

サイエンス & テクノロジー

京都産業大学

理学部&工学部
からのメッセージ

VOL.1



想像力をかきたてる

『不思議な幾何学』!!

位相幾何学 (トポロジー) 入門 福井 和彦 教授

宇宙の起源は?

宇宙物理学を駆使してここまでわかった宇宙の謎!

原 哲也 教授

コンピュータと数学は

どういう関係に
あるのだろうか?

小林 聡 教授

“思っただけ”で アームが動く!?

BMIと脳研究の世界

藤井 宏 教授

喫煙を科学する

タバコがなぜ体に悪いのか、
細胞、遺伝子レベルで解明する

竹内 実 教授



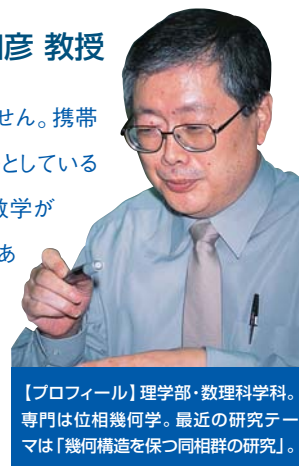
想像力をかきたてる「不思議な幾何学」!!

位相幾何学(トポロジー)入門

理学部の福井和彦先生は位相幾何学(トポロジー)が専門。「不思議な幾何学」トポロジーとは? 聞けば聞くほど、その不思議ワールドから面白くて抜け出せません。福井和彦先生にトポロジーの入り口と、大学で学ぶ数学の一端をお聞きました。

語る人。福井 和彦 教授

仕事を離れたときは何もしません。携帯電話も持ちません。独りでボーとしているのが大好きです。ただ時々数学が頭の中に浮かんでしまうときがあって、そういう時は食事中でもいきなり考え込んでしまいます。家族は「何考えてんの?」と思っているでしょうね。



【プロフィール】理学部・数理科学科。専門は位相幾何学。最近の研究テーマは「幾何構造を保つ同相群の研究」。

トポロジーをもっと知るために…

■ユークリッド幾何学・非ユークリッド幾何学

中学校の幾何で学んだ「平行線、三角形、四角形、円などの性質」などは、ギリシャ時代に完成された「ユークリッド幾何学」と呼ばれるものです。大学の「幾何学」では、それとは対照的な「非ユークリッド幾何学」というものも学びます。

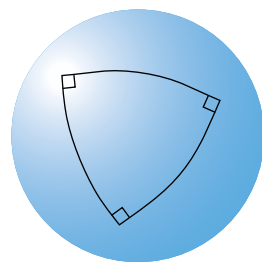
「非ユークリッド幾何学」とは「ユークリッド幾何学」の公理(*)である「直線外の1点を通り、この直線に平行に引ける直線はただひとつである(**)」を否定し、「そういう直線が2本以上引ける」、あるいは「ただひとつもない」という公理に置き換えて成立する幾何学で、19世紀末に誕生しました。発表当初は日常感覚とずれたこの幾何学の考え方は多くの批判を受けましたが、この幾何学を土台として、アインシュタインの有名な「一般相対性理論」が誕生したのです。

非ユークリッド幾何学の誕生をきっかけに、それまでとは価値観が異なる多くの幾何学が構築されるようになりました。福井先生の研究されている「位相幾何学(トポロジー)」もそのひとつです。

(*)…理論の前提(**)…「平行線の公理」という。

三角形の内角の和は180°?

「三角形の内角の和」は必ず180°。でも、それは「ユークリッド幾何学の世界」での話です。三角形がふつうの平面じゃなくて、ボールの表面のような「球面」に描かれていたら、どうでしょう? 内角の合計は180°より大きくなるはず。極端に言えば「三つの角が全部90°」なんていう三角形だって描けてしまうでしょう。球面上の世界では、私たちの知っている図形の定理は当てはまらないのです。



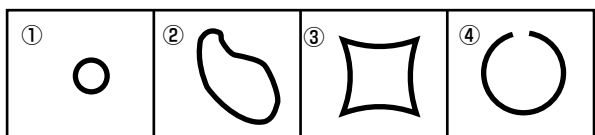
▲球の表面なら、三つの角が全部90°の三角形だって描ける!

「仲間はずれ」と言えるでしょうか。「答は見方によっては、どれも仲間はずれになる」ということです。

たとえば「左右対称である/ない」という点で分

いままでの「常識」が通用しないような世界、「非ユークリッド幾何学の世界」で「図形」について考えるのが、私たちの研究の出発点です。

下の四種類の図形を見てください。この中で、どれ



けると、②が仲間はずれ。「角がある/ない(滑らか)」なら③が仲間はずれ。そして「閉じている/開いている」という見方をすれば、④が仲間はずれになりますね。このように「図形をどう見るか」によって、いろいろな幾何学が成り立ちます。

私の専門であるトポロジーでは、この場合3番目の「線が閉じている/いない」ことに注目します。図形を作っている要素の「つながり方」に目をつけて考えるわけですね。

ドーナツとコーヒーカップは同じ形? それでは人間は?

中学校の三角形や平行四辺形の勉強でもそうですが、幾何学では「どんな場合に図形を“同じ形”と見なすか?」が重要になります。

私たちが注目するのは、図形を形づくっている辺や面の「つながり方」です。つまり、角度も、長さも、大きさも関係なく、辺や面のつながり方が同じならば「同じ形」(難しい言葉で言えば、「同相」といいます)と考えるわけです。

たとえば平面図形でいえば、三角形も、四角形も、円も、あるいは凸型や凹型、ハート型に至るまで、みんなつながり方でいえば同じ図形、

同相ということになります。このことは、自在に伸び縮みするゴムでできた図形をイメージしてみると分かりやすいでしょう。要するに、三角形だろうと円だろうとハート型だろうと、みな一本の“輪ゴム”で作ることのできる図形ということになるのです。

