群れの維持・形成に寄与する内的ゆらぎ

村 上 久*・西 山 雄 大*・新 里 高 行*・榎 本 洸一郎**
戸 田 真 志***・森 山 徹****・飯 塚 浩二郎****・郡司ペギオ幸夫*

Inherent Noise Can Contribute to Maintenance and/or Formation of a Swarm

Hisashi MURAKAMI*, Yuta NISHIYAMA*, Takayuki NIIZATO*, Koichiro ENOMOTO**,
Masashi TODA***, Toru MORIYAMA****, Kojiro IIZUKA**** and Yukio-Pegio GUNJI*

In most study of collective behavior, many numerical models have been developed. However, there is little field data collected for comparison with the models. We observed soldier crabs in Iriomote Island, Japan, which live in tideland forming big swarms, and analyzed their collective motion by transforming their positions on two-dimensional coordinates. The results of analysis show that the fluctuation of their motion positively contributes to maintenance and/or formation of a swarm, in contrast to the fluctuation of classical model, which is given as just random noise.

Key Words: collective behavior, swarm, inherent noise, mutual anticipation, soldier crab

1. はじめに

ムクドリやイワシの群れは全体性を維持しながら素早く滑らかに、まるでそれ自体が一つの生命体であるかのように振る舞う^{1)~3)}。

群れ研究において、数理モデルが多くの成果を上げてきたが、実際の群れを実験的に解析したデータとモデルの比較は非常に少ない。モデルの挙動はしばしば、魚や鳥や昆虫の群れの“見た目”をもとに作られる。CGでの利用を目的に開発されたBOIDは、群れ一般をよく説明するものであると考えられてきた⁴⁾。各個体は一定半径の近傍をもち、その中で他個体と向きを平均化することで揃え (Alignment)、距離が離れすぎると近づき (cohesion)、近づすぎると離れる (separation)。また Alignment に特化したシンプルなモデルとして

self-propelled particle (SPP) が広く研究されている。SPPでは近傍内個体との向きの平均化 (群れ形成力) と向きに加える一様分布のランダムノイズ (外部摂動) を結合する⁵⁾。Alignment のみの場合、各個体の向きが収束して川の流れるように一方向に進む集団となり、またノイズのみの場合、それぞれがバラバラに動く集団となる。群れ形成力に外部摂動を調節して加えることで、群れらしい動きを実現するこのモデルでは、形成力とゆらぎは相反する性格をもつ。

しかしながら、果たしてノイズは単に外部から加えられるものだろうか。ムクドリの群れの就事前に見られる一糸乱れぬ振る舞いは、捕食者がいる場合のみに見られるわけではなく、捕食者がいない場合には自発的に行なわれていると考えられている。このような振る舞いを見せる境界のはっきりとした一つの群れにおいて、各個体の速度を平均から差し引いた速度 (これはゆらぎベクトルと呼ばれる) の相関をみたとき、群れの大きさに対し常に一定の比率をもつ相関領域をもつとの報告がなされている^{6)~8)}。これは、ゆらぎベクトルの相関をみるため、一様に外部からノイズを加える従来のモデルでは説明はきわめてむずかしい。また、ドーナツ状の装置に入れられたイナゴの群れの解析において、群れ個体の平均ベクトルの大きさ (ドーナツ状装置ゆえに、これは全個体が時計回りに向きを揃えると1、反時計だと-1、向きが揃っていないほど0に近づく) が0に近いほど群れとしてランダムに動き (激しく向きを変える)、1あるいは-1に近いほど群れとして安定した動き (方向転換を起こしにくい) を見せるという結果が示されている。これは、群れが外部摂動なしに自発的にゆらぎを調節していることを意味する (インヒアレントノイズと呼ばれる)。通常のSPPにおいてこれをシミュ

