

リング発振回路の周波数・位相引き込み現象の研究

栗原 圭汰* 柴崎 有祈子 小林 春夫 (群馬大学)

Study of Frequency and Phase Lead-in Phenomenon of Ring Oscillator
Keita Kurihara*, Yukiko Shibasaki, Haruo Kobayashi, (Gunma University)

キーワード: リング発振回路、共振、引き込み現象、インジェクションロッキング、カオス、複雑系
(Keywords: Ring Oscillator, Resonance, Lead-in Phenomenon, Injection-Locking, Chaos, Complex system)

1. 序論

近年、自動車を始めとする製品のエレクトロニクス化やインフラ設備のIT化が著しく、アナログ・デジタル混載回路の需要が大きい。特に発振回路は、時間の基準を与えるペースメーカーの役割を果たし、システムが機能するためには必要不可欠な回路ブロックである。

周期的なリズム現象は、単体では同じ出来事を繰り返すだけであるが、それらが相互作用すると、リズムが自発的に揃う「引き込み」と呼ばれる現象が起こる。例えば、周期が等しいメトロノームをブランコのような水平方向に動く不安定な台の上に乗せ、発振タイミングをずらすと、位相が引き込まれ、位相同期する [1]。これを「位相引き込み」と呼ぶ。一方、地球の自転の周期は約 24 時間であることが知られているが、地球上に生息する生物はその周期に引き込まれて生活をしている (周波数同期) [2]。これを「周波数引き込み」と呼ぶ。

本論文では、段数の同じおよび段数の異なる複数のリング発振回路の周波数・位相引き込み現象をシミュレーションで確認し、その現象について調査した内容を報告する。加えて、単純な回路に内在するカオス現象、すなわち、複雑系の可能性についても述べる。

本論文の構成は次のようになる。第 2 章では、リング発振回路の原理と動作について述べる。第 3、4 章では、リング発振回路の位相・周波数の引き込み現象をシミュレーションで確認し、その現象について調査した。最後に、第 5 章で本論文の結論を述べる。

2. リング発振回路

本研究対象の回路で使用されるリング発振回路について概説する。

〈2-1〉 原理と構成

リング発振回路とは全体として負のゲイン K ($K < -1$) を持つ複数個の遅延要素 (典型的には奇数個のインバータ) をリング状に結合した構成をもつ発振回路である (図 2-1)。奇数個のインバータを用いることで、各インバータの出力が鎖状に次のインバータに入力され、最終段のインバータの出力は初段のインバータに入力され、全体としてリング構造になっている。奇数個のインバータ鎖は全体として入

力の論理否定となる。各インバータは有限の遅延時間をもつので、初段のインバータへの入力から有限の遅延時間後に最終段のインバータが初段入力の論理否定を出力し、これが再び初段インバータの入力になる。このプロセスが繰り返されることで発振する。

〈2-2〉 動作

図 2-2 のようにインバータを 3 段接続した場合を例に発振回路の動作を考える。 V_{out1} が High になると、 V_{out2} ではインバータ 2 つ通るため、 τ 遅れて High になる。 V_{out2} が High になると、 V_{out1} ではインバータ 1 つ通るため、 τ' 遅れて反転し Low になる。 V_{out1} が Low になると、 V_{out2} ではインバータ 2 つ通るため、 τ 遅れて Low になる。 V_{out2} が Low になると、 V_{out1} ではインバータ 1 つ通るため、 τ' 遅れて反転し High になる。これが 1 周期の流れである。発振周期 t 、発振周波数 f は以下のように求まる。

$$t = 2(\tau' + \tau) \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{2(\tau' + \tau)} \quad (2)$$

ここで、動作確認のために TSMC180nm CMOS プロセスを使用してシミュレーションを行った (図 3-1)。遅延バッファ 2 段とインバータ 1 個で構成する。結果は、発振周期 391ps だった。

