

光ネットワーク回路で起こる同期現象の解析

Analysis of the synchronization phenomena to be caused by the network circuits
with optical signals

同志社大学大学院 生命医科学研究科 河野 良介

同志社大学 生命医科学部 松島 正知

Ryosuke KONO, Graduate School of Life and Medical Sciences, Doshisha University

Masatomo MATSUSHIMA, Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University

概要

演算増幅器を用いた方形波発振器に、受光素子であるフォトトランジスタと発光素子であるLEDを付加させた電気回路（電子ホタル）がある。この電気回路は、フォトトランジスタの挿入方法により2種類の電子ホタルを作成することが出来る。この2つの電子ホタルを光信号によって結合させることで、2つのLED発光が同相同期や逆相同期する現象がみられる（ここでは、LEDにおける点滅が同じタイミングで点滅することを同相同期、交互に点滅することを逆相同期という）。さらに、3つの電子ホタルを光によって結合させることで様々な複雑な同期現象が起こることが報告されている。しかし、これらの解析は進んでいないのが現状である。今回、本研究における新たな発見として、3つの電子ホタルを結合した場合において、LEDが1つ点灯し、残りの2つが消灯し、またその状態を交互に繰り返す（1:2同期）の状態からLEDが時計回り、反時計回りと点滅していく三相同期へ移り変わる現象を発見した。このように同期の状態は継続されるのではなく、同期の状態が移り変わっていくことから、この現象には多重安定性があると考えた。私たちは、この現象を人の脳における情報伝達回路に類似していると考えている。そこで、これらの回路を私たちは電子ホタルを改め「光ネットワーク回路」と呼んでいる。光ネットワーク回路を制御していくにあたり、多重安定性を解析することが重要となるが、実際の回路実験では多重安定性を解析していくのは困難である。そこで、モデリング・シミュレーションソフトであるMapleSimを用いることで現象のシミュレーションを行い、解析を進めている。本論文では、MapleSimを用いた光ネットワークで起こる同期現象の解析を報告する。

1. はじめに

ホタル、振り子、神経細胞の集団発火、サーカディアンリズム（概日リズム）など振動子が相互作用、外部刺激的作用によって、振動のタイミングをそろえる現象を同期現象という。この同期現象の周期のメカニズムを理解するためにホタルを模擬的に再現した電子ホタルを用いた研究 [1] が行われている。[1]では、電子ホタルの光の送受信による2回路結合系と3

回路結合系の回路実験とシミュレーションが報告されている。また、3回路結合系には複雑な同期現象が生じ、詳細な解析が課題であると記されている。

本論文では、モデリング・シミュレーションソフトである MapleSim を用いて、詳細な解析を行い、その報告を行う。

著者たちは、この電子ホタルによる回路は、人の脳における情報伝達回路に類似していると捉え、その方向への研究発展を考えてる。そこで、本論文中では、「電子ホタル回路」ではなく、敢えて「光ネットワーク回路」と呼ぶことにする。

2. 光ネットワーク回路

光ネットワーク回路の実物写真を図1で示す。光ネットワーク回路の2回路結合系は、2つの同期パターンがある。二つのLEDが交互に点滅する逆相同期と同時に点滅する同相同期である。その様子を図2に示す。

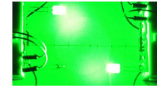
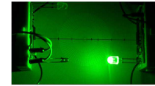
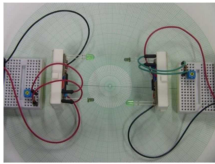


図 1: 光ネットワーク回路（実物：2回路結合系）

図 2: 2回路結合系の同期パターン（左：逆相同期，右：同相同期）

光ネットワーク回路が図2のように同期現象を起こす理由について、1回路の仕組みから説明する。光ネットワークの1回路は、方形波発振器に受光素子（入力）であるフォトトランジスタと発光素子（出力）である発光ダイオードを組み込んだものである。その回路図を図3に示す。光ネットワーク1回路は、フォトトランジスタのつなぎ方により、2つの Type が作れる。

