

ブロッキング発振器における臨界現象

明治鍼灸短大・物理 森 本 安 夫

(1982年6月7日受理)

要 旨

ブロッキング発振器の時定数を決めているコンデンサーに並列に抵抗, R を接続し, それを変えることにより回路に発振-非発振の転移を引き起した。 $R < R_c (= 4.99 \text{ k}\Omega)$ では発振は停止する。制御変数を $\beta = R/R_c - 1$ と認定する。 $\beta \geq 0.8$ ($R \geq 9 \text{ k}\Omega$) では周期, T_p は $\ln(R/R_0)$ ($R_0 = 0.92 \text{ k}\Omega$) のように R に依存する。 $\beta \lesssim 0.8$ ではこの関係より余分な増大を示す。その部分を ΔT_p とすると $\Delta T_p \propto \beta^{-1.0}$ と表わされ, 一種の臨界現象を呈する。又同時に T_p に揺ぎが生じる。揺ぎの分散に比例すると思われる揺ぎの最大値, $\max |T_p - \langle T_p \rangle|$ ($\langle T_p \rangle$ は平均値) を δT_p とすると, $\delta T_p \propto \beta^{-1.0}$ なる依存性を示す。興味あることは, ΔT_p が秩序変数的な振舞いを示すことである。 δT_p はその臨界揺動を表現するものと思われる。

§ 1. 序 論

電子回路, 特に発振器における発振-非発振の転移は非平衡系における相転移現象の恰好の題材として既に多くの理論的, 実験的研究がなされており,¹⁻⁷⁾ 種々の興味ある現象-臨界揺動や臨界減速あるいは揺ぎの不可逆的循環等-が観測されている。特にウィーンブリッジ発振器における臨界現象については川久保等による詳細な研究がある。¹⁻³⁾ パラメトリック発振器における外部雑音が発振閾値に与える影響の研究⁵⁾ も, 相転移における揺ぎの役割を理解するうえで興味あるものだろう。硬軟両モードの不安定性を同一の回数で実現できる線型帰還増巾器を用い, 不安定性のタイプによって異なる型の臨界現象の起ることは平川等によって実験的, 理論的に示された。⁶⁾ これら一連の研究により, 発振器における相転移現象は確率過程の言葉を用いてほぼ説明されるようになった。

一方上述の発振器群-連続波発振器-とは異なるタイプの発振器がある。不連続波発振器と

森本安夫

呼ばれるもので、マルチバイブレーターやブロッキング発振器等がその例である。これらは先程述べたような連続波発振器とは異なり、発振は回路中のアクティブな要素—トランジスタ等—のオン、オフの動作の繰返しで持続し、ファン・デア・ポール方程式でその動作が記述されるような発振器とは異なる発振機構を有している。従ってこれらには又独自の臨界現象が存在すると想像できる。この小論ではブロッキング発振器を例にとり、“無理矢理”に誘起させた臨界現象を紹介する。それが非平衡系の相転移の物理学にとってどのような意義を有するのかは定かではない。読者諸兄の御意見、御批判を頂ければ幸いである。次節では回路の簡単な説明と実験結果が示される。その中でこの場合有効と思われる秩序変数と制御変数が設定される。3節では観測された臨界現象についての問題を議論することにする。

§ 2. 実験とその結果

実験に用いた回路を図1に示す。普通のエレクトロニクスの教科書⁸⁾にあるブロッキング発振器に、余分(?)な可変抵抗、 R を取り付けたものである。無論 $R=\infty$ なら通常のブロッキング発振器であり、その周期、 T_p は約 $R_B C_B$ で与えられる。その動作は教科書を参照されたい。 R は § 1 で述べた如く、いわば“無理矢理”にこの回路に臨界現象を引き起す為に取り付けられたものである。 R には臨界値が存在する。即ち $R < R_c$ ($= 4.99\text{k}\Omega$) では発振は停止する。その理由はトランジスタ (Tr) のベース・エミッターバイアス、 V_{BE} は発振を考えなければほぼ $RV_{CC}/(R_B + R)$ で与えられ、

$R \lesssim R_c$ では $V_{BE} \lesssim 0.46\text{V}$ となり、 Tr がカットオフになる為である。 $R > R_c$ では発振パターンはパルス巾 $80\mu\text{sec}$ 、振巾 45V であり、これ等の値は R にはほとんどよらず一定である。

それに対して発振周期、 T_p は R に大きく依存する。それを図2に示そう。 $R=\infty$ では $T_p = 4.6\text{ msec}$ である。

$9\text{k}\Omega < R < 150\text{k}\Omega$ では T_p は $\ln(R/R_0)$ 、 $R_0 = 0.92\text{k}\Omega$ の形で R に依存して減少する。この関係は回路方程式から求められるはずであるが残念ながらその解析はまだ成功していない。

この関係は $R < 9\text{k}\Omega$ では成立せず、図で見られるようにこの領域では増加し始める。

後で述べる理由により、図中で $R < 9\text{k}\Omega$ に対してはこの関係は点線で示してある。その領域で点線より余分に増加した部分を ΔT_p と名付ける。 R_c 近傍で T_p は発散的な振舞いを示す

