

惑星科学と非線形科学の接点：化学反応から生物計算まで

白川智弘¹, 郡司ペギオ幸夫², 小松崎民樹³

(要旨) 惑星科学と非線形科学にはどのような接点があるのでしょうか？カオスの源流は恒星力学の三体問題に端を発していることは周知の通りであるが両者の関係はそれだけではない。天文学者堀源一郎氏が開発したリー正準変換摂動理論は、カオスの発展の素地をつくっただけではなく、化学反応や蛋白質の構造変化における「偶然と必然」の原理を解き明かそうとしている。しかしながら、この問題が宇宙船の安価な惑星間航路を如何に、惑星系の重力場が存在する宇宙空間から、抽出するかという問題と等価であることは殆ど知られていない。また、NASAはDNA、粘菌といった生物計算の構築原理を2002年から10年間3千万ドルという巨額の予算を投じて研究し、次世代の宇宙探査開発に活かそうとしている。本稿ではこうした惑星科学と非線形科学との間の新しいクロストークに関連した我々の最近の研究成果を紹介する。

1. はじめに

NASAは宇宙における生命の起源、進化、分布および未来を研究するAstrobiology（宇宙生物学）を推進するため、NASA Astrobiology Instituteを1998年に設立した。また、ノイマン型コンピュータではない生物計算原理を活かした次世代の宇宙探査開発も2002年から巨額の研究費を投じて積極的に推進している。人類は、ギリシャ時代の古代から天や星を見つめては、虚心坦懐に、「運動」、「物」、「我々そのもの」について考えてきた。自然の非線形性から生じる複雑さも太陽、地球、月のような三体問題から初めて人々は学ぶことができた。「状態は変わる」、「創発する（予想外のことが起こる）」ことを考えると、どういうことであろうか？「状態が変わる」ということは、「化学反応が生起する」、「生体分子の構造が変わる」、…など、

「ものの運動」の起源に関係する一般的な問いである。「創発する（予想外のことが起こる）」とはわれわれ生命体に普遍的な現象である。生物はその習性や社会的規範に従って行動しているが、予想外の環境の変化に適応する柔軟性も持ち合わせている。これは、従来の計算概念では、表現・実装できないことが知られている。「未知の惑星との遭遇」を想定した際にどのような次世代宇宙開発が在り得るであろうか？そこでは既存の計算概念を越える発想の転換が不可欠と思われる。以下の章では、これらの問いと惑星科学の間の新しいクロストークに関する我々の最近の研究成果の一端を紹介する。

2. 化学反応に学ぶ相空間輸送

2.1. 化学反応における「偶然と必然」

化学反応とは、系が何らかの形でエネルギーを獲得して励起し、ある安定状態（反応系）から別の安定状態（生成系）へ変化するプロセス全般を指す。必ずし

1. 東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻

2. 神戸大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻（非線形科学研究分野）

3. 北海道大学電子科学研究所（分子生命数理研究分野）

も化学結合の解離生成を包含する必要はなく、あらゆる状態遷移は広い意味で化学反応といえる。ここでは N 個の粒子（狭義の化学反応では原子を指し、惑星の問題としては恒星、惑星、小惑星、宇宙船など）から成る N 体の古典力学を考える。図1に、 N 個の粒子間に働く相互作用によって表される $3N$ 次元空間におけるポテンシャルエネルギー曲面上を動き回る代表的な2種類の軌道の概略図を示した。 $3N$ 次元空間における軌道に沿って、一般に N 個の多粒子が時々刻々に動き得る。図中、2つの盆地は、2つの異なる安定な粒子配置に相当する。「状態が変わる」、「粒子配置が変わる（例えば、宇宙船が移動する）」とは、ひとつの盆地から別の盆地へ系が飛び移ることに他ならない。ここで、「系」とは一般に N 粒子すべてを指すが、質量の大きい惑星間を移動飛行する宇宙船においては、近似的に惑星による重力場の存在下での宇宙船を指すものと考えてよい。