* 神戸大学大学院理学研究科 神戸市灘区六甲台町 1-1

** 公立はこだて未来大学大学院システム情報学研究科
函館市亀田中野町 116-2

*** 熊本大学総合情報基盤センター 熊本市中央区黒髪 2-39-1

**** 信州大学ファイバーナノテク国際若手研究者育成拠点
上田市常田 3-15-1* Graduate School of Science, Kobe University, 1-1
Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe

** Graduate School of System Information Science, Future University Hakodate, 116-2 Kamedanakano-cho, Hakodate

*** Center for Multimedia and Information Technologies, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Chuo-ku, Kumamoto

**** Young Researchers Empowerment Project, Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda

(Received March 30, 2012)

(Revised July 17, 2012)

レートすると、平均ベクトルによる群れ全体としての方向転換頻度に違いは見られない⁹⁾。

われわれは、沖縄以南に生息し大規模な群れを成すミナミコメツキガニ (*Mictyris quinotae*) を観測し、その行動に関する実験を行なっている。今回われわれは群れ行動を垂直方向からビデオカメラで撮影し、各個体位置を時系列にそって二次元座標平面に再構成した。そこで得られたデータから群れの運動解析を行なった結果、各個体は自他双方の過去にとった運動の方向においてより人気の高い方向へ移動していることが示された。これは各個体が自他双方の遷移履歴を使って、互いに運動を予期し合い、群れとして運動を決めていることを示唆するものである。これはゆらぎが群れ形成の対立項を成すのではなく、むしろ群れ形成に積極的に関与していることを意味する。またこの結果は、われわれがミナミコメツキガニの群れの観察から構成した、個体が複数の方向可能性をもち、その方向可能性を各個体が他個体と相互に予期し合うモデルと非常に整合的である^{10), 11)}。

2. 群れの内的ゆらぎ

2.1 ミナミコメツキガニ

ミナミコメツキガニは干潟に生息する甲幅 15 mm 前後の小型のカニで、満潮時は砂底に穴を掘って潜み、干潮時に砂泥中のデトリタスなどをこしとり摂餌する。横ではなく前に進み、大規模に群れることから兵隊ガニと呼ばれる。個体が二次元平面を運動するという点で群れ行動の解析に適している。そこでわれわれは干潟の平面上を運動するミナミコメツキガニに注目し、運動規則を推定する行動実験を行ないながら、それとは別にこれをビデオカメラで撮影し、群れ行動の解析を行なっている。Fig. 1 はその例である。

ミナミコメツキガニの個体は通常、潮溜まりを忌避する傾向がある。Fig. 1 において、始め疎な状態で潮溜まりの水際に接近する群れは、そのまま水中には入らず、水際にそって展開してゆく。しかしその後、蠢きつつも一点に集中して高密度の集団を形成し、水中に入り河を渡っていることがわかる。この運動の特徴は、第一に、群れとしての形態を維持しつつも内部に激しいゆらぎを蓄えている点、第二に群れの密度が上がることによって通常渡ることのできない河を渡る点にある。群れ形成力とゆらぎが対立する BOID や SPP は第一の点に矛盾する。第二の点は密度変化が群れ形成力に変化をもたらすことを意味し、第一の点を考慮するとき、内的なゆらぎが群れ形成に積極的に関与していることを意味している。われわれは、この内的ゆらぎの定量化を試みる。

2.2 解析を行なった群れ

個体間相互作用を定量的に分析するためには、二次元座標上の個体位置のデータが必要不可欠である。そこでわれわれは干潟において、槽を用いてビデオカメラを設置し、干潟平面上を通過するミナミコメツキガニの群れを垂直上方から撮影した。Fig. 2 は動画から静止画を切り出し、そこから個体位置の情報を得ようすを示している。

Table 1 Swarm events are labeled according to the date and time of session. Swarm size is the longest inter-individual distance in the swarm. Velocity is that of the centre of mass, i.e. the mean velocity of the group. Polarity is the degree of global ordering in a swarm, which is the size of average unit vectors of all individuals. Polarity is zero if the individual vectors are pointing in different directions, while it is close to one if most of them are nearly parallel

