

量子もつれ状態を模倣した2匹のアリにおける 協調行動と集合的意思決定における一解釈

中山 茂^{†1} 飯村 伊智郎^{†2}

量子もつれ状態は, Summhammer の先行研究において, 2匹のアリが協力して小石を押す協調行動の決定過程に応用された. その先行研究では, 量子もつれ状態を模倣した2匹の量子風アリ(もつれアリたち)は, 独立した2匹の古典的アリ(独立アリたち)と比較して, 小石を約2倍まで遠くに押すことができることを, 計算機実験で確認している. しかしながら, 小石を押すために必要な最低限の力と2匹のアリの力との関係については明らかにされていない. 本研究では, それらの関係を明らかにすべく, 計算機実験を行った. 実験の結果, 力の強いアリが有利な競争的社会を考えた場合, 2匹のアリの脳は均質が良く, 2匹のアリの力は不均質(異質)が良いことが認められ, 集合的意思決定の考え方と似た結果となった.

Cooperative Action in Two Ants Inspired by Quantum Entanglement State and an Interpretation in Collective Decision Making

SHIGERU NAKAYAMA^{†1} and ICHIRO IIMURA^{†2}

J. Summhammer applied quantum entanglement state to cooperatively pushing a pebble by two ants. According to his results, we have confirmed that the two quantum-inspired ants with quantum entanglement, i.e., entangled ants, can push the pebble up to twice relative to the independent two classical ants, i.e., independent ants. However, the conventional study did not have clearly described the relation between “the force needed for pushing a pebble” and “the forces of two ants”. For clarifying the relation, we have simulated the cooperation of two ants while changing the condition of these parameters. From the experimental analysis, in competitive society where ants with strong force is advantageous, we have proven that homogeneous two ant brains are good and heterogeneous two ant forces are good. The result of the experimental analysis was similar to the idea in collective decision making.

1. はじめに

近年, 量子重ね合わせ状態や量子干渉効果, そして量子もつれ状態などの量子力学的原理¹⁾の物理概念が, 生物学と同様に, 情報科学の領域に融合されつつある. たとえば, 量子干渉効果の物理概念は, Narayanan らによって遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) に導入された²⁾. Narayanan らはそれを Quantum-inspired GA³⁾⁻⁸⁾と名付けた. また, 量子重ね合わせ状態は, Han らによって Evolutionary Algorithm (EA) に導入され⁹⁾, Quantum-inspired EA^{10),11)}と呼ばれた. さらに, 量子もつれ状態に関しては, Summhammer によって, 2匹の昆虫(アリ)が小石を押すというタスクにおける協調行動に対して導入された¹²⁾. つまり, 各アリはある行動を実行するかどうかを決めるために, 量子状態を観測する. この場合, 2匹のアリは, まず目的地からの匂いに導かれて小石を押す方向をランダムにそれぞれ選択し, 次に小石を押すか押さずに待つ(休む)かを量子状態の観測確率で決定する. この押すか休むかの行動を量子的に決定するアリは, 量子風アリ (quantum-inspired ant) と呼ばれ, 一方押すか休むかの行動をそれぞれ確率 1/2 で決定するアリは, 古典的アリ (classical ant) と呼ばれる. Summhammer の実験結果は, 量子もつれ状態を模倣した2匹の量子風アリ(もつれアリたち, entangled ants)は, 独立した2匹の古典的アリ(独立アリたち, independent ants)と比較して, 小石を約2倍まで遠くに押す(運ぶ)ことができることを示している¹²⁾.

しかしながら, 小石を押すために必要な最低限の力 f_{min} と, 2匹のアリ ant_1, ant_2 の力 f_1, f_2 との関係については明らかにされていなかった. そこで本研究では, それらの関係を明らかにすることを目的として, パラメータ f_{min}, f_1 , そして f_2 の条件を変えながら, 2匹のアリが小石を運ぶ行動に関する計算機実験を行った. なお, 本研究では, 2匹のアリが生きる社会を, 餌(小石)を巣(目的地)に運ばないと生きられない社会構造ととらえ, 上述した3つのパラメータ値の関係から, 誰でもが生きられる簡単な優しい世の中である福祉的社会, 強者が生きられる競争的社会, そして強者も弱者も協力しないと全滅する過酷な社会の大きく3つに大別している. 今回の実験は, そのうちの競争的社会に着目

^{†1} 鹿児島大学
Kagoshima University

^{†2} 熊本県立大学
Prefectural University of Kumamoto

しており、競争的社会における2匹の協力関係の最適モデル化を行った初期実験に値する。実験の結果、競争的社会を考えた場合、2匹のアリの脳は均質が良く、2匹のアリの力は不均質（異質）が良いことが認められ、集会的意思決定の考え方と似た結果となった。