系の全エネルギー一定の条件下において、ひとつの安定状態から出発する軌道を追跡したとしよう。初期条件（すべての粒子の初期配置と初速度）に依っては、系は別の安定状態へ到達したり（図中、灰色の軌道）、分水嶺近傍で右往左往した挙句に、出発点の状態に一旦逆戻りする場合もある（赤色の軌道）。化学反応や蛋白質の構造変化における「偶然と必然」、「選択性と統計性」の原理を理解するということは、系の辿る（で

あろう）経路を初期条件の情報のみから（軌道計算をすることなしに）予測可能であるか？ということを解明することに対応する[1,2]。各粒子の相互作用の非線形性ゆえ、分水嶺を越えるくらい十分に高いエネルギーを持つ系においては、その軌道の未来は一般に些細な初期値の違いに鋭敏に依存する。特に、化学反応などの場合には、質量はほぼ同程度であるし、粒子も一般には数個から数百、数千個以上存在するため、系の軌道は初期値鋭敏性が大きいと考えられている。そのため、化学反応や蛋白質の構造変化においては、ほとんどの場合、確率論に依拠する統計力学的な枠組みのなかで論じられている。すなわち、状態変化は軌道計算をしない限り同定できず、蛋白質の構造転移などは進化の所産としてデザインされた平均場ポテンシャル上の“偶然の産物”と一般に考えられてきた。

2.2. 宇宙船の惑星間輸送：二体問題から多体問題へ

1991年にプリンストン大学の数学者Edward Belbrunoが“惑星間スーパーハイウェイ(interplanetary superhighway, IPSH)”の概念（NASAジェット推進研究所のMartin Lo博士による命名）[3]を提唱するまでは、宇宙船は多くの燃料を搭載して惑星の重力場に抵抗しながら“力任せに”太陽系を横断するように設計されてきた。例えば、Apolloの月面着陸計画においては、地球、月などの重力場に抵抗しながら宇宙空間を“航海”するために、Apolloは総重量の約50%の液体燃料を搭載する必要があった。簡単のため、良く知られている制限三体問題を例に取り上げてIPSHの理念を説明しよう。

共通重心の周りでそれぞれ円軌道を描いて運動している2つの物体（例えば、地球と月）に対して、質量が無視できるほど小さな第三の物体（例えば、宇宙船）があるとする。このとき、最初の2体との相対位置を変えずに回り続けられるような位置が5つ存在することが、18世紀、オイラーとラグランジェによってすでに解かれている。2体の重心を中心とする回転座標系

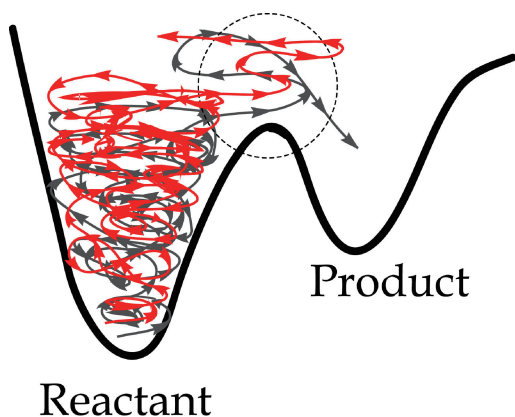


図1: ポテンシャルエネルギー上の2つの盆地のあいだを遍歴する状態遷移の概略図

から見ると、第三の物体に働く重力および遠心力が釣り合う3種類の不安定固定点 (L_1, L_2, L_3) と2種類の安定固定点 (L_4, L_5) が存在することになる。たとえば、 L_1 点は質量の大きな2体を繋ぐ線上に位置し、そこに位置する第三の物体（宇宙船や小惑星など）は最初の2体による重力と遠心力がちょうど釣り合い、回転座標系においては静止して見えることになる。少しでもその点からずれると、宇宙船などの第三の物体は L_1 点からはほぼ初速度0から加速しながら次第に遠ざかり、質量の大きな2体のいずれかへ接近する。回転座標系での不安定固定点は、非回転系では不安定（準）周期軌道に相当する。そのため、 L_1 点から遠ざかる第三の物体は、非回転系では、不安定（準）周期軌道から出発して、宇宙船はチューブ型の軌道を描きながら、質量の大きな物体からの重力を感じて、質量の大きな物体のいずれかに接近することになる。

