

# 環境の感知と運動を同時に制御する化学反応系ロボットの 数理モデリング

公立はこだて未来大学 大学院システム情報科学研究科 複雑系情報科学領域  
○小田中 嵐 (Arashi ODANAKA) \* ;  
田中 吉太郎 (Yoshitaro TANAKA) † ; 櫻沢 繁 (Shigeru SAKURAZAWA) ‡

## 概要

近年, Belousov-Zhabotinsky 反応 (BZ 反応) という化学反応を用いて生物の柔軟性を再現するようなロボットが開発されている [1]. この化学反応系を用いたロボットは, 平坦な床で一方向に運動し, 狭空間で進行方向を反転させる振る舞いが観測されている. 本研究では, この化学反応系ロボットの運動を表す数理モデルを, ミミズの蠕動運動を表すマルチブロックモデルと BZ 反応の数理モデルを組み合わせることによって構築した.

## 1 導入

一般に, ロボットはセンサなどで周りの環境を感知し, 得られた情報を元にコンピュータによって計算が行われ, その計算結果に応じて行動を制御する. つまり, ロボットの行動は周囲の環境の感知から生まれていると言える. 一方で, 生物に関してはこの逆のプロセスを考えることができる. 例えば, 目隠しをした人に棒を渡す状況を考える. 棒を掴んだ際に棒の硬さや重さ, 温度などの情報が得られると考えられるが, このままで得られる情報は限られている. このとき, 棒を振ることによって新たに棒の長さや強度などの情報が得られると考えられ, これは行為から知覚が生まれていると言える. このように, 知覚と行為には双方向の関係がある.

近年, Belousov-Zhabotinsky 反応 (以下, BZ 反応とする) という化学反応を用いて, このような生物の柔軟性の再現を試みたロボットが開発されている [1, 2, 3, 4]. 吉田らは, BZ 反応の酸化還元反応に応じて体積を膨潤・収縮させ, 平坦な床上を一方向に運動できるゲル状のロボットを開発した [2]. さらに, 櫻沢は, ゲル外部の溶液の影響を受けて BZ 反応の反応速度や周期が変化すること, 反応生成物が外部の溶液に影響を与えることに注目し, ロボットが環境との相互作用によって自身の運動を調節できることを発見した [2]. 具体的には, ゲルが運動によって狭空間に侵入すると, 進行方向を逆転させることを明らかにした (図 1).

これは, BZ 反応がロボット内部の触媒の密度と外部の溶液の濃度の変化に対応し, 反応のパターンを変えたというものである. すなわち, このロボットにおいて BZ 反応は運動の動力源であり, 環

---

\* E-mail: g2122017@fun.ac.jp

† 公立はこだて未来大学システム情報科学部, E-mail: y-tanaka@fun.ac.jp)

‡ 公立はこだて未来大学システム情報科学部, E-mail: sakura@fun.ac.jp

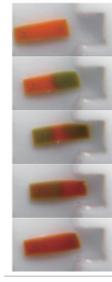


図 1: 狭空間での進行方向の逆転 [1]

境を感知するセンサの役割も、それに応じて運動を変える判断を行う役割も果たしている。また、BZ ゲルは体を伸縮させるように進むが、これはミミズのような手足を持たない生物に見られる蠕動運動と酷似している。

櫻沢らによって観測された、環境の感知と運動の制御を同時に行うような振る舞いは、ある特定の狭空間における一方向の蠕動運動でのみ確認されたことである。そのため、BZ 反応の条件や周りの環境の変化させた場合についての振る舞いの予測ができていない。そこで本研究では、化学反応系ロボットがどのようなシステムによって運動を制御しているかを明らかにすることを目的とする。本研究では、ロボット内部で発生する BZ 反応の数値モデルと、蠕動運動の数値モデルを組み合わせることとで、BZ 反応によって運動を制御するようなモデルを提案する。

## 2 先行研究

### 2.1 BZ 反応を記述するモデル

BZ 反応は代表的な反応拡散系であり、次のように記述できる。

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = D_u \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + R_u(u, v) & (0 \leq x \leq L, t > 0) \\ \frac{\partial v}{\partial t} = D_v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + R_v(u, v) & (0 \leq x \leq L, t > 0) \end{cases} \quad (1)$$

