

## 知的粒子流の分子運動論的数値シミュレーション\*

(指向性個体間ポテンシャルと動機関数)

平原裕行\*<sup>1</sup>, 川橋正昭\*<sup>1</sup>, 荒館 俊\*<sup>2</sup>

### Numerical Simulation of Intellectual Particle Flows Based on a Molecular Dynamics Method (Directional Individual Potential and Motivation Function)

Hiroyuki HIRAHARA\*<sup>3</sup>, Masaaki KAWAHASHI and Takashi ARADATE

\*<sup>3</sup> Department of Mechanical Engineering, Saitama University,  
255 Shimo-Okubo, Saitama-shi, Saitama, 338-8570 Japan

A numerical simulation technique of creature's flow was proposed on the basis of molecular dynamics method. Creatures, such as humans, fishes, bird and so on, usually move in a cluster or crowd. Features of crowd's behavior were discussed from the point of fluid dynamical view. The motivation of its motion was classified into a several categories due to intelligent level. In the present report, three primitive categories were taken into the consideration. In order to express a suitable individual potential, directional and influence functions were introduced to with a dependency of creature's view angle. Macroscopic quantities of state such as temperature, density, and pressure of the crowd were defined for a local region in the creature flow. An interaction between two intellectual particles and crossing flows between two crowds were simulated and discussed in detail.

**Key Words:** Creature's Flow, Numerical Simulation, Molecular Dynamics, Molecular Potential, Motivation Function

#### 1. 序論

我々が通常'流れ'として取り扱っているものは、気体、液体、あるいは固体粒子などが混入した流れで、いわゆる媒質が連続体とみなされる場合がほとんどである。これに対して、一見、連続体とは思われない離散的な要素によって構成される集合体の運動でも、時空間的にマクロに眺めると流れを形成しているようにみせるものがある。例えば、多くの固体粒子の形成する流れや自動車の流れ、人の流れ、鳥や魚などの群集の流れなどがそれにあたる。これら離散系の流れは、従来より様々な解析が行われてきた。代表的な例として交通流の研究がある。交通

流<sup>1)</sup>に関しては、都市工学、制御工学的観点から盛んに研究が行われ、各車両の平均速度と相対速度の関係、車間距離の状態の把握、交通の流れの中での情報の伝達問題などが議論され成果をあげている。

一方、知性を持つ生物も、群れとして行動するときには、様々な特徴ある性質を示す。このような生物群の行動は、生物学、環境工学的に興味ある問題であり、これまでに幾つかの解析が行われている。魚群や鳥の群れの行動は従来から生態学的に様々なアプローチが行われており、人の群集の行動についても研究が行われている<sup>2)</sup>。これらは、従来のシステム工学的な観点からのみならず、最近では複雑系をなすシステムとしても近年研究の広がりを見せている。例えば、めだかの群れのシミュレーション<sup>3)</sup>が複雑系の問題として取り上げられている。それによれば、めだかの集団運動がシミュレーションされ、集団の行動、分裂、個体の飛散などが表現されている。このような現象は、群をなす個々の個体の行動をある規則によって予測し、相互の干渉を明確

\* 原稿受付 2001年5月21日。

\*<sup>1</sup> 正員、埼玉大学工学部(☎338-8570 さいたま市下大久保255)。

\*<sup>2</sup> 埼玉大学大学院理工学研究科。

E-mail: hhira@mech.saitama-u.ac.jp

に規則付けることで解明していくことができる。しかしながら、個体の行動を律する規則は複雑でその解析手法はまちまちである。

さて、気体や、液体を離散系として眺めて、その運動を解析しようとする手法に、分子動力学法がある。このような、気体力学の運動解析手法を用いて生物の個体の運動を解析することが本論文の目的である。本論文では、生物や交通の流れを総称して、知的粒子流と呼ぶことにする。これに対して、気体の運動は、まったく知性を有しない粒子群の運動の解析として解釈できるであろう。知的粒子流を流体力学的に観察した場合、流体力学との間にアナロジーの成り立つことが多く、その意味で流体力学的なアプローチはこれらの流れの解析に多くの知見を与えるものと期待される。例えば、高速道路で車線が減少するときの渋滞の問題は、超音速流れと間に単純なアナロジーが成り立ち、事故の情報は衝撃波によく例えられる。Courant と Friedrichs のテキストで用いられた絵は Shapiro<sup>10)</sup>のテキストの中でも引用されている。そこでは、衝撃波を初心者的印象的に理解させるために、複数のスキーヤーが徐々に木にぶつかり、その衝突によってスタックしていく様子が描かれている。Witham<sup>11)</sup>は交通問題の解析の一つとして、交通変動量を、道路上を伝播する特性曲線として表現した。