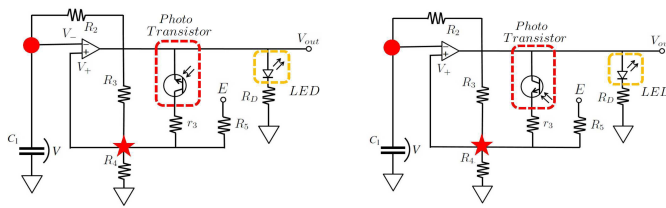


図 3: 2つの光ネットワーク1回路（左：Type-A，右：Type-B）

ここで、図3における回路方程式を考える。丸点では、

$$V_{out} = R_2 C_1 \frac{dV}{dt} + V, \quad (1)$$

星点では、

$$\frac{V_{out} - V_+}{R_3} + \frac{-V_+}{R_4} + \frac{E}{R_5} = 0 \quad (2)$$

と方程式を立てることができる。この連立方程式は、

$$\begin{cases} V_{out} = AV_d \\ V_d = pV_{out} + qE - V \end{cases} \quad (3)$$

と整理できる。このとき、

$$V_d = V_+ - V_-, \quad p = \frac{\frac{1}{R_3}}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}}, \quad q = \frac{\frac{1}{R_5}}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}} \quad (4)$$

である。(3)式より、 V_d と V_{out} 、 V_d と V の回路特性が判る。その特性を図4に示す。

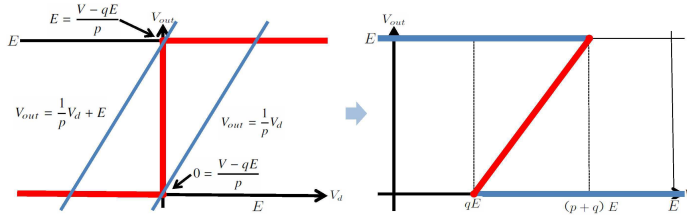


図4: 回路特性 (左: V_d と V_{out} , 右: V_d と V)

ここで、図4の右図の斜線のような電圧変化は実際に起こることはなく、図5のように電圧 V が起こす充放電の電圧が異なる現象が見られる。これは、ヒステリシス特性を示し、この特性により方形波発振器は、図6の出力特性を示す。

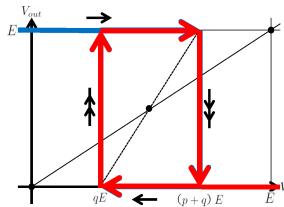


図5: ヒステリシス特性

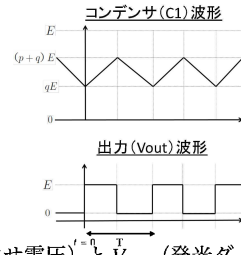


図6: V (コンデンサ電圧)と V_{out} (発光ダイオード出力)の回路特性

この出力特性は、Type-A・Type-Bとも同じである。しかし、フォトトランジスタによる入力特性が異なっている。Type-Aでは、 $V_{out} = 0$ かつ光入力がある時に、フォトトランジスタがONになる。このとき、コンデンサの放電閾値が減少し、同期が開始される。したがって、Type-A・Type-Aでの2回路結合系は逆相同期が起こる。また、Type-Bでは、 $V_{out} = E$ かつ光入力がある時に、フォトトランジスタはONになる。このとき、コンデンサの充電閾値が増加し、同期が開始される。したがって、Type-B・Type-Bでの2回路結合系は同相同期が起こる。

3. MapleSim によるシミュレーション

MapleSimは、電気や機械、熱などの複合分野のモデリング・シミュレーションが可能である。また、MATLAB/Simulinkとの連携もでき、最大の特徴として、作成したモデルから、微分方程式の抽出を自動的に行うことができる。これにより、現象を特徴的な微分方程式で記述することが可能となる。

光ネットワーク回路をMapleSimでモデル化するにあたり、光による結合をどうモデル化するかが問題となる。それは、光による結合では様々な要因（指向性等）を考慮しなければならないからである。著者たちは、光による結合をデジタル信号による結合に置き換えて、モデル化することを考案した。このシミュレーションにより、同期現象が起こっていることを示す。