$u = u(x, t)$  は反応の活性因子 ( $\text{HBrO}_2$ ) の濃度、 $v = v(x, t)$  は反応の抑制因子 ( $\text{Br}^-$ ) の濃度、 $D_u$  および  $D_v$  はそれぞれの物質の拡散係数、 $R_u$  および  $R_v$  は反応項を表す。反応項は BZ 反応の化学組成によって異なるが、今回は RZ モデルを採用した。RZ モデルは次の 2 変数系で表される [7].

$$\begin{cases} R_u(u, v) = \frac{1}{\varepsilon} \left( u(1-u) - 2q\alpha \frac{v}{1-v} \frac{u-\mu}{u+\mu} \right) \\ R_v(u, v) = u - \alpha \frac{v}{1-v} \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $q$  は反応物の濃度に依存したパラメータ、 $\varepsilon$ 、 $\mu$ 、 $\alpha$  は反応物の濃度と反応速度に依存したパラメータである。

## 2.2 マルチブロックモデル

ロボットは内部で発生する酸化還元に対応して膨潤・収縮を繰り返し、体積の変化によって方向性のある運動を実現している。このような運動はミミズやヒルのような手足を持たない生物に見られる蠕動運動に非常に酷似している。本研究では、BZゲルの運動を蠕動運動として捉え、ミミズの蠕動運動を表すマルチブロックモデル [6] によって表す。本章ではマルチブロックモデルの概要について述べる。

まず、生物の体を複数のブロックとばねと蝶番によって表す (図 2)。ばねの自然長は蝶番の開き角度によって変化すると仮定する。このとき、体内に伝播する蠕動波をばねの張力として考え、接地面と体の間にはたらく摩擦を粘性摩擦によって近似することで、蠕動運動は 1 次元のばねの単振動の方程式として与えられる。

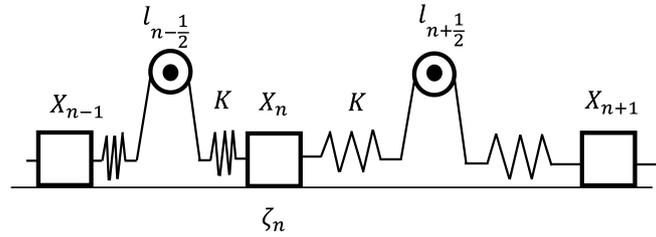


図 2: マルチブロックモデル

このようなマルチブロックモデルの運動方程式は次のように与えられる。

$$\zeta_i(t)\dot{X}_i = \begin{cases} K \left[ (X_{i+1} - X_i - l_{i+\frac{1}{2}}) - (X_i - X_{i-1} - l_{i-\frac{1}{2}}) \right] & (1 < i < M) \\ K \left[ (X_{i+1} - X_i - l_{i+\frac{1}{2}}) \right] & (i = 1) \\ K \left[ -(X_i - X_{i-1} - l_{i-\frac{1}{2}}) \right] & (i = M) \end{cases} \quad (5)$$

$$l_{n+\frac{1}{2}} = l_0 + a \sin \left( \omega t - \frac{2i\pi}{N} \right) \quad (6)$$

ここで、 $X_i = X_i(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ) は時刻  $t$  における各ブロックの中心の位置、 $\zeta_i$  は各ブロックの粘性摩擦係数、 $K$  はばね定数、 $l_0$  はばねの平均の長さである。ばねは蝶番によって繋がれており、蝶番の開き角度が  $\omega t$  で変化する場合を考える。このとき、ばねの自然長は正弦波状に振る舞い、 $l_0 + a \sin \omega t$  によって与えられる。 $a$  は振幅の大きさ、 $\omega$  は角速度を表す。 $l_{i+\frac{1}{2}}$  は  $i$  番目と  $i+1$  番目のブロックの間のばねの自然長、 $N$  は周期を表す。また、 $l_{i+\frac{1}{2}} > 0$  より  $|l_0| > a$  を満たすように  $a$  を設定する。

### 3 提案モデル

#### 3.1 1次元空間でBZ反応の濃度に対応して蠕動運動を行うモデル

化学反応系ロボットの数理モデルは、マルチブロックモデルにBZ反応の濃度を組み合わせて考える。

まず、ロボットの運動を蠕動運動と考えることにより、ミミズの蠕動運動を表すマルチブロックモデルによって表現する。長さ  $L$  の短冊状のロボットを  $M$  分割し、 $M$  個のブロックのマルチブロックモデルとして式 (5) によって表す。ただし、元のマルチブロックモデルでは、ばねの自然長はすべての位置で周期的に変化している。一方で、ロボットの伸び縮みは内部のBZ反応の酸化還元に対応している。よって、 $l_{i+\frac{1}{2}}$  の変化はBZ反応の濃度を対応していると仮定する。