以上のように、離散系の流れの問題に対しては、それぞれに種々の試みがなされているが、これらの問題を統一的に扱い、異なる群集の間の特徴を抽出して議論することは大変意義のあることである。そのためには、生物のような離散系に対して、個々の個体を統計的な性質を持った粒子として捉えることで、力学的な展開の可能性が見えてくる。

本研究は、個体の運動を分子運動論的表現から出発して展開し、生物群の運動の特徴、及び知的な性質を付加することで、群れの運動の解析を行うものである。本報告では、このような観点から、人の流れを例にとり、そのアプローチについて議論している。このようにすることによって、群集の持つ性質や現象を力学的に説明し、同時に、エネルギー、温度、圧力といったマクロな状態量も用いて群集の特徴を抽出することが本研究の目的である。

## 2. 個体間の力学

**2.1 行動の要素** はじめに、生物個体の運動の動機（モチベーション）について考える。図1に示したように、ある個体は他の個体との干渉によって、自らの行動を決定する場合、行動の原因には様々な要素が関係していると考えられる。下記の要素は、生物が自らの行動を決定するときの、知的判

断レベルの低い順から列挙したものである。ここで知的判断レベルの基準となるのは、あくまでも、力学的に解析するための判断に基づくもので、厳密な意味での生態学的基準とは異なることを断っておく。

- ①行動の基本的モチベーション
- ②接触による知覚情報
- ③近距離の視覚情報
- ④偶発的な方向転換
- ⑤聴覚情報
- ⑥遠距離の視覚情報
- ⑦学習によって得た習性から生じる行動

まず、要素①は、個体が行動を開始するための基本的なモチベーションである。例えば、これは、ある個体が目的の地点へ移動しようとするときの行動の基本要素となる。そして、個体が運動を始め、他の個体と接触した場合、運動の方向転換を行う。これは②に示した要素による。図1においては、個体の大きさは円で示した。他の個体は、少なくとも、この半径以下には進入することはできない。通常はこのような接触は起こらず、周囲に他の個体が接近した場合には視覚情報によって接触回避、または他の個体に追従する行動をとる。③はそのような行動の要素である。④は生物の行動によく見られる無意識の内に方向を転換しようとする要素である。⑤か

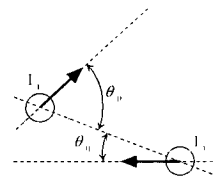


Fig.1 Interaction between two individuals

ら⑦は高度に知的な要素である。例えば⑥に示した要素は、遠方で生じている混乱の情報が③の要素によって徐々に個体間を伝わり、自分に到達しようとする前に、この混乱を回避しようとするような要素である。今回の報告では①から③の要素を主として取り扱う。①から③は、個体が群として行動するとき、極く近傍の周囲個体の影響を受けて、自らの行動を決定する要素とみなせる。これらは、分子運動論的な干渉プロセスで表現することが可能であると期待される。

**2.2 個体のポテンシャル** 分子動力学における分子運動の根本は、分子が有する分子間ポテンシャルにある。要素②と③を考慮するために、はじめに、各個体の個体間ポテンシャルを導入する。ここでは、個体の種として、'人'を想定して考えることにする。人の行動は基本的に視覚的な情報によって大きく影響を受ける。視覚は個体前方については敏感であるが、側方、後方に関しては鈍感である。

分子運動とのアナロジーを考えると、角度依存性を有する個体ポテンシャルは、分極した分子の分子間ポテンシャルに相当すると言える。ここでは、より単純にこのポテンシャルを扱うために、後で述べる個体間ポテンシャルと指向性関数を導入してこれを表現する。

はじめに、無指向性の個体間ポテンシャルから導入する。一般に分子間ポテンシャルは次のように表現される。

$$U(r) = a \left( \frac{d}{r} \right)^s - b \left( \frac{d}{r} \right)^{s'} \quad (1)$$

上式の第1項が斥力項、第2項が引力項である。これらの定数  $a, b, s, s', d$  を適切に設定することで分子間ポテンシャルを表現することができる。レナードジョーンズポテンシャルでは以下の様な形式である。

$$U(r) = 4\varepsilon \left[ \left( \frac{d}{r} \right)^{12} - \left( \frac{d}{r} \right)^6 \right] \quad (2)$$

さて、ここで

$$U(r) = a' \varepsilon \left[ \left( \frac{d}{r} \right)^s - \left( \frac{d}{r} \right)^{s'} \right] \quad (3)$$