Apolloの月面着陸計画において、人類はApolloが地球上から打ち上げられるときの（地球からの）重力の影響および月に到達する（離陸する）際の（月からの）重力の影響を二体問題の枠組みのなかで正確に評価した。しかし、地球と月による多体問題としての重力場の影響は考慮されず、宇宙船は多くの燃料を搭載して“力任せに”宇宙空間を闊歩するように設計されてきた。IPSHは、三体問題における L_1 点近傍の運動から想像されるように、惑星との重力を上手に利用することによって“風に乗って飛行するハングライダーのように”、僅かな燃料で惑星間を行き来することを可能にするチューブ型の輸送航路を意味する。宇宙船Genesisは太陽と地球の L_1 点近傍の不安定周期軌道（Halo軌道）を5周回しながら、太陽系の塵などを採取したのち、直接、地球に帰還せず、太陽と地球の L_2 点近傍に立ち寄りて3万マイル寄り道をした後に帰還するように設計されている[3]。この輸送経路はIPSHの概念に立脚して設計されており、総重量の5%の液体燃料のみで全旅程を辿ることができることは、宇宙船Apolloが総重量の半分もの液体燃料を搭載したことを考えると、実に驚くべきことである [3]。二体

問題に比べて、2自由度以上を扱う多体問題になると、一般に大域的な解析解は存在しない。しかしながら、IPSHは不安定固定点領域において（カオスの有無には関わらず[4,5]）安定に存在しえる法双曲的不変多様体[4]と呼ばれる不変多様体から伸びているチューブ状の相空間構造（後述）を利用している。また、一般に不安定固定点から離れた領域で生起する異なるチューブの間の交差および接触はカオスの存在ゆえに普遍的に存在する現象である。通常、「カオス＝混沌？予測不可能？」といったイメージが先行している（と思われる）が、IPSHにおいては、カオスの存在ゆえに、惑星と惑星を繋ぐ複数のチューブを（正しい瞬間に正しい速度で）交差近傍で飛び移ることが可能となり、事実上、殆ど燃料を消費することなく、異なる複数の惑星を経巡ることができる [3]。このことをCaltechの数学者Jerold Marsdenは「不安定なものは安定なものに比べて（それを使うと）効率がいい」と表現している。もちろん、気流を利用して飛行するハングライダーとエンジンを搭載したブルート・フォース的な飛行機では飛行時間が異なるように、IPSHが与える低燃料経路自体は短時間経路であるとは限らない。実際問題、IPSHを上手に活用し、惑星探査ミッションに要する燃料と時間の両方を天秤に掛けて設計する必要があるであろう [3]。二体問題からカオスを積極的に利用した多体問題へと向かうことによって宇宙船輸送の効率化が実現したように、近年はまさに発想の転換時期にあると言える。

2.3. 化学反応と惑星間輸送を結ぶ高次元相空間の幾何構造

化学反応における「偶然と必然」の問題は宇宙空間における宇宙船の惑星間航路の同定問題と密接に関係している。それを示すために（ L_1 などの）不安定固定点近傍の相空間がカオスの存在する状況下において、一般的にどのようなになっているかを概観しよう（理論の詳細は紙面の都合上原著[1,2]に委ねる）。