次に、ロボット内部のBZ反応について考える。式 (1), (2) を差分近似することによって、 $i$  番目のブロックに対応する濃度  $u_i, v_i$  を求める。 $u(x, t) = u(i\Delta, t) = u_i(t)$ ,  $v(x, t) = v(i\Delta, t) = v_i(t)$  ( $i = 0, 1, \dots, M$ ) とおいて、次のように表す。

$$u_{i,t} = D_u \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta x^2} + R_u(u_i, v_i) \quad (7)$$

$$v_{i,t} = D_v \frac{v_{i+1} - 2v_i + v_{i-1}}{\Delta x^2} + R_v(u_i, v_i) \quad (8)$$

ここで、 $\Delta x = L/M$  であり、下付きの添字  $t$  は時間微分を表す。

初期条件、境界条件については次のように考える。

$$\begin{cases} u_M(0) = U_0 & (9) \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{-1}(t) = u_1(t), u_{M+1}(t) = u_{M-1}(t) & (10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{-1}(t) = v_1(t), v_{M+1}(t) = v_{M-1}(t) & (11) \end{cases}$$

初期値は反応領域の右端のみに  $u$  の濃度を与える。境界条件は Neumann 境界条件とした。ただし、 $u_{-1}, u_{M+1}, v_{-1}, v_{M+1}$  は Neumann 境界条件で計算を行うための仮想的な点である。

離散化された濃度の値を用いて、マルチブロックモデルに濃度を対応させる。はじめに、ばねの自然長の変化について考える。ロボットは酸化すると膨張し体積が大きくなり、還元すると収縮して体積が小さくなる。この濃度変化による体積変化を、マルチブロックモデルではばねの伸び縮みとして考える。つまり、ばねの自然長はBZ反応の活性因子の濃度に比例して変化するものとして与える。

$$l_{i+\frac{1}{2}} = l_0 + au_i \quad (12)$$

ただし、 $l_{n+\frac{1}{2}} > 0$  より  $|l_0| > a$  を満たすように  $a$  を設定する。

次に、摩擦について考える。ロボットは酸化して体積が大きくなるとアーチ状に膨張し、地面との接地面積が小さくなると仮定する。つまり、各ブロックにかかる摩擦は酸化しているほど小さく、還元しているほど大きくなるように与える。

$$\zeta_i(t) = \frac{b}{1 + c\left(\frac{u_{i-1} + u_i}{2}\right)} \quad (13)$$

$b, c$  はそれぞれ  $b > 0, c > 0$  を満たすパラメータである。濃度は各ブロックの端点に与えているため、1つのブロックに対して両側の端点の濃度を平均することで、1つのブロックにおける濃度を与えている。

### 3.2 1次元空間で狭空間で進行方向を反転させるモデル

次に、ロボットが狭空間で進行方向を反転させる現象について考える。ロボットの反転には、反応基質のうち還元剤であるマロン酸の濃度が関係している。ロボットは周辺の溶液と相互作用しながら進行する。このとき、還元剤であるマロン酸は、ロボット内部の酸化している場所で吸収されている。ただし、溶液の拡散の効果によってマロン酸の濃度は一様に保たれようとする。しかし、狭空間では壁の影響で拡散が滞り、吸収されたマロン酸の濃度を補うことができなくなる。そのため、マロン酸の濃度が高い方向から新たに反応波が発生し、その波が支配的になる。このようなメカニズムで、ロボットは BZ 反応の反応パターンを変化させ、進行方向を逆転させている。

したがって、ロボットの運動領域におけるマロン酸の濃度場を導入する。マロン酸の拡散と吸収の効果反応拡散方程式によって記述する。

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 m}{\partial x^2} - c_1 m - c_2 m \chi_{\Omega}(x) \quad (14)$$

$$\chi_{\Omega}(x) = \begin{cases} 1 & (u(x, t) \leq C_{th}, x \in \Omega(t), t > 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (15)$$

$$(16)$$

$x \in [-L_m, L_m]$  はシャーレ上の領域、 $m = m(x, t)$  はマロン酸の濃度、 $D_m$  はマロン酸の拡散係数、 $c_1$  はマロン酸の自然分解率、 $c_2$  はマロン酸の吸収率である。また、 $C_{th}$  は酸化の閾値を表し、 $u(x, t)$  がこの値を超えている場所は酸化していると見なす。 $\Omega(t)$  はシャーレ上でロボットの存在する領域である。 $\chi_{\Omega}(x)$  はシャーレ上の領域内でロボットの酸化している場所、つまりマロン酸が吸収される場所では 1、それ以外の場所では 0 を取るような特性関数である。