同じように、空間図形をトポロジー的に分類すると、ボールも、サイコロも、ピラミッドも、茶碗も、みんな「同じ形」とみなされます。これも変形が自在にできるゴムのボールで考えてみればいいでしょう。



▲平面図形でいえばこれらの球や壺も材質や凹凸やくびれに関係なく同相。

しかし浮き輪やドーナツとなるとどうでしょう。これらには“穴”が空いていますから図形としての「つながり方」から見れば、丸いボールとは異なったものということになります。また“穴がひとつ”とい



▲三角形も、円も、グニャグニャした図形も、みんな輪ゴムで作れる同じ形(同相な形)だ。

う点に着目すると、浮き輪やドーナツは、「取っ手付きコーヒーカップ」と同じ形になります。人間も、口から肛門まで一本の管でつながっていると考え、頭の中でこの穴を広げていけば、ドーナツと同じ穴が形だということが出来ます。

一つひとつの図形について、面積や円周の長さや体積をきちんと計算するのは別に、このようなどらえ方をすることもできるわけです。



▲ドーナツはカップに、カップはドーナツに、つながり方を変えずに相互に変形できる。

数学は時間の関数だ!

大学で学ぶ幾何学は、平面(2次元)や空間(3次元)の世界だけではありません。4次元、5次元といった高次元の世界もあるわけです。その場合、図形を思い浮かべるだけでも大変です。そのためには、日頃から想像力を鍛えておく必要があります。今まで学んだ世界から離れてもっと高いところに登って眺めてみることも大切でしょう。うまく登ることができれば、今まで見えなかった新しい景色が広がってくるはず。数学の本当の面白さ、楽しさがわかるはずですよ。

ただし、アルプスのような高い山に登ろうとすれば、それなりのトレーニングも、装備も必要になってきます。ドーナツとカップが同じ形、ということまでは直観的に分かったとしても、それを数学的にきちんと示すには、いろいろな知識・方法、計算技術が必要です。それを学んでいくのが大学の数学ということになりますね。

数学は万人に分かる学問。でも、それは「時間の関数」でもあるわけです。つまり、大切なのは日々の積み重ね。途中で投げ出さず、コツコツ学んでいけば、必ず、だれでも、少しずつ上に登っていくことができます。

もちろん、登るための土台作りは自分でやるしかありません。でも「少し上の世界」を示して、『土台ができたならこれに挑戦できるよ』と、励ましてあげることが出来ます。それが私の役割だと思っています。

社会のどんなところで役立っているのだろう

「トポロジー」が構築された段階では、それが世の中の役に立つかどうかなど誰も考えていなかったかもしれません。しかし現在では、私たちの生活の身近なところでもこの幾何学の考え方は大いに利用されています。

具体的には、「一筆書き問題」、「色の塗り分け問題」、「路線図」、「電気回路」、「化学構造」、「DNAの結び目」、「たんぱく質の構造」などがこの考えをもとに表されています。また、数学以外の研究分野では「宇宙論」、「物理学」などでも数多く活用されています。

今後、この幾何学の研究が進めば、さらに他の研究分野でも新たな発見が生まれる可能性が開けてくるでしょう。

宇宙の起源は？

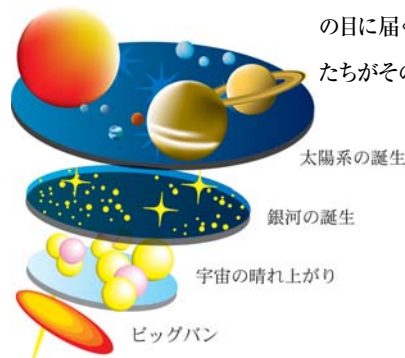
宇宙物理学を駆使してここまでわかった宇宙の謎！

古代エジプトで発達した天文学から、20世紀に入ると宇宙の成立や宇宙エネルギーに関する現象を研究する新しい学問—宇宙物理学が誕生しました。しかし「宇宙は何でできている」「宇宙の始まりは…」などという、素朴な質問に答えられるようになったのは、実はついぶん最近のことなのです。でも、まだ宇宙の96%は謎多き物質・エネルギーで占められているのです。

宇宙の端っこには壁がある ——遠い星の光は昔のもの

まず、宇宙の全体像をイメージしてみましょう。宇宙は私たちが住む地球や火星などの惑星が集まって太陽系をつくり、こうした天体の集団が銀河系を形成し、銀河系が数百とか数千個集まって銀河団をつくり、これが宇宙全体につながっていくのです。地上に住む私たちから見ると、宇宙は限りなく広がっているように思えます。でも、もっと遠くには、そのまた向こうには何があるのだろうか。宇宙はどこまで続くのだろうか。これを考えるのが宇宙物理学なのです。

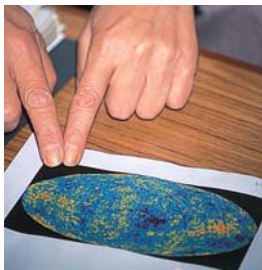
宇宙解明の手がかりとなるのが遠く輝く星の光。星の光が私たちの目に届くには、時間がかかります。私たちがその光を目にするまでに、何千年、何万年もかかる遠くの星だって珍しくありません。また、地球に届くまでに、その星は爆発して無くなってしまっている可能性さえあるのです。こうして遠い星の光、もっと



太陽系の誕生
銀河の誕生
宇宙の晴れ上がり
ビッグバン

遠い昔の光というように、私たちは宇宙の歴史をさかのぼって観察し、宇宙の姿を研究しているのです。

では、一番遠くの光はどうかと言うと、そこが宇宙の始まりであり、宇宙の端っこ。この壁の向こう側、つまり宇宙の始まり以前に光を放った星は存在しないのです。



▲NASAが発表した宇宙全体図

宇宙は大爆発(ビッグバン)から生まれた

宇宙が「ビッグバン」という大爆発によって生まれたと聞いたことがあるでしょう。およそ137億年前、何もないうちから小さな宇宙のタネが生まれました。生まれると同時に急激に膨張(インフレーション)し、引き続いて大爆発したのです。これが「ビッグバン」と呼ばれています。