以下は簡単のために、自由度が2つの場合を考える。

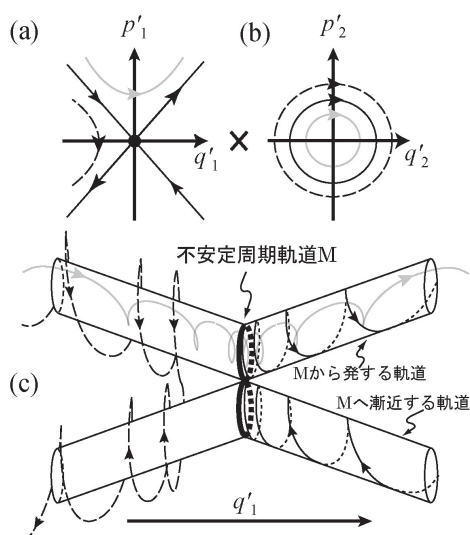


図2: 2自由度力学系の不安定固定点近傍の相空間構造と輸送経路

図2 (a) は、ちょうど L_1 点のような不安定固定点近傍の相空間の流れを描いている。ここで、 (p'_1, q'_1) は対応する運動量とそれに共役な座標を表している。原点が不安定固定点に相当し、原点に位置する限り、永遠にその位置に系は留まり続ける。他方、例えば、正の方向に無限小ずれたとすると、次第に加速し（次第に運動量が正に増大する）、不安定固定点近傍から離れていくことになる（第一象限の矢印参照）。制限三体問題の L_1 点に示されるように、不安定固定点は回転系において止まっているが、実体は不安定（準）周期軌道である。図2 (b) は全系を構成する2番目の自由度 (p'_2, q'_2) がつくる相空間構造を描いており、周期運動している。通常、粒子間には非線形な相互作用が存在するため、 (p'_1, q'_1) と (p'_2, q'_2) のようにお互いの自由度が（局所的に）独立に振舞うような座標系が存在するか否かは決して自明ではない。（ここでは、紙面の関係上、詳細には立ち入らないが、 (p', q') は堀源一郎が考案した（高次展開および新旧正準変数の正・逆変換が容易な）リー正準変換摂動理論[6]と呼ばれる方法論を多粒子系のポテンシャルの鞍部領域に適用することで切り出される（局所的な）座標系であるということ；カオスを生み出す「小さな分母の問題」と呼ば

れる現象は、 (p'_1, q'_1) とその他の自由度群の間には生じにくい。そのため、 (p'_2, q'_2) 、 (p'_3, q'_3) 、…の間に強いカオスが存在しても、 (p'_1, q'_1) は（少なくとも鞍部領域近傍では）独立に振舞うこと[1]；どのような場合に (p'_1, q'_1) の独立性が消失するかはごく最近になって分かってきたこと[5]だけ付記しておきたい。

いま、系が (p'_1, q'_1) 上の不安定固定点に位置するか、もしくは不安定固定点に対して無限小はなれた位置から（〜）無限の時間かけて離れていく（近づいていく）軌道（図2 (a) の矢印の付いた実線参照）をとるとする。その際に、 (p'_1, q'_1) 上の運動に独立な (p'_2, q'_2) では、ある周期軌道（図2 (b) の実線）を描く。今度は、系が q'_1 軸を“負”から“正”へ（ $p'_1 > 0$ で）横断する軌道をとるとする（図2 (a) の灰色の線）。この場合、上記の場合に比べ、 (p'_1, q'_1) はより多くのエネルギーを要するが、全系のエネルギー E は保存しなければならないため、 (p'_2, q'_2) においては上記の場合に比べて、振幅の小さいエネルギーを持つ必要がある（図2 (b) 灰色の軌道）。同様に、 (p'_1, q'_1) において、実線の軌道よりも低いエネルギーを持つ場合には、系は軸を“負”から“正”へ（もしくは逆）横断することはできなくなり、その分、 (p'_2, q'_2) ではより振幅の大きい周期軌道を描くことになる。

図2 (c) はエネルギー一定のもとでの全相空間構造の概略図を示している。不安定周期軌道 M は L_1 点における Halo 軌道に相当すると考えてよい。不安定周期軌道 M （の無限小近傍）から次第に離れていく軌道あるいは M へ漸近する軌道は不安定周期軌道 M から発する“チューブ”状の軌跡を描くことが分かる。ここで重要なことは系が q'_1 を“負”から“正”へ（もしくは逆）移動するためには、系は対応するチューブのなかを必ず通らなければならないことである。不安定周期軌道 M を高次元系へ拡張したものが法双曲的不変多様体に相当する（後者の場合、多様体内部の運動がカオスであっても構わない）。

