

機能モデルによる直流モータの運動予測

秋山, 峻太郎 / AKIYAMA, Shuntaro

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

80

(発行年 / Year)

2015-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2015-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2014 年度 修士論文

機能モデルによる直流モータの運動予測

指導教員 新井和吉

大学院工学研究科
機械工学専攻修士課程

12R1101 あきやま 秋山 しゅんたろう 峻 太郎

目次

1. 緒論	1
1.1 研究背景	
1.2 目的	
2. 機能モデル	4
2.1 モデル化について	
2.1.1 モデルとは	
2.1.2 モデル化の手順	
2.1.3 モデルの評価	
2.2 機能モデル	7
2.2.1 従来モデル化手法の概要	
2.2.2 機能モデルの構成	
2.2.3 機械系の機能モデル	
2.2.4 電気系の機能モデル	
3. 直流モータの機能モデル化	29
3.1 モータについて	
3.1.1 モータの機能	
3.1.2 直流モータの内部構造	
3.1.3 直流モータの回転原理とトルク	
3.1.4 スロット	
3.1.5 モータの特性	
3.1.6 ロータリーエンコーダ	
3.2 直流モータの機能モデル	39
3.2.1 モデルの概要	
3.2.2 モータの理想モデル	
3.2.3 直流モータの簡易型機能モデル	
3.2.4 シミュレーション結果	
3.2.5 考察	

4. 直流モータの計測実験-----	51
4.1 実験	
4.1.1 実験内容	
4.1.2 実験方法	
4.1.3 実験対象と装置	
4.2 実験結果	
4.3 モータの抵抗値の計測	
5. モデルとの比較-----	57
5.1 モデルとの比較	
5.1.1 比較方法	
5.1.2 物理特性値	
5.1.3 シミュレーション結果	
5.1.4 実験値との比較結果	
5.1.5 慣性モーメントの同定	
5.1.6 同定後の角速度比較	
5.2 結果・考察	
6. トルク変動を考慮した機能モデル-----	67
6.1 トルク変動の考慮	
6.1.1 概要	
6.1.2 トルク変動の組み込み	
6.1.3 スロットの考慮	
6.2 結果	
7. 結論-----	74
7.1 結論	
7.2 今後の課題	
8. 付録-----	76
8.1 モータの仕様	
8.2 計測プログラム	
参考文献-----	79
謝辞-----	80

1. 緒論

1.1 研究背景

近年，IT 技術の発展によりグローバル化が急速に促進された．それに伴い各種メーカーは苛烈な世界規模の開発競争に身を投じており，製品開発期間の短縮およびコストの低減を実現するためモデルベース開発（MBD－Model Based Development－）の導入が不可欠になっている^{(1)~(5)}．

MBD の役割は製品開発の上流段階である企画・開発段階での機能・性能の検討がコンピュータ上の仮想製品で行われることにある．しかしながら従来のモデル化手法，たとえば有限要素法（FEM）は解析を目的として発達しており，形状・寸法が決定された後でないと機能・性能の検討ができず，製品開発の業務とは逆の手順を行うことになる（図 1.1）．また，有限要素モデルは構造や強度の検討は得意であるが，機械内部の機能部品の間で行われるエネルギー発生・変換・伝達を表すことには不向きである^{(2) (3)}．以上の理由から，開発の初期段階で用いる MBD のためのモデル化手法としては必ずしも最適ではないと考えられる．

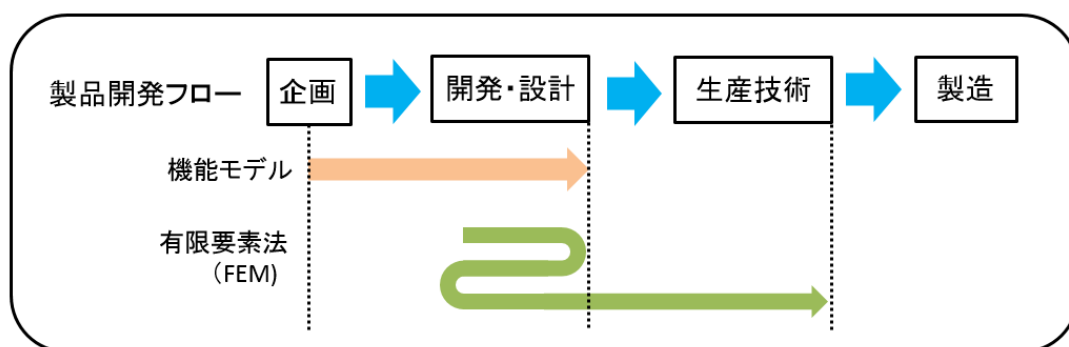


図.1.1 製品開発フローとモデル化手法

また，機械は多くの部品群から構成されるため，MBD に用いられるモデルも現実の実機と同じように小規模部品群から大規模部品群，そして大規模部品群から全体製品へと組み立てや部品の入れ替えが可能であるべきである（図 1.2）．そのためモデルには，各部品群での統合による水平展開および，同じレベルの部品群を統合することにより小から大規模な上位モデルを形成する垂直階層化ができることが望ましい^{(2) (3)}．また，大規模なモデルへと展開する為に，電気・機械などの異なる物理領域間を自在に横断して変換・流動するエネルギー現象を共通の手法を用いて統合シミュレーションできなくてはならない^{(2) (3)}．

上記の問題および要件を解決するモデル化手法として「機能モデル」が提案された．

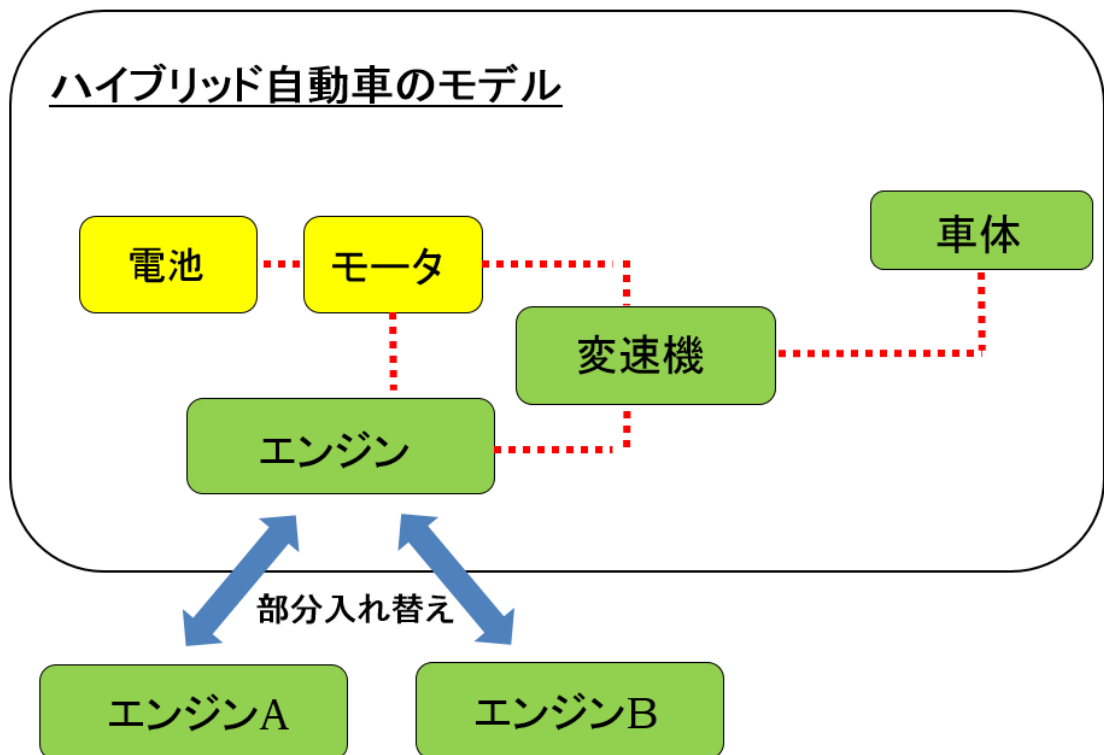


図 1.2 独立したモデルの入れ替えと統合

1.2 目的

一般に機械は、エネルギーの変換・移動により機能し使命を果たす。瞬時エネルギーは、電気系では電圧 V と電流 I の積からなる電力、機械系では速度 v と力 f の積あるいは角速度 ω とトルク T の積からなる動力の形をとる。機能モデルにおける物理機能線図では、モデルの入出力を、瞬時エネルギーを用いて標準化することにより、専門物理領域を越えてモデルを接続・分離・展開・統合・分解できる⁽³⁾。

そこで本研究では、機能モデルの目的および基本的な概念を示すと共に、電気系と機械系の一体モデルとして直流モータの一般的な状態方程式を機能モデルにおけるモータ定数という概念を用いて物理機能線図でモデル化する。また、直流モータ実機による実験を行いその結果との比較から本研究で作成した機能モデルの評価を行う。

2.機能モデル

2.1 モデル化について

2.1.1 モデルとは

初めに、モデルとモデル化について説明する。

モデル（模型）とは、一般的に「現実世界を何らかの方法で表現したもの」であり、モデルを作成することをモデル化という⁽⁹⁾。たとえば地球儀は地球をモデル化したものであり、地球（現実）を地球儀（モデル）で表現することにより、我々は地理情報を都合よく得ることができる。また、自然科学分野では、現実の物理現象の中でも必要な部分だけ抜き出して簡略化し数式で表す「数理モデル」を作成する（図 2.1）。

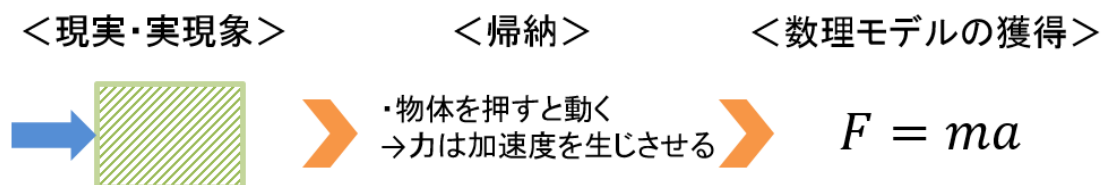


図 2.1 現象と数理モデル

得られた数理モデルは、コンピュータにより数値シミュレーションに用いられる。シミュレーションとは「モデルを用いて実際の現象や実物の動作を模擬すること⁽⁹⁾」である。モデルのパラメータを変更し繰り返し動作を調べることで、シミュレーションから実際の現象や実物に関する情報を得て問題を解決したり、動作を分析して設計・計画に用いたりする。近年はコンピュータの性能向上によりシミュレーションが容易になり、ものづくり現場の設計・開発のコスト低減に大きく貢献している。

2.1.2 モデル化の手順

モデル化する際の留意点について述べる（図 2.2）。

初めに、モデルを作成して何がしたいかという「目的」を明確にするべきである。そして次に、目的を満たすにはその対象・現象のどの要素をモデルに組み込むかを考える。要素は多く取り入れれば正確で精密になるが、その反面、情報量が多く複雑になるため使い勝手が悪くなる⁽⁹⁾。要素の選定後、要素間の関係を考察しモデルを作成する。

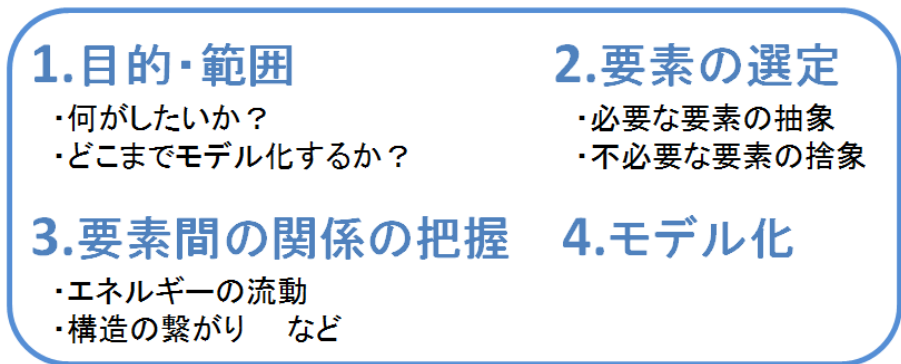


図 2.2 モデル化の手順

2.1.3 モデルの評価

作成されたモデルは、目的とした対象・現象を正しく表現できているかどうか評価しなければならない。工学では実機の性能を実験で計測し、その値をモデルのシミュレーション結果（予測値）と比較しモデルを評価する同定試験が一般的である（図 2.3）。予測値が実機と違う場合はモデルを修正し、再度同定試験を行う。

モデルベース開発（MBD）において、一つのモデルの不具合が見逃されれば最終製品の性能未達という大きな問題を生じてしまう可能性があるためモデルの評価は重要である。

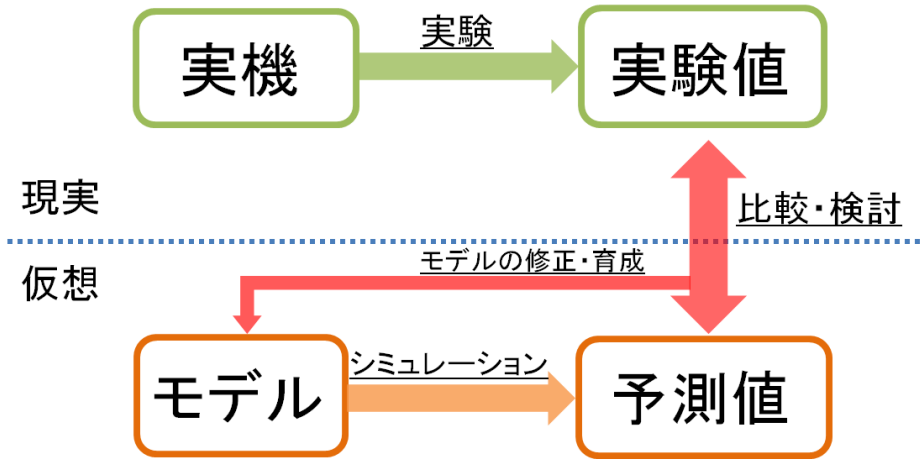


図 2.3 同定試験の流れ

2.2 機能モデル

2.2.1 従来モデル化手法の概要

現在，製品開発の場で多く用いられているモデル化手法および，それらのモデルベース開発（MBD）における問題点について述べる．

○有限要素法（FEM・Finite Element Method）

・利点

- ・3DCAD の構造データをそのままモデル化でき利便性・直観性に優れる．
- ・大規模かつ複雑な構造・形状もモデル化できる．
- ・静力学，振動，流体，音響，熱などの多分野の解析ができ応用性が高い⁽³⁾．
- ・モデル化の手順が自動化され，初心者でも容易に作成できる⁽³⁾．

・MBD における欠点

- ・構造が決定しないとモデル化できず，開発の流れと逆行する⁽³⁾．
- ・部品間のエネルギー流れが分からず，機能を表現するには不向き⁽³⁾．

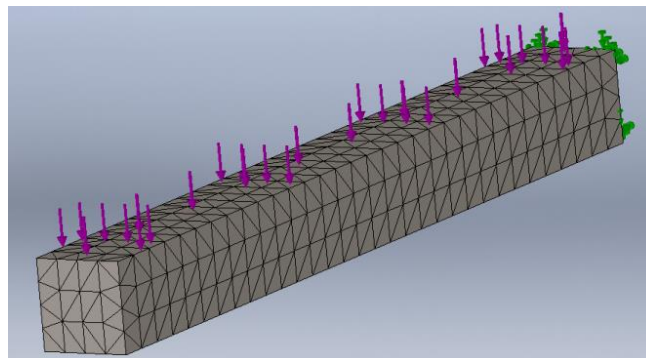


図 2.4 有限要素法 FEM の例

○力学モデル

・利点

- ・広く一般的に用いられている．

・MBD における欠点

- ・その分野の専門知識がなければモデル図を見ただけでは理解し辛い．
- ・他分野のモデルを接続できず，複合物理領域のモデルを作成できない．たとえば，機械力学モデルと電気モデル．
- ・エネルギーの流れが視覚的にわからない．

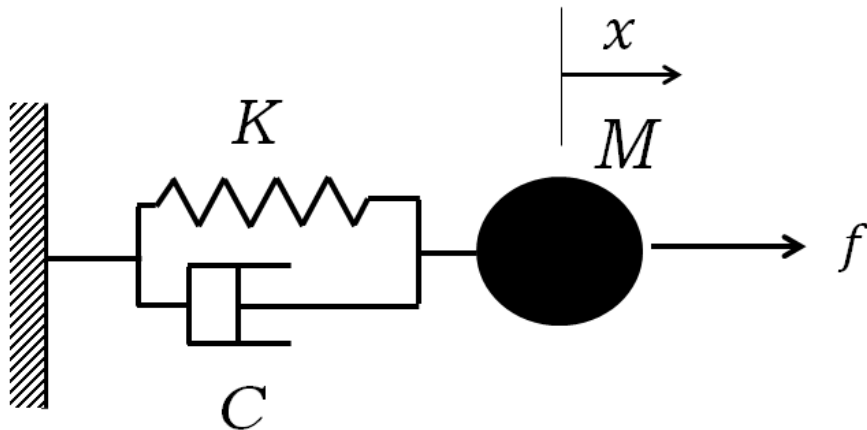


図 2.4 機械系モデル（一自由度減衰系）

上記の従来モデルの問題を解決し，大規模な複合領域シミュレーションを実行するために機能モデルは開発された⁽¹⁾．

○機能モデルの特徴

- ・制御工学で用いるブロック線図のように，ブロックを線でつないだ線図であり，物理法則に基づく特性の機能が視覚的に理解できるよう図示される⁽³⁾．
- ・異なる物理領域間を統合するため，エネルギー（正確には仕事率）の流動・交換による状態量の推移を表現する．

2.2.2 機能モデルの構成

物理系は，一般に「状態量」「特性」「係数」から構成される．

1) 状態量

系の状態を表現する量であり，「内包量」と「外延量」に分けられる．内包量は力，トルク，電流などであり，外延量は速度，角速度，電圧などである．また，内包量と外延量の積はエネルギー（正確には仕事率 P 単位はワット[W]）になる（表 2.1）．

$$F \times v = T \times \omega = I \times V = P \quad (2.1)$$

表 2.1 内包量, 外延量の例とその名称と記号, 単位の関係

	名称	記号	単位
内包量	力	F (force)	N
	トルク	T (torque)	N・m
	電流	I (intensity)	A
外延量	速度	v (velocity)	m/s
	角速度	ω	rad/s
	電圧	V (voltage)	J/C
	瞬時エネルギー (仕事率, 電力)	P (power)	W (J/s)

2) 特性

内包量と外延量を関係づける量であり系の性質を表す.

大別すると, エネルギーを蓄積する蓄積特性である質量, ばね剛性, 自己インダクタンスと, エネルギーの消費を伴う損失特性を有する粘性抵抗, 電気抵抗がある.

3) 係数

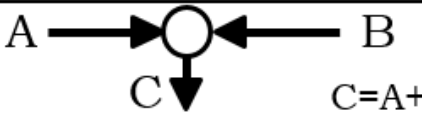
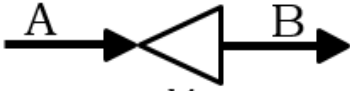
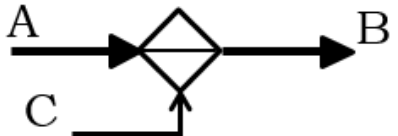
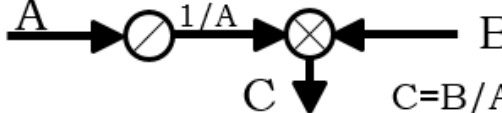
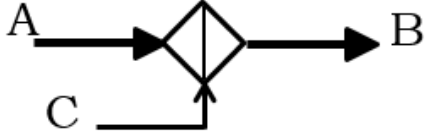
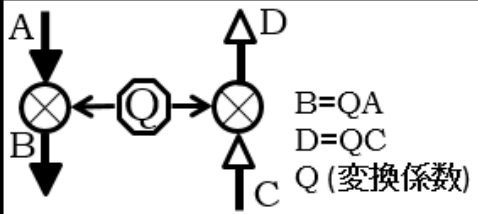
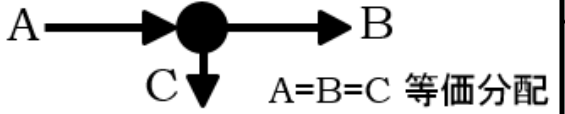
内包量または外延量同士を関係づける数や量であり, 次の3種類に分けられる.

- ① ギア比のように同じ物理単位系同士を関係づける無単位量.
- ② 半径や面積のように異なる物理単位系同士を関係づける有単位量.
- ③ 損失率や制御系のゲインのように, エネルギーの増減を伴う量.

4) 記号の意味

主に使用される記号の説明を表 2.2 に示す.

表 2.2 機能モデルの主な記号

	内包量(力トルク 電流)
	外延量(速度 角速度 電圧)
	信号 指示 処理
 $B=GA$ 特性	 $B=\int A \, dt$ 時間積分
 $C=A+B$ 和	 $B=\frac{dA}{dB}$ 時間微分
 $C=B-A$ 差	 引出し
 $C=A \times B$ 積	 スイッチ: if $C=0$ then $B=A$ else $B=0$
 $C=B/A$ 商	 スイッチ: if $C=0$ then $B=0$ else $B=A$
 $B=-A$ 逆符号	 $B=QA$ $D=QC$ Q (変換係数)
 $B=1/A$ 逆数	
 $A=B=C$ 等価分配	
 $B= A $ 絶対値	

5) 入出力

モデルは、最小単位要素から上位に至るすべての単位が、以下のように標準化された入出力を有する.

- ① 内包量と外延量が 1 : 1 で対となる.
- ② 対の一方が入力ならもう一方は出力となる.
- ③ 入出力は単数または複数の対からなる.
- ④ 入力と出力の積はエネルギーとなる. (正確には仕事率).

6) 特性の機能

表 2.3 に主な特性の機能を示す.

・剛性 K

速度 v を乗算し時間積分を行うことで力 F となる.

$$\begin{cases} \dot{F} = Kv \\ F = \int \dot{F} dt \end{cases} \quad (2.2)$$

・弾性 H

弾性 H は剛性の逆数である.

$$\begin{cases} H = \frac{1}{K} \\ \dot{F} = \frac{1}{H} \cdot v \\ F = \int \dot{F} dt \end{cases} \quad (2.3)$$

・質量 M

力 F に質量の逆数 ($1/M$) を乗算し加速度 $\dot{v}$, 時間積分により速度 v となる.

$$\begin{cases} \dot{v} = F \frac{1}{M} \\ v = \int \dot{v} dt \end{cases} \quad (2.4)$$

・慣性モーメント J

回転系では質量 M に代わり慣性モーメント J を用いる.

トルク T に慣性モーメントの逆数 ($1/J$) を乗算し角加速度 $\dot{\omega}$, 時間積分により角速度 ω となる.

$$\begin{cases} \dot{\omega} = T \frac{1}{J} \\ \omega = \int \dot{\omega} dt \end{cases} \quad (2.5)$$

・粘性 C

速度 v を乗算することで力 F となる.

$$F = Cv \quad (2.6)$$

・インダクタンス L

電圧 V にインダクタンスの逆数 ($1/L$) を乗算し時間積分することで電流 I となる.

$$\begin{cases} \dot{I} = V \frac{1}{L} \\ I = \int \dot{I} dt \end{cases} \quad (2.7)$$

・静電容量 C

電流に静電容量の逆数 ($1/C$) を乗算し, 時間積分することで電圧 V となる.

$$\begin{cases} \dot{V} = I \frac{1}{C} \\ V = \int \dot{V} dt \end{cases} \quad (2.8)$$

・抵抗 R

電圧 V に抵抗の逆数 ($1/R$) を乗算し, 電流 I となる.

$$I = V \frac{1}{R} \quad (2.9)$$

表 2.3 特性の機能

剛性(K)	(速度 v) $\rightarrow$ $\triangleright$ K $\rightarrow$ $\triangleleft$ (力 F)
弾性(H)	(速度 v) $\rightarrow$ $\triangleright$ $1/H$ $\rightarrow$ $\triangleleft$ (力 F)
質量(M)	(力 F) $\rightarrow$ $\triangleright$ $1/M$ $\rightarrow$ $\triangleleft$ (速度 v)
慣性モーメント(J)	(トルク T) $\rightarrow$ $\triangleright$ $1/J$ $\rightarrow$ $\triangleleft$ (角速度 ω)
粘性(C)	(速度 v) $\rightarrow$ $\triangleright$ C $\rightarrow$ (力 F)
インダクタンス(L)	(電圧 V) $\rightarrow$ $\triangleright$ $1/L$ $\rightarrow$ $\triangleleft$ (電流 I)
静電容量(C)	(電流 I) $\rightarrow$ $\triangleright$ $1/C$ $\rightarrow$ $\triangleleft$ (電圧 V)
抵抗(R)	(電圧 V) $\rightarrow$ $\triangleright$ $1/R$ $\rightarrow$ (電流 I)

2.2.3 機械系の機能モデル

① 速度と力の物理量対

物理機能モデルにより，機械系モデルを作成する場合，物理量対つまり上下の線の組み合わせは，速度・力となる（図 2.5）．この速度線と力線の対である図(a)に機能要素やその内部にある特性，係数などを互いに結合して瞬時エネルギー(仕事率)を伝える．

また，図(b)と(c)に示す側負荷は速度 V_0 を供給する速度源や，力 F_0 を供給する力源となる．

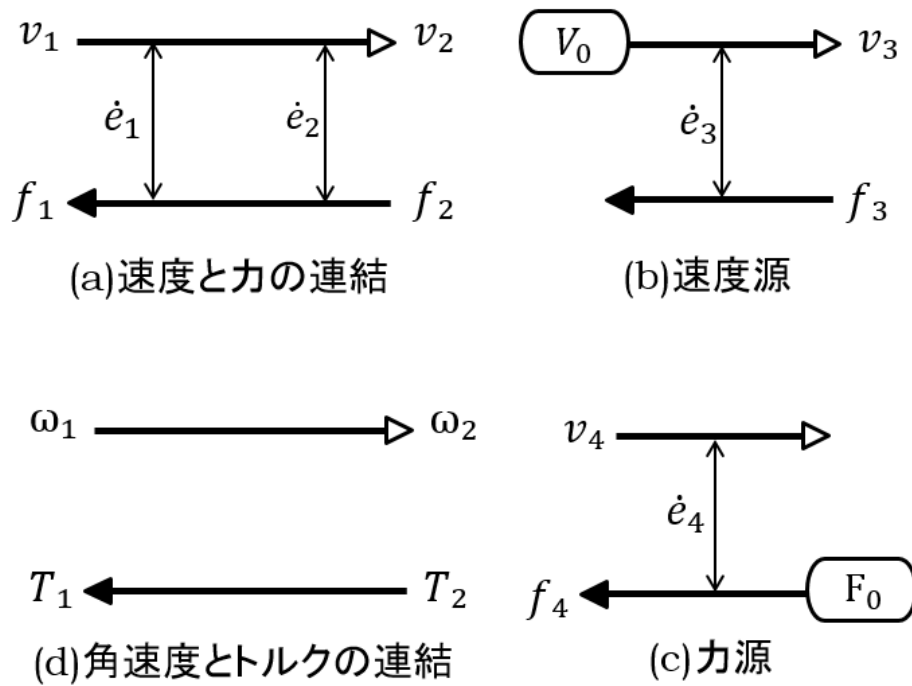


図 2.5 物理量対（機械系）

図(a)は，左右の物理量対 (v_1, f_1) と (v_2, f_2) を連結し，これを表す速度 $v_1 = v_2$ と力 $f_2 = f_1$ の対は機械同士を直接つなぐ軸や梁などの連結式を表す⁽¹³⁾．

$$\begin{cases} v_1 = v_2 \\ f_1 = f_2 \end{cases} \quad (2.10)$$

この両端物理量対を構成する速度と力の積は，次の瞬時エネルギー(仕事率)の $\dot{e}_1$ と $\dot{e}_2$ を受け渡す⁽¹³⁾．

$$\dot{e}_1 = v_1 f_1 = v_2 f_2 = \dot{e}_2 \quad (2.11)$$

また，図(b)の側負荷 V_0 をもつ速度源は，外部に次式に示す速度 v_3 の出力と力 f_3 の入力によって表す機械動力(仕事率)を供給する⁽¹³⁾．

$$\dot{e}_3 = v_3 f_3 = f_3 V_0 \quad (2.12)$$

同様に，図(c)の側負荷 F_0 をもつ力源は外部に次式の力 f_4 の出力と速度 v_4 の入力で表す機械動力(仕事率)を供給する⁽¹³⁾．

$$\dot{e}_4 = v_4 f_4 = v_4 F_0 \quad (2.13)$$

また，物理量対は回転系の場合，図(d)のように速度 v を角速度 ω ，力 f をトルク T にそれぞれ入れ替えればよい．

② 特性

特性は，物理量対を接続する役割を果たす（図 2.6）．本論文の機械系では，図(a),(b),(c)を用いた．図(a),(b)は，瞬時エネルギー(仕事率)を蓄える蓄積特性の質量 M と弾性係数 K ，図(c)は瞬時エネルギー（仕事率）を消費する損失特性の粘性抵抗 C である．

