

W

H

A

「理学」って何だろう？

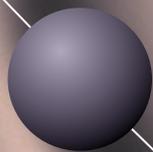
T

S

「理学」

?

はじめに



理学という学問は、現代文明を支える大きな柱のひとつであり、これまで社会の進歩に大きな貢献をしてきました。希望に燃える新しい世紀を迎えましたが、一方で環境問題などさまざまな問題に直面しています。今後、これらの諸問題を解決するためにも理学の役割はますます重要になってくると思われます。

しかし、昨今の理学の高度な発展は、理学の外にいる人々には見えにくいもの、難しいものと映っているように思われます。この冊子は、これから大学に入り学問に触れようとする若い諸君に理学という学問がどのようなものかを知ってもらうために作られまました。理学は、数学から生物学まで幅広い分野を含んでいますが、それぞれの分野がわくわくするような新しい学問の展開に沸き立っています。本冊子により、理学の研究の一端にふれていただければと思います。

編集を引き受けていただいた京都大学理学部の教官の方々、資料を提供していただいた各大学および諸機関に感謝の意を表します。

平成14年 5月 国立大学理学部長会議

理学とは

理学（サイエンス）は、私たちを取り巻く大自然の秘密を解き明かし、人類の自然についての知識を豊かにするとともに、社会の進歩に貢献することを目指す学問です。理学は、数学、天文学、物理学、地球科学、化学、生物学などの幅広い分野から成り立っています。

理学は、確かに一見異なる様々な分野からなっていますが、それらは自然の成り立ちを反映したものです。各々の分野は密接に関連しています。例えば、20世紀のはじめに成立した量子力学は、物質の変化を取り扱う化学や生命の本質に迫る分子生物学、さらには現代生活に不可欠である半導体製品等の基礎理論としての役割を担っています。物質の究極を探る素粒子物理が、現在では、宇宙の進化を語る上で欠かせないものとなっています。相対性理論の確立は、数学における幾何学の進歩が土台になったことは良く知られています。また、X線の発見が物質のミクロな構造を調べる方法を生み出し、それがDNAの構造をはじめ生体物質の解明に使われてきました。

理学の研究は、私たちが夜空をみてその美しさ感動し、動物や植物の営みを不思議に思い、自然の本当の姿を知りたいと言う知的好奇心に突き動かされて発展してきました。また、この好奇心は自らの問題にも向けられ、人類の起源や進化について多くのことを明らかにしてきました。理学は工業製品を作ると言った直接的な実利を目的としたものではありませんが、理学こそがあらゆる分野において人類の進歩を支えてきたといっても過言ではないでしょう。

しかし近年、科学の進歩が逆に人類の生存そのものを脅かすような事態も一部生まれてきました。現在、大きな問題となっている環境問題もその一例です。こうした問題を解決するためにも、理学を基礎から深く理解し、過去における様々な研究成果を土台に、解決策を模索することが大切です。このようにその他にも理学のいろいろな分野において人類がまだ理解できていない新しい問題がどんどん出てきており、それらを解決するためにわが国においても理学の研究者が日夜奮闘しています。

理学は、今、大きな発展の時を迎えようとしています。理学は人類の知的好奇心を土台にして、自然の中の真理を探りその美しさを探究する学問です。理学の進展は21世紀における私たちの文化を高め、生活をより豊かにするに違いありません。

物理

壮大な物理実験室【宇宙】— 5

「物質」とは何か？【素粒子・原子核】— 11

「新しい」物理学【量子力学】— 17

数学

- 四角い箱の中身【代数からコンピュータへ】— 21
- 「独楽」の数学【可積分系】— 27
- 「複雑なこと」を表す【力学系・確率微分方程式】— 29

地球惑星

- 私たちの惑星【地球の歴史】— 35
- 地球の鼓動を聞く【地球の変動】— 39
- 青い空を見上げて【地球環境】— 41
- 45億年の親子関係【太陽-地球システム】— 45

化学

- 分子を捕まえる！【分子物性】— 48
- 分子をデザインする【分子創製】— 51
- 生命活動をになう分子【生命分子】— 54

生物

- 生命の本質に迫る【遺伝子】— 59
- 頭の中のアンテナ【高次生命現象】— 63
- カンブリア爆発【分子進化】— 66
- 生物の多様性【多様性】— 71
- 動物の行動と生態【生態】— 74
- 人類の由来を求めて【人類】— 79



宇宙

壮大な物理実験室

ケプラー、ニュートン・・・

古くから科学者は宇宙を観察することで「法則」を発見し、「物理学」という学問を築きあげてきました。

宇宙は物理学という厳密なシナリオにのっとり、私たちの想像を絶するドラマの舞台なのです。

そして、科学技術の進歩により、今や宇宙は科学者達の手近な実験室になりつつもあるのです。

写真：すばるが捕らえたオリオンKL領域

巨大望遠鏡で宇宙を探る

日本の科学者達によって設計された新世代の望遠鏡「すばる」。世界に誇るそのすばらしい性能は、はるか120億光年先の銀河団をも見ることが可能です。そしてこの「すばる」を通して新たな発見が次々と生まれています。

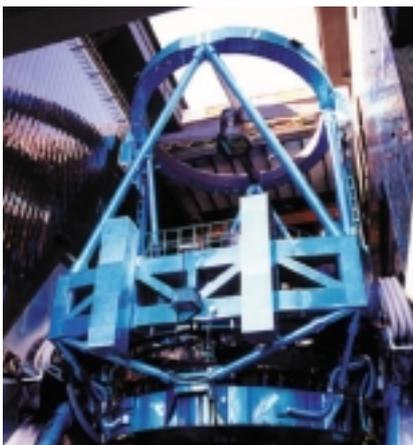
すばる展望鏡

国立天文台のすばる望遠鏡は、一枚鏡としては世界最大の8.2mの主鏡をもつ可視光および赤外線望遠鏡です。最も大気揺らぎの影響が小さく、湿度の極端に低いハワイ島マウナケア山（標高4200m）山頂に1997年建設され、角度分解能0.2秒の世界最高性能を達成し、現在、世界中の天文学者が観測を行っています。

マウナケア山頂のドーム全景（右）とすばる望遠鏡本体（下）



写真提供：国立天文台



写真提供：国立天文台

すぐれた観測装置群

すばる望遠鏡には、可視光・赤外線用の7つの観測装置があり、様々な観測目的に応じて使い分けられています。その中のひとつOHS（OH夜光除去分光器）は、大学と国立天文台が共同で開発した、望遠鏡の赤外線での観測性能を6倍以上に高めることのできる、すばる望遠鏡だけが持つ特殊な観測装置で、特に宇宙遠方の天体の性質を詳しく調査する際に威力を発揮しています。



120億光年のかなた

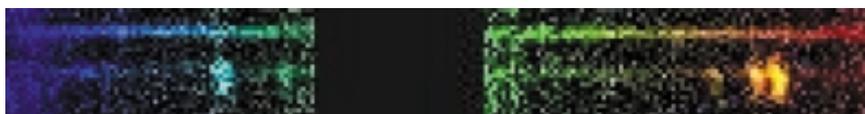
OHSの一部分は広視野の赤外線カメラとして使用する事ができます。このカメラを用いて、長時間同じ領域を観測し続けることによる遠方宇宙の探査や、可視光では塵に隠されて観測できないような星生成領域の観測が行なわれています。

左：遠方宇宙の赤外線画像

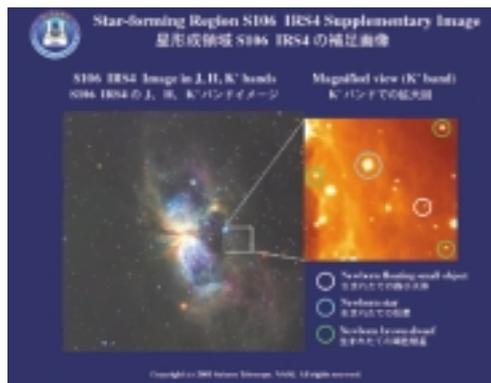
約120億光年彼方の宇宙初期の銀河を捕えている事が最近の観測結果と合わせて分かっています。

右：分子雲中で星生成が行なわれている領域 S106 の観測結果

すばる望遠鏡の高い分解能により、重く大きい星から軽く小さい星までどの程度の数の星が生まれているのかが詳しく分かりました。



上：夜光除去分光器 OHS
下：OHSにより取得された100億光年彼方の巨大銀河の赤外線スペクトル
酸素や水素などの可視光の輝線が赤方偏移して赤外線で観測されているものです。



写真提供：国立天文台（2点とも）

宇宙の始まりを見る

宇宙は今から150億年前の「ビッグバン」によって生まれたといわれています。

つまり、150億光年先から来る情報には、宇宙が生まれたその瞬間を教えてくれる「何か」が含まれているのです。

ALMA

世界の天文学者が共同で、南米チリ共和国の標高5000メートルのアンデス高地に大型サブミリ波干渉計（ALMA）を建設しています。周波数30GHzから1000GHzのサブミリ波を観測します。微弱なサブミリ波を観測するために、鏡面誤差が20 μ m以下の高精度パラボラアンテナや量子限界の低雑音超伝導受信機、そして超高速データ伝送技術などの最先端技術の開発もおこなわれています。直径12mアンテナを64台配置して、ハッブル望遠鏡の10倍以上高い解像度（0.01秒角）を実現します。



資料提供：国立天文台

Astro-F

宇宙科学研究所を中心として、2004年2月打ち上げを目標に赤外線天文衛星Astro-Fの開発が進んでいます。口径70cmの冷却型望遠鏡により、波長2~200 μ mの過去最高の感度を備え、宇宙に存在する各種の天体の謎を赤外線観測により明らかにします。



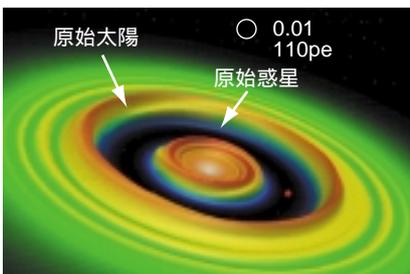
資料提供：宇宙科学研究所

星や銀河の赤ちゃんを探す

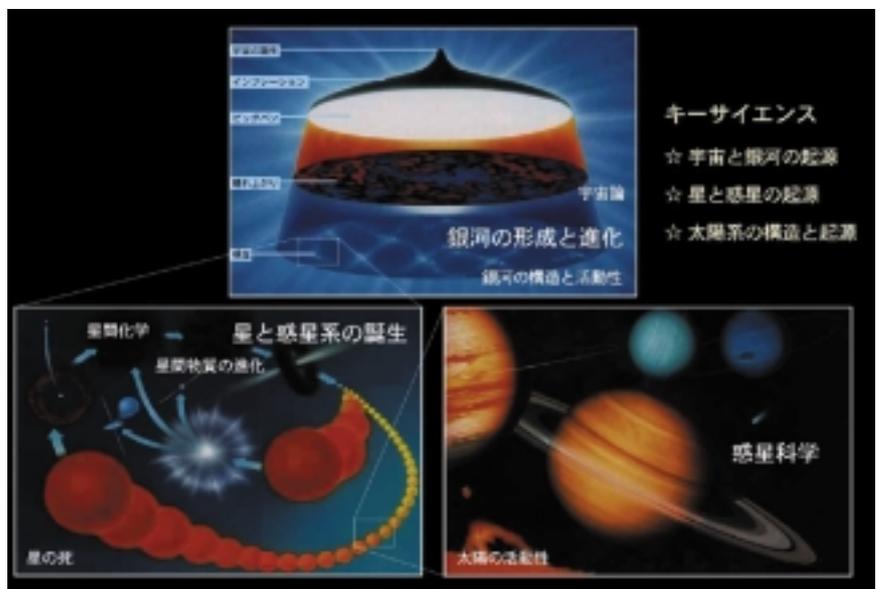
Astro-FとALMAは可視光では見えない星間物質を捕らえます。この暗黒星間物質は、星を誕生させる材料となります。太陽のような恒星や地球のような惑星が生まれるようすを調べて、太陽系の起源を解き明かします。また、サブミリ波では、生命の起源に関連する有機分子の検出も可能です。

さらに、Astro-FとALMAの観測する赤外線からサブミリ波は、生まれたばかりの銀河を探すのに適しています。原始の銀河の放射する光が宇宙膨張によって赤方偏移し、赤外線やサブミリ

波として観測されるからです。年齢が数億年の若い銀河が大量にみつき、銀河がどのようにしてできたかがわかるでしょう。



資料提供：国立天文台



資料提供：国立天文台

Astro-E2

宇宙科学研究所を中心としてX線天文衛星Astro-E2の製作が進んでいます。これはロケットの故障のため2000年2月に打ち上げに失敗したAstro-E衛星を再製作するもので、2005年2月の打ち上げを予定しています。絶対温度約0.06ケルビンで動作する高分解能X線分光器など4種類のX線観測装置を搭載し、過去最高のX線波長帯域と波長分解能を備えています。

Astro-E2は、ビッグバン直後には水素とヘリウムしか存在しなかった宇

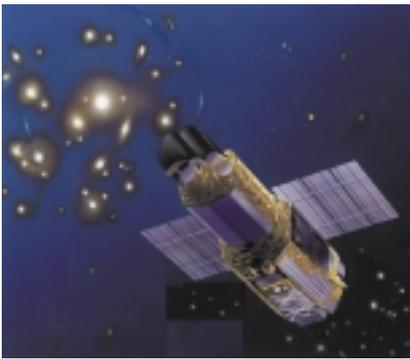
宙で、酸素や炭素などの多くの元素がいつどこで作られ宇宙空間にどのように広がっていったかを調べます。また、広い観測X線波長帯域を生かし、巨大ブラックホールの誕生の謎を解明します。

図は日本のグループが米国のチャンドラ衛星を使って発見したM82銀河の中質量ブラックホールです。巨大ブラックホールに成長すると考えられています。矢印は同時に発見された小型のブラックホールです。

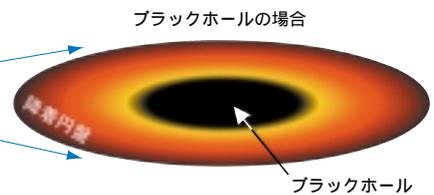
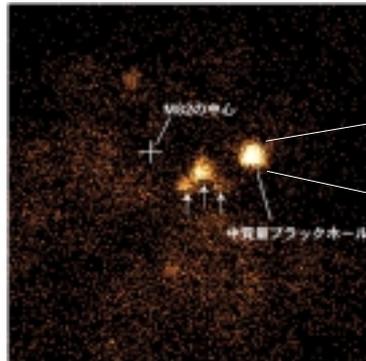
ブラックホールに落ち込む物質は下図のように「降着円盤」と呼ばれるガス円盤を形成します。ガスはブラックホールの周りを激しく回転するため、膨大な摩擦熱を発生し1000万度に達する超高温となりX線を放射します。これを観測することでブラックホールを間接的に捉えられます。

左：Astro-E2
右：ブラックホール

日本のグループが米国のチャンドラ衛星を使って発見したM82銀河の中質量ブラックホールです。巨大ブラックホールに成長すると考えられています。



資料提供：宇宙科学研究所



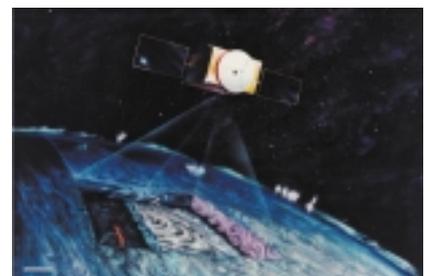
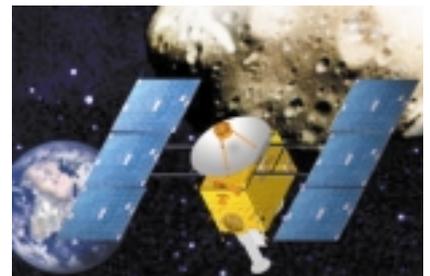
科学衛星による惑星探査

惑星探査計画

金星は太陽からの距離が地球に最も近く、また、惑星自体の大きさも地球とほぼ同じ惑星です。表面は高温の炭酸ガスの大気と硫酸の雲に覆われています。自転運動は非常にゆっくりとしています。自転運動は非常にゆっくりとしていますが、雲は毎秒100メートルも的高速で惑星の自転する方向に運動しています。スーパーローテーションと呼ばれるこの運動に代表される大気の力学を調べるために、宇宙科学研究所が中心となって2007年に金星を周回するPlanet-C衛星が打ち上げられる予定です。これにより、金星大気に雷現象が存在することの確認や、現在の地球の大気と著しい違いが生じた原因を探るために、金星の大気からどの様にまたどのくらい、外の空間に大気を構成する粒子が逃げ出しているかを調べる予定です。

また、探査機 Planet-Bが、今現在、火星到着を目指して飛行を続けており、小惑星のサンプルリターンを目的とするMuses-C衛星は2002年に打ち上げられる予定です。さらに、月探査を目的とする Lunar-A衛星や SELENE衛星などが次々と打ち上げられ、また、水星探査衛星をヨーロッパと協力して打ち上げることも計画されています。

科学衛星による惑星や月の探査が本格的に始まろうとしています。



左：Planet-B
右上：Muses-C
右下：Planet-C

資料提供：宇宙科学研究所

「見えない」宇宙を見る

宇宙空間は「真空 = 何もない」と思われがちです。

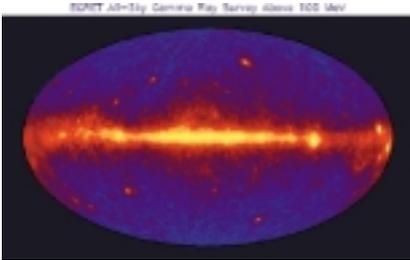
しかし、科学の目で見てみると、宇宙空間は「エネルギー」に満ちあふれた空間なのです。

いったい何があるのでしょうか？そしてそれはどこから来るのでしょうか？

物理

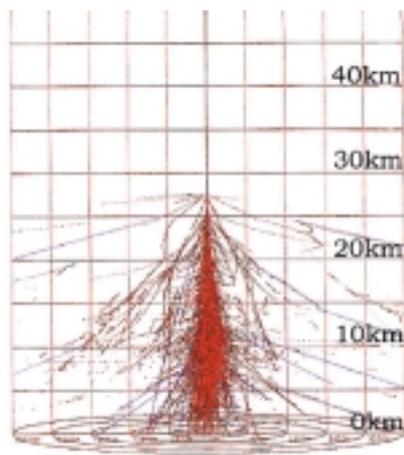
高エネルギー宇宙

下の写真は米国のComptonガンマ線衛星が捉えた銀河面からの1億電子ボルトガンマ線です。宇宙線が星間ガスと衝突して発生したガンマ線の放射と考えられ、銀河に宇宙線が満ちていることがわかります。



写真提供：NASA

宇宙線は宇宙からふりそく高エネルギーイオンであり、10の20乗電子ボルトという、途方もないエネルギーにまで達します。大気と衝突して、いくつもの粒子を生成した電磁シャワーをつくり、地上に多くの粒子を降らせます。

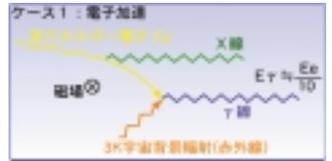
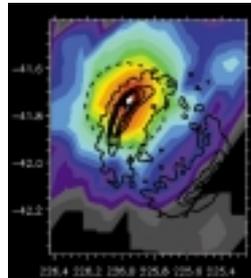
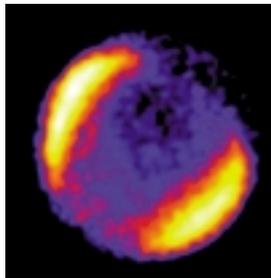