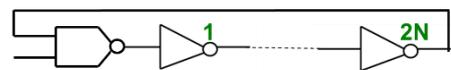


図 2-1 リング発振回路

Fig. 2-1 Ring oscillator

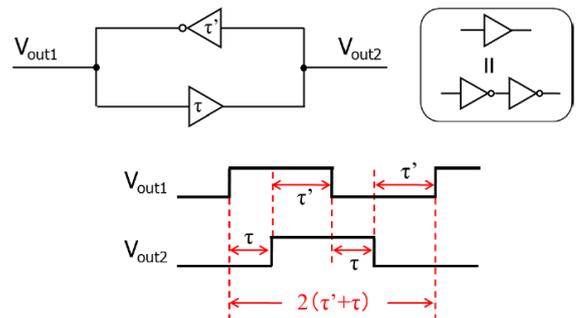


図 2-2 3 段のリング発振回路の動作

Fig. 2-2 3-stage ring oscillator operation

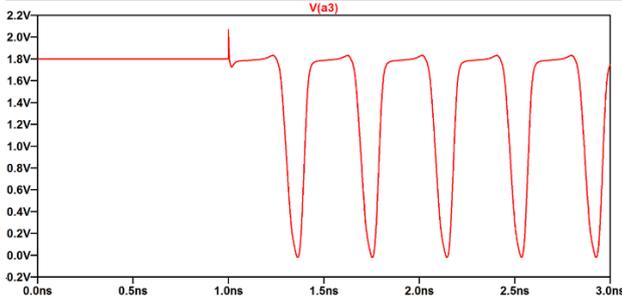


図 2-3 3 段リング発振回路のシミュレーション

Fig. 2-3 SPICE simulation of 3-stage ring oscillator

3. 位相引き込み現象

この章では位相引き込み現象について議論する。

(3-1) 2 相のリング発振回路

図 3-1 のように段数が等しい 2 相の 3 段リング発振回路の各ノード間を容量 C を介して結合させた。これはメトロノームをブランコに乗せた状態と物理的に類似している。この回路への信号の動作開始入力タイミングをずらすことで位相にオフセットを与え、有限時間後に位相の同期、すなわち、位相同期現象をシミュレーションにより確認した (図 3-2)。ここでは、発振周期 391ps、位相オフセット 0.2 周期の結合系に対して、 $R=1M\Omega$ と $C=1\mu F$ を直列にカップリングした。位相引き込み現象を確認するには、インピーダンスの値が重要となる。これが大きすぎるとその経過が見られず、小さすぎると位相同期せずに各々の発振器が独立に振動してしまう。

図 3-3 に、位相同期時間と位相オフセットの関係を示す。ここで、位相同期時間を「発振タイミングの異なる信号の電位差が、初期電位差の 5% になるまでの時間 (整定時間)」と定義した。図より、位相オフセットが小さく、カップリング抵抗が小さいほど、位相同期時間は短いことが分かる。

図 3-4 に、位相同期時間とカップリングサセプタンスの関係を示す。この時の位相オフセットは 0.1 周期である。この際もカップリングインピーダンスは大きすぎても小さすぎても有限時間での位相同期は見られない。その中間においては、位相同期時間とインピーダンスは線形の関係にあることが分かる (図 3-4)。

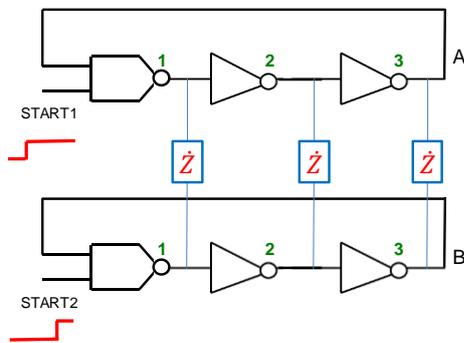


図 3-1 2 相の 3 段リング発振回路の容量結合

Fig. 3-1 Capacitor coupled two 3-stage ring oscillators.

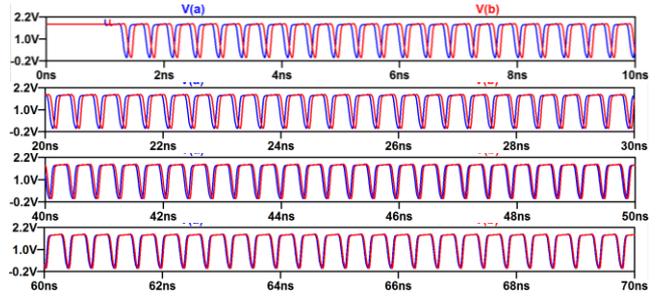


図 3-2 3 段のリング発振回路 2 相の位相同期現象の SPICE シミュレーション波形 (位相オフセット 0.2 周期)