とおき、各定数に最適な値を決定する。 $s = q s'$  として、 $U$  が最小値になる  $r$  の値を  $r_B$  とし、このときに  $U = -\varepsilon$  となるように  $d$  を定める。 $\varepsilon$  はポテンシャルの井戸の深さである。ポテンシャルの形状を決定する基本パラメータは、 $s, q, d$  である。ここで  $d$  は、個体ポテンシャルが 0 となる点で、個体の大きさを決める定数である。 $r = r_B$  で分子間力は 0 となり  $r < r_B$  で斥力、 $r > r_B$  で引力が作用する。 $r_B$  と  $s, q$  の関係を式(3)より求めると以下の通りである。

$$r_B = \frac{1}{q^{(q-1)s'}} d \quad (4)$$

また、 $a'$  は  $q$  を用いて次式のように表される。

$$a' = \frac{q}{q-1} \quad (5)$$

式(4)より求めた  $r_B$  と  $q$  の関係を図2に示す。 $s, q$  のいずれも値が小さいほど、柔らかい個体であることに対応する。 $q$  が大きければ大きいほど、斥力項の勾配が急になり剛体に近づくことになる。 $r_B$  の値は重要で、個体がどの程度、近接して存在し得るかの

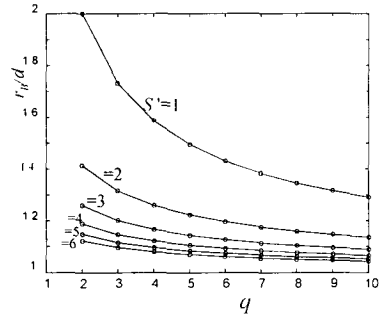


Fig.2 Parameters of potential function

指標を与える。人の場合にあてはめると、 $r_B$  はおよそ 1.5d ほどが妥当であると思われる。このような推論から、 $s=1$  で  $q=4 \sim 6$  が適切であると考えられる。本報告では、 $s=1, q=6$  を選択した。もちろん、これらの値は、現段階では、一義的なものではないと考えている。様々な生物、個体間の大きさ、性質の相違などに対して、適切な値を決定する手法を検討しなければならないと考えられる。

次に、要素③について考察する。図1において、個体  $j$  が個体  $i$  から受ける力については、次の二つについて考慮しなければならない。

③-1: 個体同士が接近した場合、接触を避けるため前方には斥力が作用する。

③-2: 個体間で追隨する性質を表すために個体背後で引力が作用する。

以上の点を考慮するため、本研究では指向性関数を導入した。指向性関数は単純に余弦関数を用いたもので、次式のように表現した。

$$U(r) = \frac{6^{\alpha_i}}{5} \varepsilon \left( \alpha_i^+ \left( \frac{d}{r} \right)^s - \alpha_i^- \left( \frac{d}{r} \right)^{s'} \right) \\ = \frac{6^{\alpha_i}}{5} \varepsilon \left( \frac{1 + 5 \cos^2 \theta}{2} \left( \frac{d}{r} \right)^s - \frac{1 - \cos \theta}{2} \left( \frac{d}{r} \right)^{s'} \right) \quad (6)$$

上式に示したように、 $\alpha_i^+$  は個体  $i$  の斥力項指向性関数、 $\alpha_i^-$  は引力項指向性関数である。図3に  $\alpha_i^+$  と  $\alpha_i^-$  を、図4に個体間ポテンシャル関数の形状を、指向性関数を考慮しない場合と考慮した場合について示す。

次に、再び図1において、個体  $i$  と個体  $j$  との干渉について考える。図1に示したように、個体  $j$  と

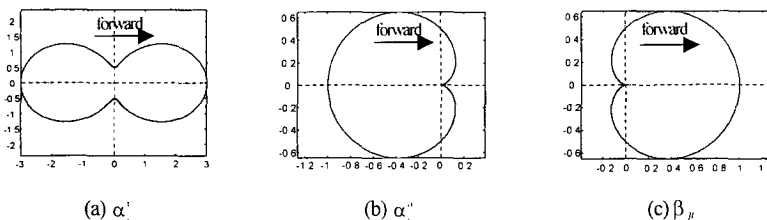


Fig.3 Directional and influence functions.

$i$ との相対関係は、距離  $r$ 、および個体  $j, i$ それぞれに対する個体進行方向の方位角の 2 自由度を考慮しなければならない。個体  $j$  を中心に考えた場合、個体  $j$  から距離  $r$  離れた位置にいる個体  $i$  によって及ぼされるポテンシャルによる影響は式(6)に基づき与えられる。式(6)の中の  $\theta$  は個体  $i$  の進行方向(前方)と個体  $j$  とのなす角で、これを  $\theta_j$  と表す。次に、個体  $j$  の進行方向と個体  $i$  とのなす角度により、個体  $j$  が個体  $i$  の存在をどの程度認知するかを考慮しなければならない。すなわち、次の条件が重要となる。

