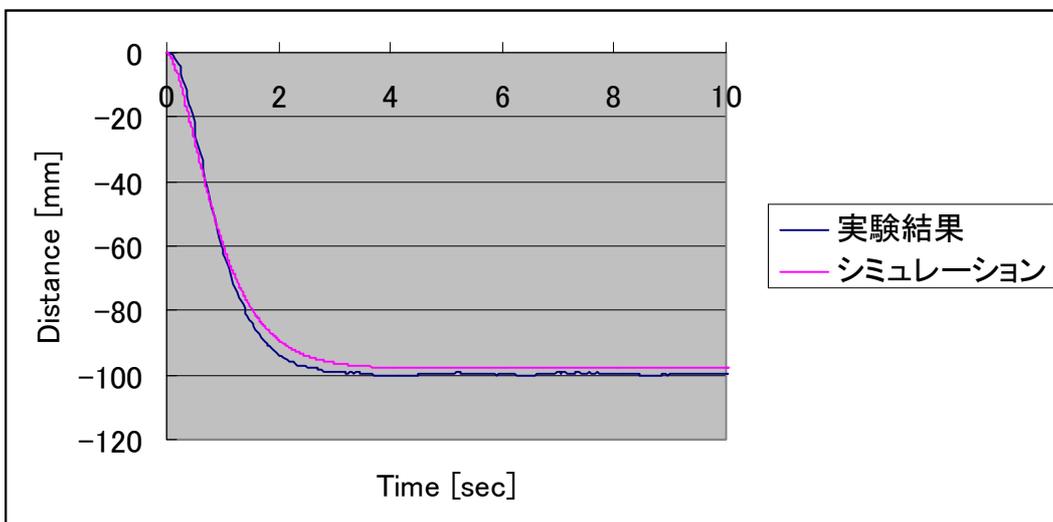


(b) 変位

図 4.13 実験 1  $M=100$  [kg]  $K=2000$  [N/m]  $C=3000$  [Ns/m]

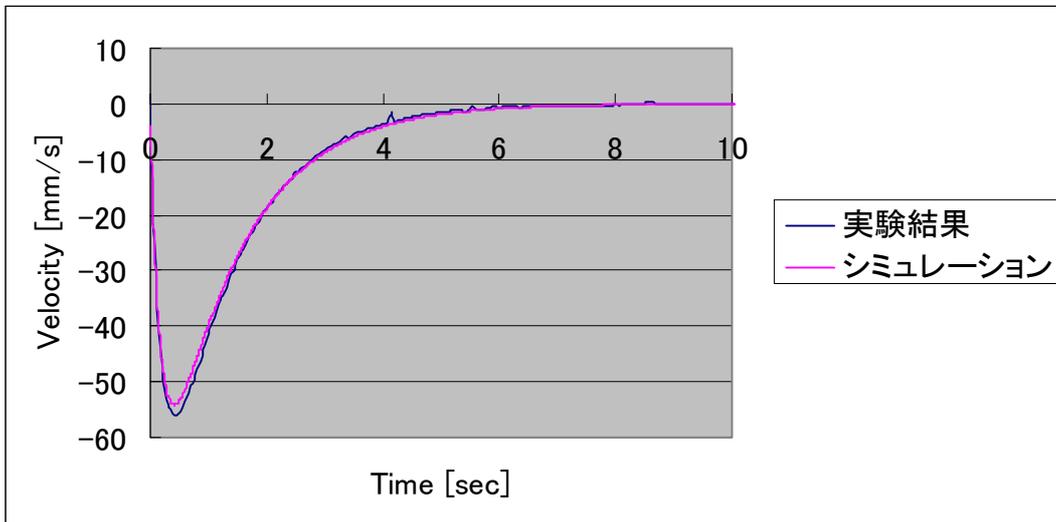


(a) 速度

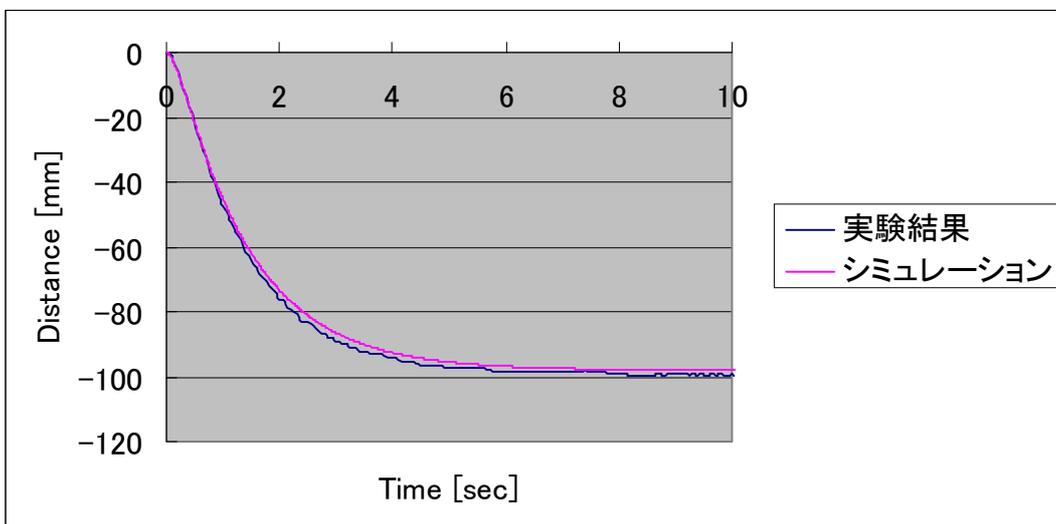


(b) 変位

図 4.14 実験 1  $M=500$  [kg]  $K=2000$  [N/m]  $C=2000$  [Ns/m]

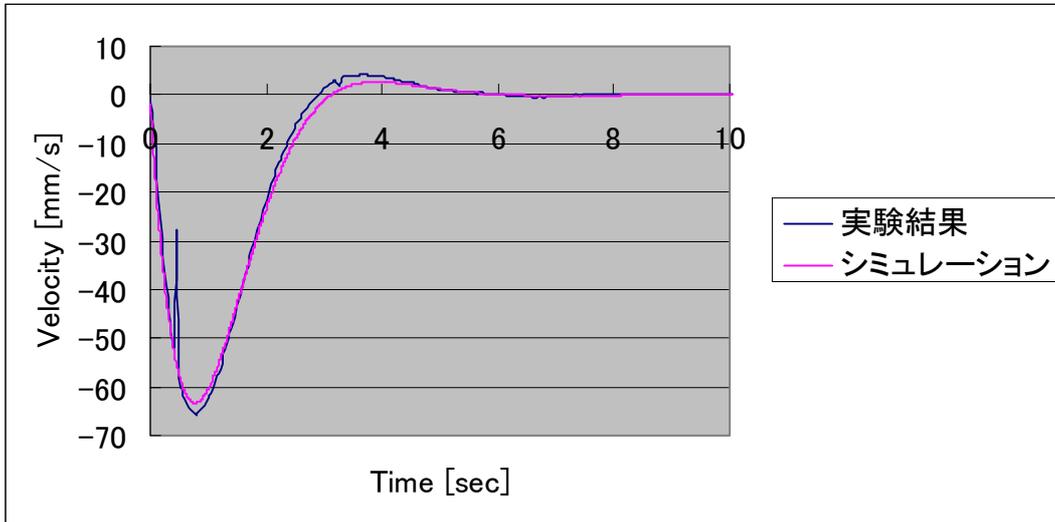


(a) 速度

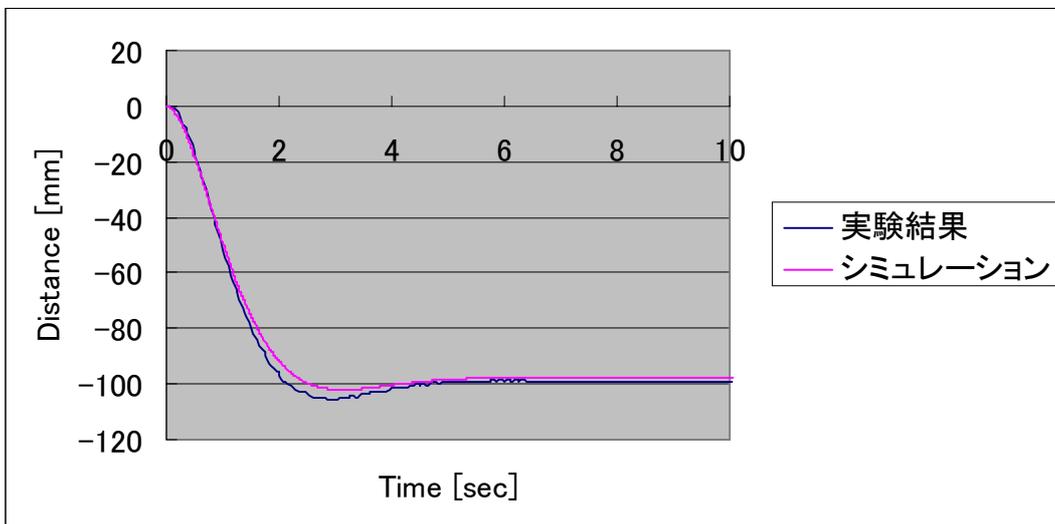


(b) 変位

図 4.15 実験 1  $M=500$  [kg]  $K=2000$  [N/m]  $C=3000$  [Ns/m]

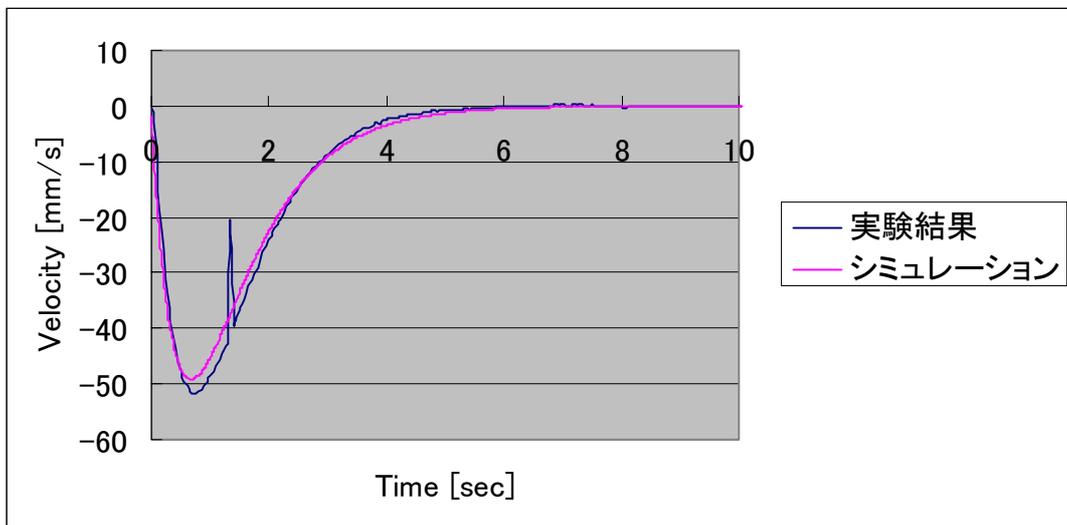


(a) 速度

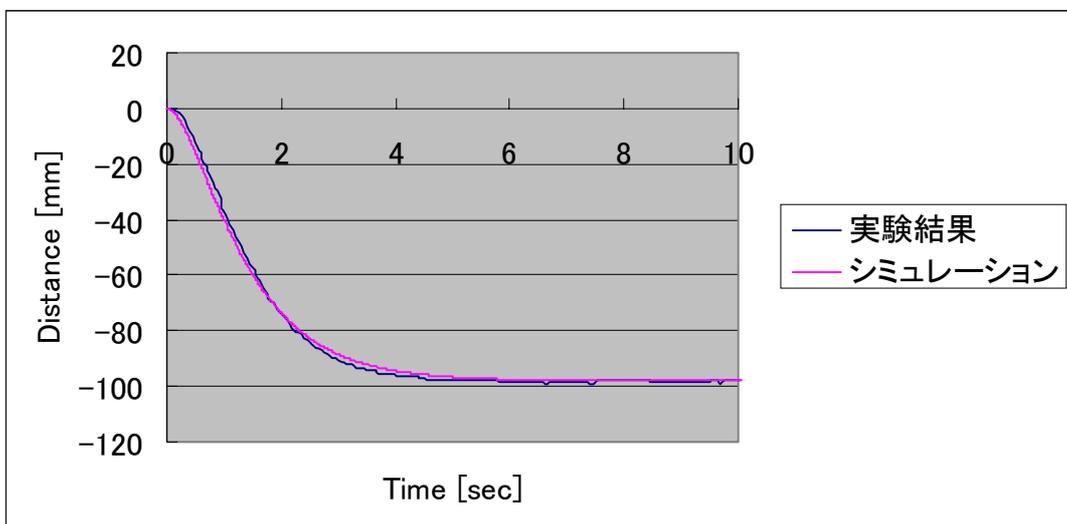


(b) 変位

図 4.16 実験 1  $M=1000$  [kg]  $K=2000$  [N/m]  $C=2000$  [Ns/m]

