

メカトロニクス特論

機械回路の記号解析

電気通信大学 知能機械工学科

下条 誠

専門: ロボティクス・メカトロニクス 人間工学

はじめに

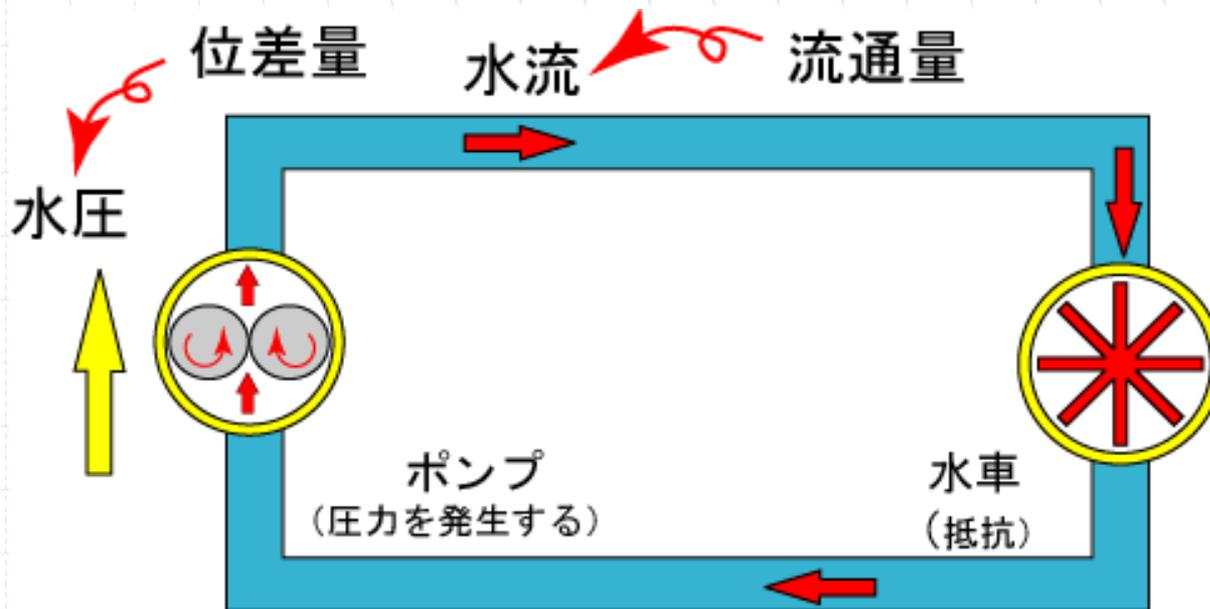
- **機械の動力学的解析手法と、電気回路の交流理論及び過渡解析的手法との間には非常に似通った関係にある。また同様な関係は、特定な場合の熱・流体に対しても成り立つ。**
- **本講義では、機械システムの動力学的特性を、機械回路に置き換えて電気回路的に解析する手法について解説を行う。**

量の話

- **外延量**: そのまま足せる量
長さ, 面積, 体積, 質量, 時間など
- **内包量**: そのまま足せない量
濃度, 密度, 温度など
- **流通量**: 要素を通過する量
電流, 流量, 熱流量, 力など
- **位差量**: 要素に加わる差の量
電圧, 圧力, 温度, 速度など

流通量と位差量

	電気	機械	熱	流体
流通量	電流 (i)	力 (f) モーメント (M)	熱流量 (q)	流量 (w)
位差量	電圧 (V)	速度 (v) 角速度 (ω)	温度 (T)	圧力 (P)



基礎方程式

表 1.2: 基礎方程式

	電 気	機 械	熱	流 体
方程式 (流通量)	KCL: $\sum i_{net} = 0$	$\sum f = 0$ $\sum M = 0$	$C \frac{dT}{dt} = q_{netin}$ C 熱容量	$W_{netin} = \frac{dm}{dt}$ $\sum f = 0$
方程式 (位差量)	KVL: $\sum v_{loop} = 0$	$\sum v_{loop} = 0$ $\sum \omega_{loop} = 0$	$\sum T_{loop} = 0$	$\sum P_{loop} = 0$

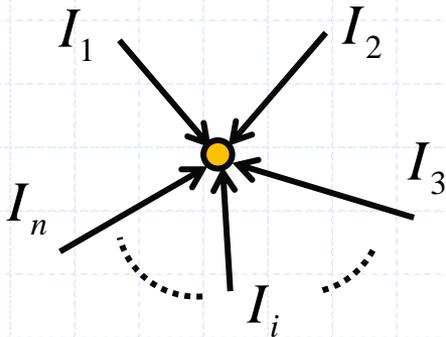
流通量:キルヒホッフの電流則(KCL)

→電荷不減の法則

位差量:キルヒホッフの電流則(KVL)

→電圧値一箇の法則

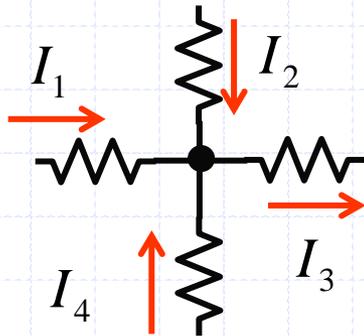
電気回路の基本法則(キルヒホッフの第一法則)



$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

節点に電流が流れ込む量と、
流れ出る量の和はゼロとなる。

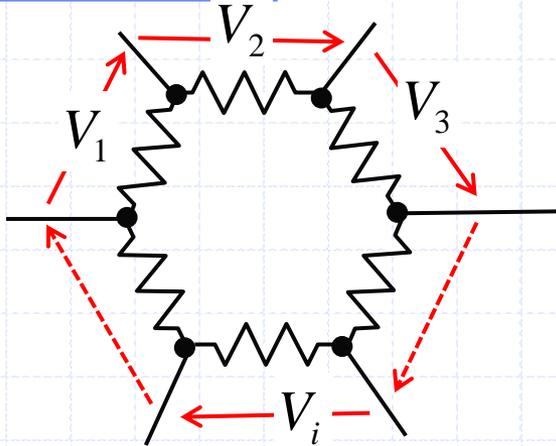
例)



電気回路を作るとき、部品を繋ぐとき、
複数の配線が集まる点があり(節点)、
その点に流れ込む電流と流れ出す電
流の和はゼロになること。

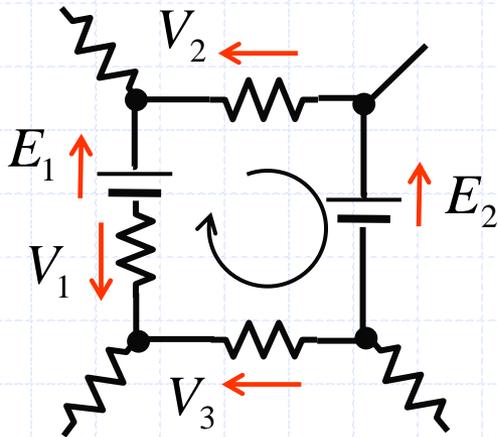
$$I_1 + I_2 + I_4 = I_3$$

電気回路の基本法則(キルヒホッフの第二法則)



$$\sum_{i=1}^n V_i = 0$$

ループになっている回路の節点間の電圧の和はゼロとなる。



電気回路を作るとき、部品を繋ぐとき、複数の配線で閉回路となる部分では、電圧は一周して足し合せたらゼロになる

$$E_1 - V_1 - V_2 - E_2 + V_3 = 0$$

$$E_1 - E_2 = V_1 + V_2 - V_3$$

機械系と電気系における相似

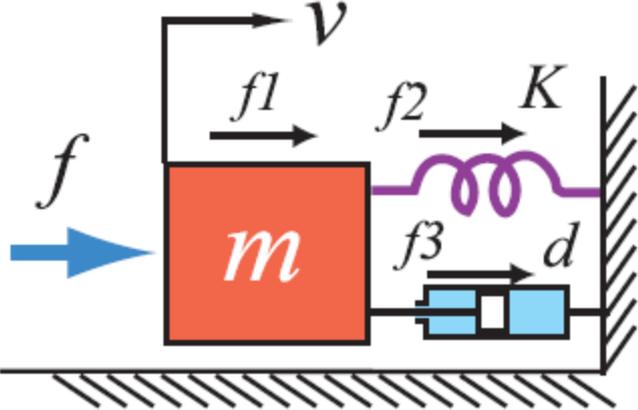
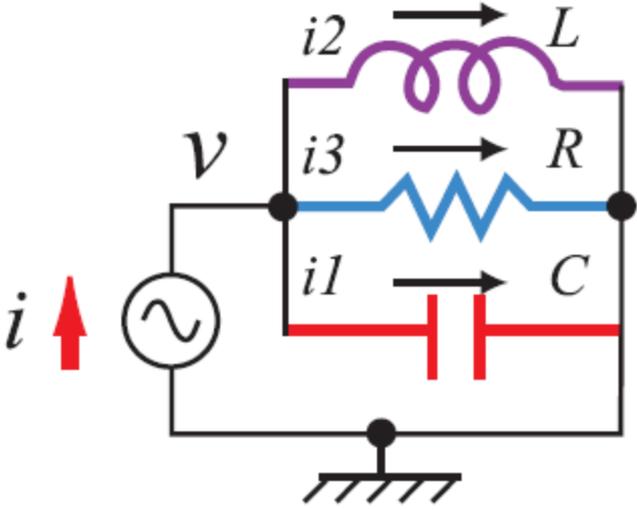
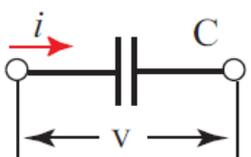
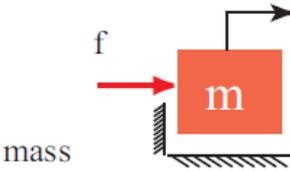
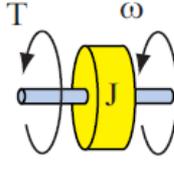
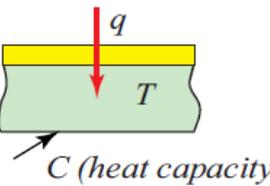
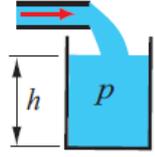
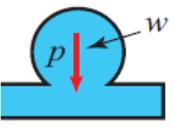
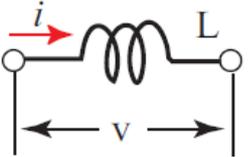
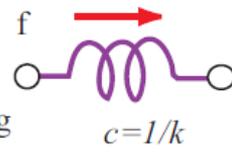
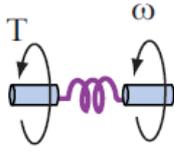
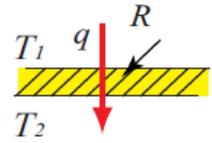
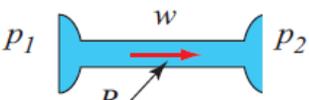
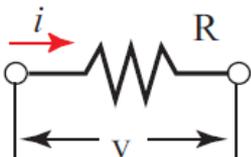
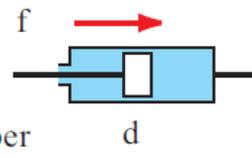
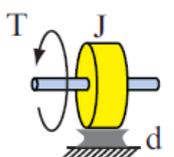
機械系	電気系
	
<p>力の平衡から</p> $f = f1 + f2 + f3$ $f = m \frac{dv}{dt} + dv + k \int v dt$	<p>キルヒホッフの電流保存則 (KCL) から</p> $i = i1 + i2 + i3$ $i = C \frac{dv}{dt} + \frac{1}{R} v + \frac{1}{L} \int v dt$

図 1.1: 機械系と電気系における相似回路



各要素の相似回路

電気系	機械系	熱系	流体系
	 	 $q_{net} = C\dot{T}$ <i>T</i> : temperature <i>q</i> : heat-flow rate <i>R</i> : heat resistance	 <i>liquid</i>  <i>gas</i> $w = Ch\dot{h}$ $w = Cp\dot{p}$ <i>w</i> : flow rate <i>p</i> : pressure <i>R</i> : fluid resistance
	 <i>spring</i> $c = 1/k$ 	 $q = R^{-1}(T_1 - T_2)$	 $w = R^{-1}(p_1 - p_2)^{1/\alpha}$
	 <i>dumper</i> 		

電流



力/モーメント

電圧



速度/角速度

力学系

エネルギーを蓄積する要素

表 1.3: エネルギーの蓄積 (受動的)

	電 気	機 械	熱	流 体
流 通 量	コイル (L) $i = \frac{1}{L} \int v dt$	バネ (K) $f = k\Delta x = k \int v dt$ $M = k\Delta x = k \int \omega dt$
位 差 量	容量 (C) $v = \frac{1}{C} \int i dt$ $i = C \frac{dv}{dt}$	質量 (m) $v = \frac{1}{m} \int f dt$ $\omega = \frac{1}{J} \int M dt$	熱容量 (C) $q_{net} = C \frac{dT}{dt}$	流体容器 (C) $w = C \frac{dp}{dt} \text{ (gas strage)}$ $w = C \frac{dh}{dt} \text{ (liquid strage)}$

エネルギーを散逸する要素

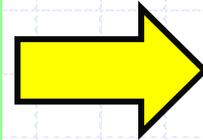
表 1.4: エネルギーの散逸 (受動的)

	電 気	機 械	熱	流 体
流 通 量	抵抗 (R) $i = \frac{1}{R}v$	粘性抵抗 (d) $f = dv$ $M = k\Delta x = k \int \omega dt$	熱抵抗 (R) $q = \frac{1}{R}(T_1 - T_2)$	流体抵抗 $w = \frac{1}{R}(p_1 - p_2)^{\frac{1}{\alpha}}$

電気回路シミュレータによる機械システムの解析

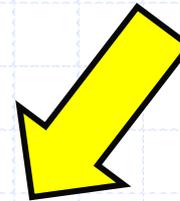
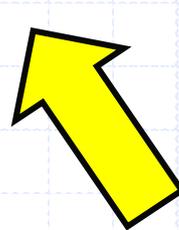
変換

機械システム



電気回路

解析



電気回路

シミュレータ

電気回路シミュレータ: Qucs 1

Qucs project: Quite Uni x

qucs.sourceforge.net

Qucs
Quite universal circuit simulator

home screenshots support download roadmap development FAQ

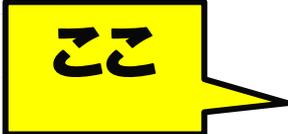
Latest News

Latest stable release: 0.0.18

Source: [Windows](#) [Ubuntu](#) [OS X](#)

[Official SourceForge repository](#)
[GitHub Mirror](#)
[Qucs Wiki](#)

- 18 September 2015 Publication "Qucs: An introduction to the new simulation and compact device modelling features implemented in release 0.0.19/0.0.19Src2 of the popular GPL circuit simulator.", 13th MDS-AK Workshop, Graz (A). The presentation slides by Mike Brinson are available [online](#).
- 19 January 2015 Enabled automatic generation and deployment of Doxygen source code documentation. Latest documentation for "master" branch available for [Qucs GUI](#) and [Qucs Core](#)
- 07 January 2015 Enabled Linux and OSX builds on [Travis CI](#), enabled code coverage with [Coveralls](#)
- 17 September 2014 Released installer fo Mac OSX 10.6 (Intel 64 bit) (ASCO included).
- 02 September 2014 Updated package for Ubuntu 14.04 (Trusty) and 14.10 (Utopic), [Ubuntu PPA](#)
- 01 September 2014 Updated Doxygen [code documentation](#)
- 01 September 2014 Released Mac OSX installer (10.7 to 10.9), ASCO included. For FreeHDL, Verilog-A, users are better served using a [package manager for Mac OSX](#)
- 31 August 2014 Released Qucs 0.0.18, [News](#)
- 04 April 2014 Updated build instruction for [Darwin \(Mac OSX\)](#), [Linux](#), [Windows](#)
- 16 March 2014 Updated manuals, developers and FAQ webpages
- 29 November 2013 Created [GitHub repository](#) for the Qucs website



Qucs2

sourceforge.net/projects/qucs/files/qucs-binary/

sourceforge Search Browse Enterprise Blog Jobs Deals Help Log In or Join

SOLUTION CENTERS Go Parallel Resources Newsletters

Norden Microwave Amps

Custom and standard microwave Amps, Multipliers, Converters

Home / Browse / Science & Engineering / Electronic Design Automation (EDA) / Quite Universal Circuit Simulator / Files

Quite Universal Circuit Simulator Alpha

A circuit simulator with graphical user interface (GUI)
Brought to you by: crobarcro, ela, fransschreuder, gitorri, and 3 others

Summary Files Reviews Support Wiki Mailing Lists Tickets News Discussion Old_SVN Git

Looking for the latest version? [Download qucs-0.0.18-win32.exe \(127.1 MB\)](#)

Home / qucs-binary

Name	Modified	Size	Downloads / Week
Parent folder			
0.0.19-snapshots	2015-05-23		175
0.0.18	2014-09-17		2,647
0.0.18-snapshots	2014-06-29		44
0.0.17	2013-10-13		16
0.0.17-Qt4-snapshot	2013-06-20		12

ダウンロードを開始

internetspeedtracker.com
スタート. 無料ダウンロー. 高速かつ無料

Start Download

Excelよりも使える

無料Zipソフト

ここ

Qucs3

Home / Browse / Science & Engineering / Electronic Design Automation (EDA) / Quite Universal Circuit Simulator / Files

Quite Universal Circuit Simulator Alpha

A circuit simulator with graphical user interface (GUI)
Brought to you by: crobarcro, ela, fransschreuder, guitorni, and 3 others

Summary | Files | Reviews | Support | Wiki | Mailing Lists | Tickets ▾ | News | Discussion | Old_SVN | Git

Looking for the latest version? [Download qucs-0.0.18-win32.exe \(127.1 MB\)](#)

Home / qucs-binary / 0.0.18

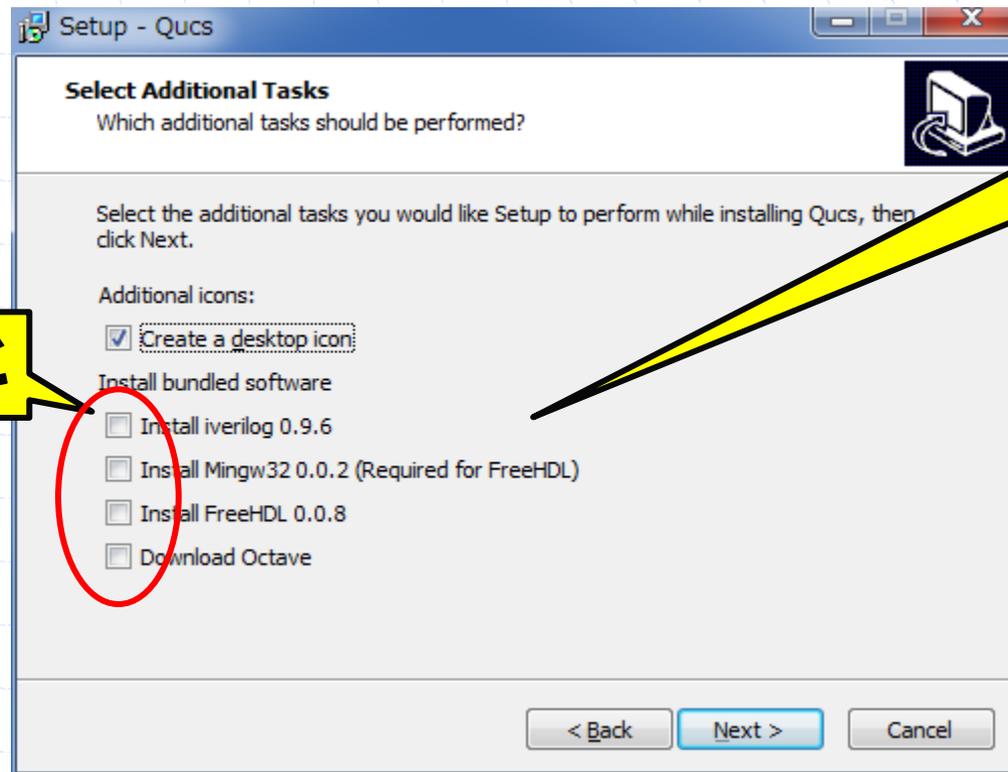
Name ↕	Modified ↕	Size ↕	Downloads / Week ↕
↑ Parent folder			
qucs-0.0.18-OSX10.6.pkg	2014-09-17	128.6 MB	8
qucs-0.0.18-OSX10.7+.pkg	2014-09-01	128.6 MB	457
qucs-0.0.18-win32.exe	2014-08-31	127.1 MB	2,182
Totals: 3 items		384.4 MB	2,647

Recommended Projects

- LogicCircuit
- ngspice

33

Qucs4



**Bundle Soft
全て外す**

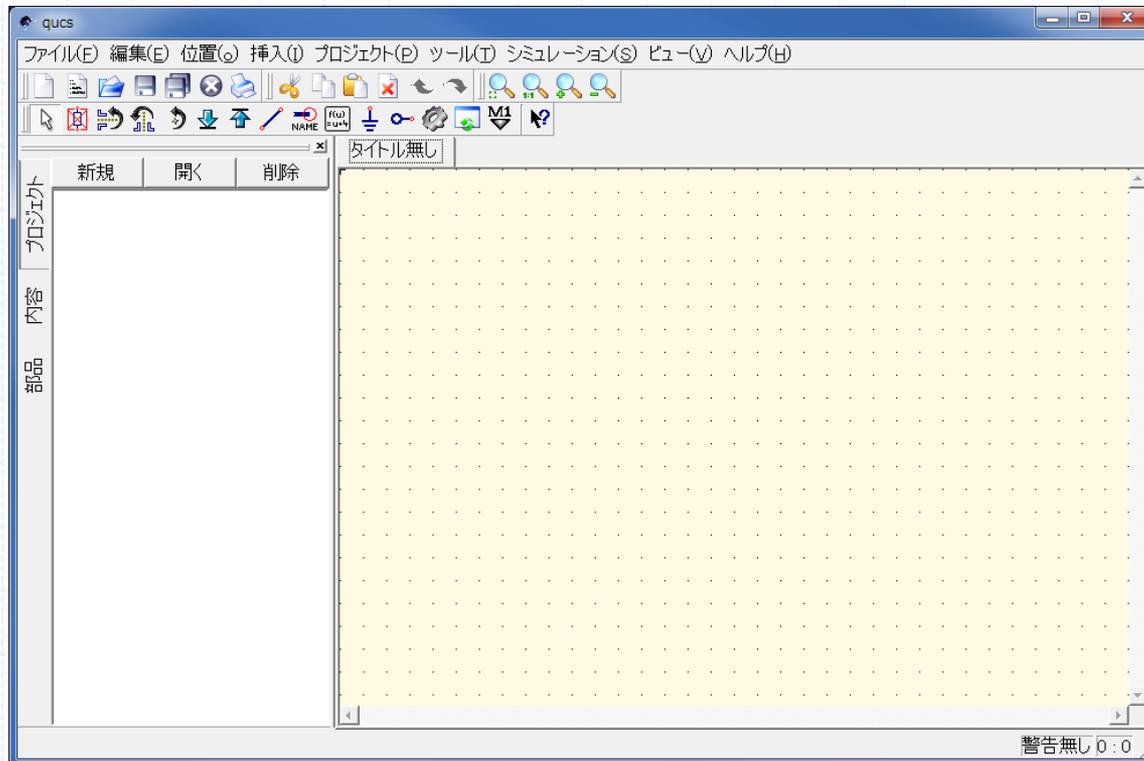
これは以下の機能です

- verilog: デジタル回路の設計用の論理シミュレータ
- mingw: GNUツールチェーンのWindows移植版
- HDL: 半導体チップの回路設計などを行なうための言語
- octave: MATLABと互換性を持ったフリーな数値解析ソフトウェア

あとは流れのままに進んでいく

Qucs5 (日本語化)

メニューから [File] - [Application Settings...] を選択し、
「Language」でJapanese、
「Font」でMS UI Gothic,などを選択
再起動すると日本語化されています。



Qucs情報6

- **QUCS 入門:**

<http://www.sp.es.yamanashi.ac.jp/ohki/qucs/qucs.html>

- **本格的使い方や各種応用例:**

<http://qucs.sourceforge.net/docs.html>

- **英文テキスト(559 頁):**

<http://qucs.sourceforge.net/docs/workbook.pdf>

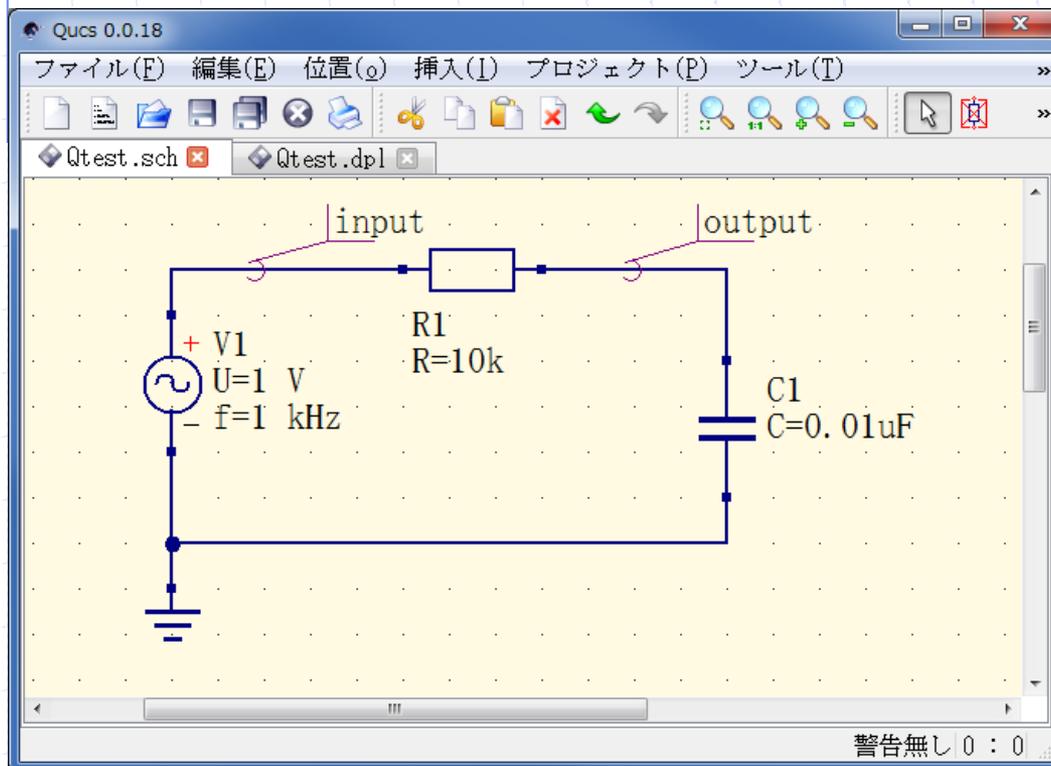
QUCSの使用方法

- **QUCS 入門:**

<http://www.sp.es.yamanashi.ac.jp/ohki/qucs/qucs.html>

が分かり易いので参照してください

講義ではまず簡単なRCフィルタの解析を行ってみます。



QUCS RCフィルタ例 (1)

The screenshot displays the QUCS (Quite Universal Circuit Simulator) interface. The main window shows a circuit diagram of an RC filter. The circuit consists of an AC voltage source $V1$ with $U=1\text{ V}$ and $f=1\text{ k Hz}$, connected in series with a resistor $R1$ ($R=10\text{ k}$), and then a parallel combination of the resistor and a capacitor $C1$ ($C=0.01\text{ }\mu\text{F}$). The input and output terminals are labeled "input" and "output".

Below the circuit diagram, there are two simulation analysis windows:

- トランジェント解析 (Transient Analysis):** Shows the transient response of the circuit. The plot displays the input voltage Vt (blue line) and the output voltage Vt (red line) over time. The input is a sine wave with an amplitude of 1V and a frequency of 1kHz. The output is a sine wave with a smaller amplitude, indicating a low-pass filter response. The x-axis is labeled "time" and ranges from 0 to 0.01 seconds.
- ACシミュレーション (AC Simulation):** Shows the AC simulation results. The plot displays the output voltage v (red line) versus the AC frequency. The magnitude of the output voltage starts at 1V at low frequencies and decreases as the frequency increases, following a characteristic low-pass filter response. The x-axis is labeled "acfrequency" and is on a logarithmic scale from 10 to $1\text{e}05$ Hz. The y-axis is labeled "output v" and ranges from 0 to 1.

At the bottom right of the window, the text "警告無し 0:0" (No warnings 0:0) is visible.