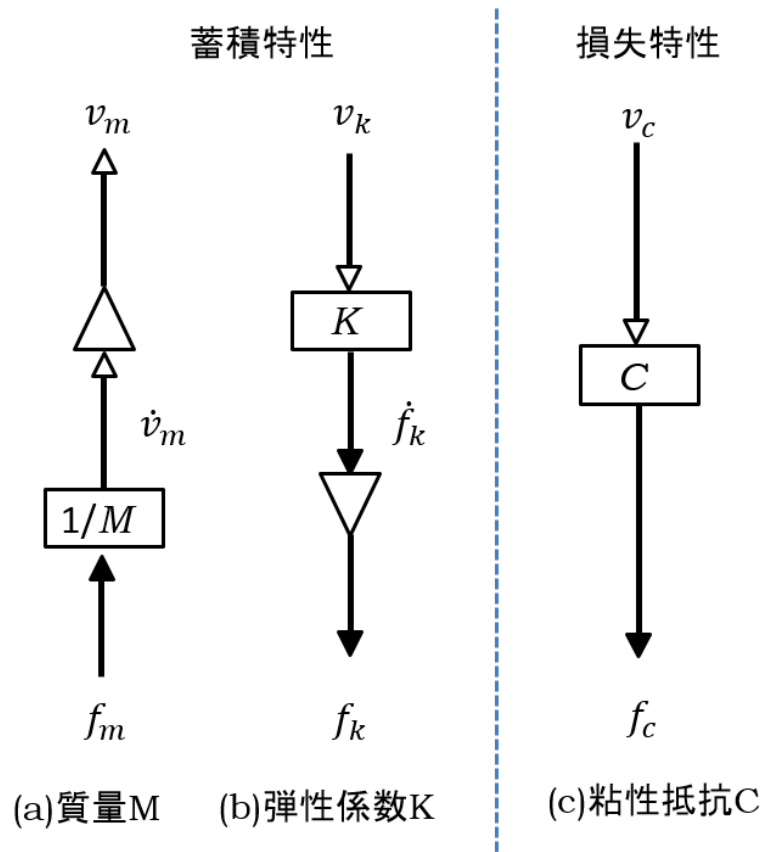


図 2.6 特性の種類（機械系）

●蓄積特性－質量 M－

図 2.7 に示す．質量 M は，それ自身には変形を起こすことがなく，力の差分力($f_m = f_{m1} - f_{m2}$)を受け，それによる加速度 $\dot{v}_m$ を生じる．加速度は，時間経過とともに速度を変化させる($v_m = \int \dot{v}_m dt$)．質量 M はこの速度の変化を力学的エネルギー T_m として蓄える．

$$T_m = \int f_m v_m dt = \int M \dot{v}_m v_m dt = \frac{1}{2} M v_m^2 \quad (2.14)$$

また，回転系では質量は慣性モーメントとなる．

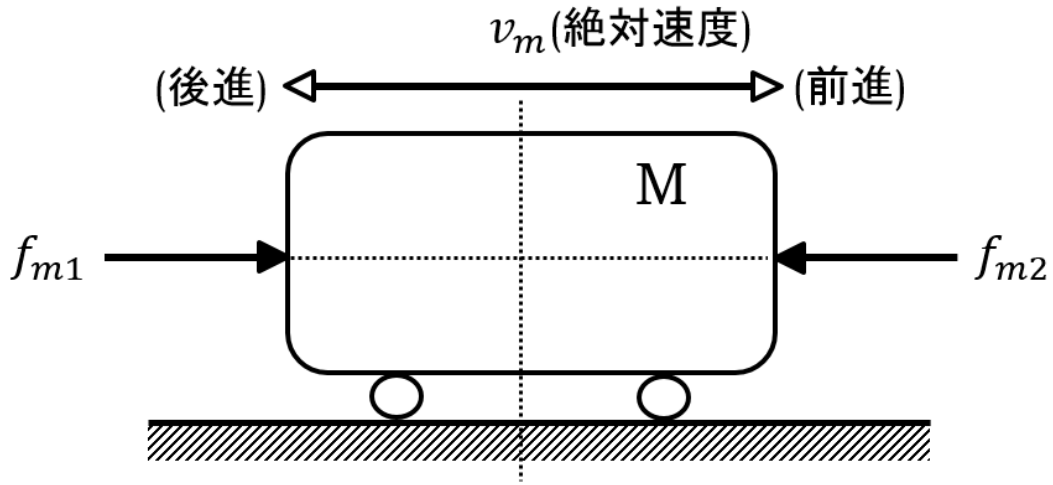


図 2.7 蓄積特性 (質量 M)

●蓄積特性－弾性係数 K－

図 2.8 に示す．弾性係数 K は，速度 v_1 と v_2 の速度差($v_k = v_1 - v_2$)を受けて伸縮し，両端間の速度差に比例した力の変動を生じる($v_k = \frac{1}{K} \dot{f}_k$)．力の変動は時間経過とともに力を変化させる($f_k = \int \dot{f}_k dt$)．弾性係数 K は，この力の変化を力学的エネルギー U_k として蓄える．

$$U_k = \int f_k v_k dt = \int f_k v_k dt = \int f_k \frac{1}{K} \dot{f}_k dt = \frac{1}{2K} f_k^2 \quad (2.15)$$

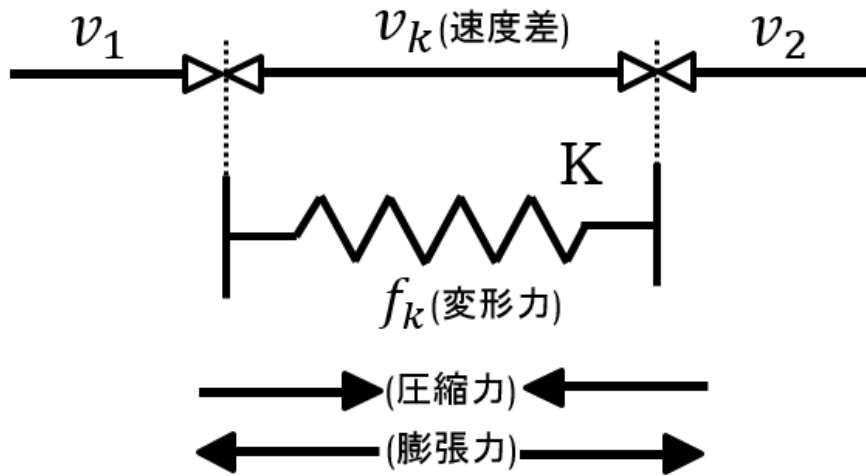


図 2.8 蓄積特性（弾性係数 K ）

●損失特性－粘性抵抗 C －

図 2.9 に示す．粘性抵抗 C は，気体や液体の中に置かれた運動体の運動を阻む方向に力を生じる．運動体の運動方向速度を v_c とすれば，粘性抵抗による抵抗力は， $f_c = Cv_c$ である．この抵抗力 f_c により，系は力学的エネルギーを熱エネルギーとして消費する．その大きさ $\dot{e}_c$ は，次式である．

$$\dot{e}_c = v_c f_c = Cv_c^2 \quad (2.16)$$

また，回転系では粘性抵抗は，回転粘性抵抗となる．

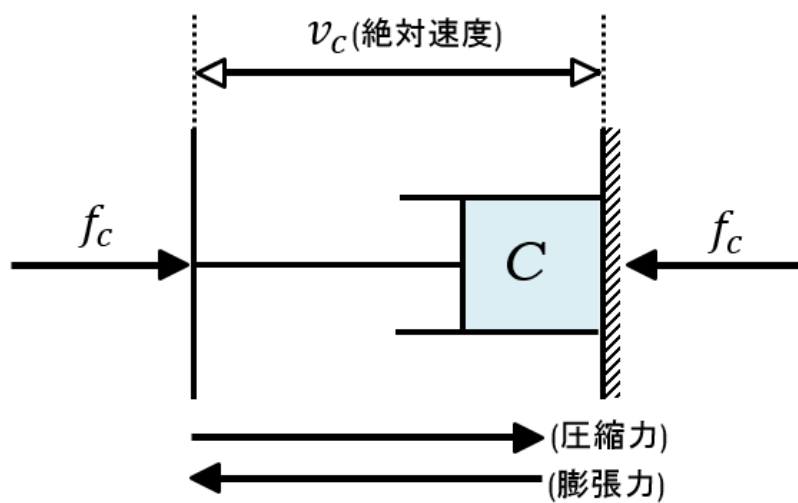


図 2.9 損失特性（粘性抵抗 C ）

③係数

物理特性の入出力端は異なる物理量の速度と力の間を接続するが、係数は機構の入出力端に与える速度・速度と力・力の同種物理量間をつなぐ（図 2.10）。図(a), (b)は効率を表す。例えば図(a)の速度の流れに組み込む速度比やスリップ率などが速度効率 N_v を表し、図(b)の力の流れに組み込むトルク比や圧力比が力効率 N_f を表す。図(c)は、速度と力の流れに挿入する伝達係数であり、速度・速度と力・力の間に挿入して機構などの幾何学的な関係を表す。例えば、無単位の歯車の減速比や有単位のタイヤ半径などがある⁽¹³⁾。

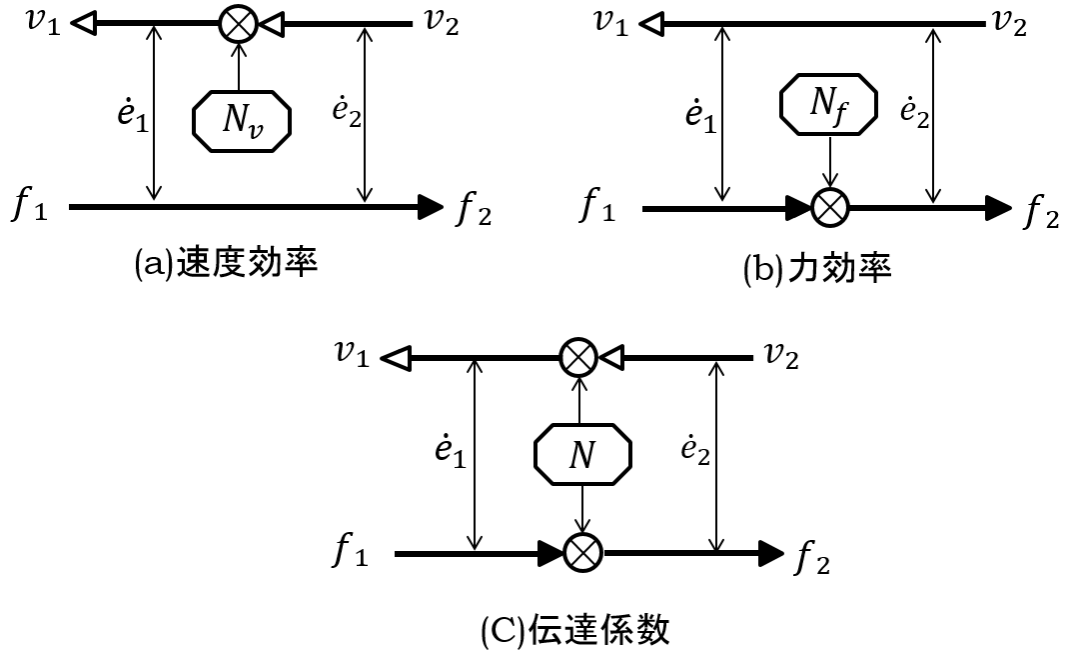


図 2.10 効率と伝達係数

図(a)の速度効率 N_v は次式となる。

$$\begin{cases} v_1 = N_v v_2 \\ f_1 = f_2 \\ \dot{e}_1 = f_1 v_1 = N_v f_2 v_2 = N_v \dot{e}_2 \end{cases} \quad (2.17)$$

同様に、図(b)の力効率 N_f は次式となる。

$$\begin{cases} v_1 = v_2 \\ N_f f_1 = f_2 \\ \dot{e}_1 = f_1 v_1 = \frac{1}{N_f} f_2 v_2 = \frac{1}{N_f} \dot{e}_2 \end{cases} \quad (2.18)$$

この物理量対の片側に挿入する効率(係数)は、流入と流出の瞬時エネルギーに差を生じる。この差は、特性による物理的な損失とは違い人工的なエネルギー消費となりモデル上で、瞬時エネルギーの不釣り合いを生じるので注意が必要である⁽¹³⁾。

図(c)の物理量対 (f_1, v_1) と (f_2, v_2) の間に挿入された伝達係数は $(v_1 \leftarrow v_2)$ と $(f_1 \rightarrow f_2)$ を次式で連結する.

$$\begin{cases} v_1 = N v_2 \\ N f_1 = f_2 \\ \dot{e}_1 = f_1 v_1 = \frac{1}{N} f_2 N v_2 = f_2 v_2 = \dot{e}_2 \end{cases} \quad (2.19)$$

伝達係数は, 受け渡す $\dot{e}_1$ と $\dot{e}_2$ の瞬時エネルギーに影響を与えない等値関係となる.

④物理量対の分岐

図 2.11 の演算子は, 図(a)と(c)の加算形分岐が加算演算子(白抜き丸印)を通して入出力間の流れに力または速度を加え, 図(b)と(d)の差分型分岐が入力の釣り合いを表し, 等値側が速度または力の連続性を表す⁽¹³⁾. また, 図では左から右に流れる瞬時エネルギーを正方向と仮定して, これに逆らう速度と力の流れに, 反作用の負記号がついている⁽¹³⁾.

図(a)と(b)の速度の連続性と力の釣り合いの関係および瞬時エネルギーは次式で表せる.

$$\begin{cases} f_1 = f_2 + f_3 \\ v_1 = v_2 = v_3 \\ v_1 f_1 = v_2 f_2 + v_3 f_3 \\ \dot{e}_1 = \dot{e}_2 + \dot{e}_3 \end{cases} \quad (2.20)$$

同様に, 図(c)と(d)は次式となる.

$$\begin{cases} f_1 = f_2 = f_3 \\ v_2 = v_1 + v_3 \\ v_2 f_2 = v_1 f_1 + v_3 f_3 \\ \dot{e}_2 = \dot{e}_1 + \dot{e}_3 \end{cases} \quad (2.21)$$

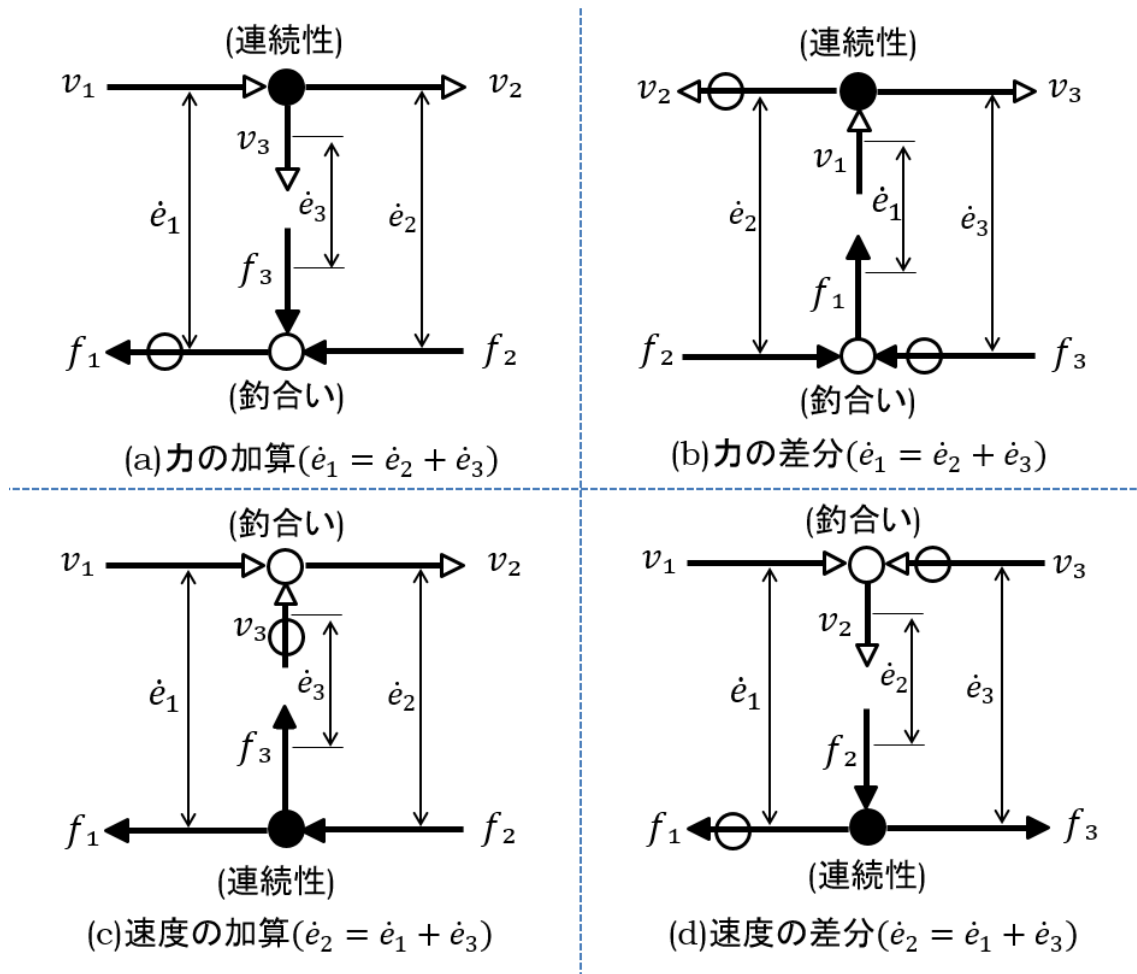


図 2.11 物理量対の分岐

④機械系機能モデルの例－1 質量減衰系－

図 2.12 は質量 M ，ばねこわさ K ，減衰 C からなる 1 質量減衰系の力学モデルである．強制加振力 f_2 が質量 M に作用して速度 v_2 を生じ，支持部に強制速度 v_1 が作用して力 f_1 を生じるとする．質量 M の変位を x_2 ，支持部の変位を x_1 とすればこの力学モデルは式(2.22)で表せる．

$$\begin{cases} M\ddot{x}_2 + C(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K(x_2 - x_1) = f_2 \\ v_2 = \dot{x}_2 \\ v_1 = \dot{x}_1 \\ f_1 = C(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K(x_2 - x_1) \end{cases} \quad (2.22)$$

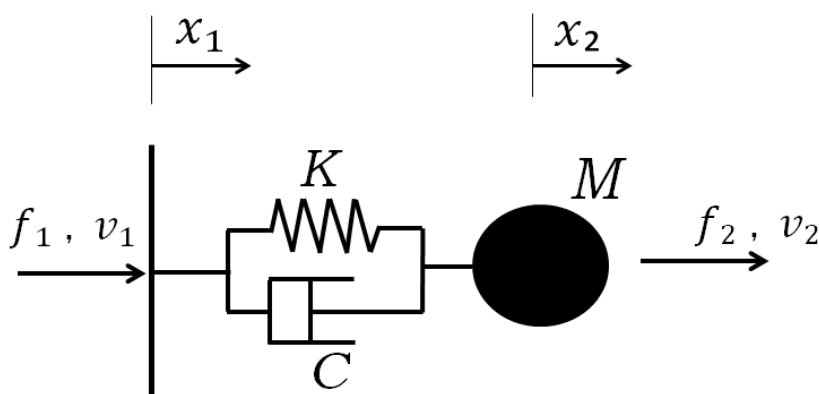


図 2.12 1 質量減衰系の力学モデル

機能モデルを用いて表現すると，図 2.13 となる．

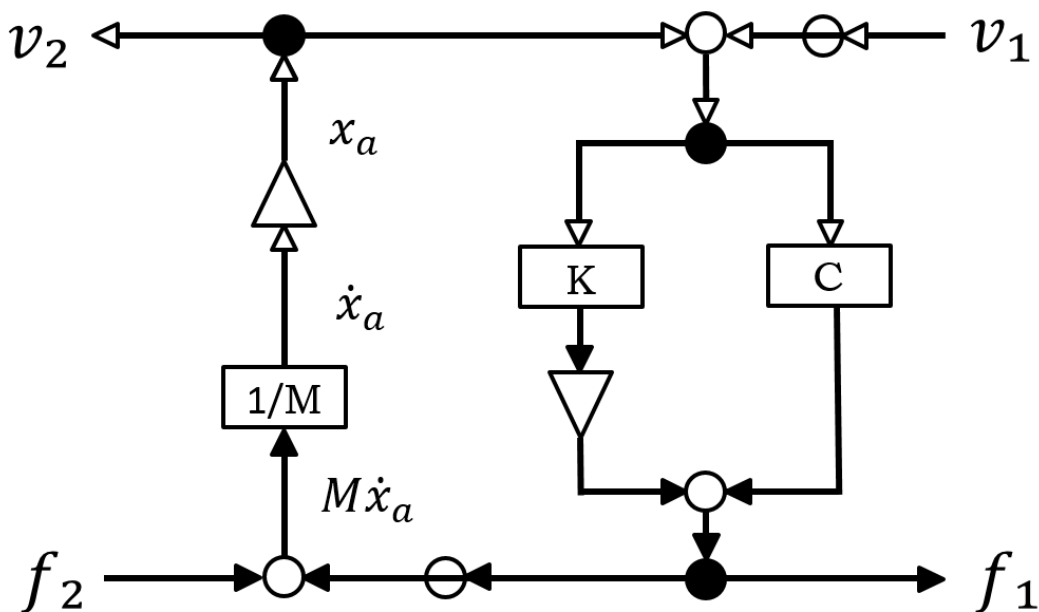


図 2.13 1 質量減衰系の機能モデル

機能モデルより数学モデルを導くには、図の各白丸について式を組み立てる.

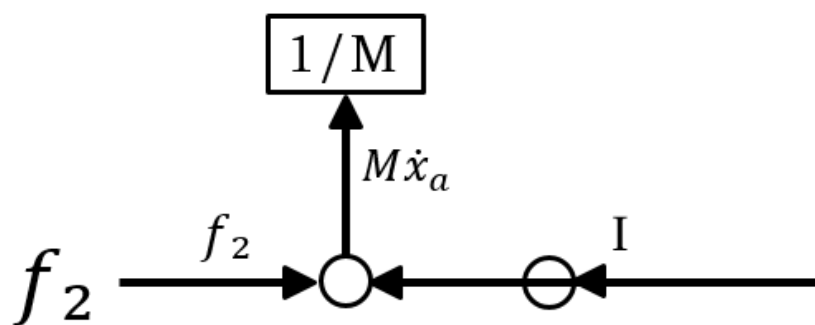


図 2.14 左下白丸

$$M\dot{x}_a = f_2 - I \quad (2.23)$$

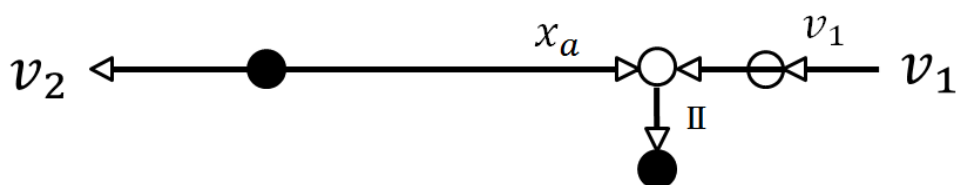


図 2.15 右上白丸

$$(x_a - v_1) = II \quad (2.24)$$

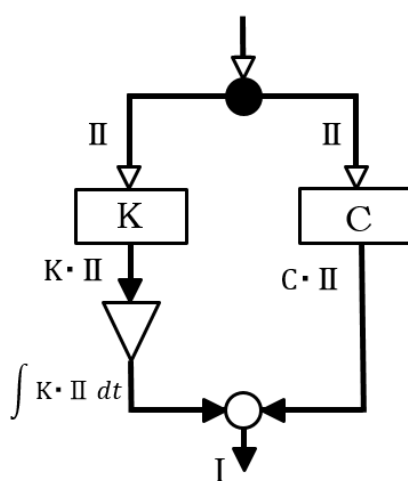


図 2.16 右下白丸

$$I = \int K \cdot II dt + C II \quad (2.25)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} M\dot{x}_a = f_2 - I \\ (x_a - v_1) = \Pi \\ I = \int K \cdot \Pi dt + C \Pi \\ v_2 = x_a \\ f_1 = I \end{array} \right. \quad (2.26)$$

式(2.18)をまとめると式(2.14)と等価であると分かる。

⑤ 機能モデルの例－2 質量減衰系－

図 2.17 は質量 M_3 ，ばねこわさ K_3 ，減衰 C_3 および質量 M_2 ，ばねこわさ K_2 ，減衰 C_2 からなる 2 質量減衰系の力学モデルである。

強制加振力 f_3 が質量 M_3 に作用して速度 v_3 を生じ，質量 M_2 に速度 v_2 および力 f_2 ，支持部に速度 v_1 が作用して力 f_1 を生じるとする．質量 M_3 の変位を x_3 ，質量 M_2 の変位を x_2 ，支持部の変位を x_1 とすればこの力学モデルは式(2.27)で表せる。

$$\left\{ \begin{array}{l} M_3\ddot{x}_3 = f_3 - K_3(x_3 - x_2) - C_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) \\ M_2\ddot{x}_2 = -K_2(x_2 - x_1) - C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + K_3(x_3 - x_2) + C_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) \\ f_1 = K_2(x_2 - x_1) + C_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \\ f_2 = K_3(x_3 - x_2) + C_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) \\ \dot{x}_1 = v_1 \\ \dot{x}_2 = v_2 \\ \dot{x}_3 = v_3 \end{array} \right. \quad (2.27)$$