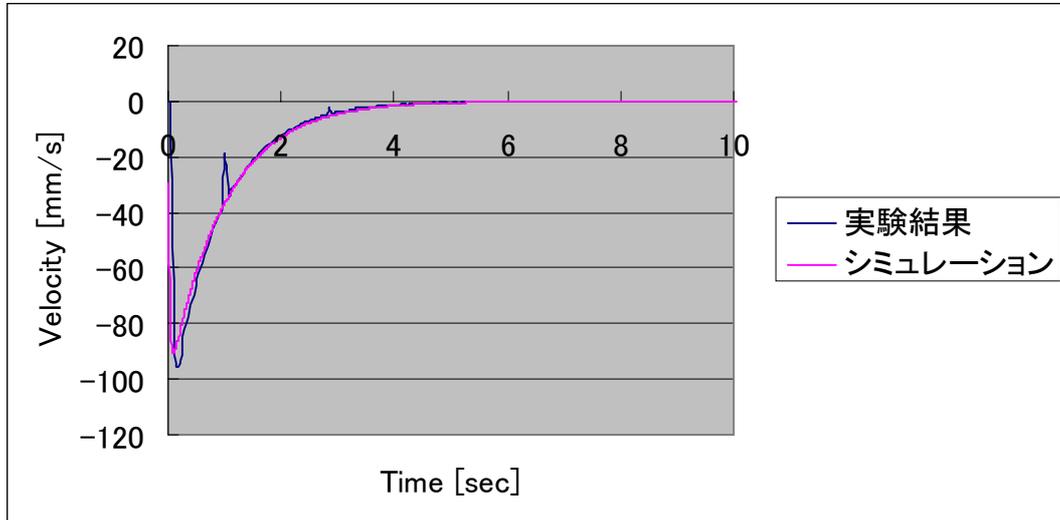


(a) 速度

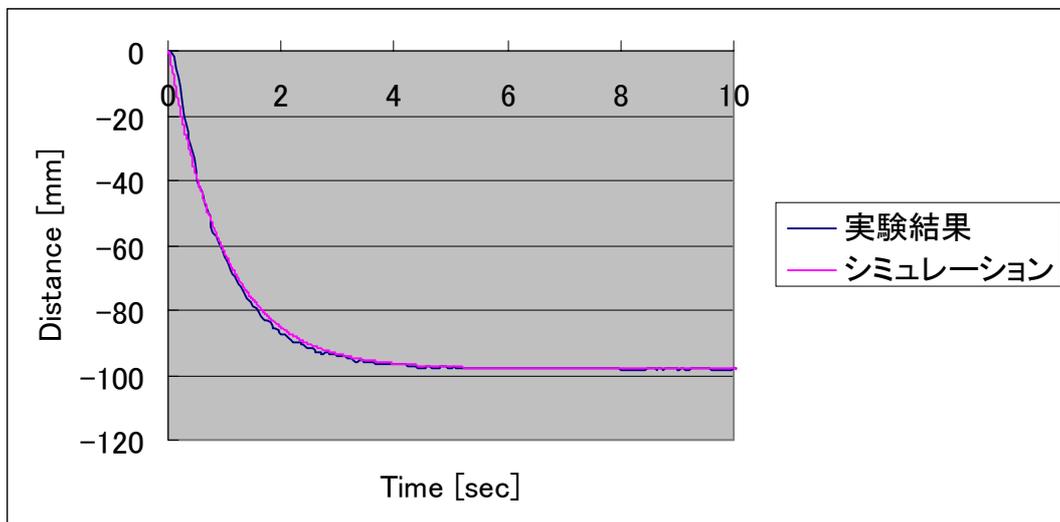


(b) 変位

図 4.17 実験 1  $M=1000$  [kg]  $K=2000$  [N/m]  $C=3000$  [Ns/m]

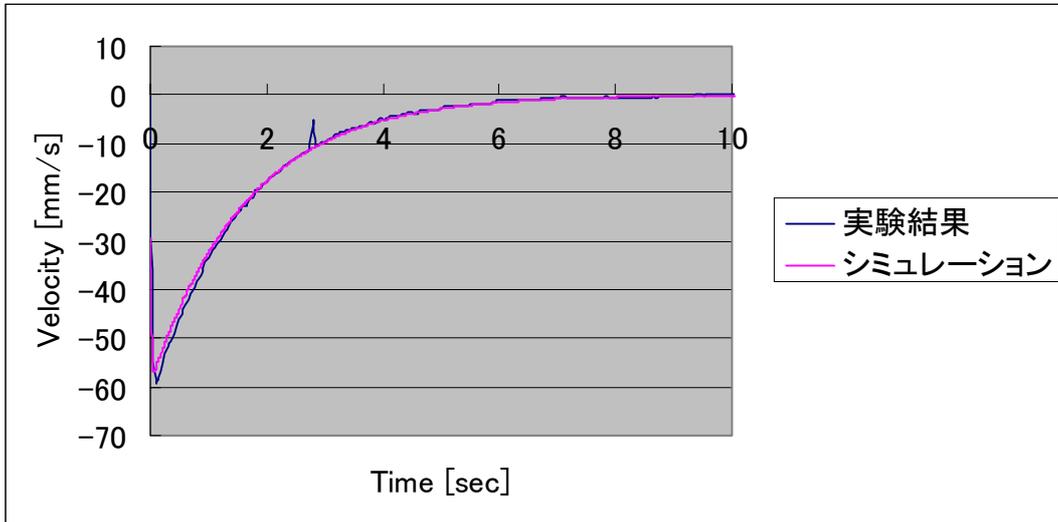


(a) 速度

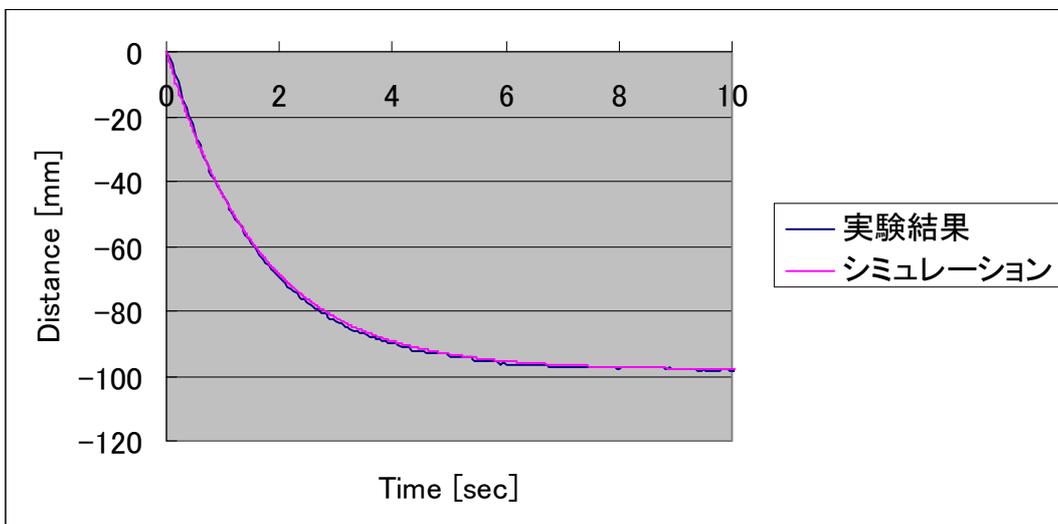


(b) 変位

図 4.18 実験 1  $M=100$  [kg]  $K=3000$  [N/m]  $C=3000$  [Ns/m]

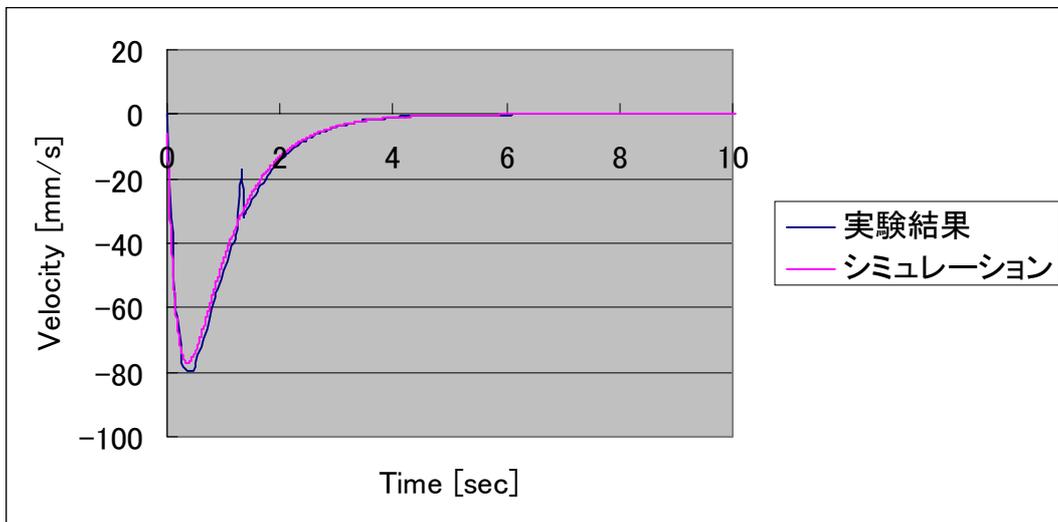


(a) 速度

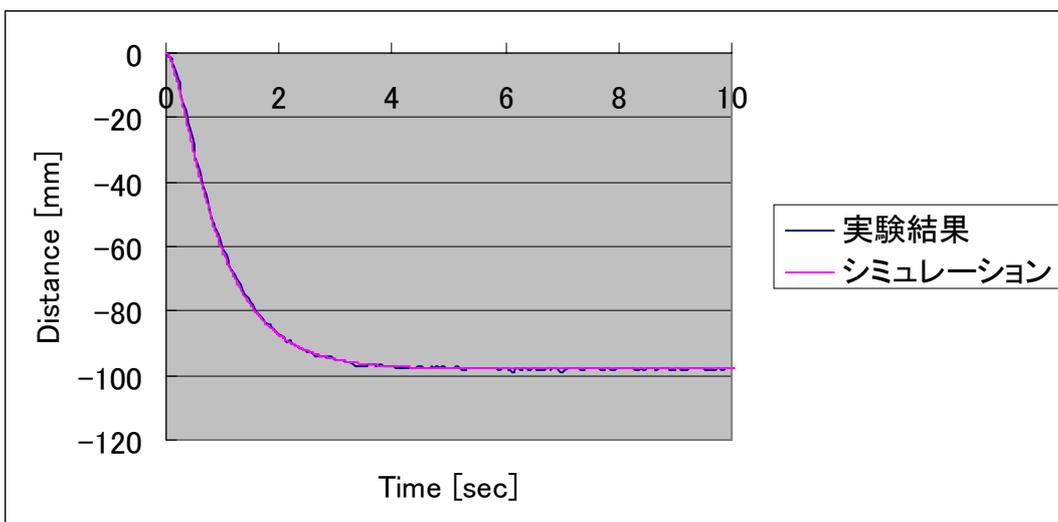


(b) 変位

図 4.19 実験 1  $M=100$  [kg]  $K=3000$  [N/m]  $C=5000$  [Ns/m]