近年、我々は一般の N 体問題において、化学反応などの「始状態」と「終状態」を繋ぐ分水嶺、または

L_1 , L_2 , L_3 点などの不安定固定点領域には輸送を媒体するチューブが相空間上に頑健に存在することを明らかにした[1,2,4,5]. 最も重要なことは、チューブを構成する軌道に対する運動方程式の解が不安定固定点近傍の局所領域に存在すること、すなわち、不安定固定点近傍を横断する輸送現象は“少なくとも部分的に”(カオスが存在する状況下にあっても存在する)規則的経路を辿っている可能性が高いことである。このように不安定固定点近傍には、系の輸送を媒介する規則的な“チューブ”が相空間上に頑健に存在する。

惑星間輸送の問題では、例えば、 L_1 点から発するチューブと L_2 点へ漸近するチューブが宇宙相空間のどこでどのように交差するかを計算機で評価し、「正しいタイミングで、正しい速度で」交差する瞬間に必要な応じて軌道補正をするだけで、チューブを乗り換えることができる。このチューブ輸送は物体のあいだに働く重力相互作用に依って駆動されるため、基本的に燃料を必要としない。従って、チューブを乗り換える瞬間に少し燃料を使えばよいことになる。

惑星間輸送の問題は、宇宙船の運動が惑星の運動に影響を与えることがないので、どんなに(質量の大きな)惑星の数が増えても宇宙船の運動方程式はたかだか宇宙船の座標3自由度に対する時間依存の力学系として記述することができる。一方、化学反応の場合には、一般に、系を構成する原子すべてが渾然一体となって運動する。そのため、化学反応に関しては克服すべき未解決問題が多く残っている。たとえば、どのような状況下においてチューブが崩壊し、真の統計性が出現するのか[5]、また、不安定固定点から発するチューブがどのように各安定状態のなかを分岐しながら経巡るのか[7]などは、エルゴード問題に関わる統計力学の根幹に深く関わっている。

3. 粘菌計算に学ぶもの

3.1. 惑星科学における生物の応用可能性

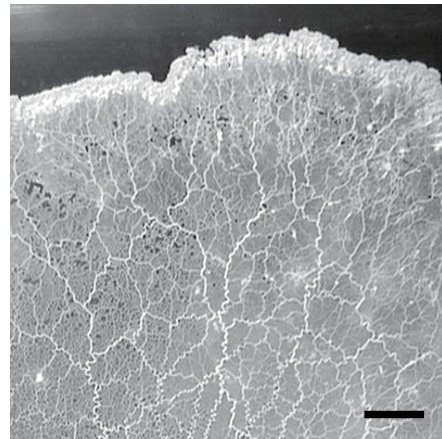


図3: 寒天培地上に広がっている真性粘菌変形体(Bar: 2cm)

未知の環境、例えば人類未踏の惑星を、ロボットを用いて探査することを考える(このとき、ロボットを遠隔操作できないだけでなく、予め探査する惑星についての情報も何一つ得られない状況を想定する)。この時、ロボットコントロールのためのシステムはどのように構築されるべきだろうか? 基本的に、ロボットはある一定のルールに従って作動する。仮に“背の高い障害物を避けて進め”というルールをロボットに与えたとする。このロボットが深い穴の中に落ちてしまった場合、四方を壁=背の高い障害物に囲まれたロボットは、ルールを遵守するが故に、デッドロックに陥ってしまう。未知の環境においてはその環境要因の全てを明示的に指定することができないため、デッドロックを回避しつつ適応的に振舞うシステムを構築することは難しい。このような状況は、しかしながら、生物システムにおいては何の問題も引き起こさない。通常とは異なる環境条件下に置かれたとしても、生物は矛盾に頓着せず、見事に適応する。生物のこのような性質を例えば惑星探査システムに実装できたとすれば、未知の惑星においてデッドロックに陥ることなく探査を続けることのできるシステムの構築が期待できるであろう。近年の惑星科学において、柔軟で自律的な生物システムの性質を応用しようとするバイオミメティクスが、幅広い注目を集めている。アメリカのNASAは、UCLAのInstitute for Cell Mimetic