③・3: 視野前方方向に敏感で後方からはほとんど視覚情報は得られない。

$\theta_j$  は、これを考慮するための角度である。この認知の程度を考慮するために影響係数  $\beta_j$  を定義する。

$$\beta_j = \frac{1 + \cos \theta_j}{2} \quad (7)$$

以上から、個体  $i, j$  間の運動を次式で計算する。

$$\begin{aligned} \frac{m_i m_j}{m_i + m_j} \frac{dv_i}{dt} &= \mu_j \frac{dv_j}{dt} = \beta_j \frac{r}{r} \frac{dU_j}{dr} \\ &= \frac{1 + \cos \theta_j}{2} \frac{r}{r} \frac{d}{dt} \left[ \frac{6^{\theta_j}}{5} \varepsilon \left( \frac{1 + 5 \cos^2 \theta_j}{2} \left( \frac{d}{r} \right)^6 - \frac{1 - \cos \theta_j}{2} \left( \frac{d}{r} \right)^4 \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

ここに  $m_j, m_i$  は個体  $j, i$  の質量であり、 $\mu_j$  は、換算質量と呼ばれる。個体  $i$  と  $j$  の位置ベクトルを  $r_i, r_j$  としたとき、 $r = r_i - r_j$  で、 $r$  は相対位置ベクトルを表している。上式を積分して、個体  $j$  に対する運動は次のように表現される。

$$\begin{aligned} v_j^{t_2} &= v_j^{t_1} + \frac{1}{\mu_j} \frac{m_j}{m_i + m_j} \int_{t_1}^{t_2} \beta_j \frac{r}{r} \frac{dU_j}{dr} dt \\ &= v_j^{t_1} + \frac{1}{m_j} \int_{t_1}^{t_2} \beta_j \frac{r}{r} \frac{dU_j}{dr} dt \end{aligned} \quad (9)$$

上式は、時刻  $t_1$  における個体  $j$  の速度が  $v_j^{t_1}$  であったとき、時刻  $t_2$  の速度  $v_j^{t_2}$  は、第 2 項の速度変動分を加えることによって得られることを示している。これは、個体の運動が、初期値問題として決定され

ることを意味する。これに加えて、生物は、他の個体と干渉する際にも、①に示した運動の基本モティベーションを保持しながら行動すると考えるのが妥当である。時刻  $t_2$  における個体干渉によって生じた速度変動分  $v_j^{t_2}$  に動機関数を付加して、個体の速度  $V_j^{t_2}$  を表現すると次のようになる。

$$\begin{aligned} V_j^{t_2} &= M_j + v_j^{t_2} \\ &= M_j + v_j^{t_1} + \frac{1}{m_j} \int_{t_1}^{t_2} \beta_j \frac{r}{r} \frac{dU_j}{dr} dt \end{aligned} \quad (10)$$

個体  $j$  の持つ動機関数  $M_j$  は単純な行動では、通常は定ベクトルで、一般的には時間や空間の関数として表現することもできる。時間、空間的な関数として予め定義することでより複雑な目的行動を表現できる。 $v_j^{t_2}$  の成分  $v_j^{t_1}$  は、前の時刻の速度である。このように時刻  $t_2$  の速度  $v_j^{t_2}$  が前の時刻の速度  $v_j^{t_1}$  を保存しつつ、動機関数  $M_j$  の効果が線形的に重ね合わされる力学系は、自然であると考えられるが、生物の運動の場合には、後の 3.1 節、図 5(a)で説明するように、必ずしも妥当な結果を与えず、むしろ時間積分の各ステップで  $v_j^{t_1} = 0$  とした場合の方が妥当な結果を与える。計算の各ステップで  $v_j^{t_1} = 0$  とすると言うことは、運動を決定する計算の各ステップで前の時刻の慣性を切り捨てていることに他ならない。例えば、人がゆっくり運動するときには、前の時刻の慣性はほとんど無いと言っても良い。一方、鳥などの運動の場合はこの慣性を無視できず、むしろ保存的である。式(10)の各項をどう取り扱うかは非常に重要で、その物理的な意味については次章で議論する。