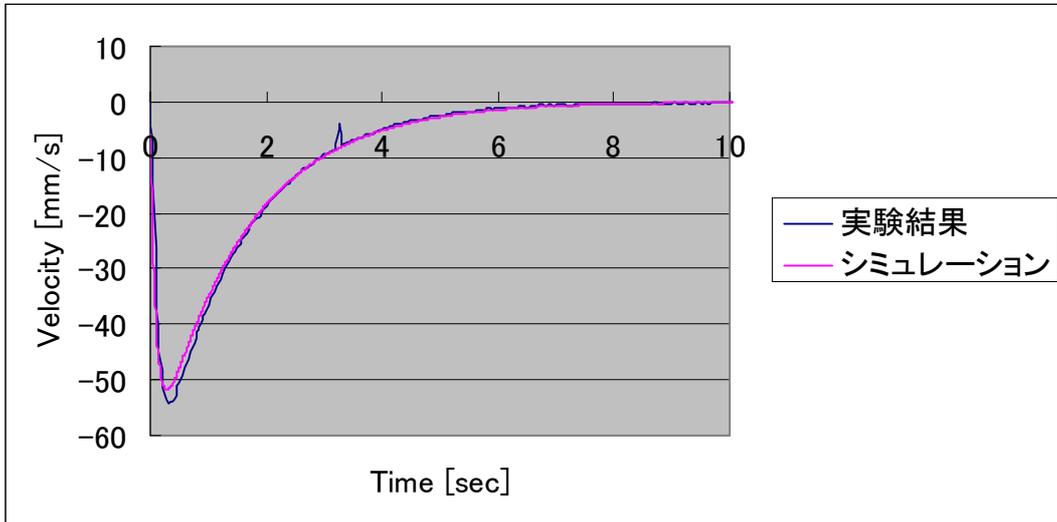


(a) 速度

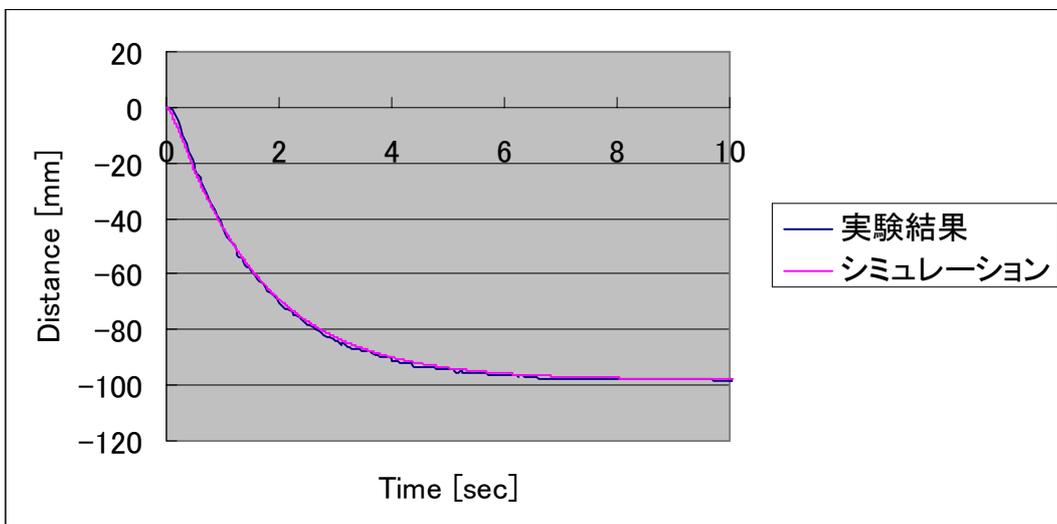


(b) 変位

図 4.20 実験 1  $M=500$  [kg]  $K=3000$  [N/m]  $C=3000$  [Ns/m]

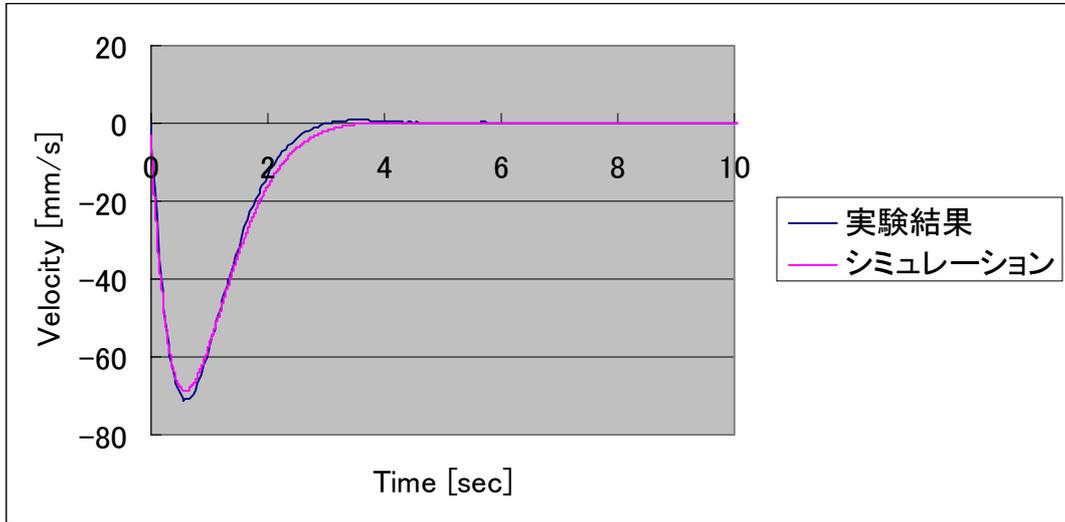


(a) 速度

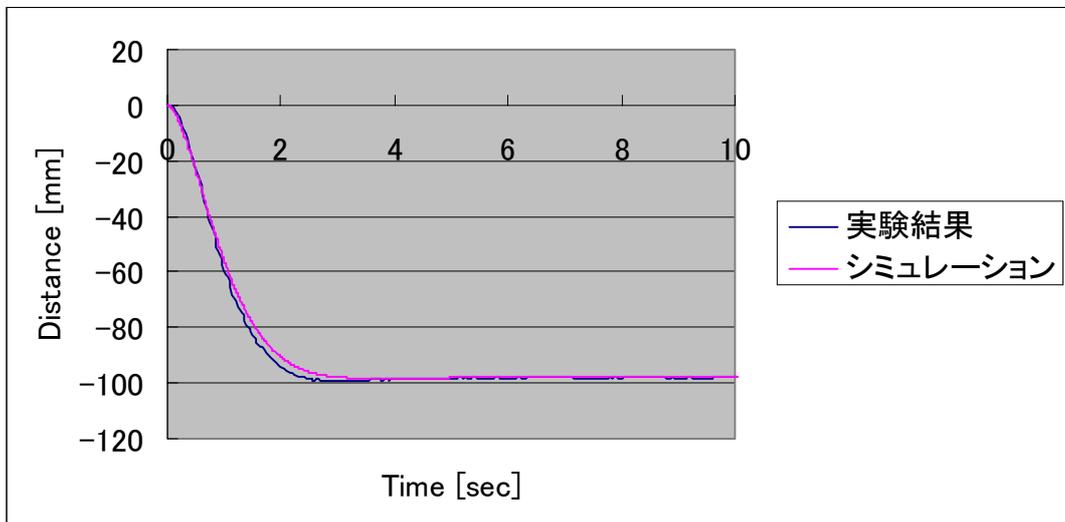


(b) 変位

図 4.21 実験 1  $M=500$  [kg]  $K=3000$  [N/m]  $C=5000$  [Ns/m]

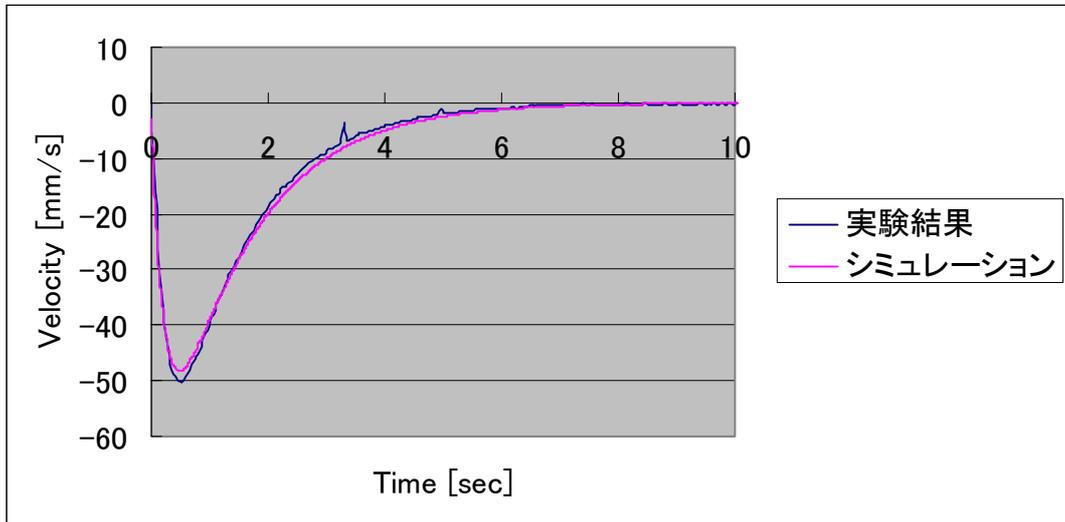


(a) 速度

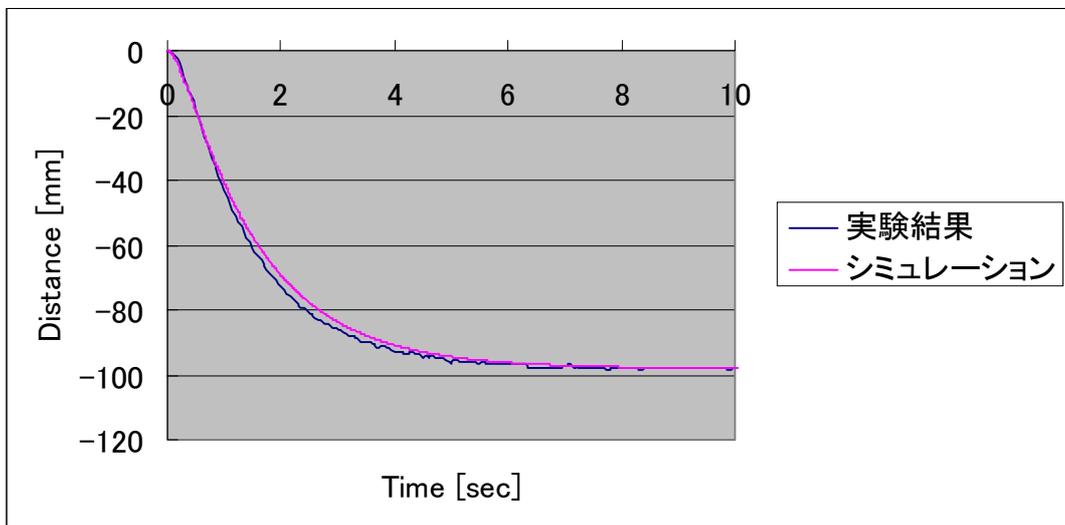


(b) 変位

図 4.22 実験 1  $M=1000$  [kg]  $K=3000$  [N/m]  $C=3000$  [Ns/m]

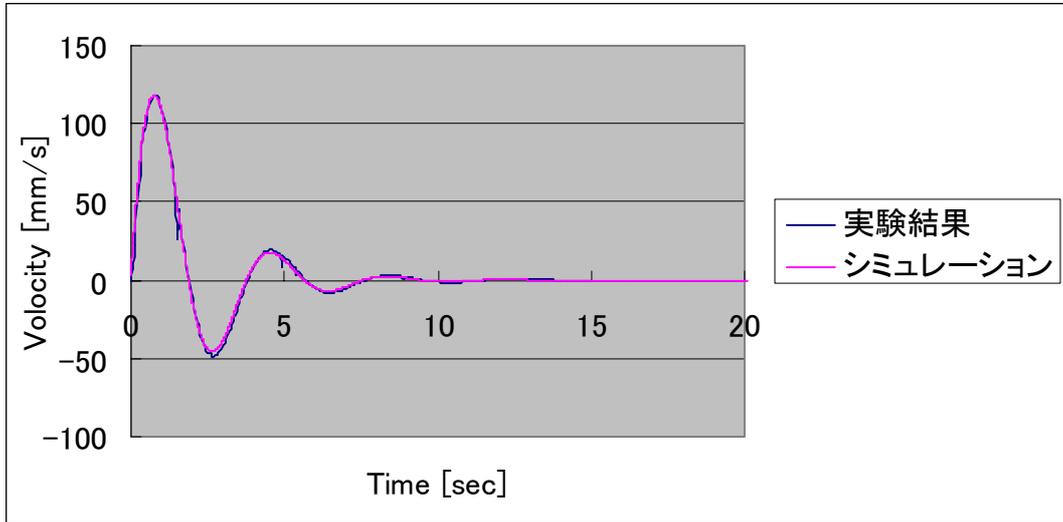


(a) 速度

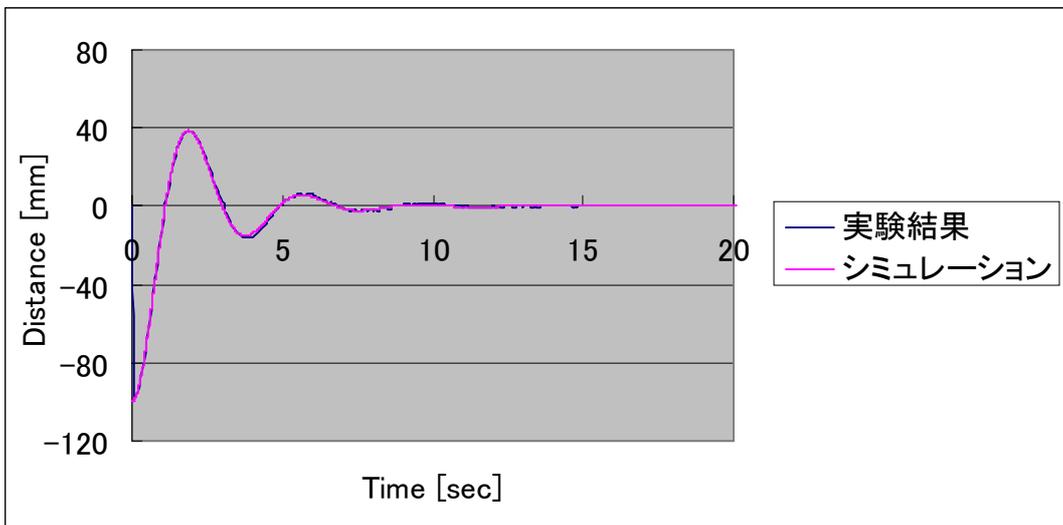


(b) 変位

図 4.23 実験 1  $M=1000$  [kg]  $K=3000$  [N/m]  $C=5000$  [Ns/m]