宇宙線が大気と衝突して生成される電磁シャワーの計算機シミュレーション

宇宙線を作る巨大加速器天体

宇宙線起源の天体は100年近く謎でした。最近、日本のX線天文衛星「あすか」が、超新星残骸SN1006から超高エネルギーに加速された電子が作るシンクロトロンX線（左図）を発見、さらに同時に生成され则认为される超高エネルギーガンマ線（10兆電子ボルト以上）を地上の超高エネルギーガ

ンマ線望遠鏡（CANGAROO 日豪共同実験）が検出（中図）に成功、宇宙線起源天体と考えられる具体的な天体が初めて観測されたことになり、大きな反響を呼びました。

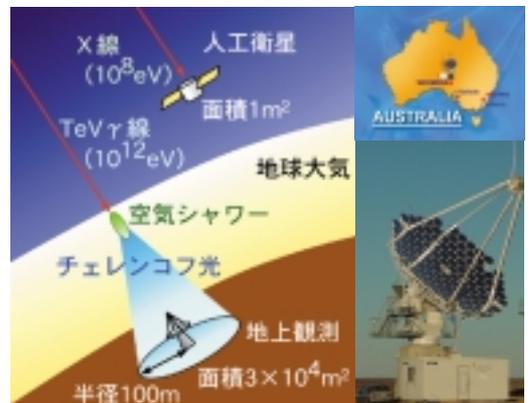


左：SN1006のシンクロトロンX線像
中：宇宙線起源天体
右：X線、ガンマ線の発生のしくみ

宇宙線をいかにして捉えるか？

X線、ガンマ線は大気に吸収されるので、衛星観測が必要です。ただし100億電子ボルト以上になると、そのフラックスが極端に少なくなります。そのため右図のように大気を検出器と

して、高エネルギー粒子と大気との衝突でできるシャワーからの前方へのビーム状のチェレンコフ光を地上の望遠鏡で捉えることで、ガンマ線、宇宙線を測定します。



資料提供：宇宙科学研究所

左：X線観測衛星
右：X線、ガンマ線の観測施設

光が地上で広がって大きな面積の装置と同等になり、フラックスの弱い超高エネルギーガンマ線を捕らえることができます。右図はオーストラリアに最近完成したガンマ線望遠鏡です。

シミュレーション科学

科学者は様々な科学現象をつぶさに観察し、理論体系化してきました。

そして現在、この理論体系をコンピュータに入力することで、今まで肉眼では見ることはできなかった「その瞬間」を再現することが可能になりました。

スーパーコンピュータによる科学の創造

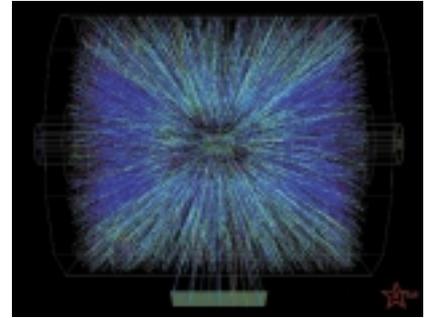
1990年代、パーソナルコンピュータの性能は格段に向上し、80年代のスーパーコンピュータをしのぐに至りました。さらにインターネットの出現はコンピュータを大衆化するとともに、世界中のコンピュータがインターネットを介してつながるようになりました。そのような技術の中から数千以上の計算機をひとつにする並列計算技術が急速に進歩し、従来不可能であった非常に多数の構成粒子の個々の運動から大きな全体をシミュレーションすることが可能になりました。

これにより理論式としてしか表現できなかった世界が可視化され、検証不可能と思われていた理論分野が実証可能になり、シミュレーション科学がひとつの科学分野として認知されるようになりました。

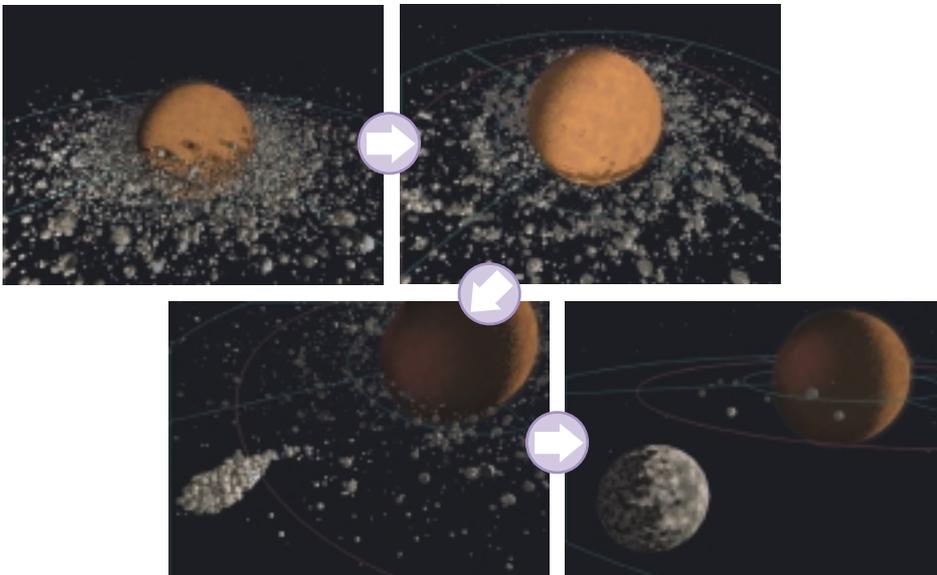
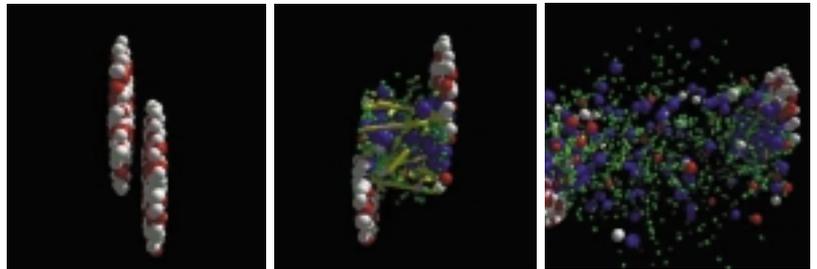
粒子の生成反応を見る

下の3点の写真は、金の原子核同士を200兆電子ボルトのエネルギーで正面衝突させ、反応の時間変化を追いかけたコンピュータシミュレーションです。最近ではコンピュータの進歩で、このようなたくさんの粒子の生成反応を計算することができるようになりました。静止している時は球形をしている原子核が、非常に高速で運動しているため特殊相対論の効果で収縮して板状に見えています。また非常にエネルギーが高く大量の素粒子が生み出される様子が手に取るようにわかります。

上の写真は、実際の金の原子核の200兆電子ボルトでの正面衝突の様子です。シミュレーションの予想どおり大量の粒子が飛び出しているのがわかります。このような反応では、宇宙が



生まれてから10のマイナス5乗秒というごく短い時間後の状態に相当する2兆度という超高温の状態をつくり出すことができると考えられています。この図のような反応結果を解析することによって、宇宙の初期状態に存在していた物質の状態を理解しようとする研究が進められています。



資料提供：国立天文台

月の誕生を見る

月がなぜあるか、実はこれも最近まで全くの謎でした。しかし、地球に衝突した惑星の破片と地球重力との相互作用をシミュレーションすることで、自然に現在の月の軌道、周期、重量などほとんどの物理量を再現することに成功し、惑星衝突説が最有力になってきました。左の図は、衝突からたった一ヶ月で現在の月ができた様子を示すシミュレーション画像です。



素粒子
原子核

「物質」とは何か？

これは、岐阜県神岡町の地下1,000mにある「スーパーカミオカンデ」という研究装置です。

直径40m、深さ40mの巨大な水槽の内部に11,200本の光検出器（写真の中の点々ひとつひとつが光検出器です）を備え、ニュートリノと呼ばれる目に見えない素粒子の検出を行っています。

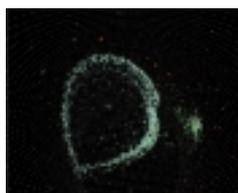
謎の素粒子「ニュートリノ」

超新星爆発や太陽からは「ニュートリノ」と呼ばれる素粒子が放出されます。

このニュートリノを観測することで、光では観測不可能な星の中心部を直接研究することが可能になり、ビッグバン直後の超高温の宇宙の様子をはじめ、様々な謎を解明できるかもしれないのです。

スーパーカミオカンデ

ニュートリノは電荷を持たない、非常に軽い素粒子です。その質量は長い間測定できていませんでしたが、1998年東京大学宇宙線研究所を中心としたスーパーカミオカンデ実験により初めて質量が測定されました。



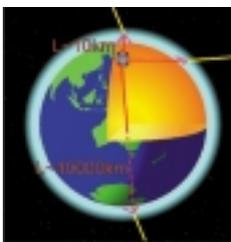
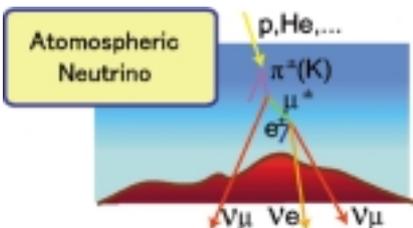
写真提供：東大宇宙線研究所

スーパーカミオカンデ検出器は約5万トンの純水を使い、ニュートリノが水と反応する現象を観測します。ニュートリノ反応はリング状の光として観測される(上図)ため、スーパーカミオカンデ検出器は水槽内に50cm径の光検出器11,200本を設置しています。

ニュートリノの正体

ニュートリノは宇宙線によって大気中で生成されます(上図)。ニュートリノは地球を通り抜けることができるので世界中の空で発生したニュートリノがスーパーカミオカンデで観測できます(下図)。

この観測を通しスーパーカミオカンデはニュートリノに質量がある場合の特有な現象であるニュートリノ振動の観測に世界で初めて成功しました。



ニュートリノは地球を通り抜けることができます。

資料提供：高エネルギー加速器研究機構

ニュートリノ振動

ニュートリノ振動が起こると、発生時と異なる成分比でニュートリノが観測にかかるため、ある種のニュートリノは減少し、別の種類のニュートリノは増加する現象が起こります。

スーパーカミオカンデではミューオン型ニュートリノが地球の反対側から来る場合(右図：-1の点)、日本の上空からくる場合(右図：+1の点)よりも減少していることを観測しました。

これはニュートリノ振動が起こっている場合の予想(右図：緑線)と非常に良く一致します。また2001年にはスーパーカミオカンデとカナダのSNO実験の観測から太陽から来るニュートリノもニュートリノ振動で減少していることが判明しました。

ニュートリノ振動：ニュートリノは3種類存在し、それぞれ異なる質量を持つと考えられています。その数

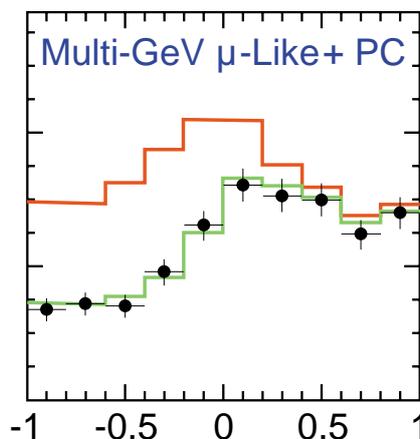
日本横断の実験

ニュートリノ振動をより詳細に研究するため、人工的に加速器でニュートリノを発生させる長基線ニュートリノ振動実験が現在進行中です。ニュートリノはつくばで生成され日本を横断し、250km離れたスーパーカ

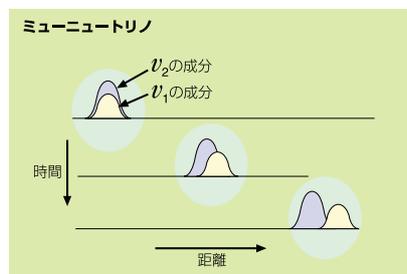


資料提供：高エネルギー加速器研究機構

種類のニュートリノが混合した状態でニュートリノは発生し、観測されます。その場合、発生した時に同じ地点にいた各種ニュートリノ成分は、飛行中に分離されてしまいます(下図)。



資料提供：東大宇宙線研究所



資料提供：高エネルギー加速器研究機構

ミオカンデで検出されます。ニュートリノ研究は宇宙の解明、素粒子物理学者が目指している全ての力の統一理論の進展等に大きな貢献をすることが期待されています。

粒子・反粒子の謎

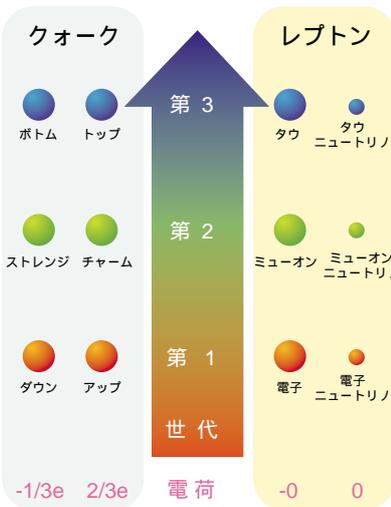
物質を細分化していった最後にたどり着く究極の粒子、それが素粒子です。

宇宙の創世記「ビッグバン」では、この素粒子とともに「反粒子」というものも同じ数だけ生まれたといわれています。

では、「反粒子」はどこにいってしまったのでしょうか？

粒子・反粒子

我々の世界は、主に陽子・中性子・電子で構成されています。現在の素粒子物理学で、物質を構成する素粒子（クォークとレプトン）には下図に挙げる12種類の粒子と電荷が反対の反粒子があることが判っています。宇宙創生期、ビッグバンにおいては粒子反粒子は同数作られたと考えられています。ではその反粒子は反物質を作ることなく何故消えてしまったのでしょうか？その鍵は、日本人物理学者小林・益川氏が提案した理論により第3世代のボトムクォークが担っていると考えられています。



ビッグバンのイメージ

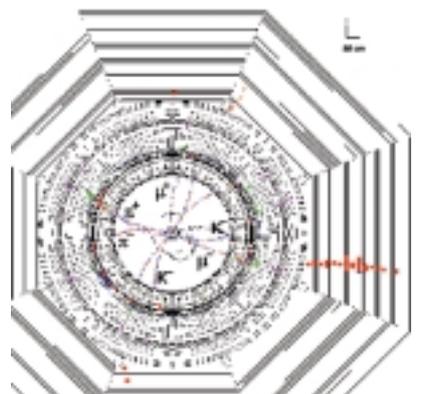
このページの写真・資料提供：高エネルギー加速器研究機構

小林・益川理論

小林・益川理論によると、ボトムクォークから構成されるB中間子では粒子・反粒子の大きな差異が観測されると予想されています。このためB中間子を大量に生成できる加速器、B-ファクトリー（全景：右上図、本体：右下図）がつくばの高エネルギー加速器研究機構で建設され、多数の大学の研究者が粒子・反粒子の研究に取り組んでいます。

素粒子反応を検出する

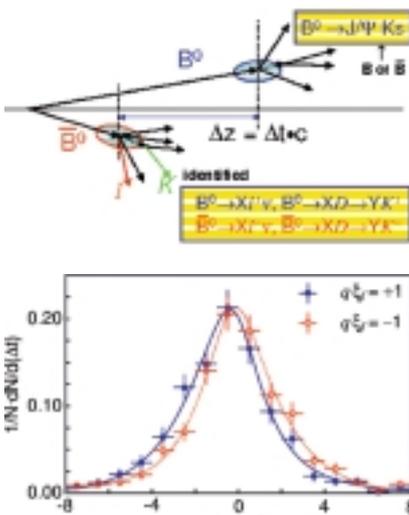
大量に生成されるB中間子を観測するための素粒子反応検出器、Belle（下写真）が建設されました。この検出器はB中間子が崩壊した地点を数十μmの精度で測定します。Belle検出器では右図のようにB中間子の崩壊が観測されます。



Belle検出器の正面図と観測された粒子の飛跡

粒子だけが生き残るわけ

Belle実験では粒子と反粒子がある特殊な状態（CP固有状態）に崩壊する際の寿命の違いを測定します。つまり、粒子と反粒子はどちらが長生きかを調べているわけです。B-ファクトリーではB中間子と反B中間子が対で生成され、その寿命の差を測定します（左上図）。2001年夏、ついにB中間子と反B中間子の間でCP固有状態に行く場合に大きな寿命差があることが判明しました（左下図：青線CP=1, 赤線CP=-1）。



原子核物理学

原子核とは文字通り原子の核をなす要素です。

原子核には、今まで知られていた「普通の」原子核以外にも、様々なタイプの存在が明らかになりつつあります。

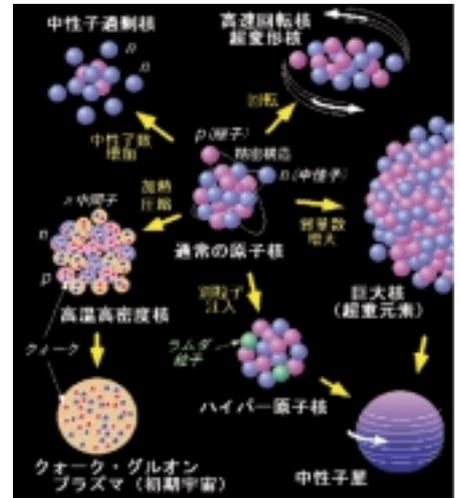
物質の基本的な要素でさえ、まだまだ知られていないことがたくさんあるのです。

新しいタイプの原子核

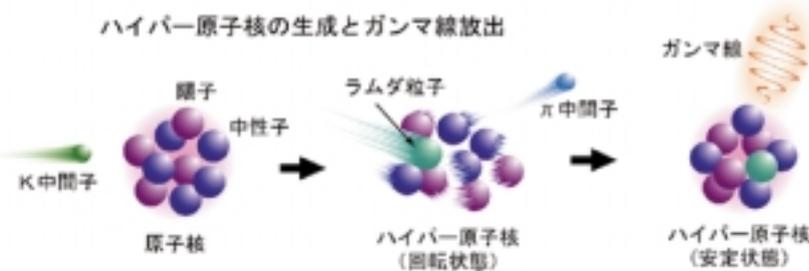
原子核は物質の基本要素です。陽子と中性子が集まってできた原子核が、まわりに電子をまわって原子となり、物質を形作っています。現在、約千種類の原子核が知られていますが、陽子や中性子がどういう力で結合してなぜこのような原子核になるのか、初期宇宙では物質はどういう姿で、そこからどのようにして原子核が作られてきた

のか、まだよくわからないことばかりです。つまり、我々人間は物質の本質をまだ理解していないのです。

原子核は、ほぼ同数の陽子と中性子が球形に集まったものというのが従来の常識でしたが、最近では右図のような様々な新しいタイプの原子核の存在が明らかになり、この常識は覆されました。



物理

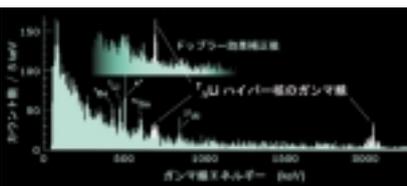
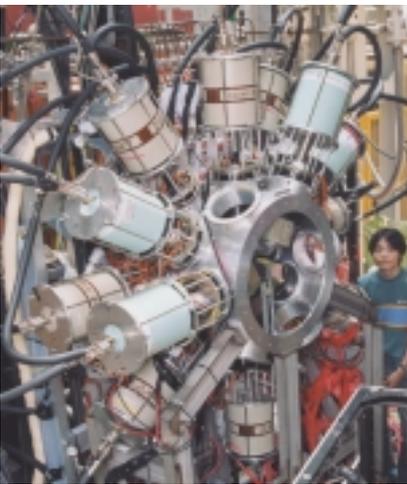


ハイパー原子核

ここでは、陽子、中性子、ラムダ粒子の三種類の粒子からなる「ハイパー原子核」の研究を紹介します。上図のように、加速器で人工的に作った「中間子」を原子核に当てると、中性子がラムダ粒子に変化し、ハイパー原子核が作られます。このハイパー原子核の