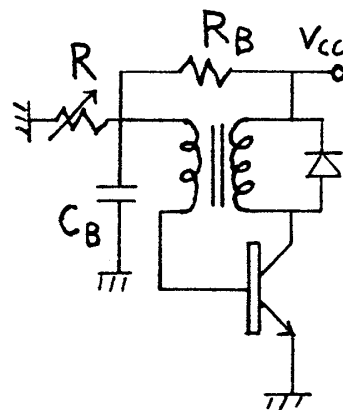


図1 実験に用いたブロッキング発振器の回路。トランジスタは2SC372、ダイオードは1S1147である。
 $R_B = 100\text{ k}\Omega$ 、 $C_B = 67.0\text{ nF}$ である。

ので、制御変数、 β を $\beta = R/R_c - 1$ と設定し、 ΔT_p と β の関係を図3に示した。

明らかに $\Delta T_p \propto \beta^{-1.0}$ なる関係を有し、 -1 という臨界指数で表現されることが解る。

なお $R = 9\text{k}\Omega$ は $\beta = 0.8$ に相当し、この関係は $\beta < 0.8$ の領域でみられる。こう書けたからと言って断定するのは危険かも知れないが、一種の臨界現象が起っていると言ってもよかろう。即ちある物理量が、ある臨界点 (R_c) を含む制御変数によって、臨界指数の形で表現されている訳である。

そのことをもっとはっきり示すのが T_p (又は ΔT_p) の揺ぎである。 $\beta > 0.8$ の領域では T_p は揺ぎを示さない。然るに $\beta < 0.8$ の領域では T_p に揺ぎが生じる。その大きさは R_c 近傍になるに従って増大する。遂にはそれが T_p と同程度になり、 T_p の測定は不可能となる。実験的には T_p の揺ぎは、オシロスコープ上での時間軸上をパルスの位置が揺いでくることとして観測される。揺ぎから統計的な量を抽出するには、 T_p をサンプリングしてその分布を測り、それから例えば揺ぎの分散と言った量を測定しなければならないが、(装置の都合上)成功していない。

そこで揺ぎの最大値、即ち $\max |T_p - \langle T_p \rangle|$ ($\langle T_p \rangle$ は T_p の平均値) を δT_p とし、かなり荒っぽくはなるが、これを揺ぎの分散に比例するような量と考えてみよう。 δT_p と β の関係は図4の如くなる。即ち $\delta T_p \propto \beta^{-1.0}$ であり、 ΔT_p と同様 -1 なる臨界指数で描かれる。図3, 4の結果は通常の相転移現象の言葉を借りれば、 ΔT_p が秩序変数であり δT_p は秩序変数の臨界揺動であることを示している。そのような対応で言えば臨界減速は R をステップ状に変化させた時、 T_p が新しい状態での値になるまでの緩和時間が R_c 近傍で発散を示すことに対応するだろう。この測定は実験的に T_p の揺ぎの分布をとるより困難で、特に重要な揺ぎの生じている領域での測定には全く成功していない。今後の課題である。

