

## 機械系と電子回路の対比

TDU



株式会社 アンプレット  
代表取締役 工学博士

東京電機大学 工学部第二部  
電子工学科 非常勤講師

根日屋 英之

2007年7月9日

2014/4/15

Confidential

1

## 機械系と電気回路の対比

TDU

電子回路		機械系	
静電エネルギーを蓄える.	コンデンサ	位置エネルギーを蓄える.	弾性
磁気エネルギーを蓄える.	コイル	運動エネルギーを蓄える.	慣性
エネルギーを消費する.	抵抗	エネルギーを消費する.	機械抵抗 摩擦

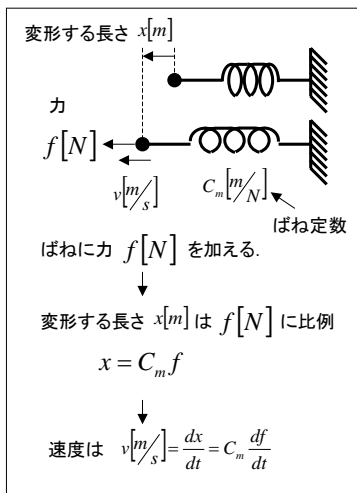
2014/4/15

Confidential

2

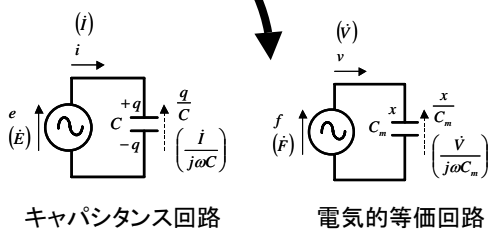
# 弾性

TDU



## 対応表

力 $f[N]$	---	電圧 $e[V]$
速度 $v[m/s]$	---	電流 $i[A]$
ばね定数 $C_m[m/N]$	---	キャパシタンス $C[F]$
変形する長さ $x[m]$	---	電荷 $q[C]$