**2.3 マクロ量の定義** 次に群集中の  $N$  個の母集団を対象にした局所的な温度、数密度、圧力などのマクロ量を、古典分子運動論とのアナロジーから定義する。

ここでは、2次元の場合に話を限定する。まず、個体  $i$  近傍における局所数密度  $n$ 、局所密度  $\rho$  につい

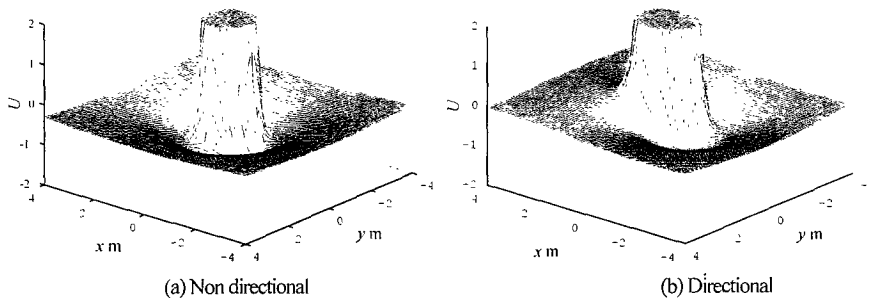


Fig.4 Individual potentials

て考える。個体  $i$  の周囲の  $N-1$  個体を対象とし、 $N-1$  番目に近い個体までの距離を  $r_N$  とすれば、

$$n = \frac{N}{\pi r_N^2} \quad \rho = \frac{n}{N} \sum m_i = n v \quad (11)$$

ここで、

$$v = \frac{\sum m_i}{N} \quad (12)$$

は、局所的な平均質量である。また、集団の全個体に対しても同様な数を定義する。

$$v_0 = \frac{\sum_{N_0} m_i}{N_0} \quad (13)$$

$N_0$  は、全個体数である。 $v_0$  は、具体的には、対象を人にした場合、小集団の平均体重である。ここで、 $v$  と  $v_0$  との比は、個体集団の質量分布における偏在の程度を表す。これを次式で定義する。

$$S = \frac{v}{v_0} \quad (14)$$

次に局所温度は群集の平均速度  $\bar{V}$  からの変動成分をもとに次式で表す。

$$T = \frac{1}{kN} \left\langle \frac{1}{2} \sum m_i (V_i - \bar{V})^2 \right\rangle \quad (15)$$

ここに、 $k$  はボルツマン定数に相当する定数である。 $k$  は個体 1 個が有する特定の運動エネルギーに対する尺度を与える定数であると考え、この値を適当に定めることにより、生物の運動における温度の次元  $K$  を定義することができる。すなわち、温度  $T$  は、個体  $i$  を中心とした  $N$  個の個体が局所平均的に有する熱的なエネルギーと  $k$  との比として定義されるものとして表す。例えば平均速度を基準にして、その 1/10 あるいは 1/100 程度を生物が認知する速度変動と考えて  $k$  の値を決める方法が考えられる。ここでは、 $k$  を個体の平均質量と平均速度の 1/10 を用いて定義した。例えば、平均質量 60Kg、平均速度 1.1m/s の人の場合には次の値を取る。

$$k = \frac{1}{2} \times 60 \times 0.11^2 = 0.363 \quad (\text{J/K}) \quad (16)$$

2 次元の場合の局所圧力は気体の状態方程式とのアナロジーから次式で定義する。

$$p = nkT = n v \frac{v_0}{v} \frac{k}{v_0} T = \frac{\rho RT}{S} \quad (17)$$

$$= \frac{\rho}{vN} \left\langle \frac{1}{2} \sum m_i (V_i - \bar{V})^2 \right\rangle$$

上式において、 $R = k/v_0$  (J/kgK) は、熱力学の気体定数に相当する定数である。 $R$  は調べたい個体

集団の物性値であり、対象とする種のそれぞれに対して定義されるべきものである。式(17)は、この  $R$  を偏在係数  $S$  で除した値で表された局所的な状態方程式である。圧力は、Nm の次元を持ち単位長さ当たりの力として定義できる。ここで定義した圧力とは、上で定義した温度と同様に、個体間の干渉によって生じる速度変動によって計算されるものである。その意味で、これらの温度、圧力を変動温度、変動圧力と呼ぶことにする。一方、分子間力によるビリアルのように、個体ポテンシャルによって作用する力も圧力として考慮されなければならない。生物のように個体が離散的に存在する場合には、この個体間力によるビアリアルの評価の方がむしろ重要であると考えられるが、ここでは、これ以上議論しない。

### 3. 計算手法の検討と人の流れへの適用

**3-1 個体間の運動のシミュレーション** はじめに、本シミュレーションを人の場合に適用した結果を以下に示す。初めに、図5に示したような2個体間の干渉のシミュレーションを行った。計算のパラメータを表1に示す。個体1 ( $I_1$ ) は静止して左方向を向いており、個体2 ( $I_2$ ) が左方向から右方向に近づいていく場合のシミュレーションである。 $I_2$  は、図において右方向に一定速度 1.1m/s の初期速度、またはモティベーションを与えた。 $I_1$  と  $I_2$  が有するポテンシャルはいずれも同じ大きさで、 $I_1$  の指向性は左向き、 $I_2$  の指向性は右向きである。 $I_2$  の初期位置を  $y$  方向に 0.2m ずつずらしたときの  $I_1$  に対する相対運動を、式(10)にもとづき時間積分して求めたときの軌跡を実線で示した。時間積分の時間間隔は  $\Delta t = 0.02$  sec である。図5(a)は、 $I_2$  が  $M = 0$  で、 $v_1^i$  が保存的であり、かつ指向性を考慮しない場合の結果である。これは、単純な粒子同士の干渉シミュレーションに等しい。当然のことながら、干渉のパターンは単純な散乱パターンとほぼ同様である。 $y=0$  から出発した個体は、正面衝突し、正反対方向にはね返される。破線は、その最接近距離を元にした円である。なお、 $M$  を考慮した場合の結果は、この図に示された結果に、 $M$  によって生じる  $x$  の正方向への運動を単純に重ね合わせた結果となることが容易に推定できる。