初期条件と境界条件は次のように与える。

$$\begin{cases} m(x, 0) = m_0 \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} m(-L, t) = m_0 \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} m(L, t) = 0 \end{cases} \quad (19)$$

初期条件は初期濃度  $m_0$  で空間一様に与える。境界条件は左右で分けて考える。左側は開けた空間であり、吸収の効果でマロン酸が減少しても拡散の効果によって一定量供給され続けているという状況を想定し、Dirichlet 境界条件で与える。右側は壁になっており、マロン酸が流れ込んで来ないことから Neumann 境界条件を与える。

このようにして求めた  $m$  をロボット内部の BZ 反応に対応させる。RZ モデルの中でマロン酸の濃度に対応するパラメータは  $\alpha$  に相当する。

$$\alpha(x, t) = \frac{k_4 K_8 m(x, t)}{k_1^2 A^2 h_0^2} \quad (20)$$

よって、求めた  $m$  は式 (4) の  $\alpha$  に含まれる  $m$  に代入する。

### 3.3 2次元空間でBZ反応の濃度に対応して蠕動運動を行うモデル

これまで1次元空間で考えてきた運動を2次元空間に拡張する.

まず, マルチブロックモデルを2次元空間に拡張する.  $(i, j)$  番目のブロックの座標を  $\mathbf{p}_{i,j} = (X_{i,j}, Y_{i,j})^T$ ,  $(i = 1, \dots, M_x)$ ,  $(j = 1, \dots, M_y)$  とする. 2つのブロックは結合しており, その距離をこのとき,  $(i, j)$  番目のブロックを中心に上下, 左右, 斜めに隣接するブロックとの距離を

$$\mathbf{d}_{i+\frac{m}{2}, j+\frac{n}{2}} = \left( (X_{i+\frac{m}{2}, j+\frac{n}{2}} - X_{i,j}), (Y_{i+\frac{n}{2}, j+\frac{n}{2}} - Y_{i,j}) \right)^T \quad (21)$$

と定義する. ただし,  $m, n \in \{-1, 0, 1\}$  である.

また,  $X$  方向の単位ベクトルを  $\mathbf{e}_1 = (1, 0)^T$  とする.  $\mathbf{d}_{i+\frac{m}{2}, j+\frac{n}{2}}$  が  $X$  方向となす角を  $\theta_{i+\frac{m}{2}, j+\frac{n}{2}}$  とすると, ベクトルの内積と外積の関係から,

$$\cos \theta_{i+\frac{m}{2}, j+\frac{n}{2}} = \frac{\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{d}_{i+\frac{m}{2}, j+\frac{n}{2}}}{\|\mathbf{e}_1\| \|\mathbf{d}_{i+\frac{m}{2}, j+\frac{n}{2}}\|} \quad (22)$$

$$\sin \theta_{i+\frac{m}{2}, j+\frac{n}{2}} = \frac{(\mathbf{e}_1 \times \mathbf{d}_{i+\frac{m}{2}, j+\frac{n}{2}})_3}{\|\mathbf{e}_1\| \|\mathbf{d}_{i+\frac{m}{2}, j+\frac{n}{2}}\|} \quad (23)$$

である. ここで,  $(\mathbf{a} \times \mathbf{b})_3$  は外積の第3成分とし,

$$(\mathbf{a} \times \mathbf{b})_3 = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & 0 \\ a_2 & b_2 & 0 \\ a_3 & b_3 & 1 \end{vmatrix} = a_1 b_2 - a_2 b_1 \quad (24)$$

と表す. このようにして求めた  $\cos \theta$  と  $\sin \theta$  を用いて力を2方向に分解する.

同様にBZ反応も2次元に拡張して考える.  $(x, y) \in [0, L_x] \times [0, L_y]$  とする.