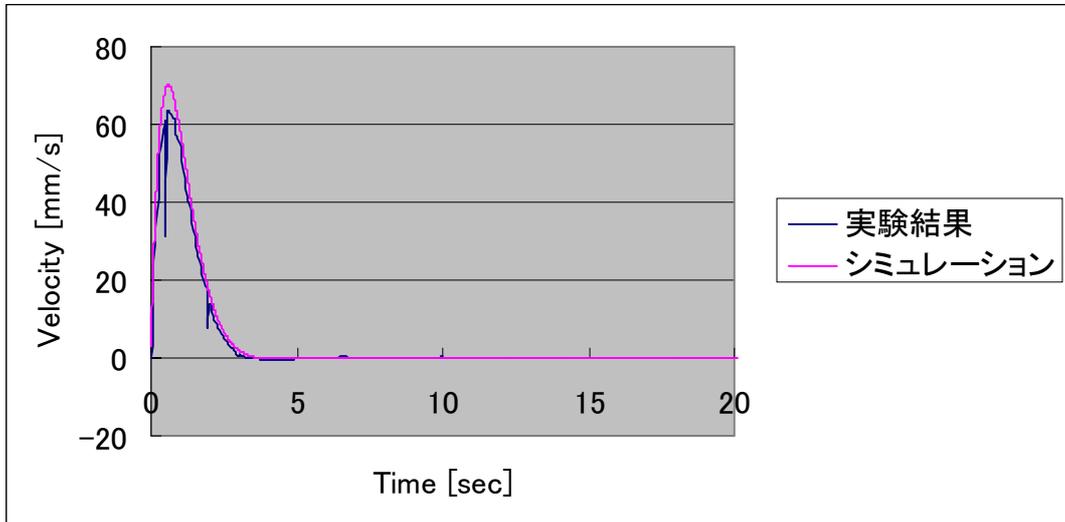


(a) 速度

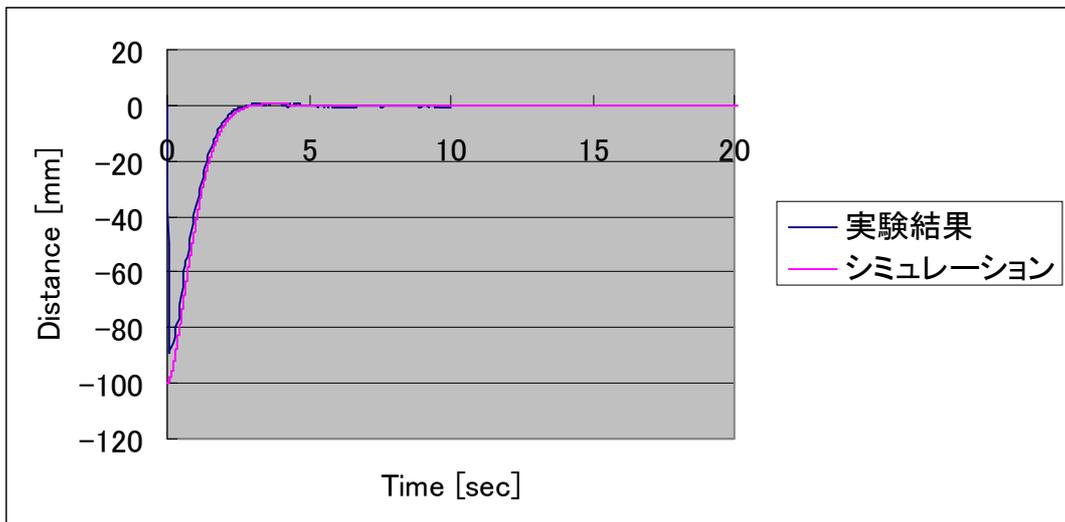


(b) 変位

図 4.24 実験 2  $M=100$  [kg]  $K=300$  [N/m]  $C=100$  [Ns/m]

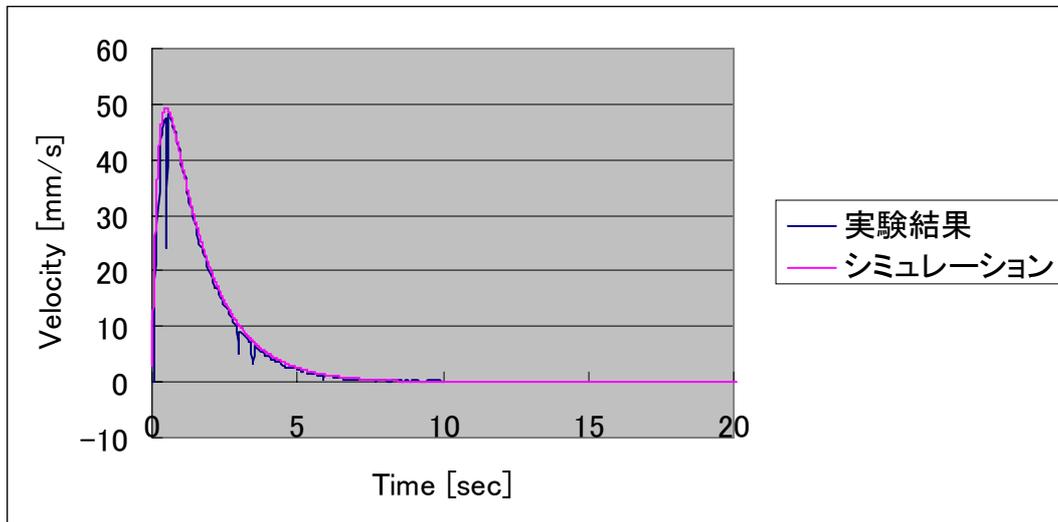


(a) 速度

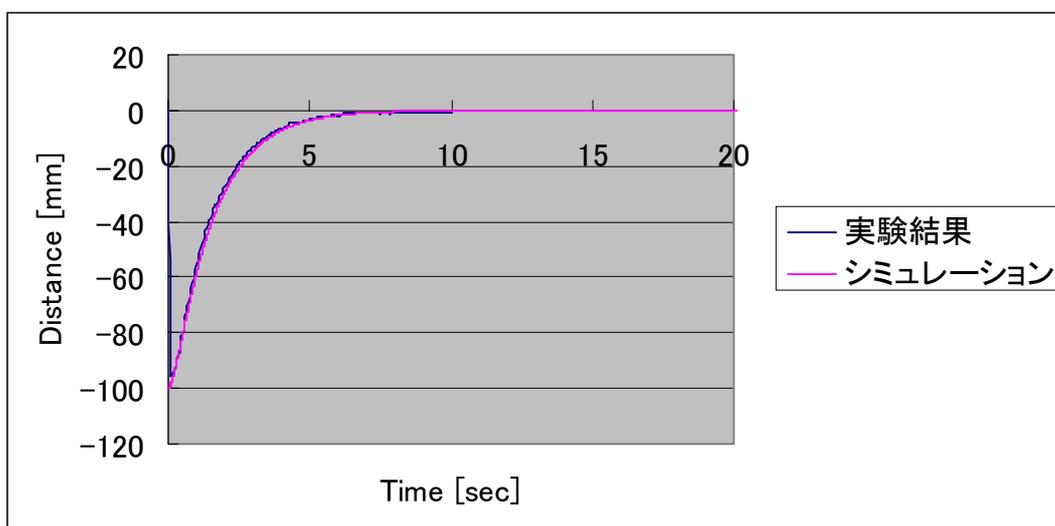


(b) 変位

図 4.25 実験 2  $M=100$  [kg]  $K=300$  [N/m]  $C=300$  [Ns/m]

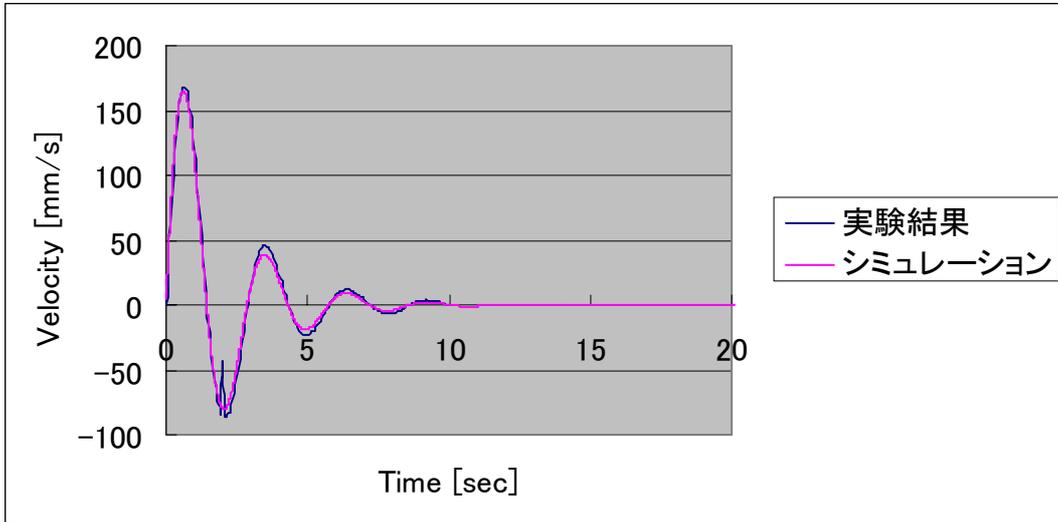


(a) 速度

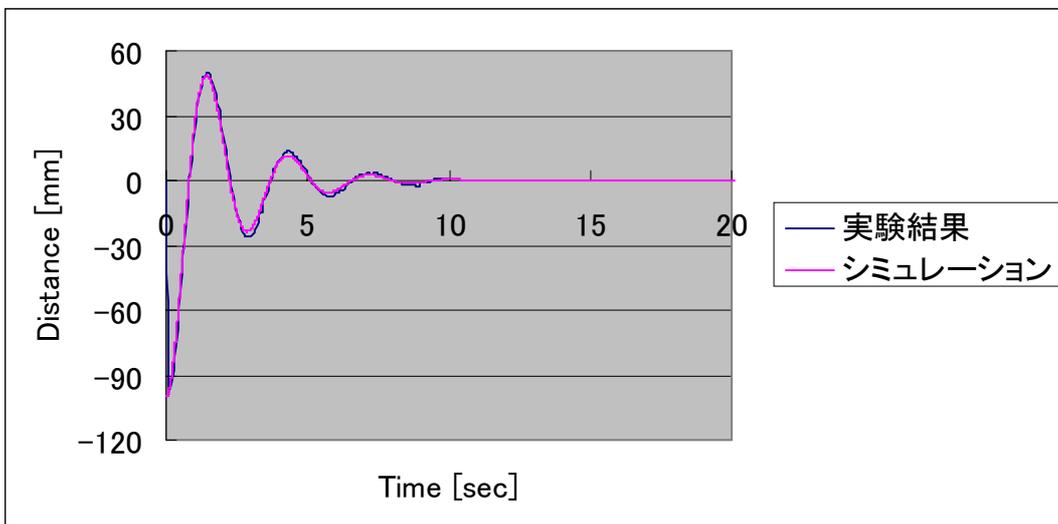


(b) 変位

図 4.26 実験 2  $M=100$  [kg]  $K=300$  [N/m]  $C=500$  [Ns/m]