QUCS RCフィルタ例 (2)

自動的にパラメータを変化させる

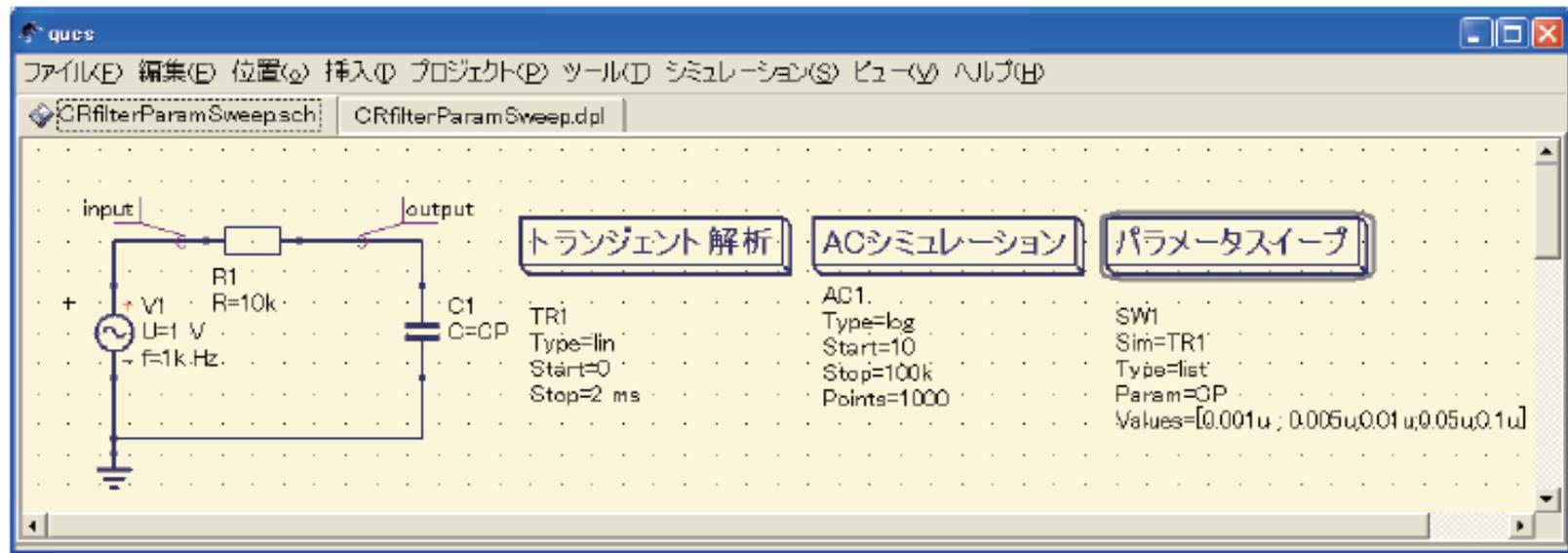


図 2.2: コンデンサ容量を変化させる場合 (パラメータスイープ) の方法

QUCS RCフィルタ例 (3)

コンデンサを変化

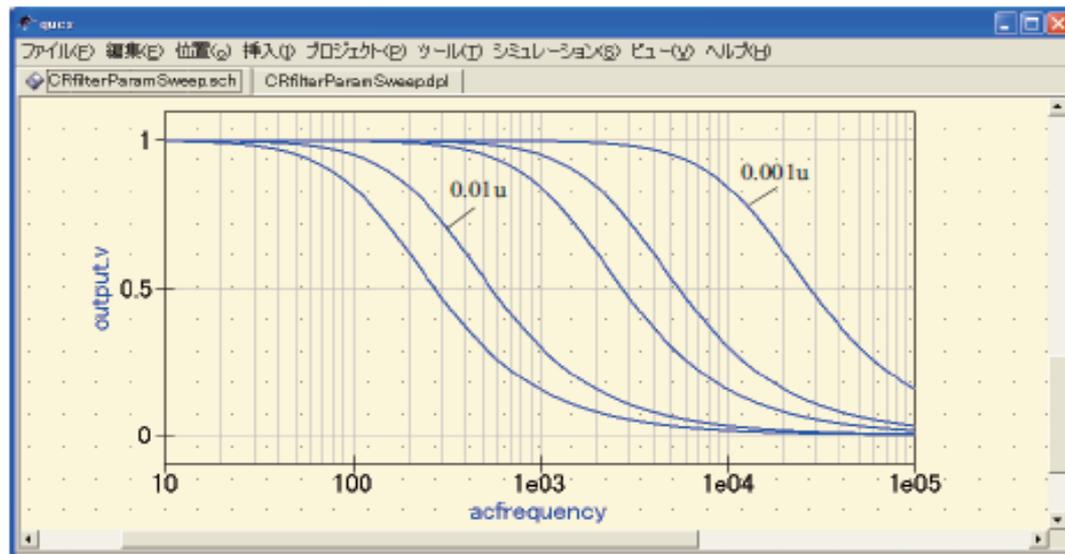
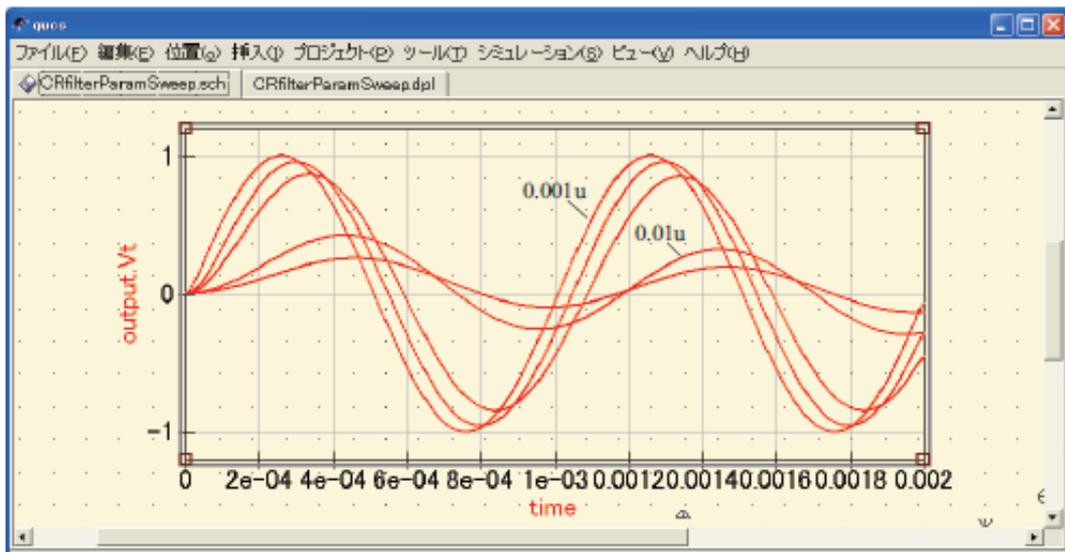
0.001 μ F

0.005 μ F

0.01 μ F

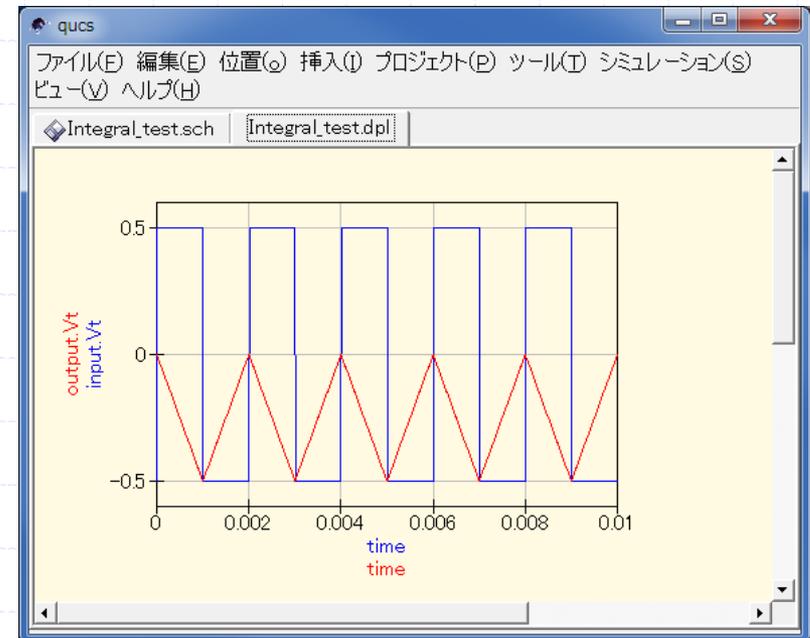
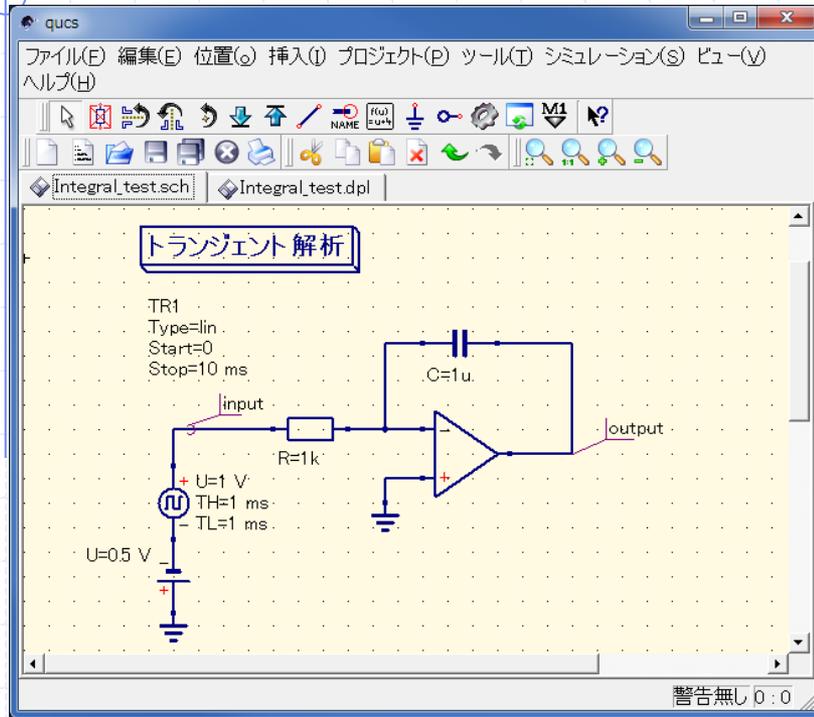
0.05 μ F

0.1 μ F

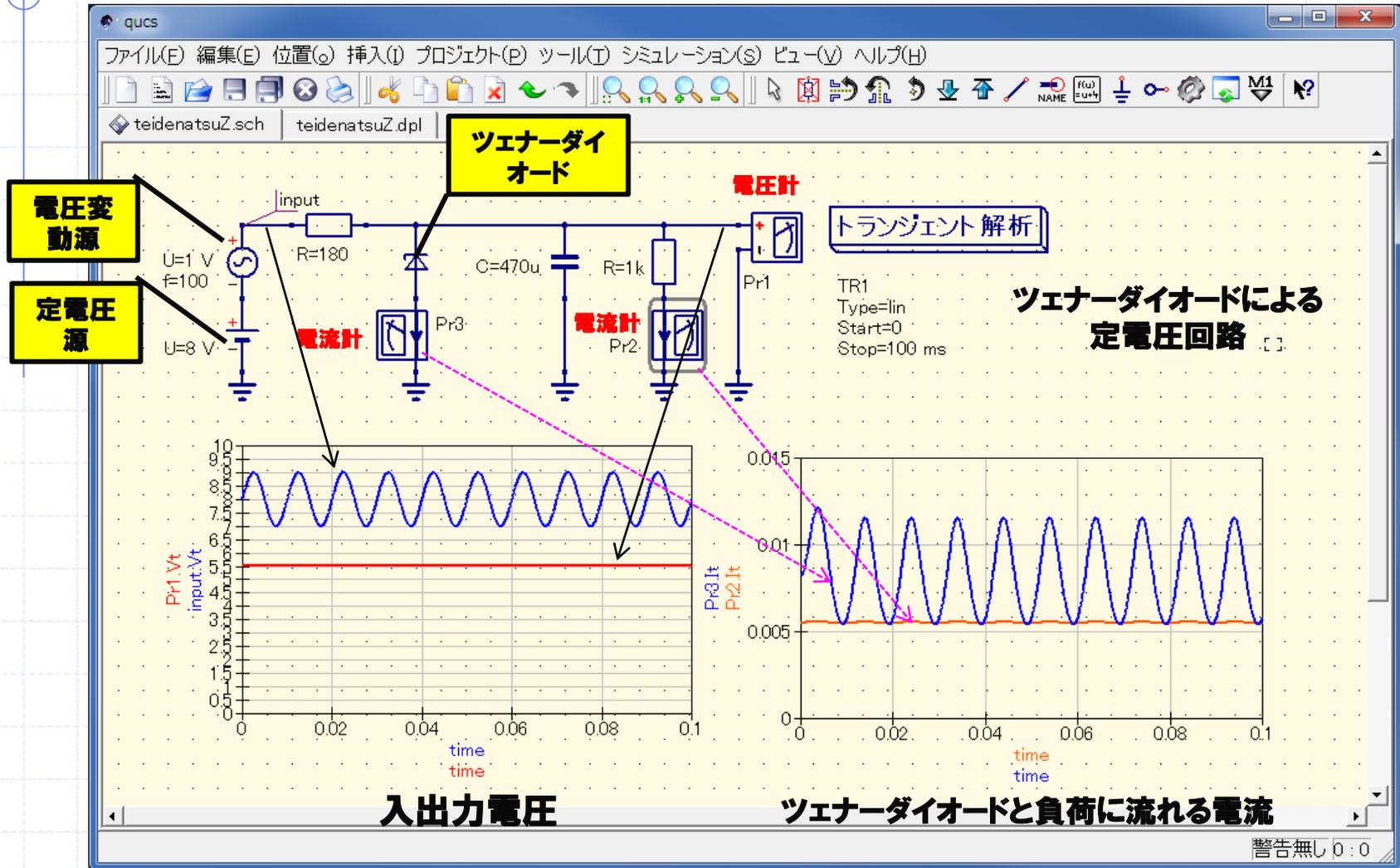


練習問題(1): 積分器

積分器回路の入出力のトランジェント応答特性を求めよ



練習問題(2):ツェナーダイオード定電圧回路



機械回路と電気回路の関係

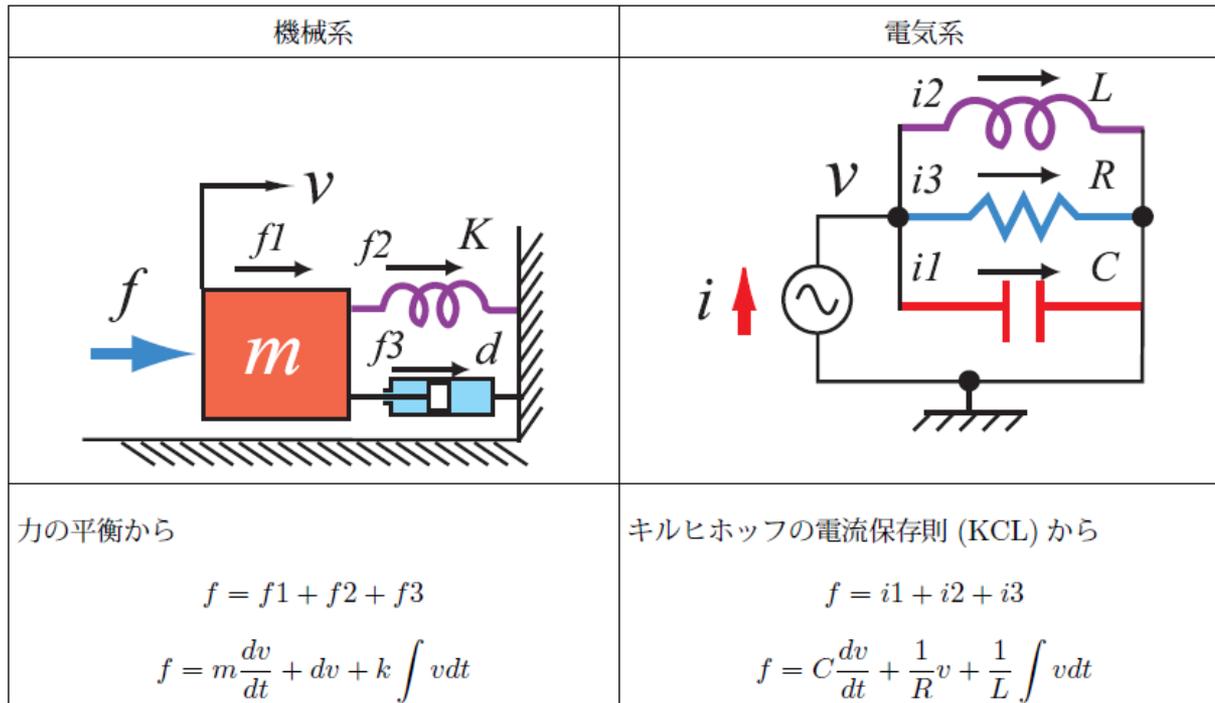
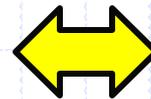


図 1.1: 機械系と電気系における相似回路

- 速度 ↔ 電圧
- 力 ↔ 電流
- 質量 ↔ 容量
- バネ ↔ コイル
- 粘性 ↔ 抵抗

インピーダンス

$$Z = \frac{V}{I}$$



モビリティ

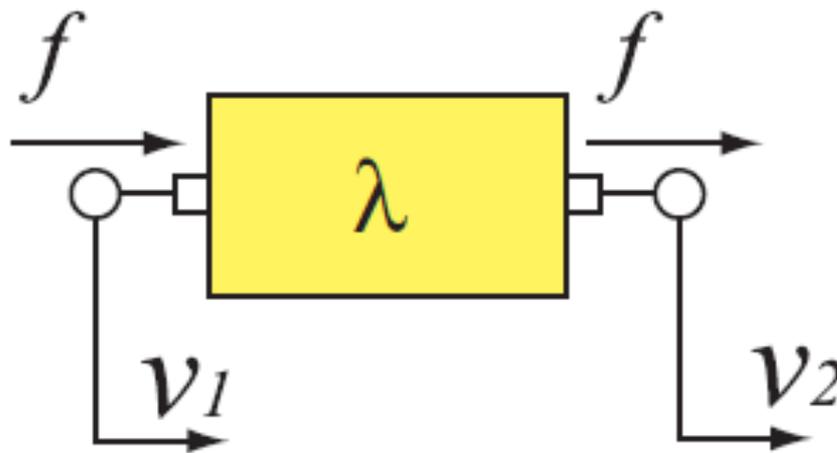
$$\lambda = \frac{v}{f}$$

モビリティ法 (mobility)

定義: $V_1 - V_2 = \lambda f$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

機械要素を通過する力と速度差との関係

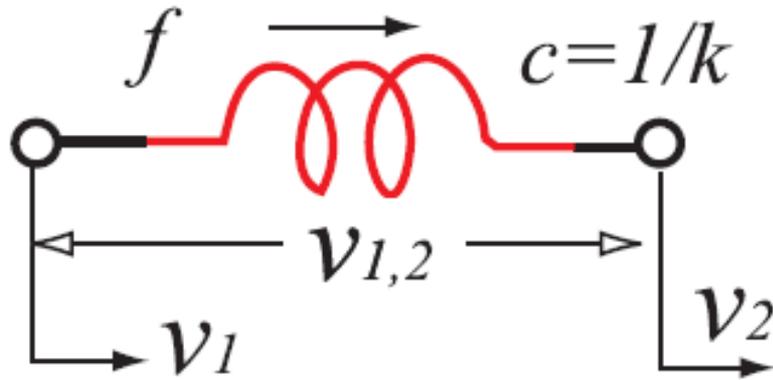


λ = mobility

f = force

v = velocity

例ばね



spring

$$f = k(x_1 - x_2)$$

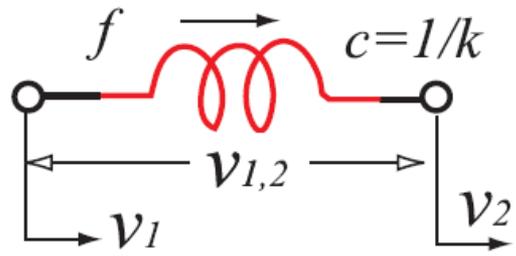
$$\Delta v = \frac{d}{dt}(x_1 - x_2)$$

$$\therefore \Delta v = s \frac{1}{k} f = scf$$

$$\lambda = sc \quad (c = k^{-1})$$

演算子: $s = \frac{d}{dt}, \quad s^{-1} = \int dt$

ばね ダンパ 質量



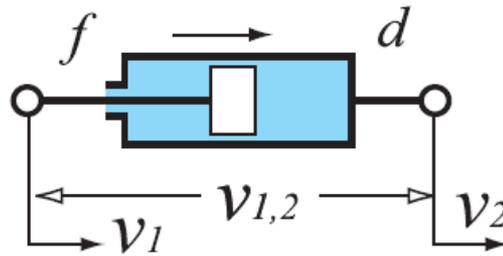
spring

$$f = k(x_1 - x_2)$$

$$\Delta v = \frac{d}{dt}(x_1 - x_2)$$

$$\therefore \Delta v = s \frac{1}{k} f = scf$$

$$\lambda = sc$$

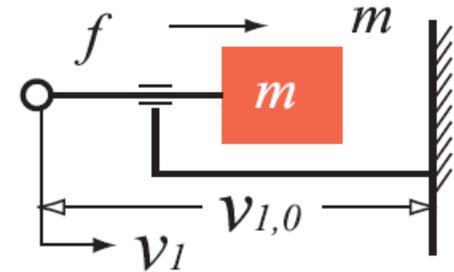


damper

$$f = d(v_1 - v_2)$$

$$\therefore \Delta v = \frac{1}{d} f$$

$$\lambda = \frac{1}{d}$$



mass

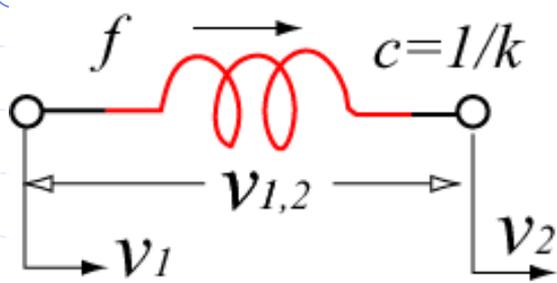
$$f = ma = m \frac{d(v_1 - v_2)}{dt}$$

$$f = ms \Delta v$$

$$\Delta v = (ms)^{-1} f$$

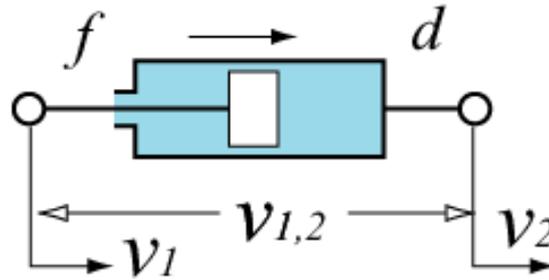
$$\lambda = (ms)^{-1}$$

機械要素のモビリティ



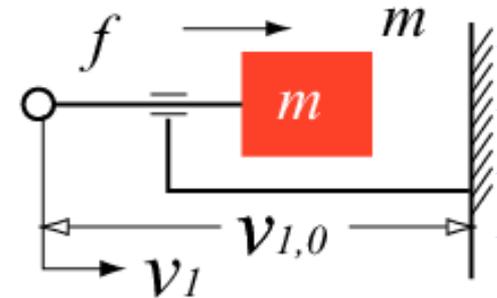
spring

$$\lambda = sc$$



damper

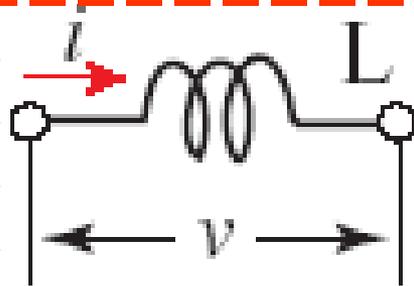
$$\lambda = d^{-1}$$



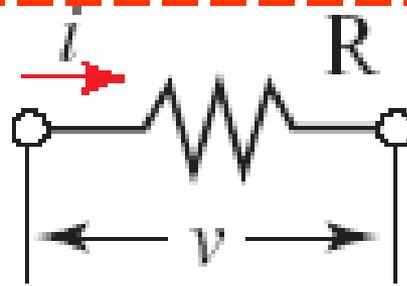
mass

$$\lambda = (ms)^{-1}$$

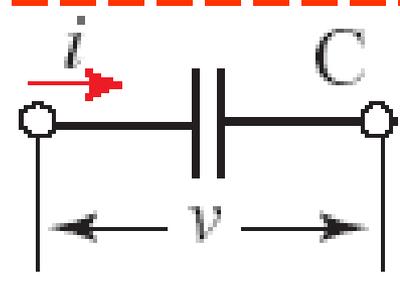
電気素子



inductance(コイル)



resistance(抵抗)



Capacitance(容量)

直列質量表現

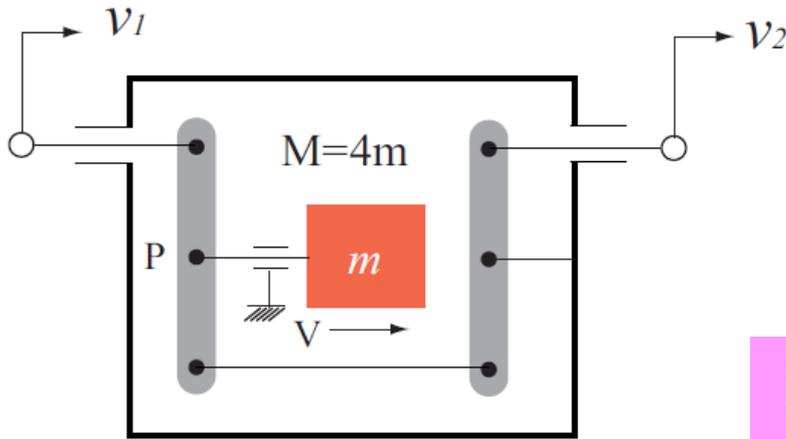


図 1.6: 直列質量の表現

質量→キャパシタンス

質量原点→地球
この為、回路として並列接続

しかし、電気回路としてはキャパシタンスを直列接続することが一般的

$$V = (v_1 - v_2) / 2$$

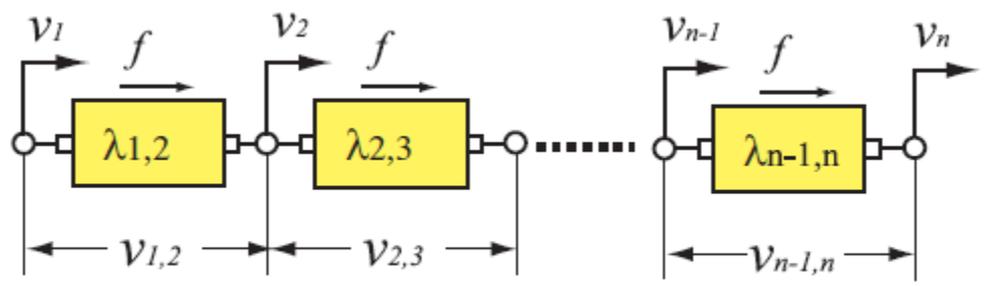
$$F = M \frac{dV}{dt} = \frac{1}{2} M \frac{d(v_1 - v_2)}{dt} = \frac{1}{2} M \frac{dv_{1,2}}{dt}$$

$$v_{1,2} = \frac{2}{M_s} F = \frac{2}{M_s} 2f = \frac{4}{M_s} f \equiv (ms)^{-1} f$$

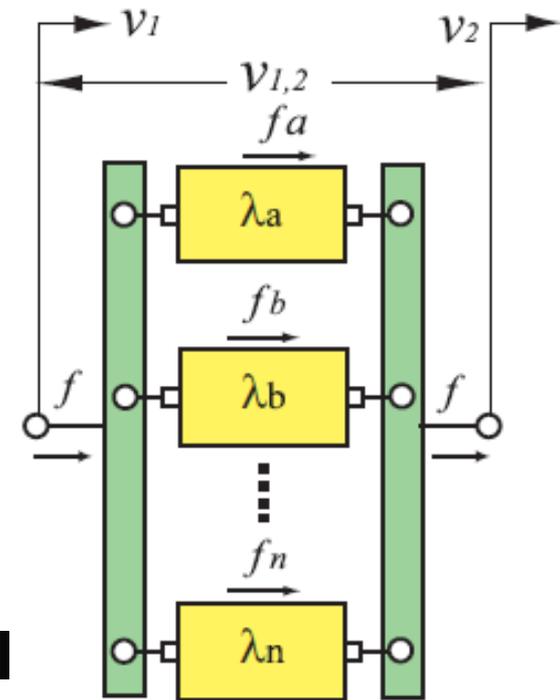
機械回路と電気回路の対応関係

	機械回路	電気回路
流通量	f : 要素を通る力	i : 要素を通る電流
位差量	v : 要素両端の速度差	v : 要素両端の電位差 (電圧)
ダンパと抵抗	$\lambda = \frac{1}{d}$ d: 粘性抵抗 [$s \cdot kg^{-1}$]	$z = R$ R: レジスタンス [Ω]
バネとコイル	$\lambda = \frac{1}{d}s = cs$ c: コンプライアンス [$N \cdot m^{-1}$]	$z = Ls$ L: ヘンリ [H]
質量とコンデンサ	$\lambda = (ms)^{-1}$ m: 質量 [kg]	$z = (Cs)^{-1}$ C: ファラッド [F]

直列, 並列接続



(a) serial

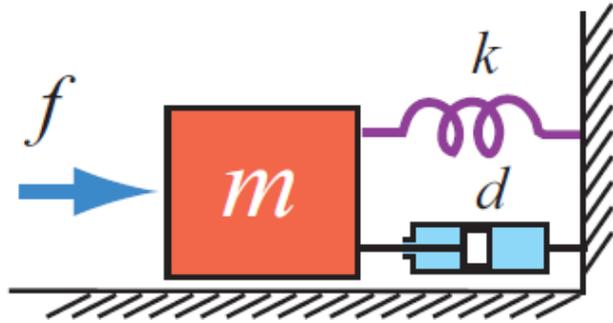


(b) parallel

$$\lambda = \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_{i,i+1}$$

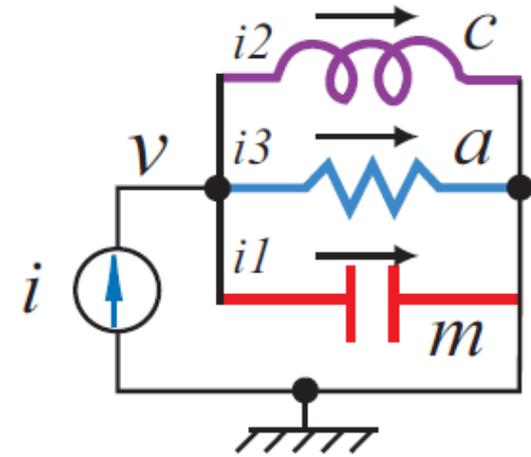
$$\lambda^{-1} = \sum_{i=1}^{n-1} \lambda^{-1}_{i,i+1}$$

1 自由度減衰項を含む振動系(0)



$$c = 1/k$$

$$a = 1/d$$

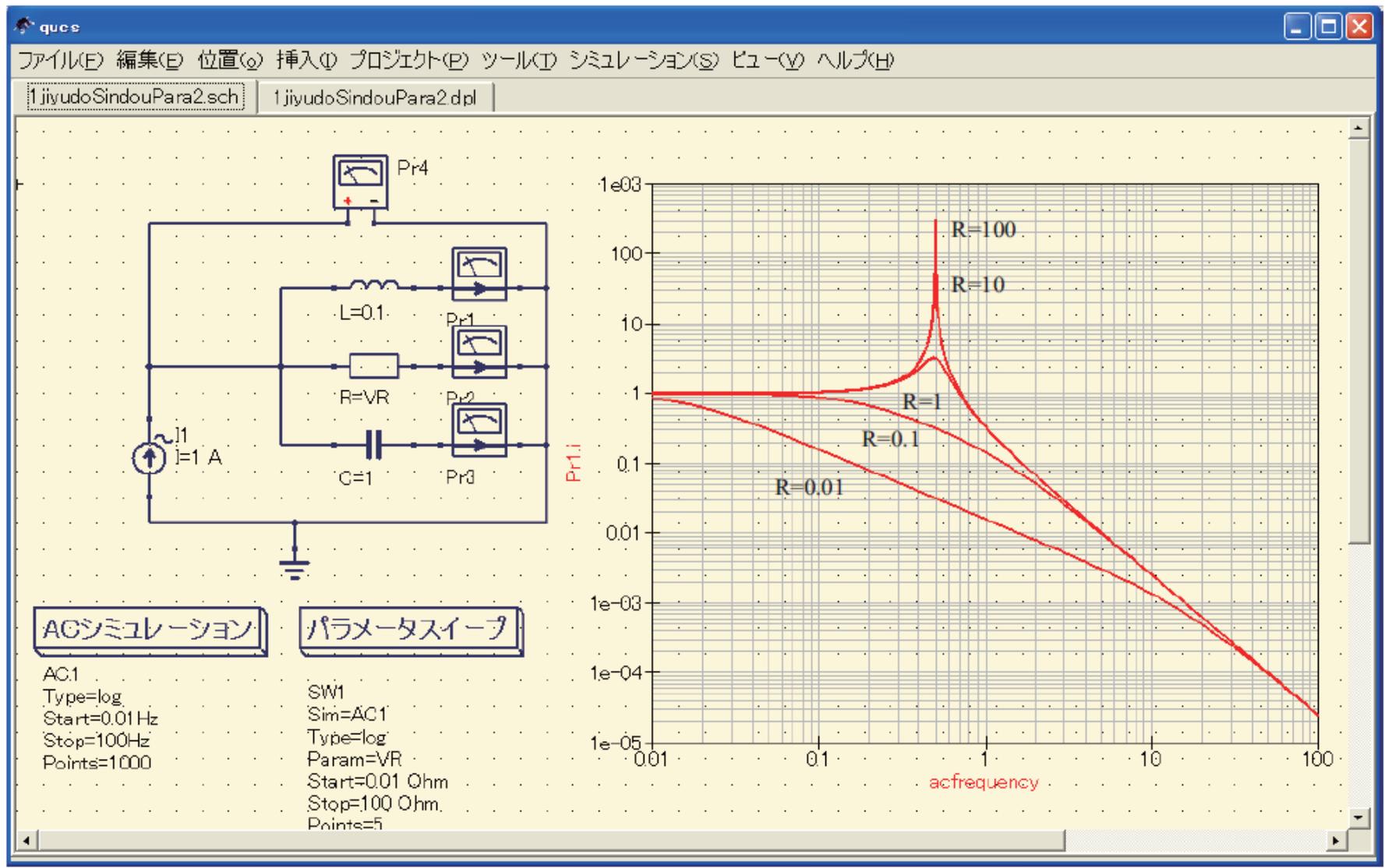


$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\varepsilon \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = \frac{f}{m}$$