構造を調べると、従来調べられなかった原子核の深部の様子や、陽子や中性子の間に働く力の詳しい性質を知ることができます。

ハイパー原子核の研究は、実験・理論の両面で日本の研究者が圧倒的に世界をリードしています。最近、つくば市の高エネルギー加速器研究機構 (KEK) では、世界で初めてハイパー原子核の発生する光 (ガンマ線) の精密測定に成功しました。こうしてハイパー原子核の精密構造が次々と解明されています。



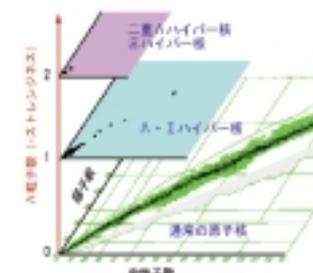
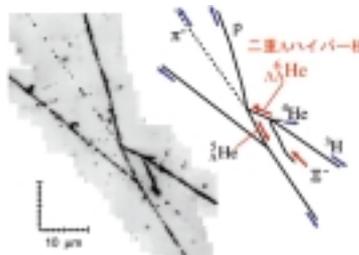
ハイパー原子核のガンマ線の検出装置と実験で得られたスペクトル

広がるハイパー原子核の世界

さらに、別のKEKの実験では、ラムダ粒子を2つ含む二重ラムダハイパー原子核の決定的な証拠が写真乾板の中に捉えられました (下図左)。こうして、これまで陽子の個数と中性子の個数で区別されていた原子核は、下図右

のように第三の軸を加えて3次元的に表されることになりました。

ハイパー原子核は単なる人工的な物質ではなく、中性子星の内部に存在するとされています。こうして我々の物質観も拡張されるのです。



素粒子と生命の融合

私たち人間の体も、行き着くところは素粒子の集まりです。

つまり、宇宙空間にある物質や身の回りのものと、ある意味「同じ」だといえます。

「物理」というと、一見、無機的なものを扱う学問と思われがちですが、「素粒子的な見方」をすればそのような垣根は存在しないといえます。



ニュートリノ質量からレプトン族の混合測定まで

電子ボルト以下の領域のミュオン

ミュオン科学

物質の磁性、表面界面物性、ミュオン触媒核融合、等

ミュオン (μ)

中間子の崩壊によって発生するミュオンを効率よく集めて世界最強のパルス状ミュオンビームをつくる。

ニュートリノ (ν) GeV領域の粒子

原子核・素粒子物理学
ハイパー核、核物質中のQCD、ニュートリノ振動、K中間子崩壊、等

50 GeV陽子ビームを原子核にあてて発生する中間子、反陽子、ニュートリノなどのいろいろな粒子ビームを利用する。

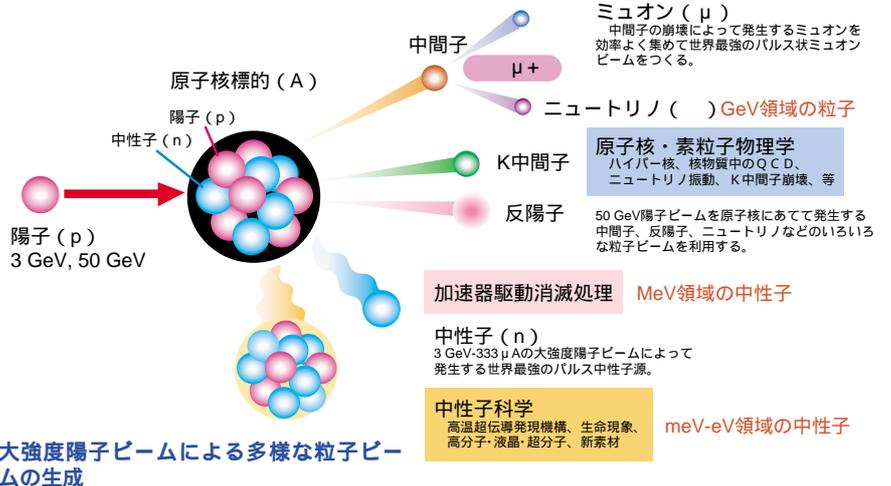
大強度陽子加速器施設

大強度陽子加速器施設は、高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所が共同で建設を進めている多目的加速器施設です。平成18年度末の完成を予定しています。

建設される加速器は、陽子リニアック、30億電子ボルトシンクロトロン、500億電子ボルトシンクロトロンという世界最高強度を誇る陽子加速器群から成り立っています。

これらの加速器群から供給される大強度陽子ビームという共通の道具を基に、中性子、ミュオン、K中間子、反陽子、ニュートリノなどの様々な二次粒子を発生させて、これを利用した広い範囲の科学分野の研究が行われます。

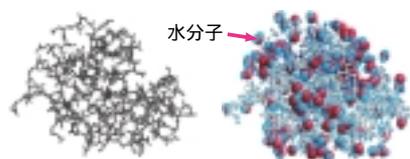
その範囲は、ミクロの世界を探求する原子核・素粒子物理学から、より身近な物質の基本的性質や生命の機構を探る物質・生命科学、あるいは人類の未来のための新しい技術開発など、様々な分野をカバーしています。むしろ、従来の学問領域にとらわれない21世紀の新しい科学・技術分野の創成へとつながることが期待されています。



タンパク質の3次元構造の解明

中性子散乱は、X線と比較すると水素などの軽い元素に高い感度を持っています。この特徴を生かして、複雑な3次元構造をもつタンパク質の全体像をとらえることができます。

最近では、このようなタンパク質の形が、生体内での働きと深い関わりを持つことが知られてきています。



X線で見えたタンパク質の構造

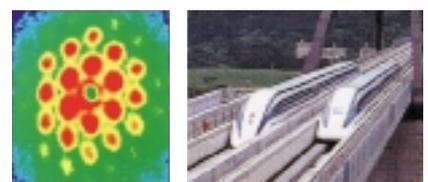
(C, N, O, S原子からなる骨組み構成)

中性子で見えたタンパク質の構造

X線では見えない水分子がよく見える

新しい超伝導物質の構造解明・開発

中性子は、ミクロな磁石としての性質も持ち、磁性体の構造の研究にも大いに役立っています。例えば、新しく開発された超伝導材料の性質を理解し、実用化に向けた開発を進める上でも重要な役割を果たしています。



超伝導の渦構造の観測(左)と超伝導技術を用いて動くリニアモーターカー(右)

超伝導の新しい潮流

ある温度以下で電気抵抗がゼロになる状態を示す物質のことを「超伝導体」といいます。最初に発見された超伝導体は、4.15ケルビン（-269℃）の水銀でした。

その後、より高い温度で超伝導となる物質が世界中の研究機関で探し求められています。

超伝導とは

現代社会の営みは、通信・輸送・家庭生活の全般にわたって電気を利用した機器に強く依存しています。物質に電気を流すと電気抵抗が生じるため、電気エネルギーの多くは熱として消費されています。ところがある種の金属のなかには、冷やしていくと電気抵抗が突然、完全に消失するものがあります。これを「超伝導体」といいます。超伝導状態では、電気を運ぶ電子は2個ずつ対を作り、それらの電子対がボース・アインシュタイン凝縮（18ページ参照）を起こしています。

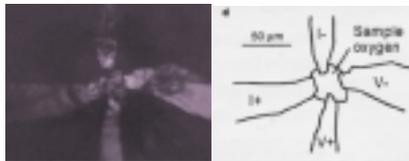
最近、これまでになかった新しい物質や新しい性質の超伝導体が次々と見つかりました。特に日本の大学での研究から多くの発見が生まれています。

2ホウ化マグネシウムの高温超伝導

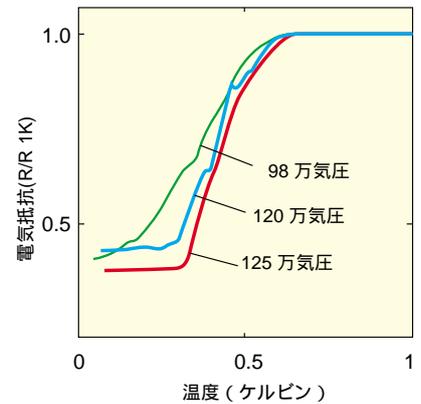
マグネシウムとホウ素が1対2の割合で結合した2ホウ化マグネシウムが、金属化合物としては従来の転移温度の記録を一気に16ケルビンも塗り替える39ケルビンで超伝導になることがわかりました。この物質は研究用の試薬として市販されていましたが、それが実

酸素の超伝導

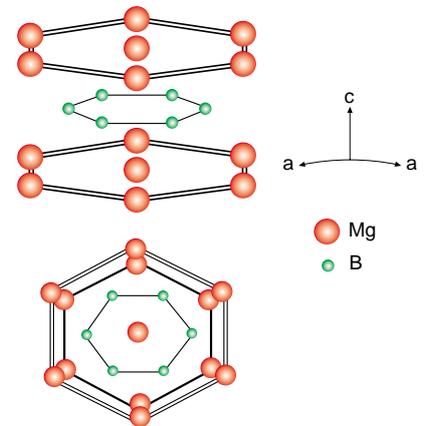
酸素は空気中に窒素について多く含まれ、身近な元素です。酸素に100万気圧もの超高压をかけて冷やしていくと、絶対温度で0.6ケルビン以下では超伝導になることが発見されました。この他、超高压力のもとでは、鉄も強磁性を失ったあと、超伝導になることがわかりました。



120万気圧における固体になった酸素。電気抵抗測定のための電線が取り付けられている。



超高压のもとでの酸素の電気抵抗

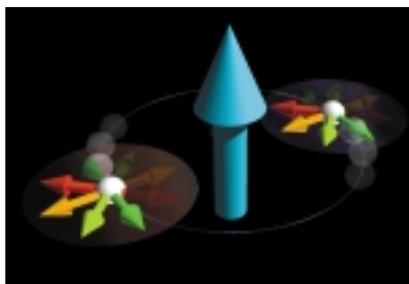


2ホウ化マグネシウムの結晶構造

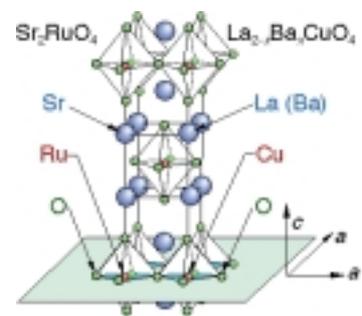
スピン・トリプレット超伝導

超伝導体の中では、電気を運ぶ電子は2個ずつ対をつくっています。電子には右向き・左向きの自転に相当するような2種類のスピンという状態がありますが、従来の超伝導体ではすべて、互いに逆向きスピンの電子が対を作っています。ところが最近、同じ向きのスピンの電子対による画期的な超伝導体も見つかりました。これが「スピン・トリプレット超伝導体」と呼ばれるもので、ストロンチウムとルテニウ

ムの酸化物超伝導体はその例です。この超伝導体では電子の対（白い球で表現）は小さい矢印で表されたように同じ向きのスピンをもち、お互いに公転

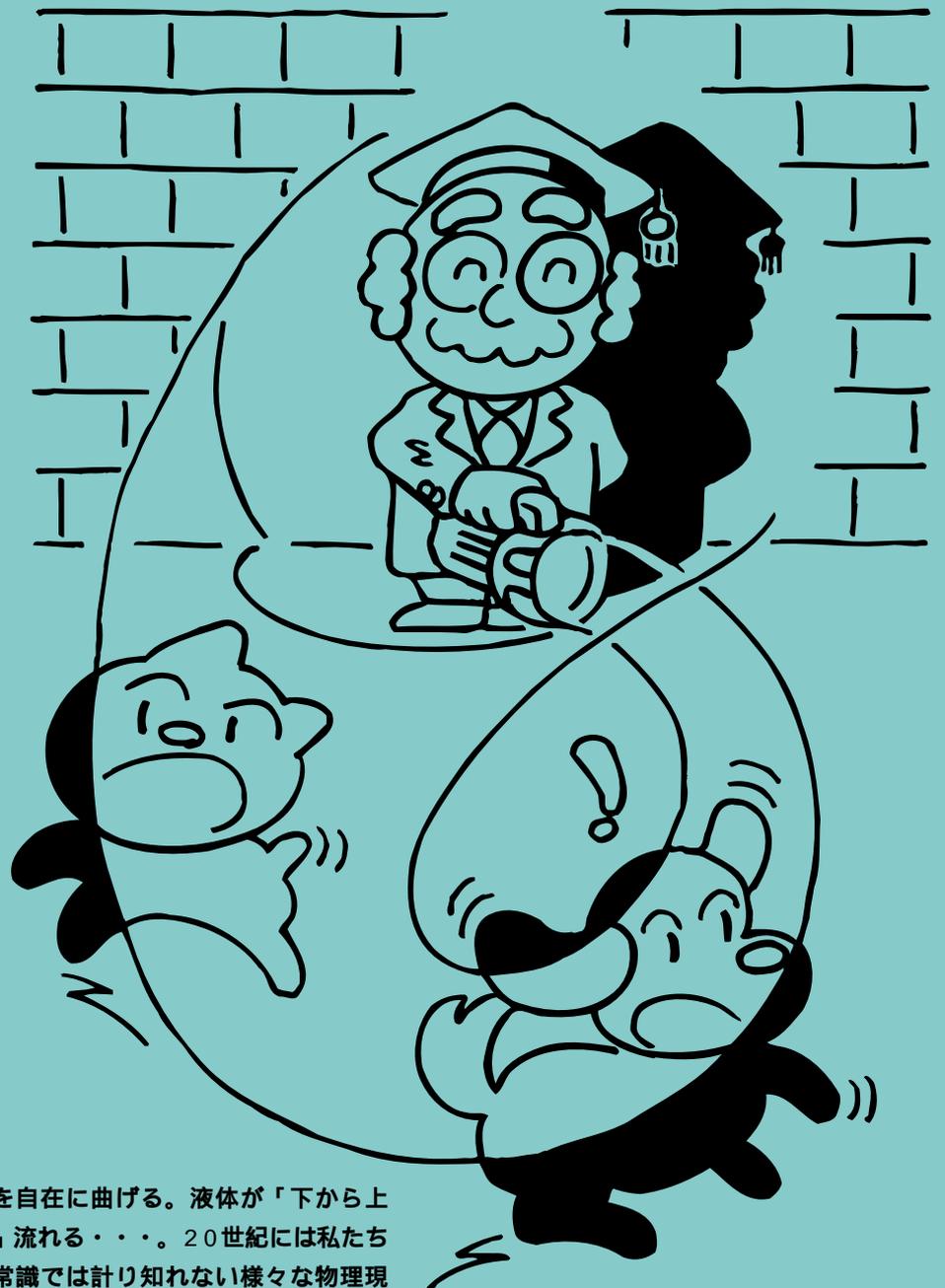


運動していることがわかりました。一方方向に公転運動していることを上向き大きな矢印で表現しています。



「新しい物理学」

量子力学



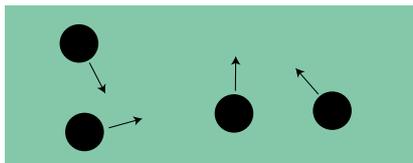
光を自在に曲げる。液体が「下から上へ」流れる……。20世紀には私たちの常識では計り知れない様々な物理現象が発明・発見されました。それは、木から落ちるリンゴを見て万有引力を発見したニュートンによる「古典物理学」とは全く異なる「新しい」物理学なのです。

「量子力学」といわれるこの新しい物理学の研究はまだ始まったばかり。無限の可能性を秘めた分野でもあります。

レーザー冷却原子のボース・アインシュタイン凝縮：巨視的量子現象の本質に迫る

レーザー冷却法を用いて、希薄原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体を作り出すことができるようになりました。これを用いて巨視的量子現象が観測でき、量子力学の本質に迫る興味深い研究が展開されています。

ボース・アインシュタイン凝縮とは？



高温：原子はランダムに熱運動をしています。



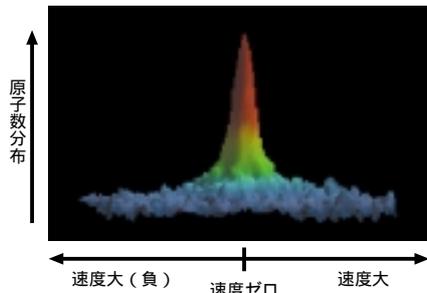
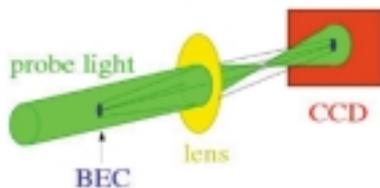
低温：レーザー冷却法により低温になった原子では、波動性が顕著に表れます。



極低温：さらに冷却されるとお互いの波が重なり合い、純粋に量子力学的な相転移が起きます。これがボース・アインシュタイン凝縮(BEC)です。集団となって巨視的な量子現象を起こします。

ボース・アインシュタイン凝縮の検出

ボース凝縮体にレーザー光を照射し、それをCCDカメラを用いて観察することで、凝縮体がどのような空間分布をしているかを測定することができます。



飛行時間法と組み合わせることで凝縮体がどのような速度分布をしているかを知ることができます。上図の中央部分の非常に低速度（低温）の集団がボース凝縮体です。

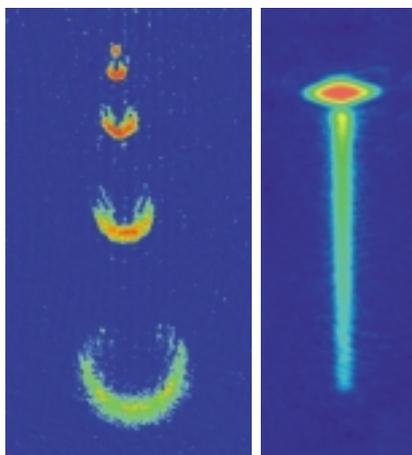
ボース・アインシュタイン凝縮を用いた様々な研究

レーザー冷却原子のボース凝縮体は、レーザー光や磁場を用いて多様に操作することが可能です。例えば、磁場によって閉じ込めていた凝縮体を、自由空間に開放することができます。これは、原子の波がレーザー光のように位相のそろった状態にあり、原子リソグラフィーや原子を用いた干渉計など様々な応用が期待されています。

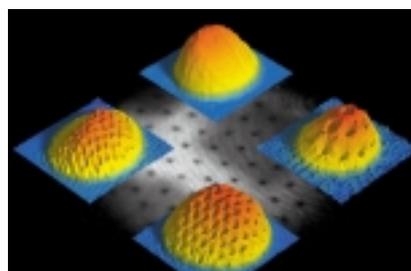
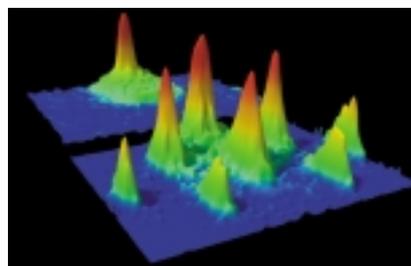
また光との相互作用においては、光の波の増幅と同様に、物質波が増幅される効果が興味深い形で現れます（超放射）。さらに、原子間相互作用を斥力から引力にスイッチし、凝縮体が崩壊する現象（BOSENOVA）や格子状に並んだ多数の量子渦生成など基礎から応用にいたる様々な分野で精力的に研究が進められています。

レーザー冷却原子のボース・アインシュタイン凝縮の成功

中性原子気体をレーザー光を用いて数マイクロケルビン程度の極低温に冷却することが可能になりました。このレーザー冷却法などを用いて、アルカリ原子や準安定状態のヘリウム原子、水素原子のBECが達成されています。日本でも数グループがBECに成功しており、活発に研究が行われています。



