

## 非線形 LC 回路

徳大 工電子 川上 博

## 1. はじめに

この報告では非線形 LC 回路が Hamiltonian 系となることを示したい。すなわち有限個のインダクタおよびキャパシタからなる任意の回路においては, Kirchhoff の法則による状態変数の拘束の一部が (i) キャパシタ電圧  $v_r$  間 (あるいはインダクタ電流  $i_\lambda$  間) の scleronomous constraints:  $f(v_r) = 0$  (あるいは  $f(i_\lambda) = 0$ ) とし、また (ii) キャパシタに蓄えられる電荷  $q_r$  (あるいはインダクタと鎖交する磁束  $\phi_\lambda$ ) の保存則, すなわち運動の第一積分:  $f(q_r) = 0$  (あるいは  $f(\phi_\lambda) = 0$ ) とみなされる結果, 回路のダイナミクスはキャパシタに蓄えられる電荷  $q_r \in \mathbb{R}^r$  とインダクタの鎖交磁束  $\phi_\lambda \in \mathbb{R}^\lambda$  のつくる状態空間  $\mathbb{R}^r \times \mathbb{R}^\lambda$  内において, 上体の (i) で定まる多様体上の更に (ii) で定まる積分多様体内で Hamiltonian 系として記述されることとなる。

結果は具体的な coordinates を使用して示した。以下二の

節では記号の説明, Kirchhoff の法則を記述する際の座標系  
のとり方などについてよく知られた結果を述べる。記法は R.A.  
Rohrer [1] の 14 章にしたがった。

回路は連結しているものとし, 素子の総数 (枝の数) を  $b$ ,  
グラフとして見たときの節点の数を  $n$  とする。

キャパシタの総数:  $\gamma$

$$b = \gamma + \lambda$$

インダクタの総数:  $\lambda$

枝電流  $i \in \mathbb{R}^b$  } これらは適当に分割表現にて表すことができる:  
枝電圧  $v \in \mathbb{R}^b$  }  $i = \begin{bmatrix} i_r \\ i_\lambda \end{bmatrix}$ ,  $v = \begin{bmatrix} v_c \\ v_s \end{bmatrix}$ ,  $v_c = \begin{bmatrix} v_{c1} \\ v_{c2} \end{bmatrix}$  など。

### (1.1) Kirchhoff の法則

$$Q i = 0$$

$$B v = 0$$

適当な tree の選択と枝の番号付けを行うと, その tree から  
決まる座標系で

$$Q = [I : F], \quad B = [-F' : I]$$

の形に表現できる, ここで  $'$  は転置を表わす。以下では  
次の性質を持つ tree を使用する。これはキャパシタ (あるいは  
インダクタ) のみからなる loop および cutset を数えあげること  
がある。

(i)  $C$ -normal tree:

キャパシタ素子をできるだけ多く tree branches に含む tree のこと。

(ii) L-normal tree:

インダクタ素子をできるだけ多く tree branches に含む tree のこと。

今 1 つの C-normal tree を選んで固定したとする。このとき次の性質を持つ L-normal tree が存在する:

(性質) C-normal tree における tree inductors および link capacitors をそれぞれ L-normal tree の tree inductors および link capacitors に含む。

よって C-normal tree, L-normal tree での性質を持つ pair を 1 組選んで, キャパシタ, インダクタを次表のように分割して考える。表中たとえば  $n_{C1}$  は C-normal tree の座標系では tree に含まれ, L-normal tree による座標系では link に含まれるキャパシタの個数を表わす。これらの個数はもちろん具体的な tree の選択にはよらない。

| C-normal tree | tree branches |               | cotree links |              |
|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| capacitors    | $n_{C1}$      | $n_{C2}$      | $n_{L1}$     | $n_S$        |
| inductors     |               | $n_I$         |              | $n_{L2}$     |
| L-normal tree | cotree links  | tree branches |              | cotree links |