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = D_u \Delta u + R_u(u, v) \\ \frac{\partial v}{\partial t} = D_v \Delta v + R_v(u, v) \end{cases} \quad (25)$$

$$\quad (26)$$

1次元と同様に式(25), (26)を差分近似する.  $u(x, y, t) = u(i\Delta x, j\Delta y, t) = u_{i,j}(t)$ ,  $v(x, y, t) = v(i\Delta x, j\Delta y, t) = v_{i,j}(t)$  ( $i = 0, 1, \dots, M_x$ ), ( $j = 0, 1, \dots, M_y$ ) とする.

$$u_{i,j,t} = D_u \left( \frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i,j}}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right) + R_u(u, v) \quad (27)$$

$$v_{i,j,t} = D_v \left( \frac{v_{i+1,j} - 2v_{i,j} + v_{i,j}}{\Delta x^2} + \frac{v_{i,j+1} - 2v_{i,j} + v_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right) + R_v(u, v) \quad (28)$$

境界条件は Neumann 境界条件で与える.

以上より、2次元のマルチブロックモデルに濃度を組み込んだモデルを構築した。

$$\zeta_{i,j} \dot{p}_{i,j} = K \left[ \sum_{m,n \in \{-1,0,1\}} p_{i+m,j+n} - 8p_{i,j} - \sum_{m,n \in \{-1,0,1\}} l_{i+\frac{m}{2},j+\frac{n}{2}} \right] \quad (29)$$

$$l_{i+\frac{m}{2},j+\frac{n}{2}} = H_{m,n} (l_0 + U_{m,n}) \begin{pmatrix} \cos \theta_{i+\frac{m}{2},j+\frac{n}{2}} \\ \sin \theta_{i+\frac{m}{2},j+\frac{n}{2}} \end{pmatrix} \quad (30)$$

$$H_{m,n} = \begin{cases} 1 & (m = 0 \text{ or } n = 0) \\ \sqrt{2} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (31)$$

$$U_{m,n} = \begin{cases} a \frac{u_{i,j+\frac{n+1}{2}} + u_{i+1,j+\frac{n+1}{2}}}{2} & (m = 0) \\ a \frac{u_{i+\frac{m+1}{2},j} + u_{i+\frac{m+1}{2},j+1}}{2} & (n = 0) \\ au_{i+\frac{m+1}{2},j+\frac{n+1}{2}} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (32)$$

$$\zeta_{i,j} = \frac{b}{1 + c \left( \frac{u_{i,j} + u_{i+1,j} + u_{i,j+1} + u_{i+1,j+1}}{4} \right)} \quad (33)$$

式 (29) は2次元に拡張したマルチブロックモデルを表す。1つのブロックにつき、上下、左右、斜めの8つのブロックとの結合を考える。

式 (30)～式 (32) はばねの自然長と濃度の対応を表す。上下、左右に結合したブロックの場合、ばねがまたがるブロックの辺の端点の濃度を平均して与える。斜めに結合したブロックの場合、結合の方向に対応した端点の濃度を与える。また、ブロックが斜めに結合している場合はばねの長さを $\sqrt{2}$ 倍して与える。このようにして求めたばねの自然長の長さを $\cos \theta$ ,  $\sin \theta$ を用いて $X$ 方向と $Y$ 方向にそれぞれ分解する。

式 (33) は摩擦と濃度の対応を表す。1つのブロックに対して4つの頂点に濃度が与えられている。そのため、4つの頂点に与えられた濃度の平均を求めることで、1つのブロックにおける濃度を与える。1次元の場合と同様に、酸化している場所で摩擦が小さくなるように設定する。

### 3.4 2次元空間で狭空間で進行方向を反転させるモデル

1次元空間と同様に2次元空間のマロン酸の濃度場を導入する。

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D_m \Delta m - c_1 m - c_2 m \chi_\Omega(x, y) \quad (34)$$

$$\chi_\Omega(x, y) = \begin{cases} 1 & (u(x, y, t) \leq C_{th}, x, y \in \Omega(t), t > 0) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (35)$$

$$(36)$$

$(x, y) \in [0, L_{m_x}] \times [0, L_{m_y}]$  はシャーレ上の領域、 $m = m(x, y, t)$  はマロン酸の濃度である。

初期条件と境界条件は次のように与える。

$$\begin{cases} m(x, y, 0) = m_0 \end{cases} \quad (37)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} m(0, y, t) = \frac{\partial}{\partial x} m(L_x, y, t) = 0 \end{cases} \quad (38)$$

$$\begin{cases} m(x, 0, t) = m_0 \end{cases} \quad (39)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial y} m(x, L_y, t) = 0 \end{cases} \quad (40)$$