Fig. 3-2 SPICE Simulated two 3-stage ring oscillators

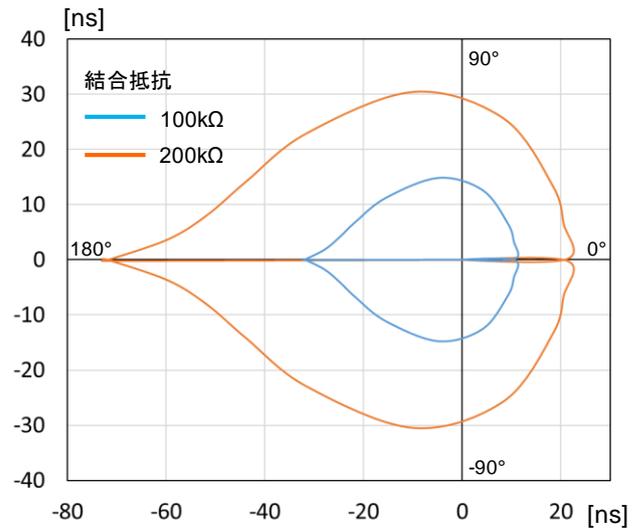


図 3-3 整定時間と位相オフセットの関係 (パラメタ: 抵抗)

Fig. 3-3 Settling time and phase offset.

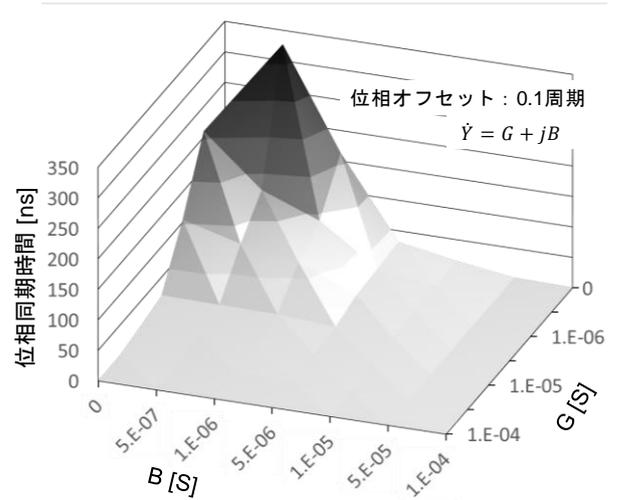


図 3-4 位相同期時間とカップリングのサセプタンス ($\dot{Y} = G + jB$) の関係 (位相オフセット: 0.1 周期)

Fig. 3-4 Settling time and coupling susceptance.

4. 周波数引き込み現象

この章では周波数引き込み現象について議論する。

〈4-1〉 2相のリング発振回路 (3-5 段)

図 4-1 のように段数の異なる (3-5 段) 2 相のリング発振回路の末端を、キャパシタンス C を介して結合させた。2 つのリング発振回路は段数が異なることから発振周期が異なり (式 (2))、これが周波数オフセットとなる。この時の位相オフセットはゼロとした。なお、発振周期は結合前の単体では 3 段 : 391ps、5 段 : 563ps、短絡結合後は 513ps であった。3 段と 5 段の結合後の周期は、結合前の平均値である 522ps と近いことが分かる。

この回路を用いて、カップリング抵抗と周波数同期現象の関係をシミュレーションで確認した。図 4-2 はキャパシタンス C と出力波形の関係を示しており、大別して以下の 3 のモードを確認した。図中において、青線 (V(a)) は 3 段の、赤線 (V(b)) は 5 段のリング発振回路の末端の電圧を示している。なお、黄緑線は電源電圧 1.8V の 1/2 の値を表している。

- (a) 2 相が同じ周波数で発振する状態。
- (c) 各々が独立して発振する状態。
- (b) 上記 2 つのモードの臨界状態。2 相の発振回路の周波数はほぼ等しいが、1 周期毎に周波数のズレが徐々に蓄積される。そのズレがある閾値を超えると 1 周期分の差をつくることで調整作用が生じる、周波数引き込み現象が見られた。この時の同期後の両者の主な周波数成分は 1.92GHz であり、おおよそ結合前の各々の発振回路の発振周波数の平均値であることが分かった。

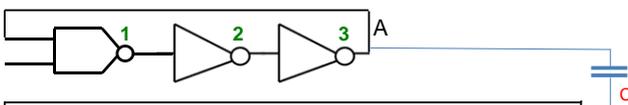
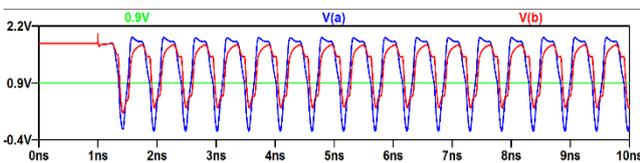
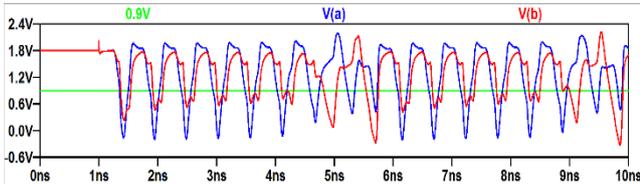