これらの trees を用いた Kirchhoff の法則の表現は

(i) C-normal tree を用いて  $Q_C \dot{c} = 0$ ,  $B_C v = 0$ :

$$\text{tree capacitors } (C_1): \quad i_{C1} + F_{C1S} i_S + F_{C1L2} i_{L2} + F_{C1L1} i_{L1} = 0$$

$$(C_2): \quad i_{C2} + F_{C2S} i_S + F_{C2L2} i_{L2} + F_{C2L1} i_{L1} = 0$$

$$\text{tree inductors } (\Gamma): \quad i_{\Gamma} + F_{\Gamma L2} i_{L2} + F_{\Gamma L1} i_{L1} = 0$$

$$\text{link capacitors } (S): \quad v_S - F'_{C1S} v_{C1} - F'_{C2S} v_{C2} = 0$$

$$\text{link inductors } (L_2): \quad v_{L2} - F'_{C1L2} v_{C1} - F'_{C2L2} v_{C2} - F'_{\Gamma L2} v_{\Gamma} = 0$$

$$(L_1): \quad v_{L1} - F'_{C1L1} v_{C1} - F'_{C2L1} v_{C2} - F'_{\Gamma L1} v_{\Gamma} = 0$$

(ii) L-normal tree を用いて  $Q_L \dot{c} = 0$ ,  $B_L v = 0$ :

$$\text{tree inductors } (L_1): \quad i_{L1} + N_{L1L2} i_{L2} + N_{L1S} i_S + N_{L1C1} i_{C1} = 0$$

$$(\Gamma): \quad i_{\Gamma} + N_{\Gamma L2} i_{L2} + N_{\Gamma S} i_S + N_{\Gamma C1} i_{C1} = 0$$

$$\text{tree capacitors } (C_2): \quad i_{C2} + N_{C2S} i_S + N_{C2C1} i_{C1} = 0$$

$$\text{link inductors } (L_2): \quad v_{L2} - N'_{L1L2} v_{L1} - N'_{\Gamma L2} v_{\Gamma} = 0$$

$$\text{link capacitors } (S): \quad v_S - N'_{L1S} v_{L1} - N'_{\Gamma S} v_{\Gamma} - N'_{C2S} v_{C2} = 0$$

$$(C_1): \quad v_{C1} - N'_{L1C1} v_{L1} - N'_{\Gamma C1} v_{\Gamma} - N'_{C2C1} v_{C2} = 0$$

なお 行列  $Q, B$  については tree の選び方によらず次の直交性  
が成り立つことに注意する:

$$Q_C B_L' = 0, \quad B_C Q_L' = 0$$

これより

$$I - F_{C1L1} N_{L1C1} = 0$$

$$F_{C1L2} - F_{C1L1} N_{L1L2} = 0$$

$$F'_{C2L1} + F'_{C1L1} N'_{C2C1} = 0$$

$$N'_{\Gamma L2} - F'_{\Gamma L2} + N'_{L1L2} F'_{\Gamma L1} = 0$$

$$N_{C2S} - F_{C2S} - N_{C2C1} F_{C1S} = 0$$

などの関係式を得る。

以上の結果をまとめて C-normal tree に基づく Kirchhoff の法則として次の表現を得る:

circuit dynamics:

tree capacitors ( $C_1$ ):  $i_{C1} + F_{C1S} i_S + F_{C1L1} (i_{L1} + N_{L1L2} i_{L2}) = 0$

link inductors ( $L_1$ ):  $v_{L1} - F'_{\Gamma L1} v_{\Gamma} - F'_{C1L1} (v_{C1} - N'_{C2C1} v_{C2}) = 0$

first integrals:

tree capacitors ( $C_2$ ):  $i_{C2} + F_{C2S} i_S + N_{C2C1} (i_{C1} + F_{C1S} i_S) = 0$