2. Summhammer による2匹のアリがともに行動して小石を運ぶモデル

Summhammer は、2匹のアリがある目的地に向かって小石を押さなければならない状況を仮定した。各アリ ant_j ($j = 1, 2$) は、力 \vec{f}_j で小石を押すことができる。また、小石を押すためには、少なくとも f_{min} の力が必要である。つまり、その小石がどちらか1匹だけで押すことができないほどの重さであった場合、言い換えれば $f_{min} > |\vec{f}_1|$ かつ $f_{min} > |\vec{f}_2|$ の場合は、2匹のアリは同時にしかも同じ方向に押さなければならない。同時に押す試みを繰り返すことによって、この2匹のアリは小石を運ぶ仕事をなしとげる。

2匹のアリは、小石を押す試みの前に次に示す2つの決定を行う。なお、これらの決定は、各アリによって独立に行われ、アリどうしでのコミュニケーションはないことに注意されたい。

Decision 1 各アリ ant_j は、押す方向 θ_j を選ぶ。その方向は、次の確率分布 $w(\theta_j)$ に従って選ばれる。

$$w(\theta_j) = n \cdot (\pi - z \cdot |\theta_j|). \quad (1)$$

ただし、 n は正規化係数、 z は $[0, 1]$ の正の定数である。

Decision 2 2匹のアリは、今回の小石を押すかどうかの試みにおいて、小石を実際に押すのか、それとも押さずに待つ（休む）のかの行動を決める。なお、この行動の決定については、もつれアリたちの場合は3章で、独立アリたちの場合は4章で、詳細に述べる。

ここで、もしアリ ant_j が押すこと決めた場合、小石に作用する力 \vec{f}_j は次式で与えられる。

$$\vec{f}_j = s_j \cdot \begin{bmatrix} \sin \theta_j \\ \cos \theta_j \end{bmatrix}. \quad (2)$$

ただし、 s_j はアリの力の強さである。方向 θ_j は $-\pi \leq \theta_j < \pi$ であり、 $\theta_j = 0$ は目的地へのまっすぐな方向を意味する。なお、図1は、2匹のアリ ant_1 と ant_2 のそれぞれの力 \vec{f}_1 と \vec{f}_2 を図示したものである。

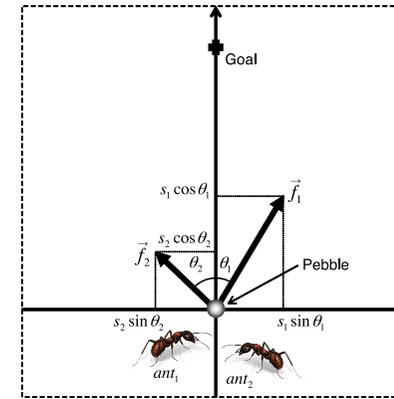


図1 2匹のアリ ant_1 , ant_2 における力 \vec{f}_1 , \vec{f}_2 の関係
Fig. 1 Relation between the forces, \vec{f}_1 and \vec{f}_2 , in two ants, ant_1 and ant_2 .

3. もつれアリたちによる協調行動の決定過程

3.1 量子風アリにおける力の実空間と量子ビットの脳空間との関係

一般に、量子ビットは、内積が定義された複素ベクトル空間での2次元列ベクトルで記述でき、次のような計算基底状態（computational basis state） $|\uparrow\rangle$ と $|\downarrow\rangle$ を正規直交基底ベクトルとして使う。

$$|\uparrow\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\uparrow\rangle \\ |\downarrow\rangle \end{bmatrix}, \quad |\downarrow\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\uparrow\rangle \\ |\downarrow\rangle \end{bmatrix}. \quad (3)$$

一般的な量子ビットは、 $|\uparrow\rangle$ と $|\downarrow\rangle$ とのベクトルに複素確率振幅を係数にした重ね合わせ状態（ベクトル和）として、同時に $|\uparrow\rangle$ と $|\downarrow\rangle$ とを持つことができる。量子ビットにおける重ね合わせ（superposition）状態 $|\psi\rangle$ は、Bloch 球を用いて表示され、以下のように表せる。

$$|\psi\rangle = \alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\uparrow\rangle \\ |\downarrow\rangle \end{bmatrix}. \quad (4)$$