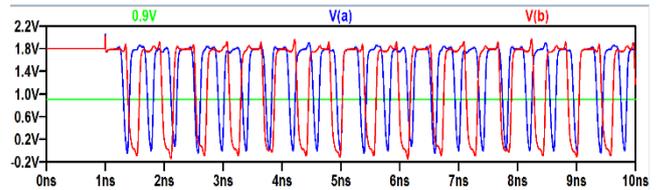
図 4-1 段数の異なるリング発振回路 2 相の C 結合図
Fig. 4-1 Capacitor coupling between 3-stage and 5-stage ring oscillators



(a) 周波数同期 (C=200fF)



(b) 臨界状態 (C=172fF)



(c) 独立振動 (C=10fF)

図 4-2 結合コンデンサと出力波形

Fig. 4-2 Coupling capacitor and oscillation wave-forms

〈4-2〉 多相のリング発振回路 (3-5-7-11-13 段)

図 4-3 のように段数の異なる (3-5-7-11-13 段) 5 相リング発振回路の末端を、キャパシタンス C を介して結合させた。ここで、各相単体の発振周期とそれらを短絡結合した時の周期を表 4-1 に示す。この時の結合後の周期は、9 段単体の周期 878ps と近いことが分かる。

カップリング素子 C の値によって、図 4-2 で示したような 3 種類のモードが確認できた。その中間である (b) の臨界状態において、各発振回路の位相をずらした時の出力電圧への影響を図 4-4、図 4-5 に示した。ここで、図中の黄緑線 (V(a))、青線 (V(b))、赤線 (V(c))、濃緑線 (V(d))、紫線 (V(e)) はそれぞれ 3 段、5 段、7 段、11 段、13 段のリング発振回路の出力電圧を表している。

電圧波形は乱雑で、様々な周波数を含んでいることが確認できる。また、スペクトル図からは位相オフセットによって大きな周波数成分の変化は見られないが、各成分のレベルに影響することを確認した。

カオス現象との関連性は今後調べていく。

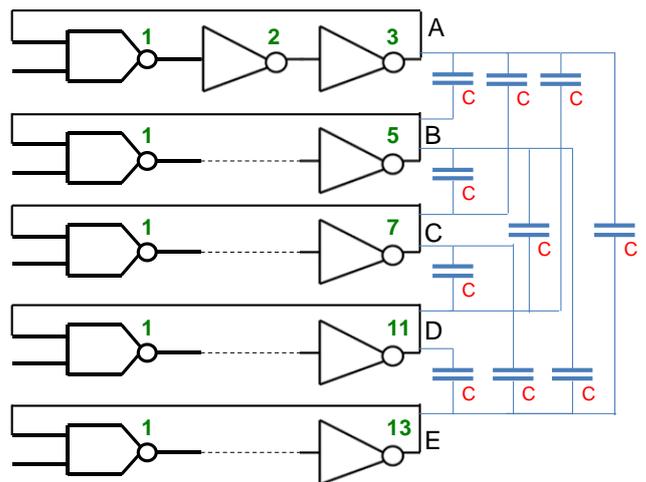
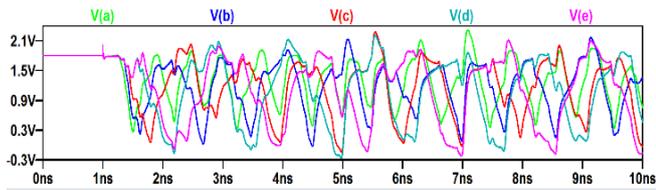


図 4-3 段数の異なるリング発振回路 5 相の C 結合図
Fig. 4-3 Capacitor-coupled 5 ring oscillators with different numbers of stages