link inductors ( $L_2$ ):  $v_{L2} - F'_{\Gamma L2} v_{\Gamma} - N'_{L1L2} (v_{L1} - F'_{\Gamma L1} v_{\Gamma}) = 0$

holonomic scleronomic constraints

tree inductors ( $\Gamma$ ):  $i_{\Gamma} + F_{\Gamma L2} i_{L2} + F_{\Gamma L1} i_{L1} = 0$

link capacitors ( $S$ ):  $v_S - F'_{C1S} v_{C1} - F'_{C2S} v_{C2} = 0$

## 2. 非線形 LC 回路の回路方程式

### (2.1) キャパシタ特性

キャパシタの枝電圧を  $v_c = (v_{c1}, v_{c2}, v_s) \in \mathbb{R}^{n_c} = \mathbb{R}^{n_{c1}} \times \mathbb{R}^{n_{c2}} \times \mathbb{R}^{n_s}$ , 蓄積される電荷を  $q_c = (q_{c1}, q_{c2}, q_s) \in \mathbb{R}^{n_c} = \mathbb{R}^{n_{c1}} \times \mathbb{R}^{n_{c2}} \times \mathbb{R}^{n_s}$  としたとき, キャパシタ特性  $\Lambda_Q$  は  $(v_c, q_c) \in \mathbb{R}^{n_c} \times \mathbb{R}^{n_c}$  空間のなめらかな  $n_c$  次元多様体である。通常キャパシタ特性  $\Lambda_Q$  は  $v_c, q_c$  のどちらを用いても global に径数表現できるものと仮定される。したがって diffeomorphisms

$$\begin{aligned} \hat{v}_c : \mathbb{R}^{n_c} &\longrightarrow \mathbb{R}^{n_c} \\ q_c &\longmapsto v_c = \hat{v}_c(q_c) \end{aligned}$$

あるいは

$$\begin{aligned} \hat{q}_c : \mathbb{R}^{n_c} &\longrightarrow \mathbb{R}^{n_c} \\ v_c &\longmapsto q_c = \hat{q}_c(v_c) \end{aligned}$$

のどちらかでキャパシタ特性をあらわすことにする。前者の表現を電荷制御型, 後者のそれを電圧制御型キャパシタと呼ぶ。特に  $\hat{q}_c$  (あるいは  $\hat{v}_c$ ) の Jacobi 行列  $\frac{\partial \hat{q}_c}{\partial v_c}$  (あるいは  $\frac{\partial \hat{v}_c}{\partial q_c}$ ) が各点で対称正値行列となるのが物理的に自然なキャパシタの特性である。

キャパシタを流れる電流  $i_c \in \mathbb{R}^{n_c}$  は蓄積電荷  $q_c$  の時間的変化:

$$i_c = \frac{dq_c}{dt} = \dot{q}_c$$

で定義される。これは  $\Lambda_Q$  の動作点での接ベクトルと考えられる。

## (2.2) インダクタ特性

キャパシタと同様なやり方で定義される。インダクタを流れる電流を  $i_L = (i_{L1}, i_{L2}, i_L) \in \mathbb{R}^{n_L} = \mathbb{R}^{n_{L1}} \times \mathbb{R}^{n_{L2}} \times \mathbb{R}^{n_L}$ , 鎖交磁束を  $\phi_L = (\phi_{L1}, \phi_{L2}, \phi_L) \in \mathbb{R}^{n_L} = \mathbb{R}^{n_{L1}} \times \mathbb{R}^{n_{L2}} \times \mathbb{R}^{n_L}$  とすると, インダクタ特性  $\Lambda_L$  は  $(i_L, \phi_L) \in \mathbb{R}^{n_L} \times \mathbb{R}^{n_L}$  空間の  $n_L$  次元多様体である。キャパシタ同様 diffeomorphisms

$$\begin{aligned} \hat{i}_L : \mathbb{R}^{n_L} &\longrightarrow \mathbb{R}^{n_L} \\ \phi_L &\longmapsto i_L = \hat{i}_L(\phi_L) \end{aligned}$$

