

「柔らかな機械」を目指して

(前) 拠点リーダー 土屋 和雄

従来の効率を重視した機械だけでなく環境と調和・共存できる機能を持った機械の開発が求められている。

—非線形に作用を及ぼしあう多数の要素からなる複雑なシステムは、変化する環境に適応した振る舞いを自発的に生成する—

複雑系の科学は、環境に適応してさまざまな振る舞いをする複雑なシステムの持つ柔らかな性質を明らかにした。環境と調和・共存できる機械とは、まさにこの環境適応機能を備えた柔らかな機械と捉えることが出来るだろう。21世紀COEプログラム動的機能機械システムの数理モデルと設計論において、機械工学を専門とする工学研究科機械系三専攻(機械理工学専攻、マイクロエンジニアリング専攻、航空宇宙工学専攻)と複雑系の科学において高い研究実績を持つ情報学研究科複雑系科学専攻は、国際融合創造センターと協力して、この柔らかな機械の開発を目標とする工学と理学の連携による共同基礎研究を進めている。

1. 「複雑さ」の視点から機械工学を捉えなおす

機械工学は長い歴史を持った学問分野であり、材料力学、マイクロメカニクス、熱工学、流体力学、システム工学、制御工学等の研究分野が確立されており、それぞれの研究分野で活発な研究が行われている。本拠点は、この成熟した段階にある機械工学を「複雑さ」の視点から捉えなおすことにより、柔らかな機械だけではなく、今後重要さが増してくる環境問題や社会システムなどをもその研究対象に取り入れた魅力溢れる学問分野へと発展させていくことを目的としている。

まず、本拠点で行われているいくつかの研究を紹介しよう。小川のせせらぎや木立を吹きぬけるそよ

風など、流れは身の回りに満ち溢れている。ゆっくりとした穏やかな流れは速度を速めていくと不規則で複雑な流れ、乱流に変わる。この乱流運動を制御して乱れのない流れに変えることは流体力学の長年の懸案である。乱流運動を制御するためには、まず乱流運動の複雑なシステムとしての特徴、すなわち、その複雑な運動の背後にある時空間構造—乱流の骨格となる構造—を明らかにすることが必要である。しかしながら、乱流運動が複雑な運動のために、乱流の骨格となる構造を発見することはきわめて困難であった。最近、本拠点における研究で、クエット乱流などの乱流運動に埋め込まれた不安定周期運動が発見され、この不安定周期運動が乱流の時空間構造や統計的な性質を支配していることが明らかにされた。この発見をもとに、乱流の骨格構造である不安定周期運動を安定化させることによって乱流を制御しようという従来の乱流制御法とまったく考え方を異にする乱流制御の研究が、制御工学者との共同研究によって始められている(図1)。

地球温暖化に対する技術的な解決策を見出すことは、工学に課せられた最重要課題の一つである。地球温暖化の要因は大気中のCO₂の増加である。大気海洋境界面での乱流を介したCO₂の海洋中への取り込みは大気中のCO₂の総量を決める最も重要な要因である。大規模で複雑な現象である長期的気象変動の信頼性のある予測プログラムを開発するためには、主要な要因の信頼性の高いモデルを作成することが必要である。流体力学の分野では乱流を介した熱物質輸送に関する研究を精力的に行っており、豊富な知見を持っている。そこで本拠点では、その知見と共に詳細な実験的研究によるデータにもとづいて、乱流輸送にもとづくCO₂移動係数