Space Exploration (CMISE) に対し、2002 年からの 10 年間で 3000 万ドルという巨額の予算を投じている (CMISE: <http://www.cmise.org/> 及び [8]) . CMISE は現在ナノスケールバイオセンサー、生物型情報処理アルゴリズムの開発から宇宙飛行士の健康管理に至る多岐に渡る分野において、生物学の応用を試みている。このようなバイオミメティクスの研究において、最近特に注目されているのが真性粘菌の変形体である。ここでは、我々が行っている、真性粘菌変形体を用いた生物計算に関する研究について紹介する。

3.2. 真性粘菌変形体

真性粘菌はそのライフサイクルにおいて、全く異なる 2 種類の細胞構築を見せる。胞子から出芽した真性粘菌の単細胞アメーバは、好条件下では分裂を繰り返し無性的に増殖するが、栄養源の不足による飢餓などの環境の変化が生じるとそれに対応して集合し始める。集合した単細胞アメーバたちは互いに融合することにより変形体と呼ばれる単細胞多核体の巨大アメーバを形成する (図3)。適切な環境下では、変形体は数十センチメートルから数メートルにまで成長し、単細胞アメーバに比して桁外れに大きなスケールを利用した大規模な運動を行う。変形体細胞は単細胞としては並外れて大きな平面状の構造を持つが、変形体の細胞質は細胞全体に渡って同調的に振動し、その振動を介して単細胞としての協調性が高度に保持されている。例えば変形体細胞の一部が誘引物質や忌避物質に接した場合、局所的に細胞質の振動パターンが変化し、それが細胞全体へと伝播される。つまり、環境の情報は細胞質の振動の変化として伝えられ、複数の情報は細胞全体の振動パターンとして統合される。そして、この振動パターンが細胞の運動や形態形成をコントロールしている [9]。このような性質を持つ変形体は、“生きた”結合非線形振動子系として実験あるいはモデル化の対象となっている。非線形科学との関わりが深いモデル生物である (一例として、[10] を参照のこと)。同時に変形体は、巨大な細胞体全体を通じて協調し、良く

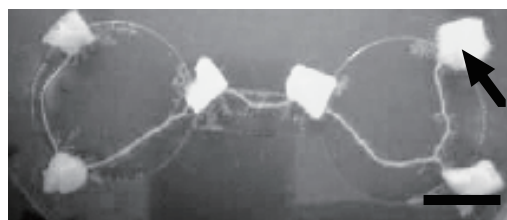


図4: 相同性を示した 2 つの変形体ネットワーク。
(矢印: 栄養源 Bar: 1cm)

環境に適応した挙動を見せるという点において、“生きた”計算システムとしても近年注目を集めている。

2000年の Nature 誌上に、変形体を用いて迷路を解く実験の論文が掲載された [11]。この実験では変形体が迷路の全体に広がった後、迷路の入り口と出口に相当する 2 箇所に栄養源が与えられた。変形体は栄養源に集合しつつ徐々に収縮し、最終的には 2 箇所の栄養源上とそれらを結ぶ最短経路上に収縮した。この論文によって変形体は単細胞でありながら“原始的なインテリジェンス”を持つ生物素子として捉える動きが生まれ、その後、変形体による計算過程の研究や、あるいは変形体を利用した計算機の構築などの研究が盛んに行われるようになった。我々の研究室では、変形体による計算の特性を理解するための生物学的基礎研究を進めている (次節 3.3.)。また一方で我々は、変形体を計算機やロボットと接続することにより変形体が持つ生物としての特性—例えば自律性や適応性など—を実装するための研究も行っている (次々節 3.4.)。

3.3. 粘菌計算の自律性・適応性・頑健性

これまでの研究で我々は変形体が自律的、適応的かつ頑健な挙動を示すことを明らかにしてきた。そのうちの 1 つが変形体に複数の栄養源を与え、その間にネットワークを形成させる実験である [12]。この実験で我々は寒天ゲルのプレート上に円形にくり抜いたプラスチックフィルムを乗せ、そこへ変形体を広がらせ、変形体は乾燥表面を嫌うため、円形のフィールドの中に留まる。さらにフィールドの端に正三角形に配置した 3 つの栄養源を与え、その間にネットワーク