α および β は、それぞれの状態が観測される複素確率振幅を表し、 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ に規格化される。状態 $|\psi\rangle$ における量子ビットの観測により、確率 $|\alpha|^2$ または $|\beta|^2$ で、結果 \uparrow または \downarrow が得られ、量子ビットがそれぞれ $|\uparrow\rangle$, $|\downarrow\rangle$ の状態に収縮する。本論文では、観測結

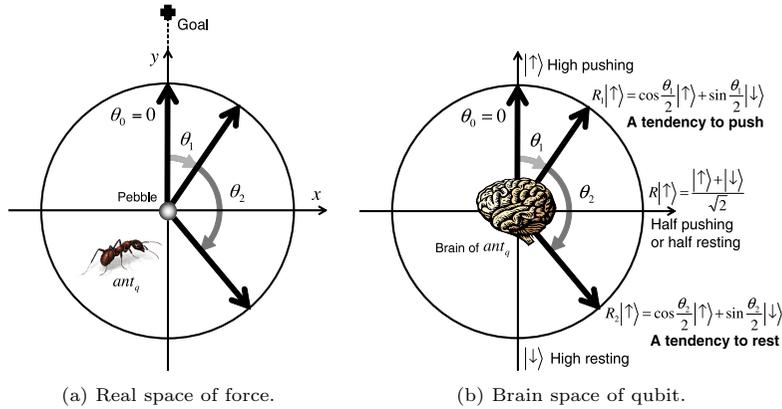


図2 力の実空間における小石を押す力の方向と量子ビットの脳空間における量子風アリ ant_q の行動との関係
 Fig.2 Relation between the force direction to push a pebble in real space of force and the action of a quantum-inspired ant, ant_q , in brain space of qubit.

果 \uparrow は量子風アリが小石を押すことに対応し、一方、観測結果 \downarrow は小石を押さずに休むことに対応する。

ここで、力の実空間における小石を押す力の方向と量子ビットの脳空間における量子風アリ ant_q の行動(小石を押すか休むか)との関係を、単一量子ビットを用いて考える。図2(a)は、小石を押す力の方向が目的地に対して角度 θ_j ($-\pi \leq \theta_j < \pi$) だけずれている例である。この θ_j は、量子風アリ ant_q が小石を押すかそれとも休むかの行動決定に関係する。重ね合わせ状態 $|\psi\rangle$ における確率振幅の比率はこの θ_j に応じて変わるが、それはユニタリ変換で行う。そのためには、次のような回転行列 R_j を用いる。つまり、力の方向に応じて量子ビットを回転させることで、確率振幅の比率を変更する。

$$|\psi'\rangle = R_j |\psi\rangle = \begin{bmatrix} \cos(\theta_j/2) & -\sin(\theta_j/2) \\ \sin(\theta_j/2) & \cos(\theta_j/2) \end{bmatrix} |\psi\rangle. \quad (5)$$

たとえば、状態 $|\uparrow\rangle$ を初期状態として回転すると次式のようになり、図2(b)はその結果を図示したものである。

$$R_j |\uparrow\rangle = \begin{bmatrix} \cos(\theta_j/2) & -\sin(\theta_j/2) \\ \sin(\theta_j/2) & \cos(\theta_j/2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\uparrow\rangle \\ |\downarrow\rangle \end{bmatrix} = \cos(\theta_j/2) |\uparrow\rangle + \sin(\theta_j/2) |\downarrow\rangle. \quad (6)$$

式(6)の解釈は次のとおりである。同式において、たとえば $0 \leq |\theta_j| < \pi/2$ の場合は、 \uparrow の観測確率 $|\cos(\theta_j/2)|^2$ が \downarrow のそれよりも大きくなり、その結果、小石を押す確率が高くなる。一方、 $\pi/2 < |\theta_j| \leq \pi$ の場合は、その逆で、 \downarrow の観測確率 $|\sin(\theta_j/2)|^2$ が \uparrow のそれよりも大きくなり、小石を押さず休む確率が高くなる。つまり、この場合、 θ_j は初期状態 $|\uparrow\rangle$ に対する角度であるので、小石を押す力の方向である θ_j の絶対値 $|\theta_j|$ が小さい、言い換えれば目的地に近づく方向に小石を押そうとする場合には押す確率が高まり、 $|\theta_j|$ が大きい、すなわち目的地から遠ざかる方向に小石を押そうとする場合には休む確率が高まる、という関係で、力の実空間と量子ビットの脳空間とを対応付けている。