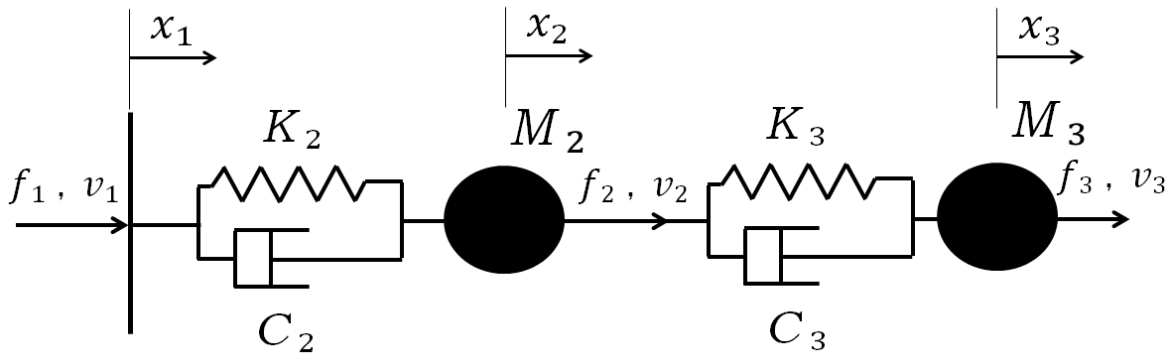


図 2.17 2 質量減衰系の力学モデル

図 2.17 を機能モデルにより表現すると，図 2.18 となる。

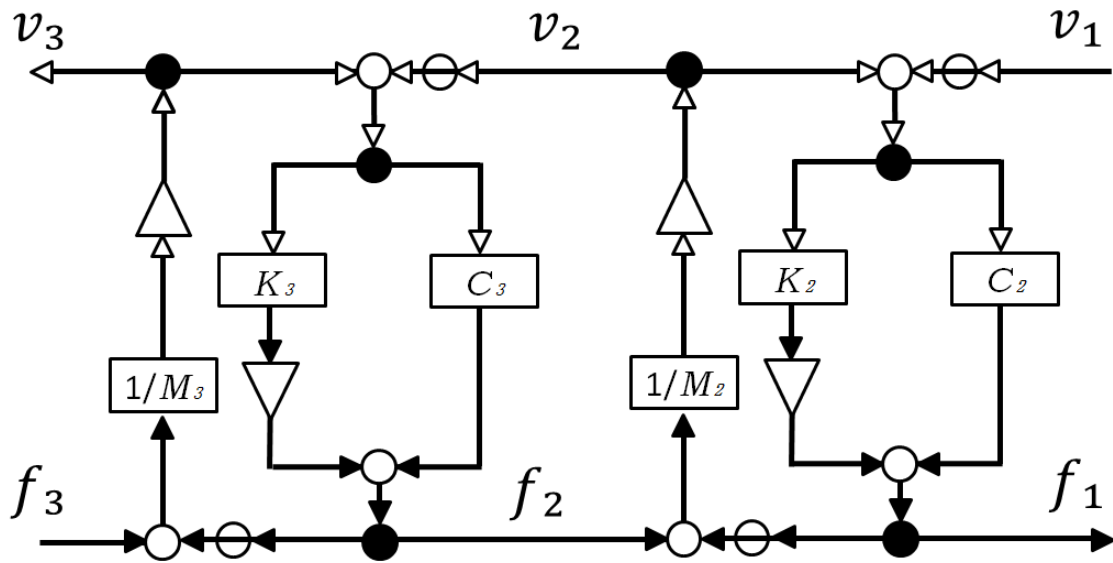


図 2.18 2 質量減衰系の機能モデル

図の各白丸について式を立てれば、図 2.19 となり、これらをまとめると式(2.27)と等価であると分かる。

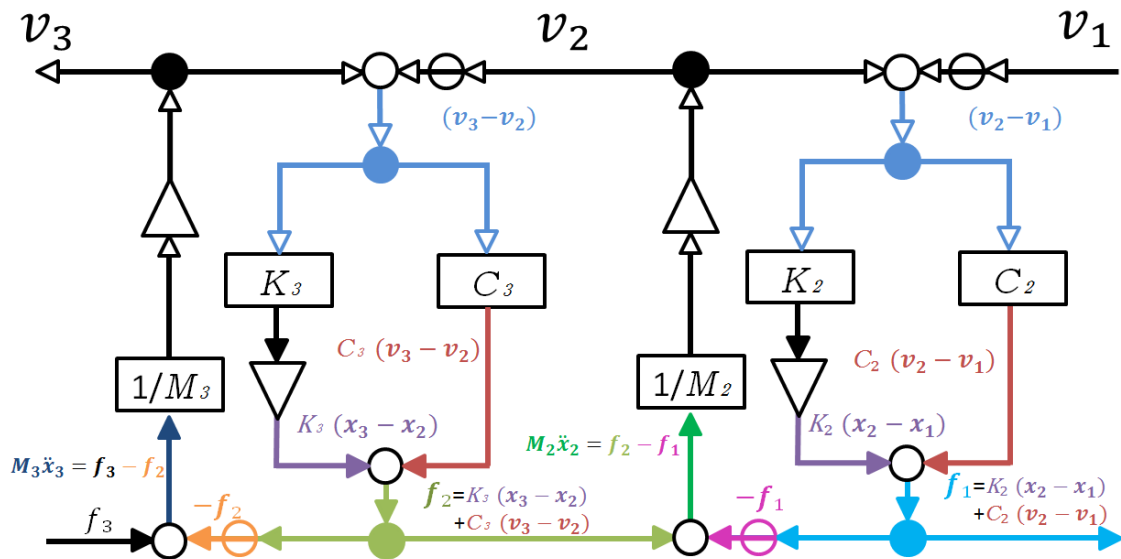


図 2.19 2 質量減衰系の機能モデル(2)

2.2.4 電気系の機能モデル

① 電圧と電流の物理量対

物理機能モデルにより，電気系モデルを作成する場合，物理量対は電圧・電流となる（図 2.20）.

図(b)は，電圧を供給する電圧源，図(c)は電流を供給する電流源である.

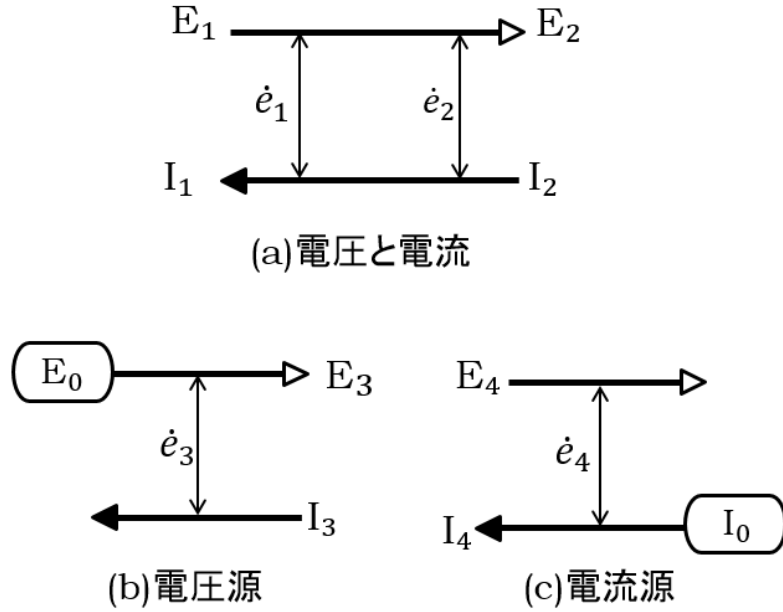


図 2.20 物理量対(電気系)

機械系と同様に図(a)は次式が成り立つ

$$\begin{cases} E_1 = E_2 \\ I_1 = I_2 \\ \dot{e}_1 = E_1 I_1 = E_2 I_2 = \dot{e}_2 \end{cases} \quad (2.28)$$

また，図(b)電圧源は，次式が成り立つ.

$$\dot{e}_3 = I_3 E_3 = I_3 E_0 \quad (2.29)$$

また，図(c)電流源は，次式が成り立つ.

$$\dot{e}_4 = I_4 E_4 = I_0 E_4 \quad (2.30)$$

② 特性

本研究で用いた電気系の特性は，図 2.21 の(a)，(b)に示す瞬時エネルギー(電力)を蓄える蓄積特性の自己インダクタンス L と，瞬時エネルギー(電力)を消費する損失特性である直列抵抗 R の 2 つである．

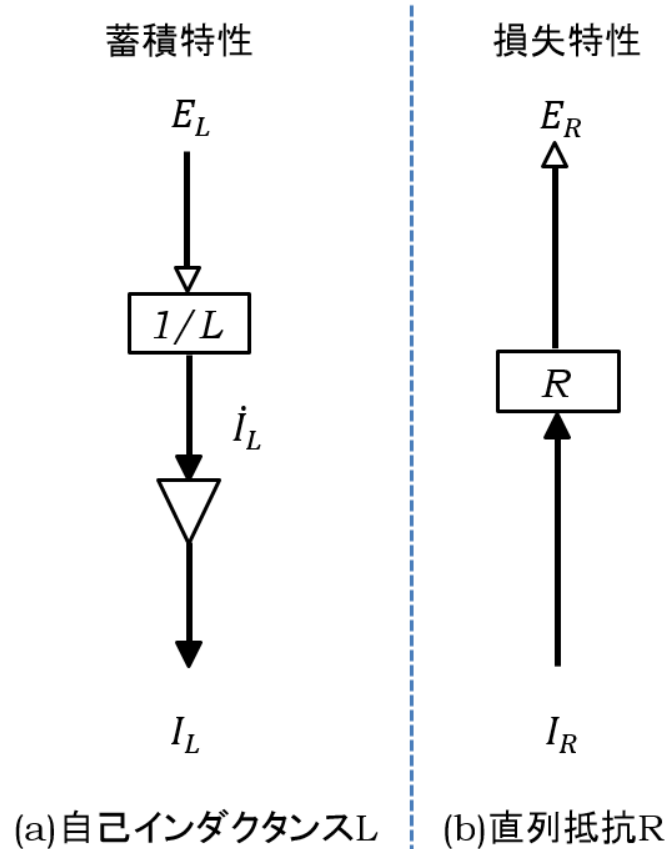


図 2.21 特性の種類(電気系)

●蓄積特性ー自己インダクタンス L ー

図 2.22 に示す．自己インダクタンス L は，コイル両端間の電位の差 $V_L = V_1 - V_2$ を受け，それに比例した電流変動を生じる($V_L = L\dot{I}_L$)．電流の変動は，時間経過とともに電流を変化させる($I_L = \int \dot{I}_L dt$)．自己インダクタンスは，この電流の変化を電氣的エネルギーとして蓄える．

$$U_L = \int I_L V_L dt = \int L \dot{I}_L I_L dt = \frac{1}{2} L \dot{I}_L^2 \quad (2.31)$$

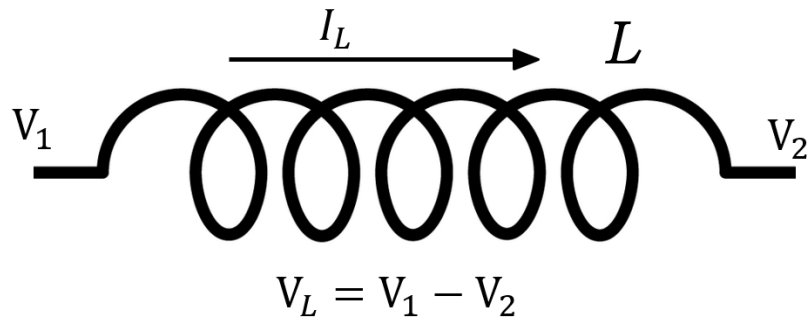
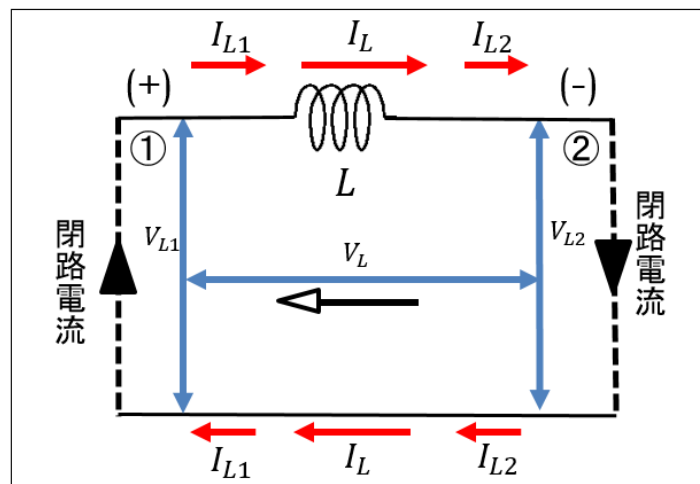


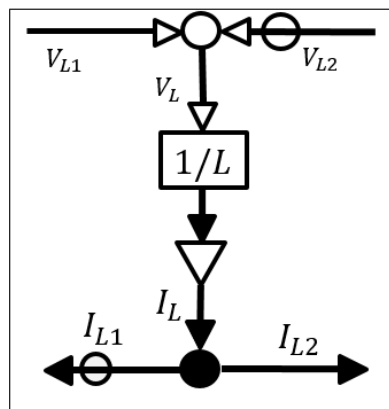
図 2.22 蓄積特性(自己インダクタンス L)

自己インダクタンスの機能モデル表現について説明する.

図 2.23 は電気抵抗が 0 の理想的なインダクタンス L の直列回路, 図(a)と, これを機能モデル化した図(b)である.



(a)回路図



(b)機能モデル

図 2.23 自己インダクタンスの電気回路と機能モデル

自己インダクタンス L の回路は、電流(I_{L1}, I_{L2}, I_L)の連続性と電圧(V_{L1}, V_{L2}, V_L)の釣り合いで表すキルヒホフの電圧則が適用される⁽¹³⁾。直列回路の上側を流れる作用方向の電流は流入電流 I_{L1} 、流出電流 I_{L2} 、自己インダクタンス L を流れる電流 I_L が等値となる。また、端子①-②の間に挿入された自己インダクタンス L には電流 I_L に逆らう方向に電圧 V_L を生じる。

図(b)の式をまとめると

$$\begin{cases} V_L = V_{L1} - V_{L2} \\ -I_{L1} = I_{L2} = I_L \\ I_L = \frac{1}{L} \int V_L dt \end{cases} \quad (2.32)$$

また、入出力端の瞬時エネルギー $\dot{e}_{L1}, \dot{e}_{L2}$ と自己インダクタンス L に蓄える瞬時エネルギー $\dot{e}_L$ は次式となる⁽¹³⁾。

$$\begin{cases} \dot{e}_L = V_L I_L = \frac{1}{2} L I_L^2 \\ \dot{e}_{L1} = V_{L1} I_{L1} = \dot{e}_{L2} + \dot{e}_L \\ \dot{e}_{L2} = V_{L2} I_{L2} \end{cases} \quad (2.33)$$

●損失特性—直列抵抗 R —

直列抵抗 R は、電流の流れにくさであり、電気エネルギーを熱エネルギーにかえて消費する特性を有する。

図 2.24 は、電気抵抗 R の直列回路(図(a))と、これを機能モデルで表した(図(b))である。

抵抗回路は、電流(I_{R1}, I_{R2}, I_R)の連続性と電圧(V_{R1}, V_{R2}, V_R)の釣り合いで表す、キルヒホフの電圧側が適用される⁽¹³⁾。

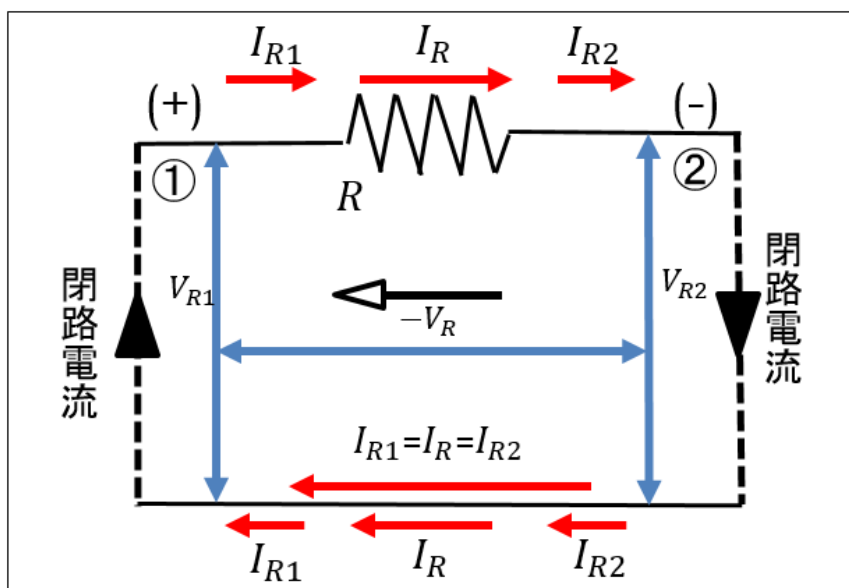
直列回路の上下側を流れる電流は、流入電流 I_{R1} 、流出電流 I_{R2} 、電気抵抗 R の電流 I_R が等値となる。また、端子①-②の間に挿入された電気抵抗 R には、電流 I_R に逆らう方向に逆起電力 V_R を生じる⁽¹³⁾。

図(b)の式をまとめると次式となる。

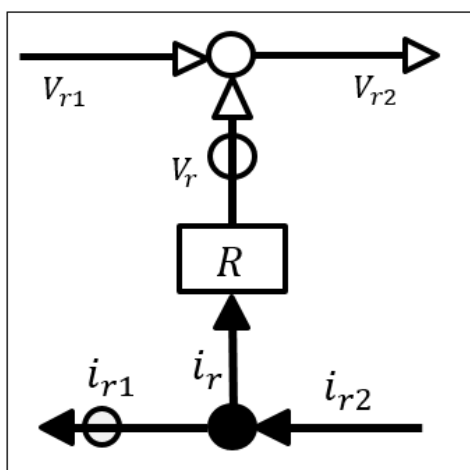
$$\begin{cases} V_{R2} = V_{R1} - V_R \\ -I_{R1} = I_{R2} = I_R \\ V_R = R I_R \end{cases} \quad (2.33)$$

また，入出力端の瞬時エネルギー $\dot{e}_{R1}$ 、 $\dot{e}_{R2}$ と直列抵抗 R が消費するエネルギー $\dot{e}_R$ は，次式となる．

$$\begin{cases} \dot{e}_R = V_R I_R = R i_R^2 \\ \dot{e}_{R1} = V_{R1} I_{R1} = \dot{e}_R + \dot{e}_{R2} \\ \dot{e}_{R2} = V_{R2} I_{R2} \end{cases} \quad (2.34)$$



(a)回路図



(b)機能モデル

図 2.24 自己インダクタンスの電気回路と機能モデル

3.直流モータの機能モデル化

3.1 モータについて

3.1.1 モータの機能

機械には、何らかの形で運動エネルギーを生成する動力源が必要であり，その中でも電動モータは取り扱いが容易で，電気エネルギーを機械的な回転運動エネルギーに変換し供給する汎用性の高い動力源である．モータの種類も，工業用の大型から玩具の模型に用いられるような小型のものまで様々である．

3.1.2 直流モータの内部構造

直流モータは DC(direct current)モータとも呼ばれ，流れる方向と電圧が一定の電流を電源とするモータである（図 3.1）．

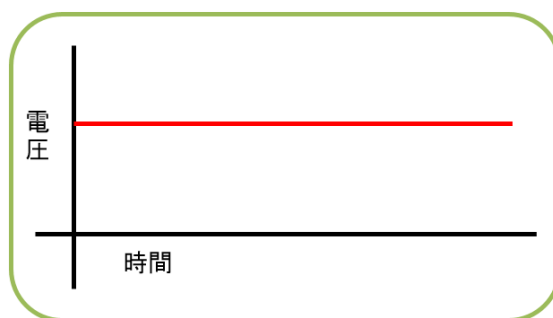


図 3.1 直流

基本構造は，外側のモータケースとその内部に固定子，回転子，ブラシで構成される（図 3.2）．固定子は磁界を発生させるもので，永久磁石形直流整流子モータの場合は界磁磁石，巻線形の場合は界磁コイルという．中心付近の回転する部品を回転子(ロータ)と呼び，回転子は整流子（転流子），電機子，回転軸により構成される．回転軸は軸受を介して回転エネルギーの出力軸となる．電機子は，コイルや鉄心をまとめたものである．整流子とブラシは電流を切り，流れる方向を逆転させるのに必要な部品である．また，ブラシは電気を供給する役割も果たす⁽⁷⁾．

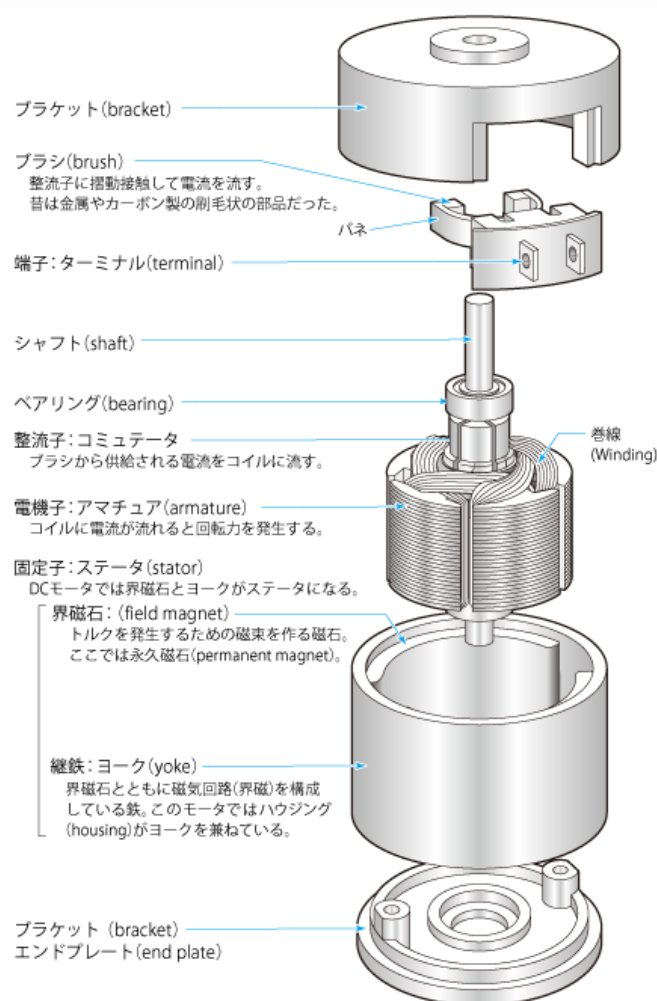


図 3.2 直流モータの内部構造 (※図引用¹⁰)

3.1.3 直流モータの回転原理とトルク

電源電圧が印加されると電機子コイルに巻かれた巻線に電流が流れ、電機子は界磁磁石内の磁界を横切るためフレミング左手の法則により電磁力が発生し、この電磁力と回転軸中心からの距離を乗じたトルクが発生する。回転を始めた回転子はそのまゝ一方方向の電流を加え続けても回転を持続できないので、ブラシと整流子（転流子）を用いて電流の方向を適宜切り替える⁽⁷⁾。

図 3.3 は鉄心のない方形コイルによる回転原理の説明図である。また、電磁力 F によるトルク T は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned}
 T &= 2\chi F \\
 &= 2\chi \cdot yBI
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

T : トルク [$\text{N} \cdot \text{m}$], $F = yBI$: 電磁力 [N], I : 電流 [A], B : 界磁の磁束密度 [T],
 y : 有効導体長 [m], χ : 回転軸からの距離 [m]

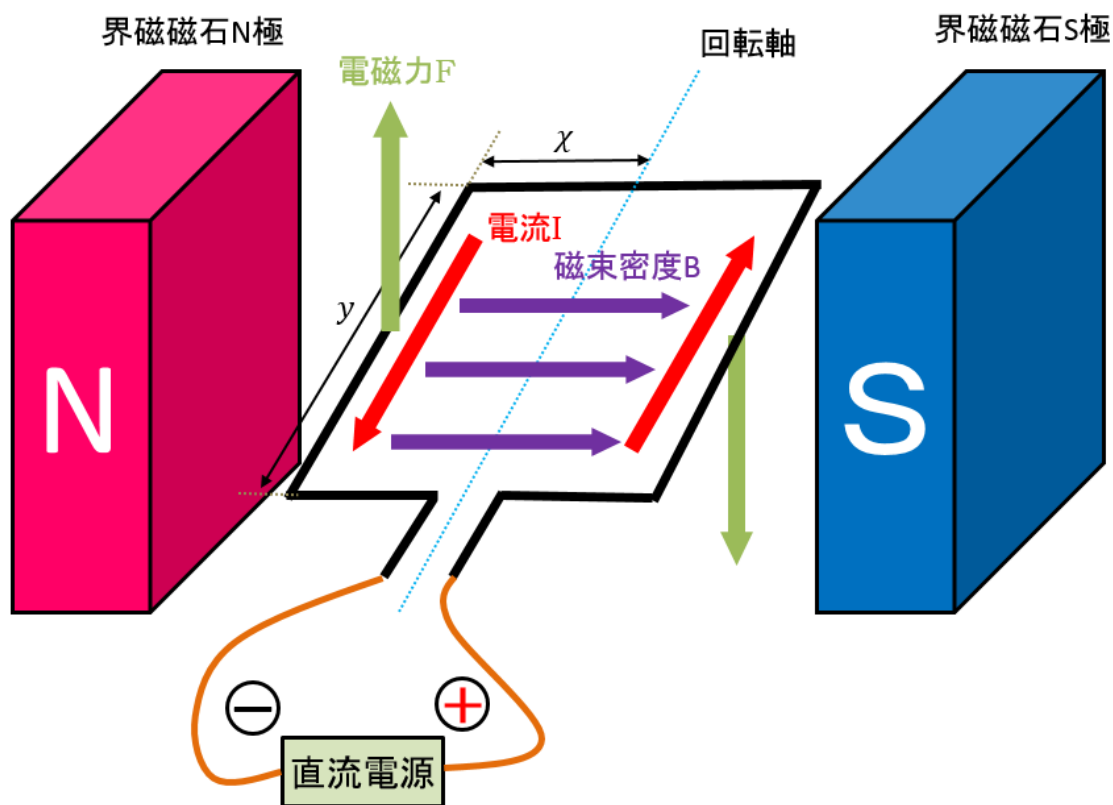


図 3.3 直流モータの回転原理

式(3.1)から，トルクを増大させるには回転半径 χ を大きくする，コイル辺を長くし巻き数を増やすことで有効導体長 y を増す，高い電圧を印加して電流 I を大きくする，強力な界磁磁石を用いて磁界の磁束密度 B を高める等の方法がある⁽⁷⁾。

また，トルクは回転角度により変動する．図 3.3 の構造の場合，方形コイルが図の位置では電磁力がすべてトルクとなるが， 90° 動くと電磁力が回転中心に向いてしまいトルクは 0 になる．図 3.4 は回転角度とトルクの関係を表したものである．図 3.5 は回転角度とトルクのグラフであり，時計回りを正とするとトルクとして利用できる電磁力はコサインカーブの絶対値であると分かる⁽⁷⁾。

また，回転原理の説明として電機子コイルに電流を流すと電磁石となり，固定子の磁極との吸引力・反発力で回転するという考え方もできる．図 3.3 場合の方形コイルの上部が N 極，下部が S 極となり回転を説明できる。