初期条件は初期濃度  $m_0$  で空間一様に与える。境界条件はコの字型の壁を Neumann 境界条件で与え、開けた空間を Dirichlet 境界条件で与える。このようにして求めた  $m$  を RZ モデルのパラメータ  $\alpha$  に代入する。

## 4 シミュレーション結果

### 4.1 1次元空間で狭空間で進行方向を反転させるモデル

1次元でマロン酸の濃度場を導入し反転を考慮したモデルのシミュレーション結果を図3に示す。グラフは左からロボットの運動とマロン酸の濃度、ロボット内のBZ反応、右端のブロックの座標変化を表す。1つ目のグラフの下側の長方形がロボットを表す。ロボット内の色の変化は  $u$  の濃度の大きさを表し、小さい方から赤 → 緑 → 青で表す。上側の緑線は、マロン酸の濃度  $m$  を表す。初期値は一様に与えるが、ロボットの酸化している場所で吸収される。2つ目のグラフは、赤線が  $u$  の濃度、青線が  $v$  の濃度を表す。

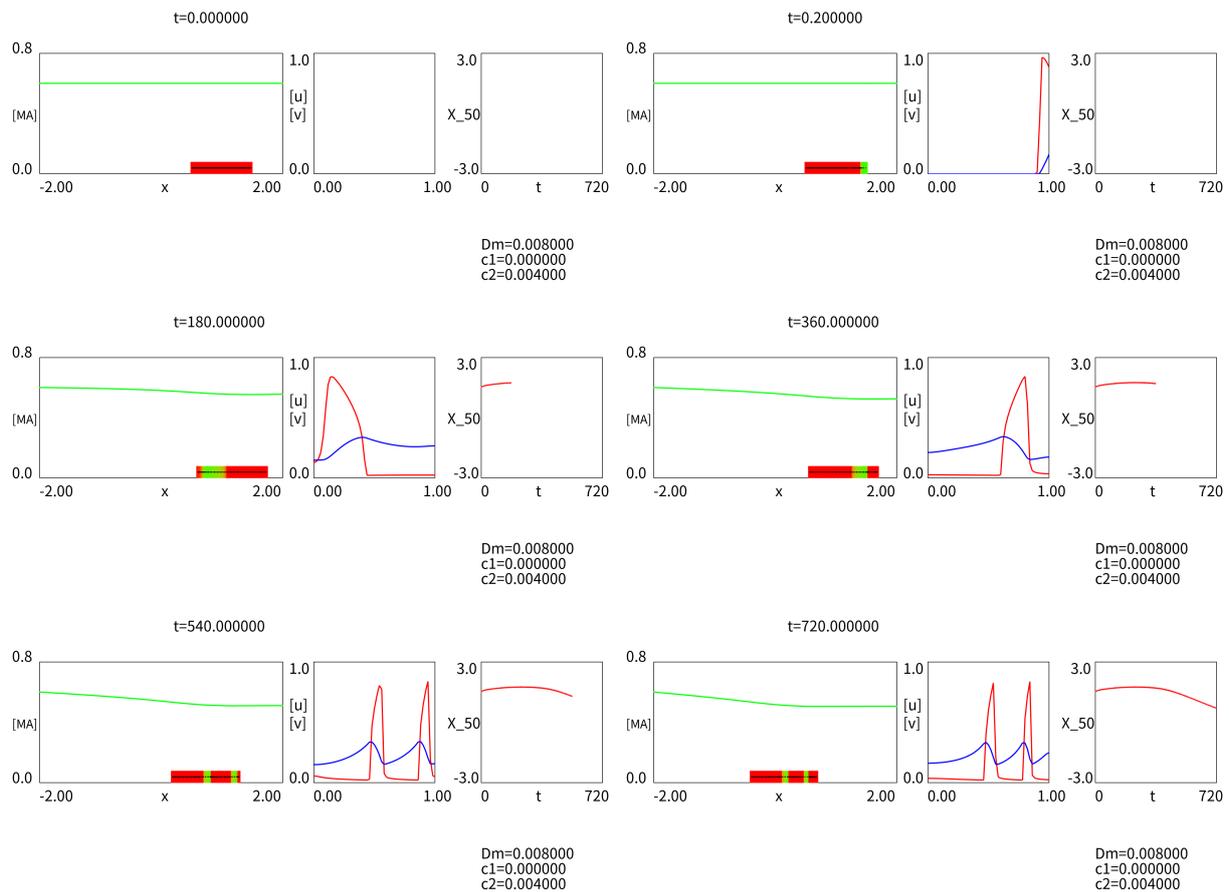


図3: 左:ロボットの運動とマロン酸の濃度場, 中央:ロボット内のBZ反応, 右:右端のブロックの座標変化. パラメータは  $M = 50, K = 20, l_0 = 1/M, a = 3l_0/4, D_u = 8.0 \times 10^{-8}, D_v = 8.0 \times 10^{-8}, q = 0.5, \alpha = 0.6, \varepsilon = 0.01, \mu = 0.02, a' = 1, b = 1.1, D_m = 8.0 \times 10^{-3}, c_1 = 0, c_2 = 4.0 \times 10^{-3}, m_0 = 0.6$