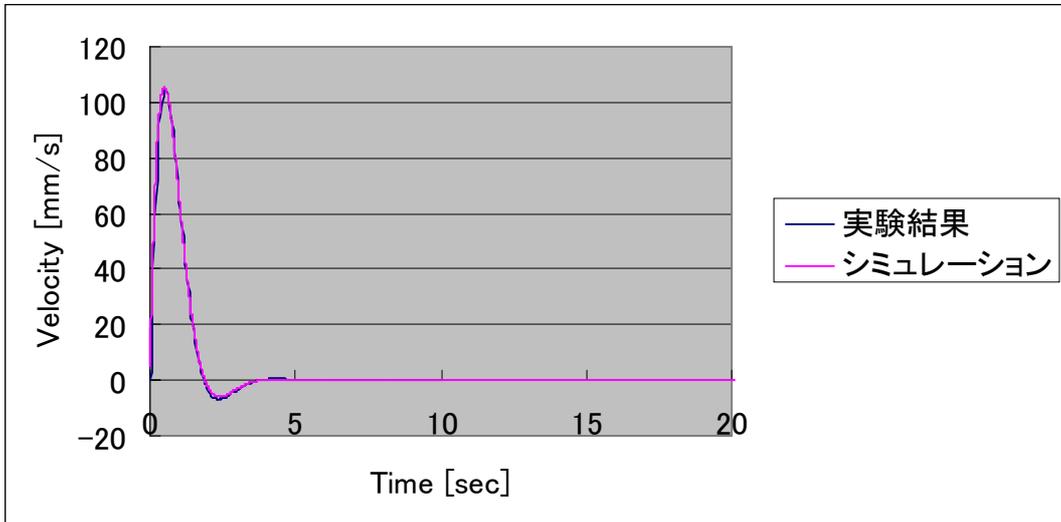


(a) 速度

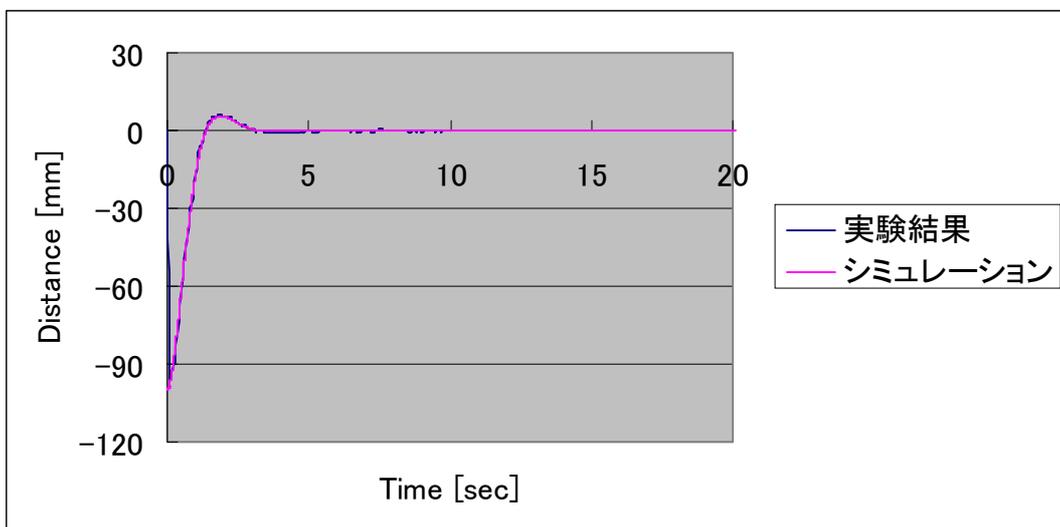


(b) 変位

図 4.27 実験 2  $M=100$  [kg]  $K=500$  [N/m]  $C=100$  [Ns/m]

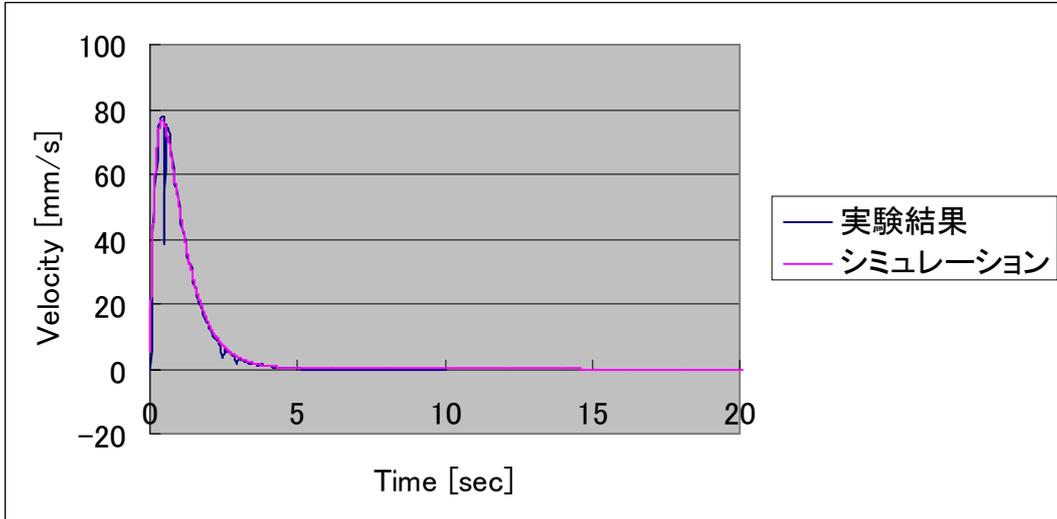


(a) 速度

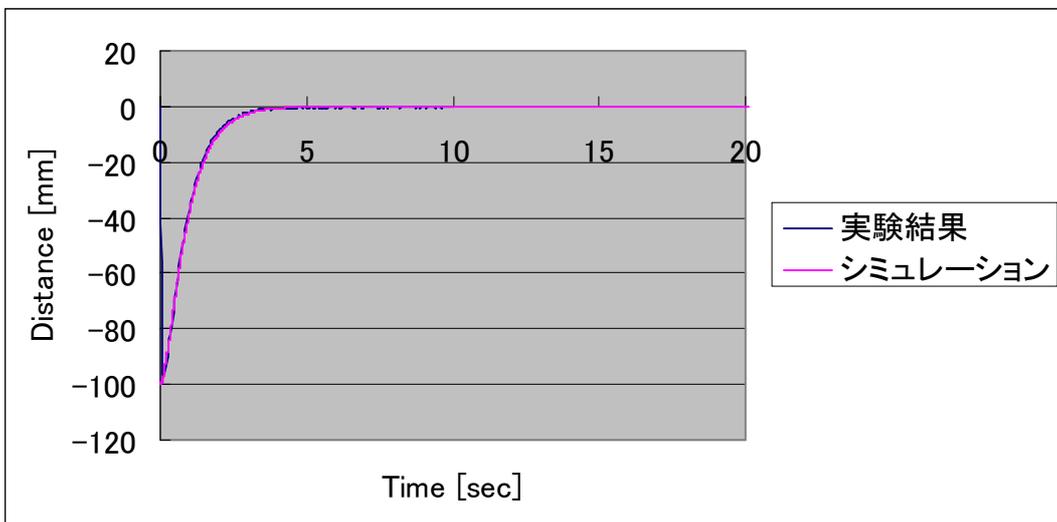


(b) 変位

図 4.28 実験 2  $M=100$  [kg]  $K=500$  [N/m]  $C=300$  [Ns/m]

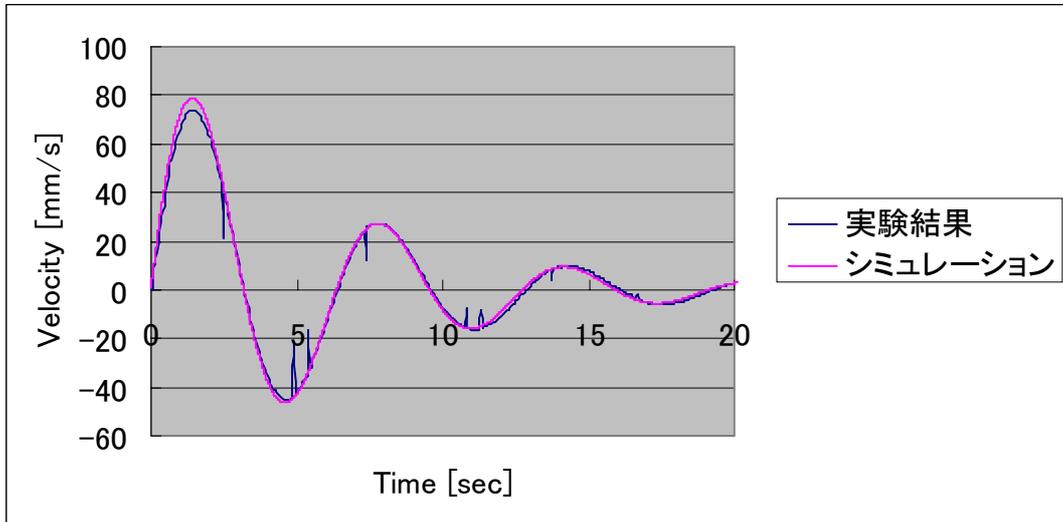


(a) 速度

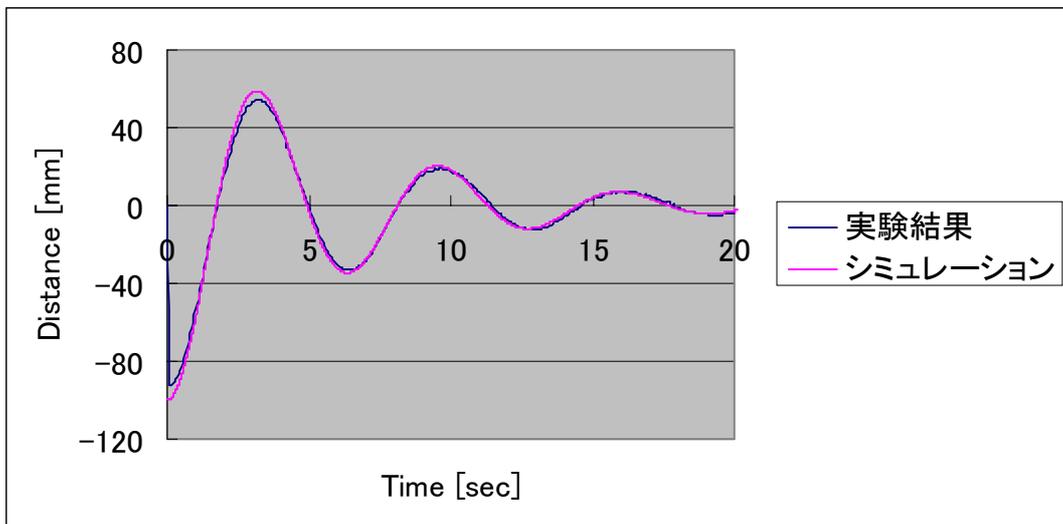


(b) 変位

図 4.29 実験 2  $M=100$  [kg]  $K=500$  [N/m]  $C=500$  [Ns/m]

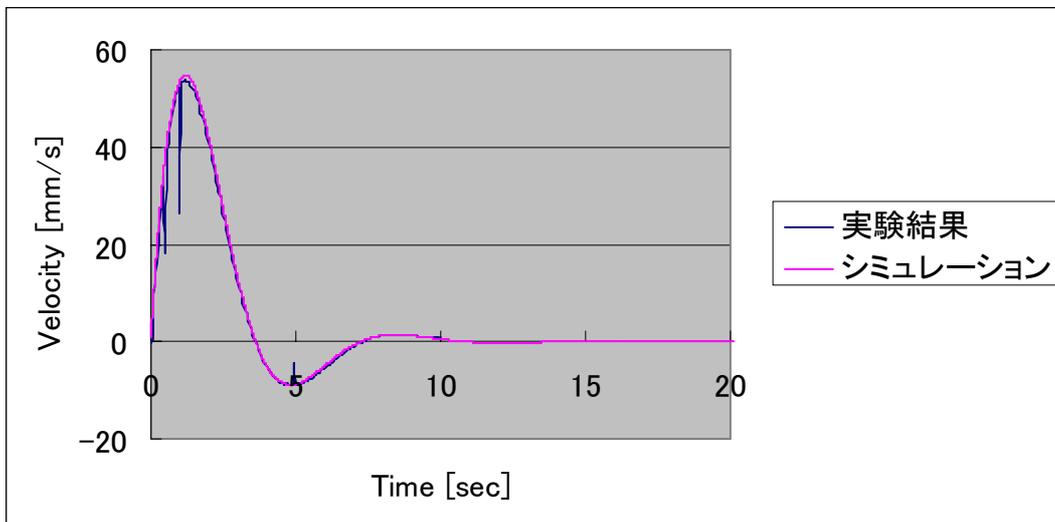


(a) 速度

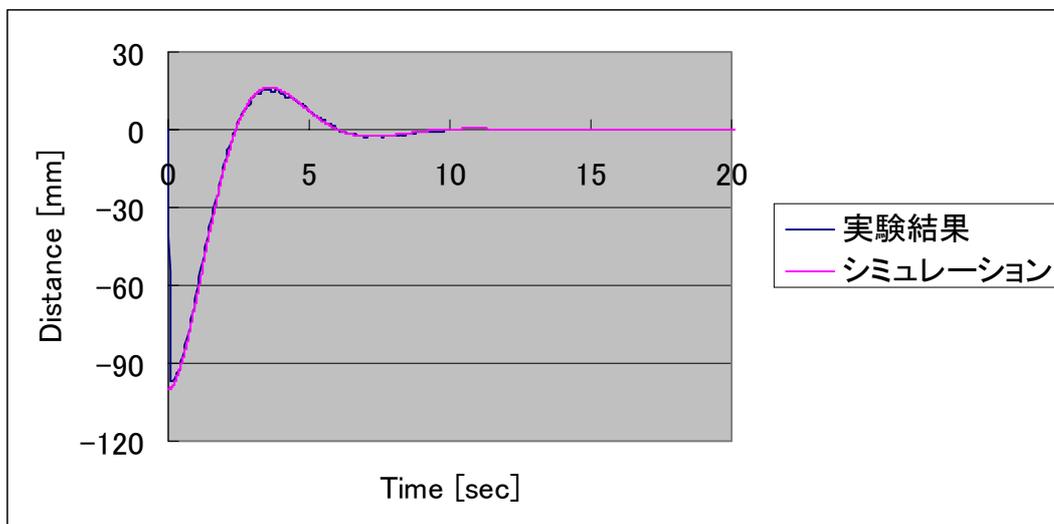


(b) 変位

図 4.30 実験 2  $M=300$  [kg]  $K=300$  [N/m]  $C=100$  [Ns/m]