この宇宙に「ゆらぎ」という銀河形成の小さなタネが発見されたのは1992年のこと。発端となったのは、アメリカのベル研究所が1965年、遠く宇宙のあらゆる方向からやってくるマイクロ波の電波雑音(宇宙背景輻射と呼ぶ)を観測したことから始まります。波長1mmあたりが一番強く、温度に換算すると絶対温度2.7度(零下270度)にきれいにそろっているのです。これで、大昔の宇宙は密度が高く熱かったが、爆発による膨張で零下270度まで冷えてきたと考えられ、このことからビッグバン宇宙説が高く評価されるようになったのです。

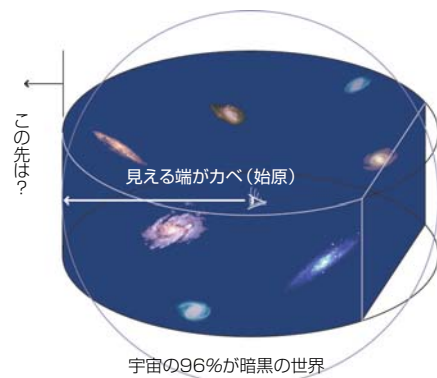
そして、アメリカのNASAが打ち上げたコピー衛星が、1992年に10万分の1度という宇宙背景輻射の温度「ゆらぎ」を発見しました。これらを解析した結果、宇宙年齢や宇宙の曲率などが判明し、宇宙物理学は新しい大きな一歩を踏み出すことになったのです。

これまで「宇宙は無限の過去から未来まで膨張している」という定常膨張説を主張していた研究者も、宇宙の始まりを認めざるをえなくなったのです。これで、ようやく宇宙の端(初期)から宇宙を語る事が可能になったのです。

宇宙の大部分を占めているのは「ダークマター」や「ダークエネルギー」

その成果を、化学や物理の授業で学んだ元素を例に具体的に考えましょう。すべての元素は宇宙で作られます。宇宙の端から内側を見るというのは、宇宙の歴史を元素の種類によって見ることができるということです。つまり軽い元素は宇宙の初期に作られたから隅っこにもあり、炭素Cをつくるには何千万年、何億年かかるからもう少し内側にあり、鉄Feなら星の中でつくられますが、ウランやプルトニウムは星が爆発しなければつくりません。それどころか「ダークマター(23%)」とか、「ダ

しかし、宇宙は元素だけでできているわけではありません。それどころか「ダークマター(23%)」とか、「ダ



この先何?

見える端がカベ(始原)

宇宙の96%が暗黒の世界

語る人。原 哲也 教授

ふと夜空を見上げる感覚は、宇宙物理学者の原先生といえども私たちと同じ感覚だ。「冬はオリオン座がきれいだなとか、夏には織姫星(ベガ)と彦星(アルタイル)、白鳥座(デネブ)を結んだ夏の大きな三角形を探します」



とのこと。休日は絵画を描いたり、のんびりと各地の庭園を見て過ごすことが多いという。研究室には美しい黄色を基調とした油絵の作品や、緑豊かな庭園の写真が飾られ先生の人柄が現れています。

【プロフィール】 理学部物理科学科教授。専攻は宇宙物理学(天体核物理学)。宇宙の大規模構造・銀河形成などの研究。

ークエネルギー(73%)」と称される怪しげな「暗黒の物質」があり、これらが宇宙全体の96%を占めていることが、2003年にWMAP衛星の「ゆらぎ」のさらに詳しい観測により分かりました。

「ダークマター」というのは、銀河や銀河団に集まってくる物質です。しかし、質量はあるのですが見えないのです。動き回っていますが、光を出さず、赤外線やX線などで観測できません。でも、これがないと先ほどの「ゆらぎ」が成長して銀河を形成することはできないのです。

最近になって、宇宙の誕生から今日までの歩みを予測できるようになりましたが、宇宙の大部分を占める「暗黒の物質」の正体の解明には残念ながら至っていません。宇宙物理学の分野で、これから解明しなければならない問題が山積していることが理解できるでしょう。

137億年前にでき上がった宇宙が解明され始めたのは最近のこと

数々の研究者が長年にわたって挑んできた宇宙。だが、21世紀の今になっても、宇宙を知り尽くすことなどまだまだ遠い将来の話です。宇宙は137億年以上前にでき上がったというのに、1965年に宇宙背景輻射の発見、1992年にゆらぎの発見と2003年のその精しい観測という大きな成果が相次いだのはごく最近のことなのです。ビッグバン理論が出てきてまだ100年にもなっていません。

宇宙には銀河が集中しているところと、あまりないところがあります。この偏りを昔は数値計算していました。もっともこれは5億光年くらいの距離で見たらの話で、最近では100数十億光年まで見られるようになった結果、大きく見ればそれほど偏っていないことがわかってきました。どうしてこのような数億光年のスケールの大規模構造が宇宙で形成されたのか一刻も早く知りたいですね。

それからダークマターやダークエネルギーの研究。ダークエネルギーのある宇宙では、私たち太陽系のある銀河系は、あと数百億年たてば近くにあるアンドロメダ銀河に近づき合体し、巨大な銀河になると予測されています。こうした宇宙の大規模構造や「ゆらぎ」のパターンの解明。ダークエネルギーの関連でブラックホールとは何なのかの解明など、興味が尽きることがありません。

夢とロマンに満ち溢れた「宇宙」に挑戦する

■人間を魅了するミクロと無限の世界

理科学志望者、なかでも理学部物理科学科を考えている受験生にとって、「宇宙物理学」に寄せる関心は高いものがあります。ミクロの世界を追求する「素粒子論」とともに「宇宙物理学」は魅力に満ちた学問分野の双壁になっています。見えない世界、想像もつかない世界は、これから学ぼうとする人間を魅了するようです。

とくに「宇宙」は、古くから多くの研究者が解明に取り組んできました。その努力が実って、少しずつ解明されてきたのです。ケプラーが惑星の運行軌道を説明し、ニュートンの万有引力がこれを裏付けました。そしてアインシュタインの相対性理論で「宇宙」での物理学の礎が固まり、「宇宙物理学」が大きく歩みだしたのです。

「宇宙」での距離の表し方に光年という単位があります。光は1秒間に30万キロ進み、この速さで1年間進む距離を1光年と呼びます。地球から何億光年という表現を見聞きしますが、実感することは困難です。こんな壮大な世界を研究する醍醐味を「宇宙物理学」で味わってください。

「研究者」はもちろん、学生の深い洞察力に「企業」の熱い関心が...