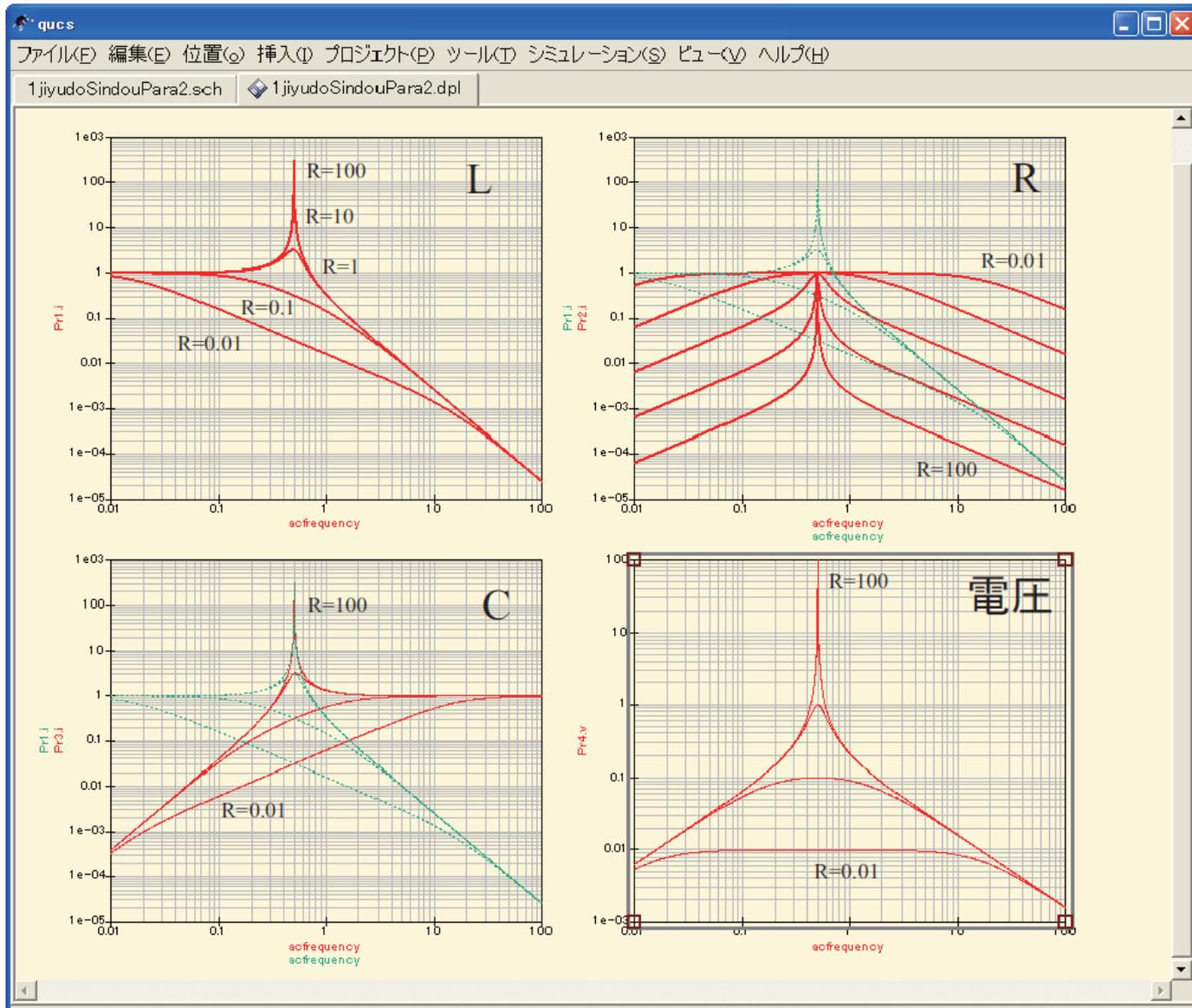
$$2\varepsilon = \frac{d}{m}, \quad \omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad \varepsilon = \omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} : \text{臨界減衰}$$

1自由度減衰項を含む振動系(1)

周波数応答

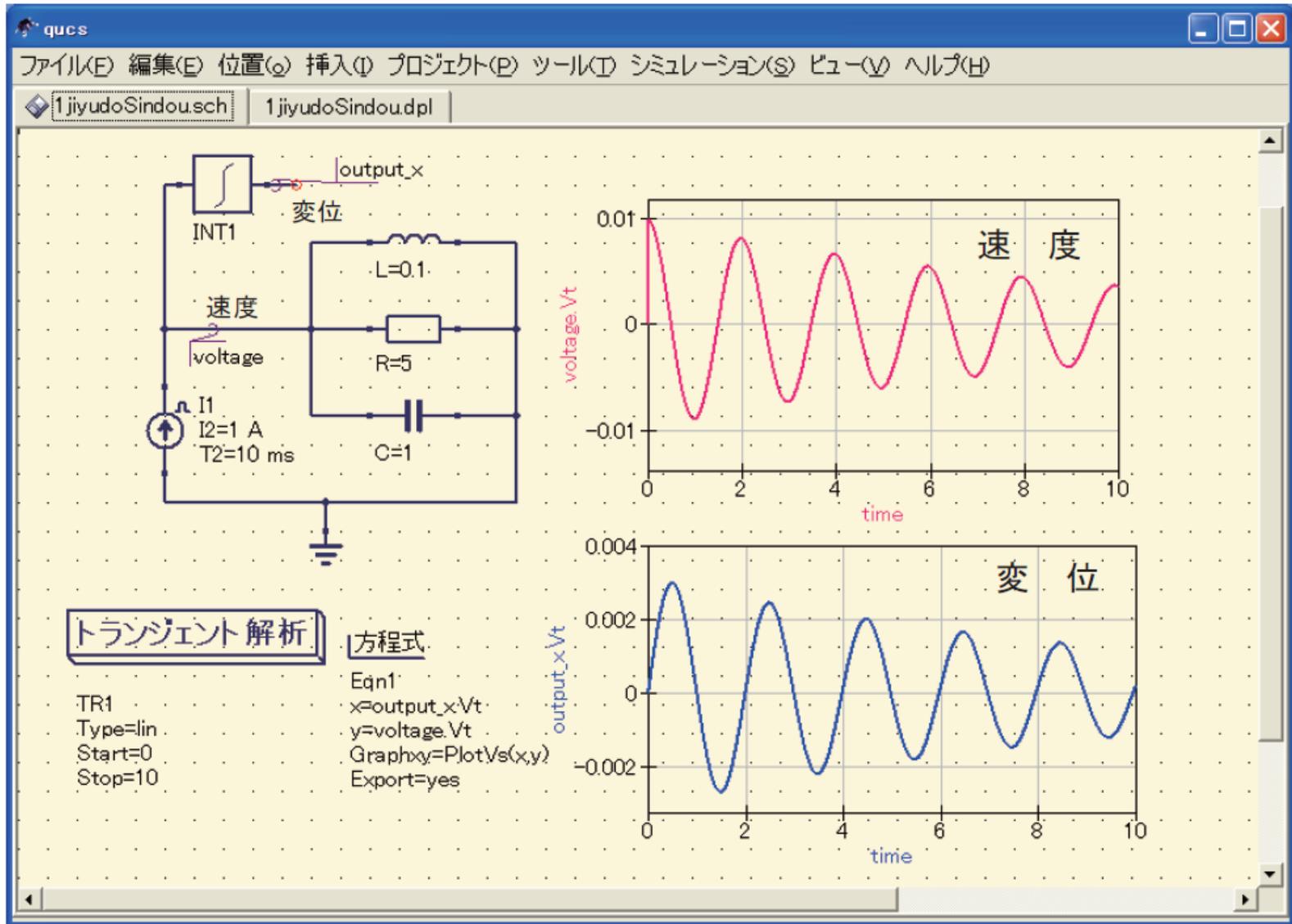


1自由度減衰項を含む振動系(2)



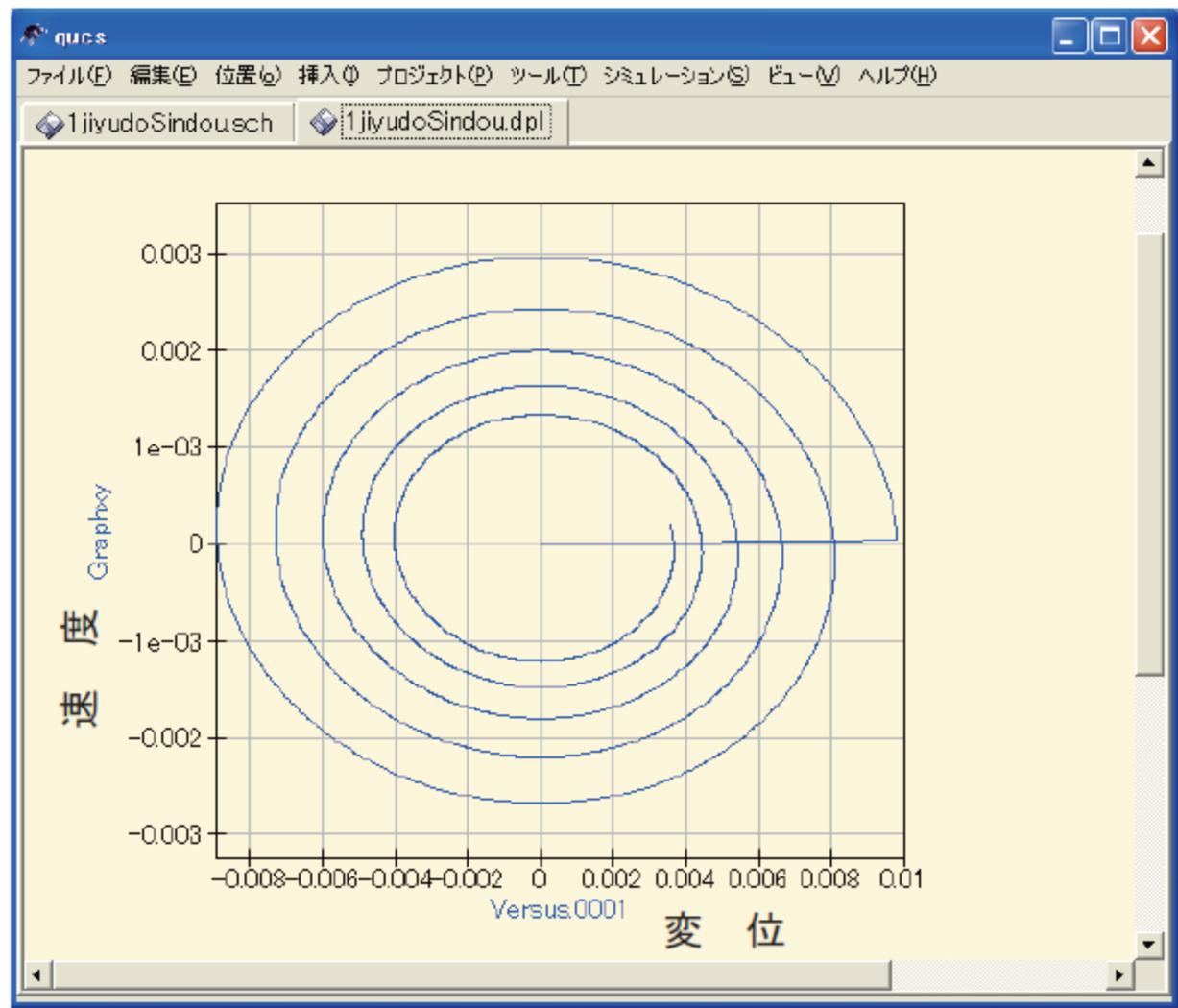
1 自由度減衰項を含む振動系(3)

速度と変位



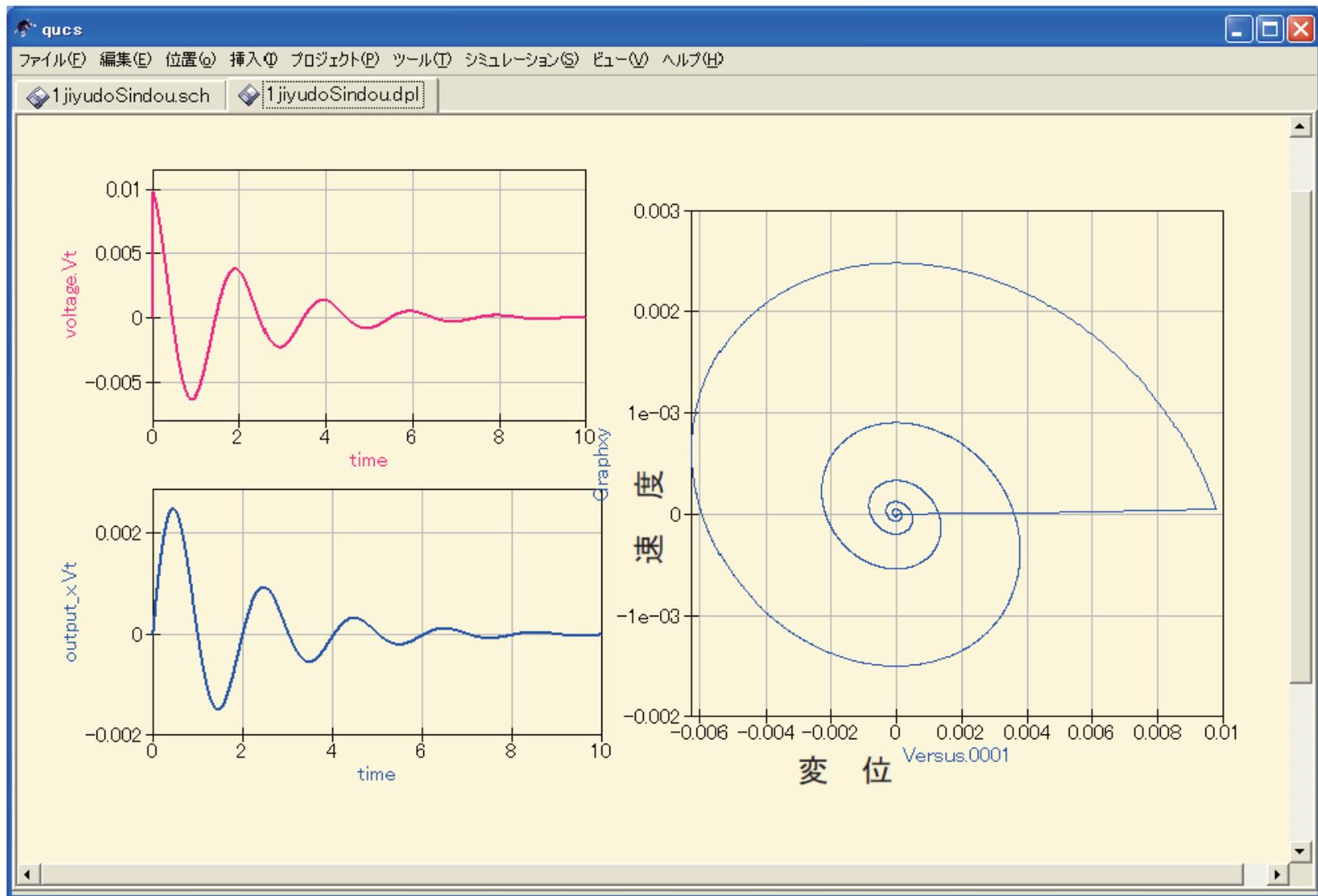
1自由度減衰項を含む振動系(4)

状態図



1自由度減衰項を含む振動系(5)

減衰振動

図 3.8: $\epsilon = 0.5$ ($C = 1, R = 1, L = 0.1$) とした時のシミュレーション結果

臨界減衰

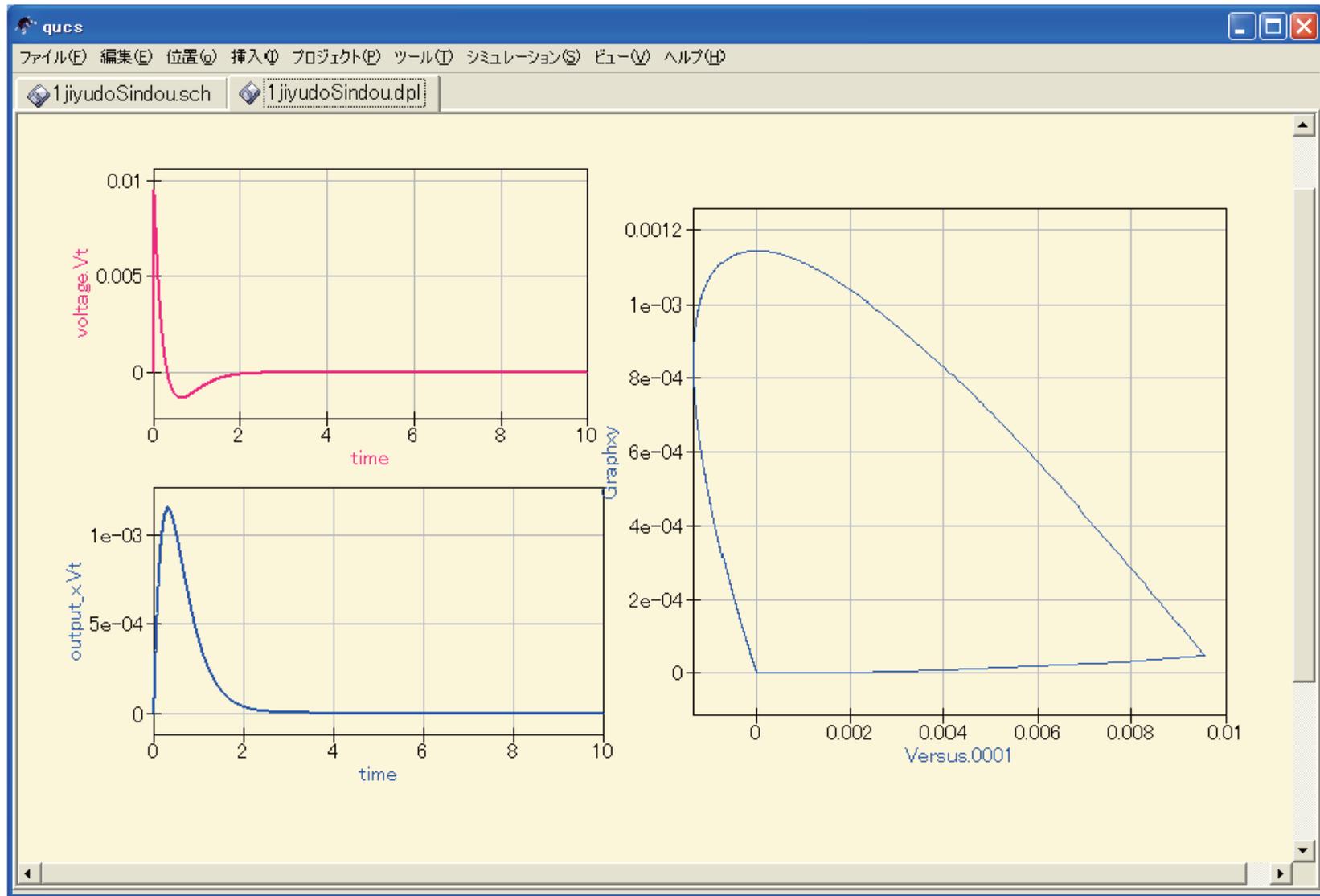


図 3.9: 臨界減衰 $\epsilon = \omega_n$ ($C = 1, R = 0.15811, L = 0.1$) とした時のシミュレーション結果

強制振動

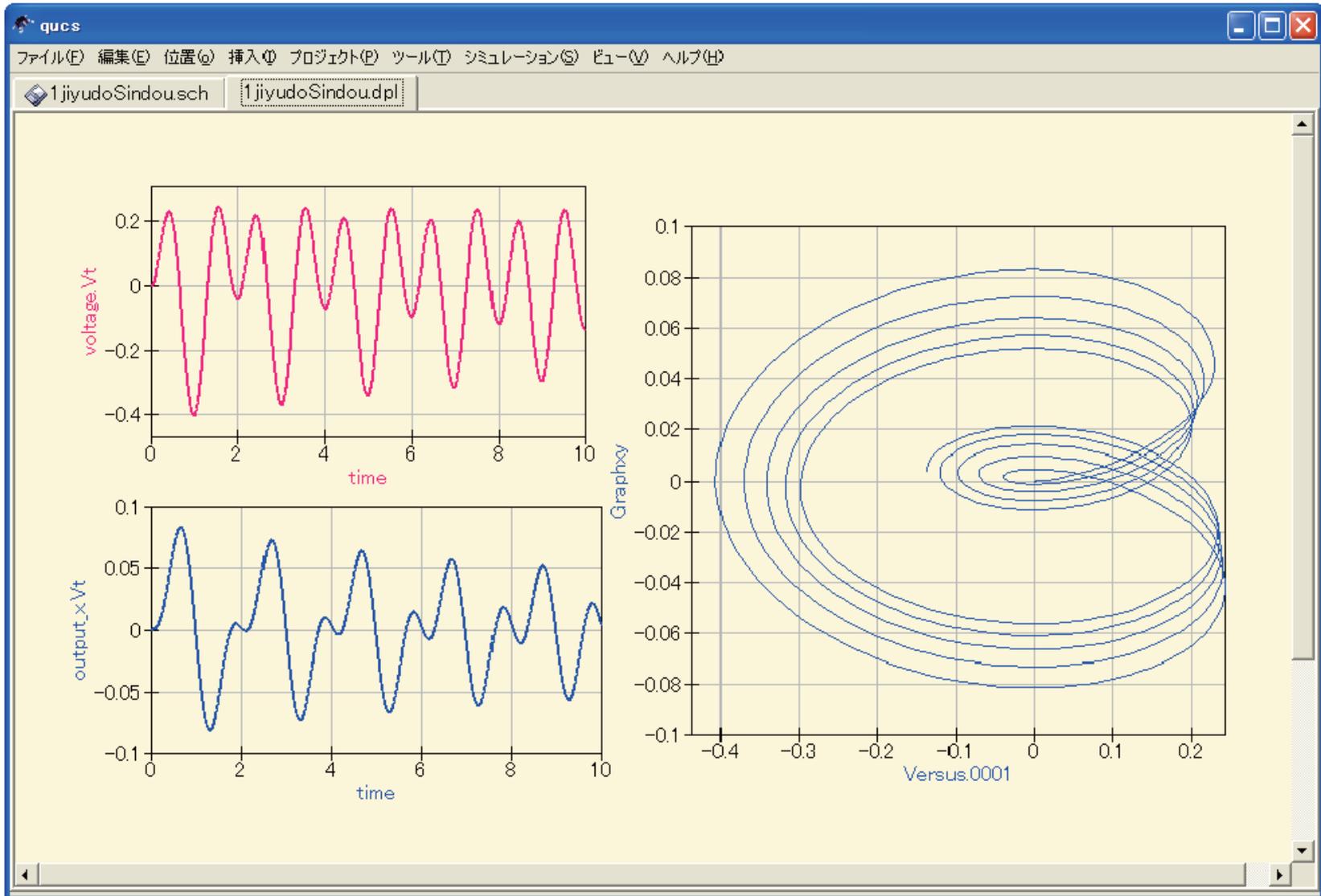
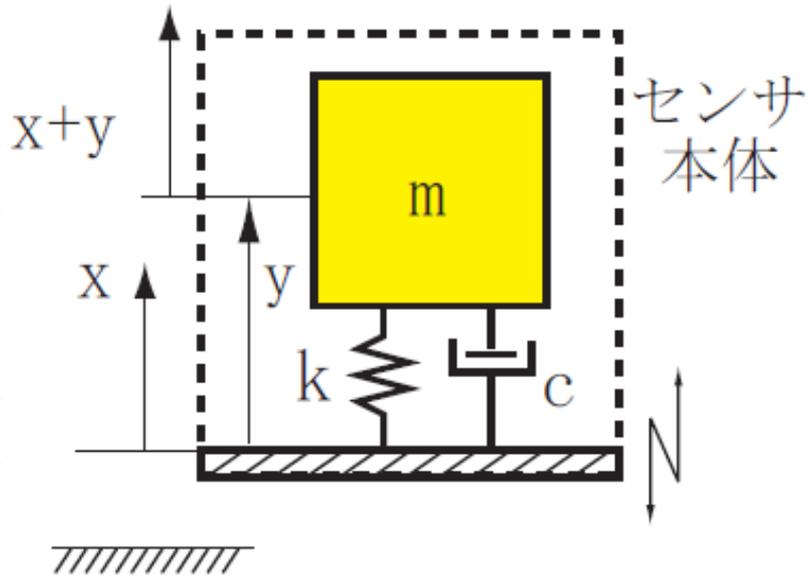


図 3.10: 1Hz の正弦波電流を加えた時のシミュレーション結果 $\epsilon = 0.1$ ($C = 1, R = 5, L = 0.1$) 41

サイズモ系



$$m(\ddot{x} + \ddot{y}) + c\dot{y} + ky = 0$$

$$-\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta s + \omega_n^2}$$

$\omega_n \gg \omega$ ならば

$$-\frac{|Y(j\omega)|}{|\omega^2 X(j\omega)|} \approx \frac{1}{\omega_n^2}$$

$\omega_n \gg \omega$ (計測振動数)

→ 加速度センサ

$\omega_n \ll \omega$ (計測振動数)

→ 変位センサ

加速度センサ

加速度センサ

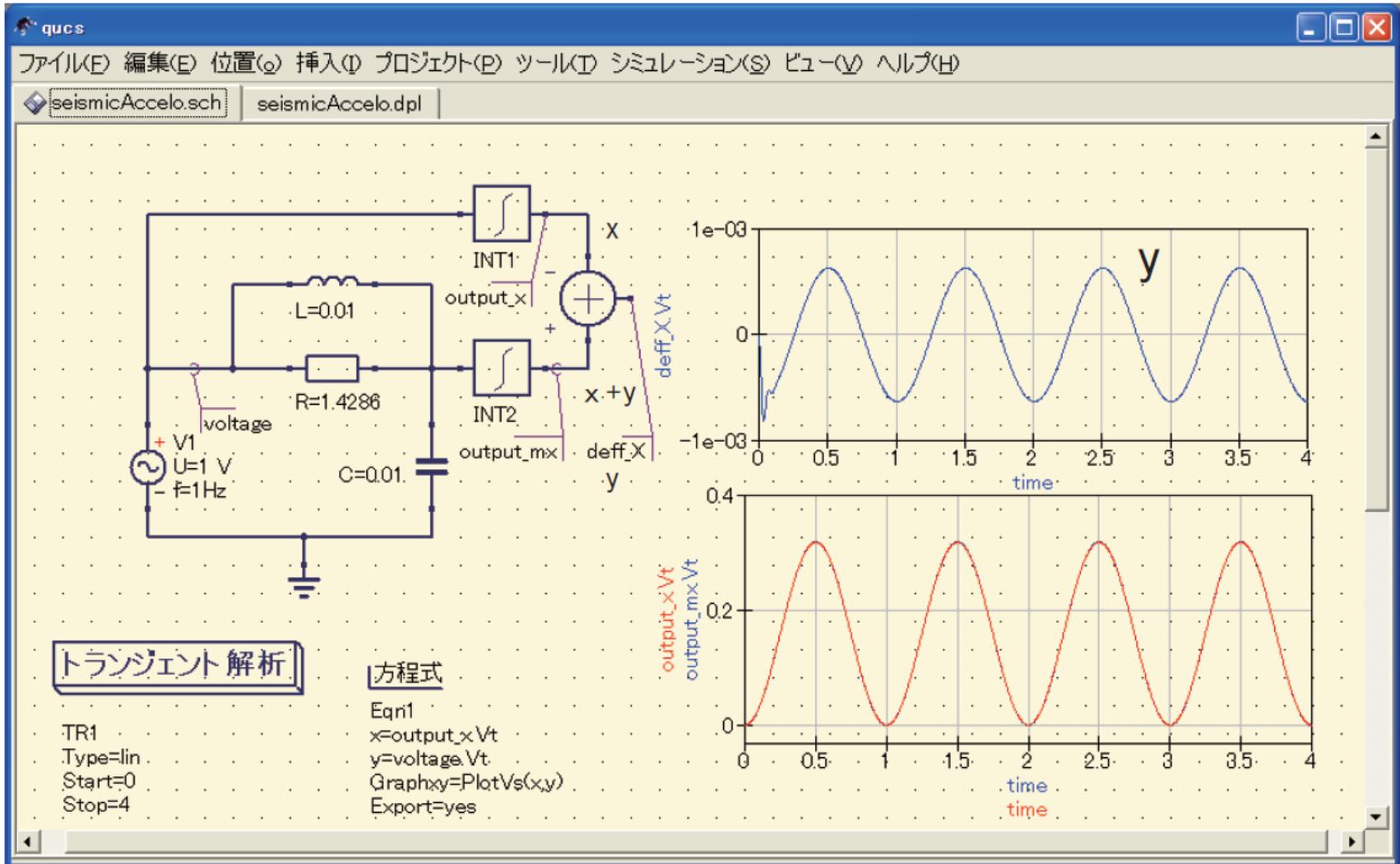


図 3.13: 加速度センサの電気回路モデルとシミュレーション結果

変位センサ

変位センサ

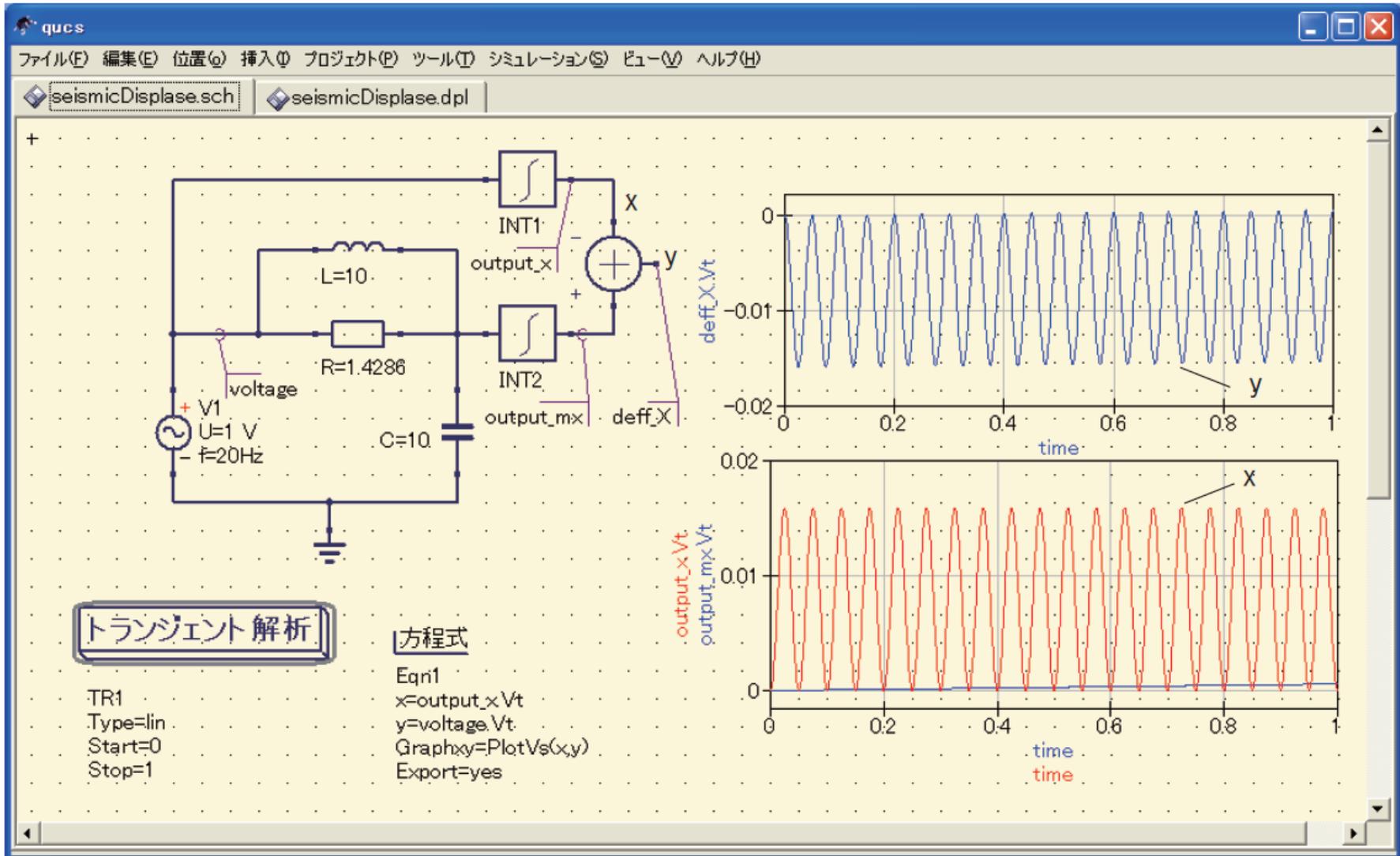


図 3.14: 変位センサの電気回路モデルとシミュレーション結果

吸振器 (0)