上：原子レーザー
右上：超放射
右下：量子渦



フォトニック結晶によって「光子」を操る

光は非常に速く、直進し、制御できないものと思われていることでしょう。

しかし今、光の速度を変え、物質中を思うままに曲げ、自在にあやつることが可能になりつつあります。そしてその先には「量子コンピュータ」という夢の光回路が見えてきました。

物理

フォトニック結晶とは

真空中では光子は光速で伝播し、物質中では屈折率の分だけ光速は遅くなります。通常、物質境界面での屈折現象やプリズムは物質の屈折率の違いによって説明できます。ところがフォトニック結晶と呼ばれる物質中では、光速を車の速度ぐらいに遅くしたり、高効率に光子を閉じ込めたり、自由自在に光子を操れる可能性のあることがわかってきました。

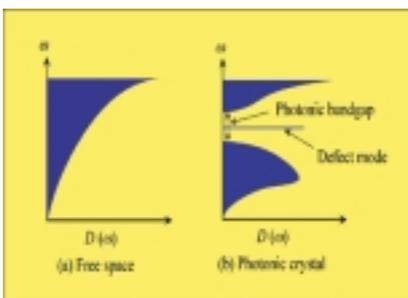
フォトニック結晶は複数の誘電体を光の波長程度の周期で交互に積層した構造物であり、積層の次元により1次元(1D)、2次元(2D)、3次元(3D)

フォトニック結晶(Photonic crystal)と呼ばれます。3Dでは、通常の結晶のように、面心立方格子やダイヤモンド格子等の構造が作成されています。



フォトニック結晶のしくみ

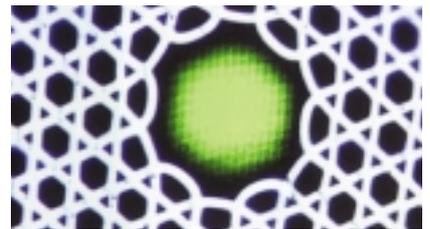
フォトニック結晶の大きな特徴の一つにフォトニックギャップ(Photonic bandgap)の存在があげられます。自由空間(Free space)では、光の固有モードの状態密度 $D(\omega)$ は光の角周波数 ω に関して下図のように ω^2 の依存性がありますが、ある構造のフォトニック結晶中の状態密度は下図のようになり、光の固有モードの存在しない周波数領域が生じることがわかります。これは、原子が規則的に配列した通常の結晶中において、電子のエネルギー準位にバンドギャップが生じる場合があるのと同様に波の回折・干渉現象の現れとして理解されます。



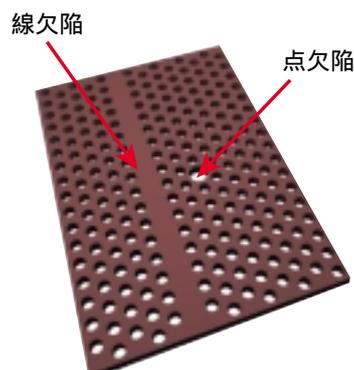
フォトニック結晶の中での不思議な現象

フォトニック結晶中では自由空間や通常の物質中では実現できない、各種の新現象が期待されます。例えば、フォトニックバンドギャップの周波数領域に発光波長を持つような原子をフォトニック結晶中に入れておけば、光の自然放出を制御できる可能性があります。また、光の異常な伝播も期待されることから、異常に遅い光伝播やスーパープリズムなどの新しい光学現象が次々と発見されています。

また、下図のように周期性の乱れ(欠陥)を導入することで、非常に光電場強度が強い領域をつくることが可能になるために、同じ場所を光が巡回しつづける光の局在現象や高効率な非線形光学現象が観測されています。そういった非線形光学現象の応用例とし



て上図にフォトニック結晶と光ファイバーを組み合わせた新しいデバイス(フォトニックファイバー)を示しています。白い部分はガラス、黒い部分は物質が存在していない穴を表しています。真ん中の大きい穴の上下方向に光が伝播しますが、フォトニック結晶の性質から弱い光でも非線形な相互作用が生じて、赤色の振動数の光子がエネルギーのずっと大きい緑や青の光子に変換されて、結果として白色光が観測されています。



フォトニック結晶の展開

フォトニック結晶には、下記のような物理学の基礎分野への応用も考えられています。

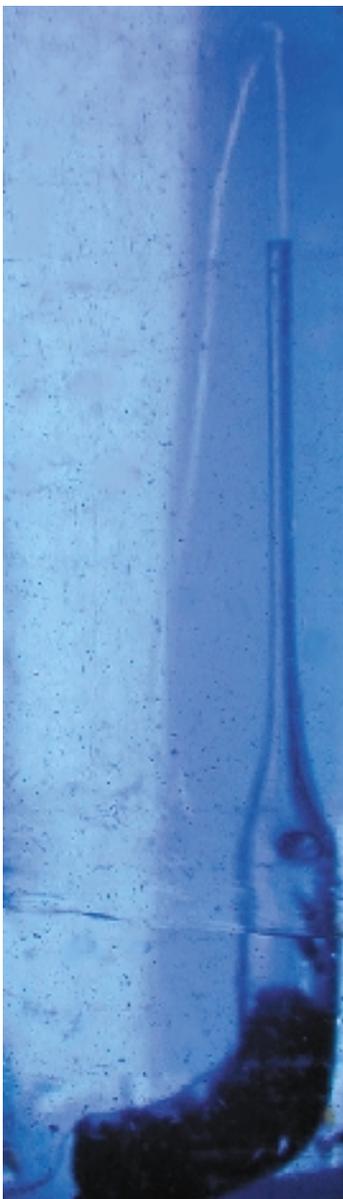
- 異常ラムシフトなどの電磁量子力学
- 高効率非線形光学現象
- 量子コンピュータ
- 超光速の有無の検証実験

超流動

通常の物質は低温で固化しますが、ヘリウムのように軽い原子は低温で量子効果が顕著に現れ、常圧では絶対零度まで固化しません。さらに絶対零度近くでは超伝導に似た「超流動状態」になります。そこは量子力学が支配する世界です。

「上」に流れる不思議な物質

ヘリウム4は2ケルビン程度で超流動状態になります。超流動状態は粘性がなく、どのような狭い隙間も通ります。これは超伝導で電気抵抗がないのと似ています。さらに壁をはい上がるなど、奇妙な性質を示します。これらは全て量子力学で説明されます。

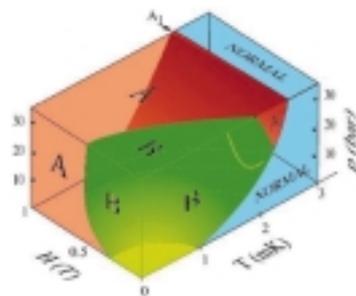


超流動ヘリウム4の噴水効果

超流動ヘリウム3の渦を見る

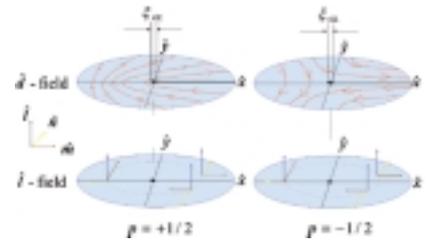
ヘリウム4の同位元素のヘリウム3も1/400ケルビンという超低温度で超流動になります。超流動ヘリウム3の運動も量子力学で支配されます。そこのできる渦は渦の強さ(循環と言います)がとびとびの値しかとれず、量子渦と呼ばれます。量子渦には2個がペアに

なったものなど、いろいろなタイプがあります。この量子渦を研究するには実験装置自体を回転させないといけません。現在、超低温で測定できる装置は東京大学物性研究所にしかありません。そこでは超流動ヘリウム3の量子渦の構造を調べています。

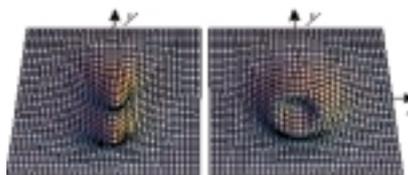


超流動ヘリウム3の相図

超低温で発現する超流動ヘリウム3には複数の相が存在します。相が違るとそこのできる渦の構造も違ってきます。

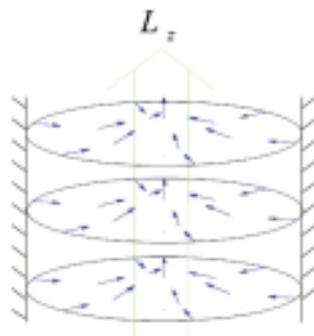


超流動ヘリウム3のA相を狭い平行平板に入れた時にできることが期待されている渦



超流動ヘリウム3にできるとされている渦の計算結果

2つの渦が結合したもの(左)や芯のない渦(右)があります。



超流動ヘリウム3A相にできると期待されている芯のない Mermin-Hoの渦



東京大学物性研究所にある回転クライオスタット

1秒間に1回転することができます。データを測定する機器も同時に回転させます。



代数から
コンピュータへ

四角い箱の中身

数を文字で表すようになって、人間の計算する力は一気に拡大しました。昔々、代数が誕生した頃のことです。

それから何百年かたって、私たちは再び計算の力が一気に拡大する時代を迎えます。コンピュータの誕生です。

科学技術や私たちの生活に飛躍的な進歩をもたらしたコンピュータの中には、ありとあらゆる「科学」が詰め込まれています。その中で数学は目に見えない部分、つまり論理的な部分をつかさどっています。

インターネットを見たり、メールを送ったり・・・あなたの目の前で今日も数学は懸命に活躍しているのです。

フェルマーの最終定理が証明されるまで

350年間、誰も解くことができなかった数学の問題があります。それがフェルマーの最終定理です。しかし、この超難問は1994年にワイルズというイギリス人によって解かれました。そしてそのヒントを考え出したのは2人の日本人でもありました。

フェルマーの最終定理とは？

350年以上も昔、近代整数論の始祖として活躍したフェルマーは、本の余白に次のように書き残しました。

「 n が3以上の時に、方程式

$$x^n + y^n = z^n$$

を満たす自然数 x, y, z は存在しない。私はこのことの驚くべき証明を発見したが、この余白はそれを書くには狭すぎる。」

フェルマーの最終定理と呼ばれるこの言明を証明しようとして、多くの人が努力しましたが、果たせず、しかしその試みの中で新しい数学理論が次々と生まれました。



フェルマー

17世紀のフランスの数学者。アマチュア数学者であったフェルマーは、整数論の研究以外にも、微積分学の先駆者としても知られ、またバスカルとの手紙は、確率論の先駆けとして有名です。資料提供：日本評論社

ワイルズ

フェルマーの最終定理をついに証明したのは、アンドリュー・ワイルズです。ワイルズは、大変若い頃から、パーチとスウィグナートン・ダイヤーの予想について大きな仕事をするなど、整数論で大活躍してきた人です。フェルマーの最終定理の証明では、構想を得てから長い間、屋根裏部屋にこもって研究を続けたと伝えられています。写真：PPS通信社

「ヒント」は日本人によって

1955年日光で開かれた研究会で、出席者谷山は楕円曲線と保型関数についての一つの予想を提出しました。この予想は、後に志村によって、正確な形にされました。

1986年、フライは谷山・志村の予想を証明すれば、フェルマーの最終定理が証明されることを発見しました。

そして、ついに1994年、ワイルズによって、フェルマーの最終定理は証明されました。

ワイルズは、谷山・志村予想をフェルマーの最終定理の証明に必要な程度まで証明したのです。

ワイルズの証明

ワイルズの証明は、 $x^n + y^n = z^n$ の解（があったとして、背理法！）、その解からあるやり方で決まる数 a, b について、式

$$Y^2 = X(X-a)(X-b)$$

で表される図形を調べることでなされました。

谷山豊

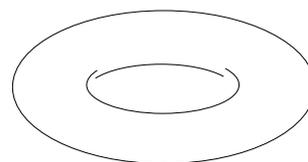
谷山は、 l 進表現、保型関数論などの数論の分野に独創的な業績を残しました。おしくも若くして亡くなりましたが、その名前は、伝説の天才数学者として、世界中の整数論研究者の間で有名です。写真提供：日本評論社



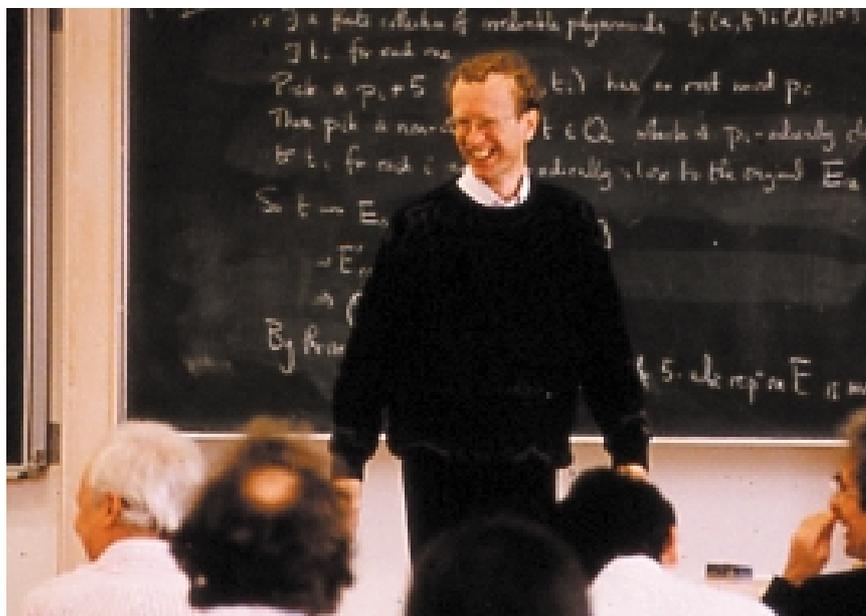
志村五郎

志村は後にアメリカに渡り、プリンストン大学で、保型関数などの整数論の様々な分野の研究の、世界的な指導者として活躍しました。その名を冠する志村多様体は、整数論の研究の重要な対象として、現在でも盛んに研究されています。

この図形は、 X, Y が複素数の範囲で考えると、図のような形をしていて、楕円曲線と呼ばれます。



楕円曲線



ガロア体と計算機

19世紀の若き天才数学者は「 $1+1=0$ 」という、不思議な数学の世界を発見しました。そしてその成果は時を超え、20世紀後半に発明されたコンピュータの中で開花することになりました。

1 + 1 = 0

$1+1=0$ 。こんな式が何かの役に立つと思う人はまずいないでしょう。

しかし、「 $1+1=0$ の数学」は、情報通信や確率シミュレーションにおいて不可欠の存在となっています。

コンピュータは情報を0,1の二値（ビット）の列にして、処理します。たとえば電子メールでアルファベットのAを送るには、00100001を送ります。



ガロア

19世紀フランスの数学者。その短い20年の生涯の中で、群、有限体（ガロア体）などの、多くの発見をして、数学の世界に革命をもたらしました。資料提供：日本評論社

$$x^5 + ax^4 + bx^3 + cx + d = 0$$

5次方程式

ガロア体は5次方程式の研究の中から発見された。

暗号化

ネットワーク上で情報を送るときには、ハッカーに情報が漏れるのを防ぐために、「暗号化」をして送信します。

暗号化をして情報を送るには、送る人と受ける人で、「合言葉」になる数字、たとえば01110011を決めておきます。そして、Aに対応する00100001を送りたいときには、合言葉の01110011を足して送るのです。

このときの足し算は、 $1+1=0$ の足し算です。

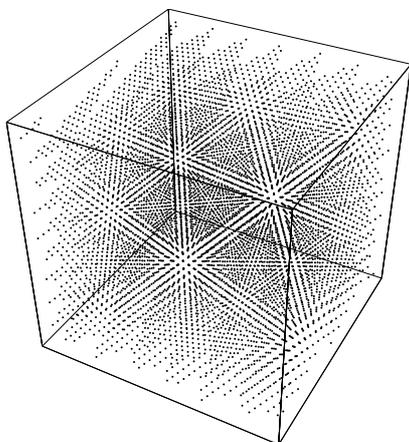
何万文字もある文書の暗号化をするには、短い合言葉では足りません。

そこで短い合言葉から長いでたらめな数の列を作ります。この列を作るところで、再び $1+1=0$ の数学が活躍するのです。

ガロア体

$1+1=0$ の数学世界（ガロア体とよばれる）は、19世紀初めにガロアにより導入されました。

100年をへて、20世紀のデジタルコンピュータの発達によって、ガロア体には、思いもよらなかったような応用



通常の $1+1=2$ の計算規則を用いたC言語のプログラムrandにより生成された空間内の「ランダム」な点列

ランダムとは言い難い結晶構造が見られる。

+	0	1
0	0	1
1	1	0

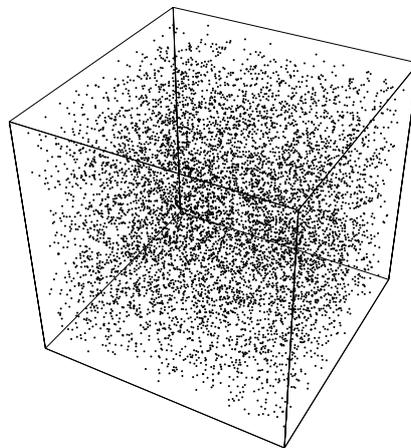
2つの元からなるガロア体の足し算

×	0	1
0	0	0
1	0	1

2つの元からなるガロア体のかけ算

が見つかったのです。

それは、コンピュータの中では、 $1+1=0$ の数学世界の方が通常の数学世界よりずっと効率良く実現されるからなのです。



$1+1=0$ の数学に基づき、松本眞・西村拓士両氏が開発したメルセンヌツイスター法により生成されたランダムな点列

従来の生成法より遥かに乱数性が高く高速で、国内外で高く評価されている。

特異点解消と計算代数

人間が描く似顔絵と写真とはどこが違うのでしょうか？似顔絵を描く時には、相手の特徴を捕らえて、時にはそれを思いっきり誇張して描きます。例えば八重歯だとかホク口だとか・・・。

図形の「ホク口」にあたるのが特異点です。図形の特徴が分かるためには、特異点をしっかり描かなければなりません。そのためには図形を表す式について理論的な考察をすることが大切なのです。

特異点解消の問題

多項式を使って定義される図形には、ところどころ、複雑に絡み合った特異点と呼ばれる部分があります。方程式

$$x^2 + y^2 + z^3 = 0$$

で表される図形では、原点(0,0,0)が特異点です。

特異点があると、多項式を使って定義される図形を調べる上で、困難が起ります。

あるいは図形の持っている大切な情報が、特異点の回りのからまりの中に隠れてしまって見えづらくなります。特異点のからまりをほぐすのが特異点の解消の問題です。

下の図は数式処理ソフトでかいた、 $x^2 + y^2 + z^3 = 0$ の特異点の絵です。

このような絵をコンピュータに書かせようとすると、特異点のところなかなかきれいに書けません。

図の中で一番情報が詰まっている特異点のところを正しく理解するには、機械に任せてしまうのではなく、人間の頭で考える必要があるのです。



廣中平祐 写真提供：日本評論社

標準基底

特異点解消の問題は、図形の次元が1, 2の場合には19世紀に解決されていて、また図形の次元が3次元の場合には1944年にアメリカの数学者オスカーク・ザリスキーが解決していました。