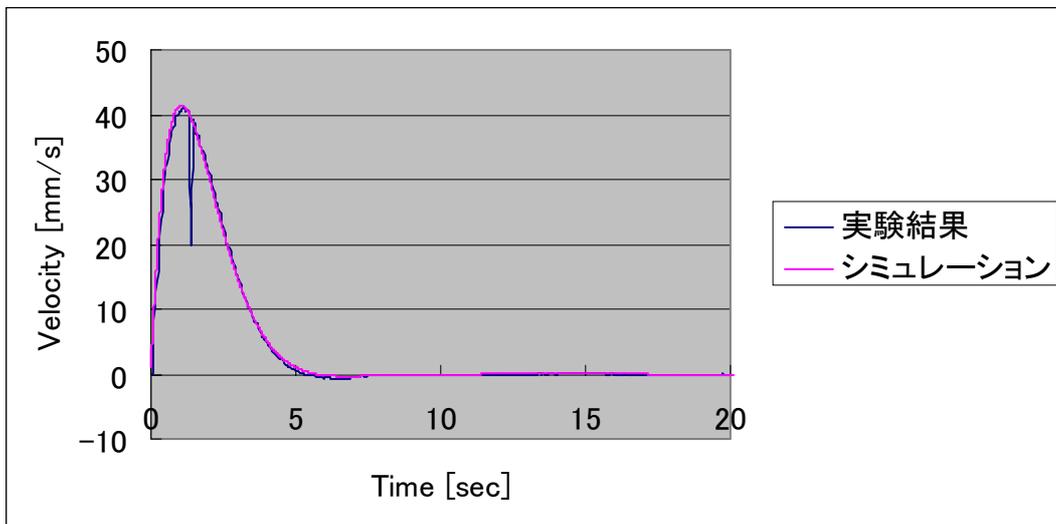


(a) 速度

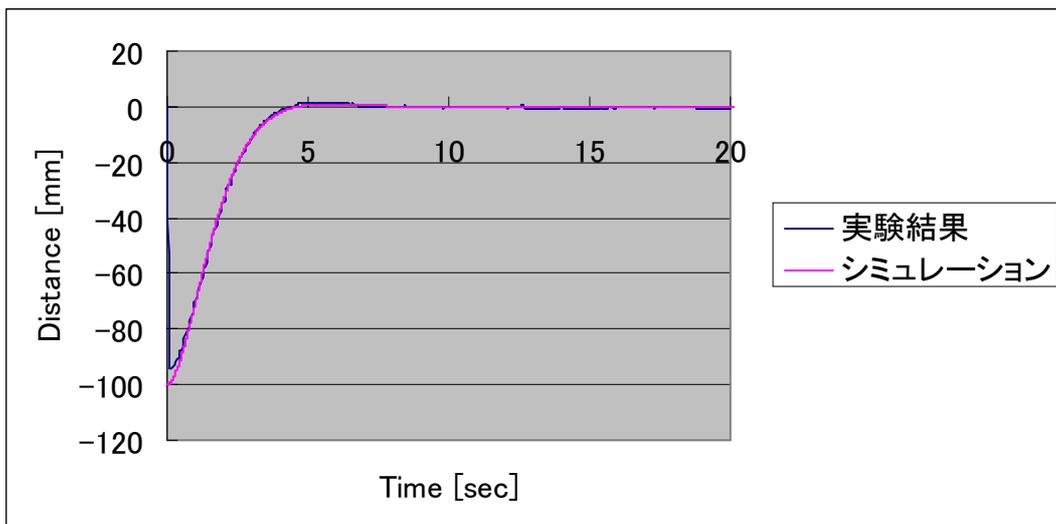


(b) 変位

図 4.31 実験2  $M=300$  [kg]  $K=300$  [N/m]  $C=300$  [Ns/m]

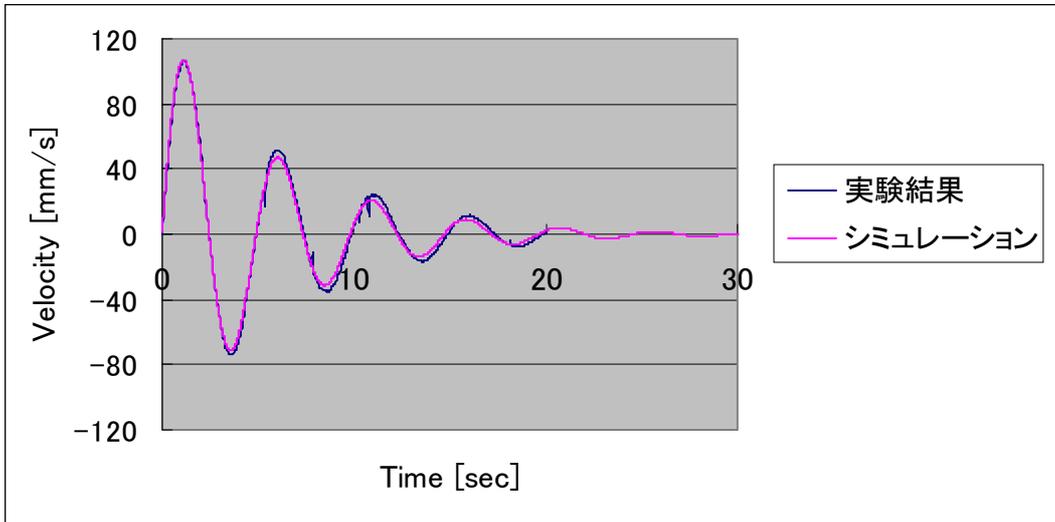


(a) 速度

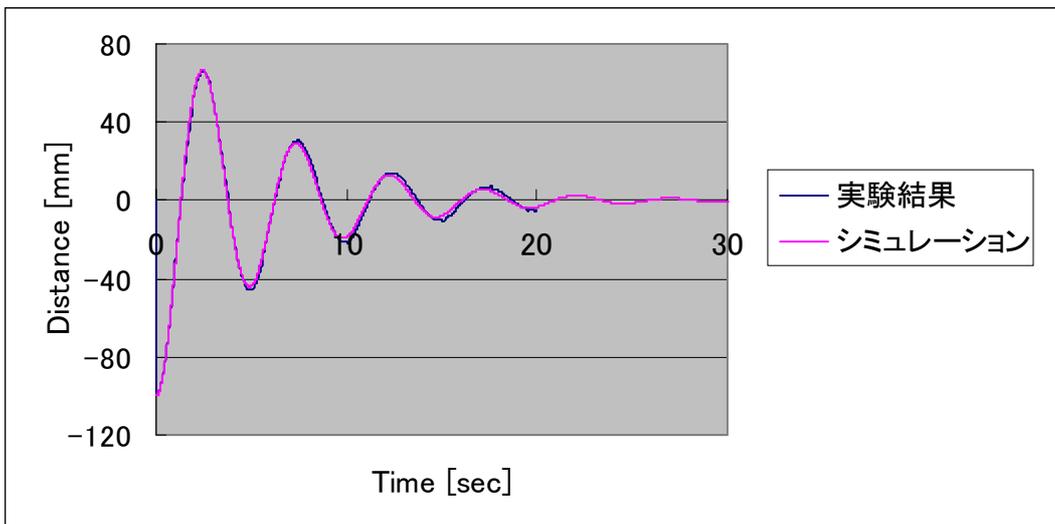


(b) 変位

図 4.32 実験2  $M=300$  [kg]  $K=300$  [N/m]  $C=500$  [Ns/m]

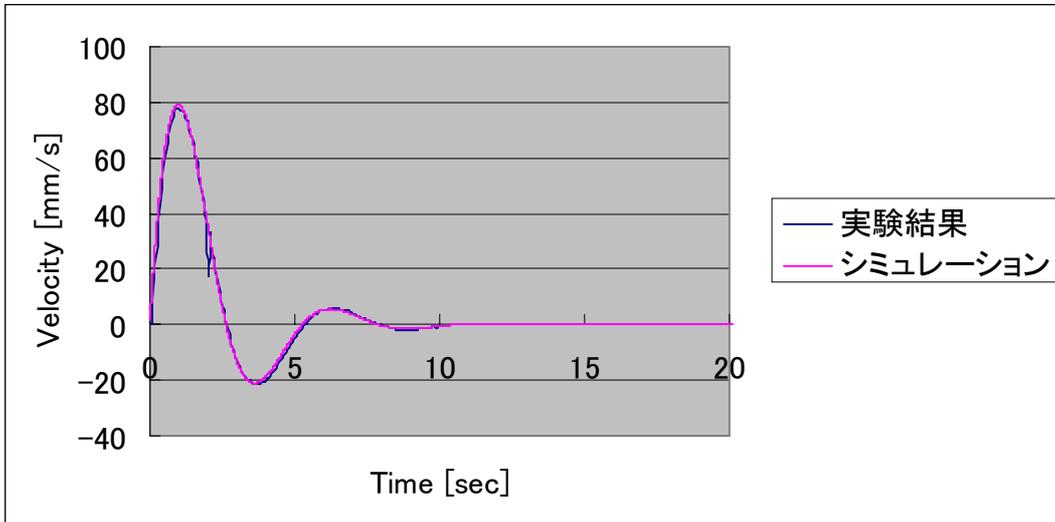


(a) 速度

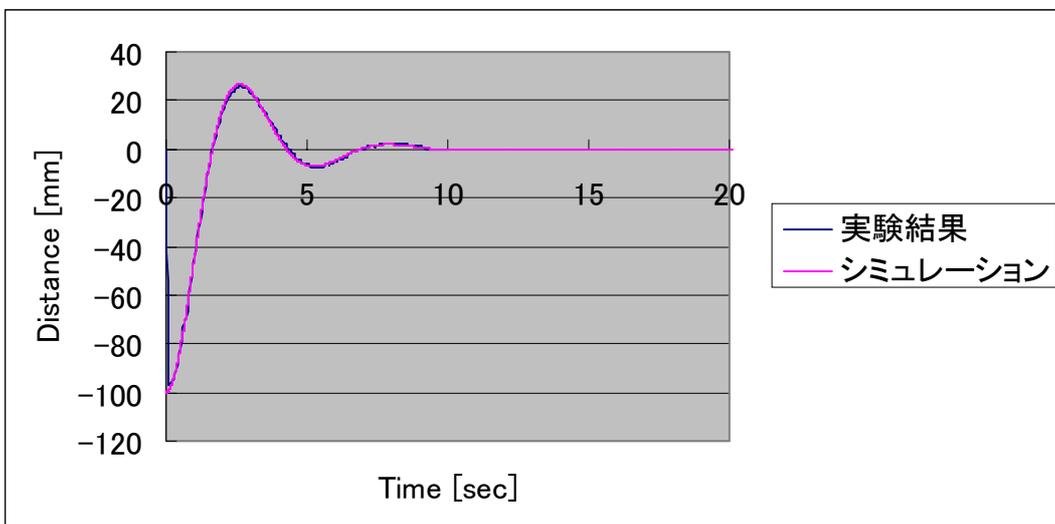


(b) 変位

図 4.33 実験 2  $M=300$  [kg]  $K=500$  [N/m]  $C=100$  [Ns/m]