Event	09271453	09271500	07190751
Number of crabs	267	258	119
Velocity (mm/sec)	28.8	32.6	29.7
Swarm size (mm)	772.7	934.0	809.9
Polarity	0.861	0.898	0.744

なお、群れは纏まりのあるものが三つ選ばれ、それぞれにおいて時系列にそって各個体の座標を追った。

個体が属している群れの同定は、これまで多く議論されてきた問題であるが、ここでは文献 12) の群れの選定基準を以下のように単純化した基準を満たすものを一つの群れとする。

$$\sqrt{IIDs} < AvD \quad (1)$$

ここで $IIDs$ は、各個体のほかの全個体との距離の平均であり、 AvD は、すべての $IIDs$ の平均である。つまり、集団からあまりに距離の離れた個体は、その集団に属していないことになる。これら三つの群れの特徴は Table 1 にまとめられた。

また、群れ 09271500 は群れ 09271453 の時間にして数分後の群れであり、複数の個体が重複していると考えられる。一方で群れ 07190751 は上記の二つの群れとは独立した時間・場所で撮影されたものである。

2.3 解析—運動履歴としての内的ゆらぎ—

本節では、内的ゆらぎに関する解析の方法を述べ、その解析をコントロールと比較して評価してゆく。

2.1 節で述べたように、内的ゆらぎは群れ内部から引き起こされることが考えられる。すなわち群れ内部で個体が互いに交差するようなベクトルをもち、また位置の入れ替えが見られる。しかし、内的ゆらぎが群れの形成・維持に本質的な機能を供給するならば、果たしてそれはどのように実現されるのか。これを観測するために、われわれは個体の遷移履歴に着目した。この遷移履歴をゆらぎとして、それがどのように現在の運動に影響を与えるかを検証する。

さて、ミナミコメツキガニが遷移履歴をどのように利用しているかを調べるために、まず微小観測区間 dt で等分割される各個体の運動軌跡を用意した (Fig. 3A)。各個体の軌跡はそれぞれ異なる色で表示され、この場合五つに分割されている (分割の個数を P で表わす。今は $P = 5$ と書かれる)。こ

Fig. 1 Density effect to the crossing-river-behavior of soldier crabs in Iriomote Island. Pale gray areas represent tidal pool in a lagoon. Red, yellow and blue points represent individuals of soldier crabs. Time proceeds from left to right, and from top to bottom

Fig. 2 A typical analyzed swarm (swarm 09271453 in Table 1). Reconstructed 2D positions of individuals in a swarm are obtained by a series of snapshot (We captured six static images per second)

Fig. 3 The schematic diagram of analysis procedure. Different color transitions correspond to different individual's trajectories. A. The trajectories of individuals. B. Making collection of transitions. C. Counting popularities. D. Comparing popularities between actual move and possible move

Fig. 4 Probability plotted against popularity for actual move (green) and for possible move (red) in swarm 09271500 with $P = 5$, $dt = 0.67$ sec, $gl = 13$. A. Real swarm. B. Control

Fig. 5 The comparison of real swarms (purple bar) and controls (blue bar) with respect to subtracting the mean popularity of actual move (MPAM) from that of possible move (MPPM), where $P = 5$, $gl = 13$, $dt = 0.67$ sec in swarm 09271453, $P = 5$, $gl = 13$ and $dt = 1.0$ sec in swarm 09271500 and $P = 5$, $gl = 15$ and $dt = 1.0$ sec in swarm 07190751. Note that all values of control are average values of 100 trials changing random seeds. Error bars of control are standard deviation

Fig. 7 The distribution of actual and possible move in a real swarm that is a part of swarm 09271453 where $P = 5$ and $dt = 1.0$ sec. The popular sites where targets of actual and/or possible moves are concentrated are represented as blue circles. Scale bar is 10 pixels (12 mm)