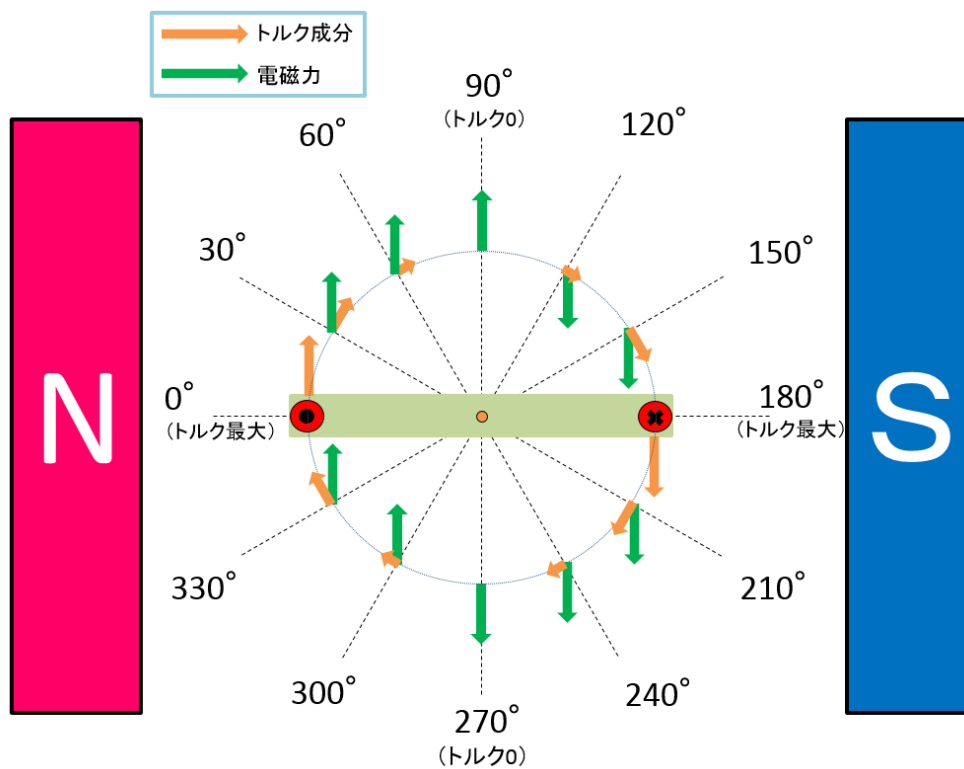


図 3.4 回転角度とトルクの関係

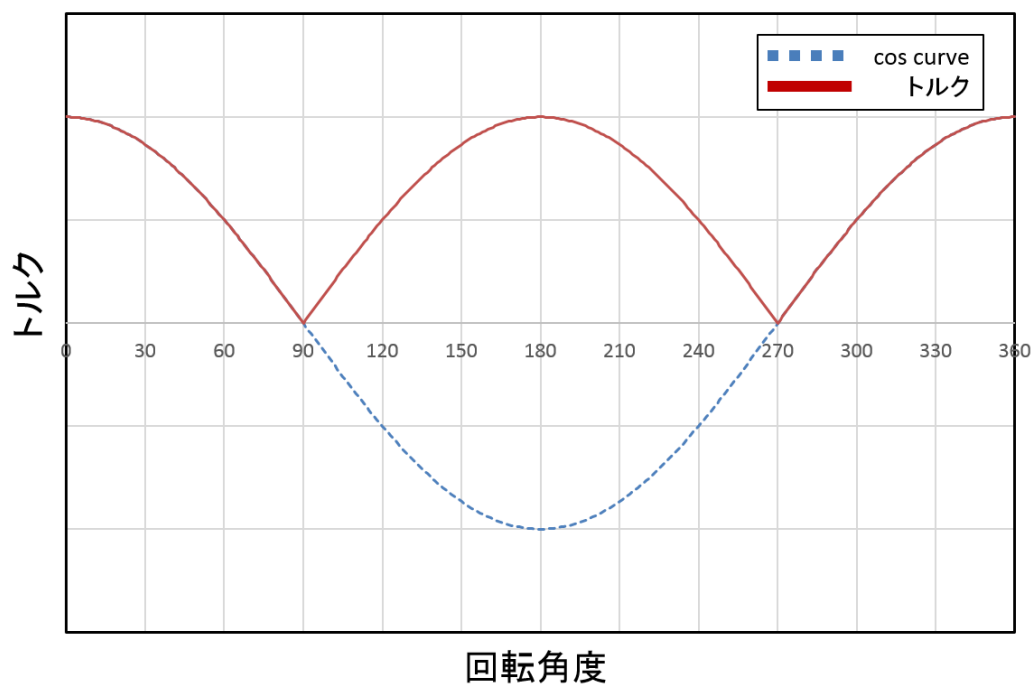


図 3.5 回転角度とトルクの変動

3.1.4 スロット

- ・スロット

電機子に設けられた溝をスロットといい、コイル辺が収められる．スロット数が多いほどトルクの変動を抑えることが出来る．図 3.6 は実機の 3 スロットモータの内部である．図 3.7 は 2 スロットモータの図 3.8 は 6 スロットモータの簡略図であり，図 3.9 は 2 スロットモータと 6 スロットモータのトルク変動の比較である．スロット数が多いほどトルクの変動が少ないことが分かる．



図 3.6 3 スロットモータの内部

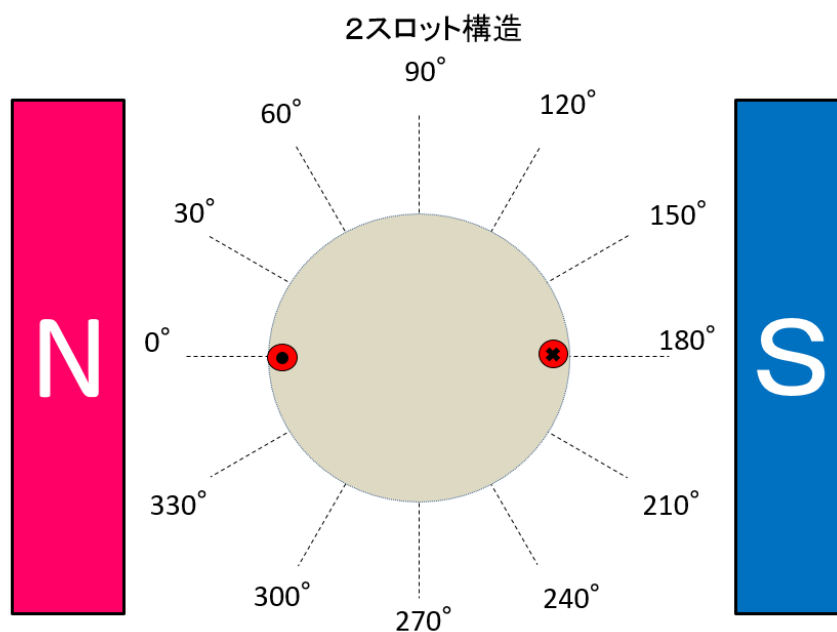


図 3.7 2 スロットモータ

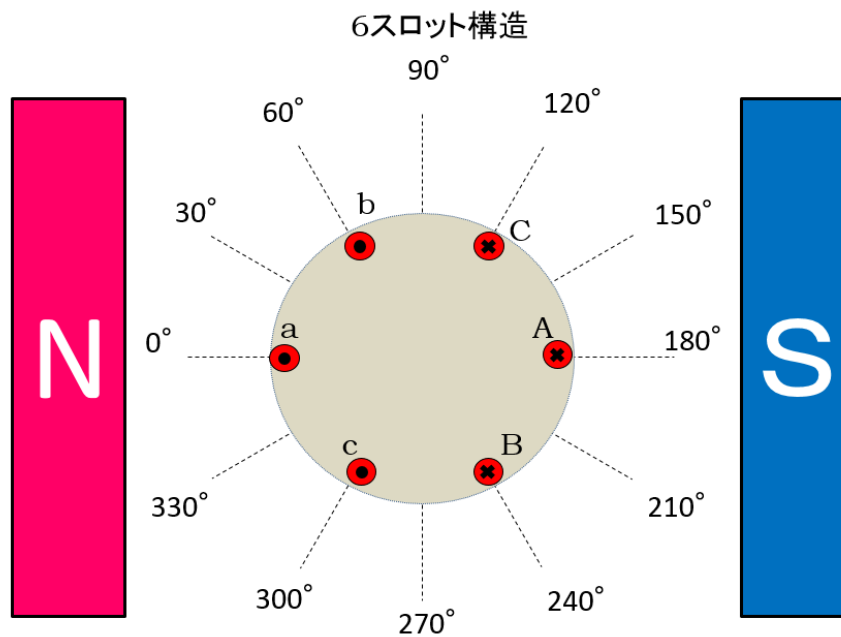


図 3.8 6 スロットモータ

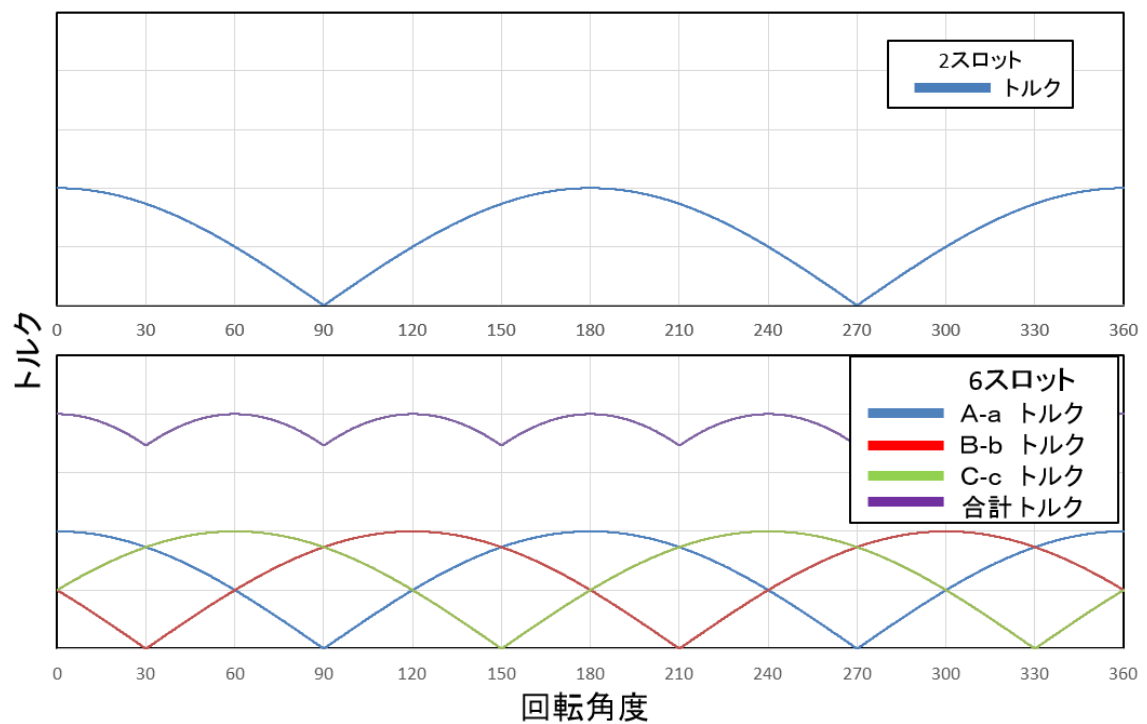


図 3.9 2 スロット, 6 スロットのトルク変動比較

3.1.5 モータの特性

- ・ 時定数

時定数は指示に対する反応の速さを表し、時定数が大きければより反応が遅くなる。

モータには電気時定数と機械時定数の 2 つがあり、前者はコイルの自己インダクタンスと電気抵抗、後者は慣性モーメントと摩擦に起因する⁽⁷⁾。

- ・ 自己インダクタンス

コイルに電流を流すとコイル内に磁力線が発生し、さらにその磁力線を打ち消す方向に磁力線が発生し誘導電流が流れる。これを自己誘導作用という、その際にコイルに逆方向の電流を流す誘導起電力を逆起電力という。このような性質や大きさを自己インダクタンス、または単にインダクタンスと呼び、単位はヘンリー[H]が使われる。

また、自己誘導作用によりコイルに誘導される逆起電力 e [V]は、式(3.2)で表される。

$$e = -L \frac{di}{dt} \quad (3.2)$$

e :逆起電力, L :自己インダクタンス[H], i :電流[A], t :時間[s]

逆起電力の大きさは式(3.2)より電流の時間変化量に影響される。直流の場合、電流の流れが安定し、磁界の変化が納まると自己誘導作用はなくなる。そのため自己インダクタンスは、モータを起動・停止した際に影響する。図 3.4 は自己インダクタンスの大小による電流の変化の遅れである。また、自己インダクタンスは磁束鎖交数に比例して大きくなるため、コイルの巻き数が大きいほど、空心コイルより鉄心ありコイルのほうが大きくなる⁽⁷⁾。図 3.10 はインダクタンスによる電流の遅れを示す。

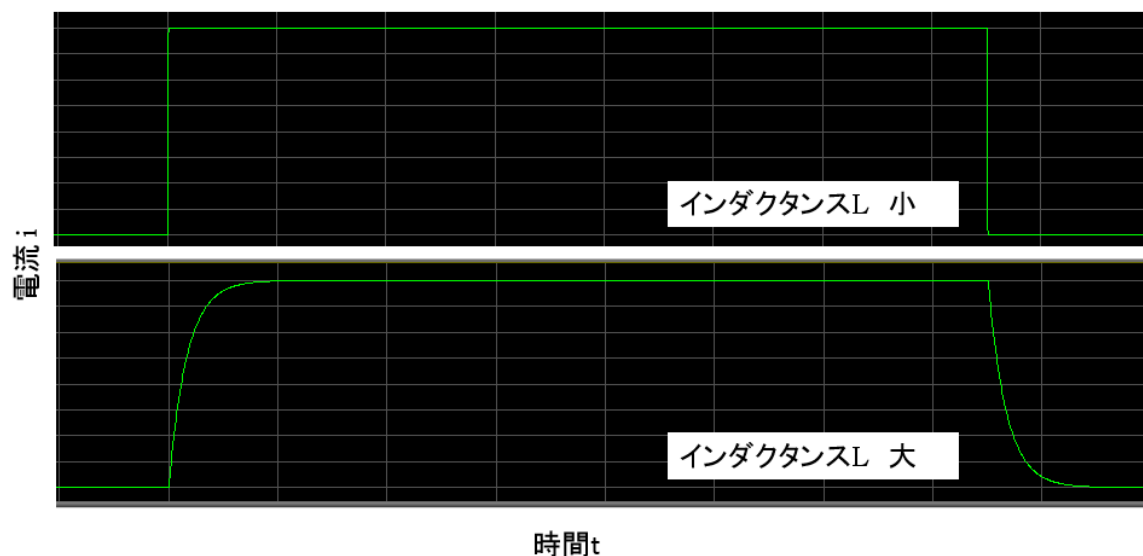


図 3.10 自己インダクタンスによる影響

・逆起電力

モータは電力から運動エネルギーを得るだけでなく、逆に運動エネルギーを電力に変換する発電機としての機能を有する。これは、モータを動力源として使用している場合も例外でなく、巻線が磁界を横切るためフレミング右手の法則により、電源電圧の逆方向に誘導起電力が発生しこれを逆起電力という。逆起電力の大きさは、回転速度と磁界の磁束密度に比例する。永久磁石型直流整流子モータの場合、磁束密度は一定のため、回転速度のみに比例する。運転中の直流整流子モータの電機子にかかる電圧は電源電圧から逆起電力を差し引いたものとなる、よって回転速度が大きくなると逆起電力が増大し、電機子の電流が小さくなっていく⁽⁷⁾。

・トルクと速度の特性

永久磁石型直流整流子モータの場合磁束密度は一定なので、トルクは電機子電流にのみ比例し、回転速度は電源電圧から逆起電力を差し引いた電源電圧に比例する。

電流が増加しトルクが増加すると、回転速度が上昇しそれに伴い逆起電力が増加し回転速度が低下する。回転速度が低下すると、逆起電力は減少し、電流が増えトルクが増大する。このつり合いによってモータの回転速度は安定する。

実際は図 3.11 のように、完全な比例関係になることはない。

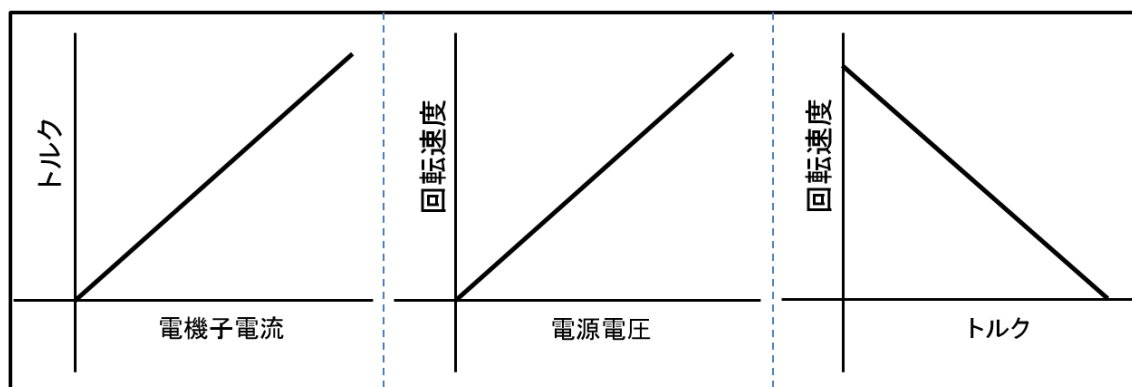


図 3.11 トルク-電機子電流，回転速度-電源電圧，回転速度-トルクの関係

3.1.6 ロータリーエンコーダ

ロータリーエンコーダはモータの回転位置を検出するセンサである。また、連続的な位置データから回転速度を算出することもできる。

モータの回転軸にカップリング（継手）を用いて取り付ける。軸が回転すると、内部に取り付けられた円盤が同期して回転する。円盤には細かなスリットが刻まれており、円盤を挟む形で発光ダイオードと光を検知して所定の電圧を出力するフォトトランジスタが取り付けられている（図 3.12）。

発光ダイオードから発せられた光が、スリットを通りフォトトランジスタがパルス波の電圧を出力する。例えば、一周 360 スリット円盤のロータリーエンコーダを用いて、360 個のパルス電圧が測定されれば軸は 360° 回転したことになる。

また、回転方向を検知するためにフォトトランジスタを A 相、B 相の 2 つ用いるタイプが主流である。2 相は位相が 90° ずれるように配置される。

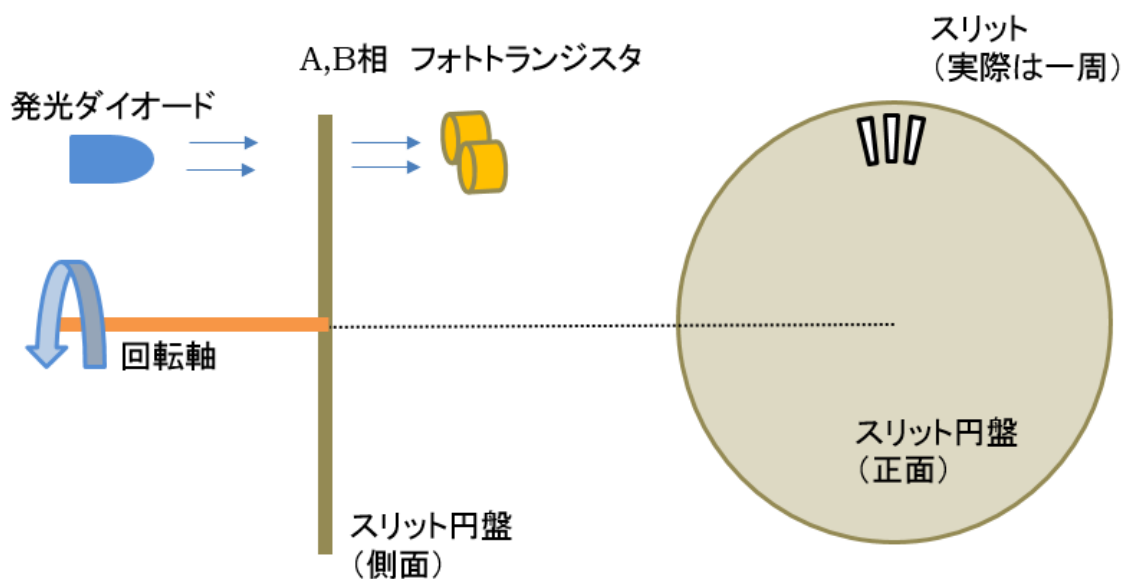


図 3.12 ロータリーエンコーダの測定原理

3.2 直流モータの機能モデル

3.2.1 モデルの概要

直流モータのモデル化をするにあたり，モータ共通の電圧・電流の電気エネルギーを角速度・トルクの回転エネルギーに変換する基本機能を作成する．その基本モデルに電源等のモータの用途から見た付加機能を組み込む．

本研究で作成するモータのモデルは動力源としてのモータモデルであり，モータ内部のトルク変動等の精密な挙動を再現するモデルではない．

3.2.2 モータの理想モデル

モータの最も基本的な機能は，電気エネルギーを運動エネルギーに変換し回転運動を得ることである．このときのエネルギー変換は，モータの電気系に電圧 V と電流 I が加えられて回転系から角速度 ω とトルク T が出力される．また，モータ内部には損失特性・蓄積特性が包含され，これらがモータ固有の挙動と損失などを決定している．

理想的なモータは，電源より供給される電気エネルギー E_1 と運動エネルギー E_2 の値は等しく，効率も 100% である．

$$\begin{cases} E_1 = E_2 \\ \frac{E_2}{E_1} = 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

モータ内部の電氣的損失である巻線抵抗や機械的損失である摩擦・空気抵抗による損失である熱エネルギー E_l を考慮すると電気エネルギー E_1 は式(3.3)となる．図 3.13 は式 (3.3) を図で示したものである．

$$E_1 = E_2 + E_l \quad (3.3)$$

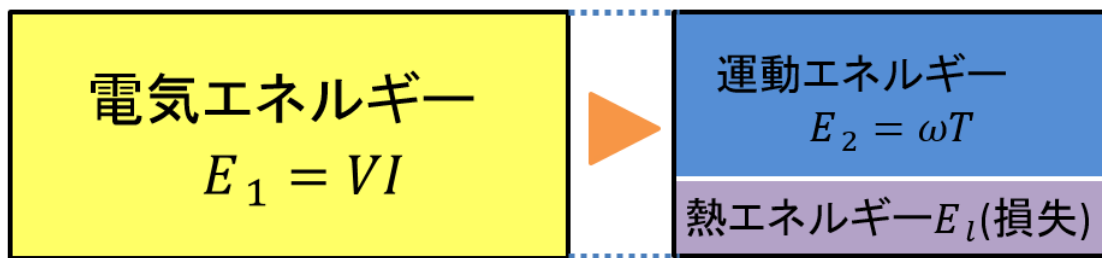


図 3.13 モータのエネルギー変換

直流モータの電気系と回転系の間には，電流 I とトルク T の比で表すトルク定数 $x_T[\text{Nm/A}]$ と，角速度 ω と誘起電圧 V の比で表す速度定数（逆起電力定数） $x_\omega[\text{V/(rad/sec)}]$ が知られている⁽¹³⁾．これらの係数を基本機能にして入出力状態量を直接変換する理想的なモータモデルは，次式で表すことができる⁽¹³⁾．

$$x_T = \frac{T}{I} = \frac{1}{2\pi} \frac{P}{a} Z \varphi \times 10^{-8} \quad (3.4)$$

$$x_\omega = \frac{V}{\omega} = \frac{1}{2\pi} \frac{P}{a} Z \varphi \times 10^{-8}$$

P:電機子極数, a:電機子並列回路, Z:全導体数, φ :1 極当たりの全磁束

$P \cdot a \cdot Z$ はモータの構造で決まるパラメータである. また磁束 φ も永久磁石型モータの場合, 構造で決定する.

トルク定数 x_T [Nm/A]と速度定数 x_ω [V/(rad/sec)]は, 電流からトルク, また角速度から電圧に変換を同じ式で行う. この対をなし, 異なる物理単位系間を変換する物理係数をモータ定数 M とする.

$$M = x_T = x_\omega \quad (3.5)$$

このモータ定数と内部負荷の関係は, 伝達係数を境に電気系と回転系に分けることができる.

図 3.8 は機能モデルによるモータ定数 M を用いたモータモデルの基本形である.

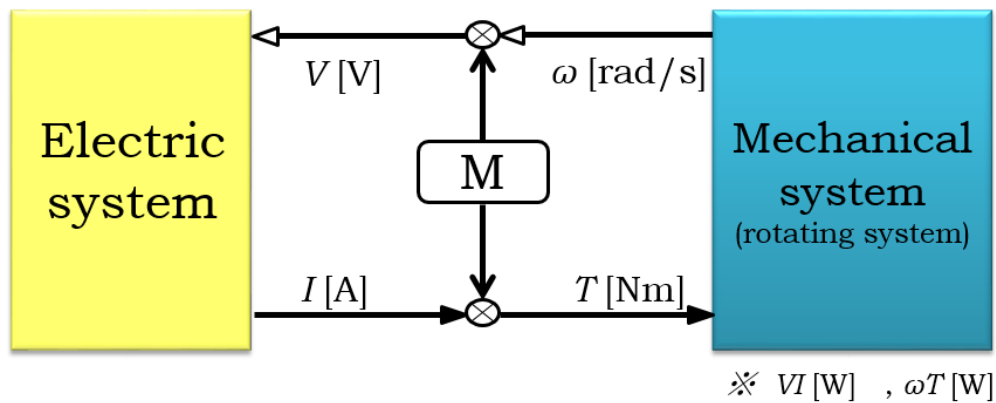


図 3.14 モータモデルの基本形

図 3.8 のモデルは, 電気系の入出力状態量が電源に接続され, 機械系の入出力状態量が外部の機械負荷と結合される. 状態量の流れは, 下側が電源の電流 I をモータ定数 M で変換し機械系の出力トルク T となり, 上側は外部負荷から受けた角速度 ω をモータ定数 M でモータの誘起電圧に変換して電源に返す電圧 V の流れとなる. このことから, モータモデルはモータ定数 M と外部電源系および外部機械系の間にある内部負荷のモデル化で作成することができる.