図5(b),(c)は  $M = (1.1, 0)$  m/s のモティベーションを有し、 $v_1^i = 0$  としたときの結果である。図(b)は指向性関数、影響関数を考慮しない場合の結果、図(c)は、両関数を考慮した結果である。 $I_2$  は、モティベーションを有しているため、常に  $x$  の正方向に 1.1m/s で移動しようとする。 $I_2$  は、 $I_1$  に接近するにつれ、これを迂回するような軌跡を描く。運動方向

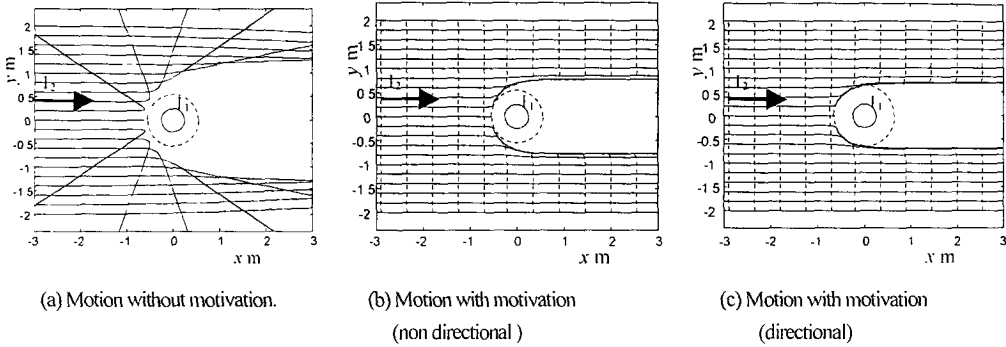


Fig.5 Interaction between two individuals

Table 1 Simulation parameters

$s, s'$	1, 6
$d$	1.0
$\varepsilon$	1.0
$\Delta t$	0.02

が変化するとき、 $I_2$ の向き(指向性関数の角度  $\theta$  の方向)は、運動方向に向くように設定している。すなわち、個体の速度ベクトルの向きに常に個体の前面が向くと考えている。シミュレーションの結果は、 $I_2$ が $I_1$ の存在によって $I_1$ との衝突を回避して迂回する行動がよく表現されている。 $I_2$ が $y=0$ の位置から運動し始めた場合には、 $I_1$ と正面で干渉するので、 $I_2$ は運動の釣り合い点で静止する。その位置の長さを半径にして描いた円が図に示した $I_1$ を中心とする破線の円である。この円を基準にして考えると、 $y \neq 0$ の場合、 $I_2$ が釣り合い半径よりもより接近して $I_1$ を通過していることがわかる。その接近の度合いは、ポテンシャルの硬さによって大きく影響を受ける。ポテンシャルが硬いと、この破線の円周にほぼ沿うように $I_2$ は移動する。

**3-2 群集のシミュレーション** 次に二つの群集の干渉の一例として、クロスフローを考える。群集Iは紙面上方向に、群集IIは右方向に $|M|=1.1$  m/sの値を与えた。二つの群集とも100個体ずつ初期配置されている。初期の配置においては、図5に示した釣り合い半径程度で全ての個体が配置されるように数密度を決め、初期座標は乱数によって決定した。乱数によって決定する際に、釣り合い半径内に配置された個体は、釣り合い半径外に位置するよう、その都度、再配置を行った。

図6は、各個体の位置を4秒ごとに示したものである。図6(a)は、指向性を考慮しない場合、図6(b)は指向性を考慮した場合である。2個体間の干渉では、指向性の影響は、行動の本質を変化させるようには思われなかったが、群集の運動の場合には、そ

の影響は、図に示すように顕著に表れる。二つの場合を比較すると、指向性を考慮しない場合には、比較的混乱は少ないが、指向性関数を考慮した場合の結果では、合流した直後に回避行動がスムーズに行えない領域が出現し、非常に大きな混乱を生じている様子が確認できる。これは、クロスフローでは、各個体が、進行方向に対して90度の方向からの影響を十分に反映できないために生じる結果である。さらに、群集がお互いを通りぬけたときの個体間の分布には、ある規則性が生じていることがわかる。図では、進入方向に対して45度から60度程度の角度で、かつ相手集団の下流側に向かって、筋状の配列が生じている。これは、一種の整流効果である。この整流効果に関しては、駅構内における群集の観察に対して、同様な運動が見られることを佐野ら<sup>9</sup>及び中祐<sup>10</sup>が報告している。本シミュレーションは、人のような知的な生物の運動に対しても、学習効果などを考慮することなく、ほとんど知性を考慮しない力学的なシミュレーションから、このような状態を予測できることを示している。このような結果は、個体ポテンシャルの特性から導かれたものである。