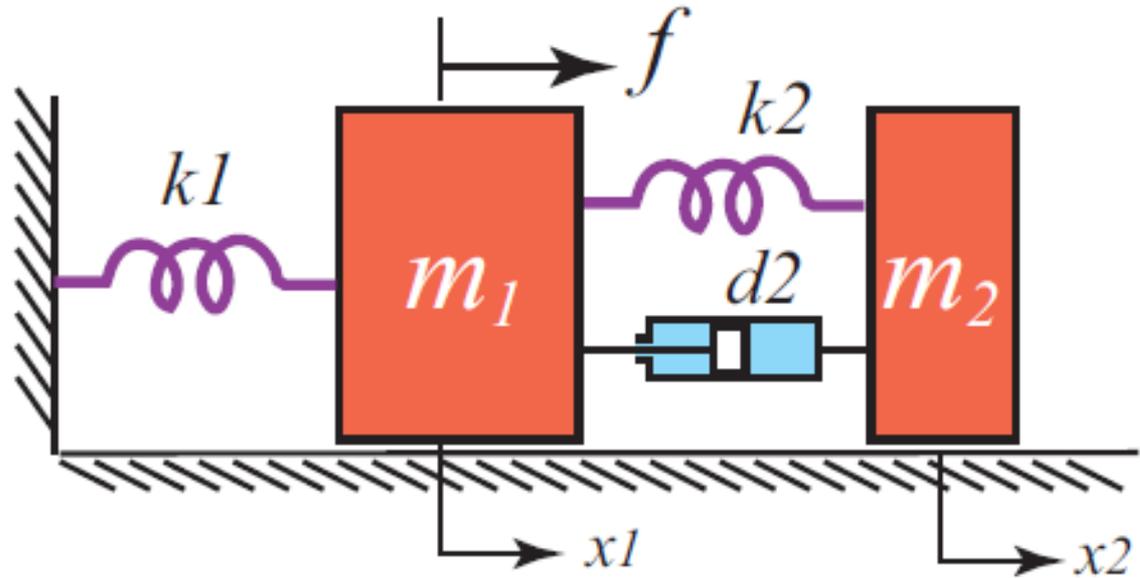


図 3.19: 粘性減衰をもつ吸振器

質量 m_1 の振動を少なくする

吸振器 (1) 電気回路モデル

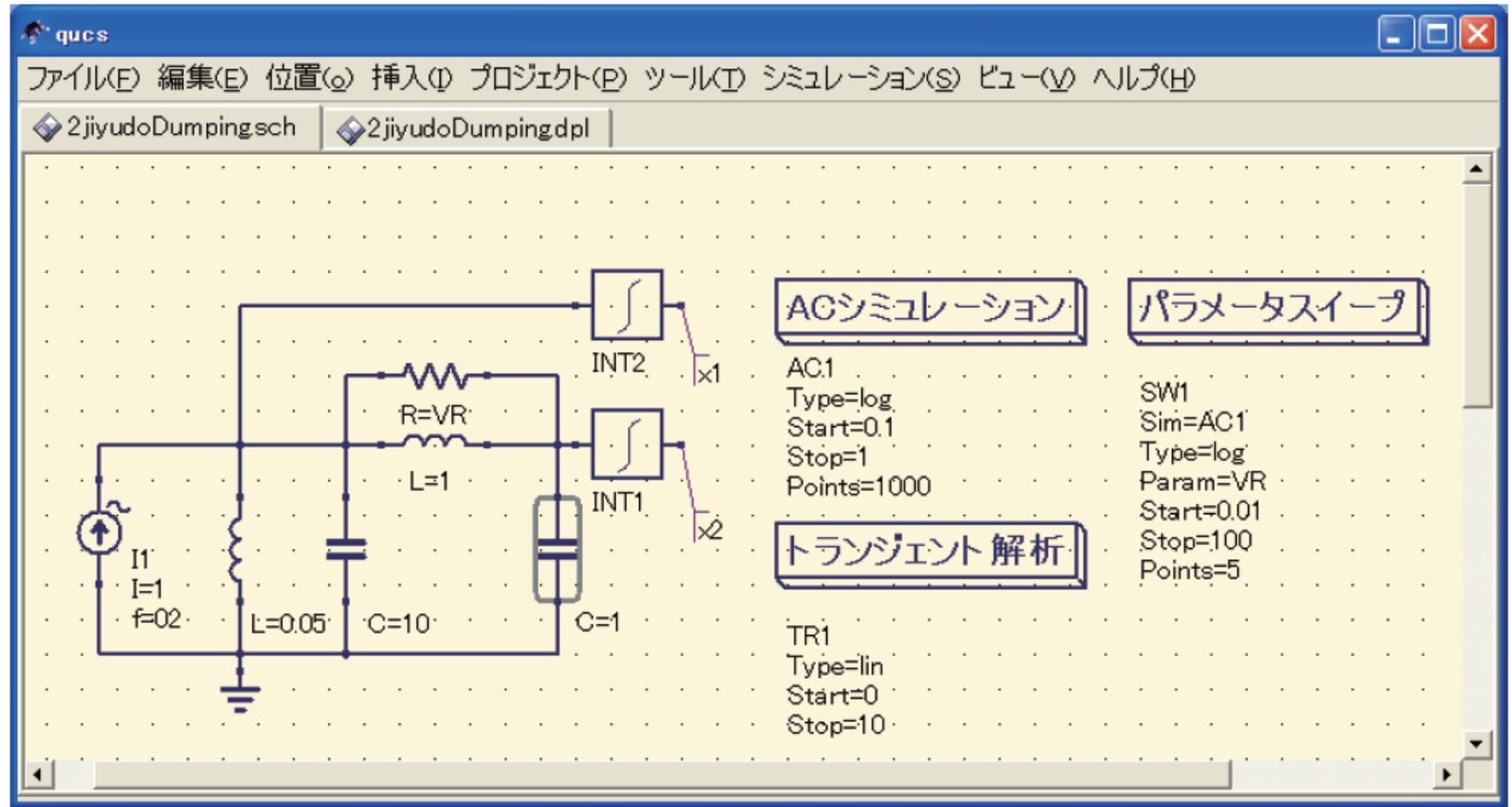
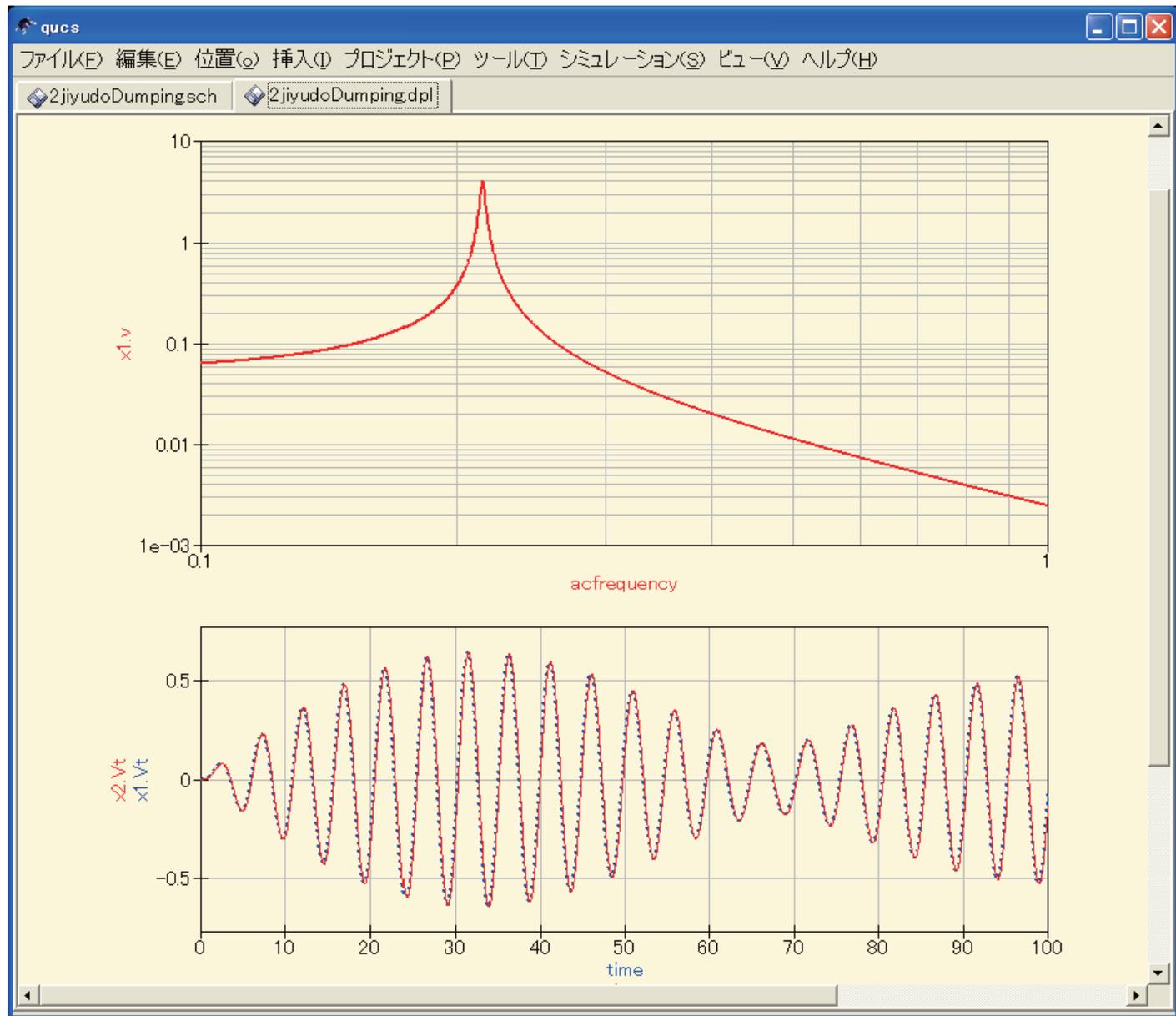
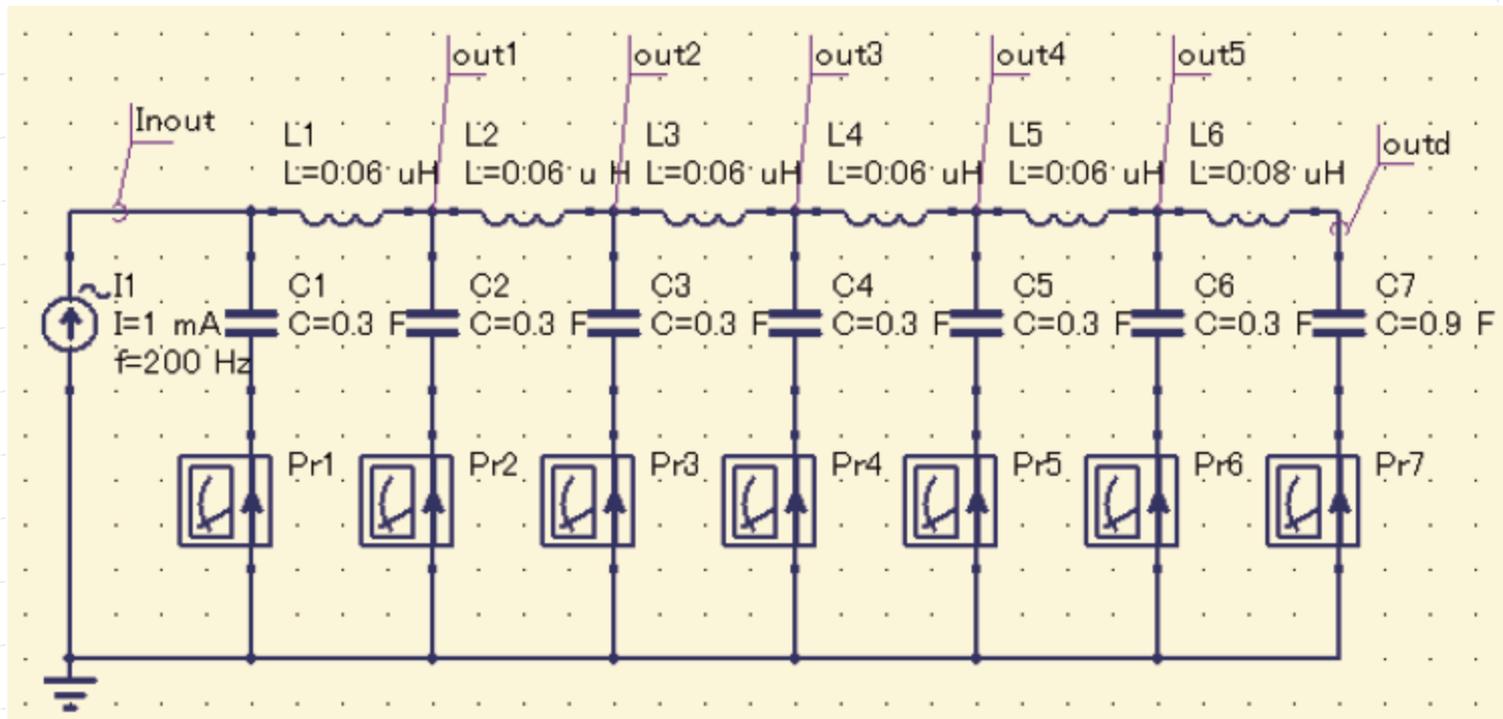
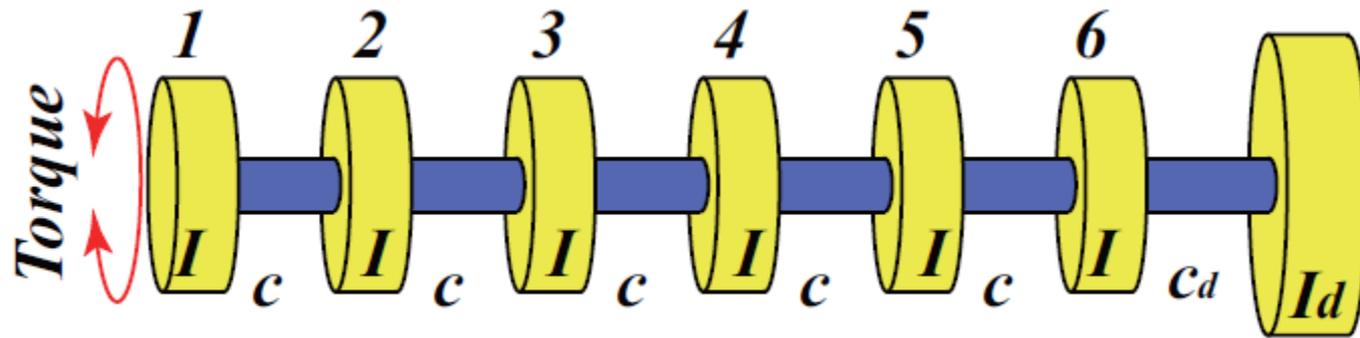


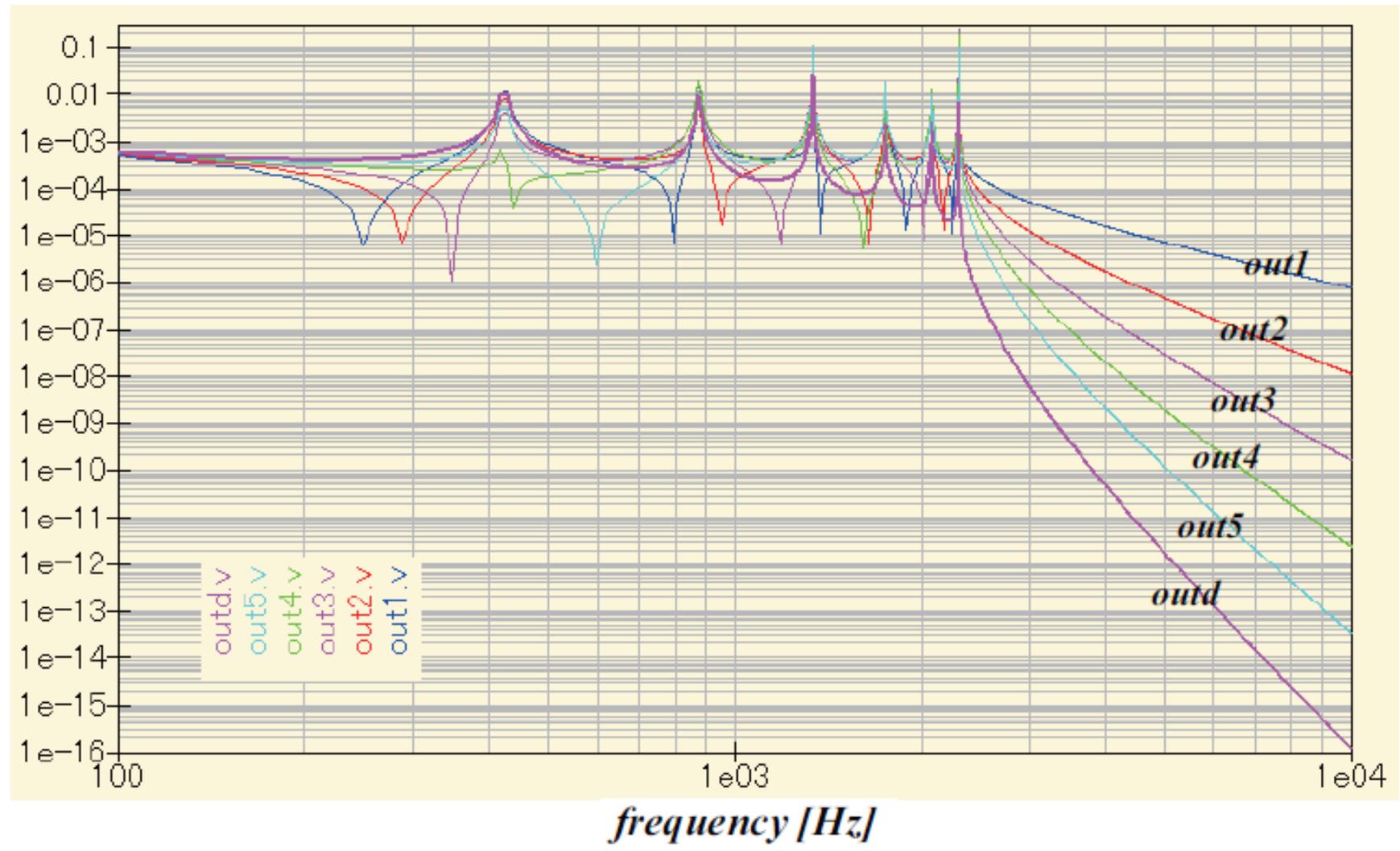
図 3.20: 粘性減衰をもつ吸振器

図 3.21: 粘性減衰をもつ吸振器シミュレーション結果 ($R=0.1$)

機械回路例3



結果 (1)



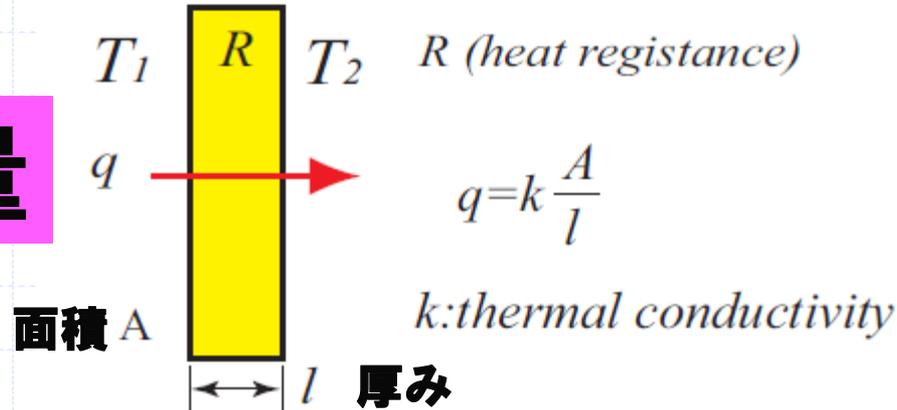
電気回路による熱伝導解析

表 3.2: 熱伝導回路と電気回路の関係

	機械回路	電気回路
流通量	q : 熱量	i : 電流
位差量	T : 温度	v : 電位差 (電圧)
	R : 熱抵抗 $q = \frac{1}{R}(T_1 - T_2)$	R : 電気抵抗 $i = \frac{1}{R}(v_1 - v_2)$
	C : 熱容量 $q = C \frac{dT}{dt}$	C : キャパシタンス $i = C \frac{dv}{dt}$
	対応なし	L : インダクタンス

熱抵抗

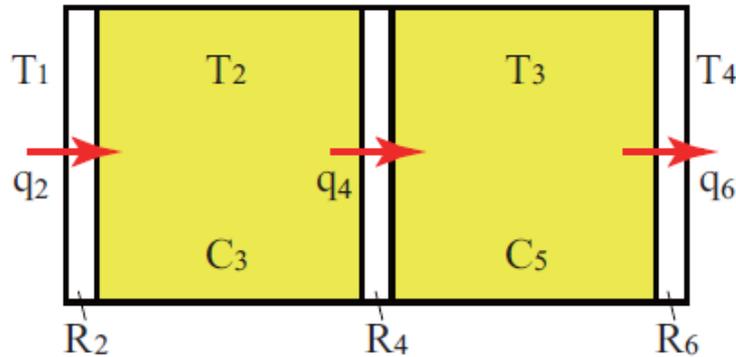
熱量



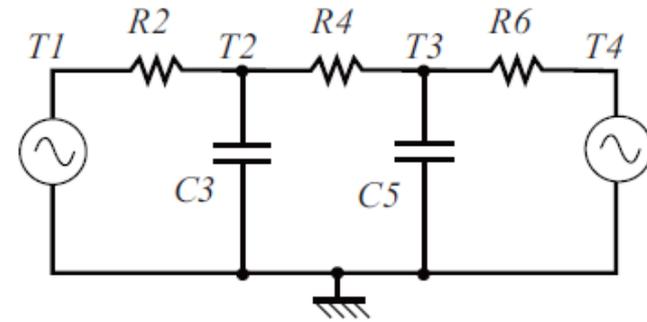
$$q = \frac{1}{R} (T_1 - T_2)$$

$$\frac{1}{R} = k \frac{A}{l} \quad k : \text{thermal conductivity}$$

熱伝導モデル



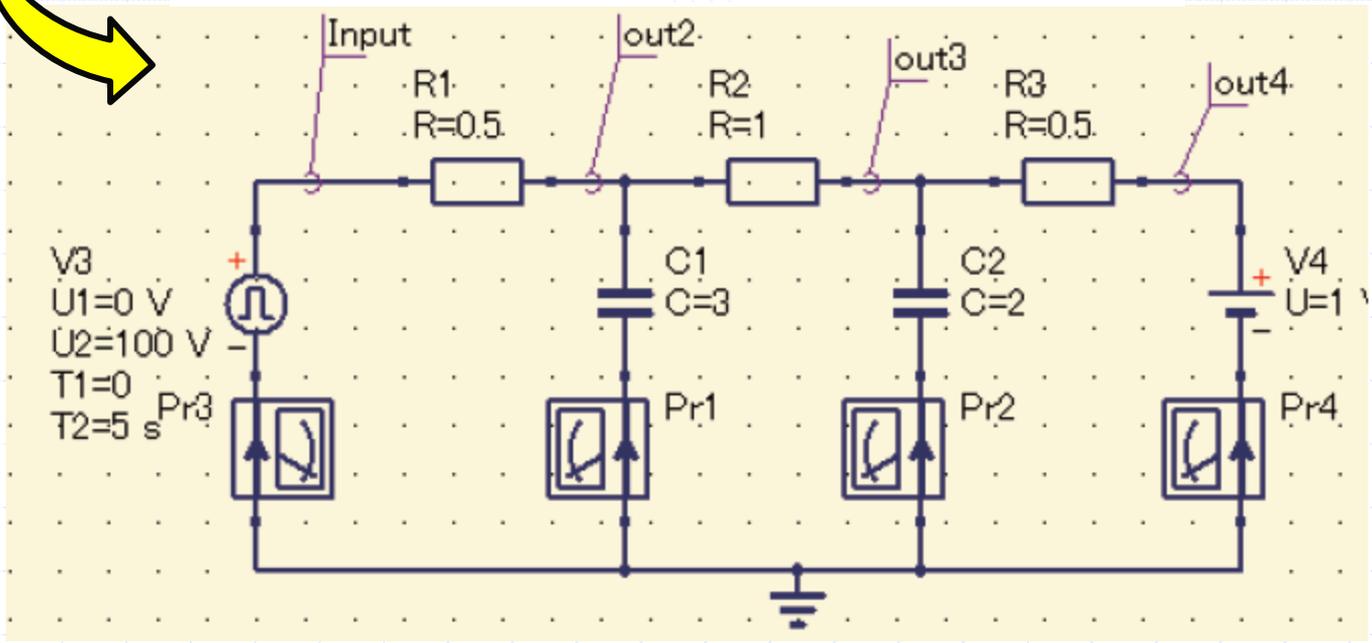
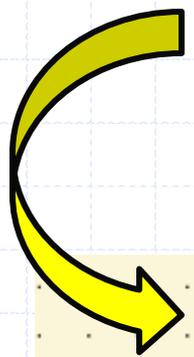
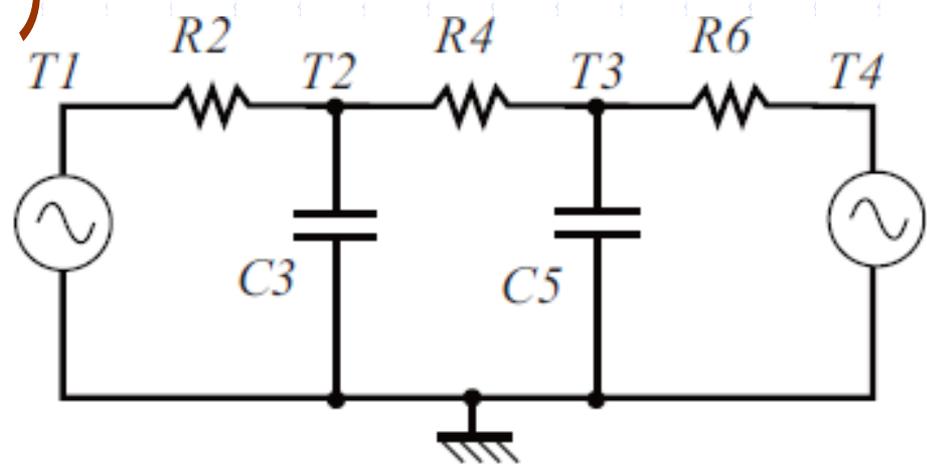
a) 熱伝導モデル



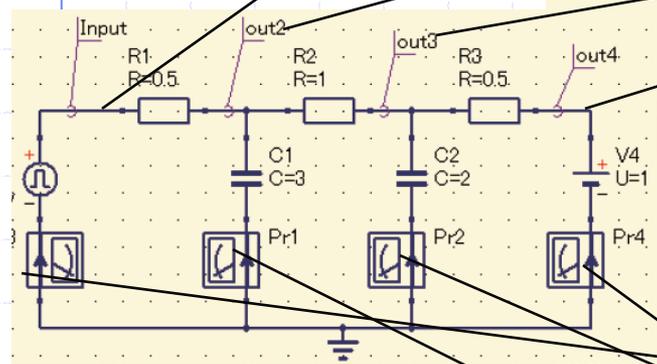
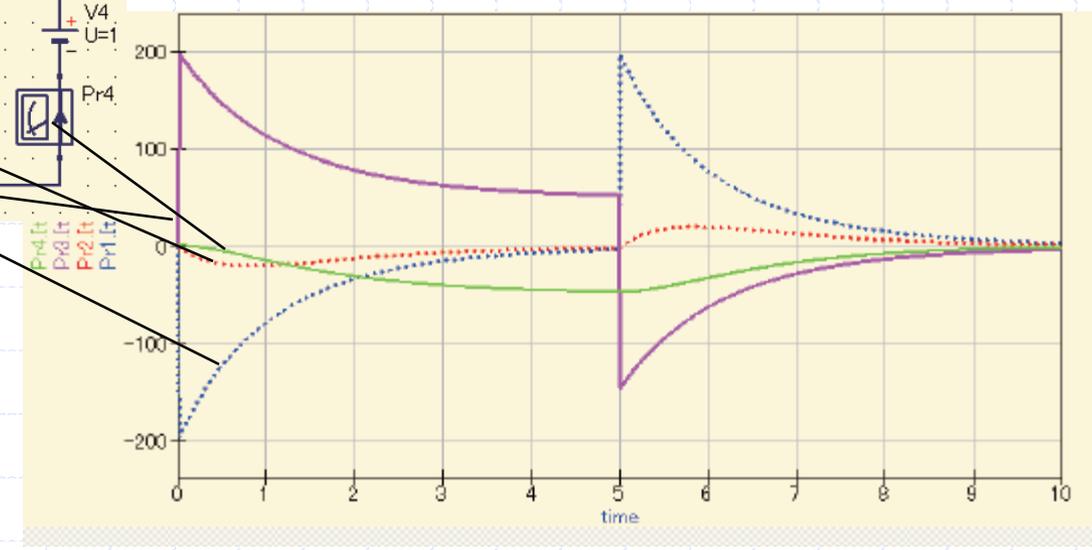
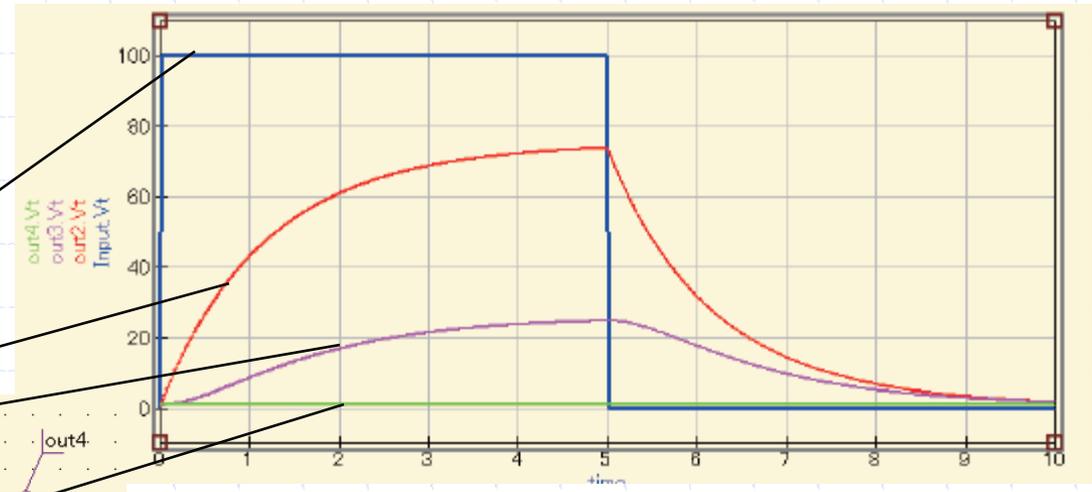
b) 電気回路モデル

- **C3, C5 は断熱壁を構成する材料の熱容量**
- **断熱壁は集中定数系で表現している。**

結果(1)



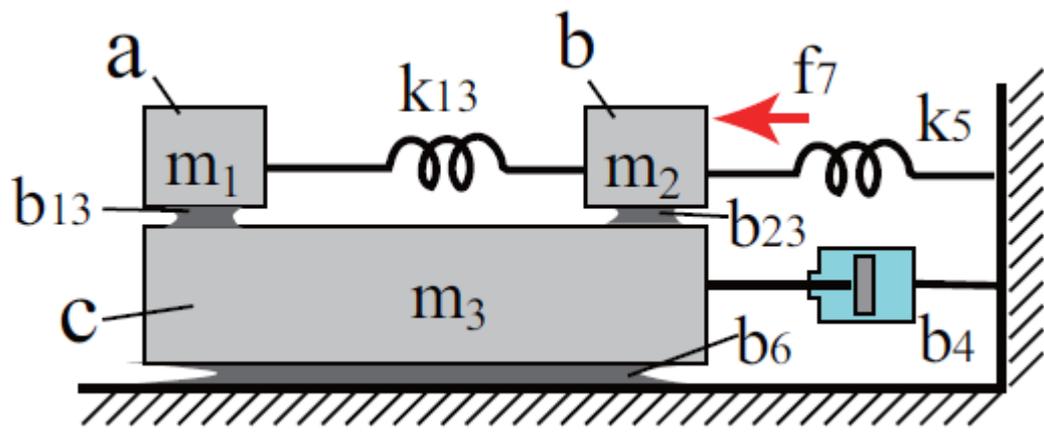
結果(2)