あるいは

$$\begin{aligned} \hat{\phi}_L : \mathbb{R}^{n_L} &\longrightarrow \mathbb{R}^{n_L} \\ i_L &\longmapsto \phi_L = \hat{\phi}_L(i_L) \end{aligned}$$

のいおれかで特性を表わすことにする。通常のインダクタでは  $\hat{\phi}_L$  (あるいは  $\hat{i}_L$ ) の Jacobi 行列は対称正値となる。

インダクタ電圧  $v_L \in \mathbb{R}^{n_L}$  は鎖交磁束  $\phi_L$  の時間微分:

$$v_L = \frac{d\phi_L}{dt} = \dot{\phi}_L$$

として定義される。

(2.3) この報告ではキャパシタ特性, インダクタ特性として次の様な簡単な場合を考える。

(i) キャパシタ特性は電荷制御型である:

$$U_{C1} = \hat{U}_{C1}(q_{C1}), U_{C2} = \hat{U}_{C2}(q_{C2}), U_S = \hat{U}_S(q_S)$$

$$\text{また } \hat{U}_{C1}: \mathbb{R}^{m_{C1}} \rightarrow \mathbb{R}^{m_{C1}}, \hat{U}_{C2}: \mathbb{R}^{m_{C2}} \rightarrow \mathbb{R}^{m_{C2}}, \hat{U}_S: \mathbb{R}^{m_S} \rightarrow \mathbb{R}^{m_S}$$

の各 Jacobi 行列は各点で対称正値とする。

(ii) インダクタは磁束制御型である:

$$i_{L1} = \hat{i}_{L1}(\phi_{L1}), i_{L2} = \hat{i}_{L2}(\phi_{L2}), i_r = \hat{i}_r(\phi_r)$$

$$\text{また } \hat{i}_{L1}: \mathbb{R}^{m_{L1}} \rightarrow \mathbb{R}^{m_{L1}}, \hat{i}_{L2}: \mathbb{R}^{m_{L2}} \rightarrow \mathbb{R}^{m_{L2}}, \hat{i}_r: \mathbb{R}^{m_r} \rightarrow \mathbb{R}^{m_r}$$

の各 Jacobi 行列は各点で対称正値とする。

(注1) キャパシタ, インダクタの特性を上のように使用する tree に依存する特性と考えるのは自然でないが, ここでは考え方を述べる意味でこのようにした。もっと一般的な特性も同様に扱いが可能である。

(注2) 特性の Jacobi 行列が対称正値行列となる仮定はキャパシタ, インダクタに蓄えられるエネルギー関数がうまく定義できる条件となる。すなわち次の (2.5) で定義するエネルギー関数が積分路のとり方によらず端点の関数として定まる条件である。

(2.4) 次の状態変数を定義しておく:

$$q_1 \triangleq q_{C1} + F_{C1S} q_S$$

$$q_2 \triangleq q_{C2} + F_{C2S} q_S$$

$$\phi_1 \triangleq \phi_{L1} - F'_{rL1} \phi_r$$

$$\phi_2 \triangleq \phi_{L2} - F'_{rL2} \phi_r$$



$$q_0 \triangleq q_2 + N_{C2C1} q_1$$

$$\phi_0 \triangleq \phi_2 - N_{L1L2}' \phi_1$$

これらの変数を用いて Kirchhoff の法則は次のように書きあらためられる。

circuit dynamics:

$$\text{tree capacitors } (C_1): \quad \dot{q}_1 = -F_{C1L1}(i_{L1} + N_{L1L2} i_{L2})$$

$$\text{link inductors } (L_1): \quad \dot{\phi}_1 = F_{C1L1}'(v_{C1} - N_{C2C1}' v_{C2})$$

first integrals:

$$\text{tree capacitors } (C_2): \quad \dot{q}_0 = \dot{q}_2 + N_{C2C1} \dot{q}_1 = 0$$