次に、群集全個体の運動の軌跡を描画した結果を図7に示す。図7(a), (b)は指向性を考慮しない場合の結果で、図7(c), (d)は指向性を考慮した場合の結果である。また、平均個体間距離は、図7(a), (c)が0.8m, 図7(b), (d)が1.0mの場合である。図は全ての軌跡を表示したため判りにくいが、指向性を考慮した場合には、各個体の軌跡が、他の個体の影響を受けて、複雑に運動方向を転向している様子が確認される。また、図6に対応した混乱の大きな領域の出現のために、右方向へ運動する群集の $y=-2$  m付近の範囲には軌跡間隔が大きくなっている領域が見られる。このように、生物個体の特性である指向性をポテンシャルに導入した場合、群集運動に特異性が出現することが確認された。

最後に、各群集の熱力学的なマクロ量について計算した結果を以下に示す。図8は群集の中から抽

出した特定の個体における、時間的溫度変化を示したものである。抽出した個体は、図6において記号Aで示された群集IIの個体である。この個体を含めて近接10個体に関する局所的変動溫度を求めた。これまでの図と同様に図(a)が指向性の無い場合、図(b)が指向性を考慮してシミュレーションした場合の結果である。図から明らかのように、指向性を有することで、溫度は非常に大きく変動し、時間経過とともに振幅が大きくなり、変動スペクトルも非常に高い成分が増している様子が確認できる。このように、群集としての熱力学的な状態量の変動は、個体が指向性を有することで大きくなるが示される。指向性を有することは、ある場面では、スムーズな流動となるが、他の局面では図6に示されるように混乱を発生させる要因ともなる。その条件については今後の研究課題である。

#### 4. 結論

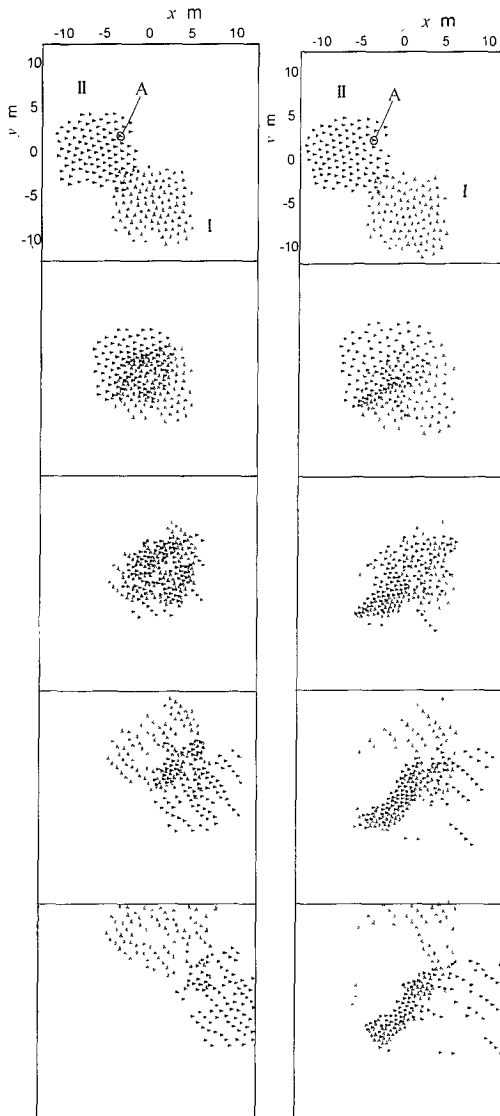
生物流れを分子力学的な視点から捉え個体の基本運動と集団運動を力学的に表現する手法を提案した。また、集団の熱力学的マクロ量を定義し評価する方法を提案した。得られた結果は次の通りである。

(1) 個体を表現するポテンシャルにレナードジョーンズ型の関数を用い、斥力項を半径 $r$ の $-6$ 乗、引力項を $-1$ 乗とすることで適切なポテンシャル関数を表現した。また、生物の視野認識の程度を個体ポテンシャルにおいて適切に表現するため、斥力項指向性関数、引力項指向性関数を導入し、2個体間の干渉過程を適切に表現するために影響関数を導入することで、2個体間の干渉を計算した。その結果、これらの関数が生物運動のシミュレーションにおいて有効かつ重要であることを示した。

(2) 交差する群集のシミュレーションを行い、本計算手法によって、定性的にはあるが合流する群集の流れの表現が可能であることが示された。

(3) 交差する群集のシミュレーションにおいて、整流効果が表されることを明らかにした。これにより整流効果は単純なポテンシャルの干渉によって生じ得るものであることが示された。すなわち、整流効果は、運動する各個体に対して、周囲の個体ポテンシャルから形成される合成ポテンシャルの結果として現れるものであると考えられる。

(4) 人の流れを例として、群集の流れをシミュレーションし、集団における局所的な溫度を算出して、集団の特性を表現する手法を提案した。本手法を用いて群集の交差に伴う溫度の変動が数量的に示され、群集を構成する個体が指向性を有する場合に溫度変動が激しくなるという結果が得られた。



(a) Non directional (b) Directional

Fig.6 Cross flows between each 100 individuals.