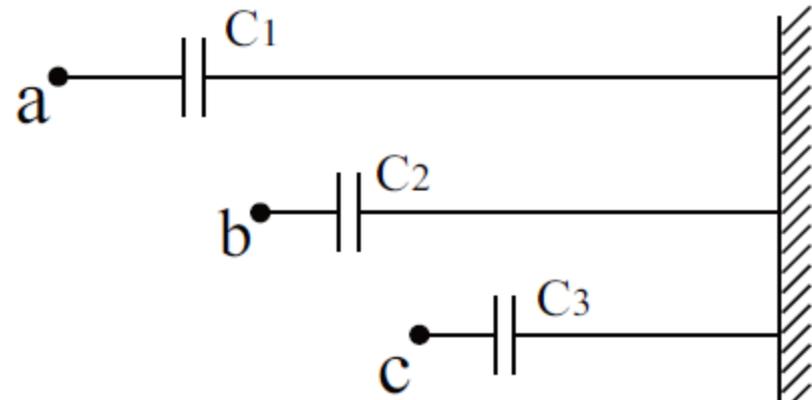
機械回路の電気回路への変換方法 (1)

1. 質量 m をキャパシタンス C に置き換え配置を行う
2. キャパシタンス C の一方の端子はグランドに接続する
3. キャパシタンス C の他の端子はノード記号を付ける(a, b, c, \dots など)
4. バネ要素, 粘性抵抗要素をそれぞれ, インダクタンス, 抵抗に変更する
5. バネ要素, 粘性抵抗要素は, 上記ノード間, ノードとグランド間を接続しているはずであるから, それらを結ぶように配置する
6. 外力(もしくは強制変位速度) は接続するノードに, 力(もしくは速度) に対応する電流源(もしくは電圧源) を接続する

(2)

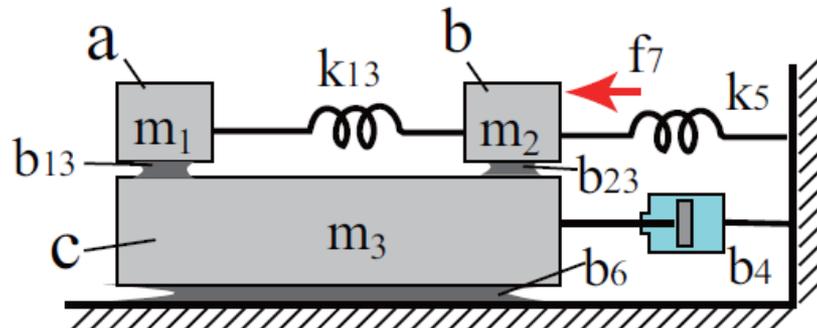


1. 質量 m をキャパシタンス C に置き換え配置を行う
2. キャパシタンス C の一方の端子はグラウンドに接続する
3. キャパシタンス C の他の端子はノード記号を付ける(a, b, c, \dots など)

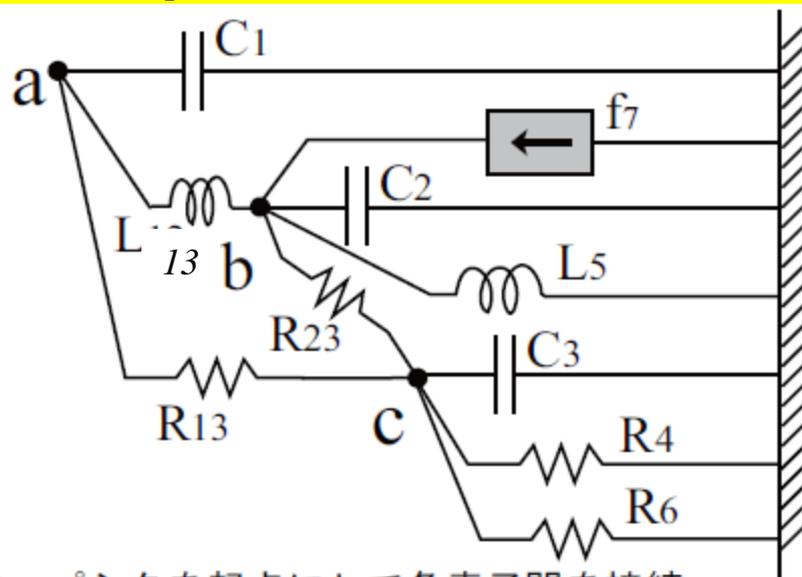


a) 質量すなわち電気回路でのキャパシタを配置

(3)



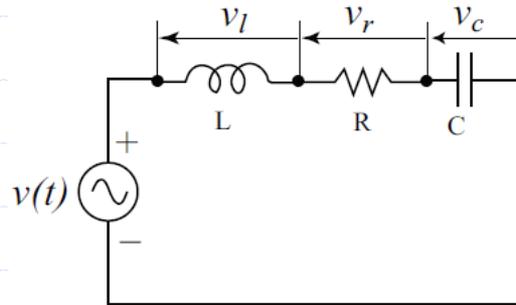
4. バネ要素, 粘性抵抗要素をそれぞれ, インダクタンス, 抵抗に変更する
5. バネ要素, 粘性抵抗要素は, 上記ノード間, ノードとグラウンド間を接続しているはずであるから, それらを結ぶように配置する
6. 外力(もしくは強制変位速度)は接続するノードに, 力(もしくは速度)に対応する電流源(もしくは電圧源)を接続する



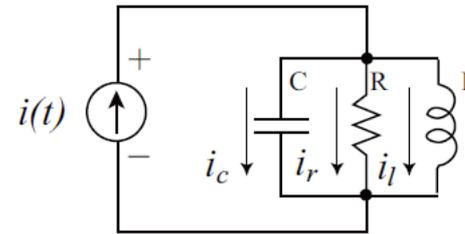
b) キャパシタを起点にして各素子間を接続

双対回路

電気回路において双対性(duality)と呼ばれる性質がある。これは**電圧で成立している関係が電流においても成立すること**、また**直列で成立している関係が並列でも成立する**



a) RLC直列回路



b) RLC並列回路

直列回路

$$v_l + v_r + v_c = v(t)$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt = v(t)$$

並列回路

$$i_l + i_r + i_c = i(t)$$

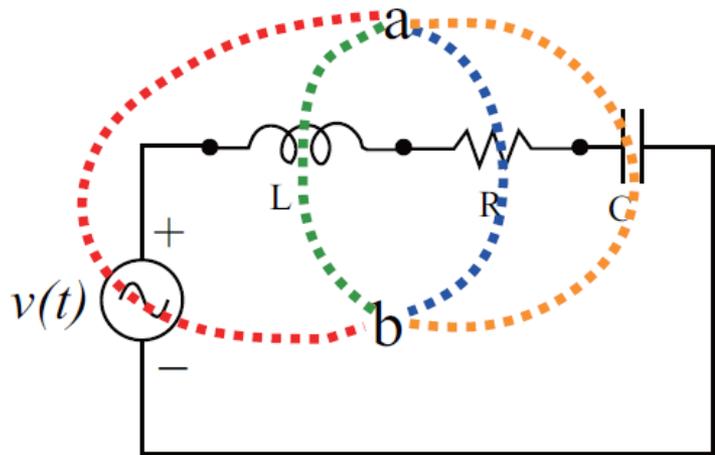
$$C \frac{dv}{dt} + \frac{1}{R} v + \frac{1}{L} \int vdt = i(t)$$

双対性 (duality) の関係

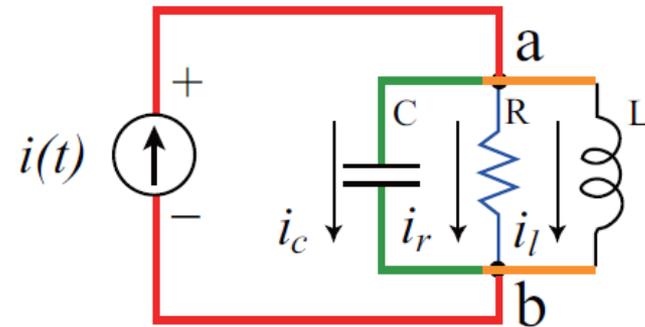
電圧 V	電流 I
電圧源 E	電流源 J
インピーダンス Z	アドミッタンス Y
インダクタンス L	キャパシタンス C
抵抗 R	コンダクタンス G
直列	並列
短絡	開放
閉路 (loop)	接点 (node)
T型回路	π 型回路

双対回路の作り方 (1)

1. 独立な回路ループの中に点a, 点b を取る. これらの点が双対回路のノードとなる.
2. a~b 間を結ぶ線(図では点線)が回路要素を通過するように結ぶ
3. このときa,b 間を結ぶ線(図では点線)が変換後の配線となる
4. また点線と交差する要素を表4.1 に示す対応する要素に変換する
5. 要素の変換で電圧源は電流源となり, 電流源はと電圧源なる.



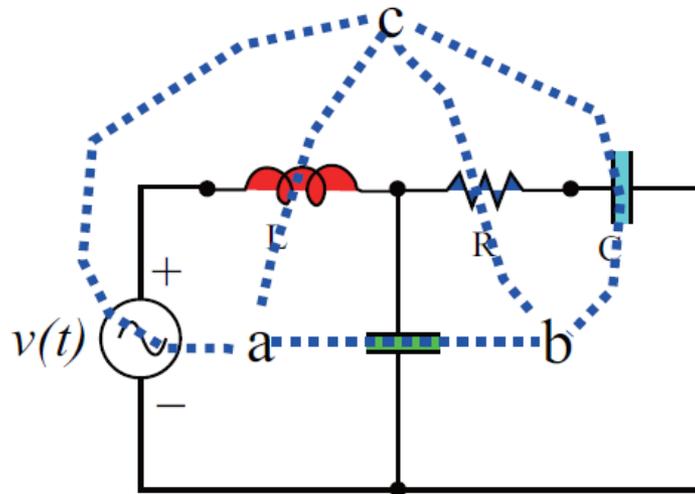
$$L \rightarrow C, R \rightarrow 1/R, C \rightarrow L$$



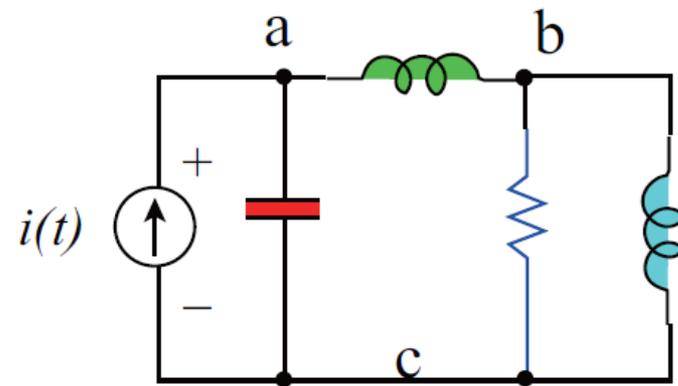
$$v(t) \rightarrow i(t)$$

双対回路の作り方 (2)

1. 独立な回路ループの中に点a, 点b を取る. これらの点が双対回路のノードとなる.
2. a~b 間を結ぶ線(図では点線)が回路要素を通過するように結ぶ
3. このときa,b 間を結ぶ線(図では点線)が変換後の配線となる
4. また点線と交差する要素を表4.1 に示す対応する要素に変換する
5. 要素の変換で電圧源は電流源となり, 電流源はと電圧源なる.



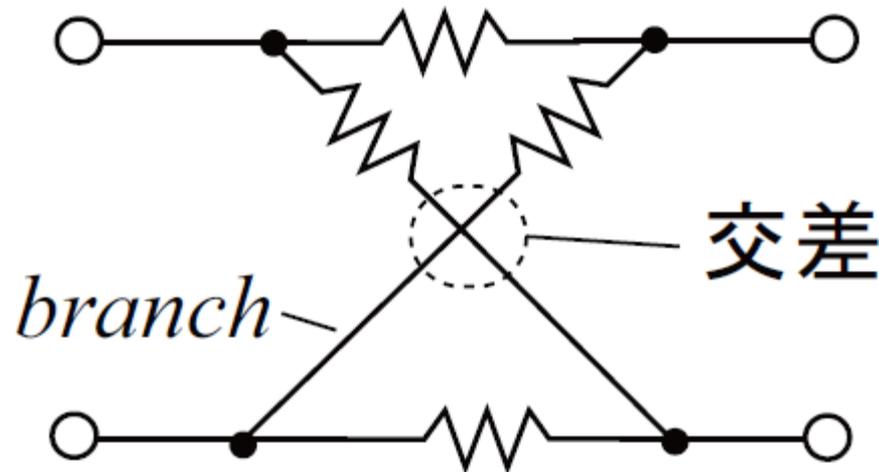
$L \rightarrow C, R \rightarrow 1/R, C \rightarrow L$



$v(t) \rightarrow i(t)$

双対性がない非平面回路

大部分の回路(平面回路)はその双対回路を有するが、時として有しないものもある(非平面回路). この非平面回路とは回路の枝(branch)が交差することなしには、平面図形として表しえないものを示す. 図には、その一例を示す.



非平面回路例

双対回路と機械回路 (1)

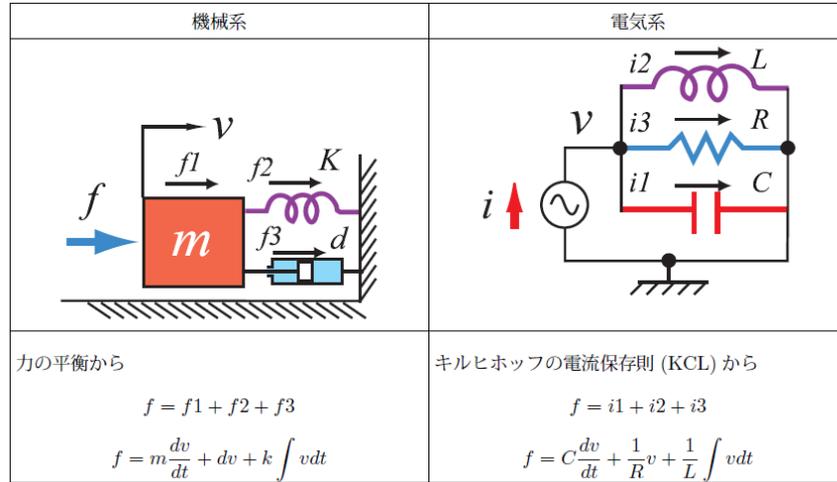
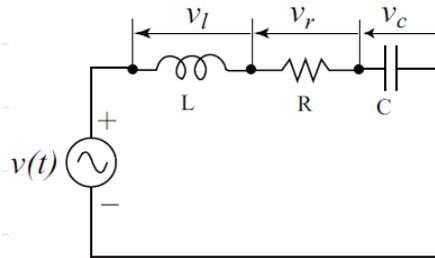
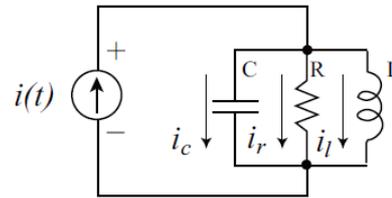


図 1.1: 機械系と電気系における相似回路



a) RLC直列回路



b) RLC並列回路

力の平衡

← $f = f_1 + f_2 + f_3 \Rightarrow f = m \frac{dv}{dt} + dv + k \int v dt$

電流則(KCL)

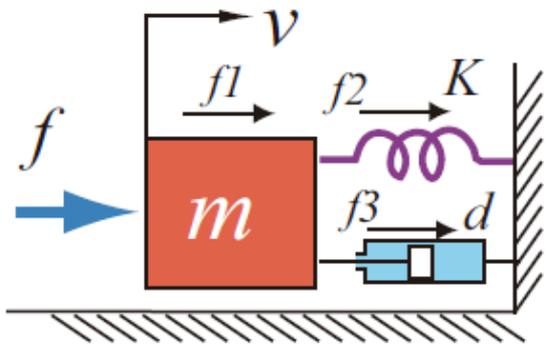
← $f = i_1 + i_2 + i_3 \Rightarrow f = C \frac{dv}{dt} + \frac{1}{R} v + \frac{1}{L} \int v dt$

双対回路

電圧則(KVL)

$$v = v_1 + v_2 + v_3 \Rightarrow v = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int idt$$

双対回路と機械回路 (2)



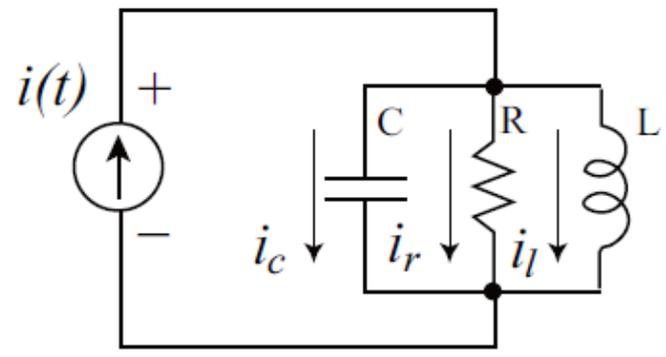
$f - i$
$v - v$
$m - C$
$d - 1/R$
$k - 1/L$

$f-i$ 回路

$f - v$
$v - i$
$m - L$
$d - R$
$k - 1/C$

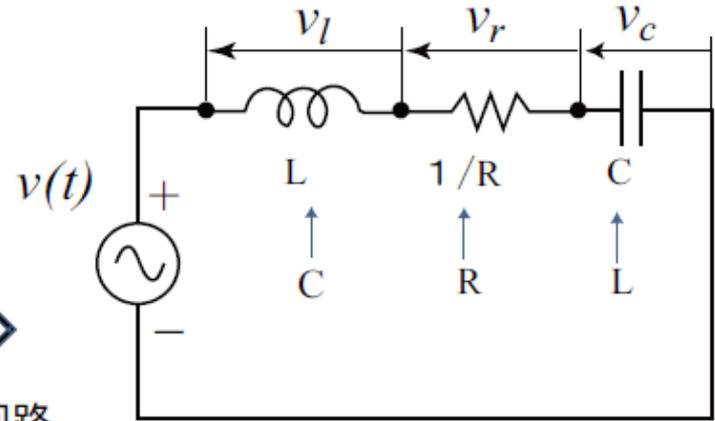
$f-v$ 回路

↓ 機械系と電気系のアナロジ



$f-i$ アナロジ回路

⇒ 双対回路



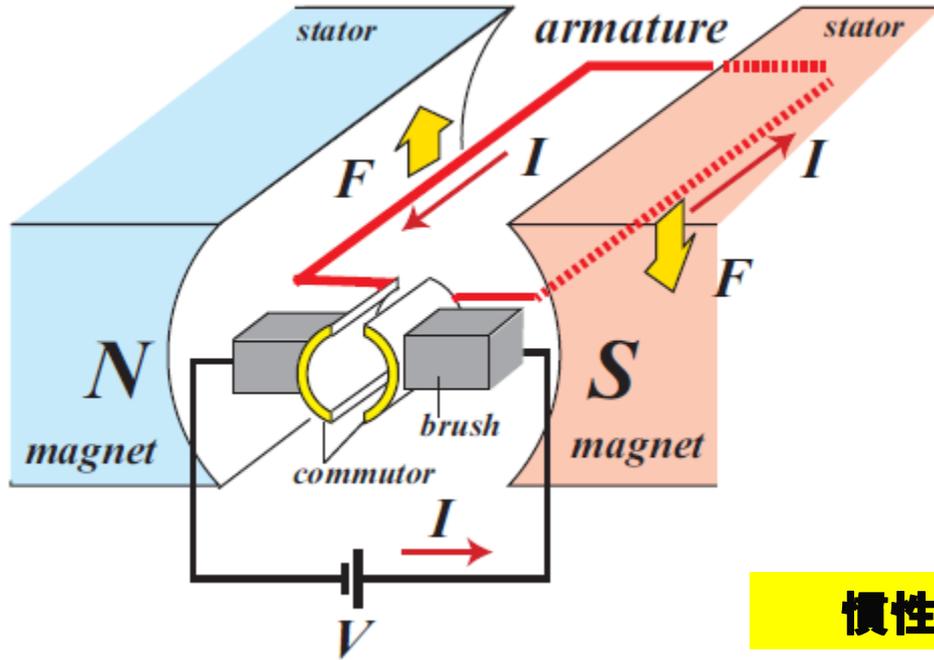
$f-v$ アナロジ回路



機械回路と電気回路のアナロジ

機械回路	力-電流アナロジ	力-電圧アナロジ
力 $f(t)$	電流 $i(t)$	電圧 $v(t)$
速度 $v(t)$	電圧 $v(t)$	電流 $i(t)$
質量 M	キャパシタンス C	インダクタンス L
粘性抵抗 d	コンダクタンス R^{-1}	レジスタンス R
バネ K	逆インダクタンス L^{-1}	逆キャパシタンス C^{-1}

機械-電気混合システムの回路解析



モータ

$$T = K_T i_a \dots\dots(1)$$

発電機

$$e = K_E \omega \dots\dots(2)$$

慣性モーメントJと回転角速度 ω の関係

$$T = J \frac{d\omega}{dt} \dots\dots(3)$$

基礎方程式変形 (1)

(1)(3)式より

$$K_T i_a = J \frac{d\omega}{dt} \Rightarrow i_a = \frac{J}{K_T} \frac{d\omega}{dt}$$

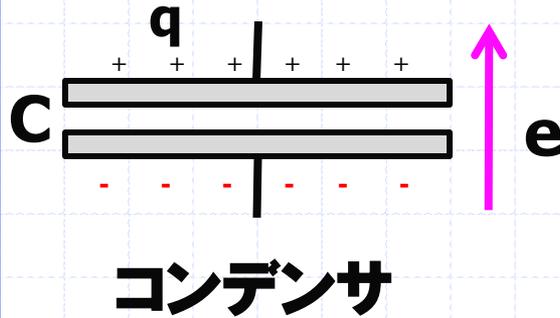
上式両辺積分

$$\omega = \frac{K_T}{J} \int_0^t i_a dt$$

上式と(2)式より

$$e = \frac{K_T K_E}{J} \int_0^t i_a dt$$

基礎方程式変形 (2)

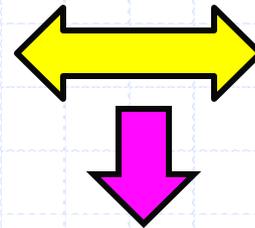


$$q = eC, \quad q = \int_0^t i_a dt$$

$$\Rightarrow e = \frac{1}{C} \int_0^t i_a dt$$

電荷: q , 静電容量: C , 電圧: e

$$e = \frac{K_T K_E}{J} \int_0^t i_a dt$$

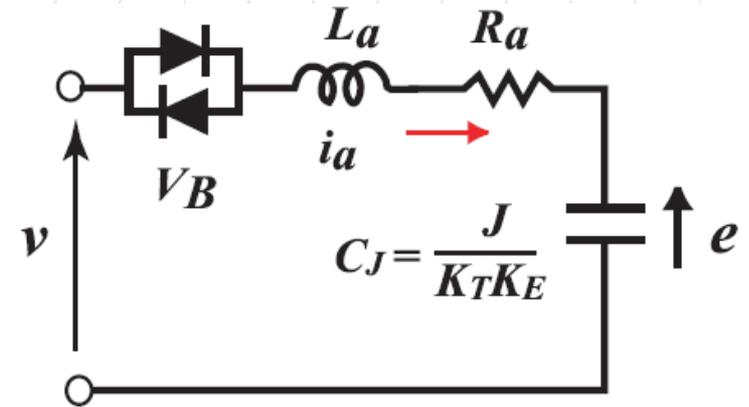
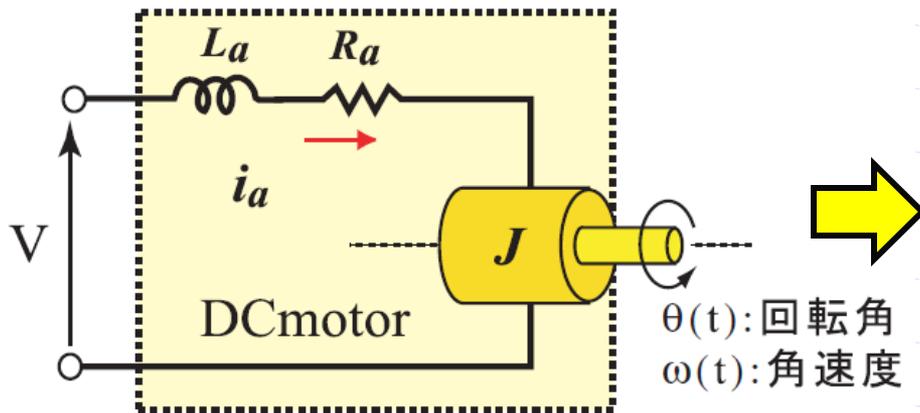


$$e = \frac{1}{C} \int_0^t i_a dt$$

慣性モーメント J
の等価静電容量

$$C_J = \frac{J}{K_T K_E}$$

DC モータの電気的等価回路



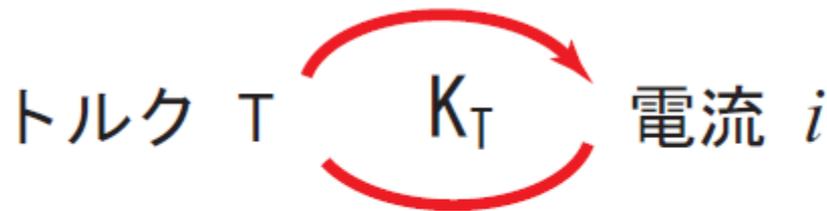
- L_a : モータ電機子のインダクタンス成分
- R_a : モータ電機子の抵抗成分
- C_J : モータローターの慣性成分
- K_T : モータトルク定数[Nm/A]
- K_E : モータ逆起電力定数[V/rpm]
- V_b : モータブラシによる電圧降下

$$C_J = \frac{J}{K_T K_E}$$

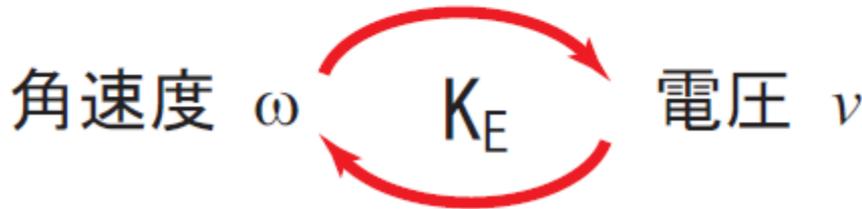
対応する機械量と電気量との相互変換係数

機械系

電気系



$$T = K_T i_a \cdots \cdots (1)$$

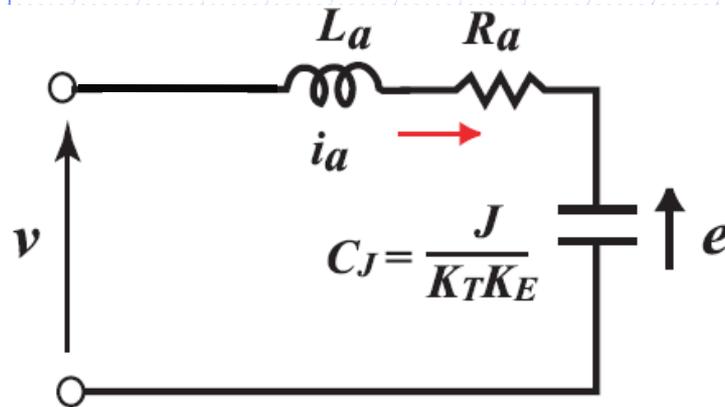


$$e = K_E \omega \cdots \cdots (2)$$

K_T, K_E は機械量と電気量とを関係付ける変換定数

$$K_T [Nm / A] = K_E [Vs / rad]$$

DC モータの伝達関数 (1)



$$v(t) = L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + \frac{1}{C_J} \int_0^t i_a dt$$

$$e(t) = \frac{K_T K_E}{J} \int_0^t i_a dt$$

$$\omega(t) = \frac{K_T}{J} \int_0^t i_a dt$$

入力: 電圧 $v(t)$, 出力: 回転角速度 $\omega(t)$

とすると伝達関数は次のようになる。

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_T / J s}{s L_a + R_a + K_T K_E / J s} = \frac{K_T}{s^2 J L_a + s J R_a + K_T K_E}$$

DC モータの伝達関数 (2)

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K_T / Js}{sL_a + R_a + K_T K_E / Js} = \frac{K_T}{s^2 J L_a + s J R_a + K_T K_E}$$

電気的時定数 τ_E が機械的時定数 τ_M に比べ十分に小さい時

$$\tau_E = \frac{L_a}{R_a} \ll \tau_M = \frac{J R_a}{K_T K_E}$$

$$G(s) = \frac{1}{(1 + s\tau_E) K_E (1 + s\tau_M)}$$

電気的時定数による一次遅れ回路, $1/K_E$ による電圧と角速度の変換, そして機械的時定数の一次遅れ回路の3つの要素が直列に接続された回路

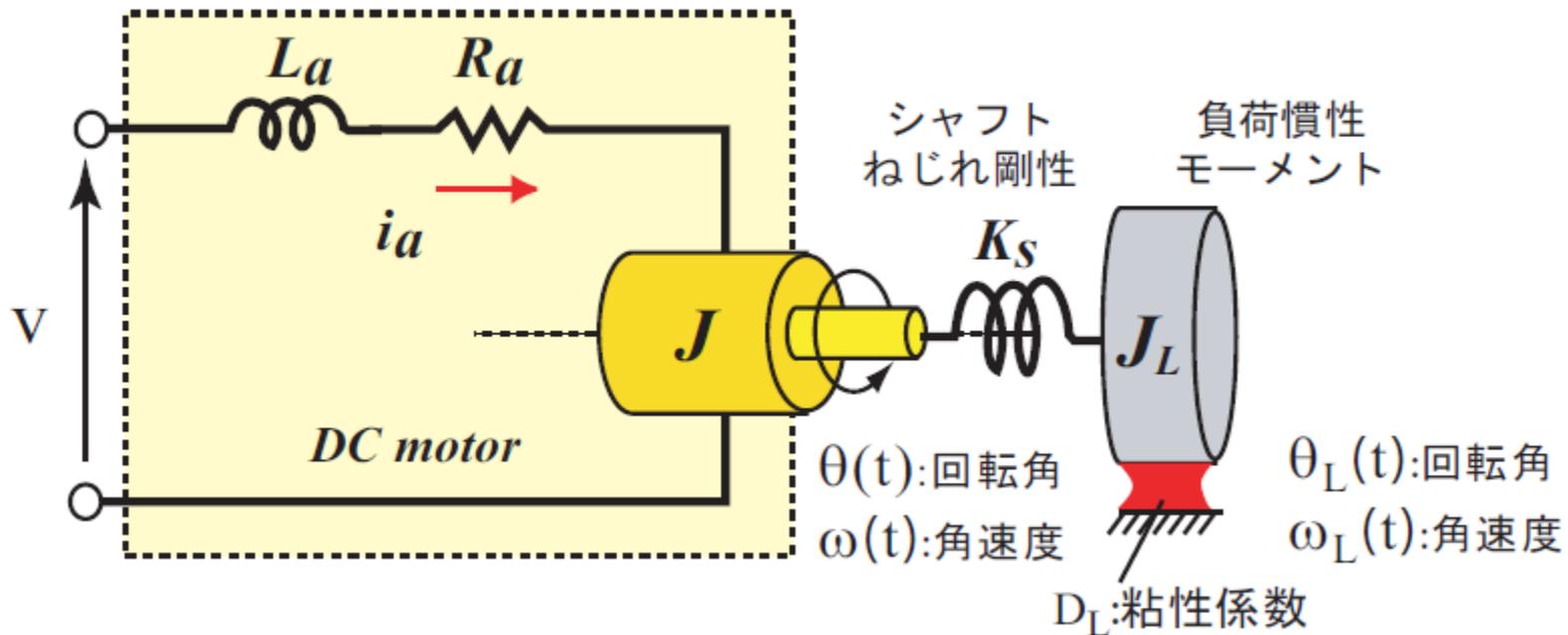
DC モータの伝達関数 (3)

電氣的時定数 T_E の意味: 巻き線に電流を流すとトルクが発生するが、インダクタンスは電流の急激な変化を妨げる特性があり、電気抵抗とインダクタンスで決まる一定の時間、電流が流れにくい領域が存在する。この時間を電氣的時定数で表わす。ちなみに小型DC モータでは T_E : 0.1ms ~ 1ms 程度である。

機械的時定数 T_M の意味: モータのローターにステップ状のトルクが加わった場合、ローターの回転はなだらかに加速し、最終速度の63%に達する時間をもって、機械的時定数とする。ちなみに小型DC モータでは T_M : 1ms ~ 10ms 程度である