廣中平祐は1964年に発表した論文で、すべての次元の特異点の解消の問題を解決しました。

廣中の論文は、200余頁の長大なもので、証明に4重帰納法を用いる大作でした。

廣中は、特異点解消の問題を解決した論文の中で、図形を定義する方程式を調べるために、標準基底というアイデアを考えました(注)。

グレブナー基底

標準基底のアイデアは、多項式の計算をシンボリックに行う計算代数の中で再登場しました。

廣中より少し遅れて、ブックバーガーは廣中の標準基底と同じような概念に到達し、それをグレブナー基底と呼びました。

ブックバーガーは方程式の組を与えたとき、そのグレブナー基底を求めるやり方(アルゴリズム)を発見しました。

注：

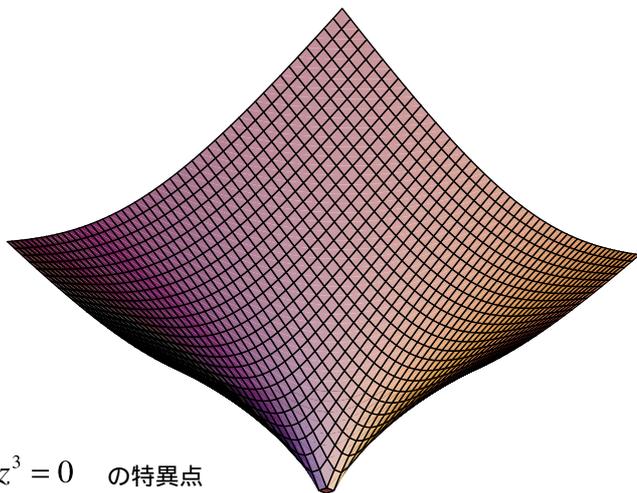
廣中の標準基底とグレブナー基底には、局所的と大域的と言う差はありますが、本質的なアイデアは同じです。

コンピュータによる発展

標準基底とその計算法は、電子計算機の発達に助けを借りて、これまで不可能だと考えられてきた、多項式のいろいろな計算を可能にしました。

```
GroebnerBasis[
{x^3 + y^4 + z^5 - 1, x^3 + y^3 + z^2 - 1},
{t, y, z}]

{0 y^2 - 3 z^4 - 10 y^2 z^2 + 10 y^2 z^4 - 8 z^11 + y^11 + 5 z^6 -
20 y^2 z^6 + 30 y^2 z^8 + 20 y^2 z^10 + 5 y^12 z^2 - 3 z^6 + 8 y^2 z^6 -
3 y^2 z^8 - 18 z^6 + 30 y^2 z^8 - 30 y^2 z^10 + 30 y^2 z^12 + 13 z^6 -
20 y^2 z^6 - 3 y^2 z^8 + 10 y^2 z^10 - 5 z^6 + 5 y^2 z^6 - z^6 + z^11,
-80 y^2 z^2 - 32 y^2 z^4 - 32 z^2 z^4 + 128 z^2 z^6 + 80 y^2 z^8 -
80 y^10 - 80 y^12 + 18 y^11 + 10 y^13 + 18 y^14 - 480 y^2 z^4 -
182 y^2 z^6 - 182 y^2 z^8 + 788 y^2 z^10 + 708 y^2 z^12 + 480 y^2 z^14 -
480 y^2 z^16 - 480 y^2 z^18 + 90 y^2 z^20 + 88 y^2 z^22 +
88 y^2 z^24 - 80 z^2 z^2 - 82 y^2 z^2 - 82 y^2 z^4 - 2080 y^2 z^6 -
288 y^2 z^8 - 288 y^2 z^10 + 2872 y^2 z^12 + 2872 y^2 z^14 +
1880 y^2 z^16 - 2240 y^2 z^18 - 2240 y^2 z^20 - 2240 y^2 z^22 +
284 y^2 z^24 + 284 y^2 z^26 + 284 y^2 z^28 - 432 z^2 z^2 - 432 y^2 z^2 -
432 y^2 z^4 - 642 y^2 z^6 + 520 y^2 z^8 + 512 y^2 z^10 + 1884 y^2 z^12 +
1836 y^2 z^14 + 710 y^2 z^16 - 3502 y^2 z^18 - 3522 y^2 z^20 -
1642 y^2 z^22 + 424 y^2 z^24 + 420 y^2 z^26 + 422 y^2 z^28 -
872 z^2 z^2 - 872 y^2 z^2 - 872 y^2 z^4 - 1760 y^2 z^6 + 2068 y^2 z^8 +
2220 y^2 z^10 - 948 y^2 z^12 - 656 y^2 z^14 - 1472 y^2 z^16 -
552 y^2 z^18 - 872 y^2 z^20 - 792 y^2 z^22 + 380 y^2 z^24 +
384 y^2 z^26 + 408 y^2 z^28 - 378 z^2 z^2 - 308 y^2 z^2 - 416 y^2 z^4 +
3882 y^2 z^6 + 2820 y^2 z^8 + 2748 y^2 z^10 - 4584 y^2 z^12 -
4136 y^2 z^14 + 3648 y^2 z^16 + 3542 y^2 z^18 + 3232 y^2 z^20 +
922 y^2 z^22 + 88 y^2 z^24 + 132 y^2 z^26 + 188 y^2 z^28 + 1614 y^2 z^30 -
84 z^2 z^2 + 1442 y^2 z^2 + 1334 y^2 z^4 + 1823 y^2 z^6 + 107 y^2 z^8 -
324 y^2 z^10 + 4787 y^2 z^12 - 4406 y^2 z^14 - 2000 y^2 z^16 +
2738 y^2 z^18 + 2440 y^2 z^20 + 2010 y^2 z^22 - 294 y^2 z^24 -
188 z^2 z^2 + 37 y^2 z^2 + 3228 z^2 z^2 - 240 z^2 z^4 + 2770 y^2 z^6 +
2552 y^2 z^8 - 3488 y^2 z^10 - 4922 y^2 z^12 - 6180 y^2 z^14 -
278 y^2 z^16 - 1212 y^2 z^18 + 234 y^2 z^20 + 2806 y^2 z^22 +
2838 y^2 z^24 + 2770 y^2 z^26 - 366 y^2 z^28 - 336 y^2 z^30 -
218 y^2 z^32 + 3827 z^2 z^2 - 388 z^2 z^4 + 1238 y^2 z^6 + 1200 y^2 z^8 -
5322 y^2 z^10 - 5020 y^2 z^12 - 4236 y^2 z^14 + 4061 y^2 z^16 +
2338 y^2 z^18 + 2781 y^2 z^20 - 88 y^2 z^22 + 795 y^2 z^24 +
711 y^2 z^26 - 270 y^2 z^28 - 342 y^2 z^30 - 218 y^2 z^32 -
2584 z^2 z^2 + 115 z^2 z^4 - 2716 y^2 z^6 - 1188 y^2 z^8 - 1208 y^2 z^10 -
585 y^2 z^12 - 1244 y^2 z^14 + 3544 y^2 z^16 + 2916 y^2 z^18 +
```

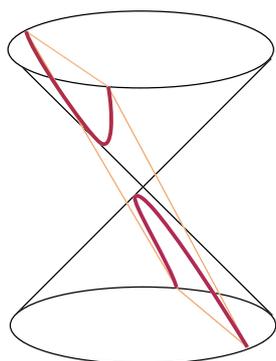


$x^2 + y^2 + z^3 = 0$ の特異点

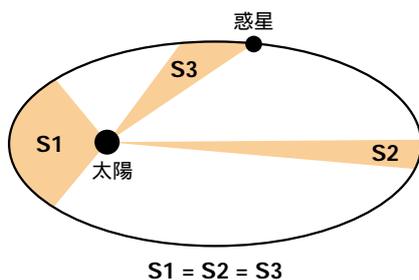
数式処理ソフト上でのグレブナー基底の計算



幾何学と理論物理学 2000年のつきあい

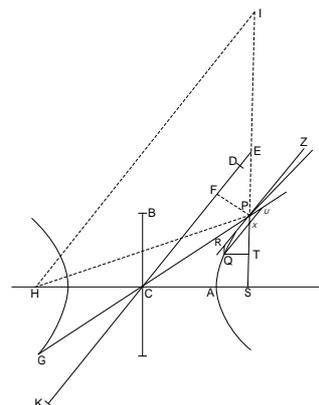


円錐曲線



ケプラーの第2法則

太陽と惑星を結ぶ線分が一定時間に描く面積は一定である。



双曲線に沿った運動 (プリンキピアより)

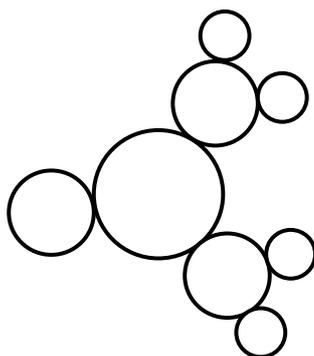
数学

前3世紀	前2世紀	16世紀	17世紀	18世紀から19世紀	18世紀から19世紀	1860年代
ユークリッド…幾何学原論によって、論理的体系的に幾何学を記述。	アポロニウス…円錐曲線論(円錐曲線とは楕円、放物線、双曲線のこと)	ケプラー…惑星の運動が円錐曲線であることを発見。	ニュートン…ユークリッド幾何学原論のスタイルで、プリンキピア(自然哲学の数学的原理)を書き、重力理論によりケプラーの法則を説明。	ファラデー・マックスウェル…場という考え方を用いて、電気力や磁力を幾何学的に説明した。	ガウス…曲面の幾何学。空間の曲がり方を表す量、曲率を発見。我々の住んでいる空間が曲がっているかを測量により調べようとした。	リーマン…高次元の曲がった空間の幾何学、リーマン幾何学を創始。

$$\int_{\Sigma} g_{ij} \frac{\partial x^i}{\partial s^a} \frac{\partial x^j}{\partial s^b} h^{ab} ds^a ds^b$$

弦のエネルギー

南部の定式化をポリヤコフらが改良したものです。エネルギーから決まる運動方程式の解は、数学では調和写像と呼ばれます。

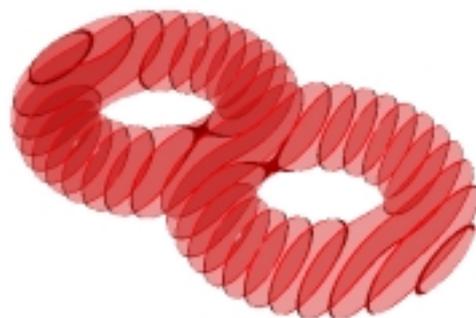


リーマン面の退化

弦理論とリーマン面

超弦理論はひもの運動で、物理現象を説明します。その数学的基礎はリーマン面で、これは、ひもが動いた跡である曲面の理論です。

リーマン面



$$\int_{\text{3角形}} \text{曲率} = \text{3角形の内角の和} - 180^\circ$$

ガウス・ボンネの定理

3角形の内角の和の, 180°からのずれが, 空間の曲がり方をあらわす。

$$ds^2 = \sum_{ij} g_{ij} dx^i dx^j$$

リーマン計量

曲がった空間で, 長さや面積を定めます。

$$g^* A = g^{-1} dg + g^{-1} A g$$

ゲージ変換

素粒子物理学の標準理論は, ほとんどすべての力をゲージ理論で説明します。

$$R_{ij} = T_{ij}$$

アインシュタインの重力理論 (一般相対性理論) の基本方程式

空間の曲がり方がその場所のエネルギー密度に比例するという式。

$$\int \|dA + A \wedge A\|^2 dx$$

ヤン・ミルズの汎関数

ゲージ理論の基本量であるヤン・ミルズ汎関数は, ゲージ場の曲率の2乗の積分です。

19世紀末

1910年代

1920年~

1920年代

1950年代

1960年代

1970年代から

ポアンカレ…高次元空間の大域幾何学(位相幾何学)を始める。

アインシュタイン…重力は空間が曲がることから起きることを発見。

ワイルやカルタンによって、ゲージ変換とか接続の概念が発見されました。

カルサ・クライン…高い次元の空間を使う、統一場の理論を提唱。(当時は不評)。

ヤン・ミルズ・内山…接続とゲージ変換に基づきゲージ場の理論を創始。

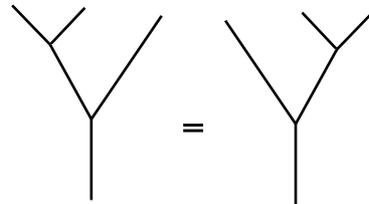
ワインバーグ・サラム・グラシヨウ…ゲージ理論によって弱い力と電磁場の統一理論を作る。

ゲージ理論や弦理論などで、次元の高い空間の幾何学や、大域幾何学が盛んに用いられるようになってきました。数学者の物理学への関心も、20世紀の最後になって、再び高まってきました。

$$a \times (b \times c) = (a \times b) \times c$$

結合法則

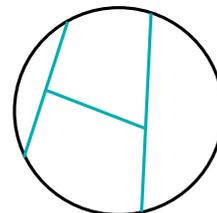
弦理論の基礎である交叉対称性は、かけ算の結合法則と関係があります。



交叉対称性

すべての力を統一する大統一理論になると期待される, 超弦理論は, およそ20世紀のありとあらゆる数学を使います。

超弦理論には21世紀の数学が必要であろう・・・ (と知っている人もいます)



コード図

絡み合ったひもを研究する結び目理論と場の量子論が関わるところで登場します。



可積分系

「独楽」の数学

数学者はさまざまな自然現象を数式で表現することにチャレンジします。

18世紀のスイスの数学者オイラーは独楽(コマ)の運動を方程式で示しました。

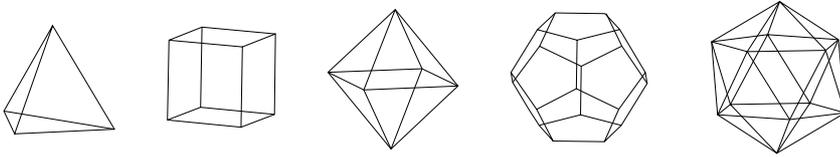
オイラーは「子供と遊びながらも論文が書けた」といわれるほどの天才数学者ですが、もしかしたら「コマの方程式」は、本当に子供と遊んでいるときに書いたのかもしれないね。

対称性と可積分系

美しい図形は高い対称性を持っています。

それと同じように、自然を表す微分方程式の解を、式で表すことができるのは、方程式に高い対称性がある場合です。

対称性が高い微分方程式の解を、具体的に求めていくのが、可積分系の研究です。

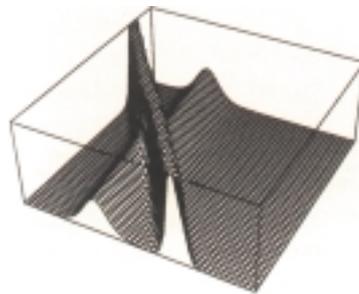
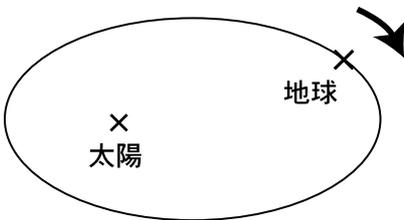


正多面体

古代から知られるこの5つの図形は、もっとも対称性が高い多面体です。

2体問題

太陽と地球の運動である2体問題は、可積分系の最初の例です。



Kdv方程式などの解には、ぶつかり合っても波の形が崩れないものがあり、孤立波（ソリトン）と呼ばれています。

群

対称性の研究には、ガロアが考えた群や、リーの考えた、リー群が役に立ちます。

20世紀には、リー群の基本単位である単純リー群や、有限群の基本単位である有限単純群の分類が完成しました。

オイラーのコマ

外から力が働かないコマの運動の方程式は、オイラーが発見した可積分系の重要な例です。

$$\begin{cases} \alpha \frac{dx_1}{dt} = (\beta - \gamma)x_2x_3 \\ \beta \frac{dx_2}{dt} = (\gamma - \alpha)x_3x_1 \\ \gamma \frac{dx_3}{dt} = (\alpha - \beta)x_1x_2 \end{cases}$$

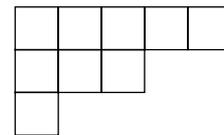
戸田格子

戸田盛和による戸田格子は、20世紀に発見された新しい可積分系です。

$$\frac{d^2 r_n}{dt^2} = 2e^{-r_n} - e^{-r_{n-1}} - e^{-r_{n+1}}$$

ヤング図形

佐藤幹夫は、リー群と関係が深いヤング図形を使って、Kdv方程式や、その一般化であるKP方程式の解を書き表す方法を見つけました。



Kdv方程式

Kdv方程式は川などの浅い水面を伝わる波の方程式です。

19世紀にKortewegとde Vriesが考え、今世紀後半の可積分系研究の高まりでも大きな役割を果たしました。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + 6u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0$$

ラックス表示

アメリカの数学者ラックスは、行列を用いると、多くの可積分系が下のよ様な一定の形の式、ラックス表示、で書き表されることを発見しました。

$$\frac{d}{dt} L = [B, L]$$

量子群

対称性は表面には現れずに隠れていることがあります。

神保道夫とドリンフェルトは、量子群という「群もどき」を考え、統計物理学などに現れる可積分系の対称性をあばきだしました。

$$[X^+, X^-] = \frac{K - K^{-1}}{q - q^{-1}}$$

力学系
・
確率微分方程式

「複雑」 な「 ∞ 」 を表す

問題：これはなんでしょう？

「新発見の暗黒星雲！」
「タコの足のレントゲン写真！」
そう答えた人は、なかなかユニークな想像力をお持ちですが、残念ながら不正解。
これは「マンデルブロー集合」と呼ばれる、数学でのちゃんとした集合なのです。
規則があるようでないような・・・不思議な文様は芸術的とさえ思えてきます。

力学系から現れる複雑な図形

いろいろな現象が時間発展するようすを記述する数学的なモデルを力学系とよびます。

その中で、最も有名なのはニュートンの運動方程式です。

力学系のもつ、不思議かつ時として美しい世界の一端をご紹介します。

3体運動

いくつかの天体が重力の下で運動する場合を考えてみましょう。運動方程式は、微分方程式であらわれます。

天体の個数が2個のときは、軌道は円、楕円や双曲線などになり、その様子は完全に理解されています。

一方、天体の個数を3個以上にすると、一般にはその軌道を既知の関数で表現することはできなくなります。

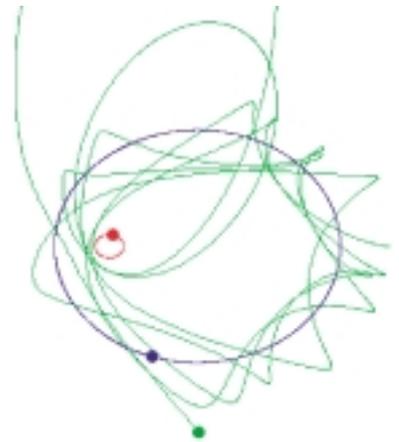
実際、その軌道の長時間にわたる挙動を調べようとしても、わずかな初期値の違いが大きな違いを引き起こすため、大体の様子を予測することさえき

わめて困難になります。

3個の天体が、衝突したり無限の彼方に飛び去ってしまわずに永久に運動し続けるかを決定する問題は3体問題と呼ばれています。

$$m_j \frac{d^2 \vec{x}_j}{dt^2} = \sum_{j \neq i} G m_i m_j \frac{\vec{x}_j - \vec{x}_i}{|\vec{x}_j - \vec{x}_i|^3}$$

3体問題の基本方程式



3体問題で、複雑な軌道がうまれるこるメカニズム

ロジスティクス写像

力学系の初期値をわずかに変えただけで、その後の軌道が大きく変わってしまう現象はカオスとも呼ばれています。

カオスは3体問題だけでなく、非常に多くの力学系で起きています。

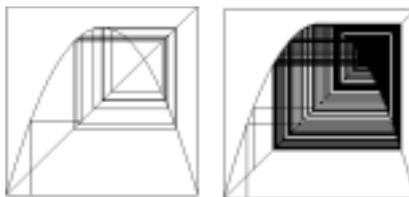
その一番簡単な例がロジスティクス写像と呼ばれる写像です。

ロジスティクス写像の様子はパラメータの値によって、いろいろ変わります。

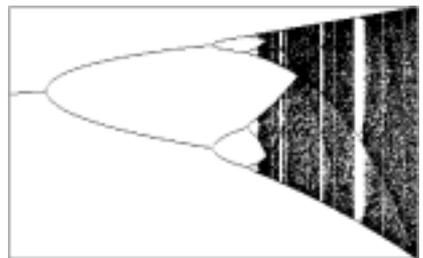
ほとんどの軌道が周期的軌道に引き込まれることもあれば、カオス的な挙動をすることもあります。

$$x_{\rho+1} = \alpha x_{\rho}(1 - x_{\rho})$$

ロジスティック写像 $(1 \leq \alpha \leq 4)$



ロジスティック写像を何回も合成したときの点の動き



の変化でカオスが生じる様子

マンデルブロート集合

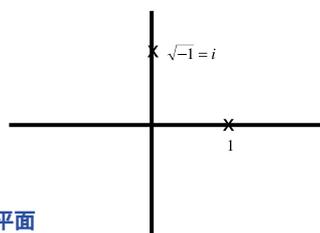
ロジスティクス写像の研究では、数列やパラメータを複素数の範囲まで広げて考えることが重要です。