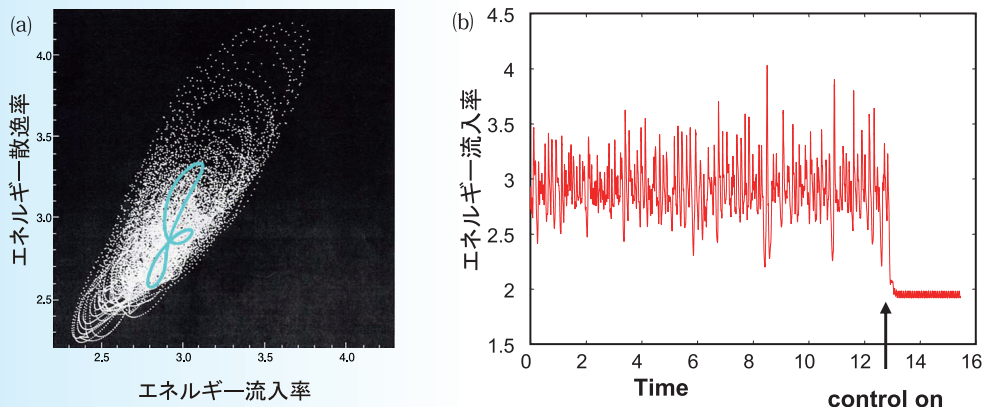


図1: 乱流に埋め込まれた不安定周期軌道とその制御。(a) 乱流に埋め込まれた不安定周期軌道. 乱流を2次元平面上に描くと複雑な軌跡を描く. その中に不安定周期軌道が埋め込まれている. (b) 乱流制御. 不安定周期軌道を制御して安定化すると, 乱流は抑えられて規則的な流れが実現される.

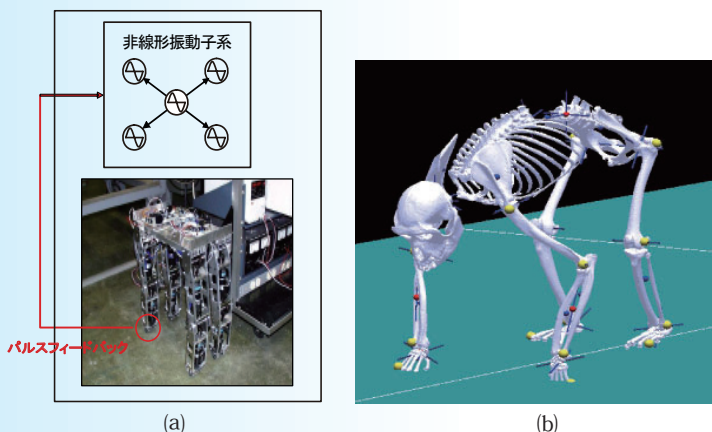


図2: 動物と機械の歩行運動。(a) 四脚歩行ロボット. 歩行速度を早くすると足並みがウォークからトロットに自然に切り替わる。(b) ニホンザルの骨格モデル. 神経回路モデル, 筋肉モデルと組み合わせて歩行のメカニズムを解明する.

の精確なモデルを作成した. このモデルは従来の現象論的なモデルに比べて, 大気から海洋中への炭素吸収量の信頼性の高い予測値を与えるものである. 現在, このモデルを組み入れた長期的気象変動予測プログラムの開発が気象学者との共同研究によって始められている.

さて, 動物のような巧みな運動をするロボットを作ることはロボット研究者の夢である. 動物は環境の変化に適応した巧みな運動を行う. たとえば, 四足歩行動物では, 歩行速度によって足並みがウォークからトロットへ自然に切り替わっていく. 神経生理学は, 脊髄にある神経回路が自発的にリズム運動を生成し四肢を動かしていることを明らかにした. しかし, この神経回路と筋骨格系の相互作用によって生成される巧みな運動のメカニズムはいまだ十分には解明されていない. 本拠点では, 振動子によって脚の往復運動を駆動すると共に, 脚先のセ

ンサー信号によってその運動を調整する歩行制御系を開発した. この制御系を取り付けた4脚歩行ロボットでは, 歩行速度を速くしていくとその足並みがウォークからトロットへ自然に切り替わっていく. 現在, 本拠点では, 動物の歩行運動の制御メカニズムの解明を目指したロボット工学者と運動生理学研究者との共同研究を始めている(図2).