$$\text{link inductors } (L_2): \quad \dot{\phi}_0 = \dot{\phi}_2 - N_{L1L2}' \dot{\phi}_1 = 0$$

holonomic scleronomic constraints:

$$\text{tree inductors } (\Gamma): \quad \hat{i}_\Gamma(\phi_\Gamma) + F_{\Gamma L2} \hat{i}_{L2}(\phi_{L2}) + F_{\Gamma L1} \hat{i}_{L1}(\phi_{L1}) = 0$$

$$\text{link capacitors } (S): \quad \hat{v}_S(q_S) - F_{C1S}' \hat{v}_{C1}(q_{C1}) - F_{C2S}' \hat{v}_{C2}(q_{C2}) = 0$$

## (2.5) Hamiltonian の計算

キルポシタに蓄えられるエネルギー  $W_E(q_c)$  は次のように計算される。

$$W_E: \mathbb{R}^\gamma \rightarrow \mathbb{R}$$

$$q_c \mapsto W_E(q_c)$$

$$\begin{aligned} W_E(q_c) &= \int_{0}^{q_c} \langle v_c, dq_c \rangle = \int \langle v_{c1}, dq_{c1} \rangle + \langle v_{c2}, dq_{c2} \rangle + \langle v_s, dq_s \rangle \\ &= \int \langle v_{c1}, dq_1 \rangle + \langle v_{c2}, dq_2 \rangle + \langle v_s - F_{C1S}' v_{c1} - F_{C2S}' v_{c2}, dq_s \rangle \end{aligned}$$

$$= \int^{q_1} \langle (\dot{q}_1 - N'_{c2c1} \dot{q}_2), dq_1 \rangle$$

同様に インダクタに蓄えられるエネルギー  $W_M: \mathbb{R}^\lambda \rightarrow \mathbb{R}$  は

$$\begin{aligned} W_M(\phi_L) &= \int^{\phi_L} \langle \dot{\phi}_L, d\phi_L \rangle = \int \langle \dot{\phi}_{L1}, d\phi_{L1} \rangle + \langle \dot{\phi}_{L2}, d\phi_{L2} \rangle + \langle \dot{\phi}_r, d\phi_r \rangle \\ &= \int \langle \dot{\phi}_{L1}, d\phi_1 \rangle + \langle \dot{\phi}_{L2}, d\phi_2 \rangle + \langle \dot{\phi}_r + F_{rL2} \dot{\phi}_{L2} + F_{rL1} \dot{\phi}_{L1}, d\phi_r \rangle \\ &= \int \langle (\dot{\phi}_{L1} + N_{L1L2} \dot{\phi}_{L2}), d\phi_1 \rangle \end{aligned}$$

したがって回路の全エネルギー  $H: \mathbb{R}^{\gamma} \times \mathbb{R}^{\lambda} \rightarrow \mathbb{R}$  を  
次式で定義しこれをこの回路の Hamiltonian と呼ぶことにする。

$$\begin{aligned} H(q_c, \phi_L) &\triangleq W_E(q_c) + W_M(\phi_L) = H(q_1, \phi_1) \\ &= \int^{(q_1, \phi_1)} \langle (\dot{q}_1 - N'_{c2c1} \dot{q}_2), dq_1 \rangle + \langle (\dot{\phi}_{L1} + N_{L1L2} \dot{\phi}_{L2}), d\phi_1 \rangle \end{aligned}$$

このことから

$$\dot{q}_1 - N'_{c2c1} \dot{q}_2 = H_{q_1}$$

$$\dot{\phi}_{L1} + N_{L1L2} \dot{\phi}_{L2} = H_{\phi_1}$$

ただし  $H_{q_1} \triangleq D_1 H(q_1, \phi_1) = \frac{\partial H}{\partial q_1}$  を表わす。

$$H_{\phi_1} \triangleq D_2 H(q_1, \phi_1) = \frac{\partial H}{\partial \phi_1}$$