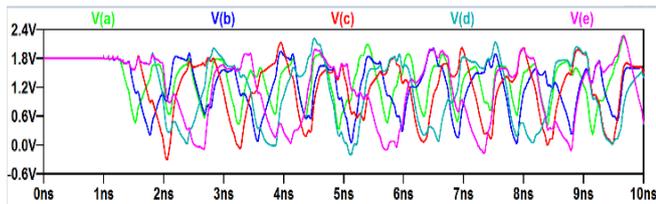
表 4-1 リングの段数と発振周期

Table 4-1 Number of stages of ring and oscillation period

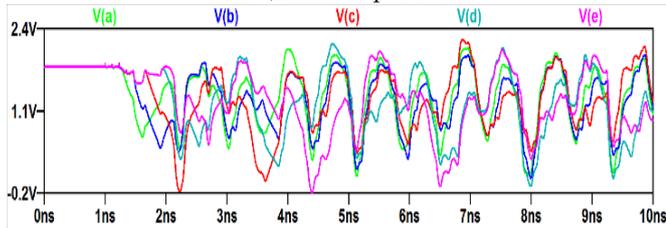
結合系 段数	周期[ps]	
	Open	Short
3段	$T_3=391$	$T_{total}=863$
5段	$T_5=563$	
7段	$T_7=723$	
11段	$T_{11}=1034$	
13段	$T_{13}=1187$	



(a) 位相差 0



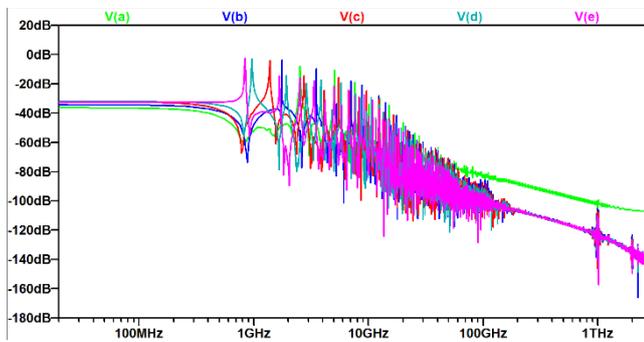
(b) 位相差 78ps 刻み



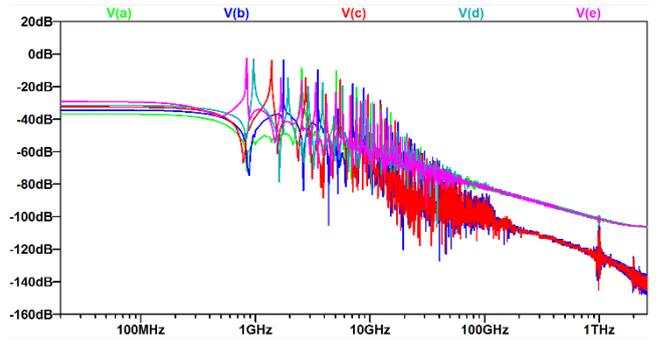
(c) 位相差 116ps 刻み

図 4-4 位相オフセットと出力電圧

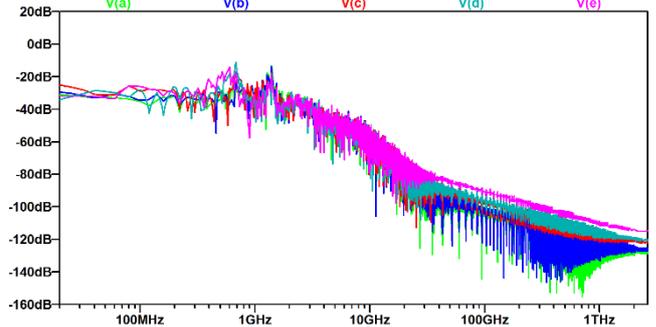
Fig. 4-4 Oscillator output waveforms with respect to phase offsets



(a) 位相差 0



(b) 位相差 78ps 刻み



(c) 位相差 116ps 刻み

図 4-5 位相差のオフセットと出力電圧スペクトル

Fig. 4-5 Output voltage spectrum with respect to phase offsets

5. 結論

段数の同じおよび段数の異なる複数のリング発振回路の周波数・位相引き込み現象をシミュレーションで確認し、その現象について調査した。

位相引き込み現象について、位相同期時間を定義し、それが位相オフセットやカップリング抵抗と線形の関係にあることを示した。

周波数引き込み現象について、周波数の異なる発振回路の結合後のモードの分類とその臨界状態における位相オフセットの周波数への影響を調査した。

今回議論したリング発振回路は、極めて単純な構成であるにも関わらず、それらを組み合わせることにより「カオス」の出現、すなわち、複雑系を示唆する結果が得られた。複雑系はあらゆる分野で応用される可能性を持っており、今後も単純な回路に内在するカオスの可能性について精力的に調査を進める。

文 献

- (1) 伊達章、「メトロノームの同期現象」+
- (2) 橋本 聡子、「睡眠と生体リズム」、日薬理誌 (Folia Pharmacol. Jpn.) 129, 400~403 (2007)
- (3) 細川康輝、「リングオシレータを用いたカオス回路の結合系」