3.2 もつれアリたちにおける協調行動の発現

前述した行動決定過程を有する量子風アリの2匹が量子もつれ状態を模倣することで、協調的な行動を発現する。ここでは、その協調行動の決定過程について解説する。まず、2匹の量子風アリ ant_{q1} と ant_{q2} がもつれている triplet 状態と呼ばれる2量子ビット状態 $|\psi_t\rangle = (|\uparrow_1\uparrow_2\rangle + |\downarrow_1\downarrow_2\rangle)/\sqrt{2}$ を考える^{*1}。量子風アリ ant_{q1} と ant_{q2} が小石を押そうとする方向をそれぞれ θ_1, θ_2 とし、対応する回転行列を R_1, R_2 とする。ただし、 $-\pi \leq \theta_1, \theta_2 < \pi$ である。すると、線形オペレータ $R_1 \otimes R_2$ によって、状態 $|\psi_t\rangle$ は次式のように変換される。

$$\begin{aligned} |\psi_t\rangle &\xrightarrow{R_1 \otimes R_2} (R_1 \otimes R_2) \frac{|\uparrow_1\uparrow_2\rangle + |\downarrow_1\downarrow_2\rangle}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (R_1 |\uparrow_1\rangle \otimes R_2 |\uparrow_2\rangle + R_1 |\downarrow_1\rangle \otimes R_2 |\downarrow_2\rangle) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) |\uparrow_1\uparrow_2\rangle - \sin\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) |\uparrow_1\downarrow_2\rangle \right. \\ &\quad \left. + \sin\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) |\downarrow_1\uparrow_2\rangle + \cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) |\downarrow_1\downarrow_2\rangle \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

したがって、 ant_{q1} と ant_{q2} が協力してともに小石を押す $|\uparrow_1\uparrow_2\rangle$ が観測される確率 $p_{\uparrow_1\uparrow_2}$ は、次式で与えられる。

$$p_{\uparrow_1\uparrow_2} = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2}\right) \right|^2 = \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\delta\theta}{2}. \quad (8)$$

同様に、 ant_{q1} が ant_{q2} のどちらか一方が押す $|\uparrow_1\downarrow_2\rangle$ または $|\downarrow_1\uparrow_2\rangle$ が観測される確率 $p_{\uparrow_1\downarrow_2}, p_{\downarrow_1\uparrow_2}$ 、そして ant_{q1} と ant_{q2} がともに休む $|\downarrow_1\downarrow_2\rangle$ が観測される確率 $p_{\downarrow_1\downarrow_2}$ は、それぞれ次式で与えられる。

*1 テンソル積 $|v\rangle \otimes |w\rangle$ の簡略記号として、 $|v\rangle |w\rangle, |v, w\rangle$ 、さらには $|vw\rangle$ がしばしば使われるが、本論文では $|vw\rangle$ を用いる。

$$p_{\uparrow_1\downarrow_2} = \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\delta_\theta}{2}, \quad p_{\downarrow_1\uparrow_2} = \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\delta_\theta}{2}, \quad p_{\downarrow_1\downarrow_2} = \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\delta_\theta}{2}. \quad (9)$$

ただし, $\delta_\theta = \theta_1 - \theta_2$ ($-2\pi < \delta_\theta < 2\pi$) であり, $p_{\uparrow_1\uparrow_2} + p_{\uparrow_1\downarrow_2} + p_{\downarrow_1\uparrow_2} + p_{\downarrow_1\downarrow_2} = 1$ である.

これら 4 つの観測確率の解釈は次のとおりである. たとえば, 2 匹の量子風アリがそれぞれ小石を押そうとする方向の差の絶対値 $|\delta_\theta|$ が $0 \leq |\delta_\theta| < \pi/2$ または $3\pi/2 < |\delta_\theta| < 2\pi$ の場合, つまりお互いがおおむね同じ方向に押そうとする場合には, 確率 $p_{\uparrow_1\uparrow_2}$ と $p_{\downarrow_1\downarrow_2}$ が高くなる. 言い換えれば, 協力をしてともに小石を押すか, あるいはともに休むかの確率が高くなり, その結果として協調的な振る舞いを見せる. 一方, 差の絶対値 $|\delta_\theta|$ が $\pi/2 < |\delta_\theta| < 3\pi/2$ の場合, つまりお互いがおおむね逆の方向に押そうとする場合には, 確率 $p_{\uparrow_1\downarrow_2}$, $p_{\downarrow_1\uparrow_2}$ が高くなる. お互いが逆の方向に押すことで力が打ち消されないように, 一方が押し, もう一方は休むことで非協調的に振る舞い, 結果的には良い方向に働くと考えられる.