## (2.6) 回路方程式

また(2.4)のKirchhoffの法則において tree capacitors ( $C_1$ ) の個数  $n_{C1}$  と link inductors ( $L_1$ ) の個数  $n_{L1}$  が等しいことに注意する:  $n_{C1} = n_{L1}$

なぜなら Kirchhoffの法則を記述するための tree の定め方から明らかのように tree capacitors ( $C_1$ ) に属するキャパシタのみで cut set はつくらない; すなわち  $\text{rank } F_{C1L1} \geq n_{C1} \Rightarrow n_{L1} \geq n_{C1}$ . 同様に link inductors ( $L_1$ ) に属するインダクタのみで loop をつくることはない; すなわち  $\text{rank } F'_{C1L1} \geq n_{L1} \Rightarrow n_{C1} \geq n_{L1}$ . したがって  $n_{C1} = n_{L1}$ .

(2.4), (2.5) より 回路方程式は

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{\phi}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -F_{C1L1} \\ F'_{C1L1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{q_1} \\ H_{\phi_1} \end{bmatrix}$$

ただし行列  $F_{C1L1}$  は  $n \times n$  ( $n = n_{C1} = n_{L1}$ ) の正則行列である。

(注)  $Q, B$  の直交性より  $F_{C1L1} N_{L1C1} = I$ ,  $F_{C1L1}$  は正則だから  $F_{C1L1}^{-1} = N_{L1C1}$ . 今  $\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ F_{C1L1}^{-1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ \phi_1 \end{bmatrix}$  なる変数変換を施すと上で求めた回路方程式は正準形となる:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_u \\ H_v \end{bmatrix}$$

## (2.7) Mixed potential による回路方程式の表現

キャパシタ, インダクタの特性がそれぞれ電圧制御型, 電流制御型の場合には次のように Mixed potential 関数が定義でき回路方程式を得る。

$$\mathbb{R}^Y \times \mathbb{R}^I \text{ 上の 1-form } \mathcal{L} = \langle i_Y, dV_Y \rangle - \langle V_I, di_I \rangle$$

$$(V_C, i_L)$$

を考える。計算すると

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= \langle i_Y, dV_Y \rangle - \langle V_I, di_I \rangle \\ &= \langle (i_{C1} + F_{CS} i_S), dV_{C1} \rangle + \langle (i_{C2} + F_{C2S} i_S), dV_{C2} \rangle \\ &\quad - \langle (V_{L1} - F'_{L1} V_I), di_{L1} \rangle - \langle (V_{L2} - F'_{L2} V_I), di_{L2} \rangle \\ &= -d[\langle F_{C1L1}(i_{L1} + N_{L1L2} i_{L2}), (V_{C1} - N'_{C2C1} V_{C2}) \rangle] \end{aligned}$$

よって混合ポテンシャル関数

$$P: \mathbb{R}^Y \times \mathbb{R}^I \longrightarrow \mathbb{R}$$

$$(V_C, i_L) \longmapsto P(V_C, i_L)$$

$$P(V_C, i_L) = \int \mathcal{L} = -\langle F_{C1L1}(i_{L1} + N_{L1L2} i_{L2}), (V_{C1} - N'_{C2C1} V_{C2}) \rangle$$

が定義できる。他方

$$i_C + F_{CS} i_S = \frac{d}{dt} [\hat{q}_C(V_C) + F_{CS} \hat{q}_S(V_S)] = C(V_C) \frac{dV_C}{dt}$$

$$V_L - F'_{L1} V_I = \frac{d}{dt} [\hat{\phi}_L(i_L) - F'_{L1} \hat{\phi}_I(i_I)] = L(i_L) \frac{di_L}{dt}$$

$$\text{FET} \quad C(V_C) \triangleq \frac{\partial \hat{q}_C}{\partial V_C} + F_{CS} \frac{\partial \hat{q}_S}{\partial V_S} F'_{CS}$$