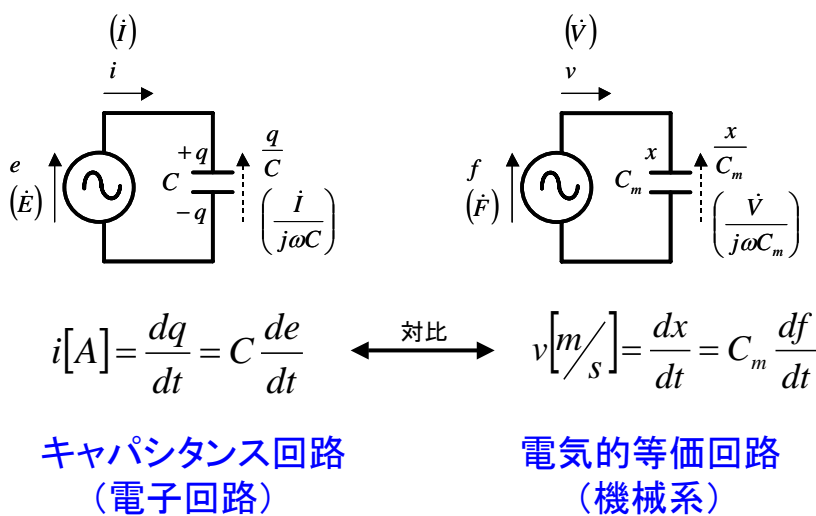
2014/4/15

Confidential

3

# 弾性

TDU

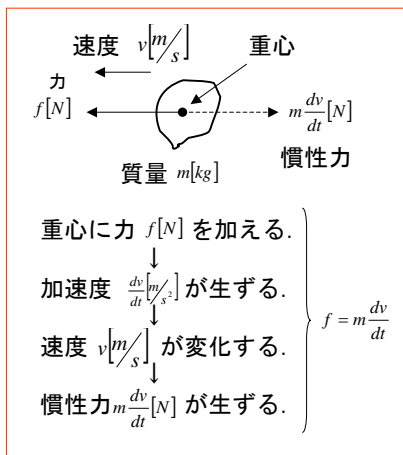


2014/4/15

Confidential

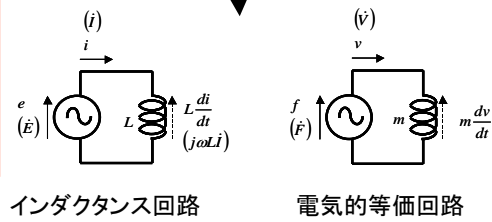
4

# 慣性

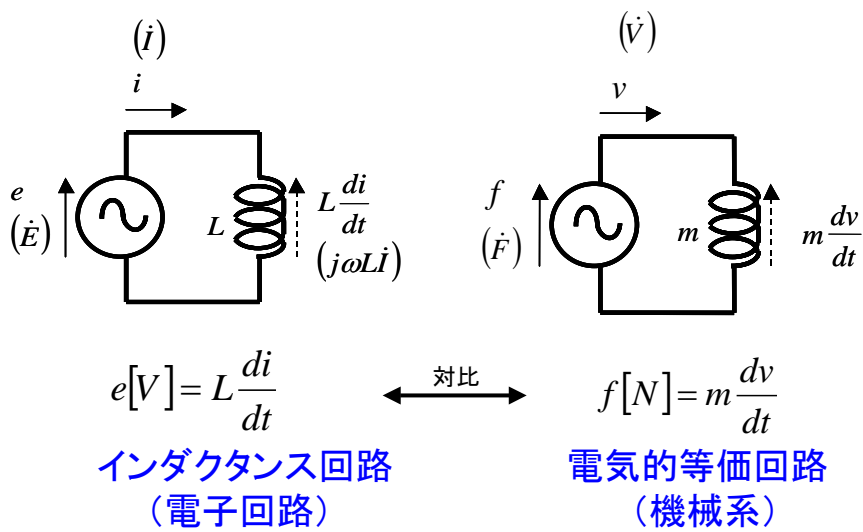


対応表

力 $f[N]$	--- 電圧 $e[V]$
速度 $v[m/s]$	--- 電流 $i[A]$
質量 $m[kg]$	--- インダクタンス $L[H]$

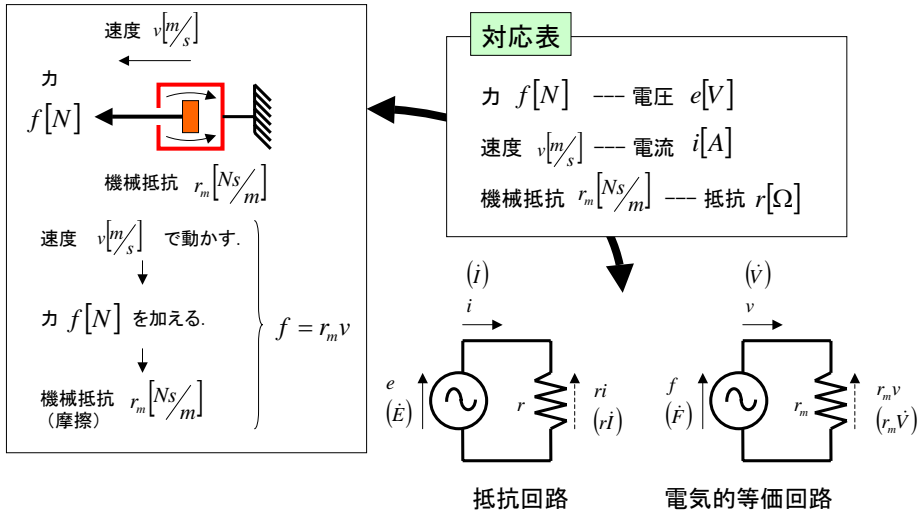


# 慣性



# 機械抵抗

TDU



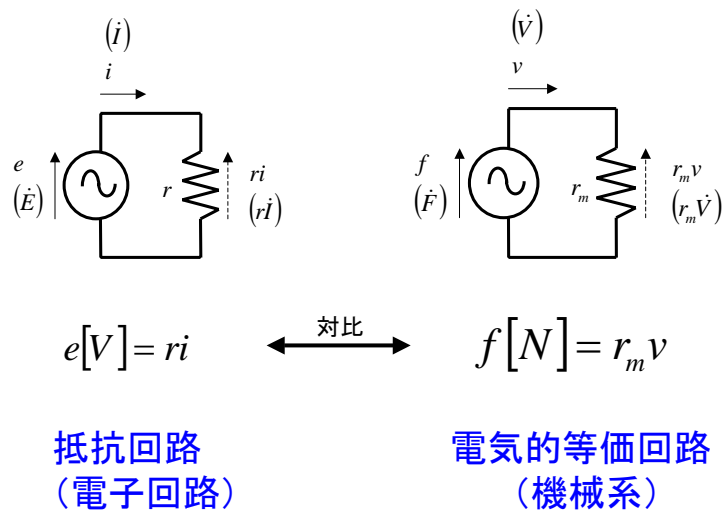
2014/4/15

Confidential

7

# 機械抵抗

TDU



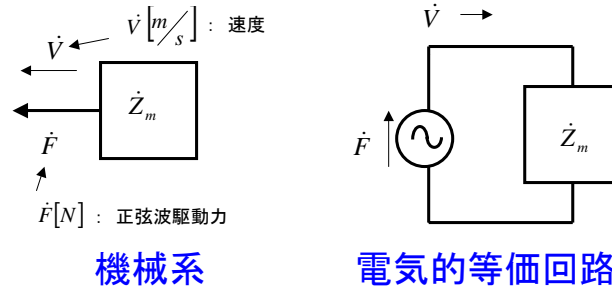
2014/4/15

Confidential

8

# 機械抵抗 Mechanical Resistance

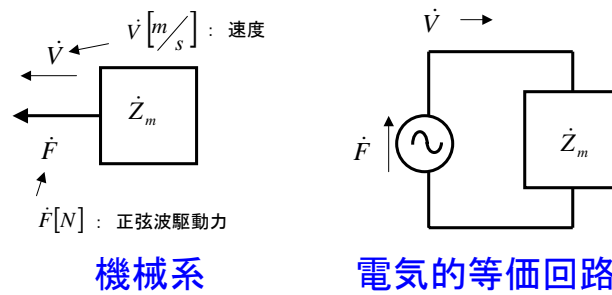
TDU



$$\text{機械抵抗} : \dot{Z}_m = \frac{\dot{F}}{\dot{v}} [Ns/m]$$

# (a) 機械インピーダンス Mechanical Impedance

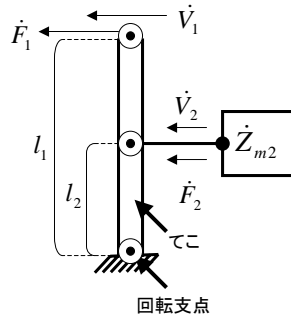
TDU



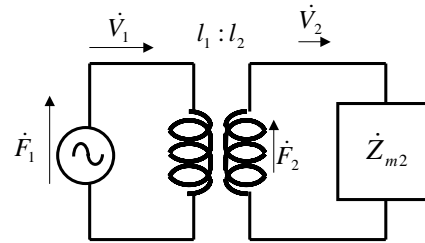
$$\text{機械抵抗} : \dot{Z}_m = \frac{\dot{F}}{\dot{v}} [Ns/m]$$

## (b) 機械変成器 (その1) Mechanical Transformer

TDU



機械系



電氣的等価回路

$$\text{機械インピーダンス} : \dot{Z}_{m1} = \frac{\dot{F}_1}{\dot{V}_1} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 \frac{\dot{F}_2}{\dot{V}_2} = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)^2 \dot{Z}_{m2}$$