3.3 1 度の押す行為による小石の移動量

前述した観測確率で, 2 匹のアリのうち, 実際に小石を押すアリが決定される. 小石は, 実際に小石を押すアリの力の合計が, 小石を押すために必要な最低限の力 f_{min} 以上である場合にのみ, 押されて移動することになる. 1 度の押す行為による小石の移動量は, 次式で与えられる.

$$\begin{aligned} \vec{R} = & g \sum_{j=1,2} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta_j w(\theta_j) \frac{1}{2} \sin^2 \left(\frac{\theta_j - \theta_{\neq j}}{2} \right) \vec{f}_j(\theta_j) \cdot \Theta(|\vec{f}_j| - f_{min}) \\ & + g \int_{-\pi}^{\pi} d\theta_1 \int_{-\pi}^{\pi} d\theta_2 F(\theta_1, \theta_2). \end{aligned} \quad (10)$$

ただし, $F(\theta_1, \theta_2)$ は,

$$F(\theta_1, \theta_2) = w(\theta_1)w(\theta_2) \frac{1}{2} \cos^2 \left(\frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \right) [\vec{f}_1(\theta_1) + \vec{f}_2(\theta_2)] \cdot \Theta(|\vec{f}_1 + \vec{f}_2| - f_{min}),$$

である. また, g は 1 度の押す行為による単位力あたりの小石の移動量であり, $\Theta(x)$ は $x \geq 0$ ならば 1, そうでなければ 0 の値をとるステップ関数である. なお, 連続した押す行為は互いに独立しているため, N 回の押す行為後の小石の移動距離は単に $N\vec{R}$ となる.

4. 独立アリたちによる行動の決定過程

独立アリたちによる行動の決定過程は, きわめて単純である. 独立した 2 匹の古典的アリ ant_{c1} と ant_{c2} は, 押すか休むかの行動をそれぞれ確率 $1/2$ で, アリごとに決定することになる. その結果, 独立アリたちにおける確率 $p_{\uparrow_1\uparrow_2}$, $p_{\uparrow_1\downarrow_2}$, $p_{\downarrow_1\uparrow_2}$, そして $p_{\downarrow_1\downarrow_2}$ は, 次式

で与えられる.

$$p_{\uparrow_1\uparrow_2} = p_{\uparrow_1\downarrow_2} = p_{\downarrow_1\uparrow_2} = p_{\downarrow_1\downarrow_2} = \frac{1}{4}. \quad (11)$$

また, 独立アリたちによる 1 度の押す行為による小石の移動量は, 前述したもつれアリたちのものと同様である.

ここで, 計算コストの観点からもつれアリたちと独立アリたちとを比較すると, 式 (1) による小石を押す方向の選択や, 式 (10) による小石の移動量については両者で等しく, 2 匹のアリのうち, 実際に小石を押すアリを決定する確率である $p_{\uparrow_1\uparrow_2}$ や $p_{\uparrow_1\downarrow_2}$, $p_{\downarrow_1\uparrow_2}$, $p_{\downarrow_1\downarrow_2}$ が異なるだけであるため, 両者の計算コストに差はほとんどないことに注意されたい.

5. 基礎的実験

5.1 実験方法

筆者らは, 小石を押すために必要な最低限の力 f_{min} と, 2 匹のアリの力 \vec{f}_1 , \vec{f}_2 との関係性を明らかにすべく, それら 3 つの重要なパラメータの条件を変化させながら, 計算機実験を行った. f_{min} は, 0.01 から 2.00 まで +0.01 刻みで変化させ, $|\vec{f}_1|$ と $|\vec{f}_2|$ は, 1.00 から 1.20 まで +0.05 刻みで, また 1.00 から 0.80 まで -0.05 刻みで, それぞれ変化させた. さらに, 2 匹のアリのより大きな力の差 $\|\vec{f}_1 - \vec{f}_2\|$ における関係性も明らかにするため, $|\vec{f}_1|$ と $|\vec{f}_2|$ については, 1.40 から 1.80 まで +0.20 刻みで, また 0.60 から 0.20 まで -0.20 刻みで, それぞれ変化させた. なお本実験では, 2 匹のアリの力は $|\vec{f}_1| + |\vec{f}_2| = 2.00$ の条件のもとで変化させるものとした.

実験で用いたパラメータ値は, 2 匹のアリによる小石を押すかどうかの試みの回数 t_{max} は 1,000 [回], 1 度の押す行為による単位力あたりの小石の移動量 g は 4 [pixel/force] とし, $z = 2/3$ とした. 実験は, 条件ごとに 100 回試行し, その 100 回試行の結果の平均値で小石の移動距離を評価した.

