

## 発振回路の相互結合で起こる同期現象の解析

Analysis of the synchronization phenomena to be caused by Two-Coupled Oscillator

河野 良介

同志社大学大学院生命医科学研究科医工学・医情報学専攻

e-mail : dmq1022@mail4.doshisha.ac.jp

## 1. 緒言

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。この同期現象のメカニズムを理解するために方形波発振器に受光素子・発光素子を付加させた回路（電子ホタル）を用いた研究[1]が行われている。[1]では、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、多重安定性を持つことが分かっている。この多重安定性を持つ回路は、外部入力の強さやタイミングにより、同期の仕方が変化するため、記憶する回路と考えることが出来る。これは、発振器の結合の数を増やすことで、人の脳神経回路と類似した回路網になると捉え、その方向への研究発展を考えている。しかし、光による結合では指向性等の様々な要因を考慮に入れなくてはならないため3回路結合系の詳細な解析は課題とされている。そこで、本研究では人の脳神経回路のモデル化への発展を考え、[1]の回路をベースとし、結合方法を光による相互結合ではなくデジタル信号による相互結合を考案した。モデリング・シミュレーションソフトである MapleSim を用いて、デジタル信号による2回路結合系でのモデル化を行い、発振周期や duty 比などの回路特性を変化させた際の同期現象の詳細な解析結果の報告を行う。

## 2. 発振回路

本研究で用いる回路図を Fig.1 に示す。

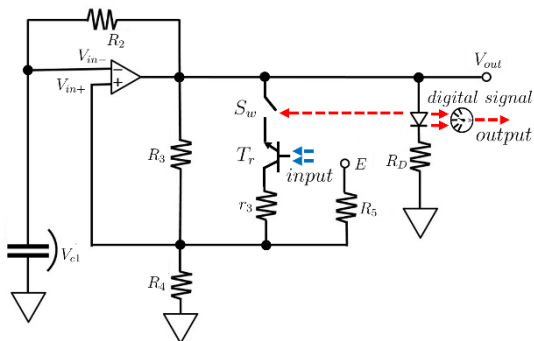


Fig.1 発振回路の回路図

この回路は、RC 方形波発振器に相手の出力信号を受ける受信部分、自身の出力信号を送る発信部分が付加されている。受信部分は自身の出力信号を検知することで開閉する制御スイッチ ( $S_w$ ) とバイポーラトランジスタ ( $T_r$ ) で構成される。受信部分の動作原理は自身の出力がなく ( $V_{out}=0$ ) かつ相手の出力がある際に受信部分が ON する。つまりこの回路は、逆相同期が起こる回路

(Type-A) であることが分かる。また、受信部分の特性を変えることで、自身の出力があり

( $V_{out}=E$ ) かつ相手の出力があることで同期する同相同期が起こる回路 (Type-B) の作成が可能である。

## 3. MapleSim によるシミュレーション

MapleSim とは、複合分野を組み合わせたモデリング・シミュレーションが可能で、作成したモデルの微分方程式を自動で導出することが出来る。

今回、結合の組み合わせとして Type-A=Type-A, Type-B=Type-B, Type-A=Type-B でシミュレーションを行った。それぞれの組み合わせにおいて duty 比や発振周期を変化させることによる現象の変化も観測した。以下では、いくつかの結果の例を記載する。また結果の図の表記において、2回路結合系であるため  $V_{c1}$ ・ $V_{c2}$  と名称を区別している。シミュレーション時の数値計算手法としては Rosenbrock 法を用いて行った。

## 3.1 Type-A=Type-A の結合系

Type-A=Type-A の結合において2回路の発振周期が同じで共に duty 比 50% の条件でのシミュレーションで得られた内部状態の波形を Fig2 に示す。