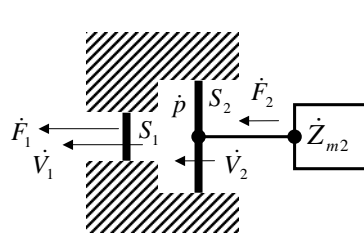
2014/4/15

Confidential

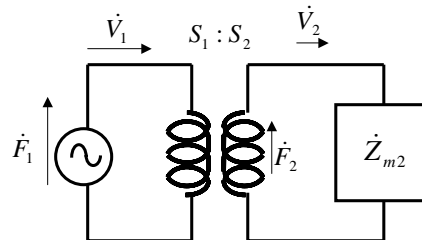
11

## (b) 機械変成器 (その2) Mechanical Transformer

TDU



機械系



電氣的等価回路

$$\text{機械インピーダンス} : \dot{Z}_{m1} = \frac{\dot{F}_1}{\dot{V}_1} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \frac{\dot{F}_2}{\dot{V}_2} = \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \dot{Z}_{m2}$$

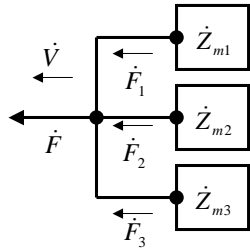
2014/4/15

Confidential

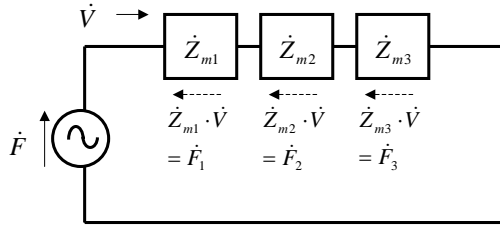
12

### (c) 機械インピーダンスの直列接続

TDU



機械系



電氣的等価回路

$$\text{機械インピーダンス : } \dot{Z}_m = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = \dot{Z}_{m1} + \dot{Z}_{m2} + \dot{Z}_{m3}$$

2014/4/15

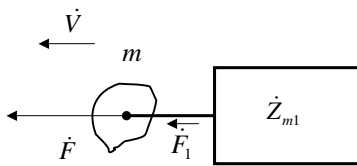
Confidential

13

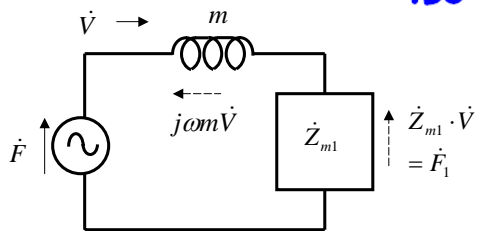
### (c) 機械インピーダンスの直列接続

質量が直列に入る場合

TDU



機械系



電氣的等価回路

速度  $\dot{V}$  で動かすのに必要な  
駆動力  $\dot{F}$  は、

$$\dot{F} = (j\omega m + Z_{m1}) \cdot \dot{V}$$

全機械インピーダンス  $\dot{Z}_m$  は

$$\dot{Z}_m = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = j\omega m + \dot{Z}_{m1}$$