のとき、分割して得られた遷移のうち、先頭の遷移に対して、それに続く遷移は履歴であるとみなすことができる。

つぎに、履歴遷移の始点を先頭遷移の始点に集めてくることによって、遷移のコレクションを作る (Fig. 3B における黒字四角形で囲まれた部分。先頭遷移は黒矢印で表示されている)。

Fig. 3 の C は B の囲まれた部分を拡大したものである。ここで、先頭遷移 (太字矢印) を、現在選択された遷移 (方向)

Fig. 6 The estimation of the graining effect of space (grid size) and time (transition size) and of the degree of possibilities (number of arrows) in swarm 09271500, where each value is represented as gl , dt and P , respectively. Vertical axis on which “Difference between MPAM and MPPM” is labeled means subtracting the mean popularity of actual move from that of possible move, and purple line is real swarm one and blue line is control one. A. The effect of side length of grid with $P = 5$ and $dt = 0.67$ sec. B. The effect of number of arrows with $gl = 13$ and $dt = 0.67$ sec. C. The effect of window time with $P = 5$ and $gl = 13$. Note that all values of control are average values of 100 trials changing random seeds. Error bars of control are standard deviation

という意味で実現遷移と呼び、履歴遷移をかつて選択された遷移（方向）という意味で可能遷移と呼ぶことにする。ここでは実現遷移・可能遷移が集中している領域が黒丸で囲まれ、そこに集中する遷移本数が添えられている。ここで、この集中する遷移の本数をその場所の人気度と呼ぶことにする。また人気度は、自他の区別なく数えられる。つまり、自身の可能遷移のうち、実現遷移と同方向・同程度の大きさをもつものがある場合（このとき実現遷移の終点付近にその可能遷移の終点があることになる）、この可能遷移も実現遷移の人気度に数えられる。たとえば、個体が一定速度で直進する傾向があるとき、その傾向は自身の可能遷移によって得られる高い人気度で表わされることになる。

以上のようにして得られた人気度について、実現遷移が一つでも属する場所の人気度と、可能遷移のみが属する場所の人気度を比較して分析する (Fig. 3D)。

なお簡単化のために実際の解析においては、二次元平面を一辺の長さが gl である格子で分割し、その格子内部に含まれる遷移の終点の数を数えた（付録“解析方法の詳細”を参照のこと）。

ミナミコメツギガニの群れにおいて、ほぼすべての個体は他個体と同期して運動するが、一部の個体は摂餌のため立ち止まることがある。このため、解析を行なう前に軌跡の総距離が平均の五分之一に満たない個体を動かない個体として取り除いた。取り除いた個体は各セッション（人気度の計算）において最大でも全個体数の十分の一に満たなかった。

2.4 結果

ここでは、前節で述べたように、実現遷移と可能遷移の人

気度を比較しながら見ていく。

Fig. 4A は実際の群れにおける実現遷移と可能遷移の人気度の頻度分布を表示している。実現遷移のほうが可能遷移に比べてより人気度が大きいほうへ傾いていることがわかり、両者の間には有意差が見られる ($p < 10^{-15}$, ウィルコクソン符号順位検定)。これは実現遷移が可能遷移に比べてより遷移が密集している方向へ向いていることを示している。

さらに **Fig. 4B** ではコントロールにおけるそれぞれの分布が表示されている。可能遷移が過去の履歴のゆらぎならば、実現遷移は現在のゆらぎと考えることができる。このゆらぎが、外部から由来するものなのか、それとも群れ内部に由来する、つまり群れ形成に関与するものなのか、が問題である。よってコントロールでは、各個体の可能遷移はそのままの状態、実現遷移はランダムに張り替えられた。各個体の実現遷移の終点は、それぞれの可能遷移が成す最大角度と最大移動距離から構成される領域に一樣確率で配置された。Fig. 4B で表示されているとおり、二つの分布には有意差は見られず ($p > 0.05$, ウィルコクソン符号順位検定)、多くが人気度 1 (つまりその遷移の終点付近に他の遷移の終点がない) となっている。Fig. 4 からミナミコメツギガニの運動のゆらぎは、単に外部から受ける摂動というよりも、群れ内部に起因していることが示唆される。