初期値を右端のみに与えると、右から左に向かって反応波が伝播する。このとき、ロボットは反応波とは対称的に左から右に向かって進行していく。その間、ロボットの運動に合わせてマロン酸が吸収されていく。右側の壁に差し掛かると、ロボットの右側と左側で濃度差が生まれ、新たに左側から右側に向かって伝播する反応波が発生する。最終的に、新たに発生した右向き反応波が左向きの波を打ち消し、ロボットは左側に進行することが確認できる。

## 4.2 2次元空間で狭空間で進行方向を反転させるモデル

2次元でマロン酸の濃度場を導入し反転を考慮したモデルのシミュレーション結果を図4に示す。グラフは左からロボットの運動、ロボット内のBZ反応、マロン酸の濃度を表す。ロボット内の色とマロン酸の濃度場の色はマロン酸の濃度の大きさを示しており、大きい方から赤→緑→青で表す。

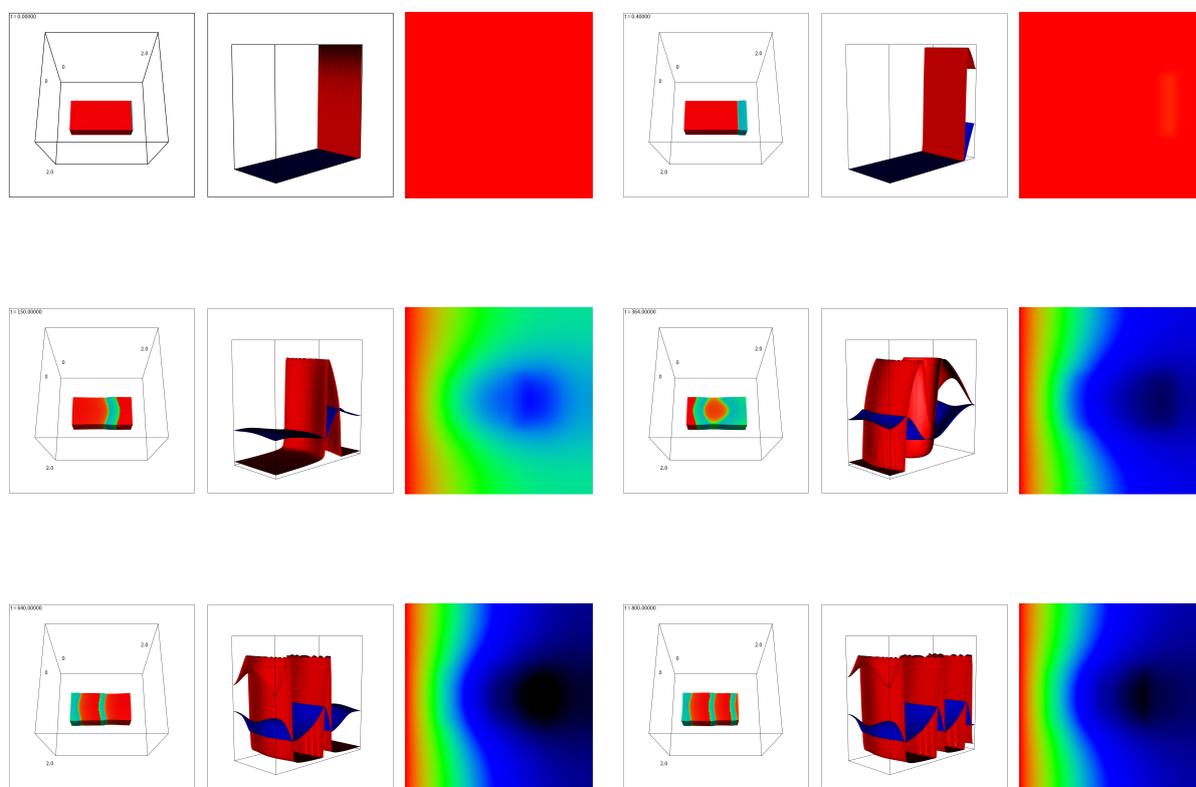


図4: 左:ロボットの運動とマロン酸の濃度場, 中央:ロボット内のBZ反応, 右:マロン酸の濃度場パラメータは  $M_x = 50$ ,  $M_y = 100$ ,  $K = 2.0$ ,  $l_0 = 1.0/M$ ,  $a = 0.75l_0$ ,  $D_u = 8.0 \times 10^{-8}$ ,  $D_v = 8.0 \times 10^{-8}$ ,  $q = 0.5$ ,  $\alpha = 0.5$ ,  $\varepsilon = 0.01$ ,  $\mu = 0.02$ ,  $b = 1.1$ ,  $c = 4.0$ ,  $D_m = 8.0 \times 10^{-3}$ ,  $c_1 = 0$ ,  $c_2 = 4.0 \times 10^{-3}$

初期値を右側縦1列に与えると、右から左に向かって反応波が伝播する。このとき、ロボットは反応波とは対称的に左から右に向かって進行することが確認できる。また、ロボットは形状を保ったまま運動していることが確認できる。その間、ロボットの運動に合わせてマロン酸が吸収されていく。

右側の壁に差し掛かると、ロボットの右側と左側で濃度差が生まれ、新たに左側から右側に向かって伝播する反応波が発生する。最終的に、新たに発生した右向きの反応波が左向きの波を打ち消し、ロボットは左側に進行することが確認できる。

## 5 まとめと今後の展望

本研究では、BZ 反応の濃度変化に対応して蠕動運動を起こし、狭空間で反転する化学反応系ロボットの数理モデルを構築した。まず、マルチブロックモデルの自然長と摩擦の項に BZ 反応の濃度に対応させることで、ロボットの方向性のある運動を再現した。さらに、ロボットの運動領域にマロン酸の濃度場を導入することで、マロン酸の吸収によって濃度勾配に応じて反応パターンを変化させ、進行方向を反転させる様子を再現した。また、1次元空間で考えたモデルを2次元空間に拡張し、運動の様子を再現した。