2014/4/15

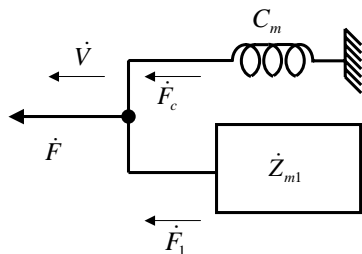
Confidential

14

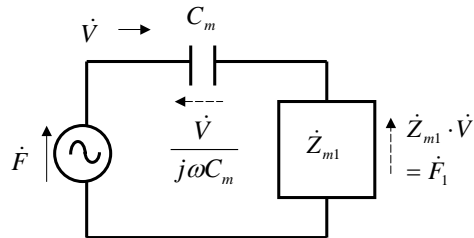
### (c) 機械インピーダンスの直列接続

ばねが並列に入る場合

TDU



機械系



電氣的等価回路

速度  $\dot{V}$  で動かすのに必要な  
駆動力  $\dot{F}$  は,

$$\dot{F} = \left( \frac{1}{j\omega C_m} + Z_{m1} \right) \cdot \dot{V}$$

全機械インピーダンス  $\dot{Z}_m$  は

$$\dot{Z}_m = \frac{1}{j\omega C_m} + \dot{Z}_{m1}$$

2014/4/15

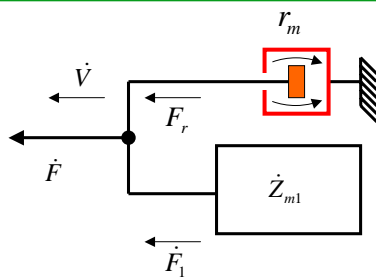
Confidential

15

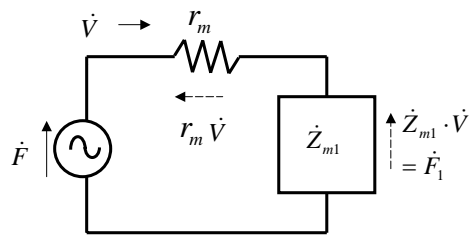
### (c) 機械インピーダンスの直列接続

機械抵抗が並列に入る場合

TDU



機械系



電氣的等価回路

速度  $\dot{V}$  で動かすのに必要な  
駆動力  $\dot{F}$  は,

$$\dot{F} = (r_m + Z_{m1}) \cdot \dot{V}$$

全機械インピーダンス  $\dot{Z}_m$  は

$$\dot{Z}_m = r_m + \dot{Z}_{m1}$$

2014/4/15

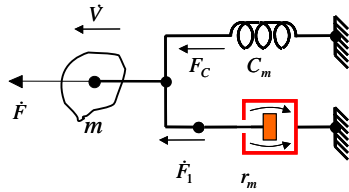
Confidential

16

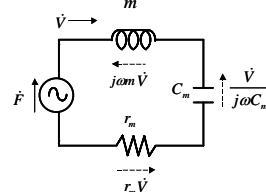


(c) 機械インピーダンスの直列接続  
 $m$ に直列に,  $C_m, r_m$  が並列回路が入る場合

TDU



機械系



電氣的等価回路

質量  $m$  の物体を速度  $\dot{V}$  で動かすには,  
 質量  $m$  の物体を加速する力  $j\omega m \dot{V}$   
 ばね定数  $C_m$  のばねを变形させる力  $\dot{V}/j\omega C_m$   
 機械抵抗  $m$  より強い力  $r_m \dot{V}$  → 電氣的等価回路は  $r_m, m, C_m$  の直列接続となる.

全機械インピーダンス  $\dot{Z}_m = r_m + j\left(\omega m - \frac{1}{\omega C_m}\right)$

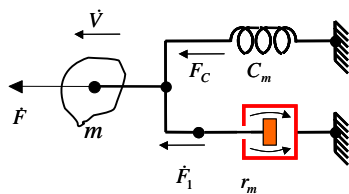
2014/4/15

Confidential

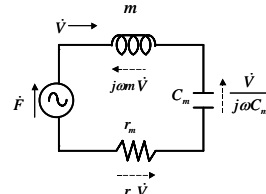
17

(c) 機械インピーダンスの直列接続  
 $m$ に直列に,  $C_m, r_m$  が並列回路が入る場合 (続き)

TDU



機械系



電氣的等価回路

質量  $m$  の物体を, 速度  $\dot{V}$  で動かす力  $\dot{F}$   $\dot{Z}_m = r_m + j\left(\omega m - \frac{1}{\omega C_m}\right)\dot{F}$

駆動点から見た全機械インピーダンスを  $\dot{Z}_m$  とすれば,

$\dot{Z}_m = r_m + j\left(\omega m - \frac{1}{\omega C_m}\right)$   $\omega = \frac{1}{\sqrt{mC_m}} =$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{駆動点のインピーダンスは高い.} \\ \text{動きにくい.} \\ \text{駆動点の振幅は小さい.} \\ \text{ばねの振幅は大きい.} \\ \text{質量は大きな振幅で動く.} \end{array} \right.$   
 0のとき反共振となる.