複素数で考えることにより、複素解析に強力な手法が使えるのです。

カオス的な挙動をする軌道に対応する初期値の集合はジュリア集合と呼ばれ、ジュリア集合が連結になるパラメータの集合は、マンデルブロート集合と呼ばれます。

これらの集合は、数学的な美しさだ

けでなくグラフィックとしての美しさも併せ持ち、我々の目を楽しませてくれます。



複素平面



マンデルブロート集合の数々

数学

伊藤解析と数理ファイナンス

数学での発見は、時として数十年、数百年後に社会を動かすことがあります。

たとえば、現代の金融界に不可欠な理論になっている確率微分方程式は、第2次世界大戦中に発表された日本の数学者、伊藤清の論文が発展を遂げた成果なのです。

確率微分方程式

物理学では、微分方程式が理論を記述する基本的な道具でした。

さまざまな科学の分野で、不確実な現象を記述する道具として、1940年代に伊藤清により日本で創られた確率微分方程式が用いられています。確率微分方程式の理論は20世紀後半に大きく発展し、今日では確率解析と呼ばれています。

$$dF(X) = \sum_{i=1}^d D_i F(X) dX^i + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^d D_i D_j F(X) d\langle X^i, X^j \rangle$$

確率解析の基礎になる伊藤の公式

ランダムな変数の置換積分の公式です。右辺第2項がふつうの微積分と違って、伊藤の公式は、数理ファイナンスでも主役を演じます。

金融工学への応用

確率解析の理論が現在もっともよく用いられているのは数理ファイナンス・金融工学の分野です。市場価格が変動するありさまを記述し、ランダムな市場の動きに対して、危険（リスク）の少ない方法を考えるのが金融工学の大事な目的ですが、確率解析はそのためにも不可欠な理論となっています。

$$-rF + rF_s S_t + F_t + \frac{1}{2} F_{ss} \sigma^2 S_t^2 = 0$$

金融工学で有名なブラック・ショールズの方程式

左辺第4項が伊藤の公式の右辺第2項に対応します。

さらに広い分野で

確率論は統計的なデータを処理することを大きな目的としていて、自然科学・社会科学・人文科学など広い範囲で役立てられています。

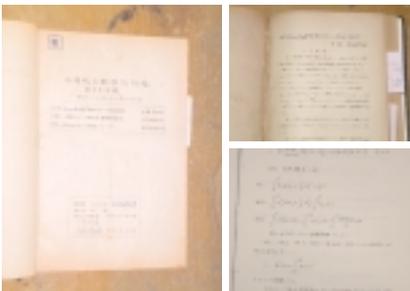
データを処理するには、それぞれの現象を記述する理論が必要です。

近年、コンピュータ・ITが発達し、大量のデータを高速に処理する事ができるようになりました。そのため、複雑で高度な確率モデルを理論の基礎に置いても、応用することが可能になりました。

数学

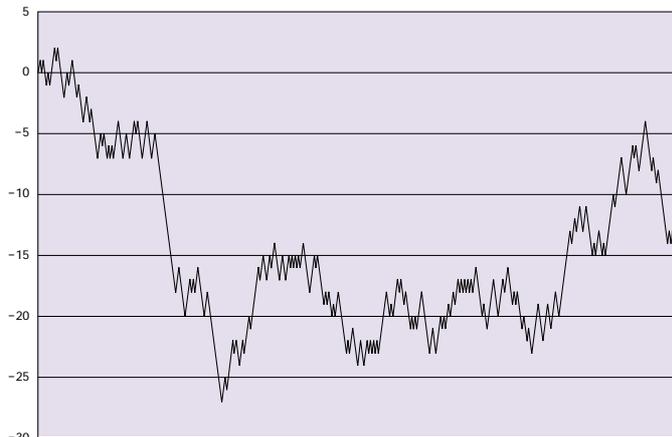
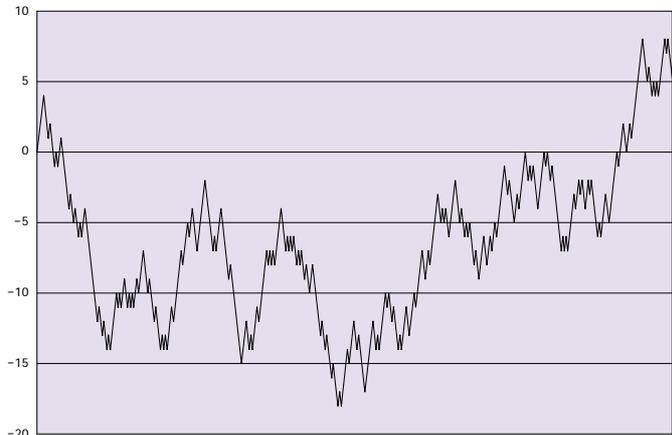


写真提供：日本評論社



上：伊藤清
下：全国紙上談話会44号

確率解析の発展に決定的な役割を果たした伊藤の公式は、戦争中の困難な状況のもとで発見され、手書き・謄写版刷りの冊子「全国紙上談話会」に発表された。



株価の変動のようなランダムな現象を表すグラフ

流体の方程式

水や空気のような、ものの流れを扱う学問が流体力学です。

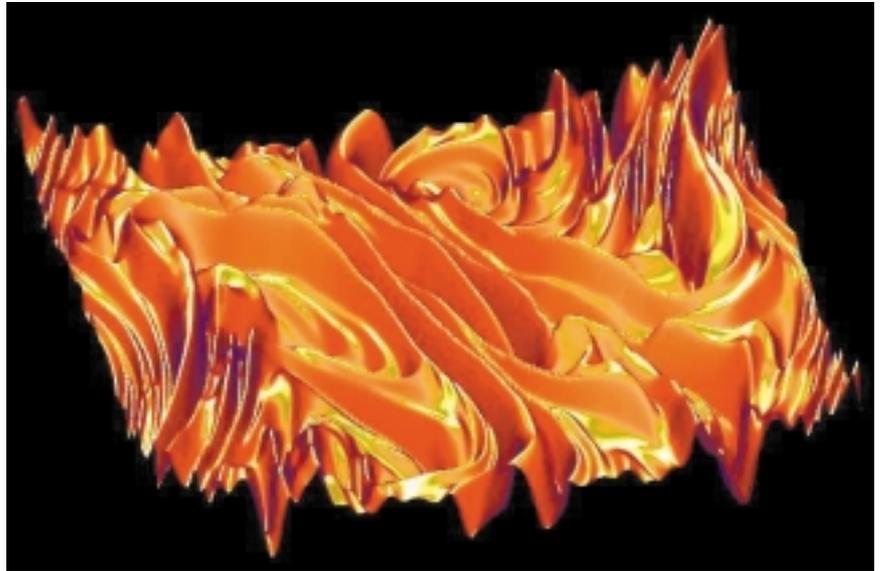
確かに「きれいな波紋」や「そよ風のような空気の流れ」が数式で表現できることは想像できるかもしれませんが、しかし、一見むちゃくちゃなように思える「乱流」さえも、方程式で表現する試みがいま行われているのです。

ナビエ・ストークス方程式

流体力学の基本方程式はナビエ・ストークス方程式という微分方程式です。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \text{grad})\mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \gamma \Delta \mathbf{u} + \mathbf{K}$$

流体力学の基本方程式ナビエ・ストークス方程式



上：2次元乱流の可視化

平面内の流れのベクトル場が複雑化することを見るようにするには渦度と呼ばれる量の分布を見るのがよい。

この絵はある時刻での渦度の分布をコンピュータシミュレーションしたものである。激しく振動している様子が見える。

左：整った渦のパターン

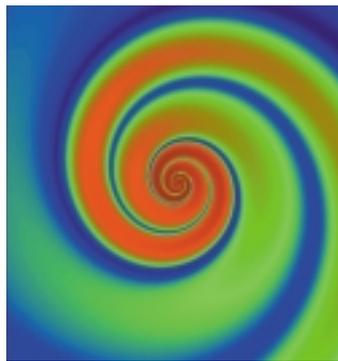
このような、乱流と正反対の、きれいな渦もナビエ・ストークス方程式の解としてあらわれます。

70年間の謎

乱流も、きれいな渦のパターンも、ナビエ・ストークス方程式の解析から分かると信じられています。ナビエ・ストークス方程式は、いわば支配方程式なのです。

しかし、この方程式には解が存在するかどうかすら分かっていないのです。

「初期値と境界値を与えたとき、ナビエ・ストークス方程式に解が存在するか」は大きな未解決問題になっています。70年もの間、多くの優れた数学者が、この問題に挑戦してきましたが、彼らの挑戦はことごとく退けられてきました。この問題は、ミレニアムを記念して懸けられた、クレイ研究所の1000万ドルの懸賞問題の一つになっています。



謎はさらに深まる・・・

ナビエ・ストークス方程式には、ごくわずかの対称性もありません。流体の体積以外には保存量もありません。

これは、対称性の高い可積分系とは、正反対の方程式なのです。

だからこそ、乱流のような、複雑な現象を扱う支配方程式となることができません。

対称性も保存量もない方程式は、数学的な取り扱いには、まことにやっかいな方程式なのです。しかし、そこには多くの重要な問題が内包されていて、多くの数学者や物理学者を魅了してきました。

過去70年の間にナビエ・ストークス方程式の理論は着実に進歩してきました。

しかし、理論の進歩は解決した問題と同じくらのミステリーも生み出してきました。これから解くべき問題は、今まで解かれた問題より遙かに多いでしょう。

流体の運動の数理科学的研究は、21世紀数学の重要なフロンティアです。

流体の研究にはいろいろな側面があります。基本方程式の理論的な研究。コンピュータを用いた数値実験。これらは、ともに欠かせない研究の両輪で、どちらが欠けても、流体现象を理解することはできないのです。

地球環境を予測する方程式

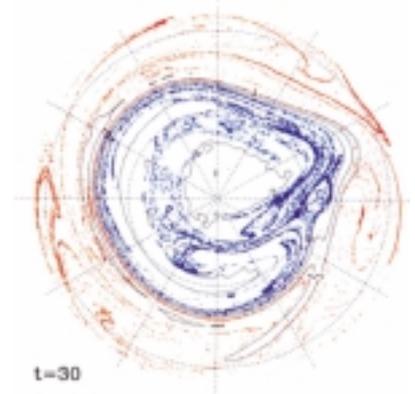
ナビエ・ストークス方程式は、数学や実験室の域にとどまらず、私たちの住む地球全体の環境さえも「支配」しているといわれています。

実際に行われている数値計算によるシミュレーションをご紹介します。

地球規模での流体運動

地球規模での大気や海洋の運動もナビエ・ストークス方程式に支配されています。日々の気象変化や長期の気候変動は、この方程式をスーパーコンピュータで解いて予測されています。また、同様の数値計算により、不規則に変動する大気や海洋の流れによってエネルギー

や物質が地球規模で循環している様子を知ることができます。オゾンホールを念頭においた「墨流し実験」では、成層圏でのオゾン破壊物質の輸送と混合の様子が、実験室内の3次元的な乱流混合と大きく異なっていることがわかりました。



数学

全世界の気候をコンピューターで予測する

世界の気候は、太陽からの熱と地球上に存在する水（水蒸気）を大気・陸・海の間でやり取りすることによって決まりますが、そこには気圧や風速・風向といった様々な気象条件が複雑にからみ合っています。この複雑な現象を全世界的な規模で予測するため、世界各地の気温(T)、湿度(q)、気圧(p)、風速(V)を初期値として、太陽放射によ

る熱力学方程式、水蒸気の連続方程式、風速の運動方程式などに関する微分方程式をコンピューターを用いた大規模な計算によって行ないます。右ページの図は、そのようにして求めた6月から8月の世界の気温と降雨量を示しています。大域的な分布がほぼ再現されていることがわかります。

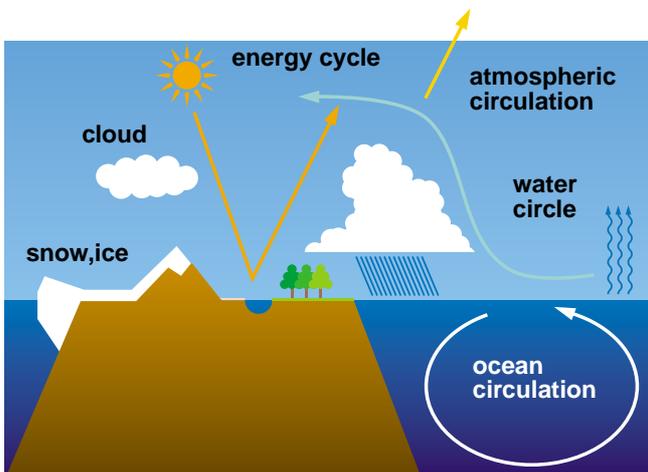
$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + F + D(V)$$

$$\frac{dT}{dt} = \Gamma w + Q + D(T)$$

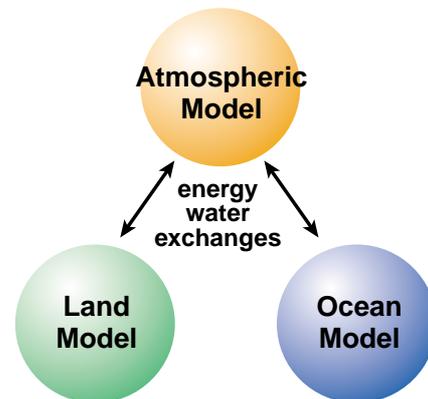
$$\frac{dq}{dt} = E - C + D(q)$$

Climate System → Climate Model

exchange and transport system
of energy and substance

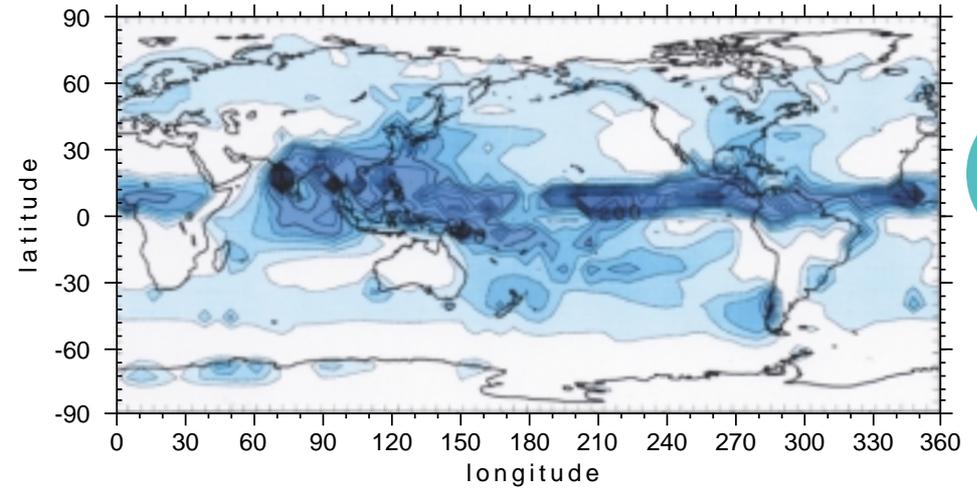
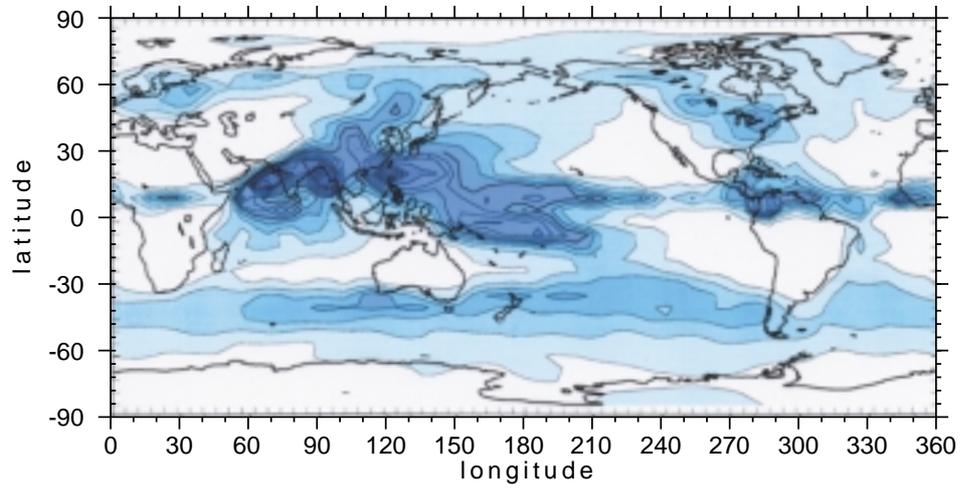


計算モデル

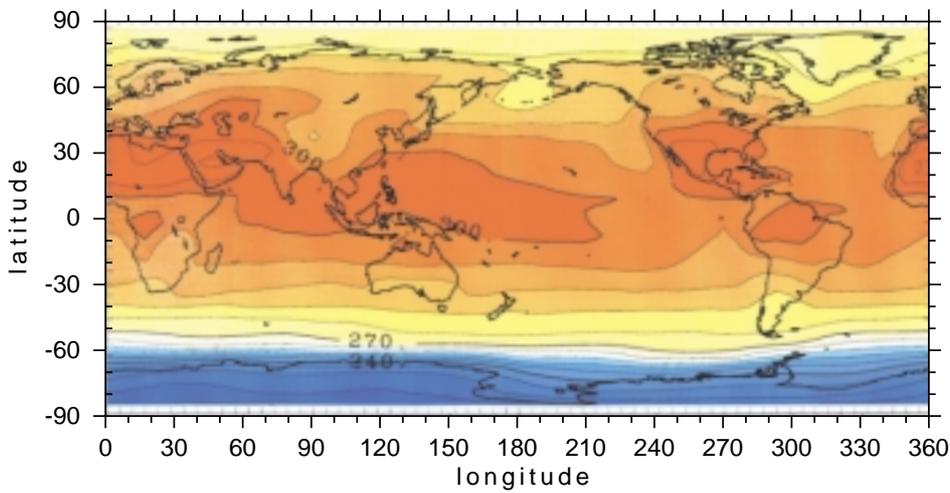


6 ~ 8月の世界の降雨量

(上) 計算で得られた降雨量分布
(下) 実際の降雨量分布

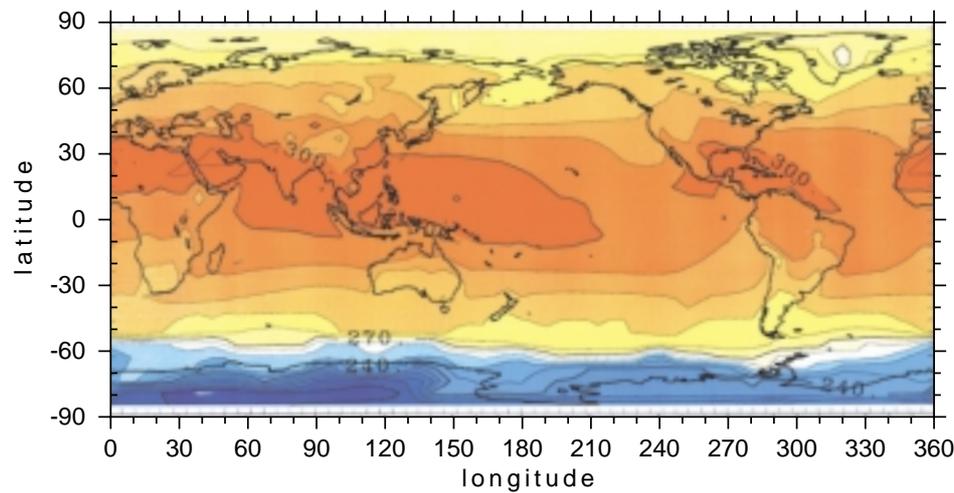
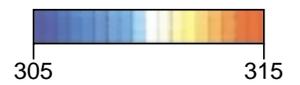