2. 「複雑系機械工学」の体系化に向けて

本拠点では, 今後, これらの具体的な研究成果をもとに「複雑系機械工学」の体系化を行っていく予定である. ここで, 「複雑系機械工学」とは複雑な機械現象・機械システムを「複雑さ」の視点から研究する機械工学の横断型研究分野であり, その研究課題は次のようにまとめられる(図3). (1)

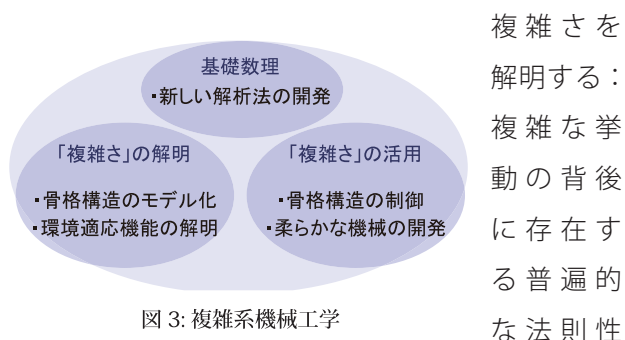


図3: 複雑系機械工学

や骨格となる構造を明らかにし, その数理モデルを導出すること, および, 自発的な構造形成によってそのおかれた環境に適応していく環境適応のメカニズムを明らかにすること. (2) 複雑さを活用する: 複雑で不安定な挙動を支配している骨格となる

構造の制御法を開発すること、および、変化する環境に対して内部構造を変化させ適応していく機能を持った柔らかな機械の設計論を作り上げること。

3. 研究者集団から研究者組織へ

本拠点は、流体力学、材料力学からシステム工学にいたるさまざまな機械システムを研究対象として自主的、自由に研究を進めている研究者が、「複雑さ」という共通の問題意識のもとで研究を進めていく中で、有機的なつながりが自発的に生まれ、機械工学の横断的な研究分野「複雑系機械工学」が形成され展開されていくことを目標としている。共通の問題意識のもとで、参加した研究者が自主的、自発的に研究を行う研究形態は基礎研究型共同研究と呼ばれる。基礎研究型共同研究では研究者間の学際的な交流の機会を充実させることが最も重要なことである。



図4: 桂インテックセンターは、桂キャンパスに設置された5つの高等研究院を持つ学際的共同研究施設である。

本拠点では、まず日常的な活動として、招聘研究者制度を充実させ、セミナーを日常化して研究者間の情報交換を盛んにすることに力を入れており、

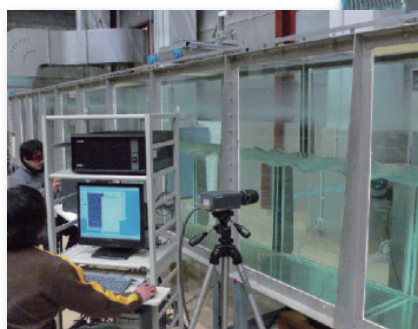


図5: 流体領域高等研究院に設置された風波水槽(長さ30m, 幅0.6m)。大気・海洋境界面における物質輸送機構のモデル作成に使われている。

過去3年間で100名以上の研究者を海外から招聘し、100回を超えるセミナーを開催した。また、21世紀COEプログラム「動的機能機械システムの数理モデルと設計論」シンポジウムを定期的を開催し拠点内の研究者の研究交流の場としている。また、桂キャンパスに設置されている学際的共同研究施設桂インテックセンターを拠点として、学内における専攻間、研究科間の学際的共同研究を推進している。本拠点はそこに設立されている2つの高等研究院と連携をとりながら単独の研究室では設置できない大型の実験設備を備えて、専攻、研究科にまたがった共同研究を行っている(図4,5)。