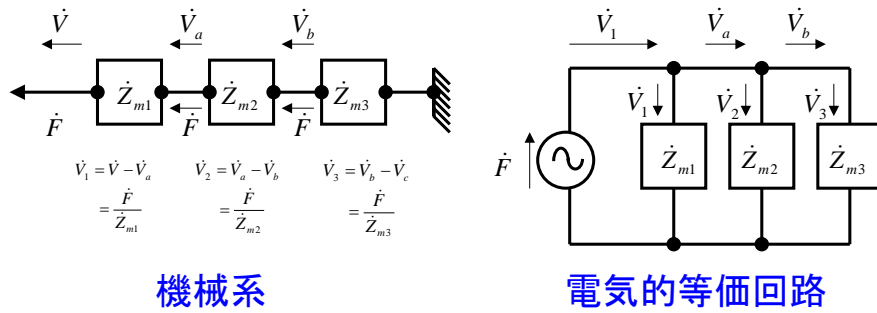
2014/4/15

Confidential

18

## (d) 機械インピーダンスの並列接続

TDU



$$\text{機械インピーダンス} : \frac{1}{\dot{Z}_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = \frac{1}{\dot{Z}_{m1}} + \frac{1}{\dot{Z}_{m2}} + \frac{1}{\dot{Z}_{m3}}$$

2014/4/15

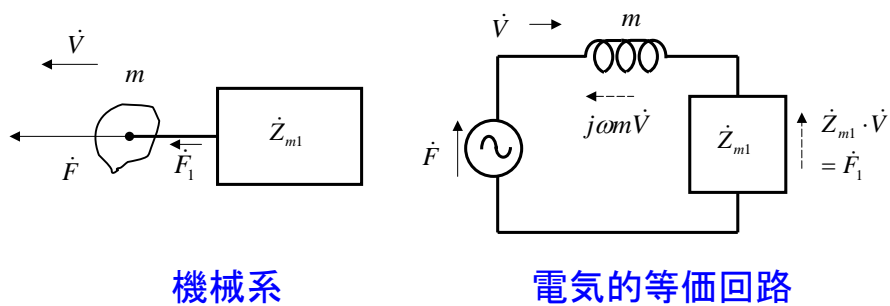
Confidential

19

## (d) 機械インピーダンスの並列接続

質量が直列に入る場合

TDU



$$\text{機械インピーダンス} : \dot{Z}_m = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = j\omega m + \dot{Z}_{m1}$$

2014/4/15

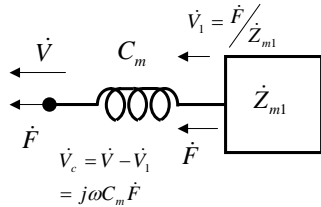
Confidential

20

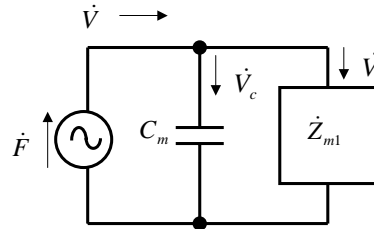
## (d) 機械インピーダンスの並列接続

ばねが直列に入る場合

TDU



機械系



電氣的等価回路

駆動点の速度  $\dot{V}$  は,

$$\dot{V} = \dot{V}_c + \dot{V}_1 = \left( j\omega C_m + \frac{1}{Z_{m1}} \right) \cdot \dot{F}$$

全機械インピーダンス  $\dot{Z}_m$  は

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = j\omega C_m + \frac{1}{Z_{m1}}$$

2014/4/15

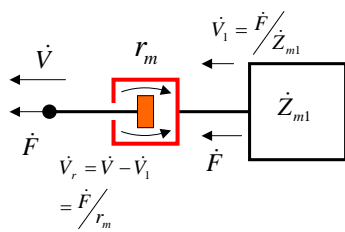
Confidential

21

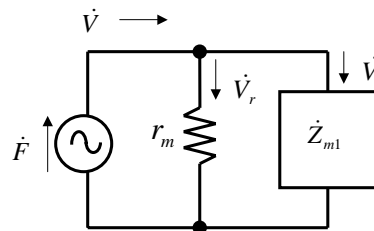
## (d) 機械インピーダンスの並列接続

機械抵抗が直列に入る場合

TDU



機械系



電氣的等価回路

駆動点の速度  $\dot{V}$  は,

$$\dot{V} = \dot{V}_r + \dot{V}_1 = \left( \frac{1}{r_m} + \frac{1}{Z_{m1}} \right) \cdot \dot{F}$$