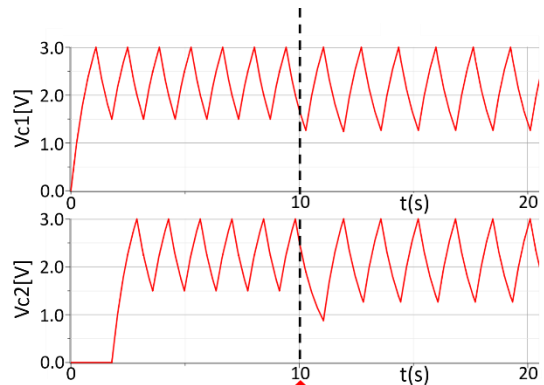


Fig.2 2回路の内部状態（コンデンサ）の波形

Fig.2において、点線の位置(10s)において互いの結合を開始している。互いの振動波形が逆相に同期していることが分かる。

### 3.2 Type-B=Type-Bの結合系

Type-B=Type-Bの結合において2回路の発振周期が同じで共にduty比50%の条件でのシミュレーションで得られた内部状態の波形をFig3に示す。

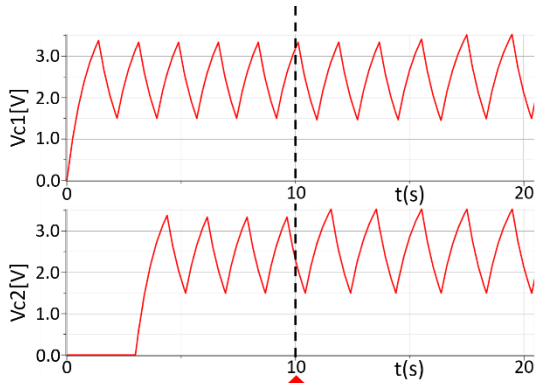


Fig.3 2回路の内部状態(コンデンサ)の波形

Fig.3において、互いの振動波形が同相に同期していることが分かる。

### 3.3 Type-A=Type-A(duty比50%:25%)の結合系

Type-A=Type-Aの結合においてduty比50%(グラフ上)とduty比25%(グラフ下)の条件でのシミュレーションで得られた内部状態の波形をFig4に示す。

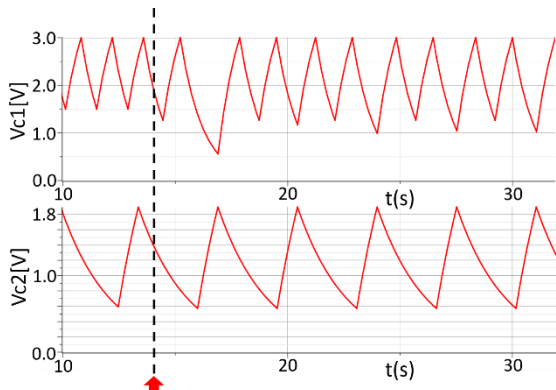


Fig.4 2回路の内部状態(コンデンサ)の波形

Fig.4において、互いの振動周期が2:1と有理数比となる同期振動が起こっていることが分かる。

### 3.4 2回路結合系における微分代数方程式

Type-A=Type-A(duty比50%:50%)のシミュレーションにおいてMapleSimから導出された微分代数方程式を以下に示す。微分代数方程式における条件が多いため本稿では条件の記載は割愛し微分方程式のみの記載にする。Fig.5のようなタイミングチャートにより条件を使い分けるようなモデルとなる。式①・②は受信部分に関する式であり、式③・④は内部状態を表す式となっている。それぞれの変数は、 $V_{out1}$ ・ $V_{out2}$ は出力電圧、

$V_{c1}$ ・ $V_{c2}$ はコンデンサ電圧、 $I_{te1}$ ・ $I_{te2}$ はトランジスタのエミッタ電流、 $I_{tc1}$ ・ $I_{tc2}$ はトランジスタのコレクタ電流、 $c$ 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である。

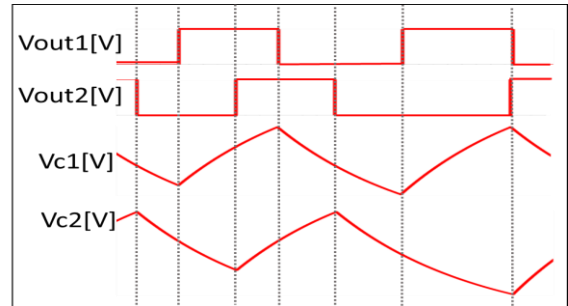


Fig.5 タイミングチャート

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} V_{out1} = \frac{1}{c} (I_{te2} + I_{tc2}) & \dots \textcircled{1} \\ \frac{d}{dt} V_{out2} = \frac{1}{c} (I_{te1} + I_{tc1}) & \dots \textcircled{2} \\ \frac{d}{dt} V_{c1} = -V_{c1} + V_{out1} & \dots \textcircled{3} \\ \frac{d}{dt} V_{c2} = -V_{c2} + V_{out2} & \dots \textcircled{4} \end{cases}$$

## 4. 結言

MapleSimを用いて発振回路の相互結合で起こる同期現象をduty比や発振周期など回路特性を変化させることで起こる現象の解析を行った。シミュレーション結果から、デジタル信号の結合方法でも先行研究[1]と同様に、同相・逆相同期、また有理数比となる同期振動などの現象を確認できたことからデジタル信号の結合系でも有効性があることが分かった。さらに、2回路結合系での微分代数方程式を導出することが出来た。しかし、実際はあまりに式・条件が膨大であり現象を捉えづらいものとなっているため式を単純化していくことが今後の課題である。今後の発展として、さらに複数回路の結合系での解析を行い、人の脳神経回路のモデル化への発展につなげたいと考えている。

## 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 ReportCAS2011-45, NLP2011-72(2011-2010).
- 2) MapleSim  
<http://www.cybernet.co.jp/maple/product/maplesim/>