「宇宙物理学」を学んだらといって、簡単に民間企業で活かせる学問ではありませんが、企業の関心は高まってきています。ビジネスの場を宇宙にまで広げようという動きが目立つようになって来たからです。

現時点では、研究者として大学や研究所に勤める人がほとんどです。また、アメリカに渡って研究したり、「宇宙」に力を注ぐ企業の研究職に就職する人も見受けられます。いずれにしても、未知の部分に深い関心を寄せる若者に、分野を問わず社会全般から熱い関心が寄せられています。

コンピュータと数学は どういう関係にあるのだろう？

「数学」と「コンピュータ」。この両者は、ほとんど同じ世界に属するように思われていますが、その間にはかなりの隔たりがあることも事実です。しかし、具体的に説明するとすると、そう簡単ではありません。両者はどのような点で同じで、どのような点で異なっているのか？

「数学とコンピュータ・サイエンスの境界領域」で、研究が続けられている小林聡先生に伺ってみました。

数学の証明とコンピュータのプログラムの関係は？

多くの場合、数学の証明のプロセスをじっくり検討すれば、コンピュータ・プログラムを作るための処理手順(アルゴリズム)は見えてきます。いいかえれば数学の論法は、ほとんどコンピュータ・プログラムの形に翻訳することができるということです。

しかし例外もあります。「解が存在しないとすると矛盾する、従って解は存在する」という形の論法がそうで、一種の背理法です。この場合「解は間違いなくある」ことは証明できますが、実際に解を求めるプログラムを示すことはできません。いってみれば、「人間には求め方がわからなくても、神は知っている」ということなのです。このような論法では、とてもコンピュータでプログラム化することはできませんし、いささか非人間的なところのある論法だと思われる。

幸いにして、このような非人間的な論法は、数学の論理のごく一部に過ぎないことがわかっていますが、そうした論法を除外してできる「より人間臭い論理」がどのようなものであるか、自然と興味が沸いてきます。こうした論理は構成的論理と呼ばれ、私の研究テーマの一つです。

数学では「解があるかないか」だけを問題にすることも多いのですが、コンピュータの世界では「具体的にどうやって解を計算するか？」が常に問われています。そのため、コンピュータのための論理は、数学のための論理よりもっと現実的、あるいは人間的なものでなければならないのです。構成的論理を用いた証明は、自動的にプログラムに翻訳できるので、正しいプログラムを系統的に作り出す技術への応用も盛んに研究されています。



現代数学とプログラム

一方、コンピュータ・プログラムの中には、数学の証明から翻訳する形では作ることが困難なものがあります。周囲の状況の変化に応じて動作するプログラムや、プログラム自身の動作が周囲の状況を変えてしまうようなプログラムがそうです。そもそも、数学の世界では「状況の変化」といった事はあまり考えません。ある時まで $x=0$ であったのが、突然状況が変わって $x=1$ になってしまう、といったことはありません。数学では条件の真偽は不変です。

ところが、私たちが生きている現実の世界というのは、条件が次々と変わっていく世界です。例として「外が暗くなったら自動的に部屋の明かりをつける」というプログラムを考えます。「外が暗い」という条件は夜と昼とで真偽が変わりますから、これは状況の変化に応

じて動作するプログラムです。そして、プログラムの動作によって部屋の明かりがつくと、「部屋が暗い」という条件は偽から真に変わります。つまり、プログラムが周囲の状況を変化させたのです。このようなプログラムは、通常の数学の証明を翻訳することでは作り出せません。

それでは、こうしたコンピュータ・プログラムに対応できる新しい数学や新しい論理は作れないでしょうか。すこし難しいですが、あえて紹介すれば「様相論理」と呼ばれるものをあげることができます。「様相論理」というのは、計算の過程で真偽が変わったり、不明だった真偽が明白になったりする状況を取り扱う論理です。簡単に言ってしまうと「変化を扱う論理」であって、通常の数学の論理と



語る人。小林聡 教授

高校時代には数学研究同好会、文芸サークル、ロックバンドに同時に所属するなど、昔から興味の範囲は広く、趣味も多彩でした。とくにキーボードの演奏では、3つのロックバンドをかけもちしていたぐらいです。

私の研究テーマは、数学における「証明」とコンピュータの「プログラム」という二つのプロセスの対応関係を明らかにしていくことです。学生に望むのは、どんな職場に就いてもコンピュータの有効利用を推進できる人材であって欲しいということです。

【プロフィール】理学部コンピュータ科学科教授。理論計算機科学と数理論理的手法によるソフトウェア基礎理論の研究。



は全く考え方が異なるものです。このような論理を用いれば、コンピュータ・プログラムと数理論理との対応関係を明らかにすることができるのです。

最近、私が興味を持っているのは、「通信」のプログラムです。通信によって情報が伝わると、自分の知らなかったデータを知ることができますから、「知識の変化」という形で「状況の変化」が起こります。これも従来の数学では扱いきれないものです。しかし、研究が進んで通信のプログラムと論理との関係が明らかになれば、インターネットで使われているようなプログラムも、現代論理を使って分析できるようになるでしょう。論理的欠陥を取り除いて、よりセキュリティの高いプログラムを開発することにも役立つことでしょう。もちろん、これは一つの例に過ぎません。私が最終的な目標にしているのは、現代数学を使ってありとあらゆるプログラムを数理論理的に表現することです。