全機械インピーダンス  $\dot{Z}_m$  は

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = \frac{1}{r_m} + \frac{1}{Z_{m1}}$$

2014/4/15

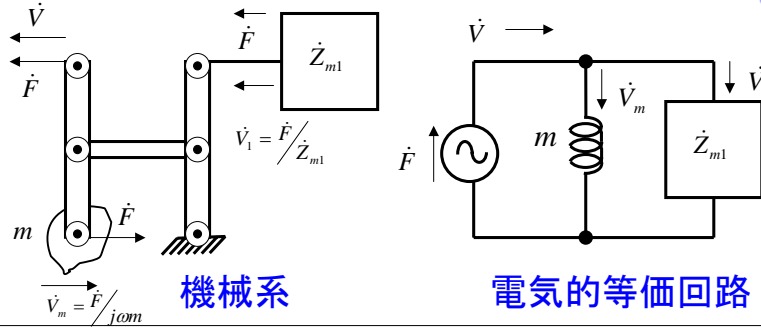
Confidential

22

## (d) 機械インピーダンスの並列接続

質量が並列に入る場合

TDU



駆動点の速度  $\dot{V}$  は,

$$\dot{V} = \dot{V}_m + \dot{V}_1 = \left( \frac{1}{j\omega m} + \frac{1}{Z_{m1}} \right) \dot{F}$$

全機械インピーダンス  $\dot{Z}_m$  は

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = \frac{1}{j\omega m} + \frac{1}{Z_{m1}}$$

2014/4/15

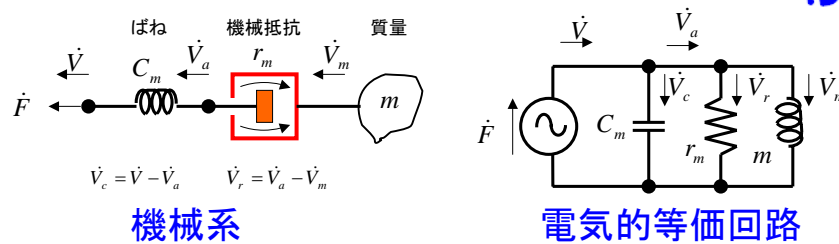
Confidential

23

## (e) 機械系の電氣的等価回路

カ-電流法による  $C_m, r_m', m$  の直列回路

TDU



駆動点の速度  $\dot{V} = \dot{V}_c + \dot{V}_r + \dot{V}_m = \left( j\omega C_m + \frac{1}{r_m} + \frac{1}{j\omega m} \right) \dot{F} = \left( \frac{1}{r_m} + j\omega C_m + \frac{1}{j\omega m} \right) \dot{F}$

駆動点から見た全機械インピーダンスを  $\dot{Z}_m$  とすれば,

$$\frac{1}{Z_m} = \frac{1}{r_m} + j \left( \omega C_m - \frac{1}{\omega m} \right)$$

||

0のとき反共振となる。

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{mC_m}} = \begin{cases} \text{駆動点のインピーダンスは高い。} \\ \text{動きにくい。} \\ \text{駆動点の振幅は小さい。} \\ \text{ばねの振幅は大きい。} \\ \text{質量は大きな振幅で動く。} \end{cases}$$

2014/4/15

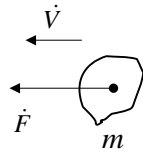
Confidential

24

## (e) 機械要素と電子回路要素の対応

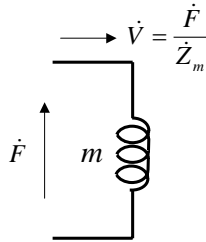
### 質量

TDU



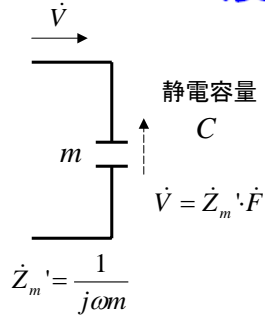
$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{j\omega m}$$