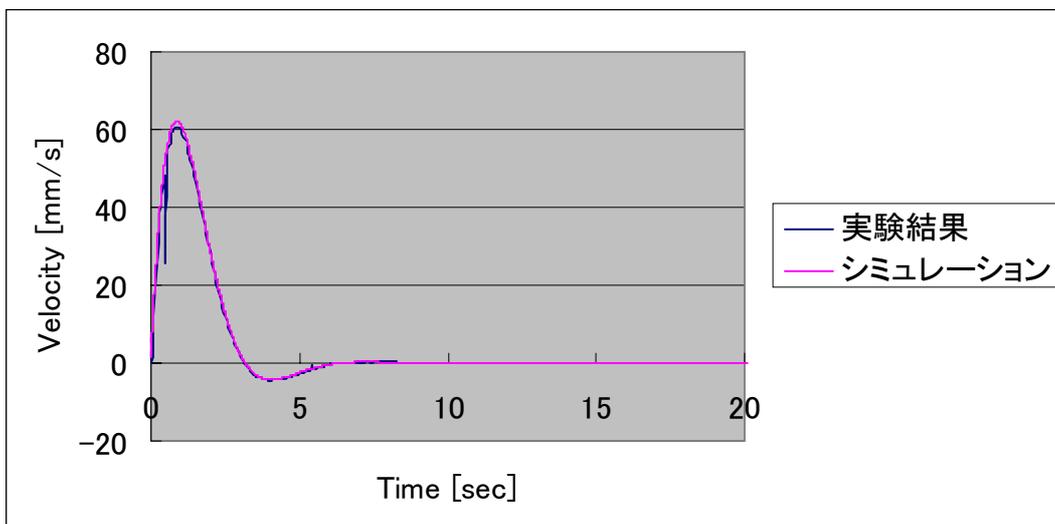


(a) 速度

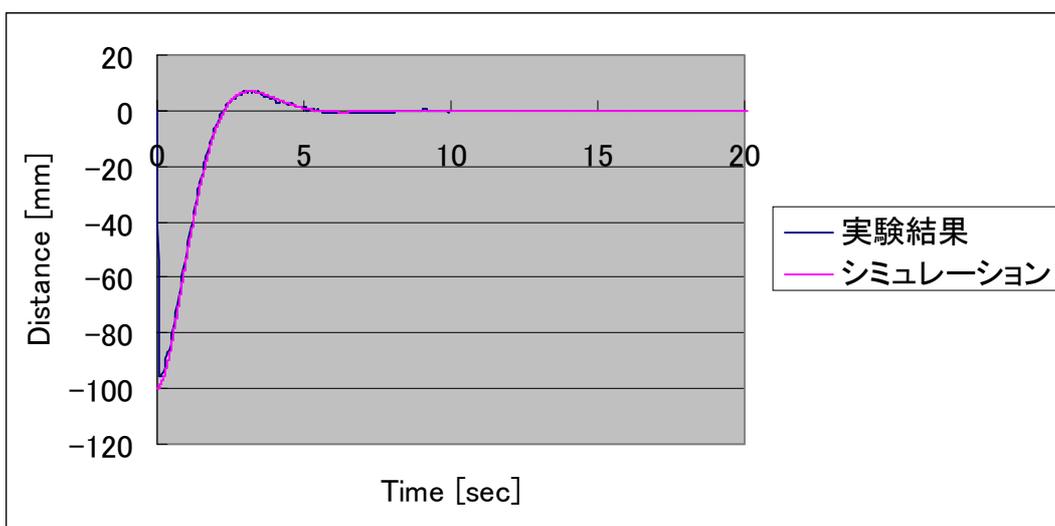


(b) 変位

図 4.34 実験 2  $M=300$  [kg]  $K=500$  [N/m]  $C=300$  [Ns/m]

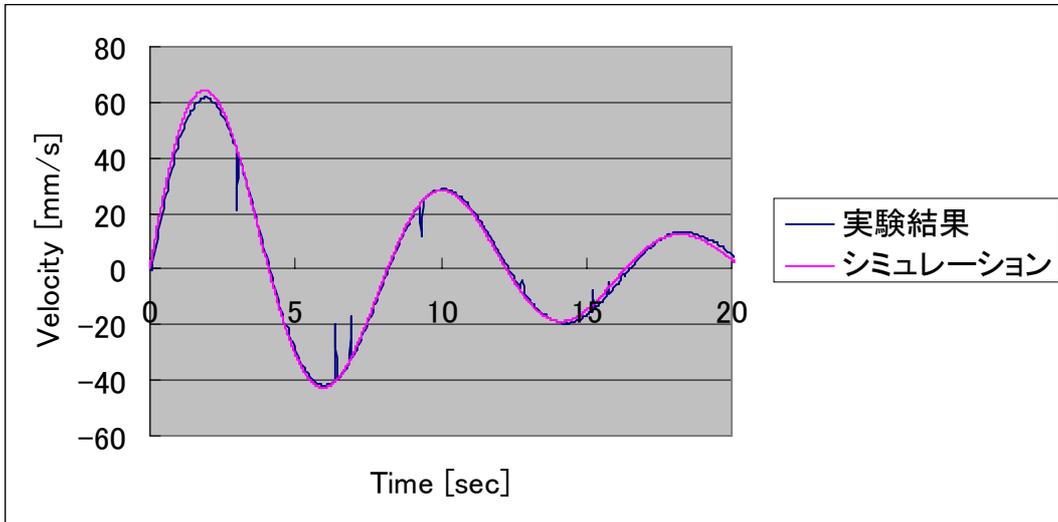


(a) 速度

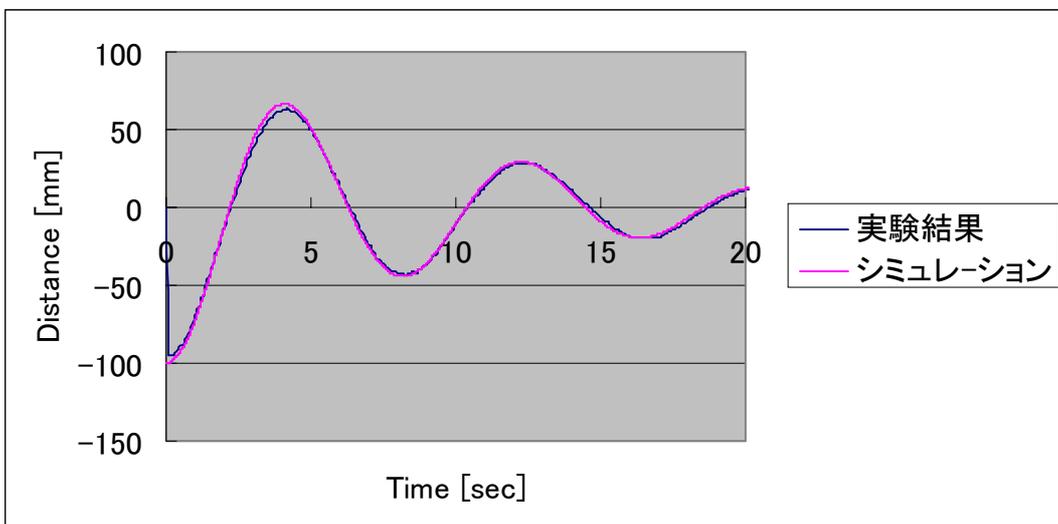


(b) 変位

図 4.35 実験 2  $M=300$  [kg]  $K=500$  [N/m]  $C=500$  [Ns/m]

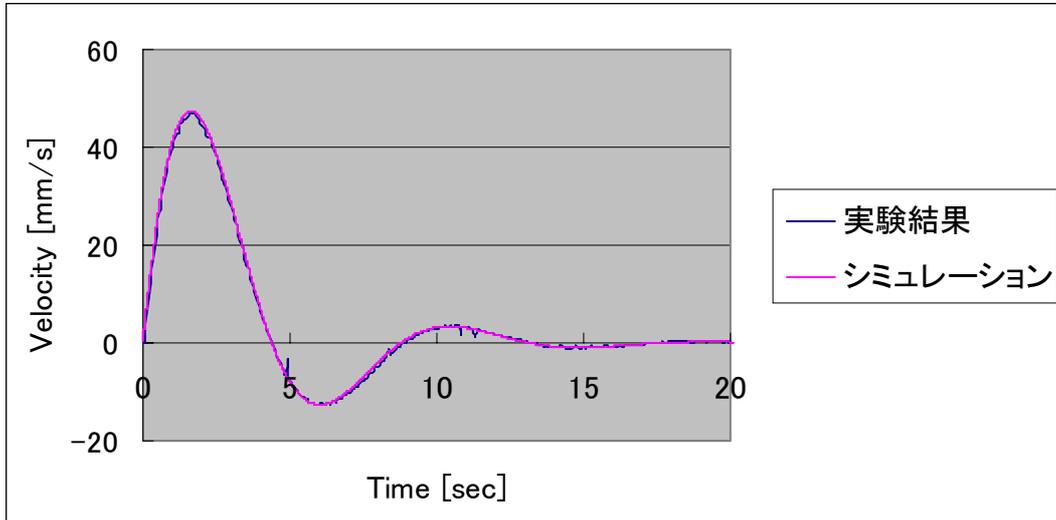


(a) 速度

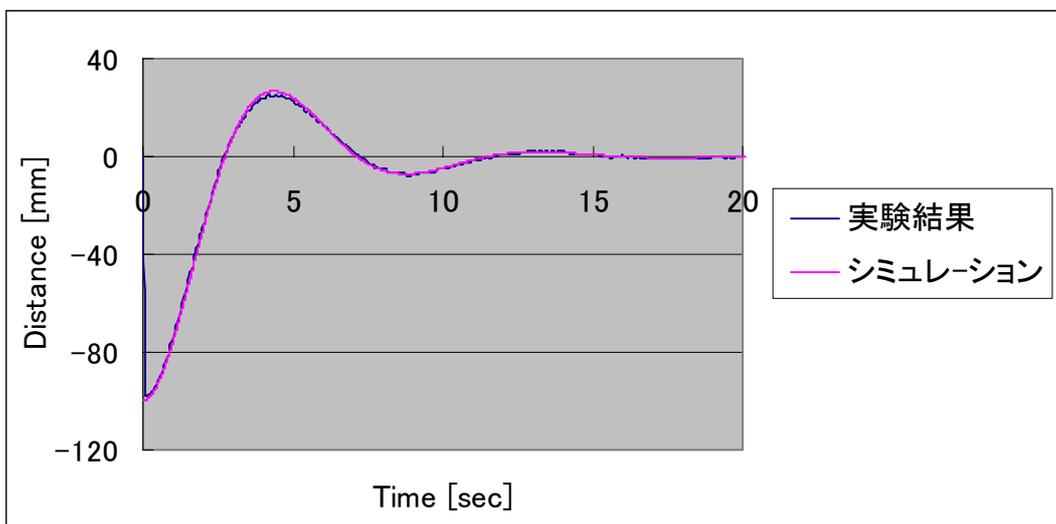


(b) 変位

図 4.36 実験 2  $M=500$  [kg]  $K=300$  [N/m]  $C=100$  [Ns/m]

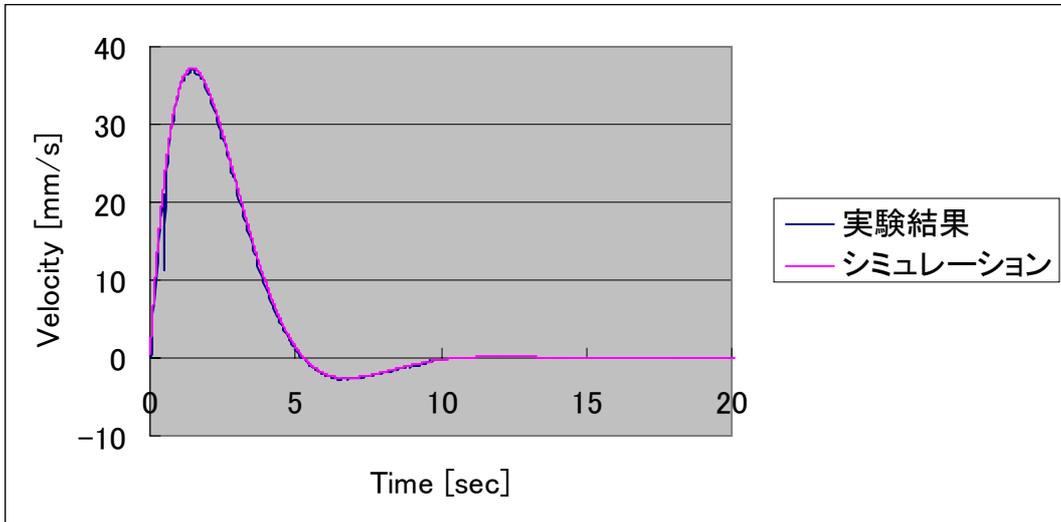


(a) 速度

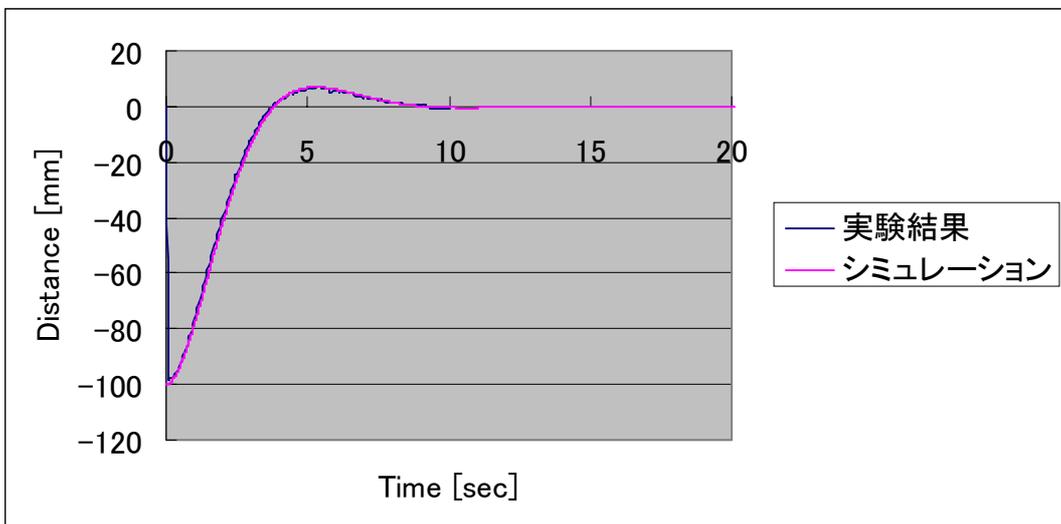


(b) 変位

図 4.37 実験 2  $M=500$  [kg]  $K=300$  [N/m]  $C=300$  [Ns/m]