5.2 実験結果および考察

実験の結果を, 図 3 および図 4 に示す. 図 3 は, 小石を押すために必要な力 f_{min} と, 2 匹のアリによって小石が押され移動した距離の平均値との関係性を示している. これら 8 個のグラフにおいて, 横軸は小石を押すために必要な力 f_{min} であり, 左側の縦軸は 2 匹のアリによって小石が押され移動した距離の平均値 (平均移動距離), 右側の縦軸は独立アリたちによる平均移動距離に対するつれアリたちによる平均移動距離の比率である. ここで筆者らは, 図 3 の各グラフにおいて, 餌 (小石) を巣 (目的地) に運ばないと生きられない社

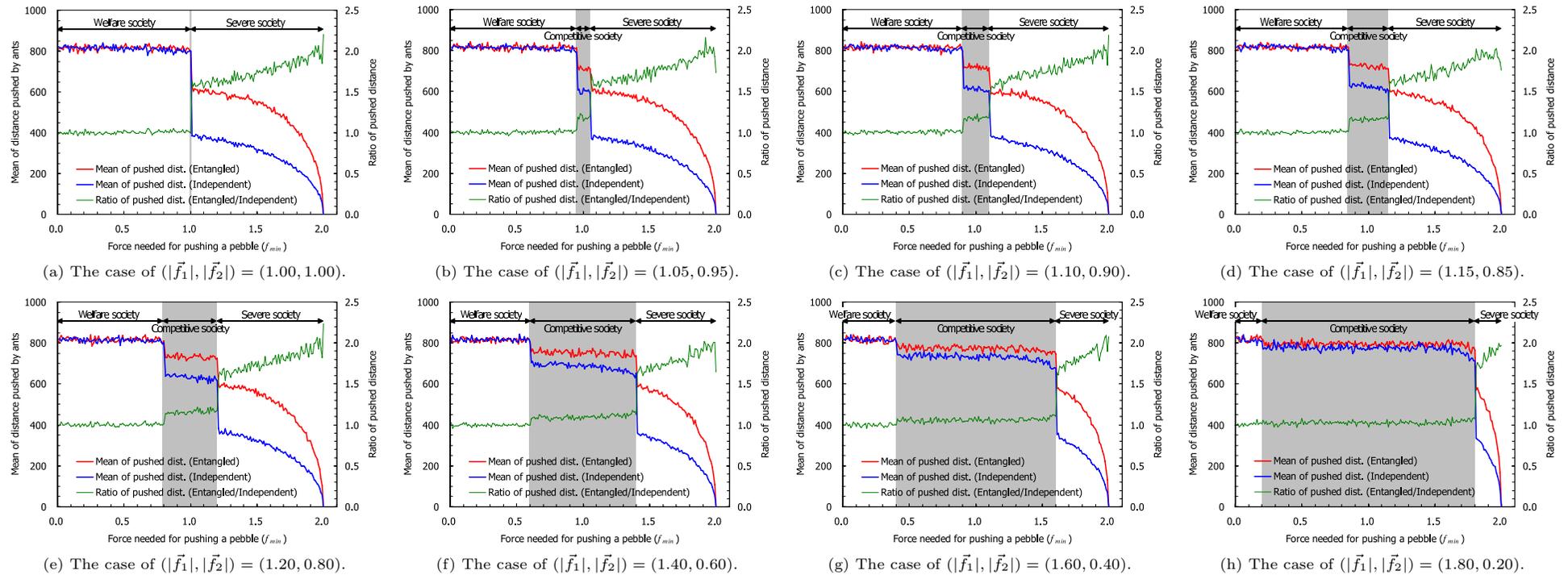


図3 小石を押すために必要な力 f_{min} と2匹のアリによって小石が押され移動した距離の平均値との関係 (灰色: 中間領域)

Fig. 3 Relation between the force needed for pushing a pebble, f_{min} , and the mean of distance to which a pebble was pushed by two ants. (Gray: Middle region).