機械系



$$\dot{Z}_m = j\omega m$$

力-電圧法



$$\dot{Z}_m' = \frac{1}{j\omega m}$$

力-電流法

質量  $m$  に駆動力  $\dot{F}$  を加えたときの速度  $\dot{V}$  は、

$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{j\omega m}$$

ここで  $\dot{F}$  を電流  $\dot{I}$  に、 $\dot{V}$  を  $\dot{E}$  に対応させると、

$$\dot{E} = \frac{\dot{I}}{j\omega C}$$

2014/4/15

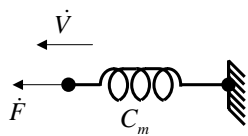
Confidential

25

## (e) 機械要素と電子回路要素の対応

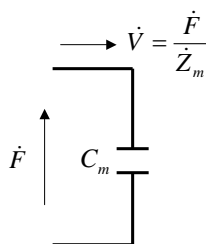
### ばね

TDU



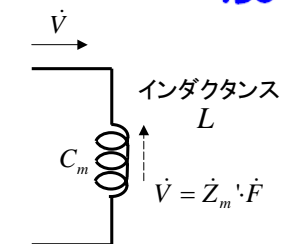
$$\dot{V} = j\omega C_m \dot{F}$$

機械系



$$\dot{Z}_m = \frac{1}{j\omega C_m}$$

力-電圧法



$$\dot{Z}_m' = j\omega C_m$$

力-電流法

ばね定数  $C_m$  のばねに駆動力  $\dot{F}$  を加えたときの速度  $\dot{V}$  は、

$$\dot{V} = j\omega C_m \dot{F}$$

ここで  $\dot{F}$  を電流  $\dot{I}$  に、 $\dot{V}$  を  $\dot{E}$  に対応させると、

$$\dot{E} = j\omega L \dot{I}$$

2014/4/15

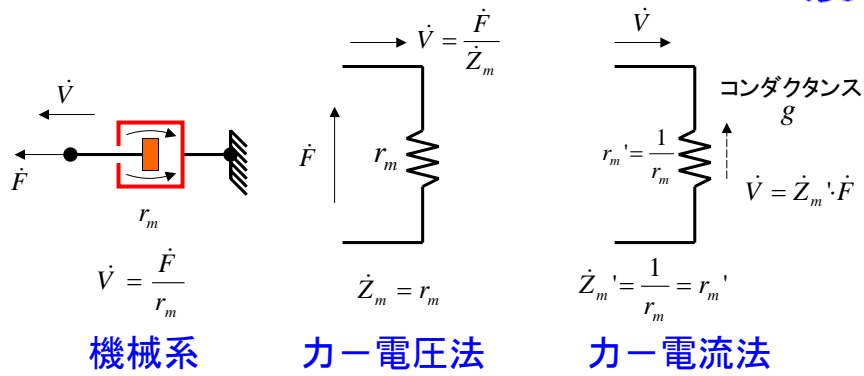
Confidential

26

## (e) 機械要素と電子回路要素の対応

### 機械抵抗

TDU



機械抵抗  $r_m$  の抵抗に駆動力  $\dot{F}$  を加えたときの速度  $\dot{V}$  は、

$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{r_m}$$

ここで  $\dot{F}$  を電流  $\dot{I}$  に、  
 $\dot{V}$  を  $\dot{E}$  に対応させると、  
 $\dot{E} = r\dot{I} = \frac{\dot{I}}{1/r} = \frac{\dot{I}}{g}$

2014/4/15

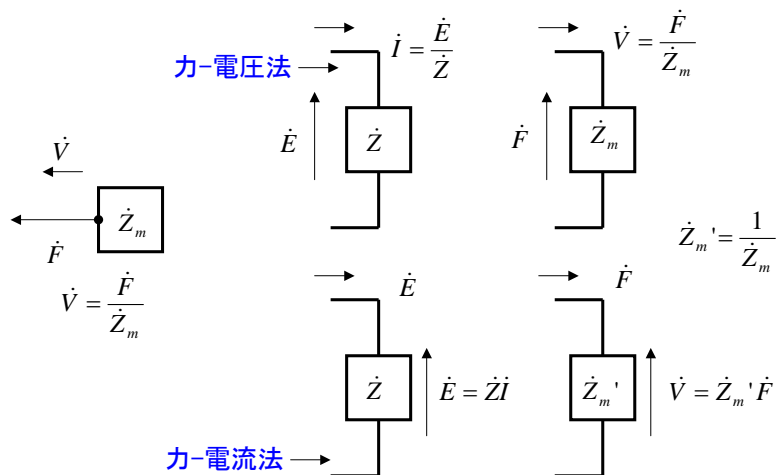
Confidential

27

## (e) 機械系の電氣的等価回路

### 力-電圧法と力-電流法の等価回路の比較

TDU



2014/4/15

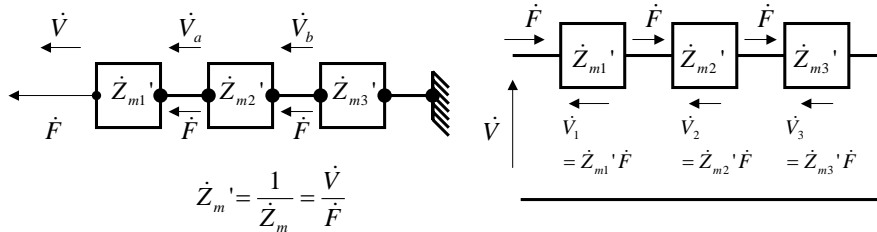
Confidential

28

## (e) 機械系の電氣的等価回路

カ-電流法による機械インピーダンスの直列回路

TDU



$$\dot{Z}_m' = \frac{1}{\dot{Z}_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}}$$