“情報”とは何だろう？

ところで、プログラムの研究を突き詰めていくと、“情報とは？”という問いに行き着きます。“情報”という言葉は、今の世の中では当たり前のようになくさんの人によって使われていますが、いざこれを定義するとすると実はとても難しいことに気がつきます。私は自分なりに、情報とは「それを得ることで何か新しいコトを実現できたり、わかったりする知識」と考えています。情報は神ではなく人間に属するものです。すべてを知っている神様には、そもそも“情報”などというものは存在しません。知らないこと、わからないことのある人間にこそ、“情報”となりうるものがある、と私は考えるのです。

コンピュータと数学の境界領域での探求を続けるということは、ある意味では限りなく深く人間の本質に迫っていくことなのかもしれません。



大学では「数学」を 論理的に考える楽しさを 味わってください

■「数理論理学」は

「計算機」の数学的概念の構築に大きく貢献

「数理論理学」とは、「数学」のさまざまな分野の研究を進めるための根幹にある分野で、実は中学校や高等学校の「数学」でも一部は取り扱われています。中学生や高校生にはこの分野を苦手と思う人が多いようですが、大学で学ぶとこのイメージは一掃されてしまいます。大学で学ぶ「数学」の大部分は、中学・高校での「数学」より論理的ですから、論理的に考え、論理的に証明することに自然に慣れてしまうのです。

「数理論理学」にはコンピュータと大きく関わる分野があります。というか、元々「計算機」の数学的概念を考え出し、研究対象にしていた分野があったということです。コンピュータは「プログラム」で動きます。プログラムは機械への命令であり、機械はプログラムの指示通りのことをします。当然、「プログラム」には正しい論理が必要となります。

コンピュータの「プログラム」について研究する分野のある「数理論理学」には、コンピュータの世界からの高い関心が寄せられています。

コンピュータの進化を支える 人材が求められる

かつて「数学」を学んだ人が、研究者や教員以外でその専攻を生かした仕事を探すのは大変でした。しかし、昨今では数学の応用性がかなり注目され、新しい分野が広がっています。コンピュータと密接な関係にある「数理論理学」などは、ソフトウェアの開発などに欠かせないということから、世界が目にする研究の一つになっています。

この50年間のコンピュータの進化は驚くべきものですが、さらに今後の50年には、これまでからは想像もできないほどの進化が予想されます。「数理論理学」がその一翼を担う分野の一つになることは間違いありません。

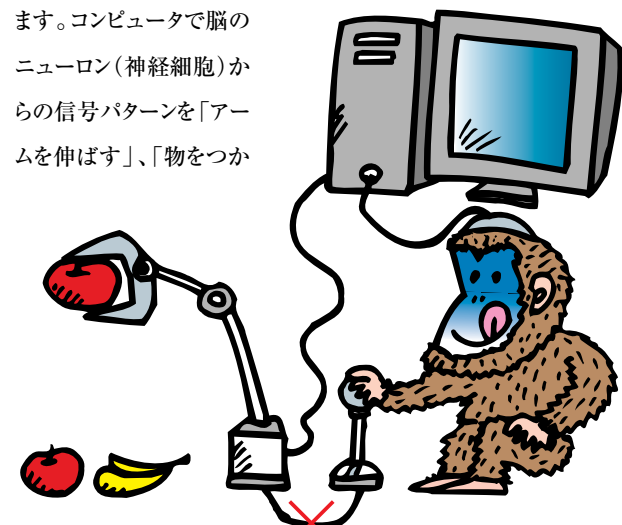
“思っただけ”でアームが動く!?

BMIと脳研究の世界

映画『マトリックス』に出てくるネオは、“自分の接触した人や物のコードを読むことができる超人として描かれていますが、これから紹介する“脳と機械をつなぐインターフェース”研究(英語のBrain-Machine-Interfaceを略してBMIと呼ばれています)の延長線上に、このような世界が見えていると言ってもいいかもしれません。実は、この“脳信号の解読”という理論的な問いこそ、理論脳科学の中心的な研究テーマなのです。

ロボットアームから医療現場へ

最近、「ロボットアーム-「意思」で操作」というタイトルで、“サル”の脳とロボットアームを銅線をつなぎ、「意思」の力だけでアームを操る実験に米デューク大の研究チームが成功した”…と新聞紙上で報じられています。ニコレリス(Miguel Nicolelis)教授が中心になったこの実験では、2匹のアカゲザルを使っています。まずアームにつないだ操縦レバーを手で動かしてアームを自在に操作できるように訓練します。この間、サルの大脳皮質の96,320カ所に髪の毛よりも細い微小電極という導線を差し込み、脳からの信号を取り出します。コンピュータで脳のニューロン(神経細胞)からの信号パターンを「アームを伸ばす」、「物をつか



む」といった動作と対応させて解析し、それらにあわせてアームが動くよう設定しておくのです。サルがレバー操作に習熟した時点でレバーとアームを切り離し、代わりに脳からの信号を(コンピュータを経由して)直接アームに繋ぎます。すると、サルが操縦レバーを動かす(実はアームと連結されていないので、こ

れは無意味な動作ですよ)と、ロボットアームもそれまで通りに動き、様々なものをつかむだけでなく、対象物の大きさや材質に合わせて、つかむ強さを加減することもできたというのです。このときおサルは“操縦レバーを動かさなくても「動かしたい」と思っただけでアームは動くぞ!”ということにすぐに気がついて、レバー操作なしでアームを動かすようになる、と会議の席でニコレリス教授が語ったのがとても印象的でした。このアームは本当に「意思の力で」操作されているのですね。

この記事では、“この技術を発展させれば、脊髄損傷で手足がまひした人の生活の質の向上に役立つと期待されている”と紹介されています。実際、このような研究はニコレリス

教授たちのグループに限らず、アメリカや世界中の脳研究者によって行われ始められているのです。ブラウン大学のドナヒュー教授(John Donoghue)は患者の大脳皮質の運動野に電極を埋め込み、動かそうと「思っただけ」でコンピュータのカーソルを動かせる実験や人工の義手を動かせる実験を、

未だ初歩的な段階ですが成功させています。ドナヒュー教授は「脳の信号を手足の筋肉に伝えれば、四肢麻痺の患者が自分の手足を動かせるようになるかもしれない」と述べています。BMI研究の成果がいよいよ実際の医療現場に適用される段階に達しつつあることを示しています。(注1)

“思っただけ”でアームが動くーどうしたら、そんなことができる?