Fig. 5 では、実現遷移の人気度の平均値から可能遷移の人気度の平均値を差し引いた値、を Table 1 のすべての群れに対して、そのコントロールと比較して表わしている。この値が大きいほど、可能遷移に比べて実現遷移がより人気度の高い場所へ移動する傾向があることを意味する。Fig. 5 では、いずれの群れに関しても、実際の群れにおける値が、コントロールの値より大きくなるという結果が得られた。

さらに **Fig. 6** では P (遷移の数)、 dt (微小観測時間)、 gl (格子の一辺の長さ) のうち二つを固定して、残りの一つが、Fig. 5 の縦軸と同様、実現遷移の人気度の平均値から可能遷移の人気度の平均値を差し引いた値、に与える影響を分析している。

Fig. 6A は、 gl が与える影響を表示している。 gl が大きくなるほど、現実の群れとコントロールの両方が大きくなっていくが、現実の群れの値はコントロールの値に対して常に大きいことがわかる。格子が大きくなるほど、多くの遷移を含むことになるので、この結果は妥当であるといえる。Fig. 6B は、 P が与える影響を表示している。 P が大きくなるほど、現実の群れにおける値はやはり大きくなってゆく一方で、コントロールのほうでは大きな変化は見られずほぼ一定の値を取る。これは、現実の群れにおいては、現在の遷移が参照する過去の遷移の数が大きくなればなるほど実現遷移と可能遷移の人気度の差が大きくなるが、コントロールにおいては、現在の遷移は過去の履歴と無関係に配置されるので、過去の遷移の数は人気度の差にあまり影響を与えないと考えられる。Fig. 6C では dt が与える影響を表示している。現実の群れの値では、ピークが確認できる ($dt = 0.67$ sec) 一方で、コン

トロールでは見られず常に現実の群れの値より小さい値を取る．このピークの存在は，ミナミコメツキガニの群れが意思決定における固有の時間をもつことを示唆している．

最後に，実際の群れにおいて実現遷移と可能遷移がどのように配置されるかを，**Fig. 7** に示す．

3. おわりに

群れ研究における従来のモデルでは，群れが被るゆらぎは，熱システムにおけるゆらぎのように全体に一樣なランダムノイズであると考えられてきた．しかしながらわれわれの解析は，ミナミコメツキガニの運動のゆらぎは，外部から起因するというよりも，むしろ群れ内部から生じ意思決定にうまく利用されていることを示唆している．

われわれは遷移履歴を内的ゆらぎとして，カニがどのように自他の遷移履歴を利用しているかを検証した．その結果，カニは自他の過去の運動方向においてより人気のある方向へ移動することがわかった．これは，各個体が相互に運動を予期し合い，群れとしての運動を決めていることを示唆するものである．