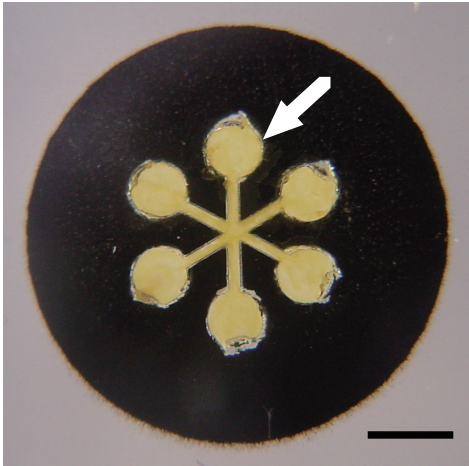


図5：変形体をプラスチックフィルムで囲むことによって形成された変形体振動子。矢印で示す円形の部分がひとつの振動子に相当する。(Bar: 5 mm, サウスハンプトン大学 Klaus-Peter Zauner 氏提供)

を形成させた。この時、変形体は全ての栄養源を結びつつ、最小全域木（全ての栄養源を結ぶネットワークのうち、エッジの数が最小となるもの）やシュタイナー最小木（全ての栄養源を結ぶネットワークのうち、ネットワークの全長が最小となるもの）などに相当する効率の良いネットワークを形成した。さらに我々は、2つのネットワークを結合させると両者は同じタイプのネットワークを形成する傾向があることを発見した（図4）。この結果は、変形体のネットワーク形成（即ち形態形成）は協同的であり、かつ迷路のような外在的な問題設定がないにも関わらず相同な形状のネットワークを形成するという意味において、自律的であることを示している。

もう1つの実験は、変形体を用いた論理ゲートの構築である [13]。変形体には互いの接触を避け、回避し合う性質がある。つまり、変形体同士には忌避性がある。この性質と、培地に含まれる誘引物質の勾配に対する走性との組み合わせにより、AND, OR, NOT などの論理ゲートが構成され、ブール演算を計算することのできる計算機が構築された。さらに、完成した AND ゲートの一部を破壊し、それが演算に対しどのような影響を与えるかを調べた。その結果、ゲートの破壊に

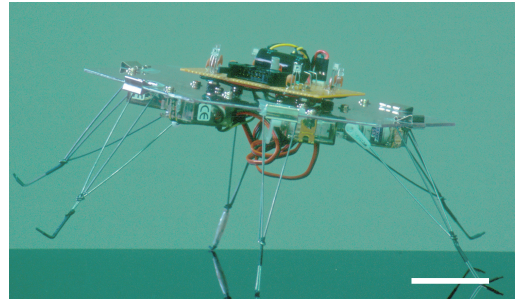


図6：光センサーとアクチュエーターを搭載した粘菌ロボット(Bar: 4 cm, サウスハンプトン大学 Klaus-Peter Zauner 氏提供)

も関わらず変形体はその挙動を変えつつも AND の計算に成功し、変形体の適応性と頑健性が示唆された。

3.4. 粘菌-ロボットインターフェイスの構築：未知の惑星探査における応用可能性

ここまで紹介したとおり、真性粘菌の変形体は単細胞生物でありながら様々な環境に対応して自律的、適応的かつ頑健な計算を行うことができる。このような性質を持つ変形体と計算機、あるいはロボットを接続することによって、計算機・ロボットにも同様の性質を実装することができないか。このような考えの元、我々は6つの振動子から成る（と見なせる）変形体（図5）と、6本足の歩行ロボット（図6）とを接続した [14]。このロボット-変形体から成るシステムは、変形体振動子、ロボットのアクチュエーター、そしてロボットに備え付けられた光センサーから成るユニットによって構成される。変形体振動子の振動パターンとロボットの運動は、次のようにして互いにフィードバックされる。6つの変形体振動子の振動パターンはリアルタイムでモニターされ、それがロボットの6本足に付属するアクチュエーターのそれぞれの運動速度に変換される。また、ロボットには6つの光センサーが備え付けられており、センサーへの光入力に従って変形体振動子への光照射が行われる（図6）。変形体には光に対する忌避性があり、光照射によって変形体振動子の振動パターンは変化する。忌避性の振動パターンに対応してアクチュエーターの運動速度を低下