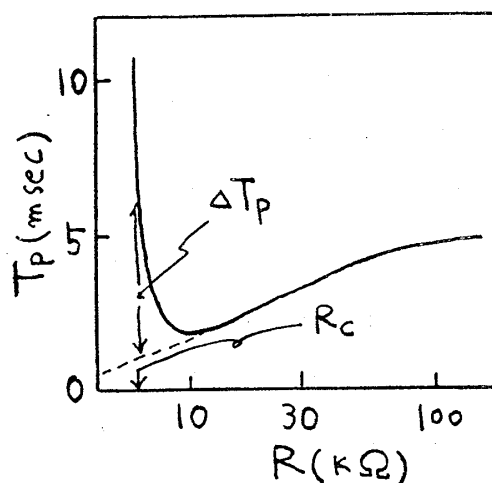


図2 T_p の R 依存性。図中の ΔT_p 及び点線については本文をみよ。

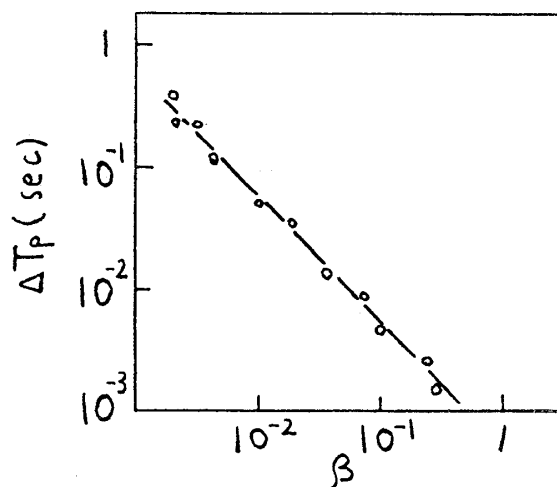
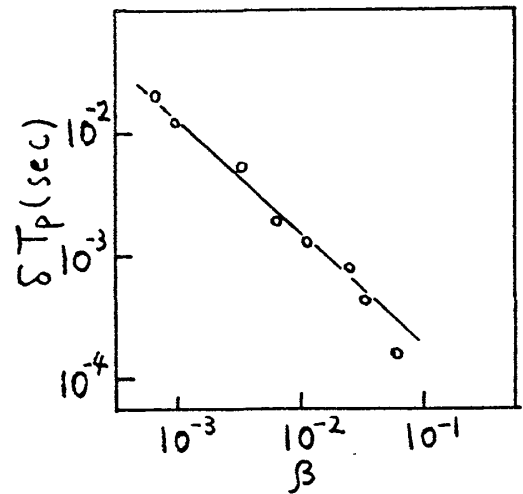


図3 ΔT_p の β 依存性。

§ 3 議論とまとめ

いささか強引な方法でブロッキング発振器に発振—非発振の転移を引き起した。その際現われた臨界現象、図 3、4 を物理的にどう解釈すればよいのだろうか？ 相転移現象であることは間違いないとすると、それを記述する秩序変数は何か。普通の連続波発振器の転移では発振振巾がそれに相当するだろうが、この場合、それは発振停止寸前まで変化せず、秩序変数とは思われない。§ 2 の終りで述べた如く、図 3 の事実から見て ΔT_p が秩序変数と考えるのが妥当であろう。そう考えると図 4 の δT_p は秩序変数

図 4 δT_p の β 依存性。

ΔT_p の臨界揺動とみなすことが可能である。このことは大変奇妙な、従来のものとは異なった考えであることは明らかである。相転移のイメージとしては、特定のモードが何等かの協同作用により臨界点近傍で不安定となり、そのモードの揺ぎがマクロな量に成長し秩序状態を形式すると言うのが一般的であろう。連続波発振器の例で言えば回路中に存在する雑音のうち、特定の周波数をもったものが、秩序変数に対応するだろう。不連続波発振器においては振巾が秩序変数になり得ないのは次のような考察からある程度理解できる。

即ちその発振機構は正弦波発振器等とは異なり、アクティブな要素（トランジスタ等）のオン、オフの繰返しによっており、振巾はほとんど電源電圧によって決定されており回路の動作状態を反映する量ではなく、従って秩序変数にはなり難い。

以上述べた如くはっきりしない面もあるが相転移現象は生じている訳であるから、その臨界現象を記述する秩序変数は ΔT_p であり、 δT_p はその臨界揺動であると、とりあえず考えることにする。両者は各れも -1 という臨界指数で表わされる。川久保等の表現を借りれば平均場近似が成立していると言える。

ΔT_p も δT_p も $\beta \leq 0.8$ の領域で発生していることからこの領域 ($0 < \beta < 0.8$) を不安定（発振）領域と名付けることができよう。

もちろん $\beta < 0$ は非発振領域であり、 $\beta > 0.8$ は ΔT_p も δT_p も存在しない、いわば安定（発振）領域である。このように不安定な発振領域がはっきりと観測された例として、ガンダイオードにおける間歇発振領域がある。⁹⁾ $\beta = 0.8$ は $R = 9 \text{ k}\Omega$ に対応しており、この時 $V_{BE} \simeq 0.83 \text{ V}$ であるから、この不安定性はトランジスタが充分飽和状態になりきれず、ブロッキング発振器としては不十分な動作しかしなくなる為に発生するものである。

以上述べた如く種々の問題点—回路方程式の解析，秩序変数とは何か等々—を含んではいるが，本報告において示された臨界現象は，従来報告されたものとは異なる様相を示しており，電子回路における相転移現象に新しい問題を提起するものと思われる。

参 考 文 献

- 1) T. Kawakubo, S. Kabashima and M. Ogishima, J. Phys. Soc. Jpn. **34** (1973) 1149.
- 2) T. Kawakubo and S. Kabashima, J. Phys. Soc. Jpn. **37** (1974) 1199.
- 3) S. Kabashima, T. Itsumi, T. Kawakubo and T. Nagshima, J. Phys. Soc. Jpn. **39** (1975) 1183.
- 4) P. M. Horn, T. Carruthers and M. T. Long, Phys. Rev. A **14** (1976) 833.
- 5) S. Kabashima, S. Kogure, T. Kawakubo and T. Okada, J. appl. Phys. **50** (1979) 6296.
- 6) K. Harada, S. Kuhara and K. Hirakawa, J. Phys. Soc. Jpn. **50** (1981) 2450.
- 7) M. Agu and Y. Teramachi, J. Phys. Soc. Jpn. **40** (1976) 636.
- 8) 服部，山本，“電子回路Ⅲ”（広川書店，東京，1969）p. 807.
- 9) S. Kabashima, H. Yamazaki and T. Kawakubo, J. Phys. Soc. Jpn. **40** (1976) 921.