最後に、本研究は、科学研究費補助金「萌芽的研究 11875044」の補助を受け行われたことを付記し関係諸氏に謝意を表する次第である。

#### 文 献

- (1) Alvarez, L., Horowitz, R., Li, P.: Proc. 35th conf on Decision and Control, Kobe (1996), 2295-2300
- (2) Lighthill, M.J., Witham, G.B.: On kinematic waves. II A theory of traffic flow on long crowded roads, Proc. R. Soc. London Ser. A, (1955) pp.317-345

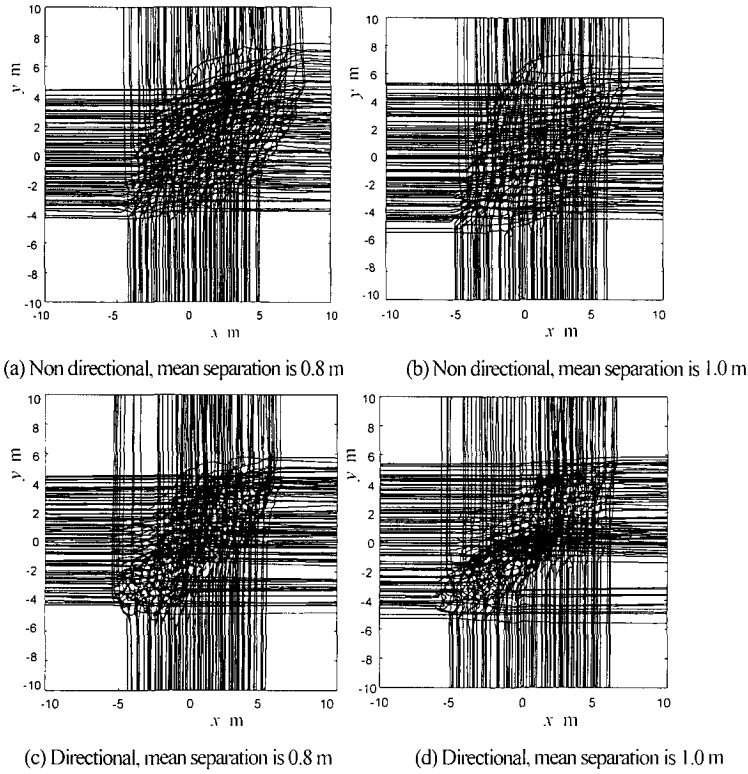


Fig.7 Trajectories in cross flow between each 100 individuals.

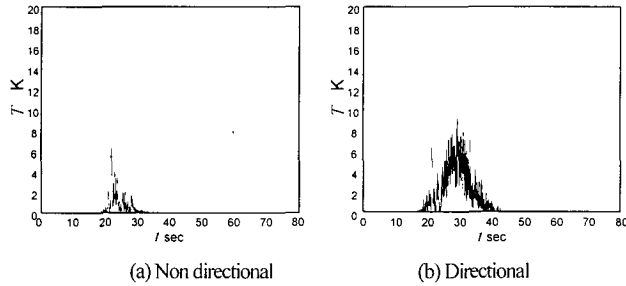


Fig.8 Fluctuation of local temperature in the cross flow.

- (3) Wagner,C., Hoffmann,C., Sollacher, R., Wagenhuber, J., Schumann,B.: Second-order continuum traffic model, Phys. Review E, Vol.54, No.5, Nov., (1996) pp.5073-5085
- (4) R.Mahnke, N.Pieret: Stochastic master-equation approach to aggregation in freeway traffic, Phys Rev E VOL.56, NO.3, Pt A(1997) pp.2666-2671
- (5) 佐野友紀,ほか2名,可視化情報,20-S2(2000),65-68.
- (6) 高柳英明,ほか2名,可視化情報,20-S2(2000),57-60.
- (7) 加藤邦夫,ほか2名,日本建築学会論文報告集,289(1980),119-129.
- (8) 中祐一郎,日本建築学会論文報告集,258(1977),93-102.
- (9) 科学シミュレーション研究会:パソコンで見る複雑系・カオス・量子,講談社(1997) pp.163-191
- (10) Shapiro, The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, The Ronald Press Company, (1953), 139.
- (11) Witham,G.B.: Linear and Nonlinear Waves, Wiley, New York, (1974) pp.68-80