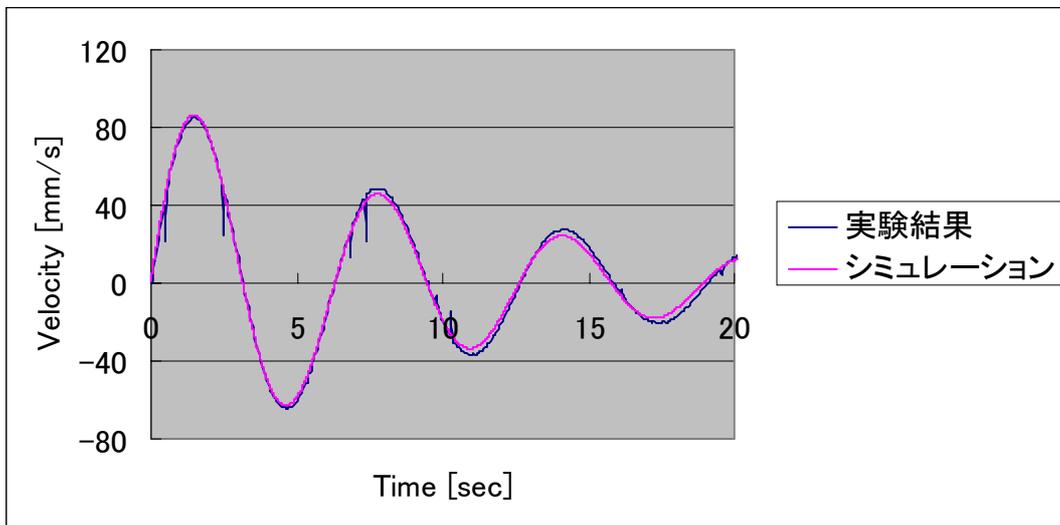


(a) 速度

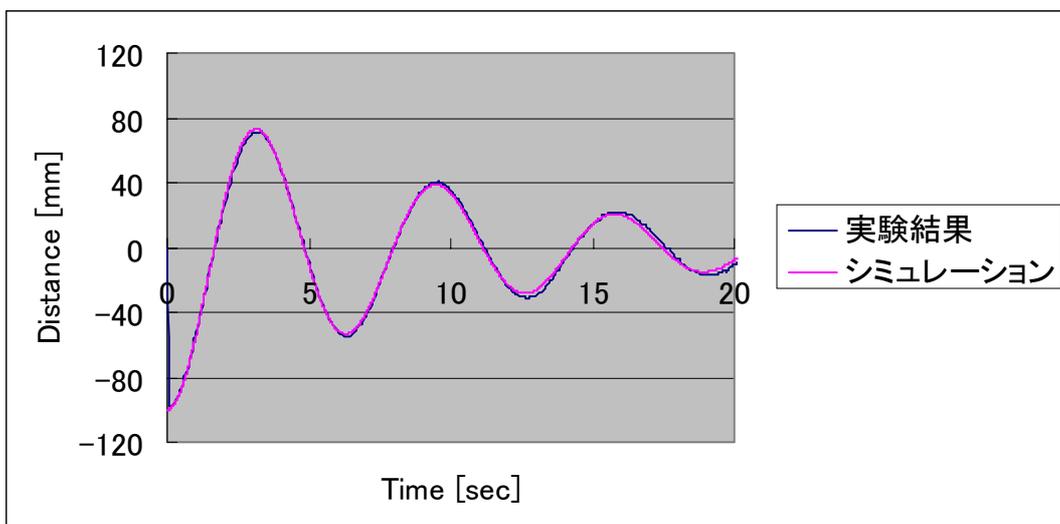


(b) 変位

図 4.38 実験 2  $M=500$  [kg]  $K=300$  [N/m]  $C=500$  [Ns/m]

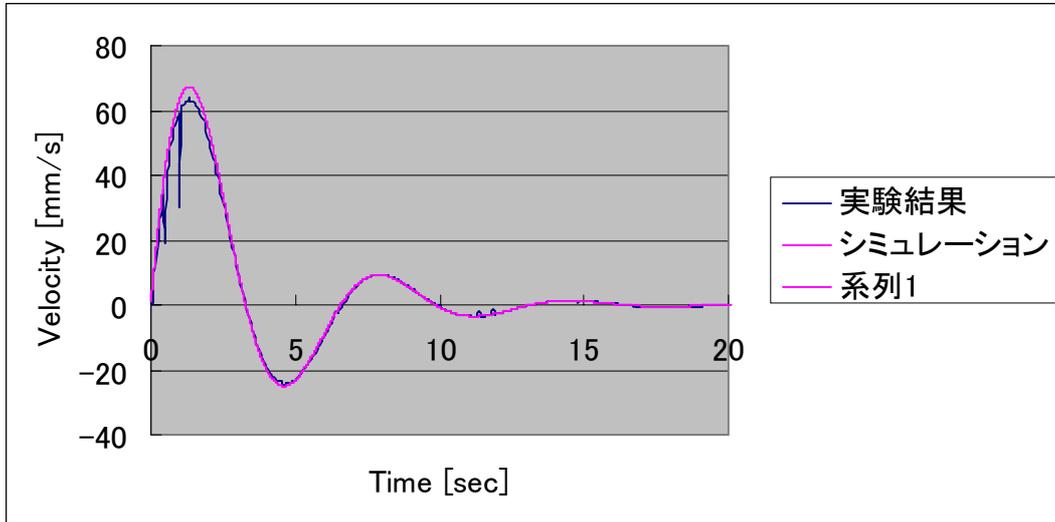


(a) 速度

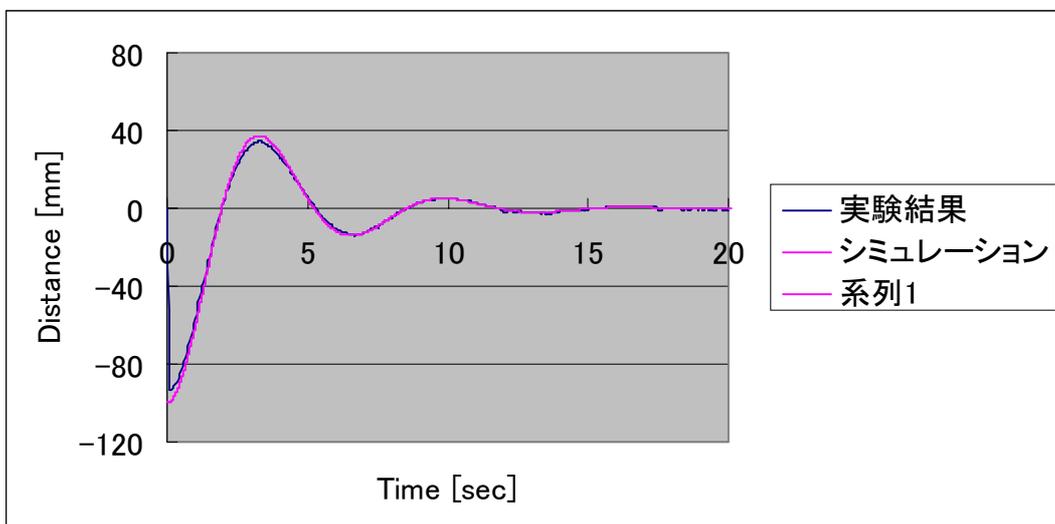


(b) 変位

図 4.39 実験 2  $M=500$  [kg]  $K=500$  [N/m]  $C=100$  [Ns/m]

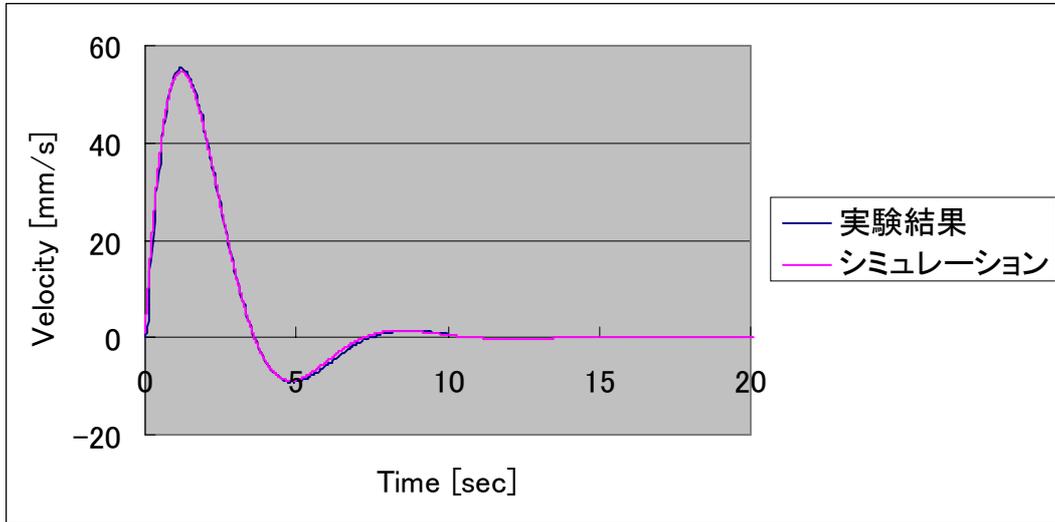


(a) 速度

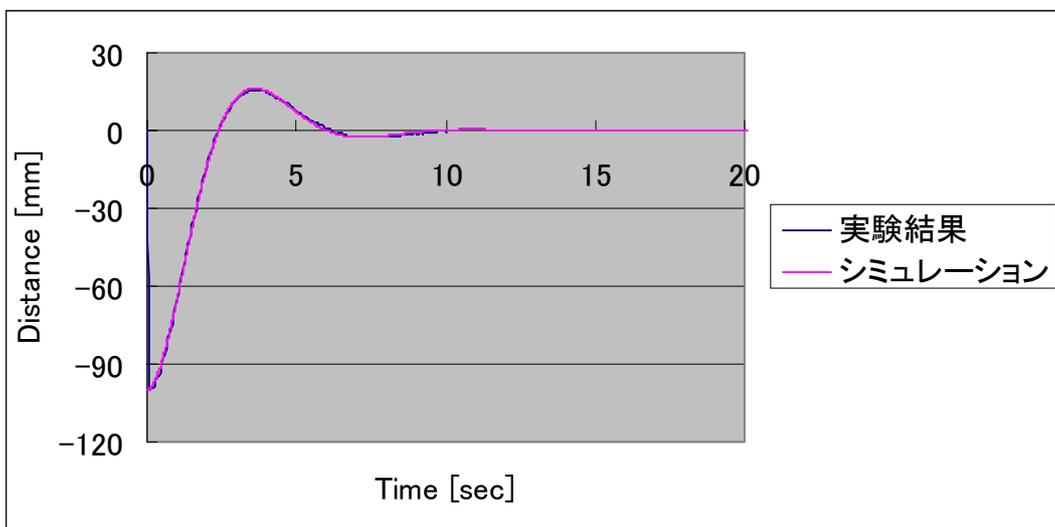


(b) 変位

図 4.40 実験 2  $M=500$  [kg]  $K=500$  [N/m]  $C=300$  [Ns/m]



(a) 速度



(b) 変位

図 4.41 実験 2  $M=500$  [kg]  $K=500$  [N/m]  $C=500$  [Ns/m]