会構造を仮定する．すると，小石を押すために必要な力 f_{min} の値により，次に示す3つの領域，つまり3種類の社会に大別することができる．

左側領域 誰でも生きられる簡単な優しい福祉的社会

中間領域 強者が生きられる競争的社会

右側領域 強者も弱者も協力しないと全滅する過酷な社会

なお，2匹のアリの力の差 $||\vec{f}_1| - |\vec{f}_2||$ が大きくなると，中間領域の範囲が広がることが分かる．

図4は，中間領域，つまり競争的社会における平均移動距離を図示したものである．この結果を見ると，もつれアリたちの方が独立アリたちに比べてより遠くに小石を運べるこ

が認められる．さらに，2匹のアリの力の差 $||\vec{f}_1| - |\vec{f}_2||$ がより大きくなるにつれて，もつれアリたちと独立アリたちともに，より遠くまで小石を運べることが分かる．このことは，集会的意思決定 (collective decision making)¹³⁾ の立場から次のように解釈できる．集会的意思決定において，良い決定がなされるためには，(i) 問題の理解は均質が良く，(ii) 問題に対する議論の多様性は不均質 (異質) が良い，とされている．これを本実験における2匹のアリの行動に置き換えると，(i) 2匹のアリの脳 (集合脳) は均質が良く，(ii) 2匹のアリの力 (集合力) は不均質 (異質) が良い，となる．つまり (i) については，独立アリたちのランダムに決定する集合脳に比べて，もつれアリたちの同じ考えにあり協調する集合脳

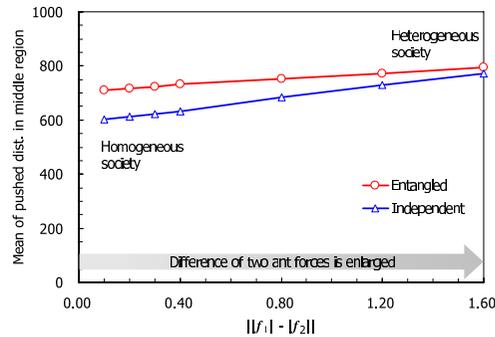


図4 2匹のアリの力の差 $\|f_1 - f_2\|$ と中間領域（競争的社会）における小石が押された距離の平均値との関係
 Fig. 4 Relation between the difference of two ant forces, $\|f_1 - f_2\|$, and the mean of distance to which a pebble was pushed in middle region (competitive society).

の方が、図4で該当する折れ線がつねに上にあることから、遠くに小石を運んで早く目標を達成できることが分かり、したがって集合脳は均質の方が良いことになる。また(ii)については、同じく図4で折れ線が右肩上がりになっていることから、2匹のアリの力（集合力）の差がより大きい方がより遠くに小石を運んで早く目標を達成できることが分かり、したがって集合力は不均質（異質）の方が良いことになる。このことは、中間領域である競争的社会において、全体的な効率を考えた場合、同じ考え方を持つ2匹のアリの力に差がある異質な社会（heterogeneous society）の方が、ランダムな考え方で力に差がない均質な社会（homogeneous society）よりも優れていることを示唆しているともいえる。

なお筆者らは、もつれアリたちによる平均移動距離と独立アリたちによる平均移動距離に対して、2匹のアリの力の差 $\|f_1 - f_2\|$ ごとに、有意水準1% ($\alpha = 0.01$) のt検定を行った。その結果、もつれアリたちによる平均移動距離と独立アリたちによる平均移動距離とは有意な差があることが認められ、独立アリたちに比べて、もつれアリたちの方がより遠くに小石を運ぶことが明らかになった。

ところで、図4から、2匹のアリの力の差 $\|f_1 - f_2\|$ がより大きくなるにつれて、もつれアリたちによる平均移動距離と独立アリたちによる平均移動距離との差がより小さくなることが分かる。この理由として、2匹のアリの力の差が大きすぎた場合、1匹のみで小石を押すのとほぼ等しい状況になる。その結果、協調行動の意味が薄れ、もつれアリたちおよび独立アリたちによる平均移動距離の差が小さくなったと考えられる。言い換えれば、2匹のアリの力の差が大きすぎないときには、協調行動が有意となり、もつれアリたちによる平均

移動距離と独立アリたちによる平均移動距離との差は、より大きくなるものと考えられる。

6. おわりに

本論文では、Summhammerの先行研究で取り扱われなかった、小石を押すために必要な最低限の力と2匹のアリの力との関係を明らかにすべく、計算機実験を行った。実験の結果、力の強いアリが有利な競争的社会を考えた場合、2匹のアリの脳は均質が良く、2匹のアリの力は不均質（異質）が良いことが認められ、集意的意思決定の考え方と似た結果となった。