3.2.3 直流モータの簡易型機能モデル

図 3.15 は、永久磁石形直流モータ（以後 DC モータ）の回路構成を表した図である．この DC モータは制御系を含まない，直流電源電圧により回転する模型や小型家電用のモータを想定している．

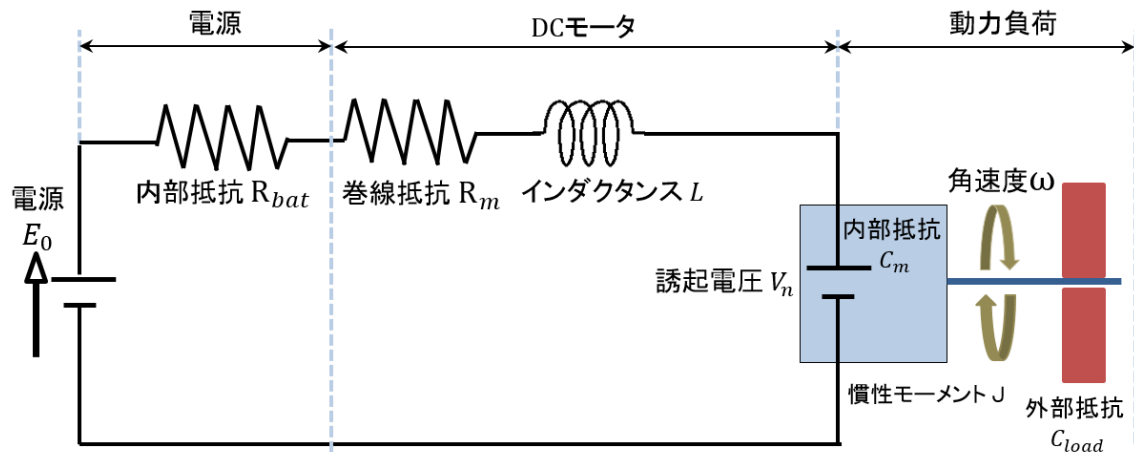


図 3.15 DC モータの回路構成

同図は，左側電源部が電源電圧 E_0 ，電源内部の抵抗 R_{bat} により構成され，中央の DC モータ部は，電機子に巻かれたコイルによる巻線抵抗 R_m ・自己インダクタンス L ，また右側動力負荷部がモータの慣性モーメント J ・モータ内部の粘性抵抗 C_m ・モータシャフトに取り付けられた負荷による外部抵抗 C_{load} でそれぞれ構成される．

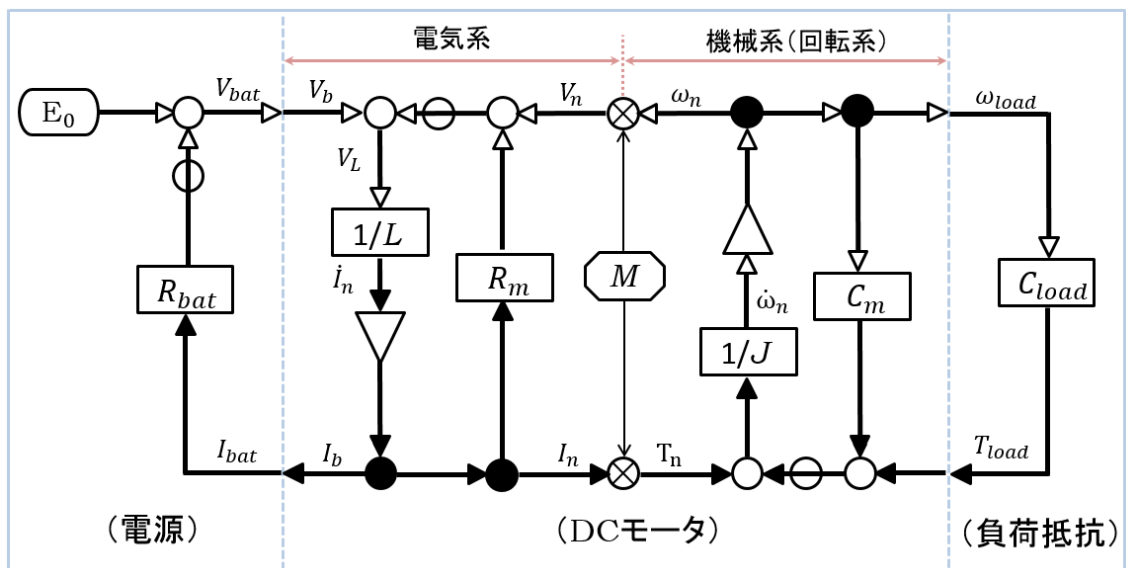


図 3.16 DC モータの機能モデル

図 3.16 は図 3.15 を機能モデルにより表現したものである。

左側電源部より供給された電力は、モデル中央のモータ定数 M により動力(仕事率)に変換され、主に右側の外部の負荷抵抗により消費される。また、動力負荷は外部粘性抵抗 C_{load} と内部粘性抵抗 C_m を統合した $(C_m + C_{load})$ となる。電機子に巻かれたコイルには、電源から与えられた電圧 V_b と回転子により誘起される電圧 $V_n = M\omega_n$ の間に生じる電位差 $(V_b - V_n)$ が与えられ、この電位差は電機子のインダクタンス L と直列抵抗 R_m を通して、電流 I_n を生じ、モータ定数 M を通して慣性モーメント J にトルク $T_n = MI_n$ を与える。

以上をまとめると、状態方程式は次式となる。

$$\begin{cases} 0 = -L \frac{dI_n}{dt} - R_m I_n - M\omega_n + V_b \\ 0 = -J \frac{d\omega_n}{dt} + MI_n - (C_m + C_{load})\omega_n \end{cases} \quad (3.6)$$

上式は電流の連続性と電圧のつり合いを表し、2 行目は角速度の連続性とトルクのつり合いを表す。また、モータに電力を供給する直流電源の電圧 V_{bat} と動力負荷のトルク T_{load} は次式で表せる。

$$\begin{cases} V_{bat} = E_0 - R_{bat} I_{bat} \\ T_{load} = C_{load} \cdot \omega_{load} \end{cases} \quad (3.7)$$

モータ電源の電力 $\dot{e}_b$ と軸出力の瞬時エネルギー $\dot{e}_m$ は以下となる。

$$\begin{cases} \dot{e}_m = \omega_{load} \cdot T_{load} \\ \dot{e}_b = V_b I_b = V_{bat} I_{bat} \end{cases} \quad (3.8)$$

また、定常状態のモータ効率 η は次式となる。

$$\eta = \frac{\dot{e}_m}{\dot{e}_b} \cdot 100 \quad (3.9)$$

3.2.4 シミュレーション結果

CATEC 社の VT2000 modeler を用いてモデルを作成しシミュレーションを実行した.
図 3.17 は, VT2000 で図 3.16 を表したものである.

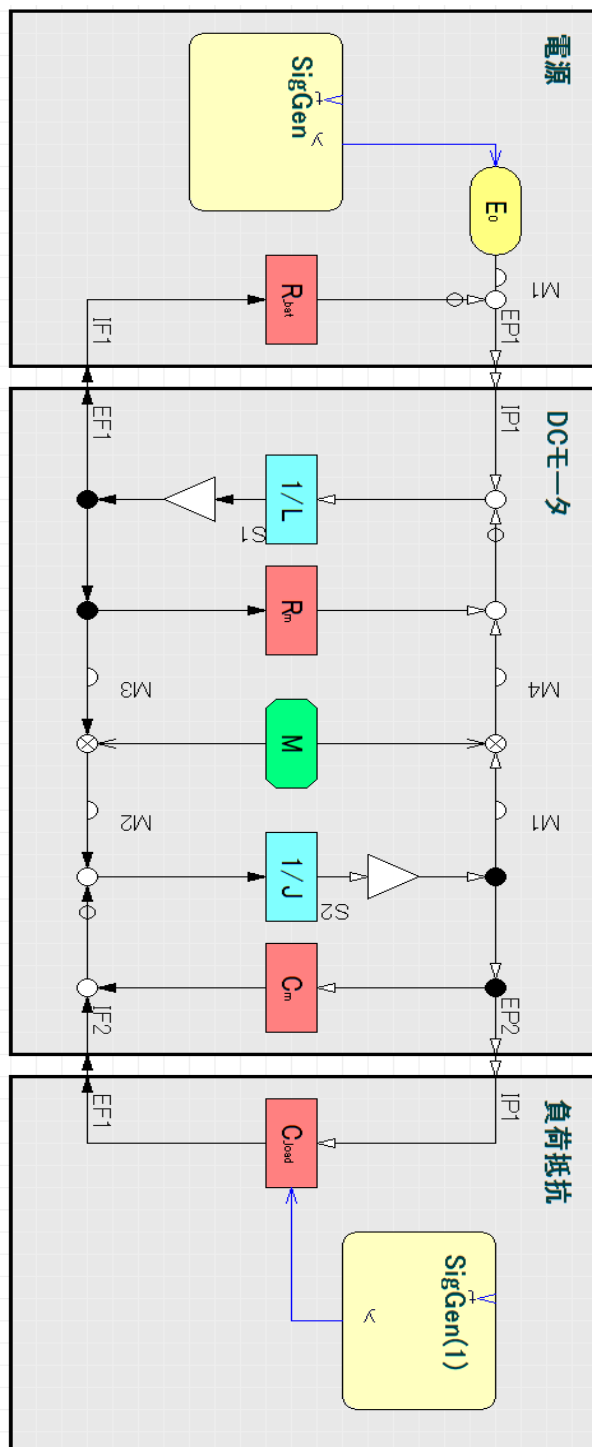


図 3.17 VT2000 による DC モータの機能モデル

表 3.1 モデルに用いた特性

特性名	記号	単位
電圧	E_0	V
電源内部抵抗	R_{bat}	Ω
インダクタンス	L	H
内部抵抗	R_m	Ω
モータ定数	M	Nm/A
慣性モーメント	J	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$
内部粘性抵抗	C_m	Nm/(rad/s)
外部粘性抵抗	C_{load}	Nm/(rad/s)

表 3.1 は，図 3.17 の特性をまとめたものである．

モデル上の電源部にある SigGen と負荷抵抗部の SigGen(1)はソフト特有の簡易信号発生器である．SigGen は電圧を SigGen(1)は外部負荷抵抗をそれぞれ時間変動させる．また，半円型の電源部 M1（出力電圧），DC モータ部 M1（角速度），M2（トルク），M3（電流），M4（電圧）は，観測点でありデータを抽出できる．

図 3.18 は電圧 SigGen の出力信号である．

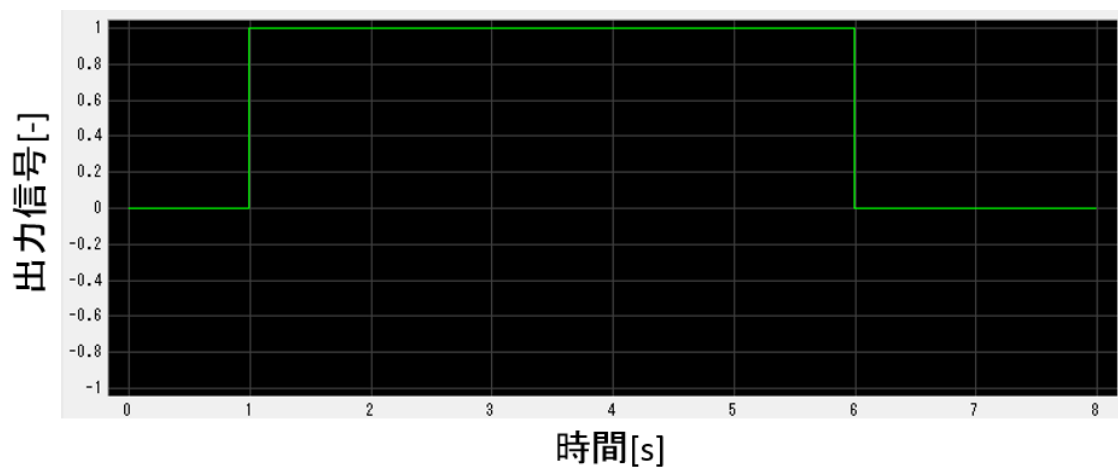


図 3.18 電圧 SigGen の出力信号

① シミュレーション 1 ー無負荷ー

モータに大きな負荷をかけず，空まわしを想定してシミュレーションを実行した．表 3.2 はシミュレーション時の特性値である．条件より外部粘性抵抗の値は 0 である．

電圧の信号発生器 SigGen からは，図 3.18 の波形を出力した．またソフトの計算時間間隔は，0.0001 に設定した．

表 3.2 無負荷シミュレーションの特性値

特性名	記号	単位	値
電圧	E_0	V	25
電源内部抵抗	R_{bat}	Ω	0.01
インダクタンス	L	H	0.005
内部抵抗	R_m	Ω	11.7
モータ定数	M	Nm/A	0.183
慣性モーメント	J	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$	2.2×10^{-5}
内部粘性抵抗	C_m	Nm/(rad/s)	0.05
外部粘性抵抗	C_{load}	Nm/(rad/s)	0

図 3.19 は，電源部 M1 の出力電圧ー時間波形である．

図 3.20 は，DC モータ部 M1 の角速度ー時間波形である．

図 3.21 は，DC モータ部 M2 のトルクー時間波形である．

図 3.22 は，DC モータ部 M4 の電圧ー時間波形である．

図 3.23 は，DC モータ部 M3 の電流ー時間波形である．

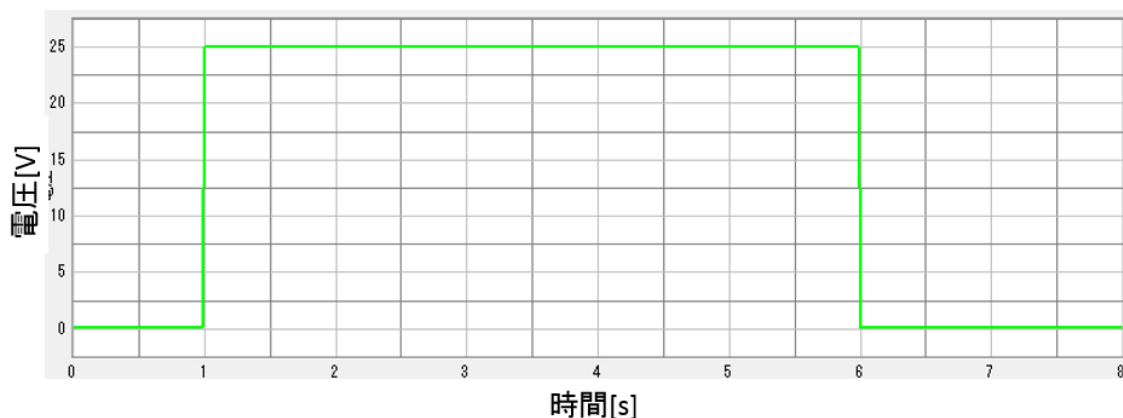


図3.19 出力電圧ー時間波形(観測点電源部M1)

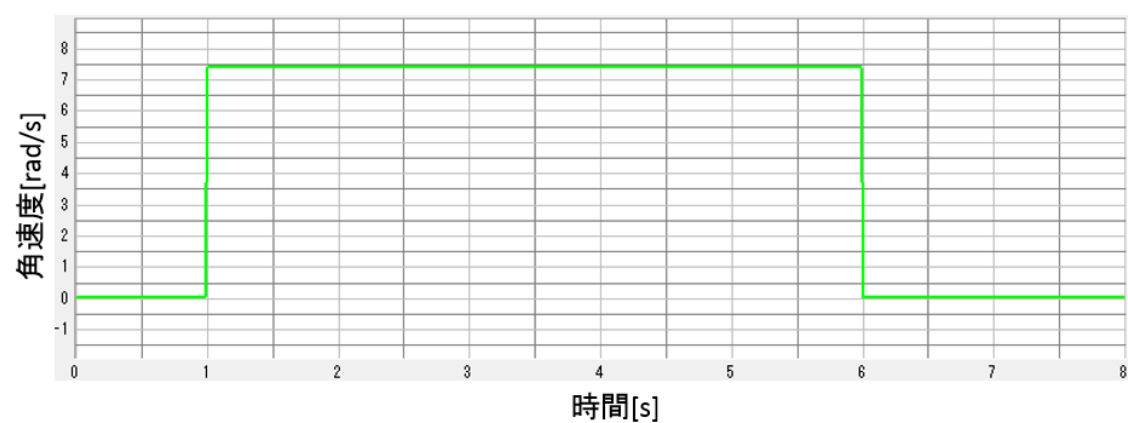


図3.20 角速度—時間波形(観測点DCモータ部M1)

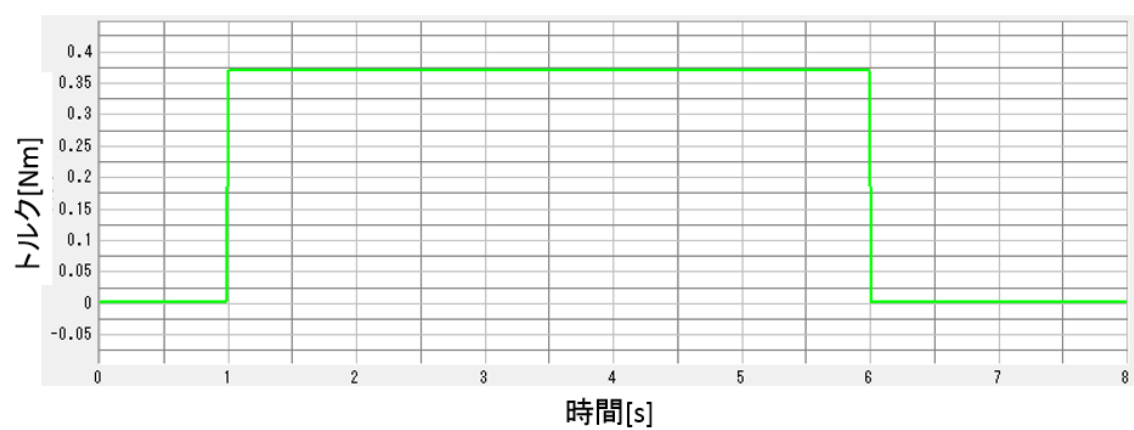


図3.21 トルク—時間波形(観測点DCモータ部M2)

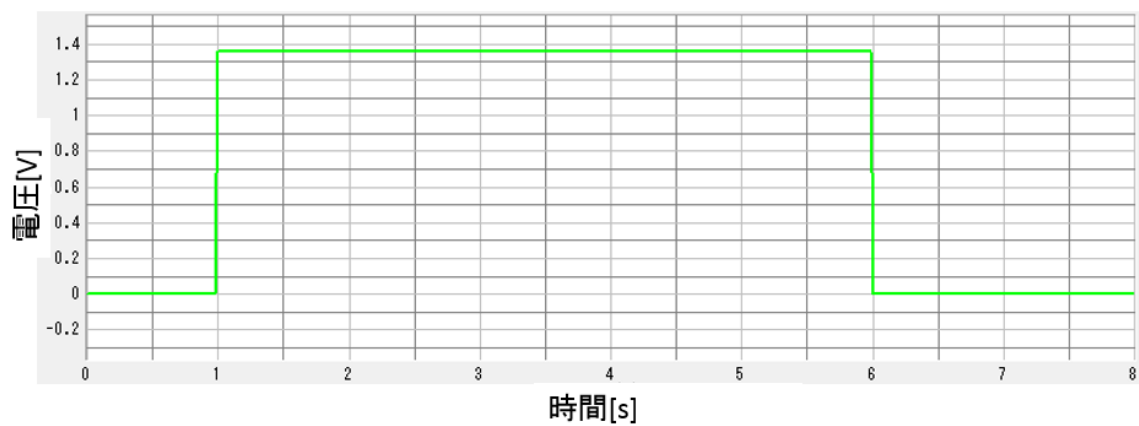


図3.22 電圧－時間波形(観測点DCモータ部M4)

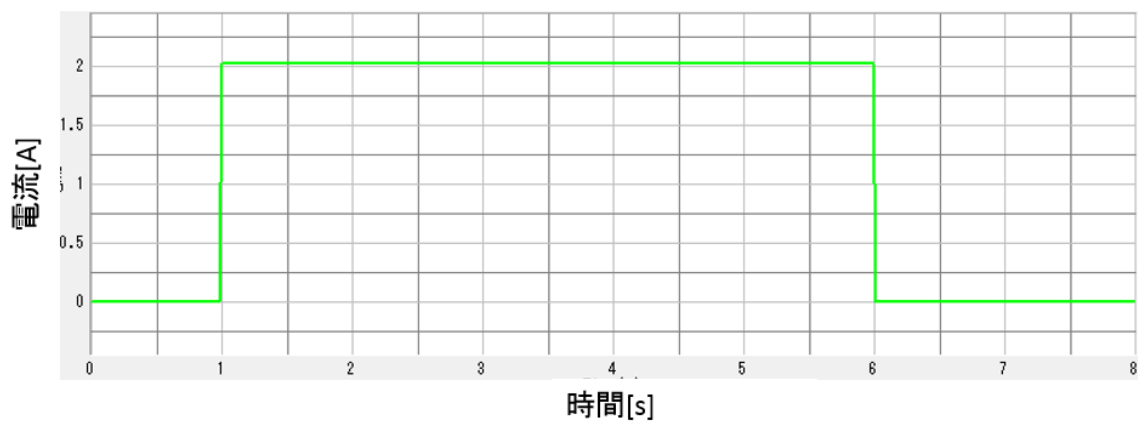


図3.23 電流－時間波形(観測点DCモータ部M3)

② シミュレーション 2 ー負荷ー

モータの運転中に回転軸に負荷を付与した場合を想定した．電圧 **SigGen** の出力信号は無負荷時と同じく図 3.18 であるので出力電圧も図 3.19 と同じである．特性値は外部粘性抵抗を除き，表 3.2 と同値である．負荷抵抗部の信号発生器 **SigGen(1)**より図 3.24 の信号を出力した．これにより，外部負荷抵抗 C_{load} が時間とともに増減する．また計算時間間隔は，0.0001 に設定した．

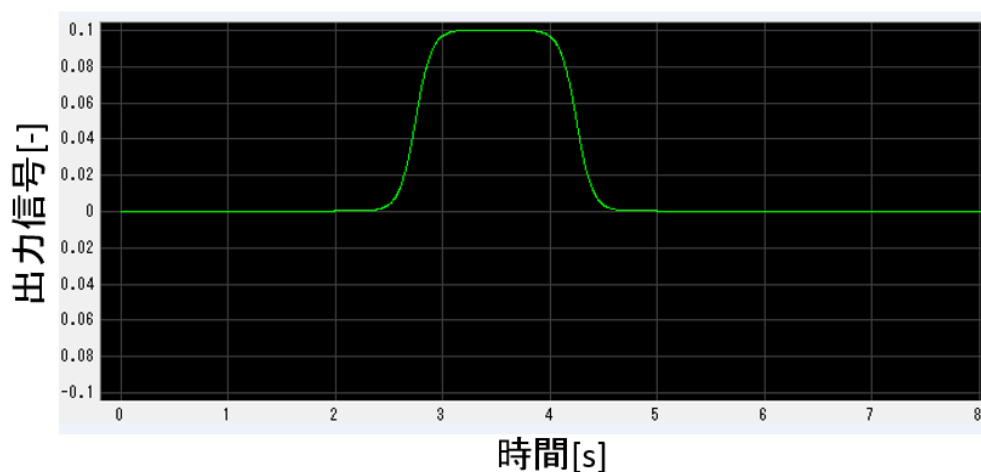


図 3.24 負荷抵抗部 SigGen(1)の出力信号

図 3.25 は，DC モータ部 M1 の角速度ー時間波形である．

図 3.26 は，DC モータ部 M2 のトルクー時間波形である．

図 3.27 は，DC モータ部 M4 の電圧ー時間波形である．

図 3.28 は，DC モータ部 M3 の電流ー時間波形である．

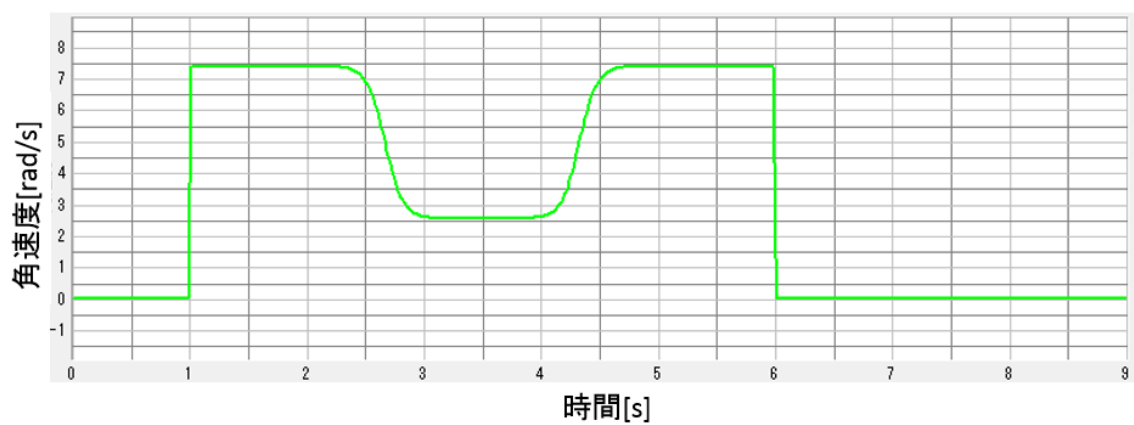


図3.25 角速度—時間波形(負荷付, 観測点DCモータ部M1)

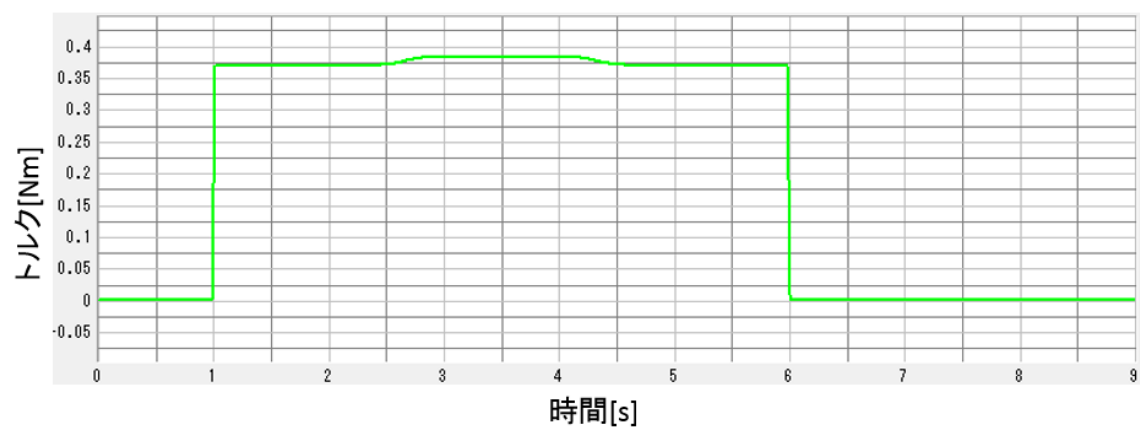


図3.26 トルク—時間波形(負荷付, 観測点DCモータ部M2)

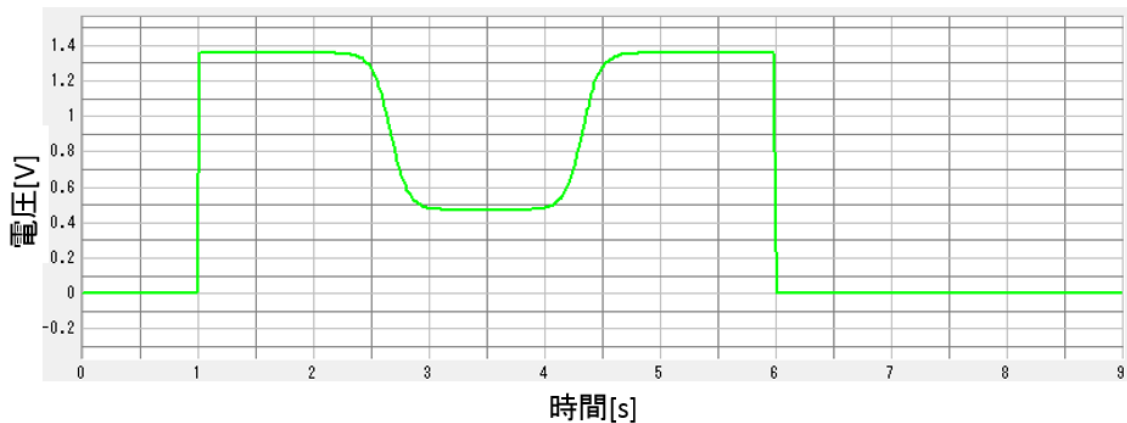


図3.27 電圧－時間波形(負荷付, 観測点DCモータ部M4)

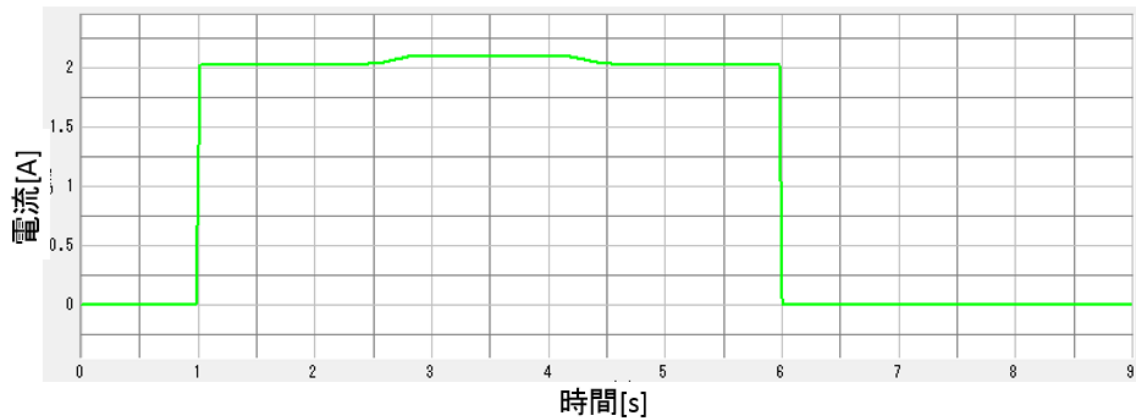


図3.28 電流－時間波形(負荷付, 観測点DCモータ部M3)