MapleSimでのType-A・Type-Aの結合モデルを図7に示す。また、出力波形とコンデンサ波形のシミュレーション結果を図8と図9に示す。

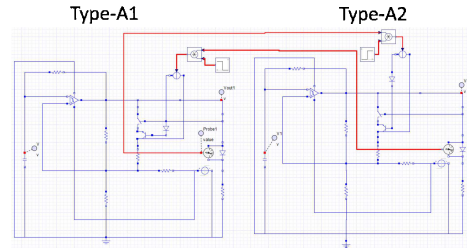


図 7: MapleSim での TypeA・TypeA の結合モデル

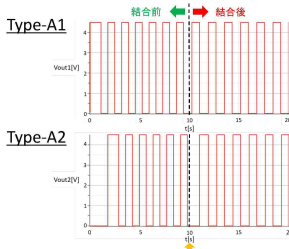


図 8: 出力波形 ($t = 10[s]$ において結合開始)

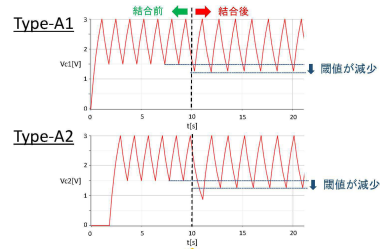


図 9: コンデンサ波形 ($t = 10[s]$ において結合開始)

図8より、逆相同期が起こり、図9より、放電閾値が減少しているのが判る。図10では、2つの回路の相図を示した。相図からも逆相同期が起こってる様子が判る。

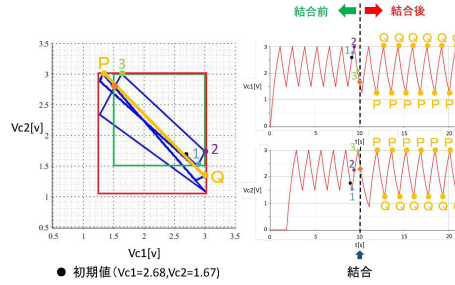


図 10: Type-A · Type-A 結合における相図

次に Type-B · Type-B も同様に結合モデルを MapleSim で作成し、シミュレーションを行った。出力波形とコンデンサ波形のシミュレーション結果を図11と図12に示す。また、相図も図13に示す。

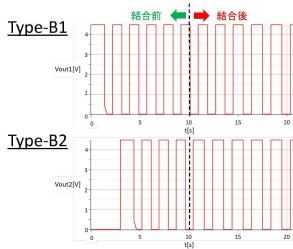


図 11: 出力波形 ($t = 10[s]$ において結合開始)

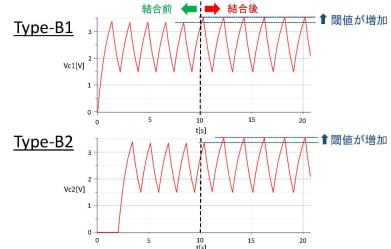


図 12: コンデンサ波形 ($t = 10[s]$ において結合開始)

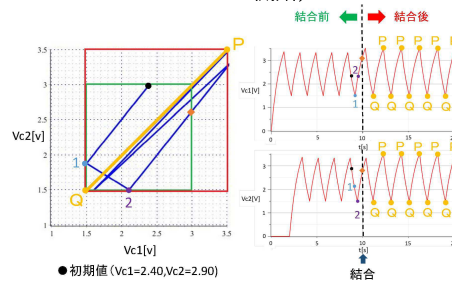


図 13: Type-B · Type-B 結合における相図

図11より、逆相同期が起こり、図12より、充電閾値が増加しているのが判る。また、図13からも同相同期が起こってる様子が判る。

さらに、TypeA・TypeBについても同様の結合モデルを MapleSim で作成し、シミュレーションを行った。出力波形とコンデンサ波形のシミュレーション結果を図 14 と図 15 に示す。また、相図も図 16 に示す。

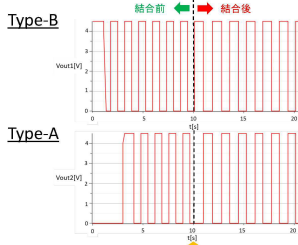


図 14: 出力波形 ($t = 10[s]$ において結合開始)