ニコレリス教授のおサルのように、ロボットアームを“思っただけで動く”ようにさせるには何が必要なのでしょう?と考えてみると、私たちの腕も「意志」の力だけで操作”できましたし、この命令は脳の第一次運動野から筋肉への指令として出ています。ですからこの信号を“解読”できれば、翻訳してロボットアームに送れば同じ動作ができるはずなのです。

脳の中では、ニューロン(神経細胞)がお互いにつながって神経回路網(神経細胞のネットワーク)をつくっています。神経スパイクという電気のパルスで通信しているのです。この時使われるのは0と1からなる信号ですが、これはコンピュータのコードとは全く違った原理で書かれているので、本当はこのスパイク列の“解読”はまだよくわかっていないのです。

おサルの実験では運動野からの指令を解析してロボットアームに送ると書きましたが、実は本当の意味で“解読”しているわけではありません。脳の学習機能を模倣した“神経回路網(ニューラル・ネットワーク)”という工学的なシステムをコンピュータの中に組み込んで、アームの動きと神経スパイク信号の対応を“学習して”模倣しているのです。ある意味では、脳とロボットアームの中間に、信号変換を専門にする小さな“人工脳”をはさんだのだと考えることもできます。もちろんこのような“学習するシステム”自身、とても面白い研究テーマです。

BMIと脳研究の未来

BMIには今迄紹介してきた、外界への働きかけを補助する一運動系のBMI以外にも、外界からの情報の知覚機能を補う一視覚や聴覚のBMIも研究されています。どちらも“外界(機械)”と“脳”の間の“信号の変換”を補助するインターフェースといえるでしょう。また、広い意味のBMIにはもっと驚くような研究があります。これらについては、コラム「音で見る」、「ロボねずみ」で紹介しましたから参照してください。

映画『マトリックス』に出てくるネオは、“自分の接触した人や物のコードを読むことができる超人として描かれていますが、BMI研究の延長線上に見えているのは、このような人の内的な脳のコードを読むという世界。そして、この“脳の信号(コード)を読む”というテーマこそ、理論脳科学の中心的な研究課題なのです。しかし、外界とのインターフェースを超

えた人の内的な世界、思考やひらめき、創造性を脳の神経回路網がどのようにして創り出すのか、といったことについては未だ殆ど謎といってもよいのです。(注2)

将来、人の思考や心、行動の準備を脳の信号から直接「解読」することができれば、福祉や医療の面で大きな福音になることは確かです。同時に、状況によっては倫理的問題など、いろいろ考えねばならない問題が生じてくることにも注意せねばなりません。そしてこのような研究は、人の知性(つまり我々自身)を知るとともに、ヒトのように考えたり、創造性をもったロボットを創るという研究にも道を拓くことになるでしょう。

注1:このような研究は脳神経系と直結して動かす補具(義手や義足)という意味で“ニューラル・プロセス”(神経補具(学)Neural Prosthesis/Neural Prosthetics)とも呼ばれます。

注2:このような高次の認知的な機能では、そのコードはスパイク間のシンクロニー(同期性)が重要な役割を果たすのではないかとわれています。

語る人。藤井宏教授



【プロフィール】1963年京都大学理学部卒業。京都産業大学理学部数学科・計算機科学科で非線形力学系の数値解析、分岐理論の研究に従事。工学部情報通信工学科開設とともに現職。

“脳信号を読む”ということを中心とした研究テーマにしています。力学系や、分岐理論といった自然界の非線形現象を解析する数学者として研究を出発したのですが、恩師である故・山口昌哉京都大学教授や友人たちの影響の下、脳研究の世界にごく自然に入っていました。

非線形数学は脳研究とどう関係があるの?とよく尋ねられますが、これは私たちの“脳”や、“記憶システム”を理解するためには、本当に重要な方法論なのです。君の頭の中では“思考”がどのようにして動き、アイデアがひらめくのだろうか?脳の“配線(=回路網)”を調べるだけでは答えは決して得られないのです。脳の回路網のダイナミクス-神経スパイクという信号のやり取りが私たちの記憶やひらめきを形作っているのです。趣味:陶芸(丹波にある穴窯という薪の窯で、友人たちと100時間以上も寝ないで窯焚きをしなければなりません。結果はたいして失望ですが…)。

目で見る

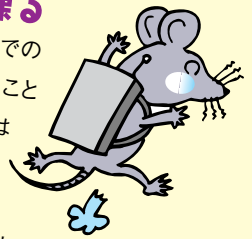
視覚障害者のための“音から誘導される心的イメージ”(Sound-Induced Mental Imagery for the Blind)システム



実はこれはオランダのフィリップス社からvOICeシステムとして市販されているものです。視覚に障害のある人のために、“耳で見る”ためのシステムで、ビデオカメラで撮った映像を1秒毎に、一定のやり方で音の信号に変換するのです。歩き回るときは背中の中のスリッパにラップトップ・コンピュータを入れ、サングラスにウェブ用カメラをつけておかなければなりません。背中の中のスリッパからはイヤホンで耳に音声信号が入ります。この装置をはじめて使ったときはなんだかおかしい音がするだけですが、やがて“脳が勝手に学習をはじめ”、外の景色が“見えて”くるのです。このように学習によって脳の回路網と機能が変化することを、専門の言葉で脳の可塑性といいます。とても興味深いのは、耳で見えてくると脳の(聴覚野でなく)“視覚野”が活性化することです。このvOICeシステムも、脳自身をシステムの一部として機能させるという意味で広義のBMIといえます。http://www.seeingwithsound.com/voice.htmで紹介されています。