3.2.5 考察

シミュレーション 1 無負荷の場合，モータは空まわりして電流・電圧・トルク・角速度に変化はなく内部の粘性抵抗のみによって角速度が決定された．シミュレーション 2 の負荷ありでは，運転中に外部負荷を付与した影響により図 3.25 のように角速度は低下しそれに伴い図 3.27 電圧（逆起電力）が減少した．これにより，図 3.28 電流が増大し図 3.26 トルクが増大した．外部負荷抵抗が，減少し始めると角速度が増大して逆起電力が増大，それにより電流が減少してトルクも減少した．

結果より，3.1.5 モータの特性で記した DC モータのトルクと速度の特性が表現されていると考えられる．

4.直流モータの計測実験

4.1 実験

4.1.1 実験内容

モデルの評価を行うため，小型永久磁石型直流モータの無負荷時におけるパルス間隔時間（角速度）を計測した．

4.1.2 実験方法

小型モータをアルミ製の台に固定し，カップリングを用いてロータリーエンコーダを接続した．直流電圧源よりモータに電圧を供給しモータを駆動させた．モータ軸が回転するとロータリーエンコーダよりパルス電圧が出力され，その信号を PXI で測定し，PXI に内蔵されるソフトウェア LabVIEW により保存した．保存したパルス時間間隔データを元に，エクセルを用いて角速度と回転角度を算出した．

また使用したロータリーエンコーダは最大一周 15000 パルスの分解能を有するが，計測装置の性能の都合上使えず，一周 1 パルスの設定とした．高速回転では正確なデータを計測できないため，電源電圧は 1.2V とした．また，角速度も立ち上がりから定常速度までの過渡現象のみ計測できた．

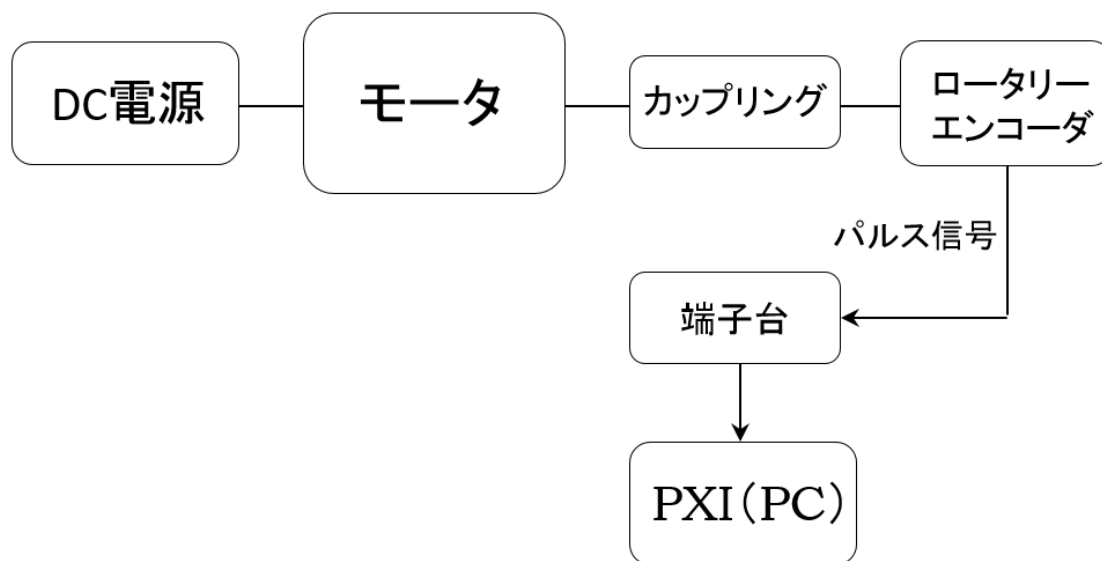


図 4.1 実験方法

4.1.3 実験対象と装置

図 4.2 は，実験に用いた MABUCHI Motor 社製の RS-540SH-6527 である．用途は電動ドリル，エアーコンプレッサー等であり，汎用的な 2 極 3 スロットの小型永久磁石型直流モータである．図 4.3 は，モータをアルミ製の台にねじで固定した写真である，また台は下面の角 4 箇所を半球ゴムで支持した．図 4.4 は実験風景である．



図 4.2 実験対象の DC モータ (RS-540SH-6527)

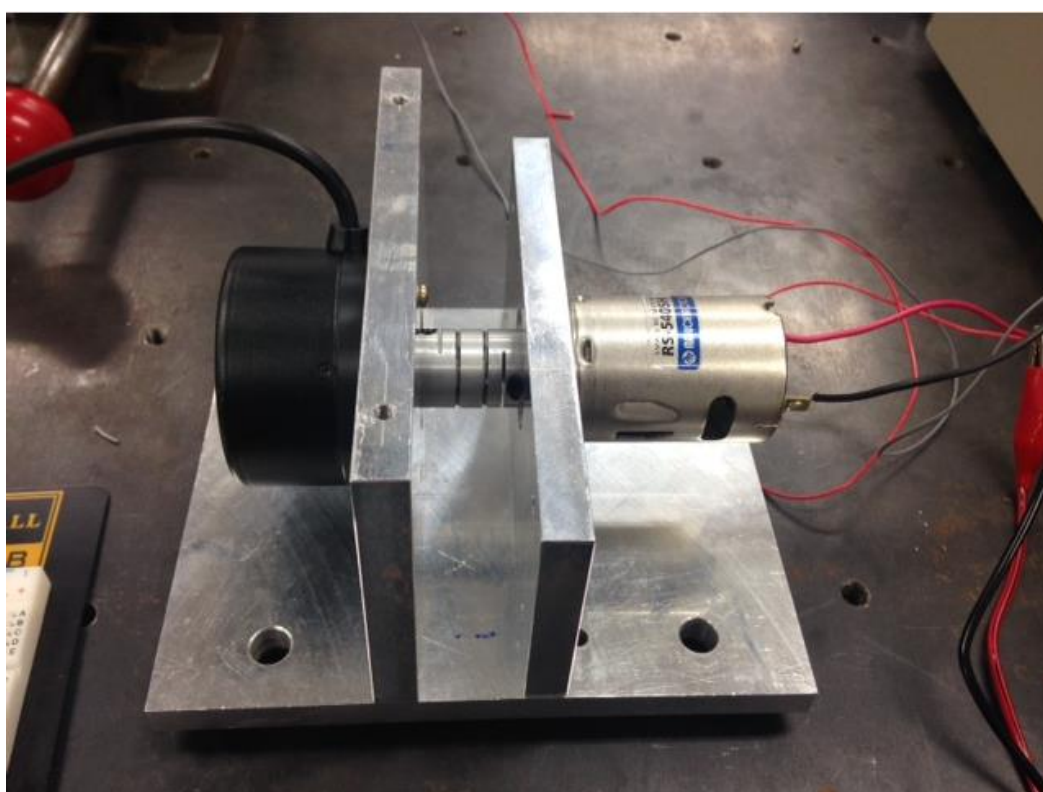


図 4.3 アルミ製の台に固定された右からモータ・カップリング・ロータリーエンコーダ

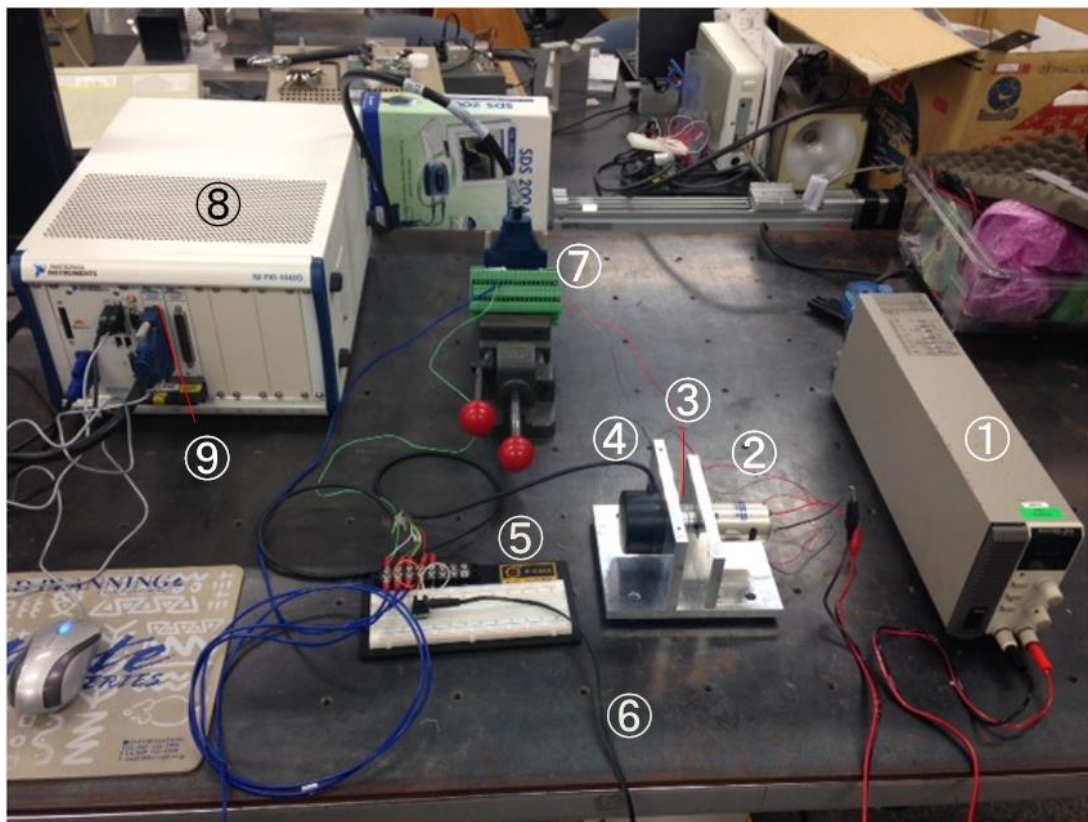


図 4.4 実験風景

実験装置名称

① 直流電源	KIKUSUI PAK60-6A
② DC モータ	MABUCHI Motor RS-540SH-6527
③ フレキシブルカップリング	NBK XHW-19C-3-8
④ ロータリーエンコーダ	MTL MES-40-15000P
⑤ エンコーダ用電源ボード	E-CALL EIC-1202B
⑥ エンコーダ用 5V 電源	LTE GFP101U-0520
⑦ PXI 接続用端子台	PHENIX CONTACT UMK-SE11 25-2
⑧ 測定装置 PXI 本体	NI PXI-1042Q
⑨ PXI 測定ボード	NI PXI-6230

4.2 実験結果

計測回数は5回. 図 4.4 に回転角度, 図 4.5 に立ち上がりの角速度を示す. また表 4.1 は角速度データの定常速度 1~3 秒間の平均角速度である.

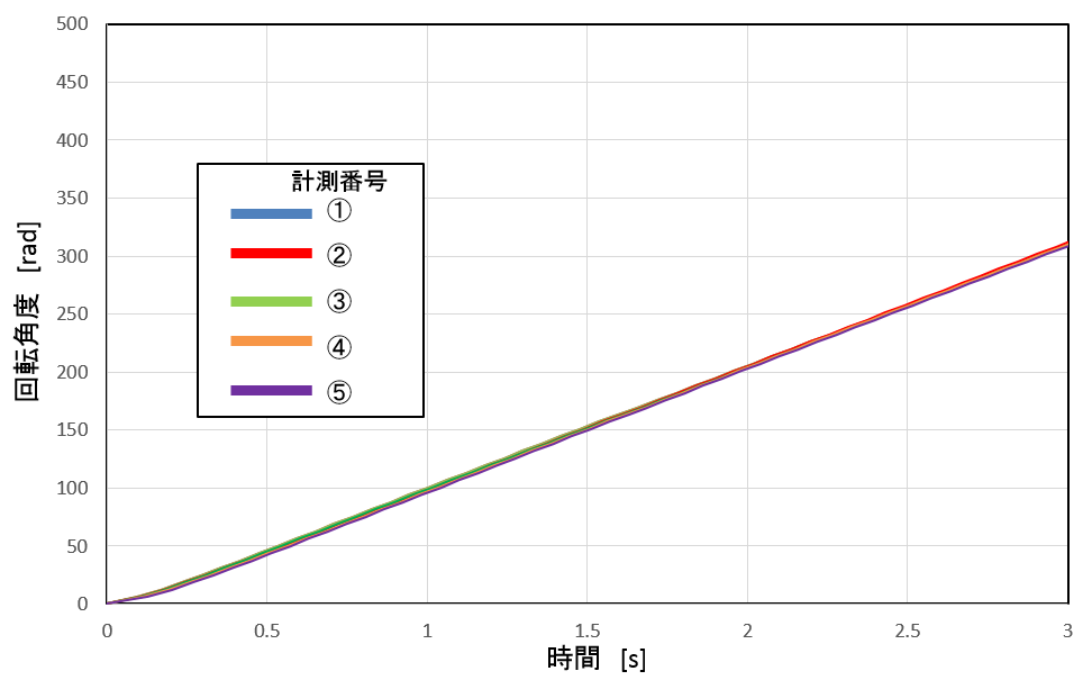


図 4.4 回転角度－時間

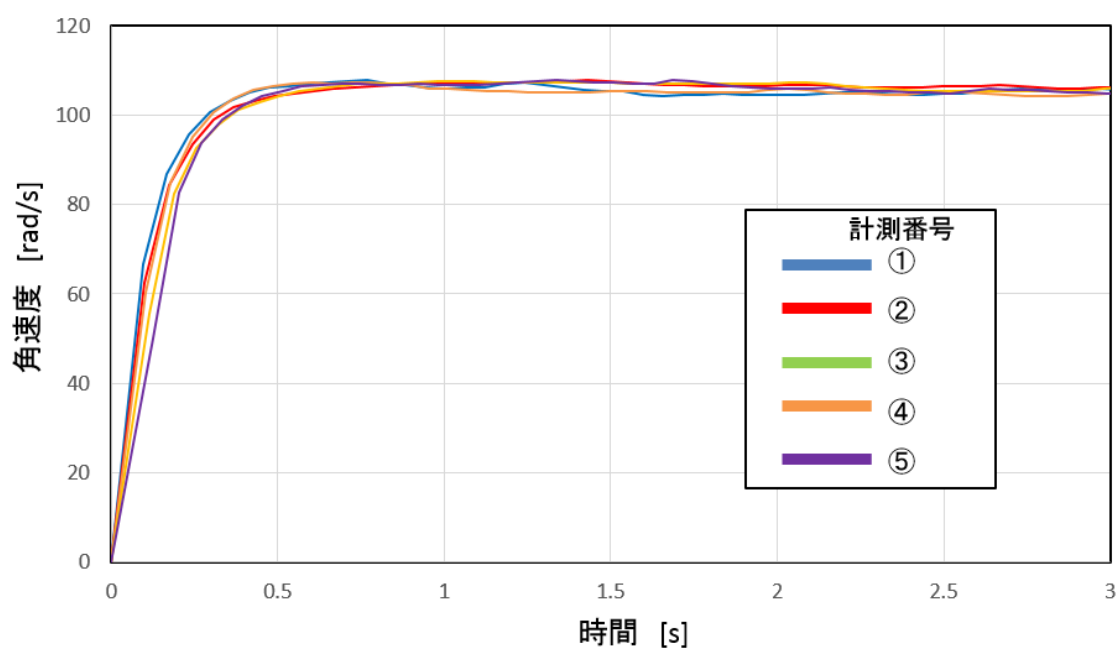


図 4.5 立ち上がりの角速度－時間

表 4.1 定常状態の角速度

計測番号	角速度[rad/s]
①	105.3
②	106.7
③	105.1
④	106.5
⑤	106.2
平均	106.0

4.3 モータの抵抗値の計測

シミュレーションに必要となるモータの端子間抵抗値を計測した。使用した計測器は、ISO-TECH IDM69 である (図 4.6)。

結果は $0.4[\Omega]$ であった。



図 4.6 抵抗計測器

5.モデルとの比較

5.1 モデルとの比較

5.1.1 比較方法

シミュレーションに用いた機能モデルは，3 章「図 3.17 VT2000 による DC モータの機能モデル」に回転角度を抽出できる累積観測点 A1 を追加した図 5.1 である．これに計測実験に用いたモータ RS-540SH-6527 の物理特性値を入力してシミュレーションを行い回転角度および立ち上がりの角速度波形を比較した．

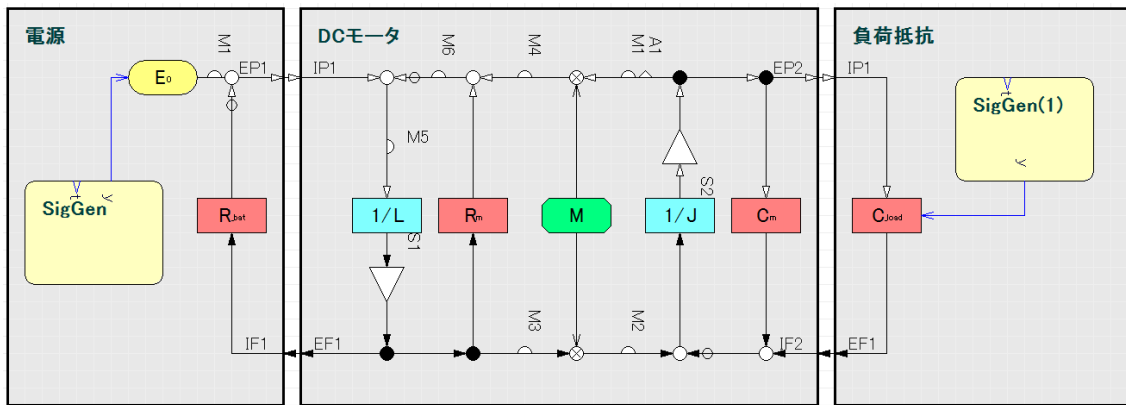


図 5.1 比較シミュレーションに用いた機能モデル

5.1.2 物理特性値

モデルに入力した特性値を表 5.1 に示す．記号に斜線されたものはシミュレーションに用いない値である．慣性モーメントはモータ，カップリング，ロータリーエンコーダの合計値を入力した．また，メーカーより入手した電機子抵抗ではなく実験により計測した端子間の抵抗をシミュレーションに用いた．粘性抵抗は，モデルの状態方程式 (5.1) の定常状態を考え，まずインダクタンス L と慣性モーメントの項を消去し，表 4.1 の定常状態の平均角速度を ω_n に代入， V_b には電源電圧 1.2[V]， M ， R_m ， C_{load} には表 5.1 の値を代入し式 A より電機子電流 I_n をもとめこれを式 B に代入し C_m を求めた．

$$\begin{cases} 0 = -L \frac{dI_n}{dt} - R_m I_n - M \omega_n + V_b & \cdots A \\ 0 = -J \frac{d\omega_n}{dt} + M I_n - (C_m + C_{load}) \omega_n & \cdots B \end{cases} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned}
I_n &= \frac{1}{R_m} (V_b - M \cdot \omega_n) \\
&= \frac{1}{0.4} (1.2 - 4.01 \times 10^{-3} \times 106) \\
&= 1.94
\end{aligned} \tag{5.2}$$

$$\begin{aligned}
C_m &= \frac{1}{\omega_n} (M \cdot I_n) \\
&= \frac{1}{106} (4.01 \times 10^{-3} \times 1.94) \\
&= 7.33 \times 10^{-5}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

表 5.1 入力特性値

特性名	記号	単位	値	備考
電圧	E_0	V	1.2	設定電源電圧
電源内部抵抗	R_{bat}	Ω	0	定電圧源なので 0 とする
インダクタンス	L	H	8.97×10^{-5}	メーカーより入手
端子間内部抵抗	R_m	Ω	0.4	実験計測値
電機子抵抗		Ω	6.45×10^{-2}	メーカーより入手
モータ定数	M	N · m/A	4.01×10^{-3}	メーカーよりトルク定数として入手
モータ慣性モーメント		$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	3.68×10^{-6}	メーカーより入手
カップリング慣性モーメント		$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	8.8×10^{-7}	メーカーより入手
エンコーダ慣性モーメント		$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	2.2×10^{-6}	メーカーより入手
合計慣性モーメント	J	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$	6.76×10^{-6}	慣性モーメントの合計値
粘性抵抗	C_m	N · m/(rad/s)	7.33×10^{-5}	計算値 C_m
外部粘性抵抗	C_{load}	N · m/(rad/s)	0	無負荷とみなし 0 とする

5.1.3 シミュレーション結果

実験で測定していない電圧，電流，トルクを含めたシミュレーション結果を以下に示す。

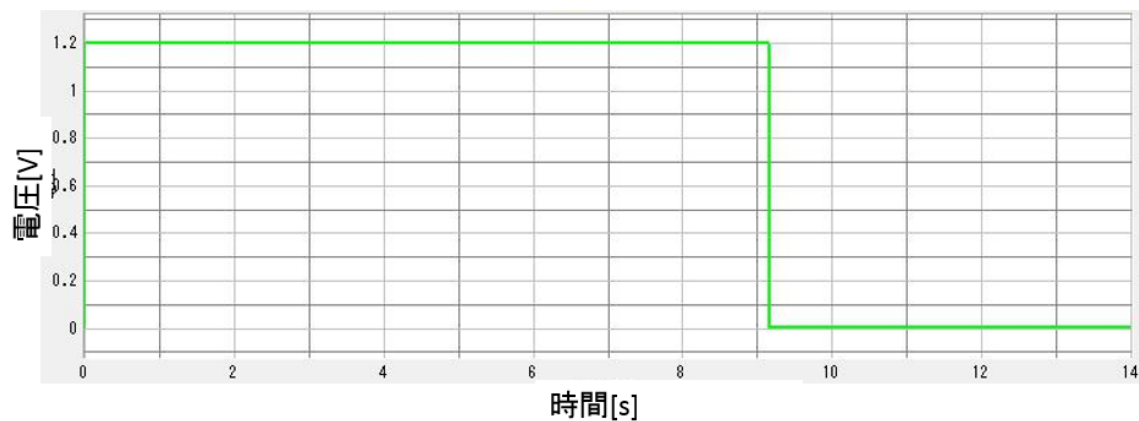


図 5.2 電源電圧の出力（観測点 M1）

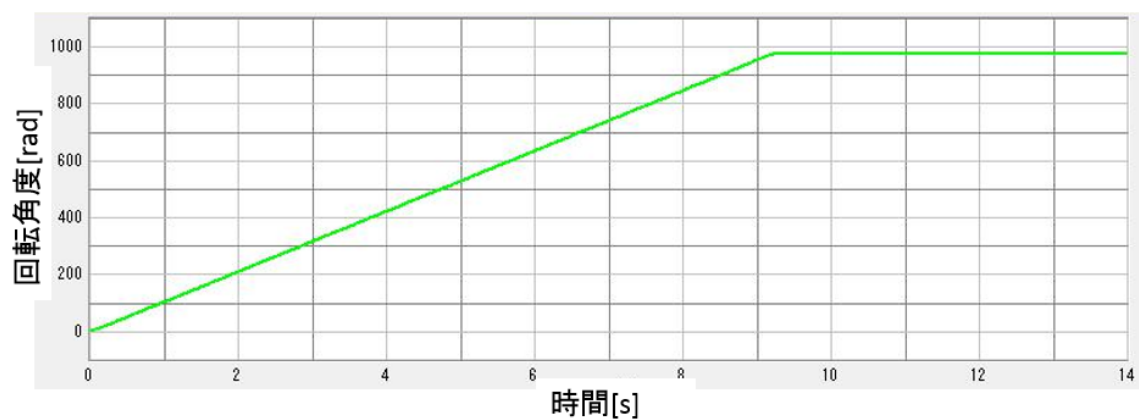


図 5.3 回転角度—時間（観測点 A1）

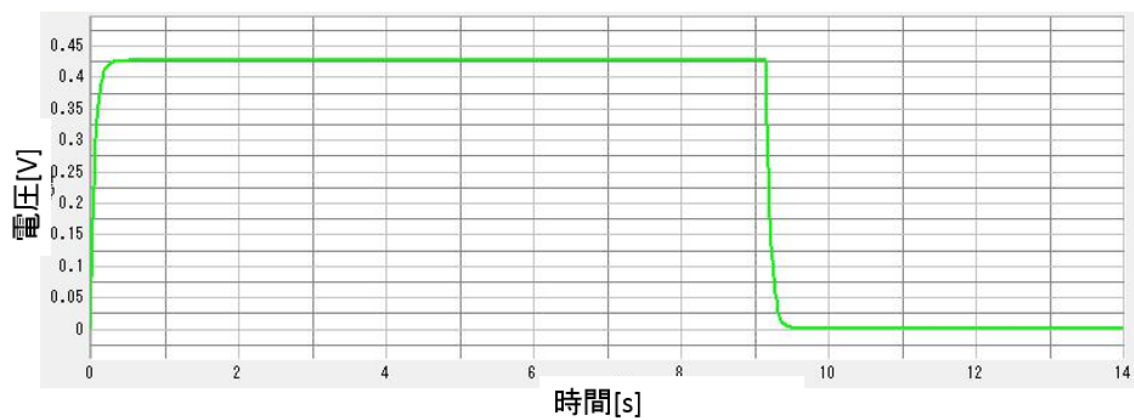


図 5.4 逆起電力—時間（観測点 M4）

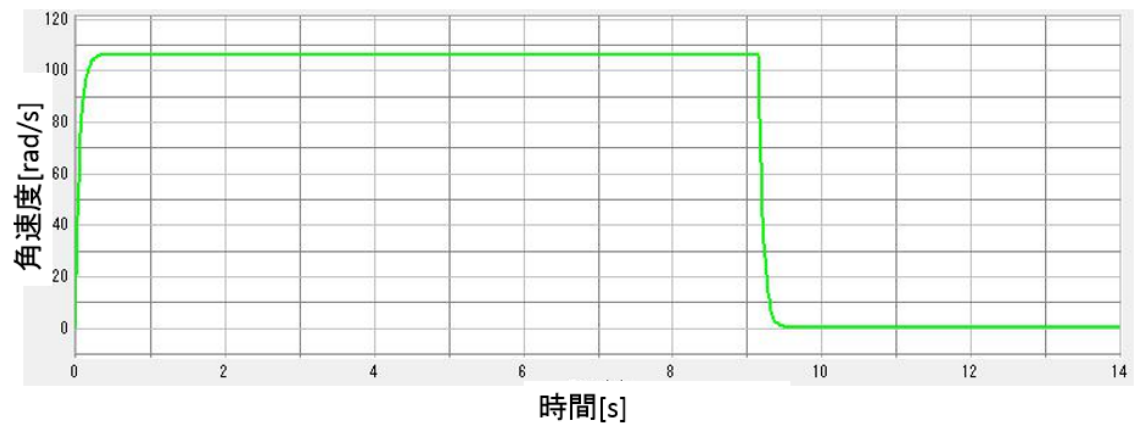


図 5.5 角速度—時間（観測点 M1）

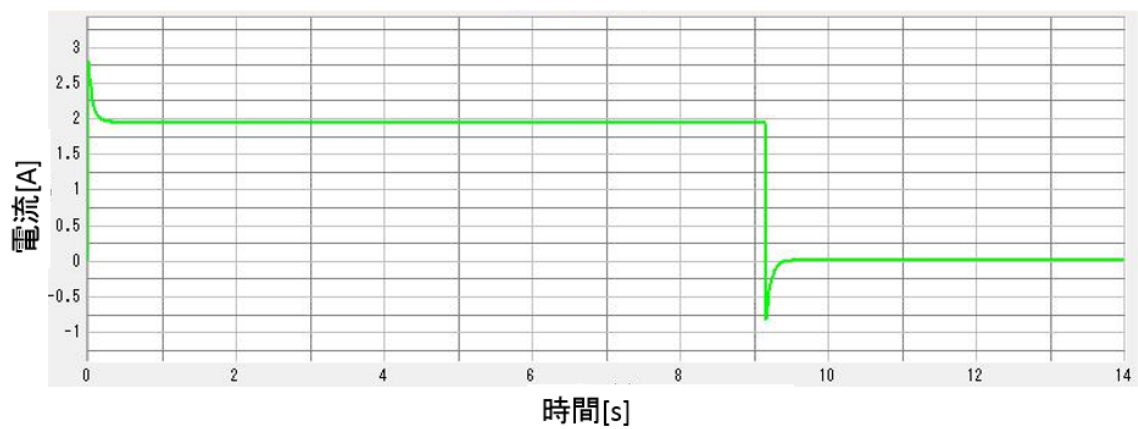


図 5.6 電流—時間（観測点 M3）

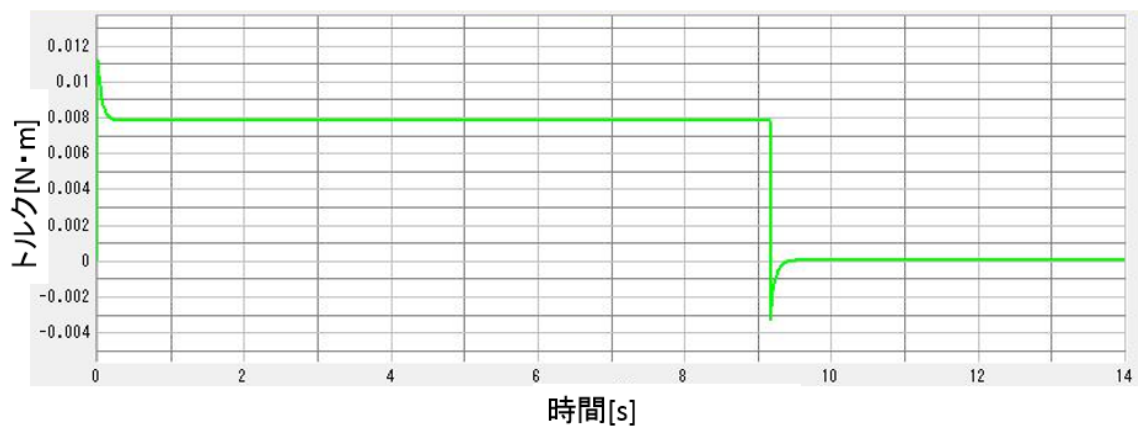


図 5.7 トルク—時間（観測点 M2）

5.1.4 実験値との比較結果

図 5.8 は, 実験で計測した無負荷, 電源電圧 1.2[V]の回転角度とシミュレーションの計算値を比較したものである. また, 図 5.9 は同条件の角速度の立ち上がりを比較した図である. 実験値の分解能が低いため立ち上がりのデータ数が少ない角速度の波形はなめらかでない.