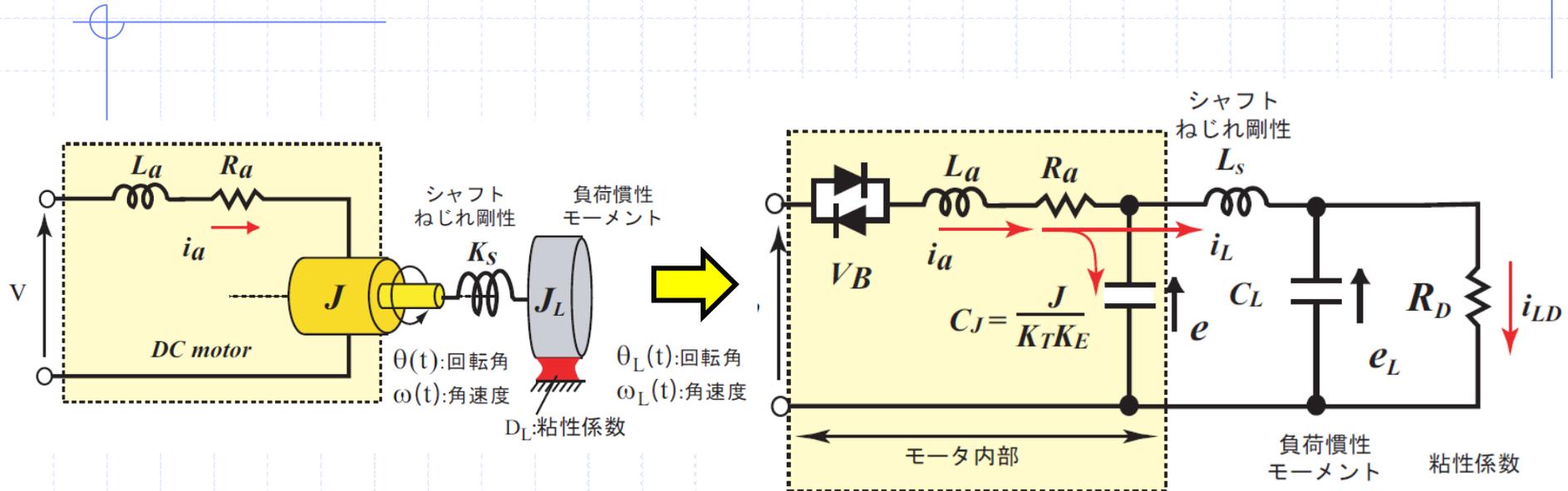
通常は、モータ軸には負荷を取付けるのが普通であるから、この値はより大きくなり、 T_E は事実上無視できる場合が多い。

DC モータに負荷慣性等が接続した場合の等価回路



1. シャフトのねじれ剛性のためシャフトがねじれる
2. シャフトのねじれにより、モータの回転角度 θ と回転体の回転角度 θ_L とがずれる。
3. よって、モータ側の角速度 ω と負荷側の角速度 ω_L が一致しない。
4. また、モータの発生するトルクは、モータのロータ(J)を駆動するためと、負荷側を駆動するために使われる。

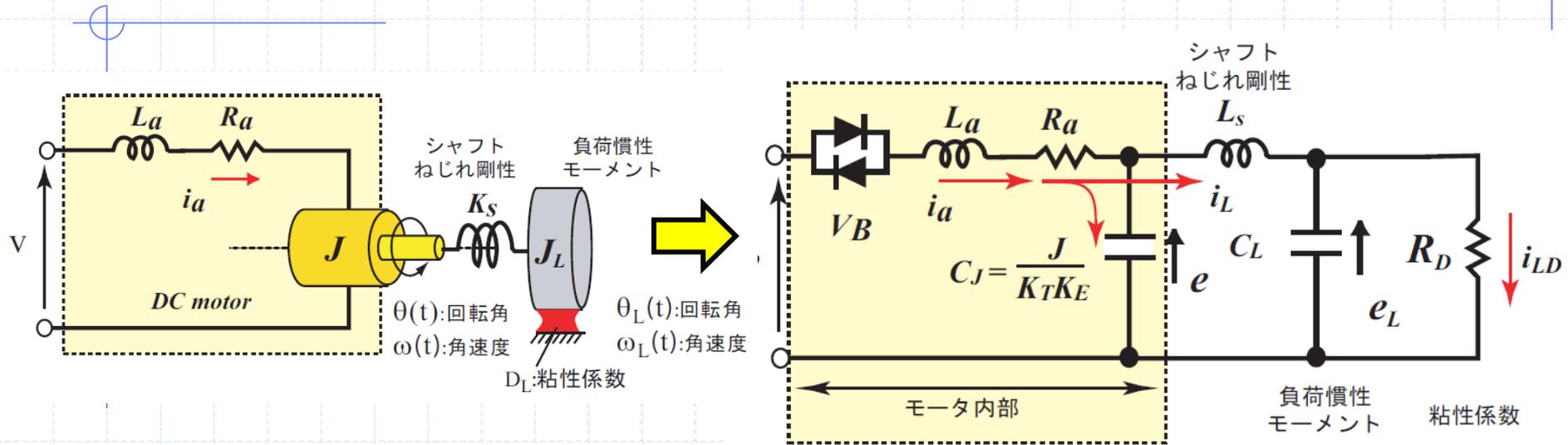
負荷慣性等が接続した場合の等価回路(2)



$$K_s \Rightarrow L_s, \quad J_L \Rightarrow C_L, \quad D_L \Rightarrow R_D$$

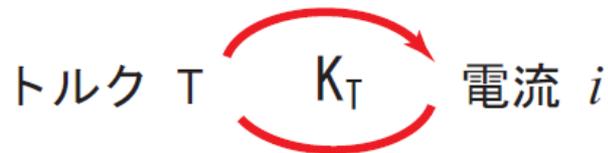
この変換式を求める

負荷慣性等が接続した場合の等価回路 (3)



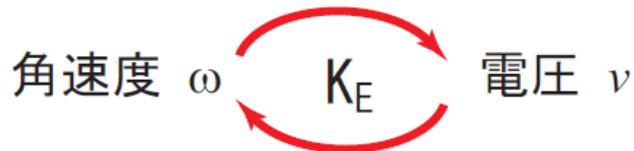
機械系

電気系



モータの回転速度 → 電圧

$$e = K_E \omega$$



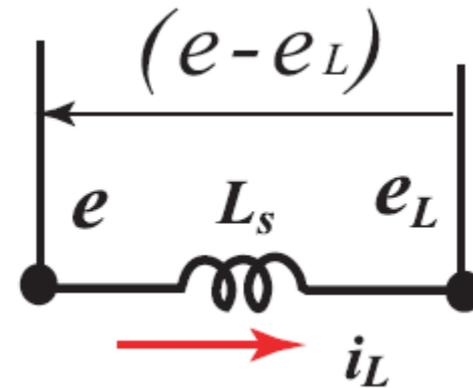
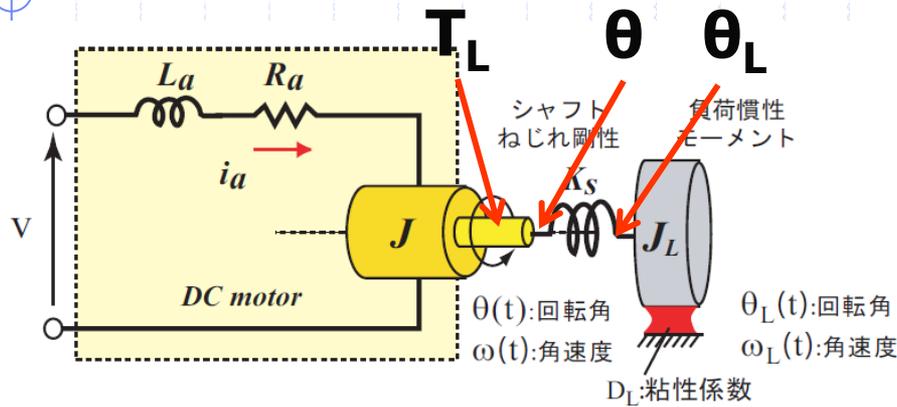
負荷の回転速度 → 電圧

$$e_L = K_E \omega_L$$

モータの発生トルク → 電流

$$T_L = K_T i_L$$

シャフトのねじり剛性の等価変換 (1)



$$T_L = K_s(\theta - \theta_L) = K_s \int_0^t (\omega - \omega_L) dt$$

微分

$$\frac{dT_L}{dt} = K_s(\omega - \omega_L)$$

$$e = K_E \omega$$

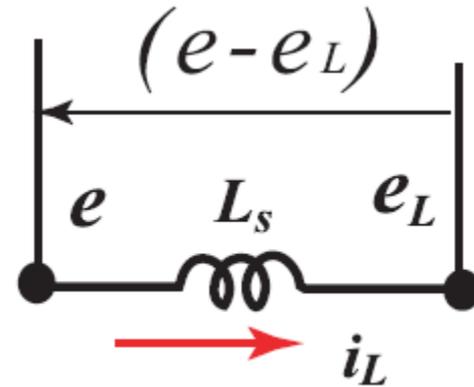
$$\frac{dT_L}{dt} = K_s \frac{1}{K_E} (e - e_L)$$

シャフトのねじり剛性の等価変換 (2)

微分

$$T_L = K_T i_L$$

$$\frac{dT_L}{dt} = K_T \frac{di_L}{dt}$$



シャフトに相当するコイル L_s に流れる電流 i_L と電圧差 $e - e_L$ の関係から

$$(e - e_L) = L_s \frac{di_L}{dt}$$

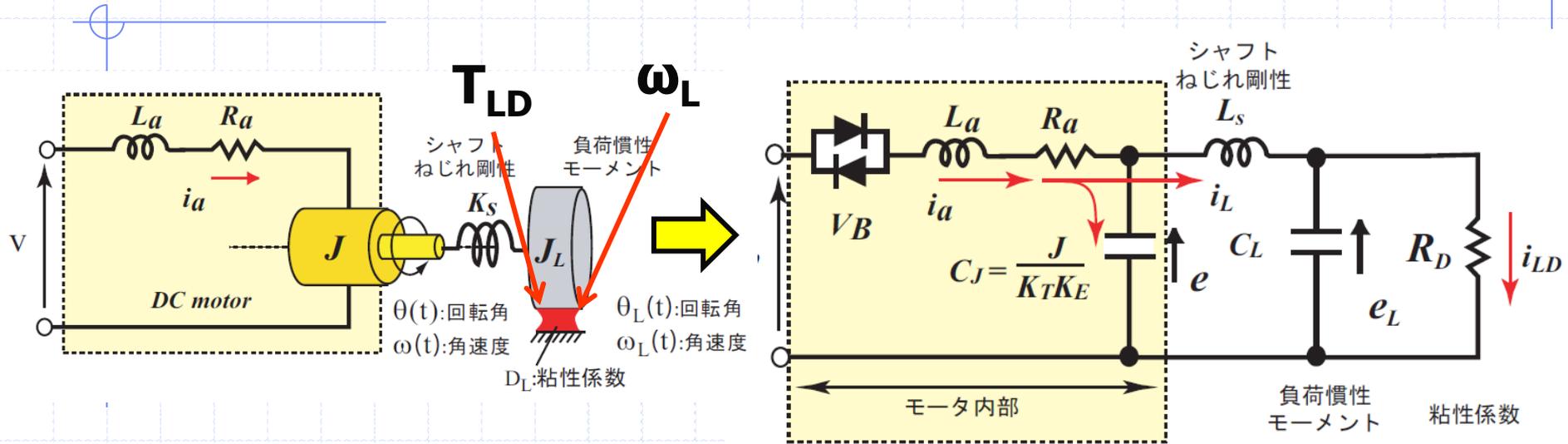
$$\frac{dT_L}{dt} = K_S \frac{1}{K_E} (e - e_L) \quad \text{と} \quad \frac{dT_L}{dt} = K_T \frac{di_L}{dt} \quad \text{から}$$

$$(e - e_L) = \frac{K_T K_E}{K_L} \frac{di_L}{dt}$$

以上よりシャフト剛性 K_S に相当する等価インダクタンスは

$$L_s = \frac{K_T K_E}{K_L}$$

粘性負荷の等価変換 (1)



粘性抵抗は角速度に比例:

$$T_{LD} = D_L \omega_L$$

発生トルク→電流変換:

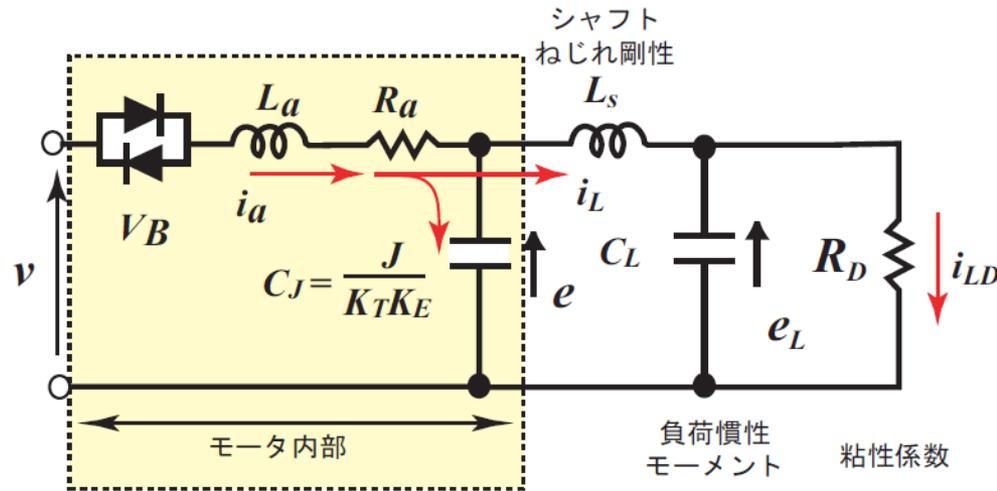
$$T_{LD} = K_T i_{LD}$$

回転角速度→電圧変換:

$$e_L = K_E \omega_L$$

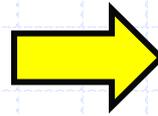
$$e_L = \frac{K_E K_T}{D_L} i_{DL}$$

粘性負荷の等価変換 (2)



$$e_L = R_D i_{LD}$$

$$e_L = \frac{K_E K_T}{D_L} i_{DL}$$



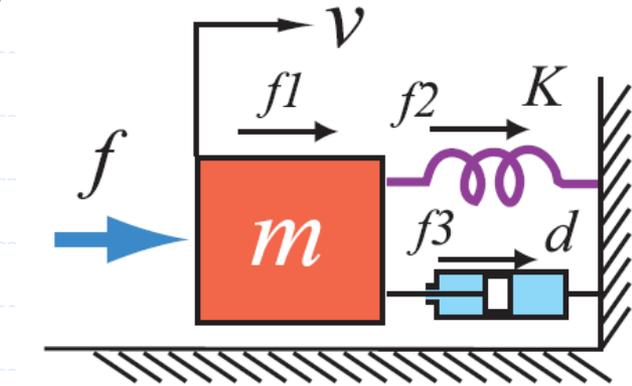
$$R_D = \frac{K_E K_T}{D_L}$$

抵抗 R_D に相当する等価抵抗

アナログコンピュータ

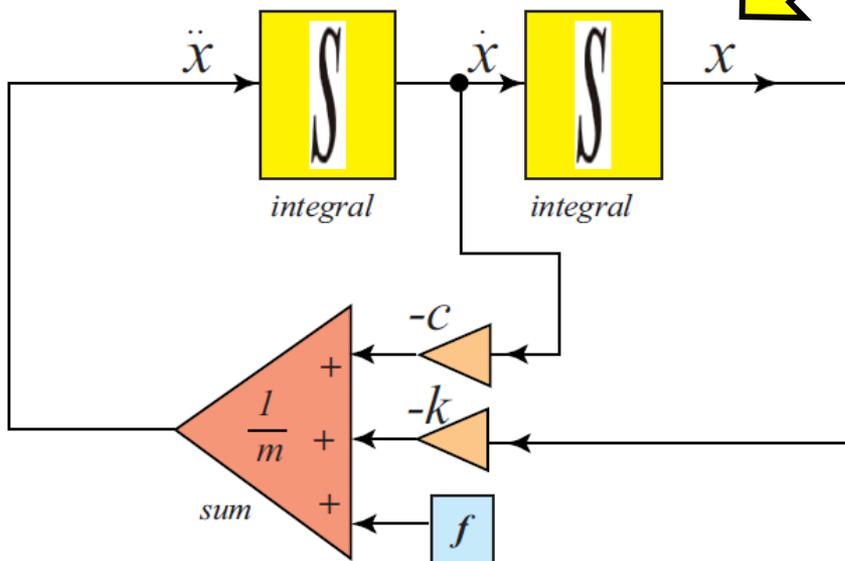
- アナログコンピュータとは、数値のデジタル数値化(ビット化)を行わず、アナログ量のまま演算処理できるコンピュータのことである。
- 回路内を流通するアナログ信号が、例えば電圧の高低が数値の大小に対応している。そのハードウェアにもアナログ素子が用いられる。アナログ素子の組み合わせによって並列処理が可能であるので、計算が高速になるという長所がある。また、データの入出力にも直接アナログ信号を用いることができるので、フィードバック制御に適しているなどの特性もある。
- アナログコンピュータが一般の用途に用いられることはないが、学術研究用のニューロコンピュータや、家電製品に組み込まれるファジイコントローラなどに、デジタルコンピュータとの混合(ハイブリッド)の形式で用いられることが多い。

2階の常微分方程式をアナログコンピュータで解く



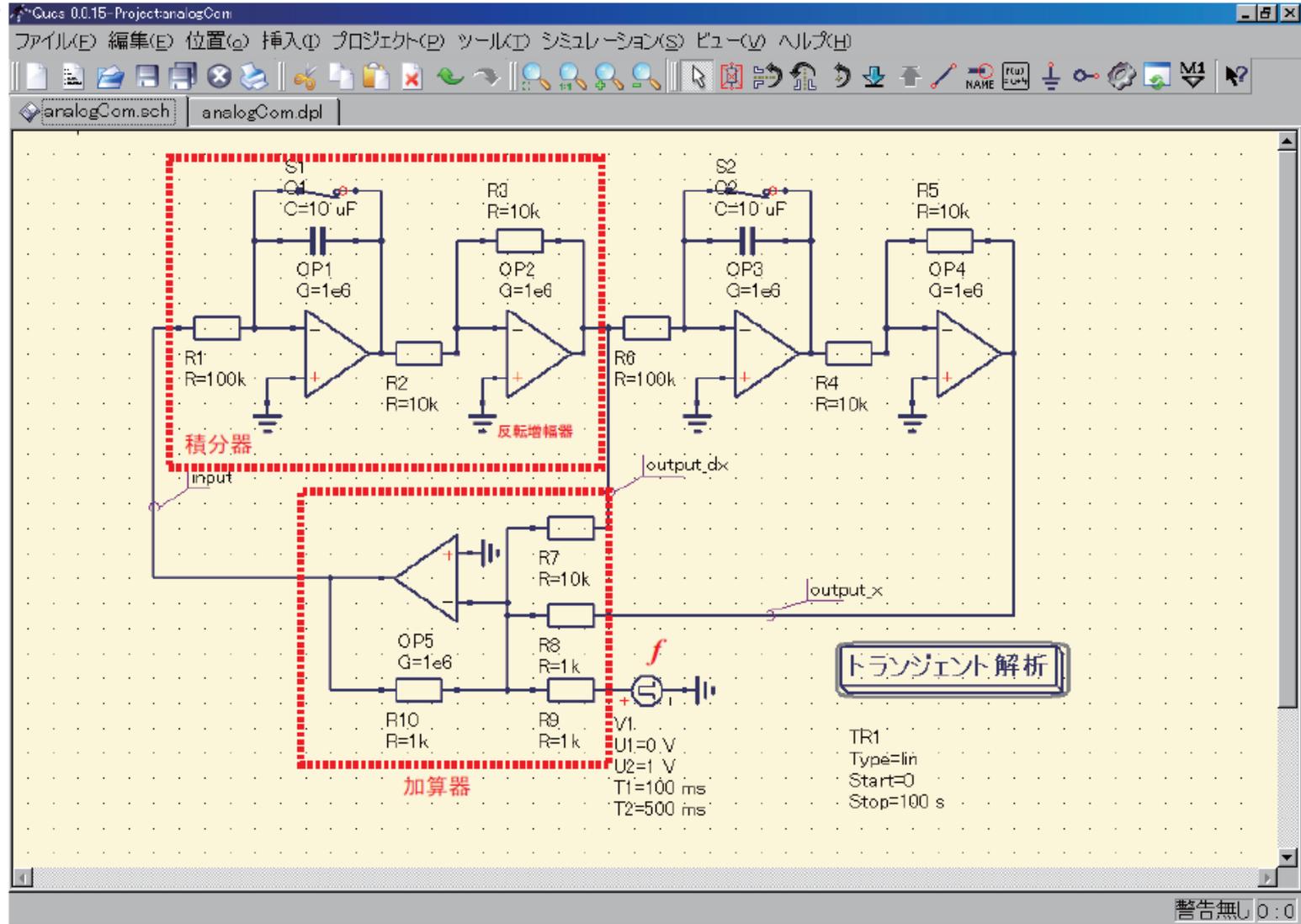
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{m} \left\{ f - c \frac{dx}{dt} - kx \right\}$$

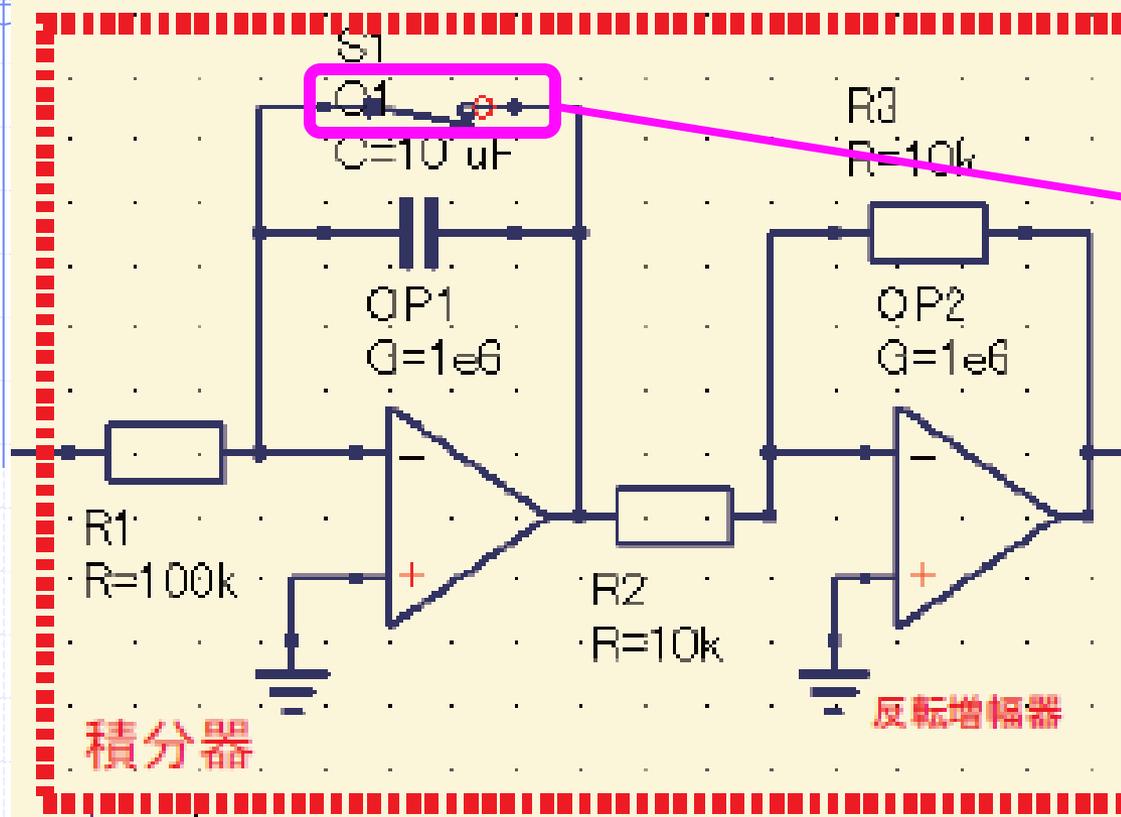


積分器2台
加算器1台
増幅器数台
で実現可能

アナログコンピュータのシミュレータ回路



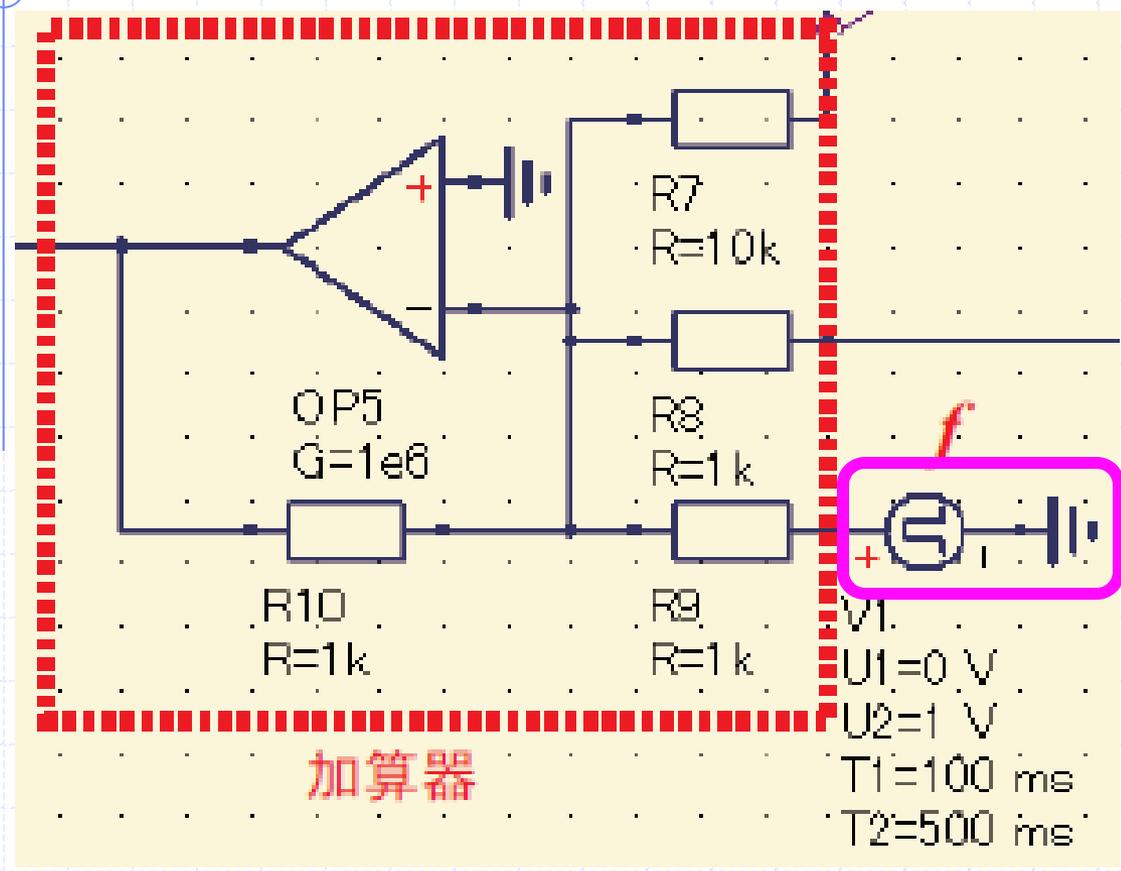
アナログコンピュータのシミュレータ回路(1)



とりあえず積分時定数(CR)を“ $10 \cdot 10^{-6} \times 100 \cdot 10^3 = 1$ ”とした。

←考察が必要

アナログコンピュータのシミュレータ回路 (2)

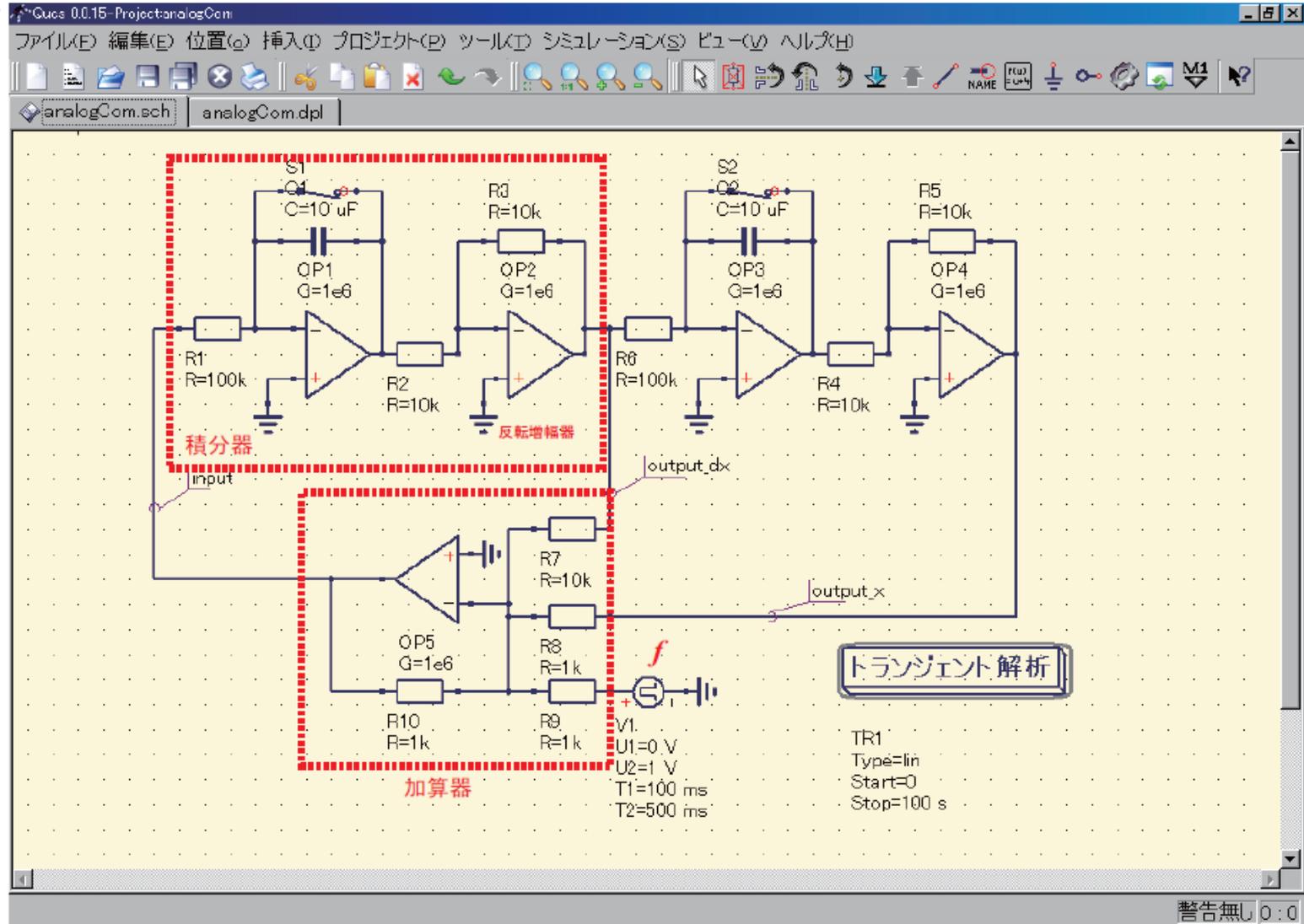


加算器および外力

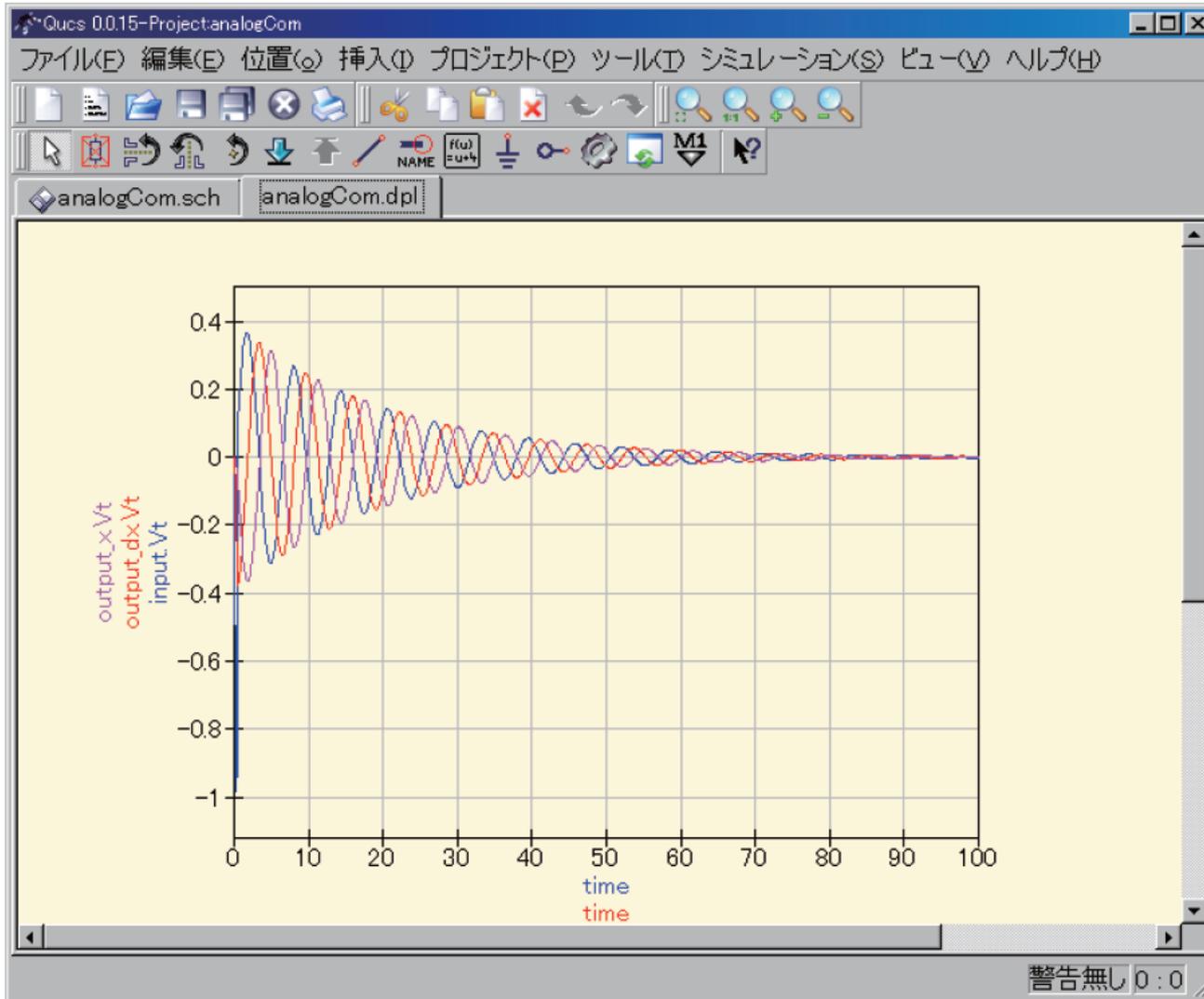
インパルス刺激

V1.
U1=0 V
U2=1 V
T1=100 ms
T2=500 ms

アナログコンピュータのシミュレータ回路



シミュレーション結果例



入力:

インパルス波形
(100ms 後に10ms 幅)

パラメータ:

$$c/m = 0.1$$

$$k/m = 1$$

組込積分器を用いたアナコン(0)

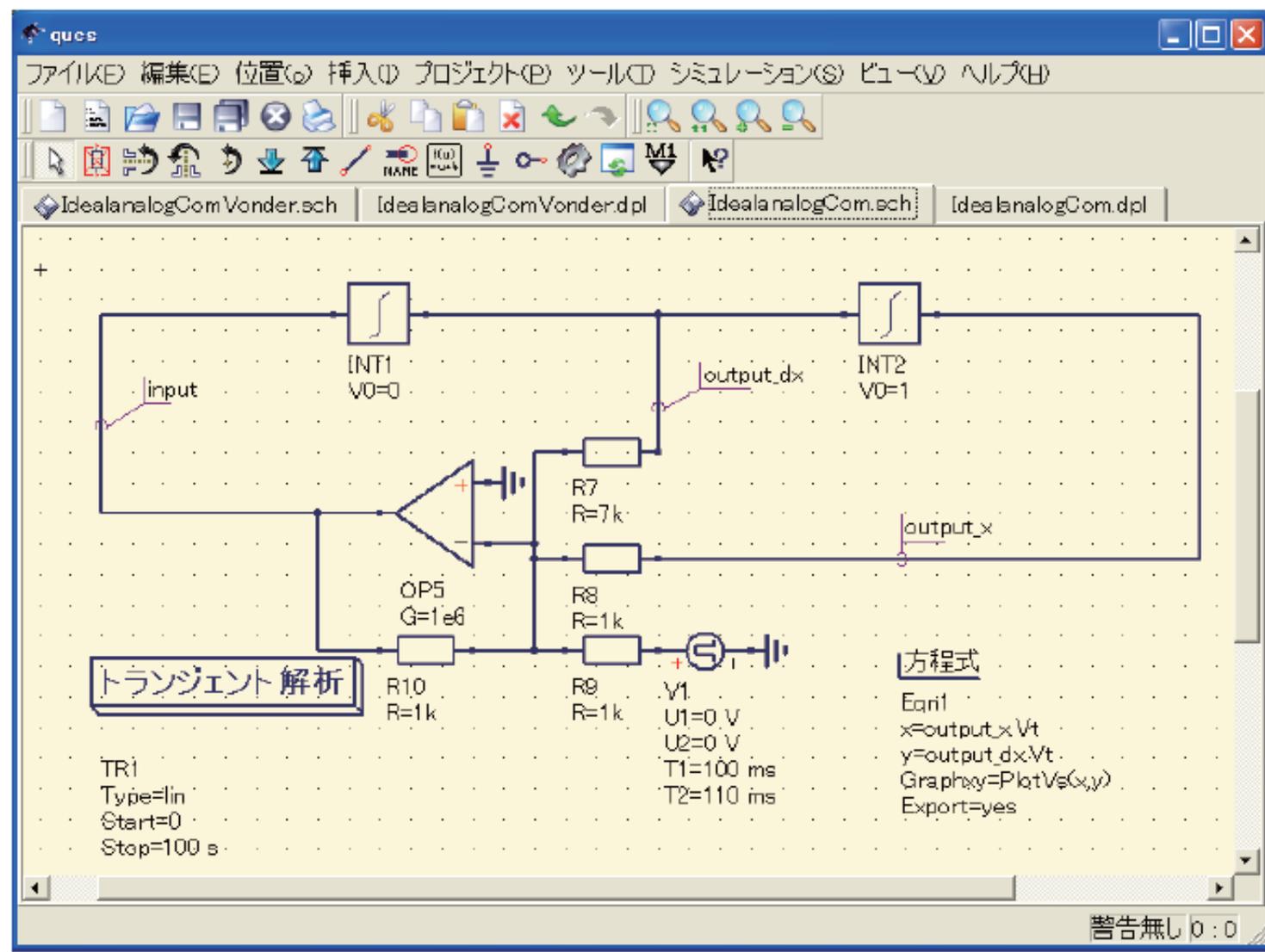


図 6.4: QUCS 組込の積分器を用いて 2 階の常微分方程式を解く回路例

組込積分器を用いたアナコン(1)

時間変化と状態遷移

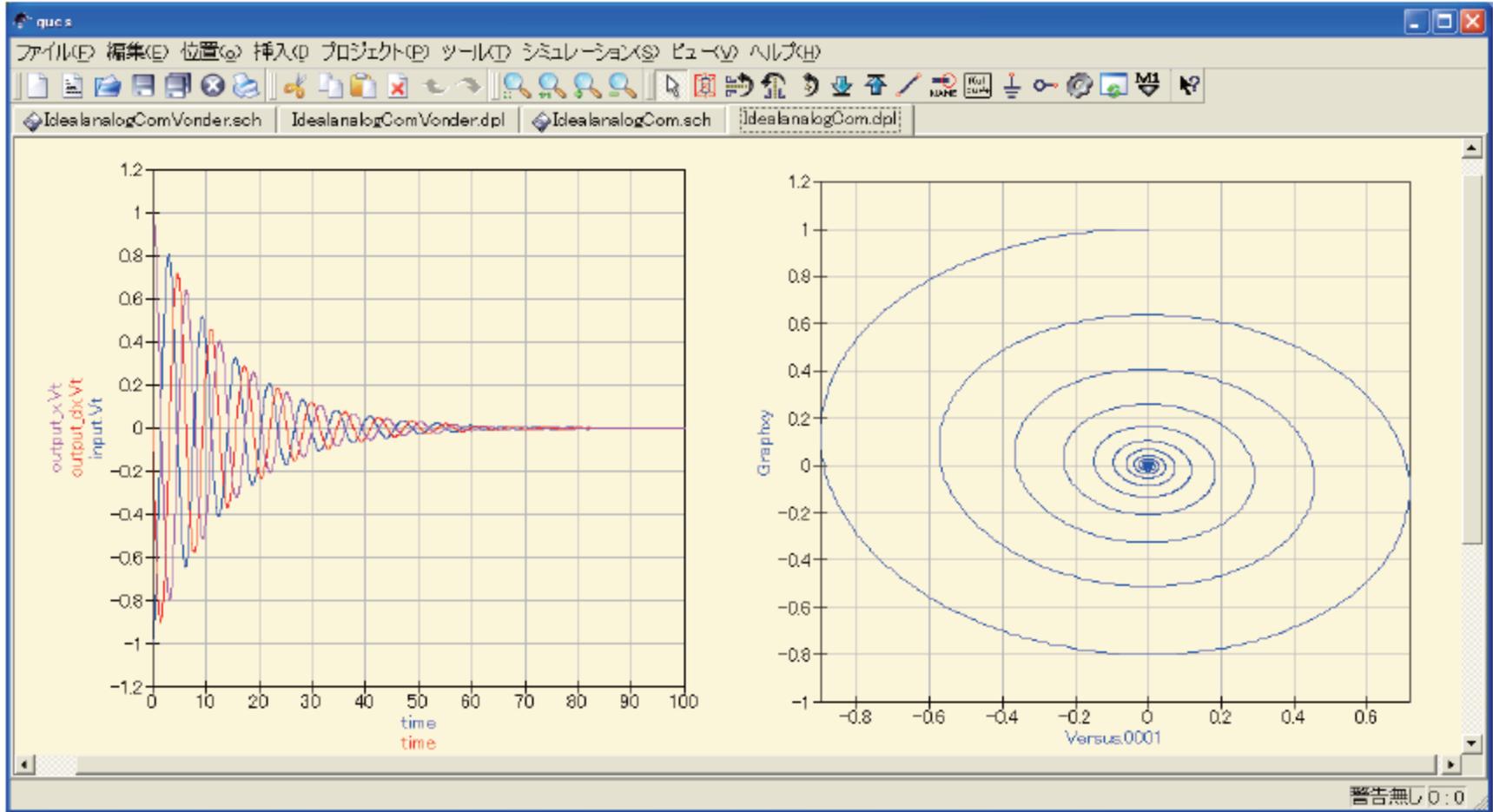


図 6.7: シミュレーション出力結果。時間変化と状態遷移

ファン・デル・ポール方程式

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \epsilon(x^2 - 1)\frac{dx}{dt} + x = 0$$

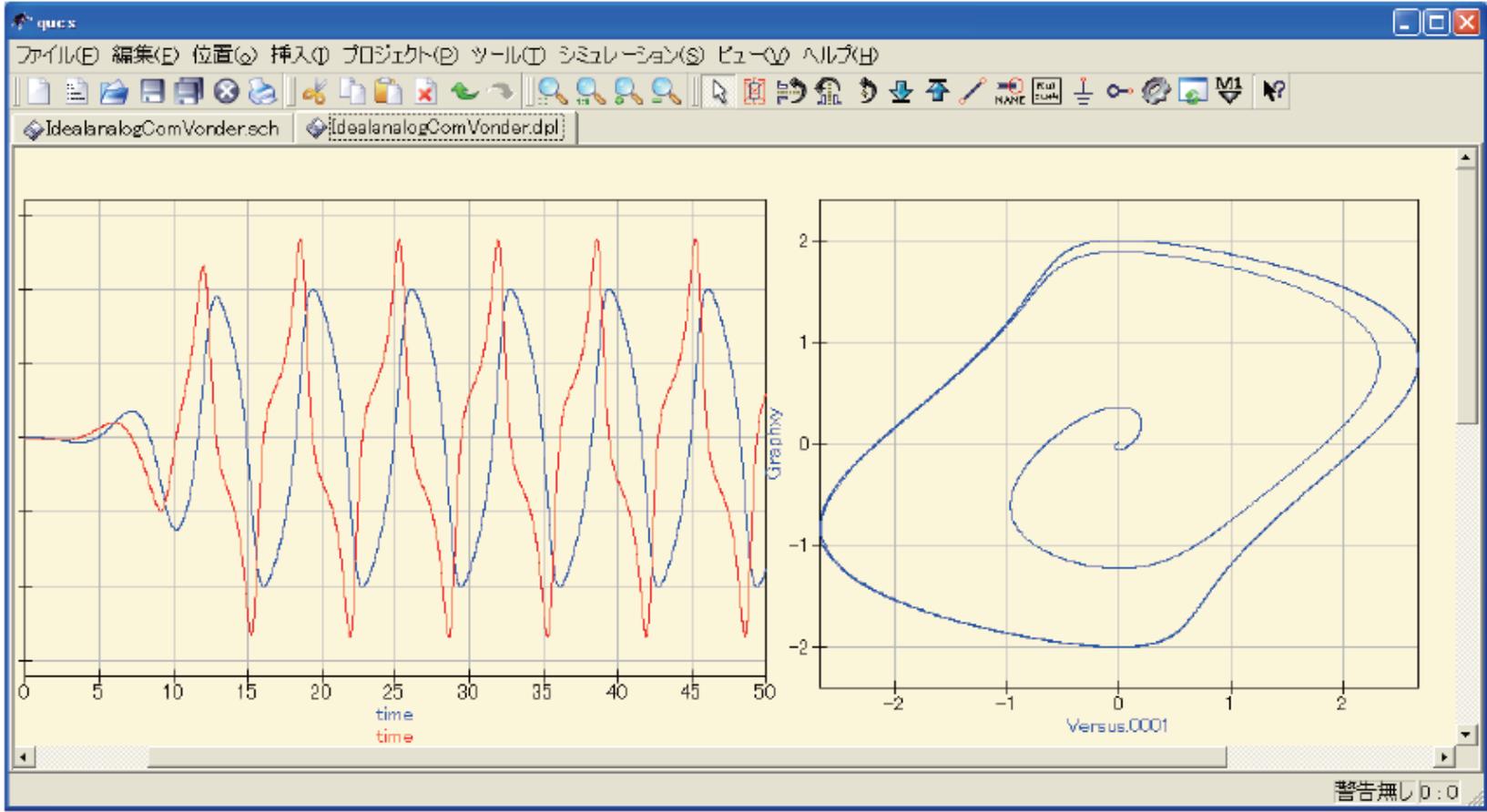


図 6.8: シミュレーション出力結果。時間変化と状態遷移

ローレンツ方程式

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -ax + ay \\ \frac{dy}{dt} &= -xy + bx - y \\ \frac{dz}{dt} &= xy - cz \end{aligned}$$

カオス的ふるまいを示す非線型方程式

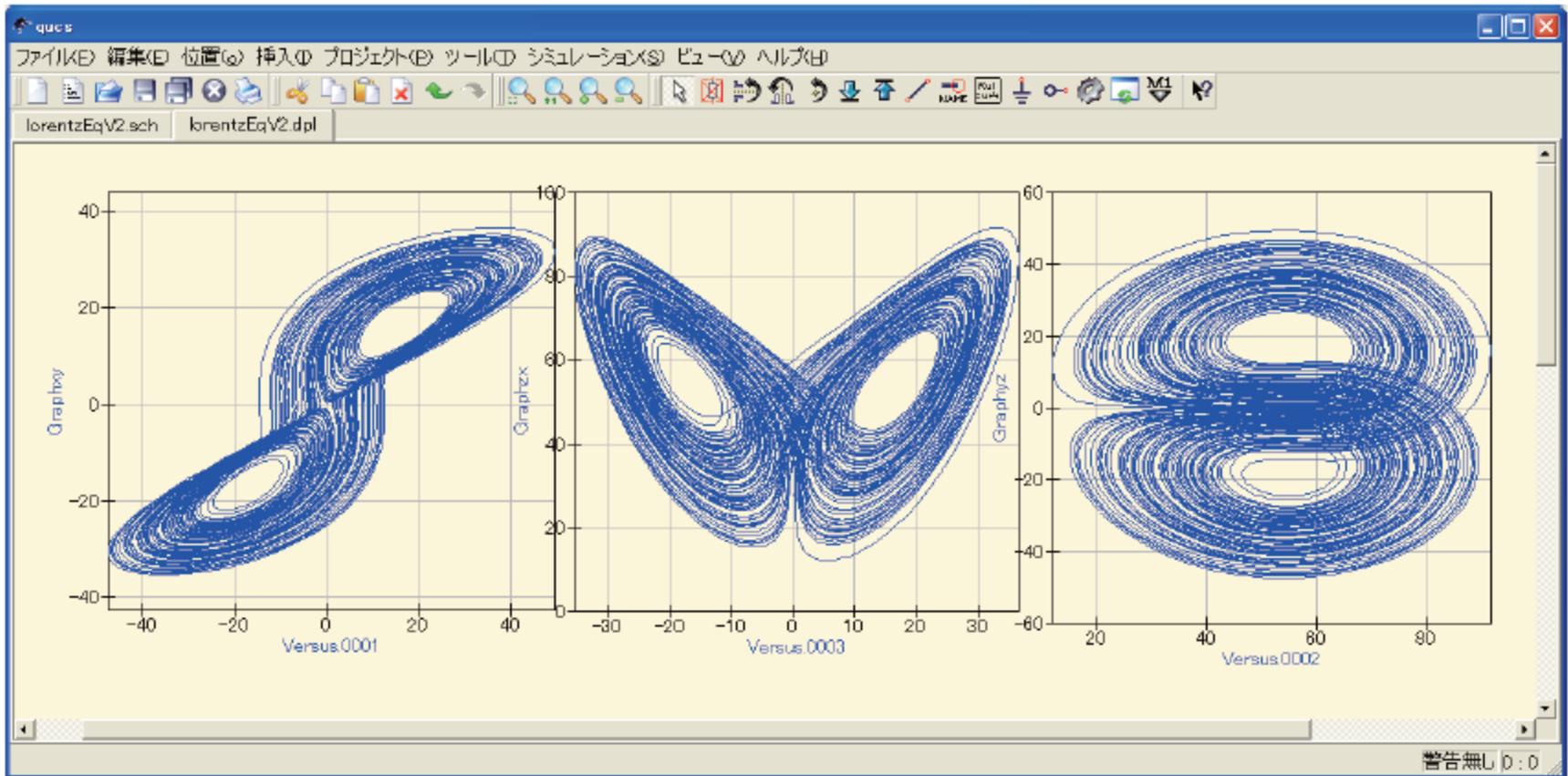


図 6.9: ローレンツ・アトラクタ, xy,yz,zx の 2次元プロット図。

レポート課題(その1)

電子回路シミュレータを用いた課題

講義資料(<http://www.rm.mce.uec.ac.jp/sj/>)

- 2.3章にある問題1, 2, どれか一つを電子回路シミュレータを用いて実行する.
- 実行結果をレポート用紙にて提出.

締切:12月12日月曜日

講義終了後



機械—電気混合システム

DCモータの方程式:
発生トルクと逆起電力

$$T = K_T i_a \quad (\text{motor})$$

$$e = K_E \omega \quad (\text{generator})$$

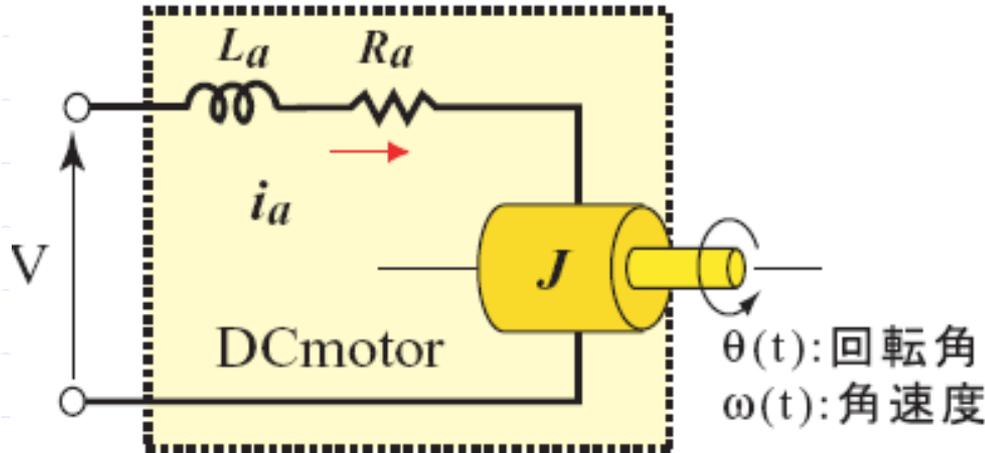


図 1.13: DC モータの等価回路

DCモータの方程式:
ロータの慣性力

$$T = J \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{inertia})$$

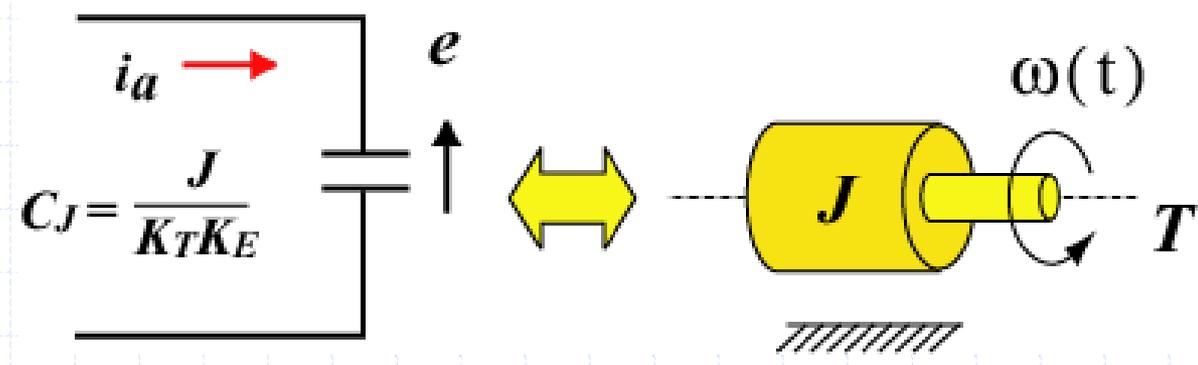
式変形1

$$\left. \begin{aligned} T &= K_T i_a \quad (\text{motor}) \\ e &= K_E \omega \quad (\text{generator}) \\ T &= J \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{inertia}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow K_T i_a = J \frac{d\omega}{dt} \Rightarrow i_a = \frac{J}{K_T} \frac{d\omega}{dt}$$

$$\omega = \frac{K_T}{J} \int_0^t i_a dt \Rightarrow e = \frac{K_T K_E}{J} \int_0^t i_a dt$$

$$e = \frac{K_T K_E}{J} \int_0^t i_a dt \Rightarrow e = \frac{1}{C_J} \int_0^t i_a dt, C_J = \frac{J}{K_T K_E}$$

式変形2



$$e = \frac{1}{C_J} \int_0^t i_a dt \quad \longleftrightarrow \quad \omega = \frac{1}{J} \int_0^t T dt \quad \left(T = \frac{d\omega}{dt} \right)$$

$$C_J = \frac{J}{K_T K_E} \quad \longleftrightarrow \quad J$$

機械系と電気系の変換係数

機械系

電気系

トルク T

K_T

電流 i

$$T = K_T i$$

角速度 ω

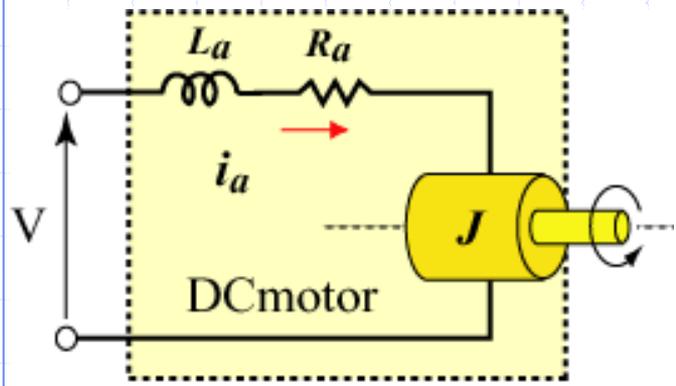
K_E

電圧 e

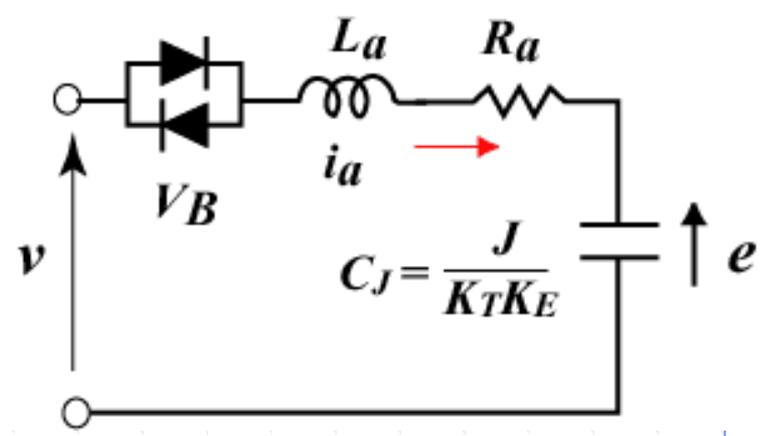
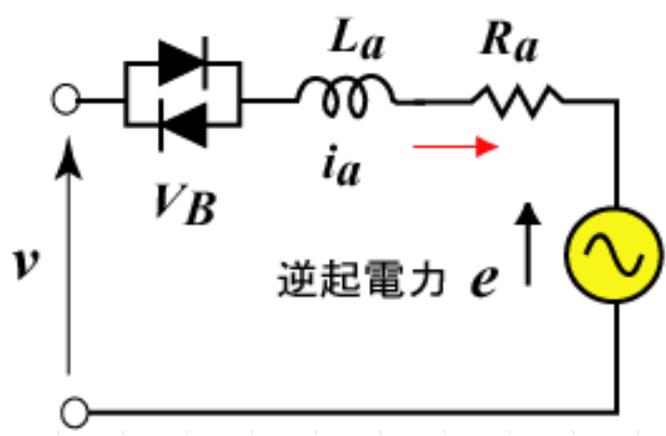
$$e = K_E \omega$$

DCモータ等価回路

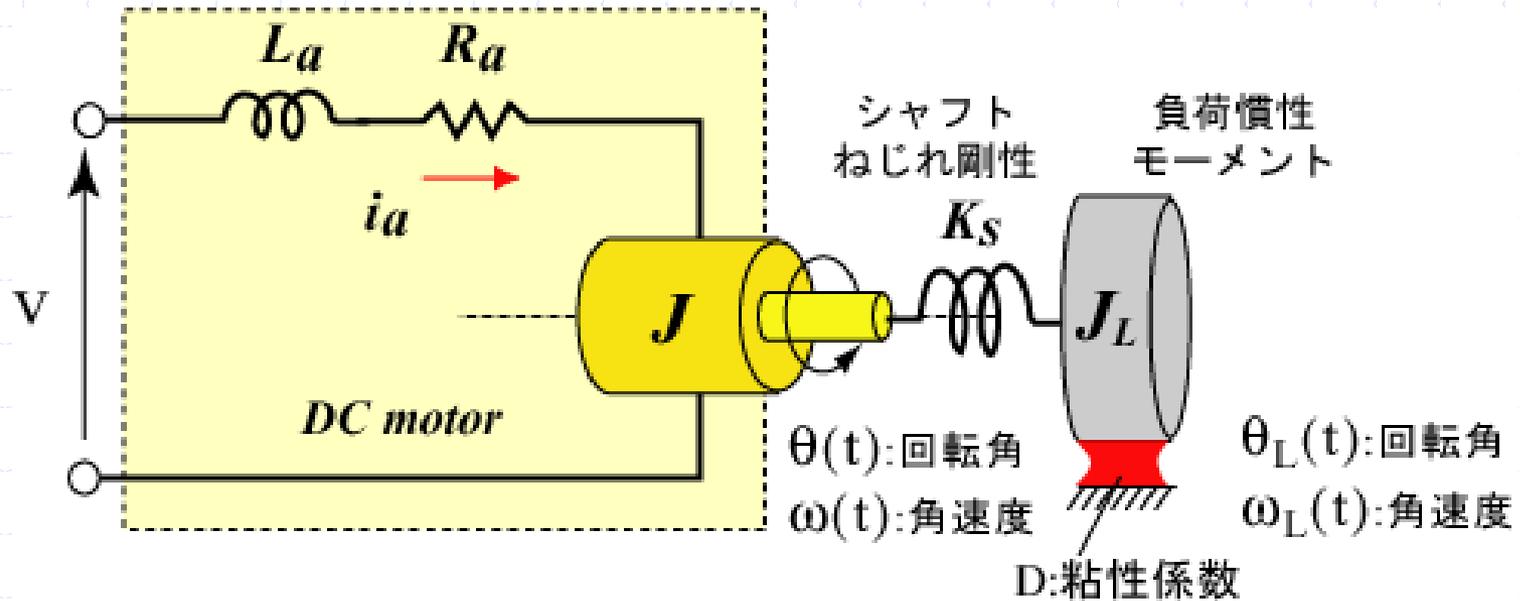
DC モータの電氣的等価回路で用いている記号



- L_a : モータ電機子のインダクタンス成分
- R_a : モータ電機子の抵抗成分
- C_J : モータローターの慣性成分 $C_J = J/K_T K_E$
- K_T : モータトルク定数 [Nm/A]
- K_E : モータ逆起電力定数 [V/rpm]
- V_b : モータブラシによる電圧降下



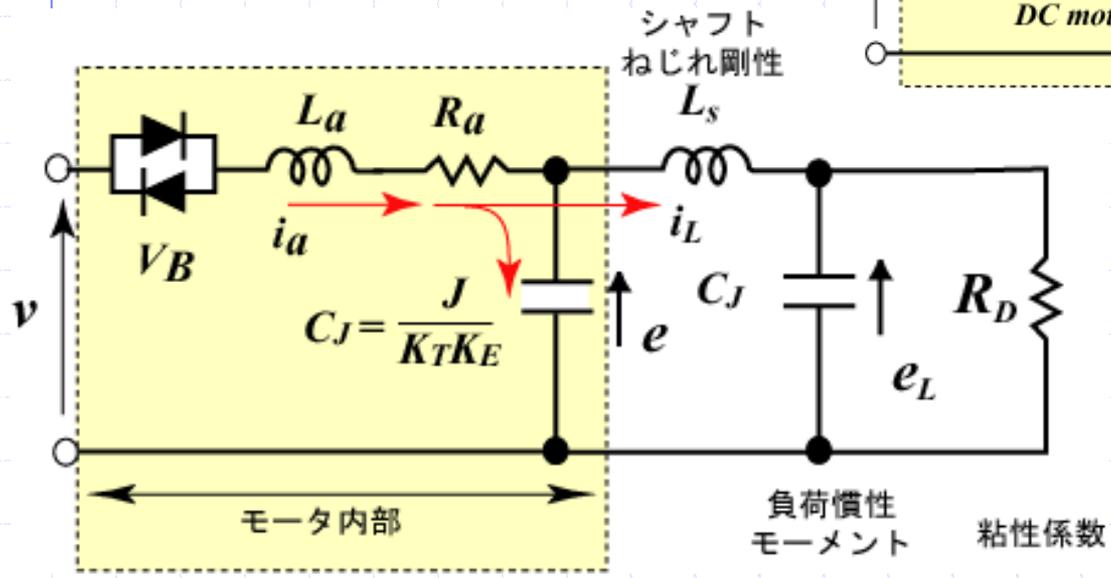
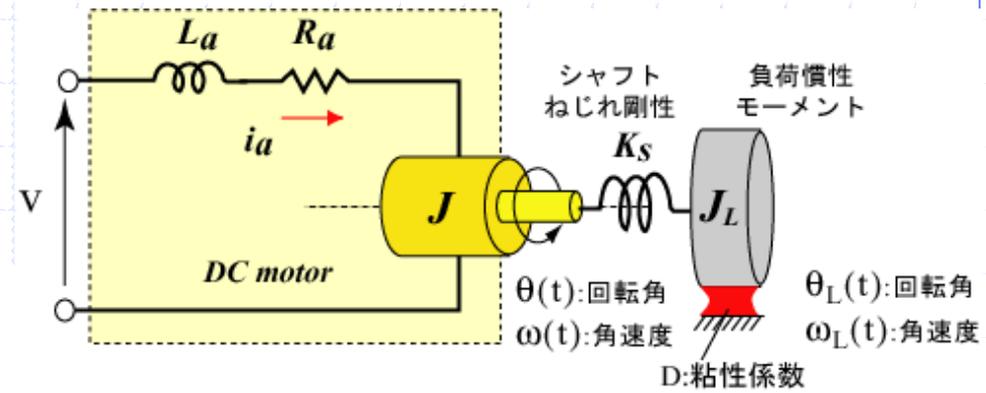
DCモータに慣性負荷が接続