本研究でわれわれが提案した解析方法は，従来の群れモデルが想定していない，群れの内的ゆらぎや相互予期を対象にした初めての解析方法であるといえる．

参 考 文 献

- 1) J.K. Parrish and L. Edelstein-Keshet: Complexity, pattern, and evolutionary trade-offs in animal aggregation, *Science*, **284**-5411, 99/101 (1999)
- 2) I. Couzin: Collective minds, *Nature*, **445**-715 (2007)
- 3) R. Goldstone and T. Gureckis: Collective behavior, *Topics in Cognitive Science*, **1**-3, 412/438 (2009)
- 4) C.W. Reynolds: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, *Computer Graphics*, **21**-4, 25/34 (1987)
- 5) Y. Vicsek, A. Czirok, E. Ben-Jacob and O. Shochet: Novel Type of Phase Transition in a System of Self-Driven Particles, *Phys. Rev. Lett.*, **75**-6, 1226/1229 (1995)
- 6) M. Ballerini, N. Cabibbo, R. Candelier, A. Cavagna, E. Cisbani, I. Giardinina, A. Orlandi, G. Parisi, A. Procaccini, M. Viale and V. Zdravkovic: Empirical investigation of starling flocks: a benchmark study in collective animal behaviour, *Animal Behavior*, **76**-1, 201/215 (2008)
- 7) M. Ballerini, N. Cabibbo, R. Candelier, A. Cavagna, E. Cisbani, I. Giardinina, V. Lecomte, A. Orlandi, G. Parisi, A. Procaccini, M. Viale and V. Zdravkovic: Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study, *PNAS*, **105**-4, 1232/1237 (2008)
- 8) A. Cavagnaa, A. Cimarilib, I. Giardinina, G. Parisib, R. Santagatib, F. Stefanini and M. Viale: Scale-free correlations in starling flocks, *PNAS*, **107**-26, 11865/11870 (2010)
- 9) C.A. Yates, R. Erban, C. Escudero, I. Couzin, J. Buhl, I.G. Kevrekidis, P.K. Maini and D.J.T. Sumpter: Inherent noise can facilitate coherence in collective swarm motion, *PNAS*, **106**-14, 5464/5469 (2009)
- 10) Y.P. Gunji, T. Niizato, H. Murakami and I. Tani: Typ-ken (an amalgam of type and token) drives infosphere, *Know. Tec. & Pol.*, **23**-1, 227/251 (2010)
- 11) H. Murakami, T. Niizato and Y.P. Gunji: A Model of Scale-Free Proportion Based on Mutual Anticipation, *International Journal of Artificial Life Research*, **3**-1, 35/45 (2012)
- 12) Y.M. Noam and G. Robert: Oscillations in shoal cohesion in zebrafish (*Danio rerio*), *Behav. Brain Res.*, **193**-1, 148/151 (2008)

《付 録》

A. 解析方法の詳細

群れの個体数を N とする．各個体は二次元離散空間上 $V \times H$ を移動するものとし， $V = \{1, 2, \dots, V_{MAX}\}$ また $H = \{1, 2, \dots, H_{MAX}\}$ とする．このとき，ある時刻 t における k 番目の個体は，

$$P(k, t) = (x, y) \quad (A.1)$$

で表わされる．またこのとき $x \in V$, $y \in H$, $k \in K = \{1, 2, \dots, N\}$ で， $P(k, t_0)$ を個体の初期位置とする．

ミナミコメツキガニが遷移履歴をどのように利用しているかを調べるために，まず微小観測時間 dt ごとに得られる P 本の個体の連続した遷移を計算する． K 番目個体の i 番目の遷移 $v(k, i)$ は

$$v(k, i) = P(k, t_0 + i dt) - P(k, t_0 + (i-1) dt) \quad (A.2)$$

で表わされる．またこのとき $i \in I = \{1, 2, \dots, P\}$ ．

各個体の遷移履歴のコレクションを構成するために，個体の各遷移の始点を自身の最終遷移の始点 (i.e. $P(k, t_0 + (P-1) dt)$) に移す．始点を移すことによって新たに得られる各遷移の終点 $\tau(k, i)$ は

$$\tau(k, i) = P(k, t_0 + (P-1) dt) + v(k, i) \quad (A.3)$$

で表わされる．この始点を移した遷移に対して，最終遷移を“実現遷移”，その他の遷移を“可能遷移”と呼ぶことにする．

ここからは，人気度，つまり実現遷移と可能遷移の終点の密集度を計算する．まず，人気度を定義するために先に定義した二次元空間を一辺の長さが gl である格子で分割する．したがって空間上には $Int((V/gl)(H/gl))$ 個の格子が存在することになる．ここで $Int(x)$ は $X \leq x < X+1$ であるような X を返す関数である．つぎに，各格子 $G(w, z)$ を以下のように定義する．

$$G(w, z) = \{(x, y) | (w-1)gl \leq x < wgl \wedge (z-1)gl \leq y < zgl\}. \quad (A.4)$$