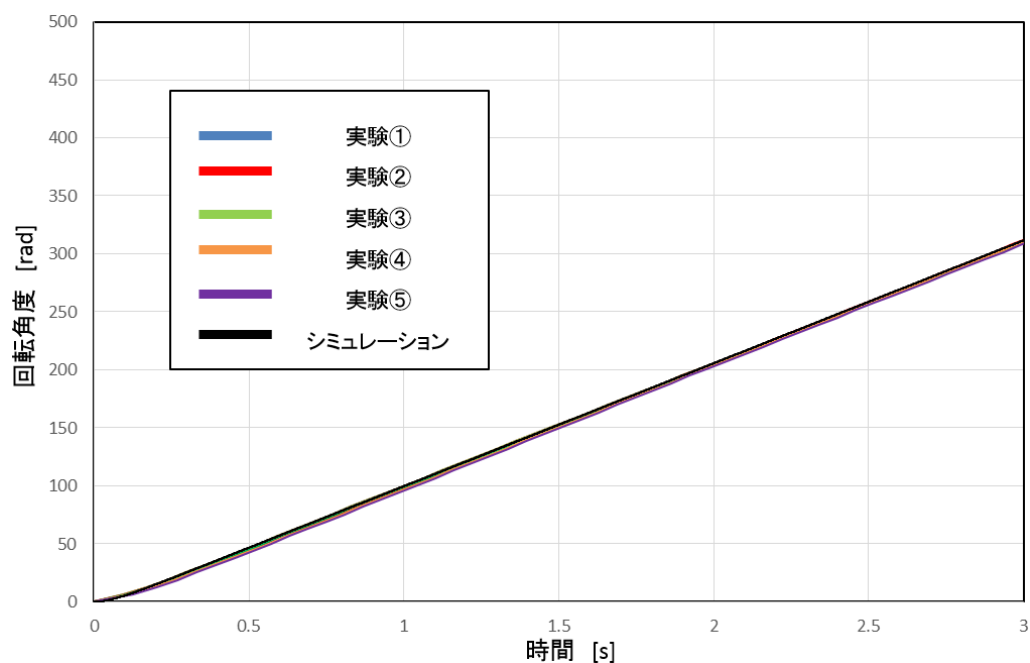


図 5.8 実験値とシミュレーションの比較 (回転角度-時間)

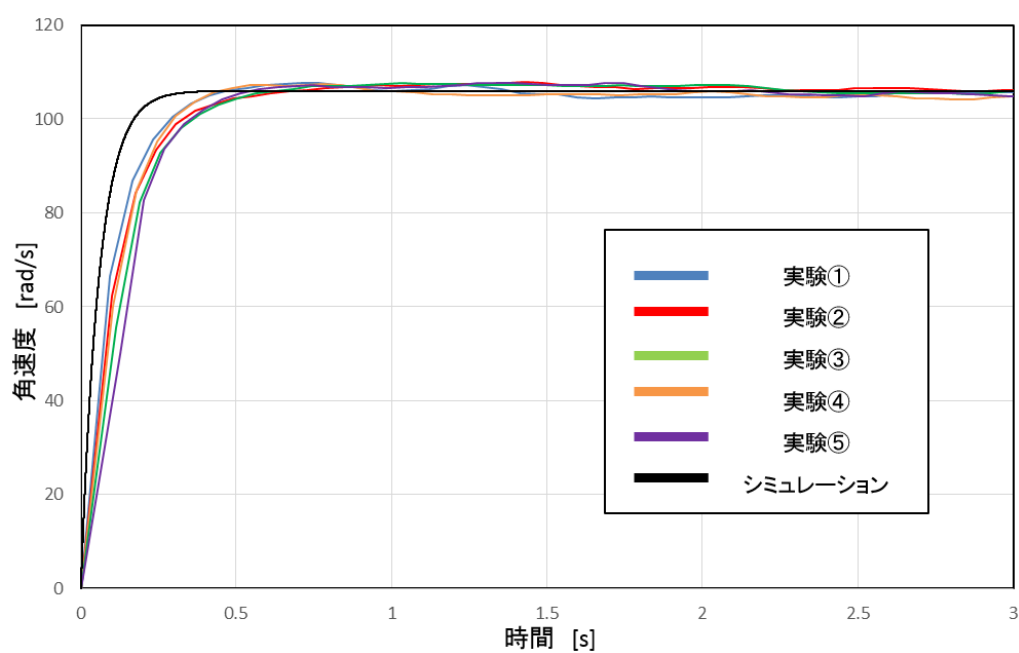


図 5.9 実験値とシミュレーションの比較 (角速度-時間)

5.1.5 慣性モーメントの同定

角速度の立ち上がり誤差が大きいことが判明したので，原因の一つとして実験環境の慣性モーメントがメーカーから提示された値とは異なるを考え，慣性モーメントの同定を行った．

定常角速度 ω_n とすると，時間 t と角速度 ω の関係は式(5.4)となる．モータの機械的時定数 α は一般に式(5.5)であり⁽⁹⁾，これを式(5.4)に代入すると慣性モーメント J_d は式(5.6)で算出できると思われる．

$$\omega = (1 - e^{-\frac{1}{\alpha}t})\omega_n \quad (5.4)$$

ω ：角速度[rad/s]， t ：時間[s]， α ：時定数[s]， ω_n ：定常角速度[rad/s]

$$\alpha = \frac{J_d}{C_m} \quad (5.5)$$

α ：時定数[s]， J_d ：慣性モーメント[kg・m²]， C_m ：回転粘性抵抗[N・m/(rad/s)]

$$J_d = -\frac{C_m \cdot t}{\log_e\left(1 - \frac{\omega}{\omega_n}\right)} \quad (5.6)$$

式(5.6)に，式(5.3)で求めた回転粘性抵抗 $C_m = 7.33 \times 10^{-5}$ ，表 4.1 で求めた平均角速度 $\omega_n = 106.0$ ，実験値の角速度 ω と時刻 t を代入して算出しようと試みたがモータの定常角速度は微妙に変動しており 106 を超える関係上計算がエラーになりがちであった．そこでモータの定常角速度 $\omega_n = 108$ として計算を行い，立ち上がりから概ね角速度が収束する 1 秒間の平均をとった．

表 5.2 慣性モーメント J_d

実験データ番号	慣性モーメント J_d [kg・m ²]
①	1.03×10^{-5}
②	1.15×10^{-5}
③	1.08×10^{-5}
④	1.15×10^{-5}
⑤	1.20×10^{-5}
平均値	1.12×10^{-5}

実験精度の低さが影響し慣性モーメントの値が定まらず，やや試行錯誤的になった．メーカーより入手した慣性モーメントの合計より約 66%増加した．

5.1.6 同定後の角速度比較

表 5.2 の算出された慣性モーメント J_d の平均値 1.12×10^{-5} をモデルに入力し, 再度シミュレーション値と実験値を比較した. 図 5.10 は, 図 5.10 に慣性モーメント J_d のシミュレーション値を追加した図である. 図 5.11 は図 5.10 の横軸を 0~1 秒間に拡大したものである.

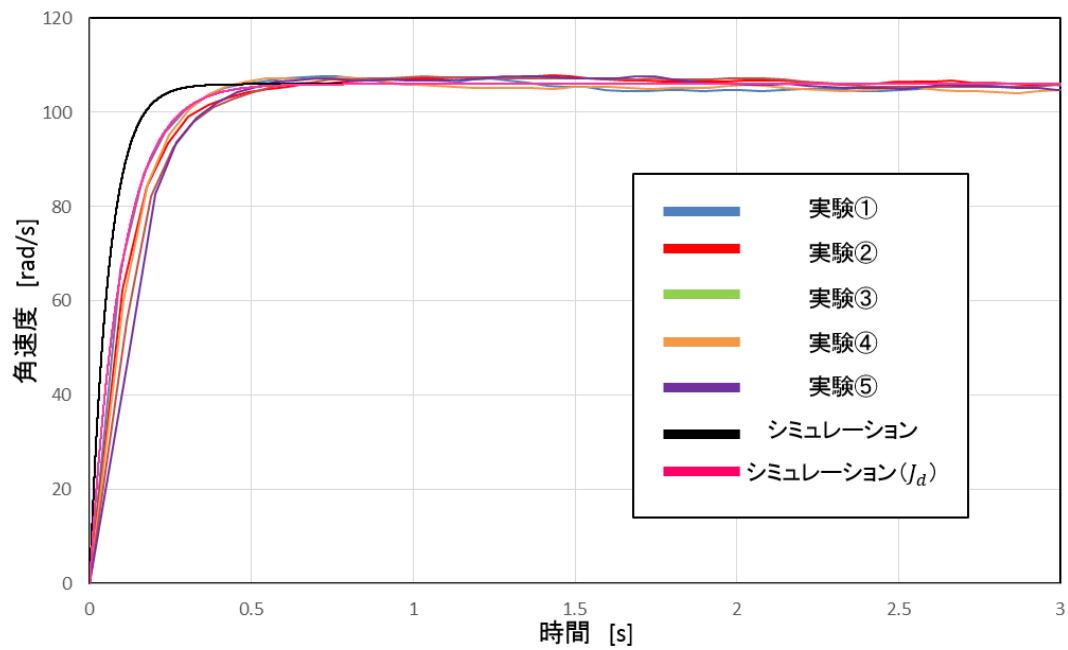


図 5.10 実験値と慣性モーメント J_d のシミュレーション値との比較 (0~3 秒間)

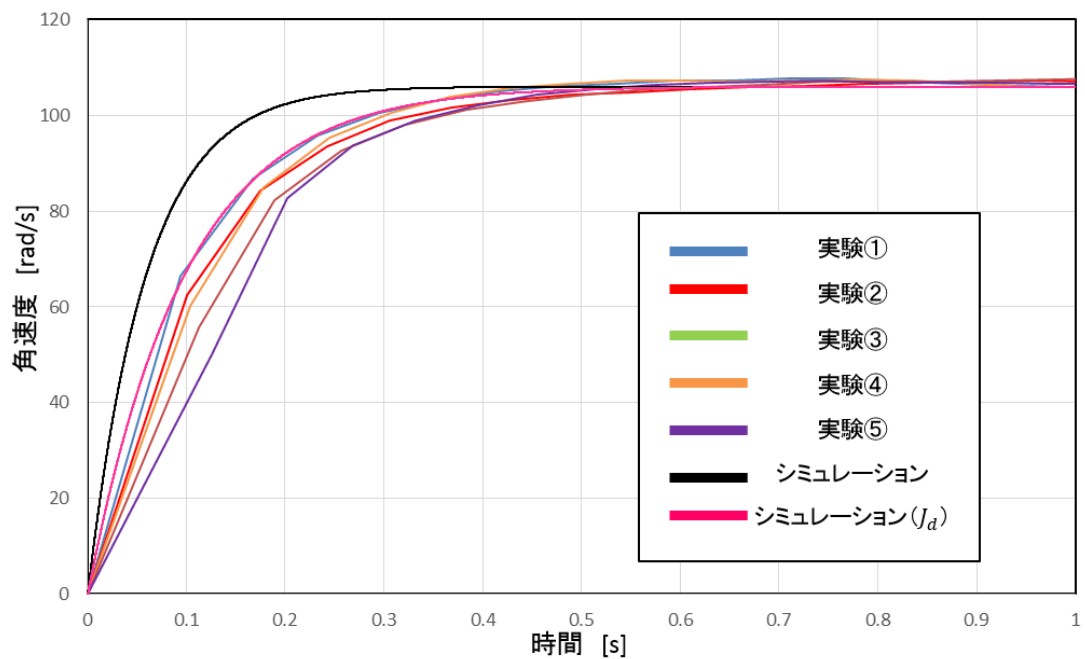


図 5.11 実験値と慣性モーメント J_d のシミュレーション値との比較 (0~1 秒間)

図 5.12 は、シミュレーション値に近い実験①と誤差の一番大きい実験⑤を抜き出し比較したものである。図 5.13 は、実験値①との誤差を慣性モーメント同定前と後の両方を比較した図であり、図 5.14 は、実験値⑤の誤差比較である。たとえば誤差がマイナスということは、同じ時間においてシミュレーション値が実験値より小さいことを示す。

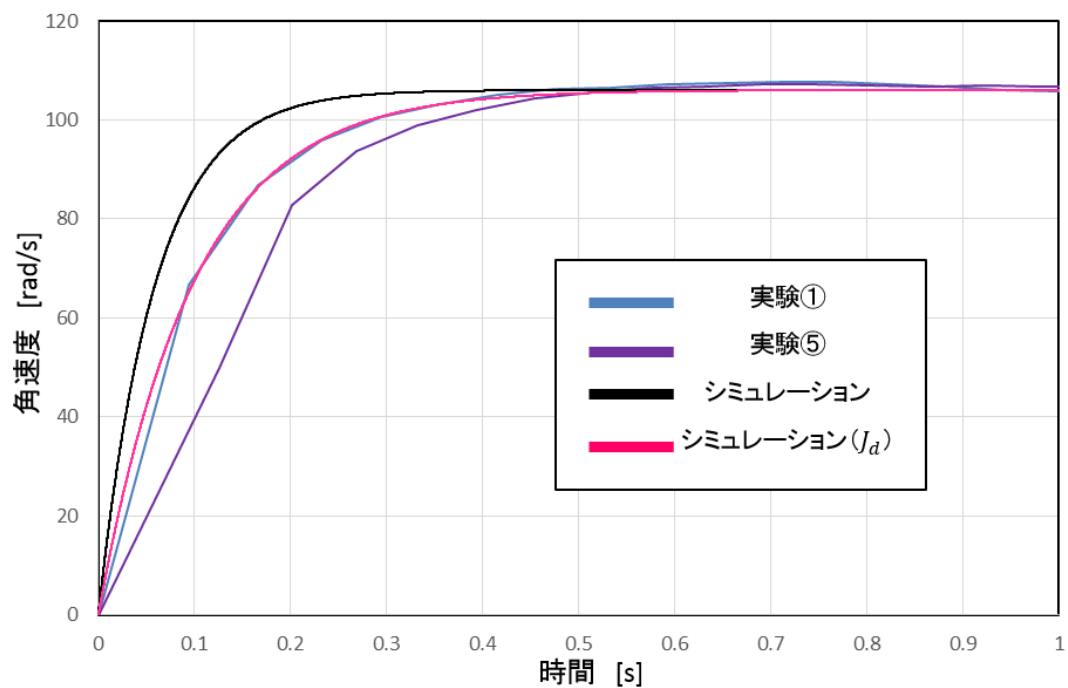


図 5.12 実験値①、⑤とシミュレーション値との比較 (0～1 秒間)

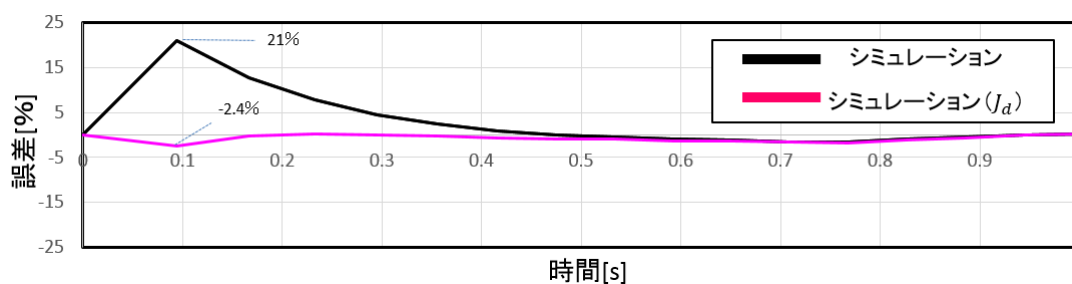


図 5.13 実験値①とシミュレーション値の誤差比較

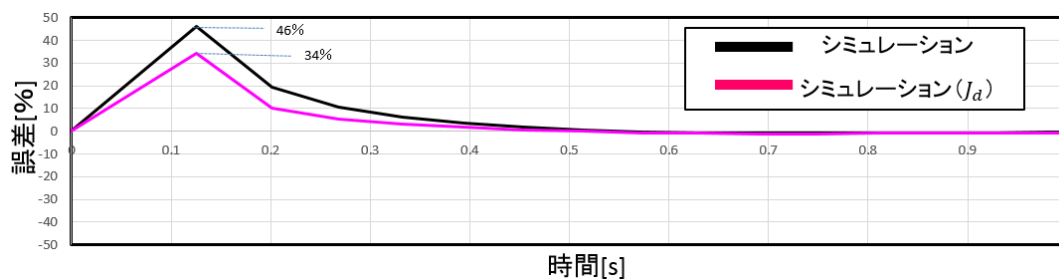


図 5.14 実験⑤とシミュレーション値の誤差比較

5.2 結果・考察

5.1.3 のシミュレーション結果

計測できなかった電圧，電流，トルクはおおむね妥当と思われる数値となった．電流値が立ち上がりに大きく上昇しているが，これは電圧を印加した際には電機子が回転しておらず逆起電力が発生していない為と考えられる．また電圧印加を終了した後に，電流がマイナスを示すがこれは電機子が慣性モーメントにより回転し逆起電力のみが発生するからと考えられる．

5.1.4 実験値との比較結果

回転角度はおおむね一致していると思われるが，定常状態に至るまでの角速度の上昇については誤差があることが分かった．そこで原因の一つとして実験環境の慣性モーメントが正しくないと考え，同定することにした．

5.1.5 慣性モーメントの同定

慣性モーメントの算出は，実験データのロータリーエンコーダの分解能が低い影響を受け，一定の値とならなかった．

5.1.6 同定後の角速度比較

新たに慣性モーメント J_d を用いてシミュレーションを行い実験値との比較を行った．誤差最小の実験①と最大の⑤を比較した．実験①は非常によく立ち上がりの波形が一致したといえる．実験⑤は，立ち上がりの実験データが荒く誤差が大きかった．

まとめ

シミュレーションに用いた粘性抵抗はモータ・カップリング・ロータリーエンコーダの合計値であるので，モータ単体のモデルにするのであれば分離して入力する必要があるが，式 5.1 よりすべての粘性抵抗を包含した値になってしまうので分離は難しい．しかしながら，求められた粘性抵抗の値は小さく本来モータを無負荷で使用することはないので，外部の負荷が支配的であり大きな問題にはならないと考えられる．

同定後の慣性モーメントが 66%増加したが，同定後の立ち上がり波形がよく一致したことを考えると必ずしもメーカより提示された値が正しいとも限らない．しかしながら，実験値の分解能が低いので今後詳しく検討したい．また，モータ単体の慣性モーメントを定める方法も検討する必要がある．

今回は測定器の制約上 1.2V のみで比較を行ったが，実験環境の改善を行ったのち電圧を変化させた際にシミュレーションとどのように差がでるか比較する必要があると思われる．また，実際に負荷をかけた際のそれぞれのデータも収集しモデルとの比較を行うべきである．また，モータを長時間駆動すると電機子に巻かれた巻き線の温度が上昇し電気抵抗が変化することも知られているのでモデルに反映する必要があると思われる

6.トルク変動を考慮した 機能モデル

6.1 トルク変動の考慮

6.1.1 概要

前章にて、機能モデルによる簡易型直流モータの機能モデルの妥当性が確認できたと判断した。次に、トルクの変動がモデルに再現できれば振動現象を含む挙動を計算で予測できると考え、3章で説明したモータのトルク変動を考慮したモデルの作成を試みた。

6.1.2 トルク変動の組み込み

図 6.1 は，方形コイルの回転角度におけるトルク変動であり，これを機能モデルで表現すると図 6.2 となる．

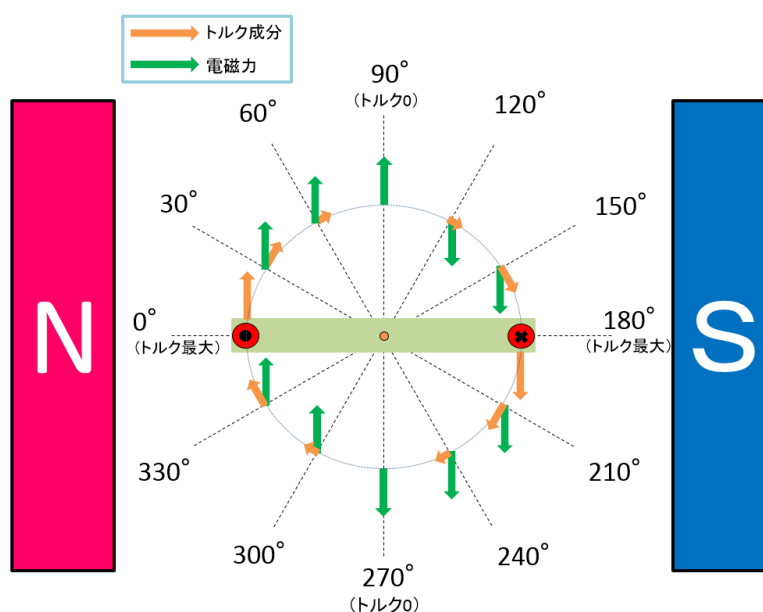


図 6.1 回転角度とトルクの関係 (再掲)

図 6.2 のモデルではロータの回転位置のコサイン成分がトルクとなり，サイン成分はトルクにならないとした．図 6.3，図 6.4 は，電圧を 1～6 秒間印加したシミュレーション結果である．パラメータには表 5.1 を入力した．