数学



6 ~ 8月の世界の気温

(上) 計算で得られた気温分布
(下) 実際の気温分布



私 た ち の 惑 星

地球の歴史

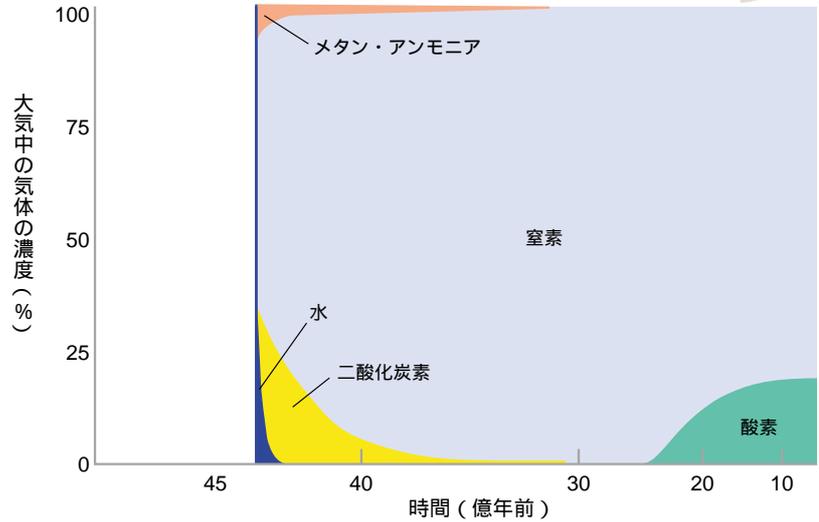
なぜ私たちは地球にいるのか？さらには、なぜ地球に生命が生まれたのか？そんなことを普段意識して生活している人はそう多くはないでしょう。でも、生命の星・地球は、「偶然」ともいえるさまざまな要因のもとに宇宙空間に生まれました。では、この「偶然」とは何だったんでしょう？あたかも探偵のように地球の過去を探る科学者達の努力は続いています。

生命の惑星 地球

地球は今のところ生命の生存する唯一の惑星です。
私たち人類も含めた生命はいつかにして生まれたのか？
それは大地に刻まれた地球生命の歴史が教えてくれます。

地球はなぜ生命の惑星になったのか？

地球には大量の水が存在し、それが海洋を形作りました。大気中に大量に存在していた二酸化炭素は、海水中に溶解して、炭酸カルシウムとして、岩石の中にとりこまれました。二酸化炭素の濃度が低下すると、光合成によって生命を維持する原始的な植物が誕生しました。それが、長い時間をかけて、大気中の二酸化炭素を酸素に変えて、呼吸活動する有酸素動物が発生し、それらが、陸地で活動する様になりました。



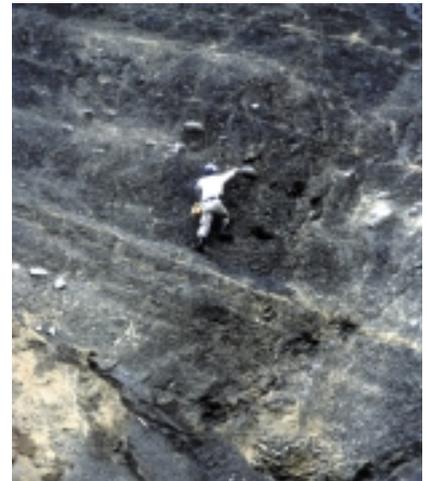
別冊サイエンス「地球と大気の進化 C.J.アレグレル/S.H.シュナイダー」より

地球

地層の情報解読

地層の中には、水流、嵐、津波、土石流、地磁気の逆転、隕石の衝突などさまざまなイベントが記録されています。地球のエキスパートたちは、自らの目と足で地層を調べ、複雑な地球の歴史を解きほぐしてきました。彼らの調査対象は世界中のあらゆる時代の地層におよびます。写真はロシア・カムチャッカ半島とサハリンに露出する中生代白亜紀（約1億4,000万年～6,500万年前）の地層です。調査の結果、これらの地層は現在の気候とは異なり、

むしろ暖流の影響を受けて堆積したことがわかりました。大自然の中で地球と一対一で向き合うのも研究の醍醐味のひとつです。



古生物の記録

化石は、過去三十数億年間にわたる生物の進化をドラマティックに物語ってくれます。それと同時に、写真のアンモナイト化石からは、地球温暖化がもっとも進んで海面が上昇した中生代白亜紀の海洋環境の一端を読み取ることができます。化石は過去ばかりでなく、現在や未来の地球環境を解くカギでもあるのです。

活動する地球とその歴史の解読

火山活動や地震は、地球が活動を続けている証です。

それまで地表にあったものが地下深くに潜り込んで再び地表に現れる・・・

ゆっくりではありますが、ダイナミックな地球の活動をご紹介します。

火山活動の予測など、防災に関する研究

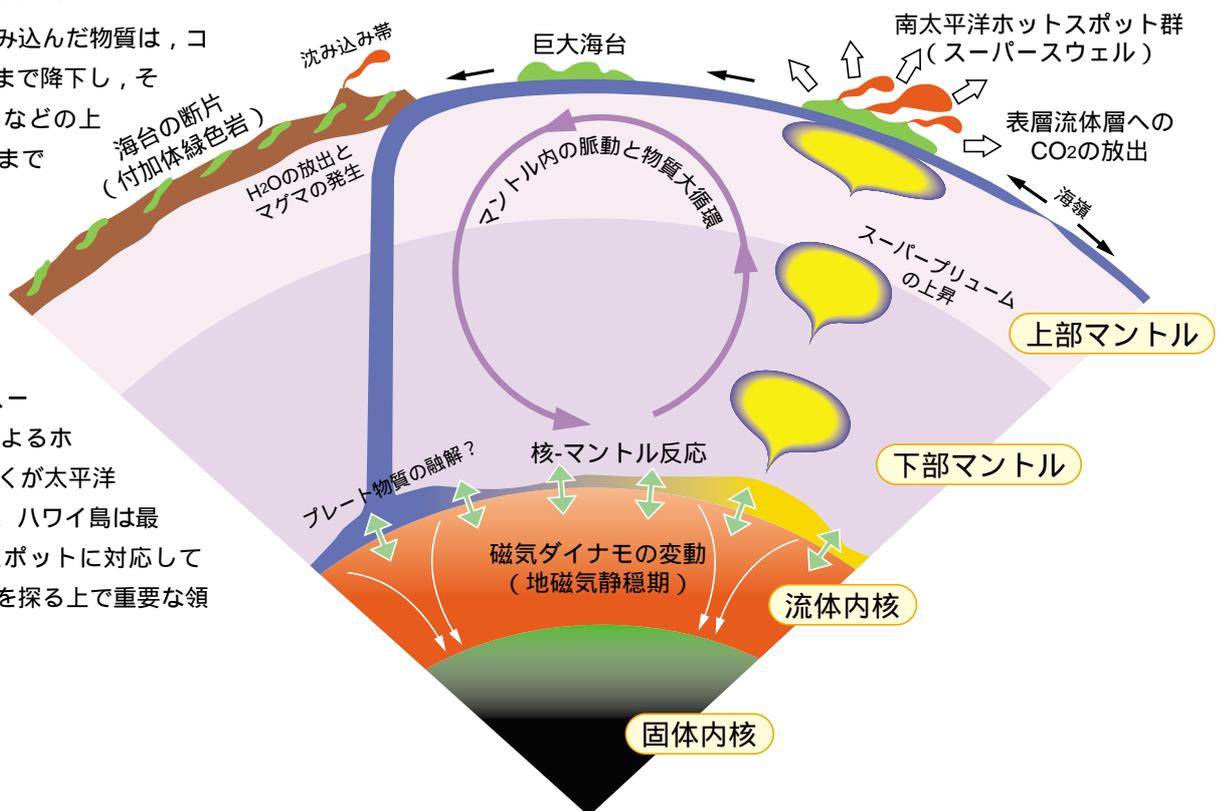
火山はマグマが地表に達する現象です。地震や地殻変動、地熱などもあわせて観測し、マグマの活動のダイナミクスに関する研究が行われています。そのような基礎的な研究は、自然のもたらす災害から私たちの身を守る防災上の観点からも重要です。ここに示した写真は1979年10月の阿蘇中岳第1火口のストロンボリ式噴火の様子です。

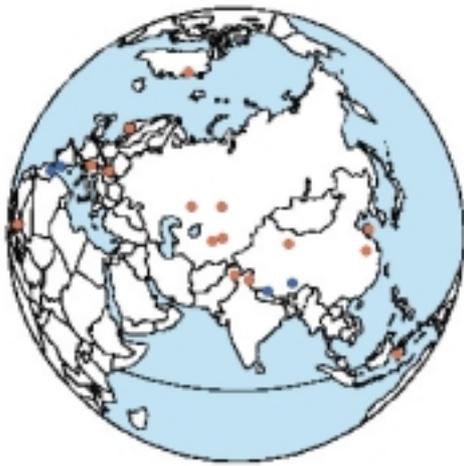


地球

地球規模の物質循環

沈み込み帯で沈み込んだ物質は、コア・マントル境界まで降下し、そこからプレュームなどの上昇流とともに地表まで達するというマントル規模での大循環の解明が進んでいます。地球深部からのスーパープレュームによるホットスポットは多くが太平洋に分布しています。ハワイ島は最大規模のホットスポットに対応していて、地球の活動を探る上で重要な領域のひとつです。





● 超高压変成岩（コース石やその仮像を含むエクロジヤイト等）
● ダイヤモンド相造山帯超高压変成岩

造山帯 浮き上がる地下深部物質

プレートテクトニクスに従うと、大陸は数億年ごとに分離と合体を繰り返しています。大陸同士の衝突によって形成された造山帯には、その地下深部を構成していた岩石が広く分布しています。1980年代以降の研究で、造山帯の地下深部物質の一部は、地表付近にあった岩石がマントルまで沈み込み、ダイヤモンドや石英の高圧多形（コース石）を含む超高压変成岩に変化した後、固体状態で再び地表に戻ってきたことが判ってきました。2001年までに世界中の大陸衝突型造山帯から超高压

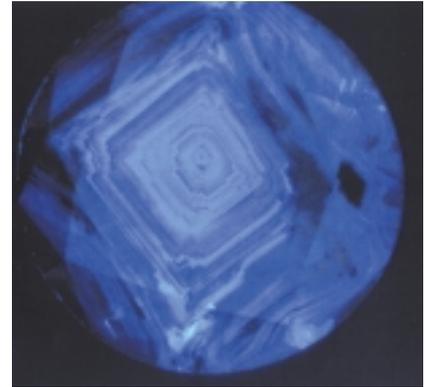
変成岩が見出されるようになっていきます。マントル物質は数mから数百mのレンズ状あるいは層状の岩体として、地殻物質起源の岩石中に取り込まれて産する例がよく知られています。写真のマントル物質は地下120kmで、周囲の地殻物質は地下50kmで形成されたとされています。地下100~200kmで形成された代表的な超高压変成岩やマントル物質の密度は代表的な地殻物質より大きくなります。さて、マントル物質と地殻物質の混合は一体どこで、どのようにして生じたのでしょうか？また、密度の大きい超高压変成岩やマントル物質は地表までどうやって上昇してきたのでしょうか？造山帯の地下深部で生じた物理過程を一緒に考えませんか。



ダイヤモンドのカソードルミネッセンス像

指輪やネックレスなどの装飾用に研磨された透明で美しい宝石級ダイヤモンドであっても、その内部には成長の記録を示した縞模様が隠されています。このようなパターンは、いわば「指紋」と同様にその個体に特有・無二のものであって、そのダイヤモンド

個体にとっては、「履歴書」とも言えます。特殊な手法を用いれば、そのような情報も引き出すことができます。この写真は、ダイヤモンドに電子線を照射することによって青色に発光する現象を利用して、ダイヤモンドの履歴書の解読を試みているところです。

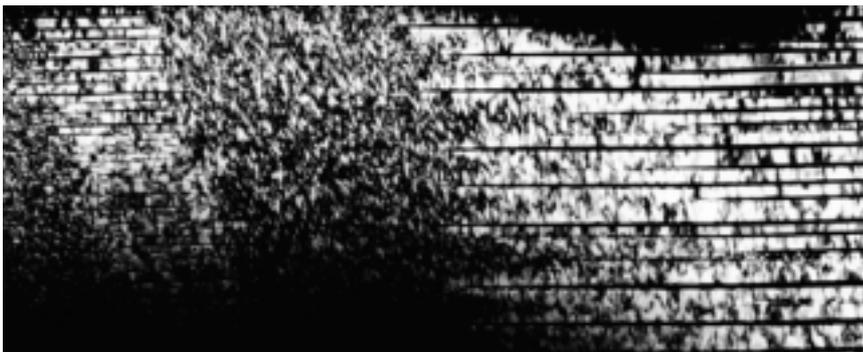


鉱物の微細構造

マグマが地表に噴出して冷え固まると火山岩と呼ばれる岩石になります。この写真はある火山岩中に含まれていたピジョン輝石という鉱物を電子顕微鏡を用いて撮影したものです。写真で

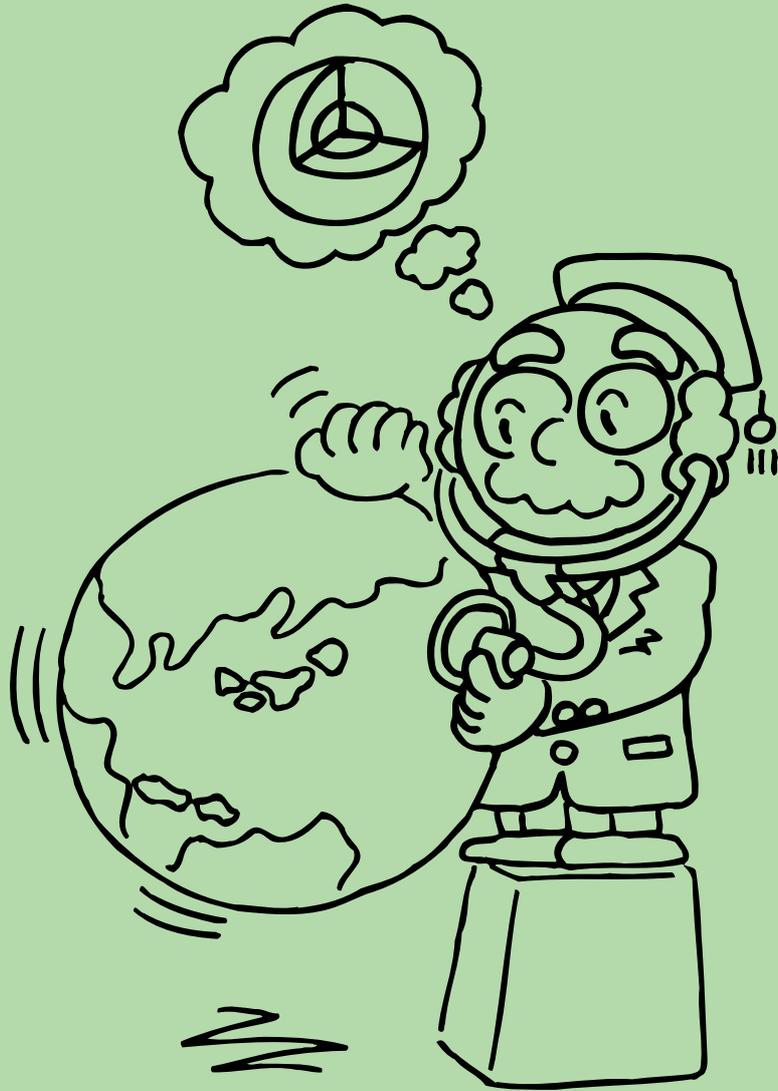
は、黒い帯と白い帯とが交互に並んでいるゾーンや黒い帯が観察されないゾーンが見られます。黒い帯と白い帯とは化学成分 - とくにCaの量 - に顕著な違いがみられます。また、黒い帯

が観察されないゾーンでは無数の微小ドメインが複雑に重なり合ったパターンを示しています。これらのような鉱物中の微細なパターンを解析することによって、その鉱物やそれを含む岩石が受けてきた熱の変遷についての手懸りをつかむことができます。例えば、写真の鉱物では、白黒の帯の太さや間隔は高温に保持されていた時間の推定に、ドメインの大きさは冷却時の降温速度の見積もりに、それぞれ利用できます。



地球の鼓動を聞く

地球の変動



地球の内部はどうやって調べるのでしょうか？
まさか輪切りにするわけにはいきませんよね。
深い穴を掘っても限りがありますし・・・
実は、地球の「音」を聴いて調べているのです。
ちょうどお医者さんが聴診器で心拍音を聴くようにね。

地球の内部構造と変動

地震を観測・分析することは、地球内部構造やその活動を知る手がかりとなります。

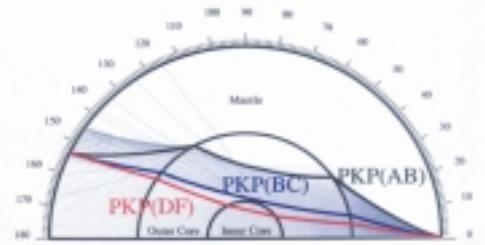
しかし、地震は時として私たちの生命を脅かす存在でもあります。

「地震を知る」ことは様々な面で大切なことなのです。

地震波による地球内部構造の探査

地震波を用いると地球内部の構造を知ることができます。この方法で地球内部に内核と外核、さらにそれを覆うマントルの存在がわかりました。30年あまりの長期にわたって蓄積された地震波データを用いて解析すると、中心部にある内核を地震波の伝わる速さが

ゆっくりと変動することがわかりました。一つの可能性として、内核がマントルよりも少し速く回転（1年に1～3度程度）していることが指摘されました。その説は、外核のダイナモ作用によって地球磁場が形成されていますが、内核とマントルの差動回転は外核



の粘性やマントルと内核間の重力トルクとも関連し、その正否を巡って論争が繰り広げられています。



超伝導重力計

写真提供：国立極地研究所

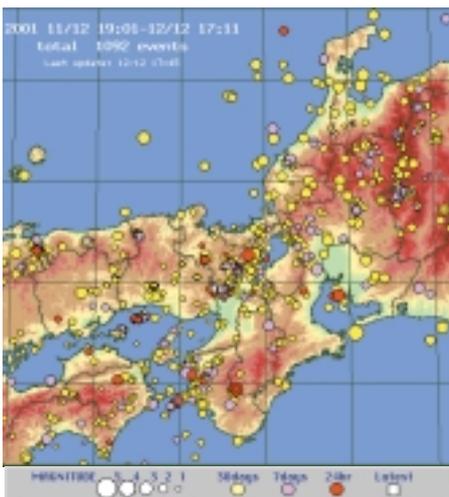
地球の自由振動

地球で地震が起こると、釣り鐘をついたのと同じように地球そのものがある決まった周期で振動することがあります。これは地球の自由振動と呼ばれ、地球全体を揺さぶるほどの大きな地震の際にだけ起こる現象だと考えられていました。しかし、最近、地球の重力の1兆分の1の変化も測定できるたいへん感度の高い超伝導重力計の観測によって、地球の自由振動は地震のないときでも常に起こっていることが発見