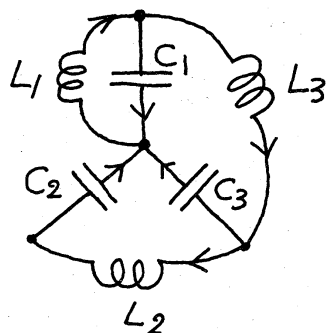
$$L(i_L) \triangleq \frac{\partial \hat{\phi}_L}{\partial i_L} + F'_{L1} \frac{\partial \hat{\phi}_I}{\partial i_I} F'_{L1}.$$

これらの関係式と混合ポテンシャル関数を用いて，回路方程式は(2.4)より

$$\begin{bmatrix} C(u_c) & 0 \\ 0 & -L(i_L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_c \\ \dot{i}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{u_c} \\ P_{i_L} \end{bmatrix}$$

となる。ここでは回路のオ1積分を特に取り出さずに表現した。したがって上の回路方程式の階数は  $n_c + n_L = (m_{c1} + m_{c2}) + (m_{L1} + m_{L2})$  である。

### (2.8) 簡単な例



左図のような簡単な例を考えよう。この場合は拘束条件もオ1積分もなく回路方程式はKirchhoffの法則と素子特性からただちに求められる。

C-normal tree による Kirchhoff の法則は

$$i_{C1} - i_{L1} + i_{L3} = 0$$

$$u_{L1} + u_{C1} = 0$$

$$i_{C2} - i_{L2} = 0$$

$$u_{L2} + u_{C2} - u_{C3} = 0$$

$$i_{C3} + i_{L2} - i_{L3} = 0$$

$$u_{L3} - u_{C1} + u_{C3} = 0$$

したがって  $F_{C/L} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$  . また N-normal tree より

$$N_{L/C} = F_{C/L}^{-1} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} .$$

保守特性:  $\dot{U}_C = g_1(q_C, q_C, q_C), \dot{U}_C = g_2(q_C, q_C, q_C), \dot{U}_C = g_3(q_C, q_C, q_C)$

インダクタ特性:  $i_{L1} = f_1(\phi_L, \phi_L, \phi_L), i_{L2} = f_2(\phi_L, \phi_L, \phi_L), i_{L3} = f_3(\phi_L, \phi_L, \phi_L)$

と仮定する ( $g_i, f_i \ i=1,2,3$  の Jacobi 行列は対称正値とす) と

系のエネルギー関数  $H(q_C, \phi_L)$  は

$$\begin{aligned} H(q_C, \phi_L) &= \int_0^{q_C, \phi_L} \langle \dot{U}_C, dq_C \rangle + \langle i_L, d\phi_L \rangle \\ &= \int_0^{q_C} \sum_{i=1}^3 g_i dq_{Ci} + \int_0^{\phi_L} \sum_{i=1}^3 f_i d\phi_{Li} \end{aligned}$$

この積分は上の仮定 (Jacobi 行列の対称性) により積分路に依存しない。

回路方程式といて

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} q_{C1} \\ q_{C2} \\ q_{C3} \\ \phi_{L1} \\ \phi_{L2} \\ \phi_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & 1 & 0 & -1 \\ & 0 & & 0 & 1 & 0 \\ & & & 0 & -1 & 1 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ -1 & 0 & 0 & & & \\ 0 & -1 & 1 & & 0 & \\ 1 & 0 & -1 & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{q_{C1}} \\ H_{q_{C2}} \\ H_{q_{C3}} \\ H_{\phi_{L1}} \\ H_{\phi_{L2}} \\ H_{\phi_{L3}} \end{bmatrix}$$

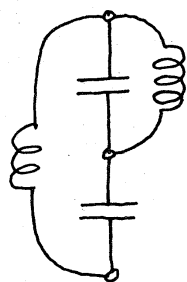
を得る。変数変換  $u = \phi_L, v = N_L C_1 q_C$  により正準形を得る。