ロボねずみ(Roborat)

小さなねずみの脳に直接、信号を入れてロボットのように意のままに操る



実際にこんなことができれば狭い空間での遭難救助など、いろいろな作業をやらせることができる。タルワー(Sanjiv Talwar)たちは科学雑誌ネイチャー(2002)で言っています。ねずみにとってヒゲは大切なセンサーでも敏感です。脳の体性感覚野には1本、1本のヒゲに対応して触れられると反応する“樽”という小さな小領野があります。実験ではこの右側の樽と左側の樽に直接、電気信号を送るように微小電極を埋め込んでおくのです。パソコンのキーボードと連動して、右のヒゲ、左のヒゲというように電波で信号を送ると、ネズミは左右のヒゲに触られた(これは仮想現実!なのですが)と感じるのです。そこでネズミが偶然、右部分に予め埋め込んであった第3の電極から信号を送ります。すると、ネズミは極度の達成感を感じて、それからは触られたヒゲの方向に曲がるという行為を嬉々として行うようになります。

こうした研究は映画『マトリックス』の世界に近づいたちょっと怖い世界というだけでなく、倫理的問題などいろいろと考えなければならぬことを含んでいることに注意しなければなりません。実際、今アメリカでも大きな議論が繰り広げられています。

喫煙を科学する

タバコがなぜ体に悪いのか、細胞、遺伝子レベルで解明する

「タバコは健康に悪い」とか「ガンになる」などと言われ、また周囲の環境への配慮もあって禁煙運動が行われています。学校でも会社でも、駅のホームでも街の喫茶店でも、喫煙スペースはどんどん狭まり、喫煙者は片隅へ片隅へと追いやられています。では、タバコの何がどう悪いのでしょうか。

このことを免疫細胞学からアプローチしているのが竹内実先生です。

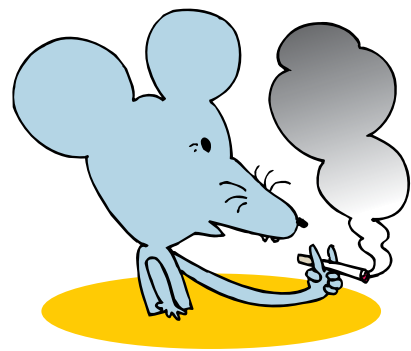
タバコは肺の「免疫系」に悪影響を及ぼします。免疫系とは自己と非自己を識別し生体を防御する一連の細胞の動きによるシステムのことで、もしタバコのためにこのシステムがうまく働かなくなるとしたら…たしかにこれは大変なことなのです。

タバコは肺の何に影響を与える？

人は常に呼吸していて、その間ずっと肺を働かせています。たとえ周りには排気ガスがあふれていても、タバコの煙がもうもうとしていても、休むことなく呼吸しています。しかし、このような汚れた空気を吸っているからといって、病気になる人はあまり見受けられません。また風邪などの病気に罹っても、たいていの場合はいつか必ず治ります。これは「免疫系」が働いて肺が悪くなるのを防御しているからです。

肺の免疫系の中で中心となって働いているのは、「肺胞マクロファージ」と呼ばれる細胞です。マクロファージは大型

食細胞とも呼ばれる白血球の一種です。肺胞マクロファージは肺の中に有害物質や異物、また細菌やウイルスなどの抗原が侵入してくると、まずそれを取り込みます。そしてそれを他の免疫系の細胞に知らせます（この働きのことを抗原提示機能といいます）。この情報はT細胞と呼ばれるリンパ球に受け取られ、その中



でも免疫反応を促進するヘルパーT細胞を活性化させます。次にヘルパーT細胞は、B細胞と呼ばれるリンパ球に働きかけ抗原に対応する抗体を産生させます。抗体は、鍵と鍵穴の関係のように抗原にくっつき、抗原を無毒化するのです。これが肺における大よその免疫反応の仕組みです。

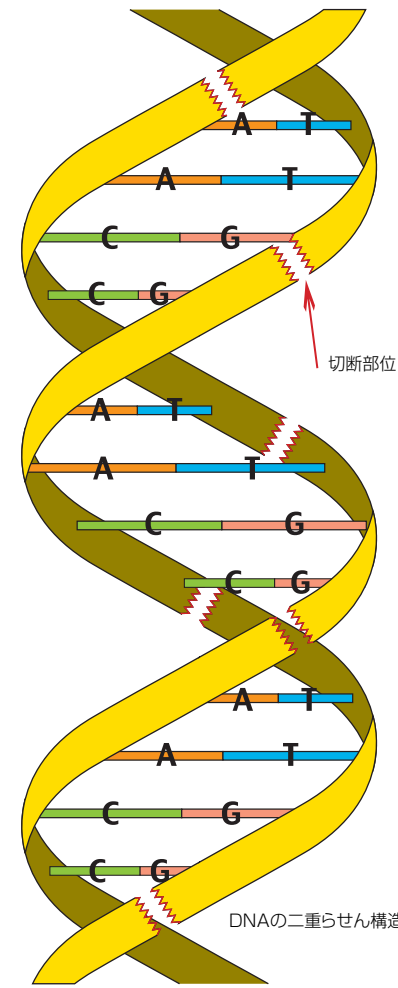
ところで、タバコを吸う人



では肺の病気にかかる人の割合が高くなっています。だとすれば、喫煙が「肺の防御機能」に何らかの影響を及ぼしていることが考えられます。そこで私は、タバコを吸うことが、免疫系の中心となる肺胞マクロファージに悪影響を与えるのではないかと仮説を立ててみたのです。

マウスを使って実験

では、それを証明するにはどうしたらいいのでしょうか。人間をモデルに実験できたら一番いいのですが、同じ喫煙者といっても、肺の中の環境は人それぞれです。まず1日に吸うタバコの本数や喫煙年数によって違いが出ます。また吸っている銘柄によって、ニコチンやタール