図6: 2004年6月28～29日に開催された第1回IIASA—京都大学21世紀セミナー。会場となった国際応用システム解析研究所前で。

更に、世界18カ国が共同運営するシステム科学の国際研究所国際応用システム解析研究所(IIASA)、ルクセンブルク、オーストリアを海外拠点として、国際的な研究活動を実施している。毎年、IIASAに

おいて、海外著名研究者を招聘した21世紀COE国際ワークショップを開催し、本拠点活動の情報発信と招聘研究者による本拠点活動の評価を行い、その報告書をIIASAレポートとしてまとめ、全世界に発信している(図6)。さらに、本拠点の提唱する

「複雑系機械工学」に賛同する海外研究機関との研究交流を積極的に実施している。2005年10月にはミュンヘン工科大学(ドイツ)と制御システム工学のワークショップ、2006年9月にはバーミン

ガム大学(イギリス)と流体力学のワークショップを開催した。

4. 研究を通しての教育 – On-The-Research Training –

本拠点では新しい研究分野を切り開く能力を持った若手研究者を育成することを目標としている。その為には、若手研究者が基礎研究型共同研究プログラムである本拠点活動に積極的に参加して自主的に研究活動を進めていく中で、自ら研究



図7: 大学院博士課程に開講されている21世紀フロンティアセミナー発表会。議論はグループ間のディベート形式で進められ、最優秀グループが全員の投票で選ばれる。2006年12月21日、付属図書館 AV ホール。

交流のネットワークを作り上げていくことが最適な育成方法である。具体的な取り組みとして、若手研究者に対する公募型研究助成制度フロンティア研究助成プログラムを実施している。これは、若手研究者が自主的に研究を進めることを財政的に援助するもので、毎年度予算の約4、5割を割り当てている。この研究助成制度を利用して、国際研究集会参加すると共に海外著名研究室を訪問して、現在進めている研究に関するセミナーを行い、助言を受けると共に国際的な研究交流のネットワークを作っていくことを積極的に奨励している。また、招聘研究者制度で招聘した招聘研究者には、博士課程学生と直接議論し助言を与える機会を多く持つことを要請している。一方、大学院博士課程において「複雑系機械工学」の講義を開講すると共に、企業の技術者、研究者に対してリカレント講座「複雑系機械工学」を定期的で開催し、若い研究者・技術者に対して現在開拓途上の研究分野である「複雑系機械工学」の研究現場の臨場感を盛り込んだ講義を行っている。また、大学院後期課程に開講されている21世紀COEフロンティアセミナーでは、数名の学生がチームを組みあらかじめ設定されたテーマに対して自由に研究計画を立案、検討してその成

果を発表し討論することを行っている(図7)。ここでは、研究能力と共にコラボレーション能力や説明能力の向上を目的としており、また国際的な活躍を意図して、討論はすべて英語で行われている。

更に、大学院博士課程学生が、海外大学・研究機関との間で研究発表と交流のための研究交流会を自主的に企画し実行している。2005、2006年にはフライブルク



大学(ドイツ)、ミシガン大学(米国)との三大学間でマイクロメカニクス分野での研究交流会が開催され、2006年には韓国科学技術院(韓国)との間で材料力学および制御システム工学分野でのワークショップが開催された。

5. 自主・自由の学風の中で

自主的で自由に研究を行っている研究者集団の中に、有機的な繋がりが自発的に生まれ、共通の研究目標に対して高いアクティビティを発揮する研究者組織が形成されていくことは、大学における研究活動の基本である。本拠点は、そのような研究環境を作り上げることを目標として活動を続けている。それを支えているのは自主・自由の京都大学の学風に育まれた学際的、基礎的な共同研究の雰囲気である。その学風をより一層充実させるため着実な努力を今後とも積み重ねていきたい。(研究の最前線「柔らかな機械を目指して」土屋和雄、京都大学広報誌「紅萌」第11号を一部改編の上掲載)