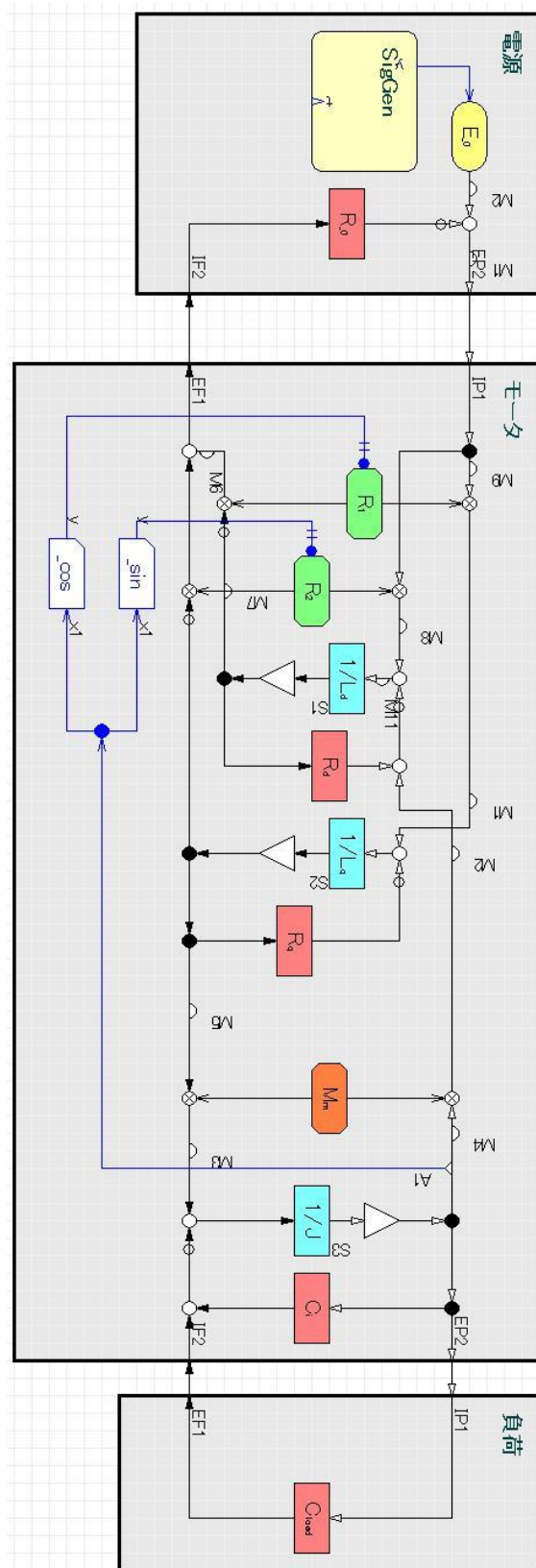


図 6.2 機能モデルによるトルク変動の表現

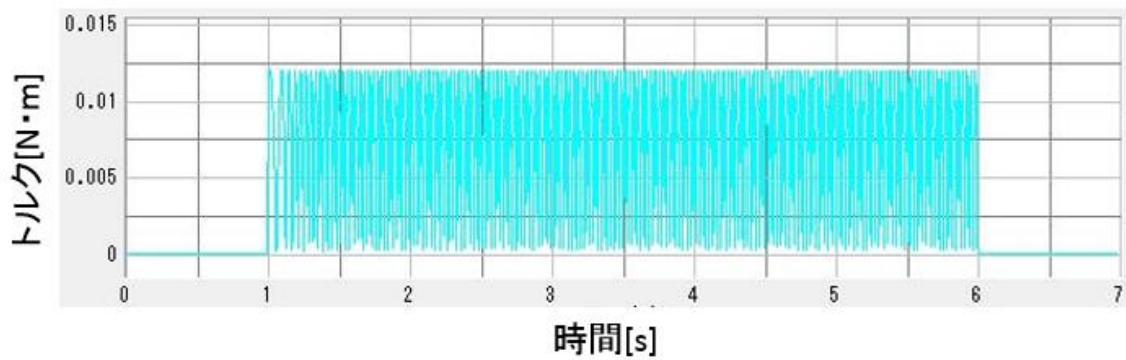


図 6.3 トルク-時間

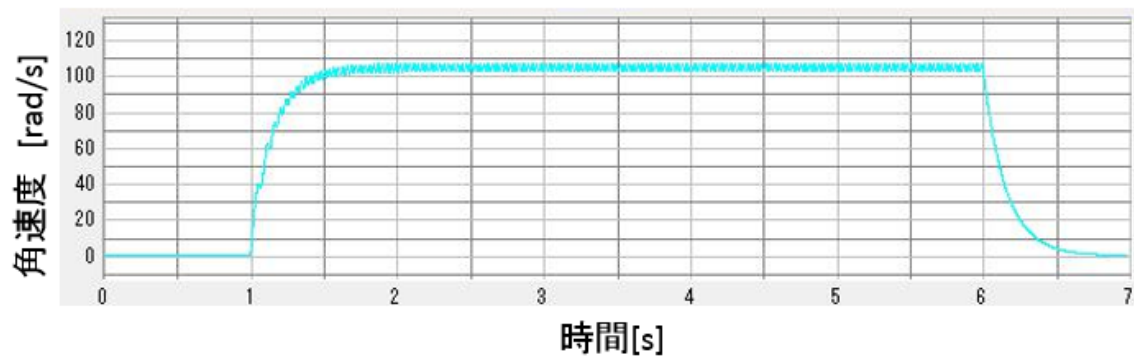


図 6.4 角速度-時間

トルクの変動を再現でき，それにより角速度も小刻みに変動するようになった．

6.1.3 スロットの考慮

スロット数によりトルクの変動が変化するので図 6.2 のモデルにスロットを並列で追加したモデルを図 6.5 に示す．また，スロットは $+120^\circ$ と -120° の位相を入力した．電源電圧は，解析時間の関係上 1～4 秒に変更した． 図 6.6 はトルク，図 6.7 は角速度である．図 6.6 のトルクは，各スロットの合計トルクが出力された．図 6.8 は定常角速度 3～3.04 秒間の角速度の拡大図であり，定常回転時の角速度の平均値が $313.4[\text{rad/s}]$ ，したがって一回転に要する時間は 0.02 秒としたとき，図より 6 山の角速度変動が確認された．

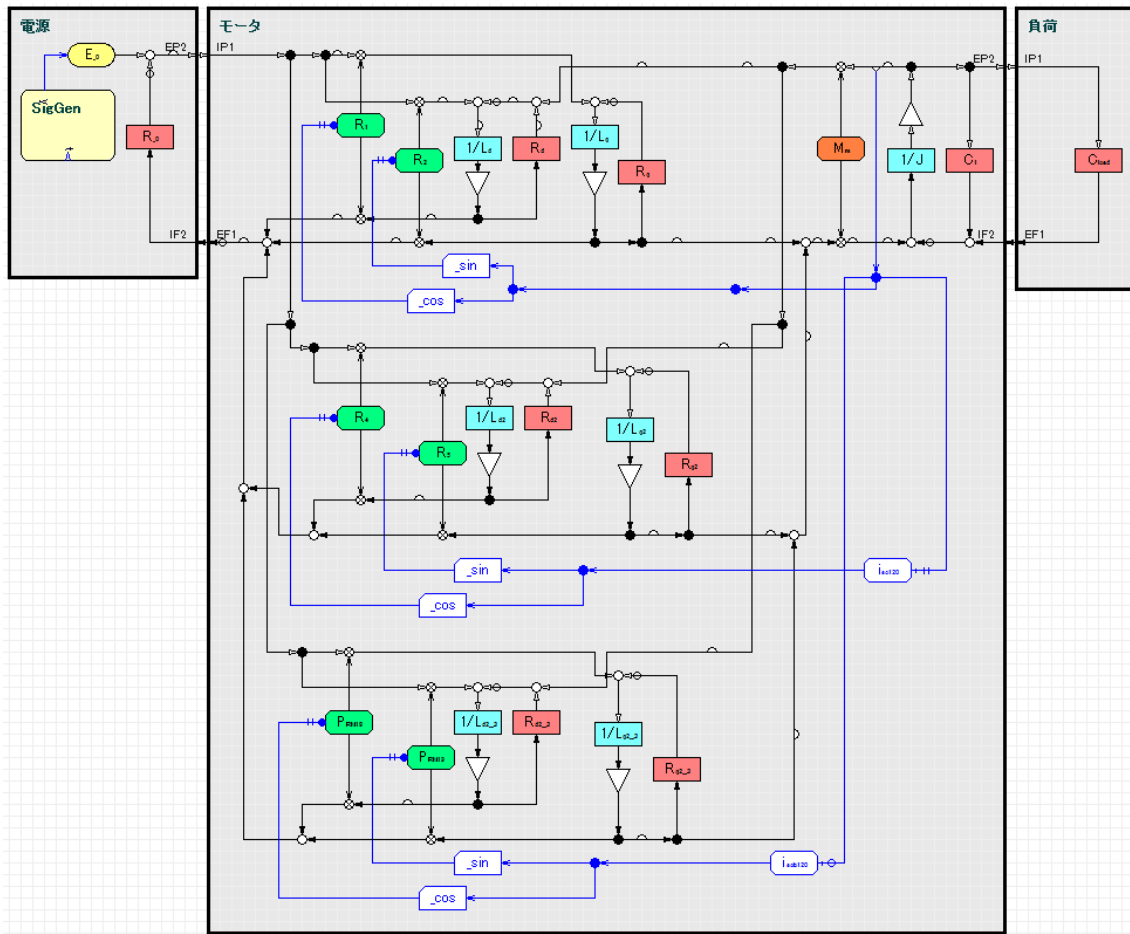


図 6.5 機能モデルによるトルク変動モデル

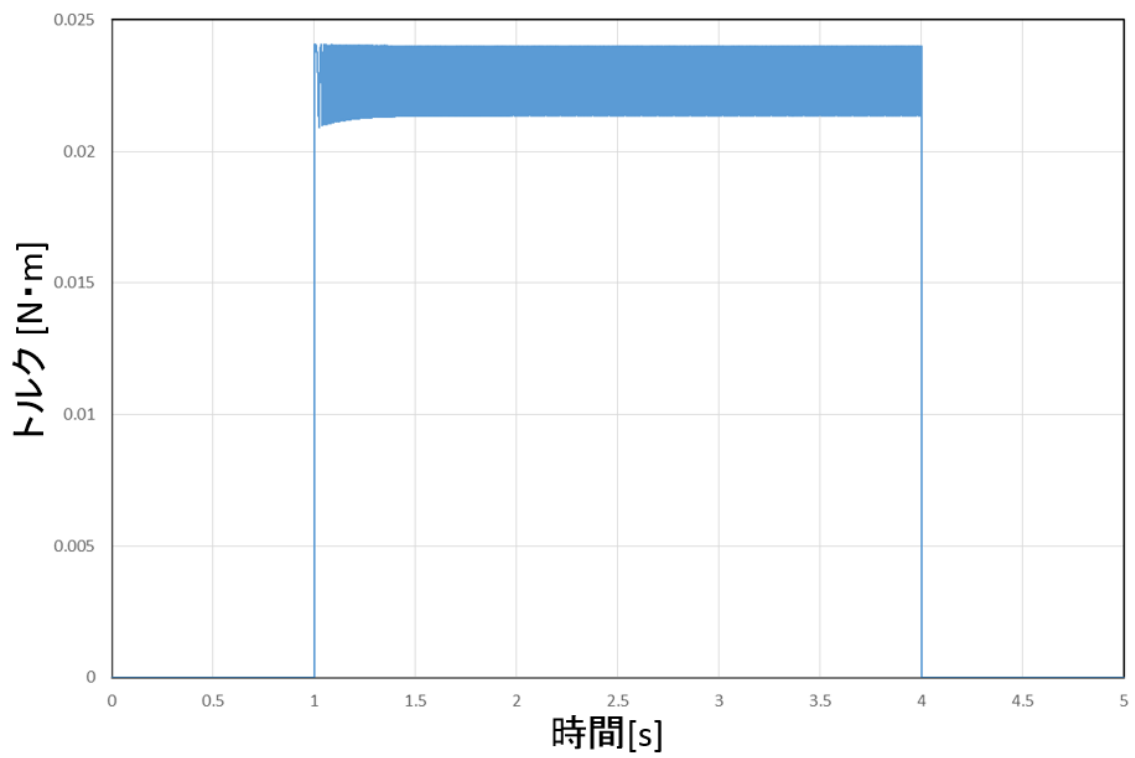


図 6.6 トルクー時間（スロット追加）

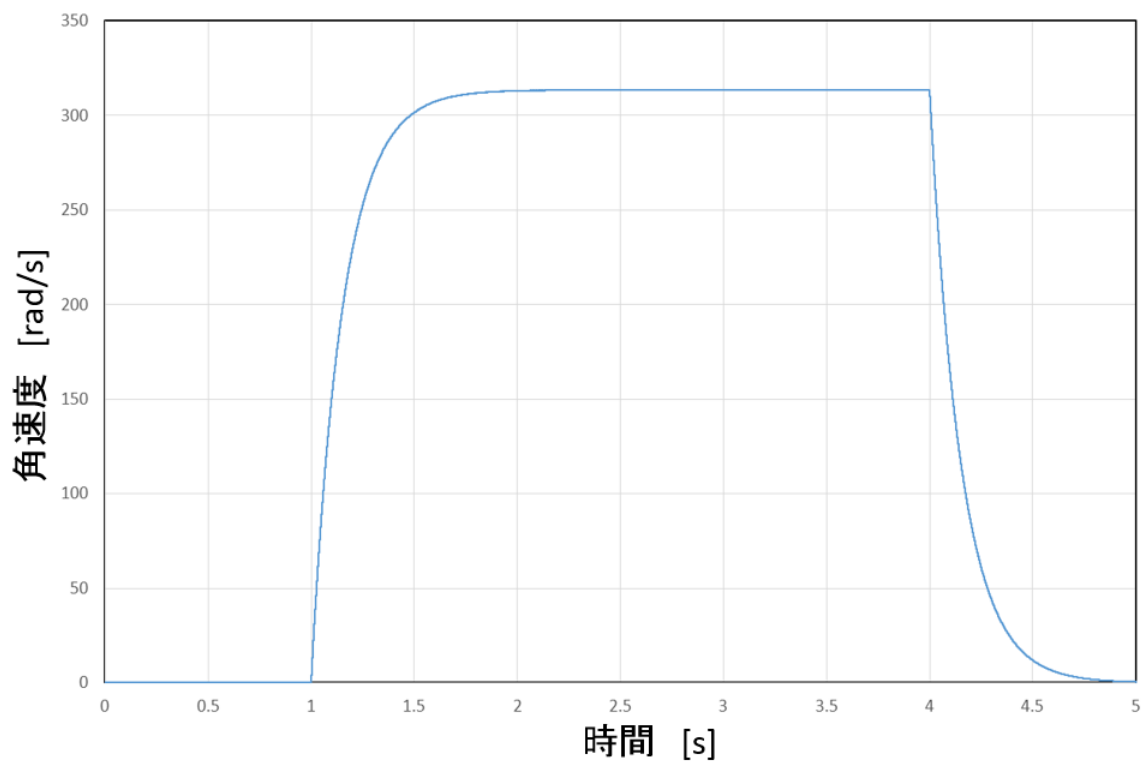


図 6.7 角速度ー時間（スロット追加）

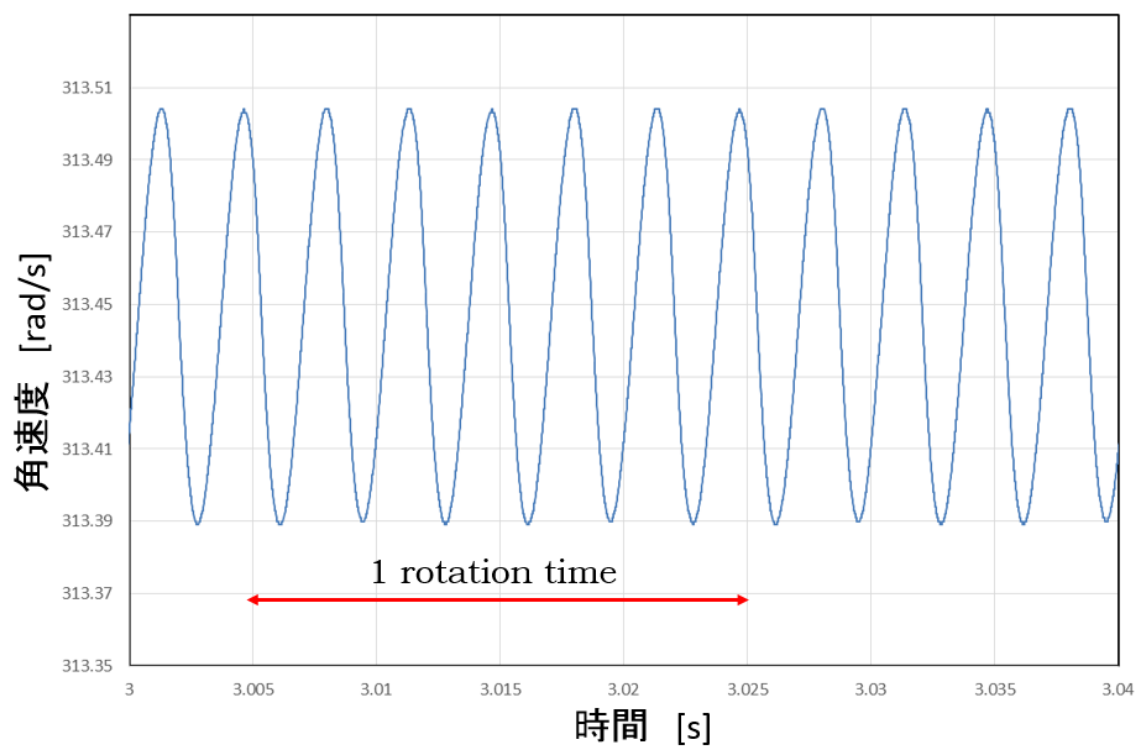


図 6.8 角速度の拡大図 (3～3.04 秒間)

7.結論

7.1 結論

- 1.機能モデルの開発背景と目的について説明した.
- 2.機能モデルを構成原理について振動モデルを例に交え説明した.
- 3.機能モデルを用いてモータモデル作成の概念を示した.
- 4.作成したモデルの予測値と、実物のモータの実験値を比較し特性値を同定した.
- 5.トルク変動を考慮したモデルの作成法について提案した

作成したモデルと実物のモータとの回転角と立ち上がりの角速度を比較した. 回転角度については良好な結果となったが, 定常状態に至るまでの角速度の立ち上がりについては誤差があった. 慣性モーメントを同定したのち再度シミュレーションを行ったところ立ち上がり波形の概ね一致を確認したが, 立ち上がりが合わない原因を特定することは出来なかった. しかし回転角度が概ね一致していることから, 電源電圧・駆動時間・慣性モーメントなど検討項目はあるが, 機能モデルを用いて直流モータのモデルを作成可能であることを示した. また, トルク変動を考慮したモータのモデル作成方法についても示し, シミュレーション結果よりトルク変動と角速度の変動を確認した.

今回, 目標とする実機自体の計測データにバラつきがあり, モデルの評価が難しく感じた. モデルベース開発を精度よく行うには, 本研究で使用した安価なモータではなくある程度上質で再現性のある挙動をする部品郡を選定しなければならないと思われる.

7.2 今後の課題

1.モデルの改善

実験環境を改善し, より高分解能での計測を可能にすることで同定精度を高める.
モータ単体の慣性モーメントを求める方法を検討する.
電源電圧を変化させてもモデルが妥当であるか検討する必要がある.
長時間駆動した際の検討が必要である.

2.モデルベース開発としての改善

モータの駆動相手としてスライダやプロペラ, ロボットアームなどの構造物のモデルを作成し統合モデルの妥当性を検討する.

3.トルク変動考慮

トルク変動などモータの精密な挙動を表現できるモデルを実験値と比較して作りこみ, 振動現象の予測に活用できるようにする.

8.付録

8.1 モータの仕様

以下は、実験に用いた MABUCHI Motor RS-540SH-6527 のデータであり、マブチモータのホームページ製品カタログより引用した。

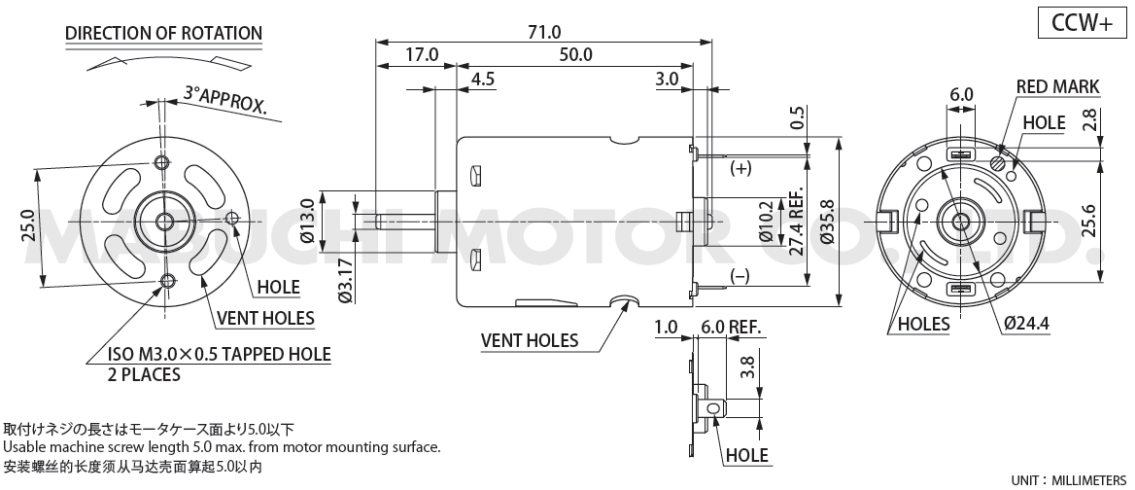


図 8.1 モータの図面

表 8.1 モータの仕様

MODEL	VOLTAGE		NO LOAD		AT MAXIMUM EFFICIENCY					STALL			
	OPERATING RANGE	NOMINAL	SPEED	CURRENT	SPEED	CURRENT	TORQUE		OUTPUT	TORQUE		CURRENT	
			r/min	A	r/min	A	mN·m	g·cm	W	mN·m	g·cm	A	
RS-540SH-7520	(*1)	4.8~7.2	7.2V CONSTANT	23400	2.40	19740	13.0	30.6	312	63.2	196	1998	70.0
RS-540SH-6527	(*1)	4.8~9.6	9.6V CONSTANT	23400	1.60	20040	9.55	31.0	316	64.9	216	2202	57.0

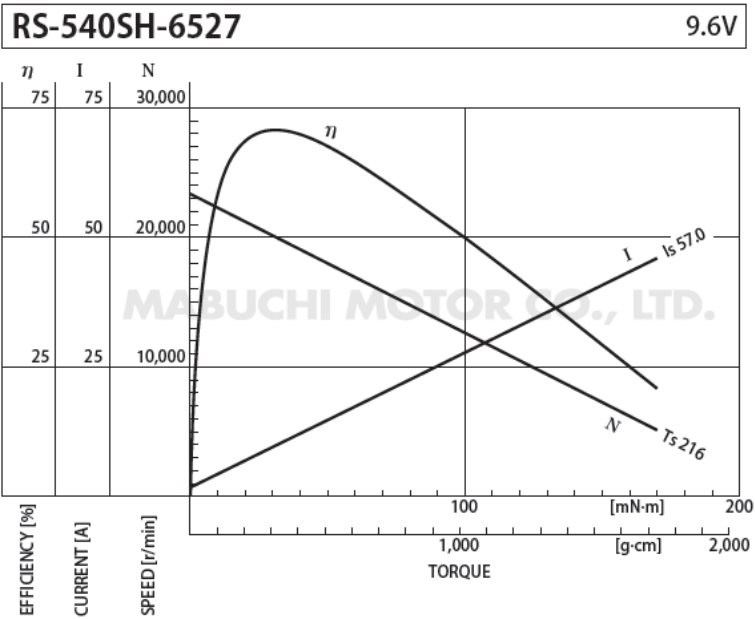


図 8.2 モータの特性図

8.2 計測プログラム

以下は、実験時に用いた計測ソフト LabVIEW のプログラムである。
スペースの都合上、角度計測・回転パルス計測のプログラムは分割して掲載する。

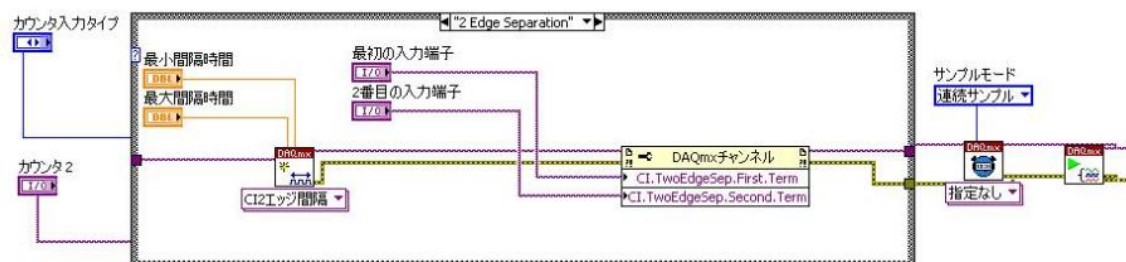


図 8.3 回転パルス時間間隔計測プログラム（左部）

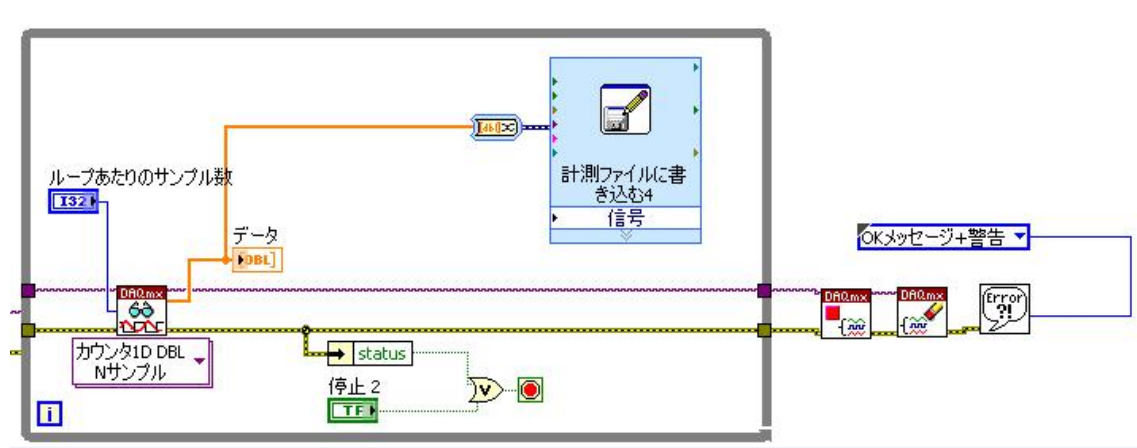


図 8.4 回転パルス時間間隔計測プログラム（中央部）

図 8.3 および図 8.4 の回転パルス時間間隔計測プログラムは角速度を算出するのに用いた。
一回転する際に検出されるパルスの数は 1 なので、 $2\pi / (\text{パルス時間間隔})$ により角速度が
求まる。

参考文献

1. 長松 昭男, 角田 鎮男, 長松 昌男: 製品開発のための新しいモデル化手法, 展開と統合 日本機械学会論文集. C 編 64(627), 4216-4223, 1998
2. 長松 昌男, 長松 昭男: 電気・機械一体モデルの開発と応用第 1 報 物理学的基础, シミュレーション 32(1), 48-54, 2013
3. 長松 昌男, 長松 昭男: 電気・機械一体モデルの開発と応用第 2 報 力学と電磁気学問の新しい相似則の提案, シミュレーション 32(2), 136-143, 2013
4. 長松 昌男, 長松 昭男, 角田 鎮男: 電気・機械一体モデルの開発と応用第 3 報 モデルベース開発のためのモデル化(講座), シミュレーション 32(3), 221-232, 2013
5. 長松 昌男, 長松 昭男, 角田 鎮男: 電気・機械一体モデルの開発と応用第 4 報 物理機能線図の応用例(講座)シミュレーション 32(4), 349-359, 2013
6. 長松昭男, 長松昌男: 複合領域シミュレーションのための電気・機械系の力学, コロナ社, 2013
7. 赤津観: モータ技術のすべてがわかる本, ナツメ社, 2012
8. 株式会社 DYMOS: ハイブリッド車モデルの事例
<http://www.dymos.jp/index.html>
9. 正司和彦, 高橋参吉, : モデル化とシミュレーション, 実教出版, 2012
10. 日本電産株式会社, : 技術情報 DC モータの回転原理を見直す. 図 2.1 DC モータの構造と各部名称, <http://www.nidec.com/ja-JP/technology/motor/basic/00011/>
11. 公益社団法人日本電気技術者協会: 電気技術解説講座インダクタンスとは何か,
<http://www.jeeea.or.jp/course/contents/01145/>
12. 長松昭男, 岩原光男: 数値解析講義資料. (2004)
13. 角田鎮男: 製品開発のための新しいモデル化手法物理機能のモデル化(線形モデル編), 製品開発のための新しいモデル化手法物理機能のモデル化(線形モデルと機械系), 製品開発のための新しいモデル化手法物理機能のモデル化(線形モデルと電気系), 2014
14. 馬場敬之: キャンパス・ゼミ シリーズ電磁気学, マセマ出版, 2014,
15. 山口正人, 横関政洋: 電動機・発電機の理論, Energy chord, 2013
16. 高田勇次郎: 電検新講第Ⅱ種編 電気機器Ⅱ, オーム社, 1954
17. 小澤 哲也: パソコン計測制御ソフトウェア LabVIEW リファレンス・ブック, CQ 出版社, 2013

謝辞

本論文を終えるにあたり，懇切丁寧な指導，助言を頂きました，CATEC（株）の角田鎮男様をはじめとする関係者の皆様には理論・実験の助言を頂き心から感謝申し上げます。

また実験設備の製作を手伝って頂きました技術教育職員の内野秦伸先生，岡本民夫先生に心より感謝の意を表します。

大学院の籍を置かせて頂きました法政大学理工学部機械工学科の新井和吉教授には大変心配お掛けしました事を深くお詫び申し上げます。

臨床心理士の山口剛史先生には 1 年にわたる心のカウンセリングをして頂き，心より感謝申し上げます。

実験場所を提供して頂きました新任の相原建人先生，実験の手伝いをしてくれた後輩の小村建人君，岩原光男先生および研究室の皆様には感謝いたします。