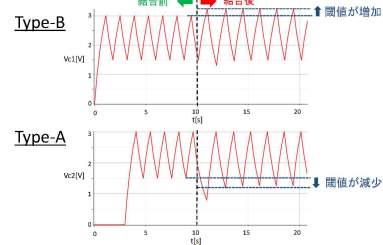


図 15: コンデンサ波形 ($t = 10[s]$ において結合開始)

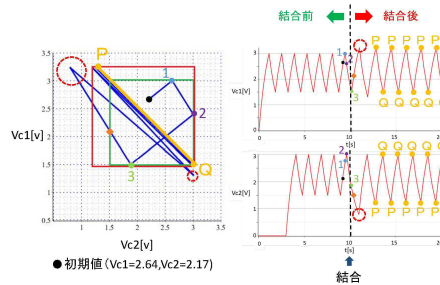


図 16: Type-A・Type-B 結合における相図

図 14 より、逆相同期が起こり、図 15 より、Type-A については、放電閾値が減少し、Type-B については、充電閾値が増加しているのが判る。また、図 16 から逆相同期が起こってる様子が判る。

Type-A・Type-B について、図 16 の点線丸に注目すると、図 10 や図 13 と違い、同期のモードにすぐ入ることはできず、同期するまでに多少の時間がかかることが判る。

以上の結果から、光ネットワーク回路の 2 回路結合系については、MapleSim によるシミュレーション再現が可能であることが示せた。

4. MapleSim による微分方程式の抽出

前節でも触れたが、MapleSim には、作成したモデルから微分方程式を抽出できる。そこで、2 回路結合系の光ネットワークモデルから、微分方程式の抽出を行う。図 17 内に、抽出した微分方程式内の関数と該当する素子を示している。抽出した微分方程式は

$$\begin{cases}
 \frac{d}{dt}V_{out1} = \frac{1}{c}(I_{te2} + I_{tc2}) & V_{out1}, V_{out2} : \text{出力電圧} \\
 \frac{d}{dt}V_{out2} = \frac{1}{c}(I_{te1} + I_{tc1}) & I_{te1}, I_{te2} : \text{トランジスタのエミッタ電流} \\
 \frac{d}{dt}V_{c1} = -V_{c1} + V_{out1} & I_{tc1}, I_{tc2} : \text{トランジスタのコレクタ電流} \\
 \frac{d}{dt}V_{c2} = -V_{c2} + V_{out2} & V_{c1}, V_{c2} : \text{コンデンサ電圧}
 \end{cases} \quad (5)$$

である。\$c\$ はトランジスタにおけるコレクタ・基板間における静電容量を表している。これだけ見ると容易な式に見えるが、実際は、関数内の条件式がたくさんあり、とても複雑である。今回は、まだこの微分方程式の詳細な解析が研究途中であるので、メインの式だけの簡単な紹介としておく。

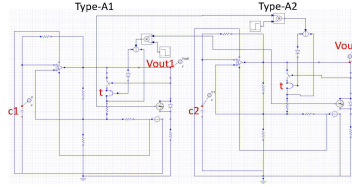


図 17: Type-A・Type-A における微分方程式の変数

6. まとめ

本論文では、光ネットワーク回路（電子ホタル回路）の同期現象に対する詳細な解析方法の1つのアイデアとして、MapleSimを使った解析手法を紹介した。2回路結合系に対して、MapleSimを用いた解析は有効であることを示した。今後は、MapleSimの特徴である微分方程式の抽出を使い、抽出した微分方程式を解析することで、現象の本質を探っていくことを考えている。また、高次の結合系についても有効な解析方法と考えらるので、解析の進んでいない3回路結合系の現象解析への新たなアプローチ法として研究を進めていく。

参考文献

- [1] Munehisa SEKIKAWA, Keiko KIMOTO, Takashi KOHNO, Hiroshi KAWAKAMI and Kazuyuki AIHARA: Synchronization of phenomena in square-wave oscillators with optical coupling. IEICE Technical Report, CAS2011-45, NLP2011-72(2011-10).