の含有量が違います。住んでいる場所によっては、大気そのものが汚染されているという場合もあります。さらに、肺炎などの疾患を、思ったか思っていないか、また思った場合はその程度によっても、肺の中の環境は違ってきます。つまり、人間をモデルにした場合、さまざまな要因が入ってきて、喫煙の影響というものを正確に評価できないのです。

そこで、マウスを使って実験を始めることにしました。餌と飼育環境を同一条件に保ち、毎日20本ずつタバコを吸わせるのです。マウスははじめ嫌がりますが、しばらくすると人と同じように抵抗なく「喫煙」するようになります。喫煙条件は一定ですから、マウスの肺の中の環境は同一のはずです。

一定期間を経て、喫煙マウスの肺胞マクロファージを見てみました。するとどうでしょう、それは通常のものとは明らかに違って、かなり傷んだ状態になっていて、免疫機能が低下していました。また、もっと詳しく調べてみるとDNAレベルでも影響が出ることもわかりました。D

NAのあちこちが切断されているのです。

免疫システムの機能が低下し、肺ガンの恐れも。

マクロファージは、取り込んだ異物を殺すために活性酸素を使います。喫煙によってタバコに含まれる有害な粒子が侵入してくると肺胞マクロファージはそれを取り込むことで活性酸素を大量に発生させます。また肺は酸素を取り入れる場所ということもあって活性酸素が発生しやすく、しかもタバコの煙の中にも活性酸素がある程度含まれていると考えられます。喫煙によって活性酸素が大量に発生するのです。活性酸素はDNAを切断します。DNAは細胞の機能をコントロールするものですから、それが損傷を受けることは細胞にとって決定的なダメージとなります。

このように肺胞マクロファージが損傷を受けると抗原提示機能は著しく低下します。免疫反応は連鎖的なものですから、肺胞マクロファージの機能低下によって免疫システム全体がうまく機能しなくなってしまいます。そうすると、少しのことで風邪を引いたり、またいったん引いた風邪がなかなか治らなかつたりするわけです。

それだけではありません。もっと恐ろしいことが起こる可能性も出てきます。DNAは4種類の「塩基」と呼ばれるものがたくさん結合してできています。DNAは切断されると元へ修復しようとして、この過程で塩基の配列が変わってしまうことがあります。そうすると異常細胞が発生します。異常細胞は将来ガン細胞に変わる可能性を持っています。

このように喫煙は肺胞マクロファージに損傷を与え、肺の免疫システムの機能を低下させ、肺ガンの原因にもなり

ます。またそれだけでなく、心臓など他の臓器にも悪い影響を与えていると言われています。まさに「百害あって一利なし」というわけですね。

語る人。竹内実教授



【プロフィール】 京都大学医学博士・山口大学博士(獣医学)取得。専攻は免疫細胞学。喫煙を例に取り上げ、免疫機構に関する研究を進めている。

子どもの頃は野生児そのもの。昆虫採集をしたり、琵琶湖に魚釣りに行ったり、近所の犬を追い掛け回したり、自然に親しみ動物が大好きでした。好奇心が強く、蜂の巣にちょっかいを出して刺されてしまったこともしばしばあります。

大学では最初、獣医学を専攻しました。そして大学院時代にはすでに、獣医師として付属家畜病院で実際に動物を診察していました。犬や猫が中心でしたが、馬や牛といった大きな動物も診ました。現在の専門では動物を診察することはありませんが、獣医時代の経験はいろいろな場面で役に立っています。もちろん、今でも動物が大好きです。

大きな可能性を秘めた免疫細胞学

現代病の多くは「免疫システムの異常」によって引き起こされると言われています。「ガン」もそのうちの一つです。異常が起こる原因としては、食生活の乱れ、添加物の多量摂取、精神的・肉体的ストレスなどが考えられています。喫煙もそのうちの一つと言えるかもしれません。現在、この免疫システムや免疫細胞についての研究は急速に進められています。「ガン」に対しても、免疫療法という新たな治療法に期待が寄せられています。これは「ガン」を抑える免疫を担当するリンパ球やマクロファージなどの働きを強化し、「ガン」を治療しようというものです。「免疫システム」の完全解明には、この先まだまだ時間がかかるかもしれません。しかし、少しずつでも解明が進めば、医療や医薬品の分野での新たな進展につながっていきます。今後はさらに、多くの人類を救うような研究や発見が生まれるかもしれませんから、将来性豊かで人類に大きな幸福をもたらすことのできる研究分野だと言えるでしょう。

多様な領域で可能性を見つけよう！

理学部 & 工学部

自然の真理を
探究

代数学
幾何学
数学解析学
複素解析学
情報系の数学
応用系の数学



数理科学科

天体・宇宙物理
素粒子・原子核
地球・気象と環境科学
物性物理／理論



物理科学科

物性物理／実験レーザー・電波物性
物性物理／実験結晶・表面物性

コンピュータシステム
プログラミング理論
プログラミング実践
科学・工学におけるコンピュータ
コンピュータと数学



コンピュータ科学科



情報通信工学科

コンピュータ工学系
情報処理工学系
光・量子情報・電波通信・電磁波工学系
生体・数理情報系



生物工学科

分子機能科学
細胞機能科学
生物保全科学
植物遺伝・育種学

テクノロジーの
最先端に
挑戦

さらに高度な
研究で可能性に
挑む

大学院

数学専攻
物理学専攻

理学研究科

博士前期課程

博士後期課程

工学研究科

情報通信工学専攻

生物工学専攻



お問い合わせ先

京都産業大学 連携推進室

〒603-8555 京都市北区上賀茂本山 TEL075-705-2952

<http://www.kyoto-su.ac.jp/>

E-mail:renkei-suishin-jim@star.kyoto-su.ac.jp

■理学部事務室 TEL075-705-1463
■工学部事務室 TEL075-705-1466
■入学センター TEL075-705-1437