参考文献

- 1) Nielsen, M.A. and Chuang, I.L.: *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge Univ. Pr., Cambridge, United Kingdom (2000).
- 2) Narayanan, A. and Moore, M.: Quantum-Inspired Genetic Algorithms, *Proc. IEEE Int. Conf. Evolutionary Computation*, pp.61-66 (1996).
- 3) 中山 茂, 飯村伊智郎, 松尾 翠, 前園正宜: 遺伝的アルゴリズムにおける干渉交叉法の検討, *情報処理学会論文誌*, Vol.47, No.8, pp.2625-2635 (2006).
- 4) 中山 茂, 飯村伊智郎, 伊藤登志也: 免疫アルゴリズムにおける量子干渉交叉法の検討, *電子情報通信学会論文誌 D-I*, Vol.J88-D-I, No.12, pp.1795-1799 (2005).
- 5) 中山 茂, 伊藤登志也, 飯村伊智郎, 小野智司: 免疫アルゴリズムにおける混合干渉交叉法の提案, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol.J89-D, No.6, pp.1449-1456 (2006).
- 6) 飯村伊智郎, 平見 亮, 森山賀文, 中山 茂: ジョブショップスケジューリング問題での免疫アルゴリズムにおける螺旋交叉法の検討, *システム制御情報学会論文誌*, Vol.20, No.9, pp.384-386 (2007).
- 7) 中山 茂, 前園正宜, 飯村伊智郎, 小野智司: 関数同定問題での遺伝的プログラミングにおける螺旋交叉法の実験的検討, *システム制御情報学会論文誌*, Vol.20, No.11, pp.454-456 (2007).
- 8) Imura, I., Moriyama, Y. and Nakayama, S.: Consideration on Distributed Immune Algorithm in Job-Shop Scheduling Problem, *Int. J. Innovative Computing, Information and Control (IJICIC)*, Vol.5, No.12(B), pp.5003-5010 (2009).
- 9) Han, K.-H. and Kim, J.-H.: Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm for a Class of Combinatorial Optimization, *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Vol.6, No.6, pp.580-593 (2002).
- 10) Nakayama, S., Imabeppu, T. and Ono, S.: Pair Swap Strategy in Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm, *Proc. Genetic and Evolutionary Computation Conf. (GECCO)*, Seattle, Washington, USA (2006).
- 11) 中山 茂, 今別府孝洋, 小野智司, 飯村伊智郎: 量子風進化的アルゴリズムにおける対

2473 量子もつれ状態を模倣した 2 匹のアリにおける協調行動と集成的意思決定における一解釈

交換戦略の検討, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J89-D, No.9, pp.2134-2139 (2006).

- 12) Summhammer, J.: Quantum Cooperation of Two Insects, arXiv:quant-ph/0503136v2 (2006). Available: http://arxiv.org/PS_cache/quant-ph/pdf/0503/0503136v2.pdf
- 13) Farrell, D., Sayama, H., Dionne, S.D., Yammarino, F.J. and Wilson, D.S.: Evolutionary Perspective on Collective Decision Making, *Proc. Int. Conf. on Complex Systems (ICCS2007)*, Boston, Massachusetts (2007).

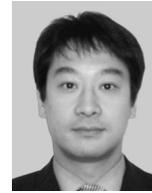
(平成 23 年 2 月 22 日受付)

(平成 23 年 5 月 14 日採録)



中山 茂 (正会員)

昭和 23 年生。昭和 52 年京都大学大学院博士課程修了, 同年上智大学助手, 昭和 56 年京都工芸繊維大学助手, 昭和 62 年兵庫教育大学助教授, 平成 9 年より鹿児島大学工学部情報工学科教授。京都大学工学博士。平成 8 年情報文化学会学会賞, 平成 12 年九州工学教育協会賞, 平成 21 年 ICM 研究賞, 平成 21 年芸術科学会論文誌第 8 回論文賞を受賞。主として, 分散オブジェクト, 量子コンピュータ, 群知能, 進化的アルゴリズムの研究に従事。電子情報通信学会, 電気学会, システム制御情報学会等各会員。



飯村伊智郎 (正会員)

昭和 44 年生。平成 6 年上智大学大学院博士前期課程修了, 同年 (株) 日立製作所日立研究所入所, 平成 9 年熊本県立技術短大講師, 平成 14 年熊本県立大学総合管理学部総合管理学科助手, 平成 15 年同講師, 平成 18 年同助教授, 平成 19 年より同准教授。平成 16 年鹿児島大学大学院博士後期課程修了。博士 (工学)。平成 13 年情報処理学会大会奨励賞, 平成 15 年日本機械学会計算力学部門優秀講演表彰, 平成 15 年情報処理学会九州支部奨励賞を受賞。主として, 進化論的計算手法, 群知能, 分散並列処理, 実世界指向インタフェースの研究に従事。電子情報通信学会, 電気学会, システム制御情報学会, 人工知能学会, 進化計算学会, 信号処理学会等各会員。