機械系

電氣的等価回路

$$\text{力点の速度} : \dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 = \dot{Z}_{m1}' \cdot \dot{F} + \dot{Z}_{m2}' \cdot \dot{F} + \dot{Z}_{m3}' \cdot \dot{F}$$

$$\text{機械インピーダンス} : \dot{Z}_m' = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = \dot{Z}_{m1}' + \dot{Z}_{m2}' + \dot{Z}_{m3}'$$

2014/4/15

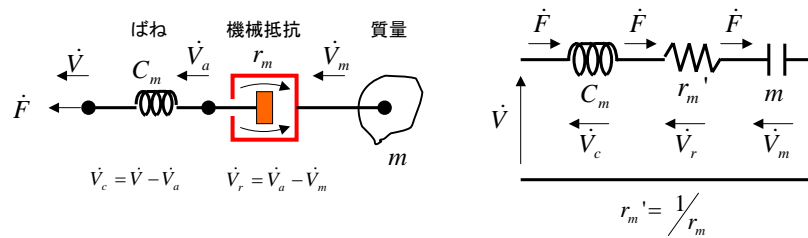
Confidential

29

## (e) 機械系の電氣的等価回路

カ-電流法による  $C_m$ ,  $r_m'$ ,  $m$  の直列回路

TDU



$$\dot{V}_c = \dot{V} - \dot{V}_a$$

$$\dot{V}_r = \dot{V}_a - \dot{V}_m$$

$$r_m' = 1/r_m$$

機械系

電氣的等価回路

$$\text{駆動点の速度} : \dot{V} = \dot{V}_c + \dot{V}_r + \dot{V}_m = \left( j\omega C_m + \frac{1}{r_m} + \frac{1}{j\omega m} \right) \cdot \dot{F}$$

駆動点から見た全機械インピーダンスを  $\dot{Z}_m'$  とすれば,

$$\dot{Z}_m' = \frac{1}{\dot{Z}_m} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = \frac{1}{r_m} + j \left( \omega C_m - \frac{1}{\omega m} \right)$$

2014/4/15

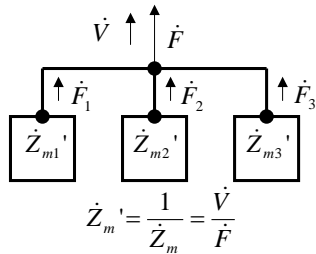
Confidential

30

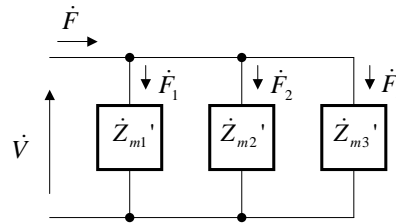
## (e) 機械系の電氣的等価回路

カ-電流法による機械インピーダンスの並列回路

TDU



機械系



電氣的等価回路

$$\text{全駆動力} : \dot{F} = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 + \dot{F}_3 = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_{m1}'} + \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_{m2}'} + \frac{\dot{V}}{\dot{Z}_{m3}'}$$

$$\text{機械インピーダンス} : \frac{1}{\dot{Z}_m'} = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = \frac{1}{\dot{Z}_{m1}'} + \frac{1}{\dot{Z}_{m2}'} + \frac{1}{\dot{Z}_{m3}'}$$

2014/4/15

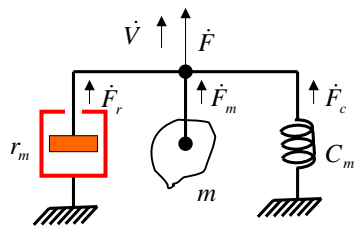
Confidential

31

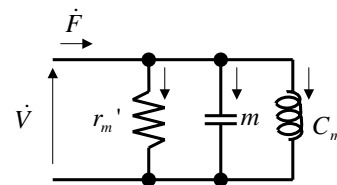
## (e) 機械系の電氣的等価回路

カ-電流法による  $C_m$ ,  $r_m'$ ,  $m$  の並列回路

TDU



機械系



電氣的等価回路

$$\text{駆動力} : \dot{F} = \dot{F}_c + \dot{F}_r + \dot{F}_m = \left( \frac{1}{j\omega C_m} + r_m + j\omega m \right) \cdot \dot{V}$$

力点から見たカ-電流法による合成機械インピーダンスを  $\dot{Z}_m'$  とすれば,

$$\frac{1}{\dot{Z}_m'} = \frac{\dot{F}}{\dot{V}} = r_m + j \left( \omega m - \frac{1}{\omega C_m} \right)$$

2014/4/15

Confidential

32