次の頁にいくつかの LC 回路の例をあげた。

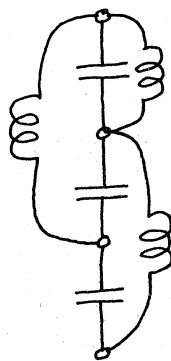
(2) ~ (4) は上の例と同様な回路である。

(5) は 1 個のオミット積分:  $L_1, L_2, L_3$  からなる loop の電圧規則が存在する例

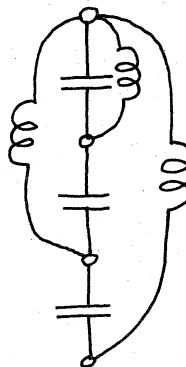
(6) は (5) 同様  $(n-1)$  個のインダクタの loop があり 回路方程式は  $2n$  階となる例である。



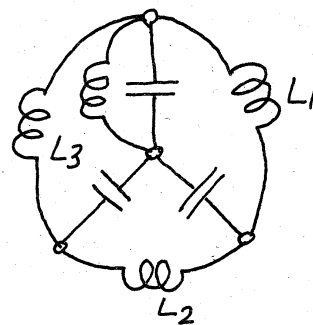
(2)



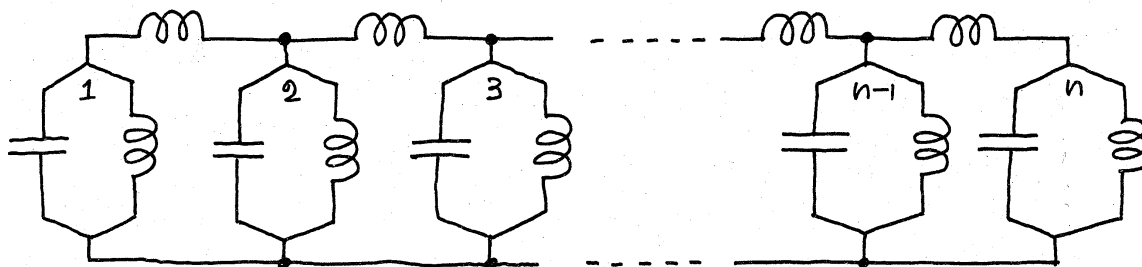
(3)



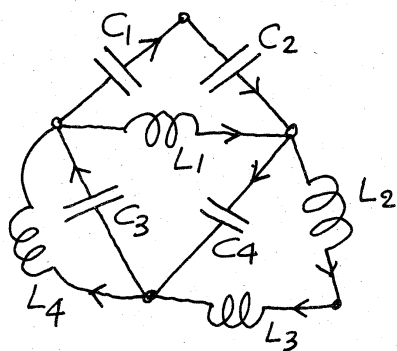
(4)



(5)



(6)



(7)

(7) の例では

$$\text{カイ積令: } \dot{q}_{C1} - \dot{q}_{C2} = 0$$

$$\sum_{i=1}^4 \dot{\phi}_{Li} = 0$$

holonomic constraints:

$$\dot{L}_2 - \dot{L}_3 = 0$$

$$\sum_{i=1}^4 v_{Ci} = 0$$

1=より 回路方程式は4階となる。

### 3. おすい

非線形 LC 回路の回路方程式を Kirchhoff の法則から直接導出し、それが Hamiltonian 系となることを示した。LC 回路に抵抗素子を加えていわゆる発振器回路を構成し、抵抗素子の項が回路方程式の定式化にどう影響するかを検討することは興味ある問題と思われる。

### 文献

- [1] R. A. Rohrer: 回路理論 学南社
- [2] C-normal tree, L-normal tree についてはたとえば  
渡部 和: 線形回路理論 第1章 昭晃堂 参照。