またこのとき， $w \in W = \{1, 2, \dots, Int(V/gl)\}$, $z \in Z = \{1, 2, \dots, Int(H/gl)\}$ である．

こうして得られた格子の，内部に含まれる実現遷移また可能遷移の終点の数を，各格子の人気度 $|pg(w, z)|$ とする．つまり，

$$pg(w, z) = \{(x, y), x \in V, y \in H | (x, y) = \tau(k, i) \in G(w, z)\}. \quad (A.5)$$

実現遷移が可能遷移に比べてより遷移が密集した場所を指しているかどうかを調べるために、ここで、人気度を、少なくとも一つ実現遷移の終点を含んでいる場所のものと可能遷移の終点のみの場所のものに分けて考えなければならない(当然、遷移の終点が一つも含まれていない格子は無視する)。したがって、実現遷移を含む格子の人気度 $|pa(w, z)|$ と可能遷移のみを含む格子の人気度 $|pp(w, z)|$ は以下のように定義される。

$$|pa(w, z)| = |pg(w, z)|, \quad \text{if } \exists (k \in K) \tau(k, P) \in pg(w, z) \quad (\text{A.6})$$

$$|pp(w, z)| = |pg(w, z)|, \quad \text{otherwise} \quad (\text{A.7})$$

なお、実現遷移を含む格子の数 N_{pa} 、可能遷移のみを含む格子の数 N_{pp} はそれぞれ、 $N_{pa} = |\{(w, z) \in V \times H \mid pa(w, z) \subseteq G(w, z)\}|$ and $N_{pp} = |\{(w, z) \in V \times H \mid pp(w, z) \subseteq G(w, z)\}|$ で表わされる。

本解析では、 P (遷移の数)、 dt (微小観測時間)、 gl (格子の一辺の長さ) を変えながら、 $|pa(w, z)|$ と $|pp(w, z)|$ を比較して見ていく。また本文中の gl の長さは画像解析時のピクセル数で表示されているが、本研究中では 1 ピクセルの一辺の長さは 1.2 mm に対応している。

[著 者 紹 介]

村 上 久

2012 年神戸大学大学院理学研究科博士課程前期課程修了。同年同研究科博士課程後期課程入学、現在に至る。

西 山 雄 大 (正会員)

2012 年神戸大学大学院理学研究科博士課程後期課程修了。同年同大学大学院理学研究科研究員、現在に至る。

新 里 高 行 (正会員)

2012 年神戸大学大学院理学研究科博士課程後期課程修了。同年日本学術振興会特別研究員、現在に至る。

榎 本 洸一郎

2011 年公立はこだて未来大学大学院システム情報科学研究科博士(前期)課程修了。同年同大学大学院システム情報科学研究科博士(後期)課程入学。2012 年日本学術振興会特別研究員(DC2)、現在に至る。

戸 田 真 志

1998 年北海道大学大学院工学研究科博士後期課程修了。企業研究員、公立はこだて未来大学講師、准教授を経て、2012 年熊本大学総合情報基盤センター教授、現在に至る。

森 山 徹

1999 年神戸大学大学院自然科学研究科知能科学専攻博士後期課程修了。研究員、助手を経て、2007 年信州大学ファイバーナノテク国際若手研究者育成拠点助教、現在に至る。

飯 塚 浩二郎

2006 年国立大学法人総合研究大学院大学物理科学研究科宇宙科学専攻博士後期課程修了。中央大学理工学部電気電子情報通信工学科助教を経て、2008 年信州大学ファイバーナノテク国際若手研究者育成拠点助教となり現在に至る。

郡司ベギオ幸夫

1987 年東北大学大学院理学研究科博士後期課程修了。助手、助教を経て、99 年神戸大学理学部地球惑星科学科惑星大講座教授、現在に至る。