今後は、次の3点について検討をしている。1点目は、より適したパラメータの調査である。BZ 反応の計算において分割数を多くすると周期が変わってしまうため、分割数が多いときに対応した反応周期のパラメータを見つける必要がある。また、うまく反転が発生するようなパラメータの範囲を調査する必要がある。2点目は、ロボットの大きさの変化を導入することである。ロボット内部の BZ 反応は固定領域上で計算しているが、実際はロボットの収縮・膨張によって領域が変化している。大きさが増えるような領域上での BZ 反応を考えることで、より実験の条件を忠実に再現できると考えられる。3点目は、別領域でのシミュレーションである。実験の再現のため、コの字型の領域を考えたが、ロボットの運動領域を円や星形などの複雑な形に変化させた場合の計算を行いたい。

■謝辞 本研究は、科研費(課題番号:21H03512)の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] 櫻沢繁, BZ ゲルを用いた化学知能ロボットのデザイン, 平成 24~26 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 2015.
- [2] 吉田亮, 化学振動反応を利用した自励振動ゲルの設計, *Electrochemistry*, Vol.71, No.5, pp.337-341, 2003.
- [3] 前田真吾, 原雄介, 吉田亮, 橋本周司, 化学ロボットの実現を目指した自励振動ゲルアクチュエーターの創製, *高分子論文集*, Vol.65, No.10, pp.634-640, 2008.
- [4] 吉田彩乃, 櫻沢繁, 計算としての化学反応によるゲルのロコモーション, *Journal of Computer Chemistry, Japan*, Vol.16, No.1, pp.17-21, 2017.
- [5] 三池秀敏, 森義仁, 山口智彦, 非平衡系の科学 III 反応・拡散系のダイナミクス, 講談社, 1997.
- [6] Y. Tanaka, K. Ito, T. Nakagaki, and R. Kobayashi, Mechanics of peristaltic locomotion and role of anchoring, *Journal of The Royal Society Interface*, Vol.9, No.67, pp.222-233, 2011.
- [7] A. B. Rovinskii and A. M. Zhabotinskii, Mechanism and mathematical model of the oscillating bromate-ferroin-bromomalonic acid reaction, *The Journal of Physical Chemistry*, Vol.88, No.25, pp.6081-6084, 1984.