

非線形アナログ回路による反応拡散システム — ブリュセレータの回路化 —

A Reaction-Diffusion System Using Non-Linear Analog Circuits

西宮 優作 浅井 哲也 雨宮 好仁

NISHIMIYA Yusaku, ASAI Tetsuya, AMEMIYA Yoshihito

北海道大学 工学部

Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

1. はじめに

多様な秩序（パターンやリズム）の自己形成が生じる非平衡系の例として、自己触媒の過程をもつ化学反応系がある。その反応キネティクスは非線形の常微分方程式で表現できることが多い。反応拡散チップの構成に向けて、これら非線形方程式の挙動を模擬するアナログ回路を設計した。以下に非平衡反応モデルの一つであるブリュセレータを例として模擬回路の構成方法を述べる。

2. ブリュセレータとは

図1(a)に示すような化学反応モデルをいう。初期物質(A, B)から中間生成物(X, Y)を経て最終生成物(D, E)を生じる。反応の中に自己触媒の過程(2X + Y → 3X)が含まれているので、パラメータの値(物質濃度や反応速度)に応じて系の挙動に自励振動や分岐現象が現れる。初期物質の濃度(a, b)が一定に保たれているとき、中間生成物の濃度(x, y)は図1(b)の微分方程式に従う。ブリュセレータは非平衡開放系の代表モデルである。

3. CMOS回路による構成

ブリュセレータの反応キネティクスを模擬するために図2の回路構成を考えた。アナログ乗算器と電流ミラーを組合せた回路要素Mによって図1(b)式の右辺に相当する電流をつくり、その電流でキャパシタCを充放電する。キャパシタ両端の電圧が中間生成物の濃度(x, y)に対応する。なお初期物質の濃度はバイアス電流(図2のa, b, 1)によって決まる。回路要素Mのアナログ乗算部を取り出して図3に示す。電流I_{in}と電圧V_{in}を入力として、これらの積に比例する電流I_{out}を出力する。

4. 回路系の動作

設計したブリュセレータ回路の動作をシミュレーション上で確認した。バイアス電流値を変えると、減衰振動とリミットサイクルが入れ替わる分岐現象が生じる。リミットサイクルが生じる条件での動作を相平面(電圧_x - 電圧_yの平面)に記述して図4に示す。初期値にかかわらず同一のリミットサイクルに巻き込まれる様子が示されている。さらに、二つのブリュセレータ回路を拡散的に結合させた系を設計し、引き込み現象の発生や非一様定常状態の発生などを確かめた。

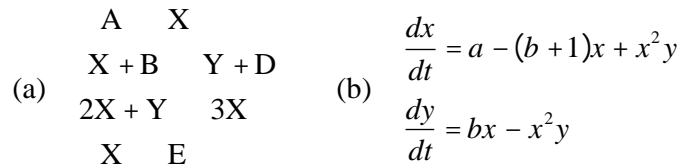


図1 ブリュセレータ反応モデルとその微分方程式

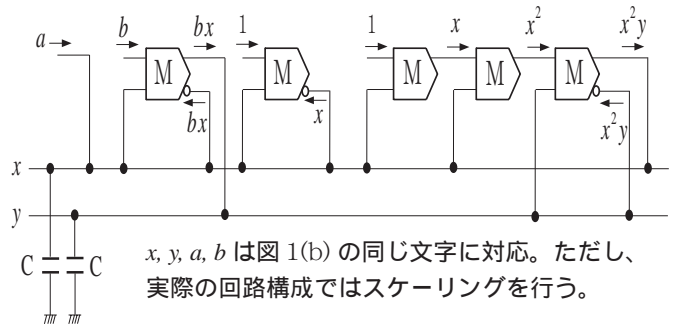


図2 ブリュセレータを模擬する回路

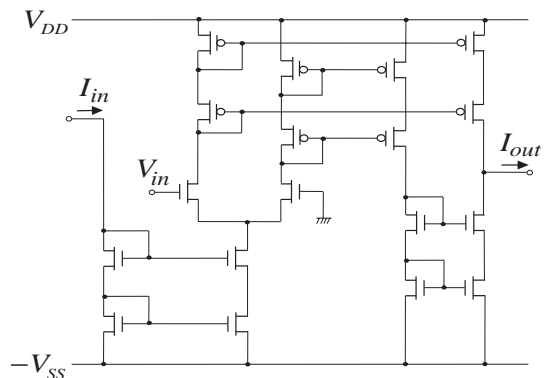


図3 アナログ乗算器(図2の回路要素Mの乗算部分)

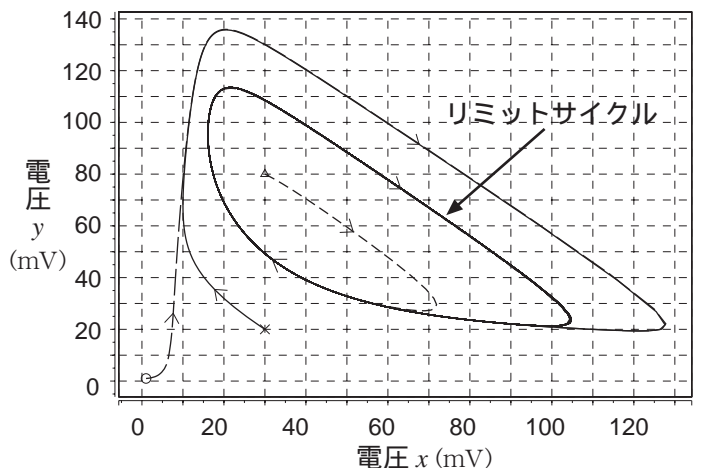


図4 相面上の回路動作(シミュレーション)