シャフトに加わるねじれトルク

$$T_L = K_s (\theta - \theta_L) = K_s \int_0^t (\omega - \omega_L) dt$$

等価回路



$$e = K_E \omega$$

$$e_L = K_E \omega_L$$

$$T_L = K_T i_L$$

$$(e - e_L) = \frac{K_T K_E}{K_S} \frac{di_L}{dt} \Rightarrow L_S = \frac{K_T K_E}{K_S}$$

電話機設計への応用例

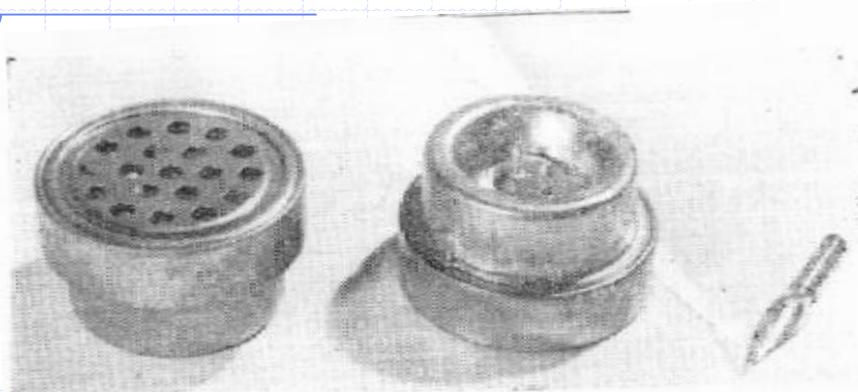


図 7-14 電磁受話器 (R-60 受話器)

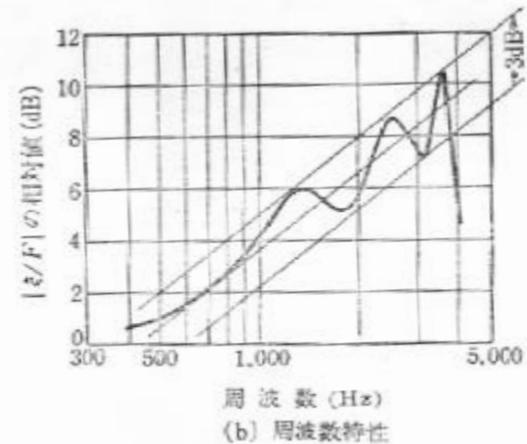
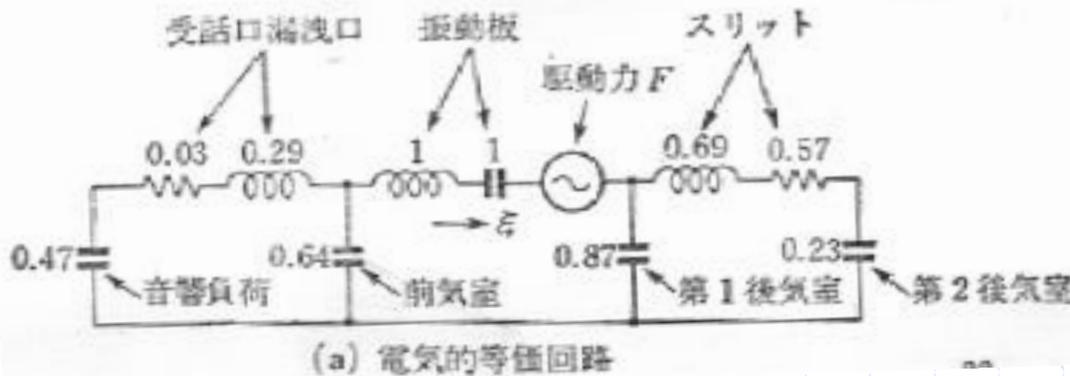


図 7-15 R-60 受話器の振動系の電氣的等価回路と周波数特性



(a) 電氣的等価回路

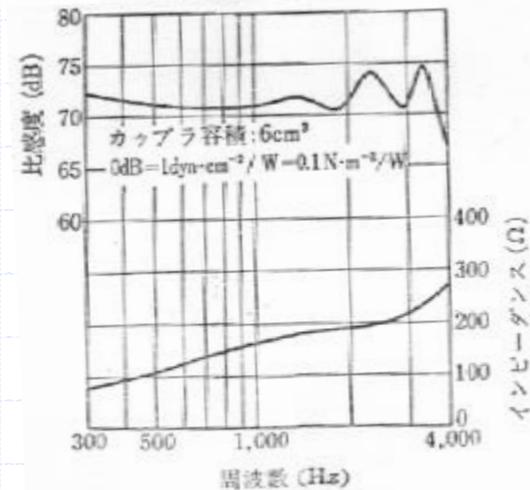
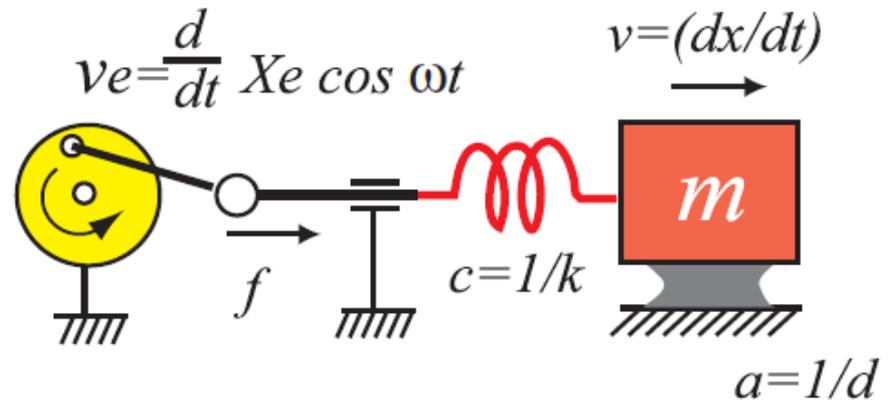
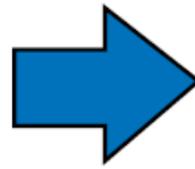


図 7-16 受話器の比感度および電気インピーダンスの周波数特性

機械回路例



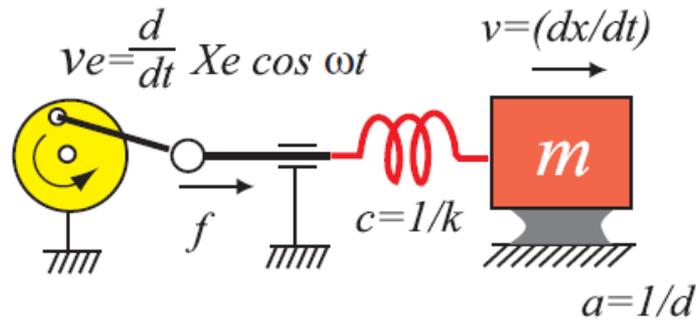
機械的蓄音機



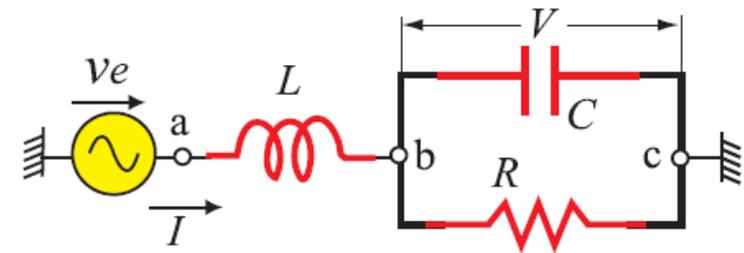
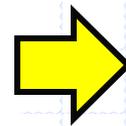
(a) Mechanics

実際の機械システムへの適用例を示す

機械回路→電気回路への変換

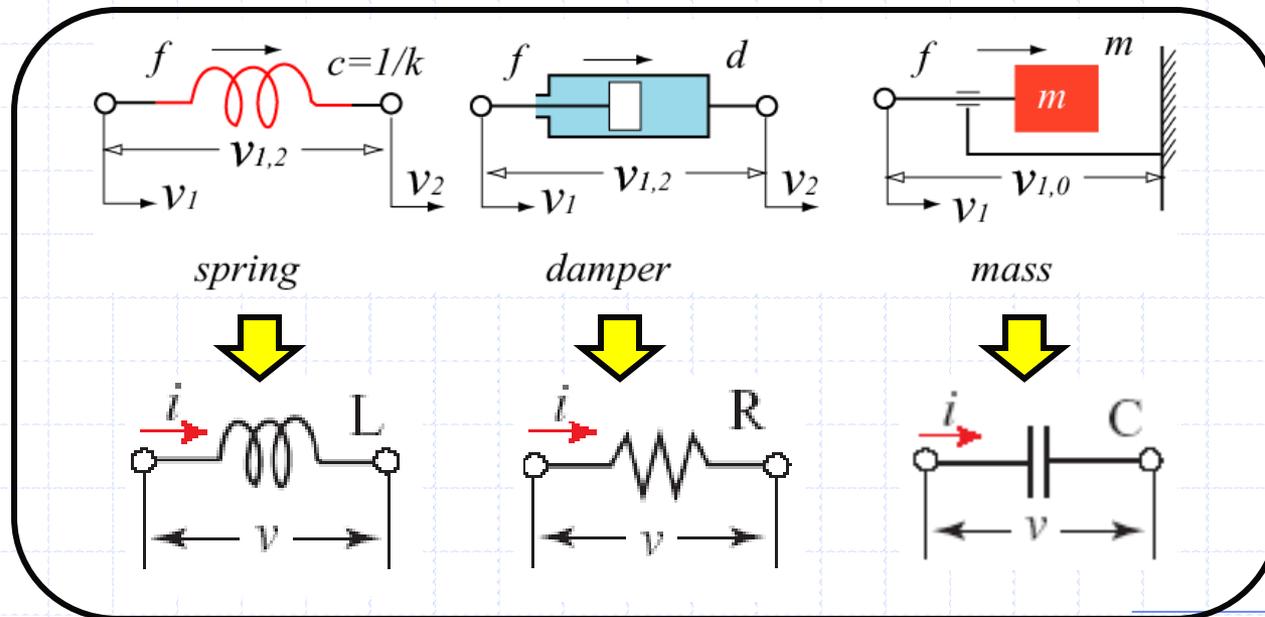


(a) Mechanics

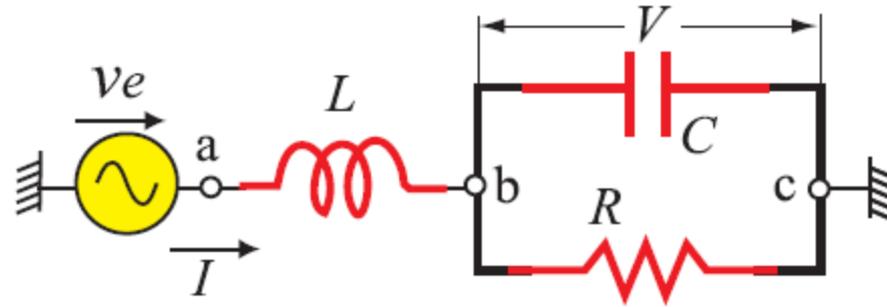


(c) Electronics

変換



電気回路解析



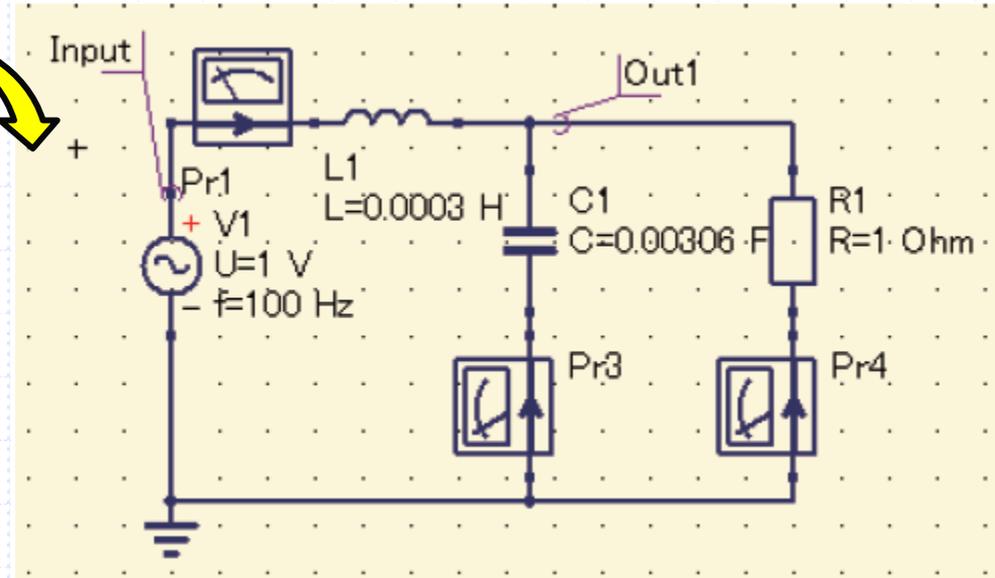
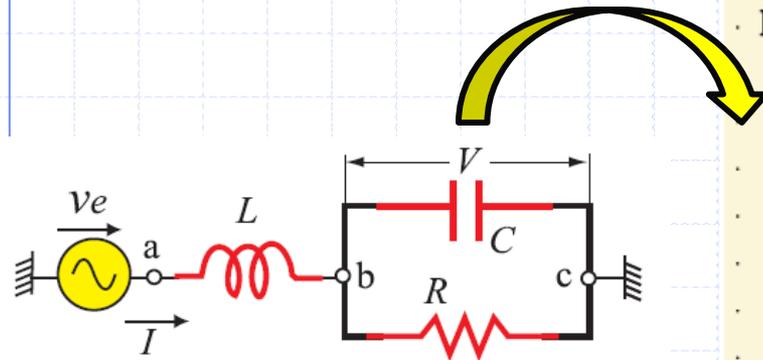
回路のインピーダンスは

$$Z = j\omega L + \frac{1}{j\omega C + 1/R} = \frac{R(1 - \omega^2 LC) + j\omega L}{1 + j\omega CR}$$

回路に流れる電流は

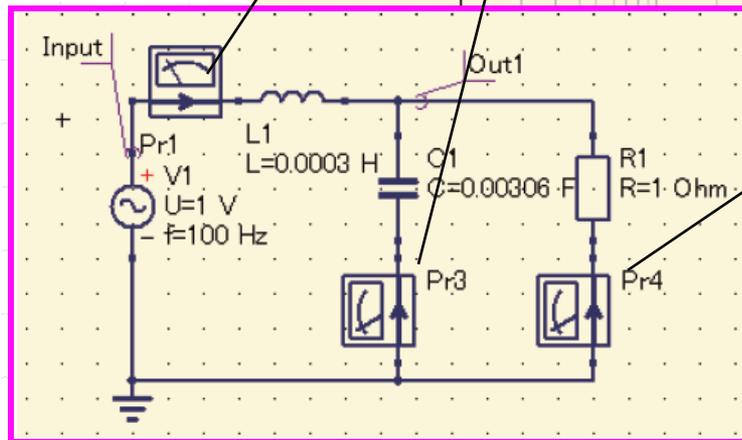
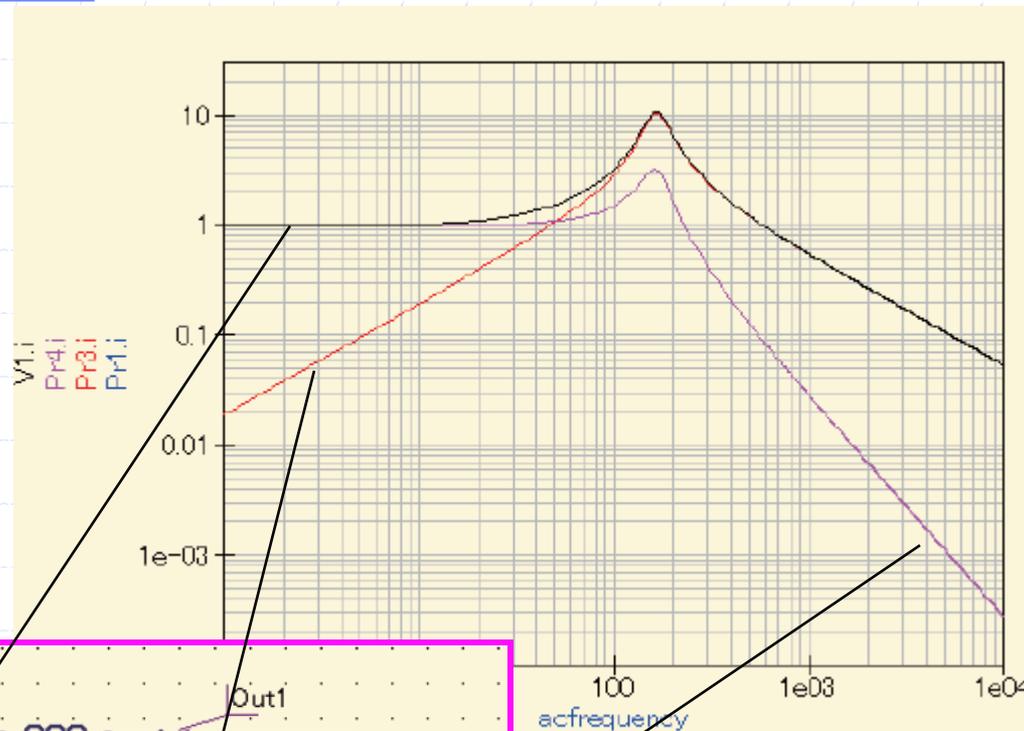
$$I = \frac{V_e}{Z} = \frac{1 + j\omega CR}{R(1 - \omega^2 LC) + j\omega L} V_e$$

電気回路シミュレータによる解析



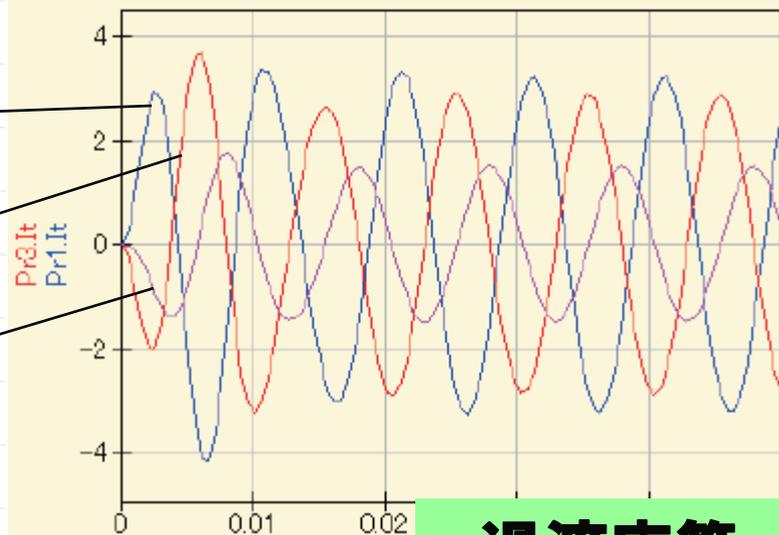
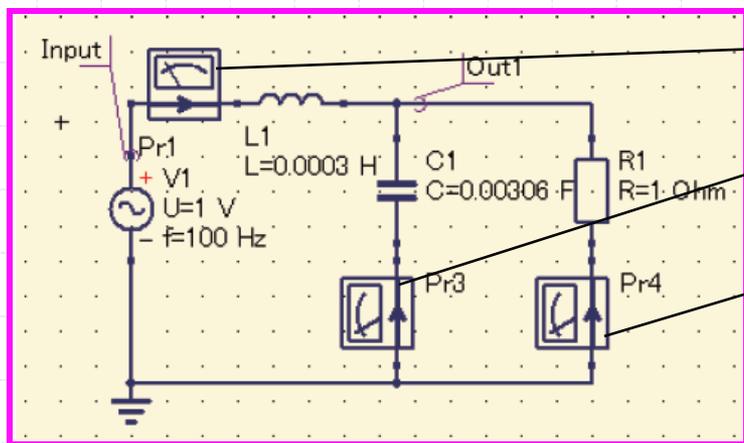
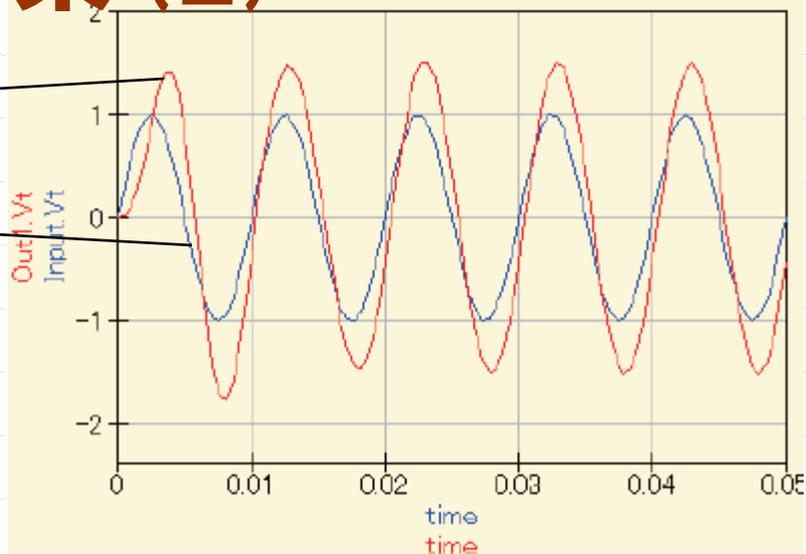
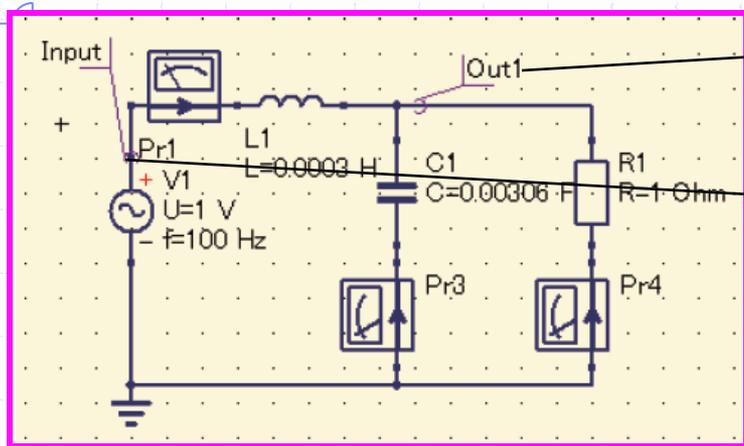
- 電気回路をシミュレータ上に作成
- 周波数応答(ACシミュレーション)
- 過渡応答(トランジェント解析)

シミュレーション結果(1)



周波数応答

シミュレーション結果(2)



過渡応答

Qucs project: Quite Universe x

← → ↻ 🏠 qucs.sourceforge.net/index.html ☆ 🔍

🔍 Yahoo! JAPAN 📄 ログイン画面/カブドッ... 🌐 Shimojo Laboratory ... 🌐 日本機械学会ロボティ... 📁 その他のブックマーク

Qucs project

[home - [news](#) - [screenshots](#) - [documentation](#) - [download](#) - [roadmap](#) - [developers](#) - [FAQ](#) - [contact](#)]

Latest release is: [0.0.16](#)

[LittleSurvey](#)
[MediaWiki](#)

Latest News

17 Mar 2011 Released Qucs 0.0.16 !

What's Qucs?

So far Qucs is not yet finished... but it is on the road.

Qucs is an integrated circuit simulator which means you are able to setup a circuit with a graphical user interface (GUI) and simulate the large-signal, small-signal and noise behaviour of the circuit. After that simulation has finished you can view the simulation results on a presentation page or window.

- Qucs, briefly for Quite Universal Circuit Simulator, is a circuit simulator with graphical user interface (GUI). The GUI is based on Qt® by Trolltech®. The software aims to support all kinds of circuit simulation types, e.g. DC, AC, S-parameter, Harmonic Balance analysis, noise analysis, etc.
- Qucsator, the simulation backend, is a command line circuit simulator. It takes a network list in a certain format as input and outputs a Qucs dataset. It has been programmed for usage in the Qucs project but may also be used by other applications.

So far we were working on the GUI and on some basic simulation features. In fact there is now a kind of useful user interface for setting up schematics and presenting simulation results in various types of diagrams. DC, AC, S-parameter, noise and transient analysis is possible, mathematical equations and use of a subcircuit hierarchy are available. Anyway, a lot of work has to be done and thus we are looking for people who want to support the project.

A few first versions can be downloaded in the [download](#) section. Please keep in mind that these versions are still incomplete and we hope that some of you will be able to compile and run the package by their own. Some [example](#) schematics have been setup to demonstrate the abilities of Qucs.

The Logo

Below the first draft of the Qucs logo done by Dotan Nahum (dotanx@gmail.com):



Operating System

Qucs is currently developed under the GNU/Linux OS using the standard autotools with no special effort to support other operating systems. Qucs is said to be successfully compiled and run on Solaris, NetBSD, FreeBSD, MacOS, Windows and Cygwin... help is needed !

📄 qucs-0.0.16-setup.exe 📄 qucs-0.0.16.tar.gz ↓ すべてのダウンロードを表示 ✕

🏠 スタート 🌐 qucs 📁 機械回路ppt 🖥️ Microsoft PowerP... 🌐 Qucs project: ... 🗂️ 全般 🗂️ CAPS KANA 🕒 11:46

Qucs project: download x +

qucs.sourceforge.net/download.html#download

Yahoo! JAPAN ログイン画面/カブドッ... Shimojo Laboratory ... 日本機械学会ロボティ... その他のブックマーク

Qucs – download

[[home](#) - [news](#) - [screenshots](#) - [documentation](#) - download - [roadmap](#) - [developers](#) - [FAQ](#) - [contact](#)]

[packages - [examples](#) - [related](#) - [press/education](#)]

Download

In this section you will find all the versions of Qucs which have been released so far. Also we provide links to the [FreeHDL](#) versions.

- Qucs version [0.0.1](#)
- Qucs version [0.0.2](#)
- Qucs version [0.0.3](#)
- Qucs version [0.0.4](#)
- Qucs version [0.0.5](#)
- Qucs version [0.0.6](#)
- Qucs version [0.0.7](#)
- Qucs version [0.0.8](#)
- Qucs version [0.0.9](#)
- Qucs version [0.0.10](#)
- Qucs version [0.0.11](#)
- Qucs version [0.0.12](#)
- Qucs version [0.0.13](#)
- Qucs version [0.0.14](#)
- Qucs version [0.0.15](#)
- Qucs version [0.0.16](#)
- FreeHDL [preliminary](#) version
- FreeHDL version [0.0.1](#)
- FreeHDL version [0.0.2](#)
- FreeHDL version [0.0.3](#)
- FreeHDL version [0.0.4](#)
- FreeHDL version [0.0.5](#)
- FreeHDL version [0.0.6](#)
- FreeHDL version [0.0.7](#)
- FreeHDL version [0.0.8](#)

SVN repository

If you are one of the impatient you can use latest [SVN](#). SVN can have the bugfixes and features you've always wanted, but also be much less stable than a release. Be aware of that.

Pulling from SVN:

```
$ svn co https://qucs.svn.sourceforge.net/svnroot/qucs/trunk/qucs
$ svn co https://qucs.svn.sourceforge.net/svnroot/qucs/trunk/qucs-core
$ svn co https://qucs.svn.sourceforge.net/svnroot/qucs/trunk/qucs-doc
$ svn co https://qucs.svn.sourceforge.net/svnroot/qucs/branches/qucs_0_1_0/qucs qucs-qt4
```

To build:

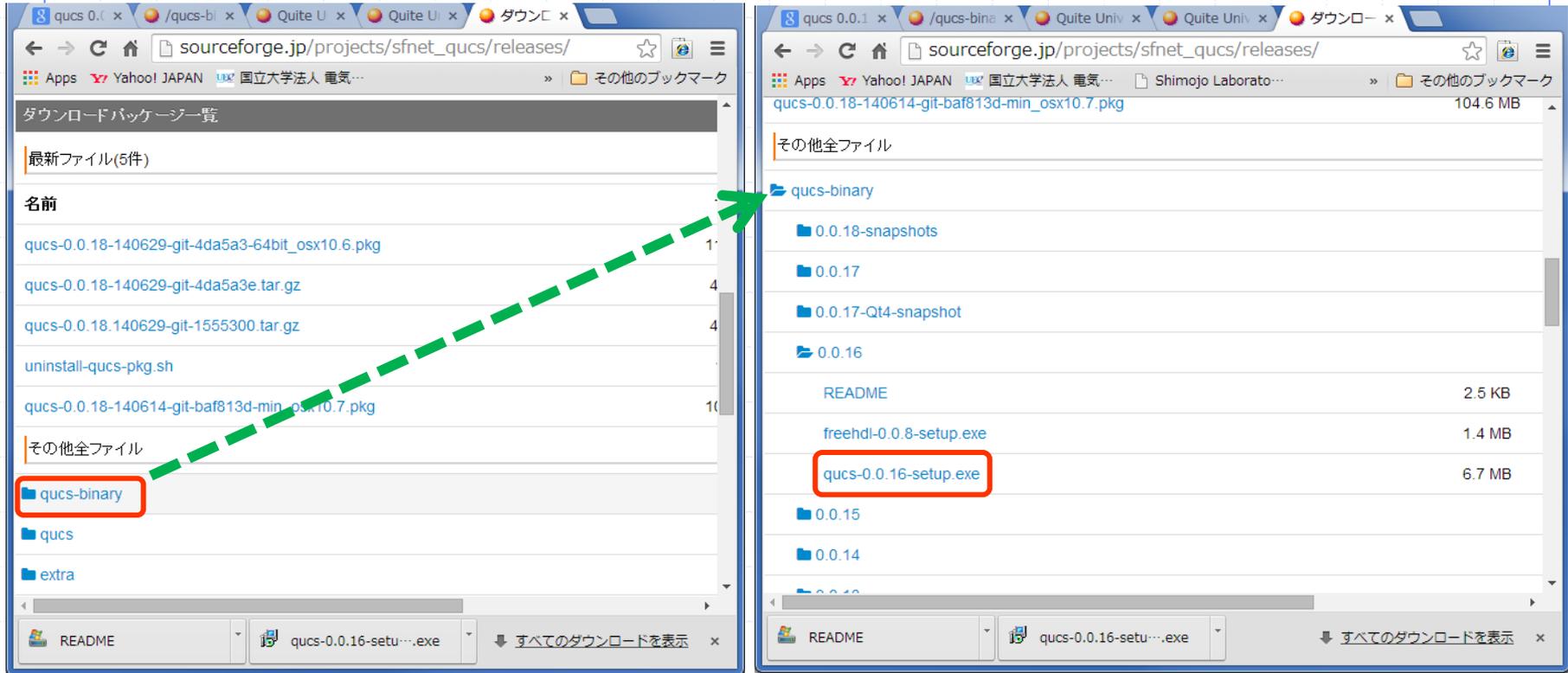
qucs-0.0.16-setup.exe qucs-0.0.16.tar.gz ↓ [すべてのダウンロードを表示](#)

スタート qucs 機械回路ppt Microsoft PowerP... Qucs project: d... 11:47



QUCSのDownload

http://sourceforge.jp/projects/sfnet_qucs/releases/>qcs-binary>0.0.16>qcs-0.0.16-setup.exe



0.0.16より新たらしいバージョンは不可