させることにより，結果的にロボットは光源に対して逆方向に運動する．このような構成により，ロボットに光源を障害物として避ける性質が付与された．このようなシステムを用いて，ロボットを光源で取り囲むという実験を行った．通常のロボットシステムであれば，このような場合“光源を避ける”というルールにひたすら従い，光源に取り囲まれた場所から脱出することはできないであろう．同様の状況に変形体（図5のようなプラスチックフィルムによって閉じ込められている振動子ではなく，図3のような自由に運動できる細胞の単体）が置かれた場合，光源に囲まれた変形体はどの方向にも動くことができずしばらくの間立ち往生するが，ある時突然一方向性の運動を始め，光に囲まれた環境からの脱出を果たす．ここには明らかに，光を忌避するというルールに忠実に従う状態からとにかく運動して閉塞状況を打破するという状態へのスイッチングが認められる．この点において，変形体の挙動は適応的であり，かつある種の創発性を担っている．では，変形体に接続されたロボットはどのように振る舞ったか．

我々のロボットの場合，通常考えられるロボットシステムとは明らかに異なる挙動が観察された．ロボットが光源を避けるというルールが常に適用されるならば，ロボットはどちらの方向にも運動せず，立ち往生することになる．実際，多くのケースでは，我々のロボットは光源に囲まれた平面の中の同じ箇所を巡回するのみで，光源の中に留まり続けた．しかしあるケースにおいては，一定時間同じように光源の中を巡回した後，ある時突然光源に囲まれた平面の中心付近からはば一直線に移動して，光源に囲まれた箇所からの脱出を果たすことに成功した．このように，変形体に接続されたロボットは通常のシステムであればデッドロックに陥ってしまうような状況を，変形体において観察されるスイッチングに似た振る舞いによって克服した．変形体とロボットの接続によって，少なくとも部分的には，変形体の性質をロボットに実装することに成功したと言える．このシステムの今後の応用研究と

して，未知環境を探索するシステムなどへの展開も期待される．

共同研究者の英国サウスハンプトン大学津田宗一郎氏，Klaus-Peter Zauner氏に感謝します．本研究の一部は神戸大学理学部COE「惑星系の起源と進化」，JSPS，JST/CREST，特定領域「実在系の分子理論」等の支援を受けており併せて，ここに感謝の意を表します．

参考文献

- [1] Komatsuzaki, T. and Berry, R. S. 2001, Proc. Natl. Acad. Sci. USA 98, 7666.
- [2] Eds. M. Toda, et al., 2005, Geometric Structures of Phase Space in Multi-Dimensional Chaos, Adv. Chem. Phys. 130A, 130B (New York: John-Wiley & Sons)
- [3] Klarreich, E., 2005, Science News, 167, 250.
- [4] Murdock, J., 2002, Normal Forms and Unfoldings for Local Dynamical Systems (New York, Springer)
- [5] Li, C.-B., et al., 2006, Phys. Rev. Lett. 97, 028302.
- [6] Hori, G., 1966, Publ. Astron. Soc. Japan, 18, 287.
- [7] Shojiguchi, A. et al., 2007 Phys. Rev. E (RC) 75, 035204.
- [8] Knight, J., 2003, Nature 421, 878.
- [9] Nakagaki, T. et al., 2000, Biophys. Chem. 84, 195.
- [10] Takahashi, K. et al., 1997, Protoplasma 197, 132.
- [11] Nakagaki, T. et al., 2000, Nature 407, 470.
- [12] Shirakawa, T. et al., 2007, Biophys. Chem. 128, 253.
- [13] Tsuda, S. et al., 2004, Biosystems 73, 45.
- [14] Tsuda, S. et al., 2007, Biosystems 87, 215.