され、これを常時地球自由振動と呼んでいます。左のグラフの横軸は周波数、縦軸が重力の時間変化を示しますが、とびとびにある縦方向に続く赤い縞目が常時地球自由振動を表しています。常時地球自由振動がなぜ起こるのかについては、現在も研究が進められていますが、おそらくは大気あるいは海洋が地球を常にたたいているためだろうと考えられています。

リアルタイムの地震観測網

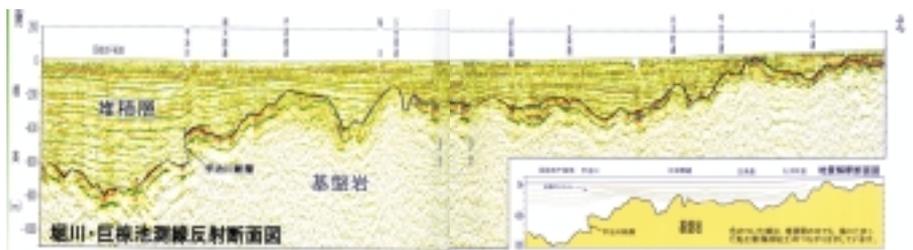
私たちの生活を災害から守る観点から、有感地震のみならず微小地震を常時観測することは、大規模地震発生予測の研究や、地震発生機構を探る上で重要です。下図は微小地震観測システムで自動的に決められた深さ30kmより浅い地震の震央分布です。リアルタイムで計算された最近1ヶ月間の結果の速報が、ウェブ上に公開され、研究面や防災面で役立てられています。



反射法地震探査による地下構造の解明

特殊な車を用いて、地面に震動を与えると、わずかな揺れが地下深くからはね返ってきます。その反射波を地表で検出し解析することによって、地下の構造を調べることができます。下図は京都市内を南北に走る測線に沿って、反射法地震探査を行なった結果です。基盤岩を覆う様に縞模様が見えます。この縞は周りの山から流れ出た

礫・砂・粘土などが堆積してできた地層に対応します。この縞模様は水平でなく傾斜したり、たわんでいたりしますが、地層が形成されるときには水平ですので、これは堆積後に地層が動いたことを示しています。また、図の左側の宇治川の付近では地層がたわんでいるのがみられ、宇治川の下に宇治川断層の潜んでいることがわかります。



青い空を見上げて

私達が普段「空」としているのは成層圏まで。高さにして約50kmです。一見ものすごく高いように感じますが、地球（半径約6,400km）を卵とするならば、成層圏はその殻ぐらいの厚さしかありません。でも、もしこの「殻」がなかったら、地球の表面は月のようになっていたといわれています。

地球の大気・海洋と環境の変化

私たちが生きていけるのは地球の表面が大気に覆われているからです。

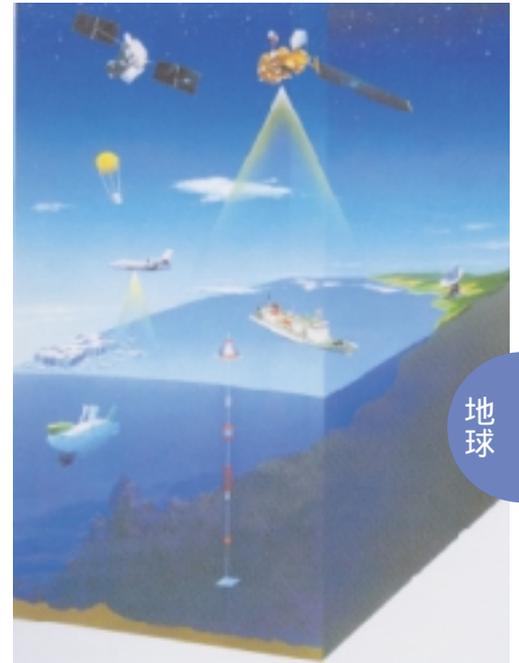
また、大気に対しては地球表面の70%を覆う海洋が大きな影響を与えています。

地球環境について考えていくとき、全地球的な観点からの観測と検討が不可欠といえるでしょう。

新しい観測システム

大気と海洋が地球環境に果たす役割を理解する第一歩は、観測によって現状を把握することから始まります。従来から、地上の観測網や気球によって大気を観測したり、船舶やブイなどによって海の中を観測する工夫がされてきましたが、近年の技術的な進歩によ

って、より精密で多様な物理量を観測することが可能になりつつあります。これらの新しい観測システムを強力に組み合わせることによって、これまで謎に包まれていた大規模な海洋の変動システムと地球規模での気候変動との関わりが明らかにされつつあります。

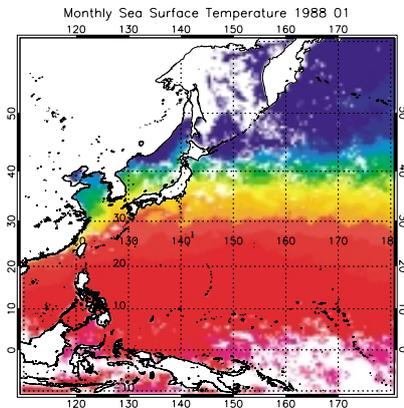


資料提供：宇宙開発事業団

人工衛星によって得られた海面温度

人工衛星による海洋観測手法の発展は、私たちに有用な情報を与えてくれるようになりました。人工衛星に搭載された赤外線の放射計によって得られる広域の海面温度のデータは、黒潮の流路の把握や気候変動の予測のために

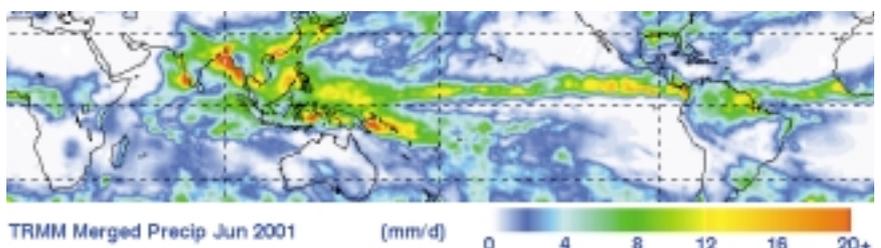
今では欠かせないものとなりました。左下の図は人工衛星NOAAによって得られた1988年1月の北西太平洋の月平均海面温度分布です。赤い色は水温が高いことを示しています。白い部分は陸域であったり雲があったりすることなどによって観測値が得られなかったところを示します。日本南岸では黒潮が蛇行して一旦岸から離れる様子がはっきりわかります。



水の循環

地球は水の惑星といわれ、表面には大量の水が存在します。しかし、その約97%は海水なので、我々陸上生物が必要とする淡水は残りの約3%です。さらに淡水のほとんどは固体として雪や氷となって主として極地に存在しているため、我々が日々利用できるのは1年の降水量を足しあわせても地球上の水の0.03%程度でしかありません。図は人工衛星TRMMによって得られた2001年6月の月平均降水量の分布です。

青から赤になるほど1日あたりの降水量が多いことを示しています。このように降水はとても偏った分布をしており、人類の多くは干ばつや洪水に毎年苦しんでいます。淡水の循環過程は我々にとって重要な問題なので、世界中の研究者が多くのプロジェクトを実施して研究してきました。そのため、近年ようやく全地球的な水循環の現状が明らかになりつつあります。

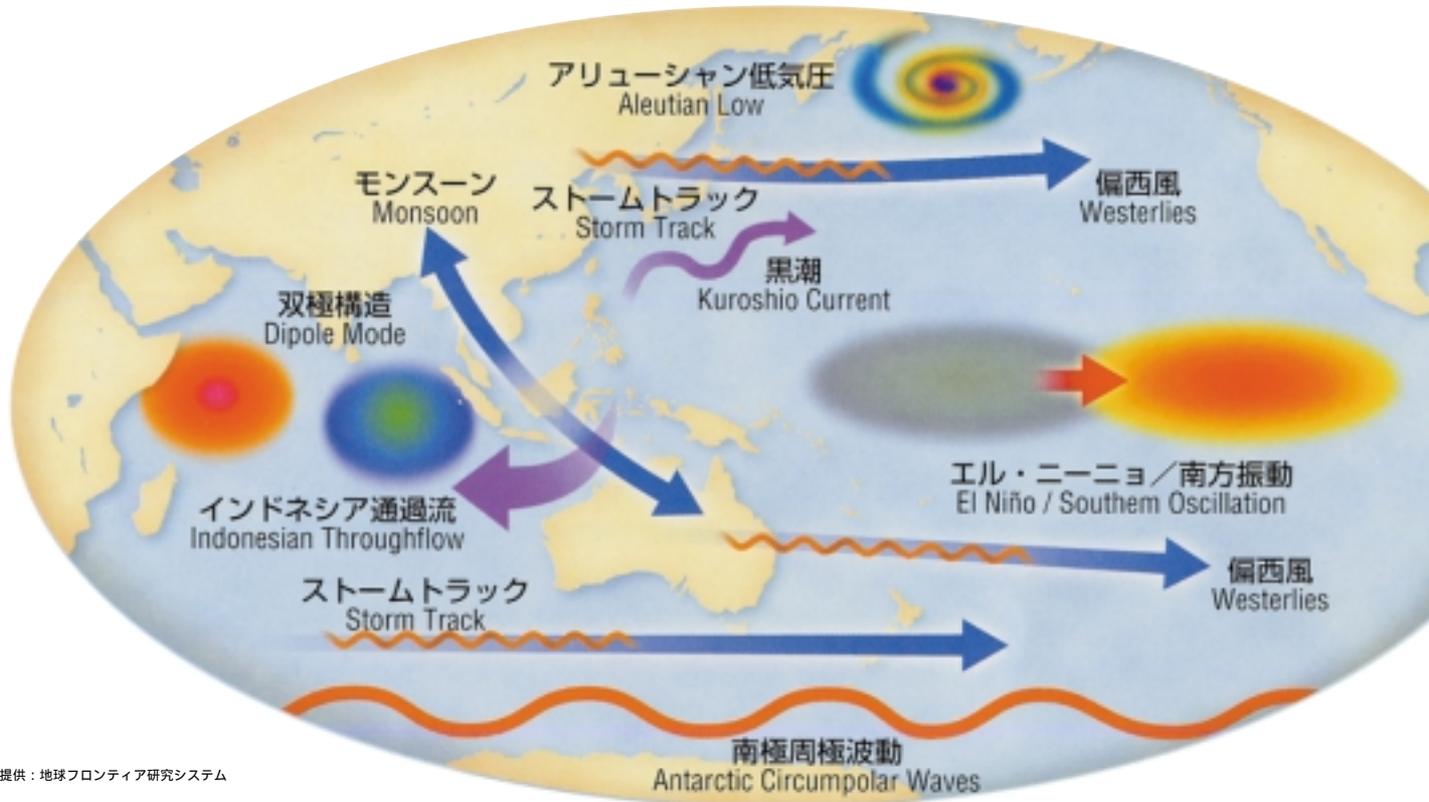


エル・ニーニョと全球気候変動

人工衛星観測をはじめとする広域観測やスーパー・コンピュータの発達にともなって、海洋が地球規模での気候変動に果たしている役割が徐々に明らかになっていきます。エル・ニーニョ現象はその代表的なものです。その影響は熱帯赤道域に限らず高緯度域に

まで及び、アジア・モンスーンやアリユーション低気圧などの変動を引き起こすと考えられています。1997年から98年にかけて起こったエル・ニーニョ現象は20世紀最大と言われ、世界各地

にさまざまな異常気象や災害を引き起こしたことは記憶に新しいところです。また、エル・ニーニョ現象の影響は遙か南極にまで及んでいることが近年発見されました。

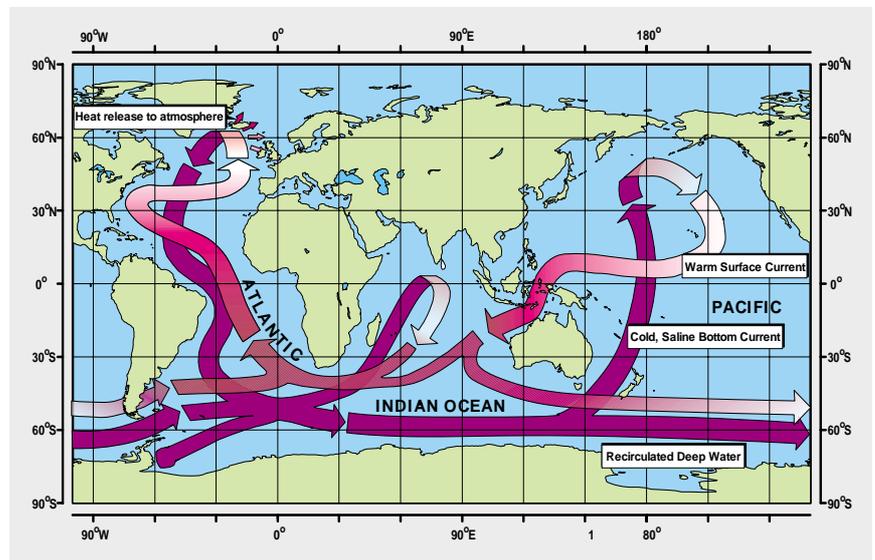


資料提供：地球フロンティア研究システム

気候システムにおける全球海洋循環

エル・ニーニョ現象のような数年スケールの変動だけでなく、数10年から数100年といった、より長いスケールの気候変動においても海洋は大きな役割を果たしています。海洋中には、「コンベアーベルト」のように水を輸送するルートがあると考えられており、このような表層から中・深層にま

で及び海洋の流れによって運ばれる熱エネルギーが気候システムを変動させる大きな要因となります。



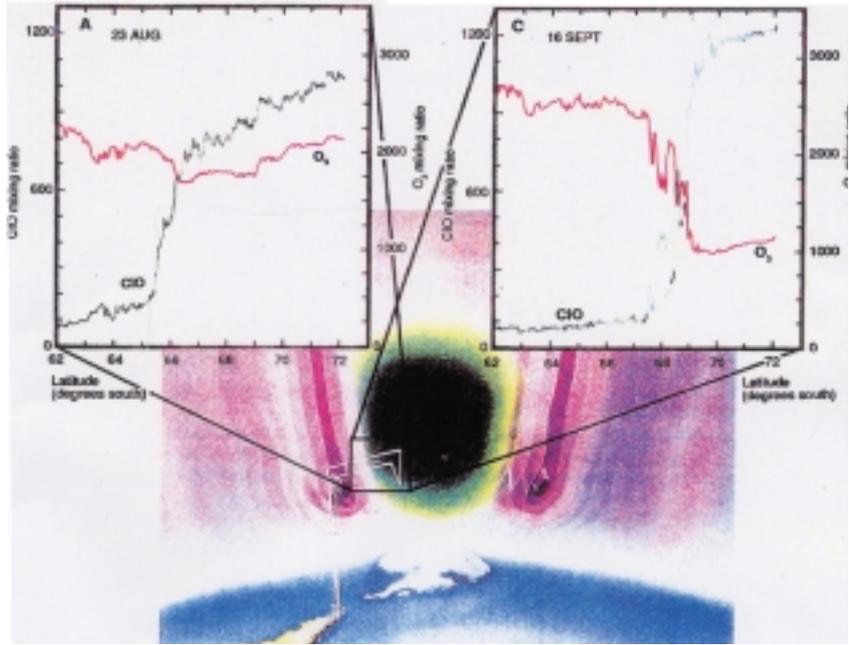
資料提供：サザントン海洋学センター

分光学と地球環境問題

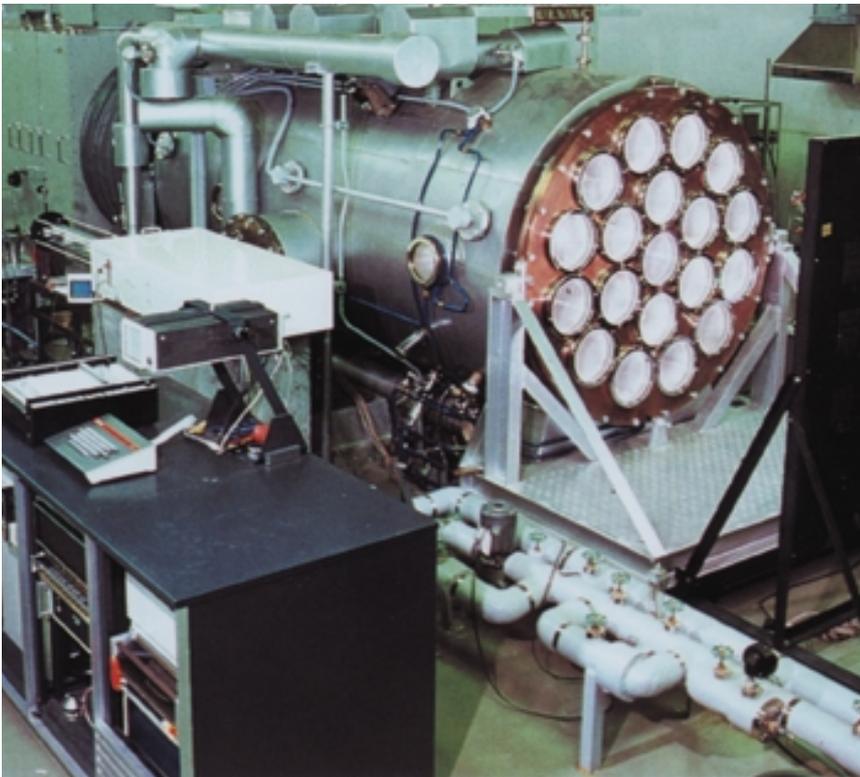
分子はそれぞれ固有の光を吸収したり放出したりします。この光を観測することで、大気中に存在する分子の種類や濃度を知ることができます。その結果、大気中には様々な化学的に活性な分子（ラジカル分子）が存在し、オゾンホールの破壊等を起こしていることがわかってきました。例えば、南極のオゾンホール付近の大気分光から、オゾン(O₃)の濃度とClOラジカルの濃度に特定の関係があることがわかりました。このことから、オゾン破壊

がCl + O₃ → ClO + O₂という化学反応によって起っていることが明らかになりました。1995年には、オゾンホール発生メカニズムの理論的解明に貢献した3人の大気科学者にノーベル化学賞が

贈られました。また、長年にわたるオゾン層破壊物質の継続観測により、オゾン層保護に関する条約のもとでの生産規制の効果が目に見える段階となりました。



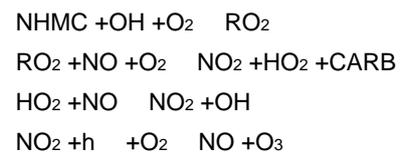
南極上空のClO とO₃ の濃度変化



大気化学反応シミュレーション装置

大気中での化学反応

大気中では、様々な化学反応が起いています。大気の状態を再現する大型シミュレーション装置によって、どのような化学反応が起きているか、その詳細がわかってきました。たとえば、オゾンの生成は太陽からくる紫外線によって生成されるラジカル分子が引き起こす以下の連鎖反応によって起っていることがわかりました。



ここで、NHMC はメタンではない炭化水素、CARB はカルボニル化合物、R はアルキル基、h は太陽光です。



太陽-地球
システム

45億年の親子関係

地球は太陽を主とする太陽系家族の一員です。

そして太陽から送られてくるエネルギーにより、地球は生命あふれる星になりました。

また、太陽は私たちにとって最も近い恒星でもあります。

太陽を詳しく知ることは、宇宙に無数とある星を知る手がかりとなります。

科学者にとっての太陽は「先生」でもあるのです。

太陽-地球システムの解明

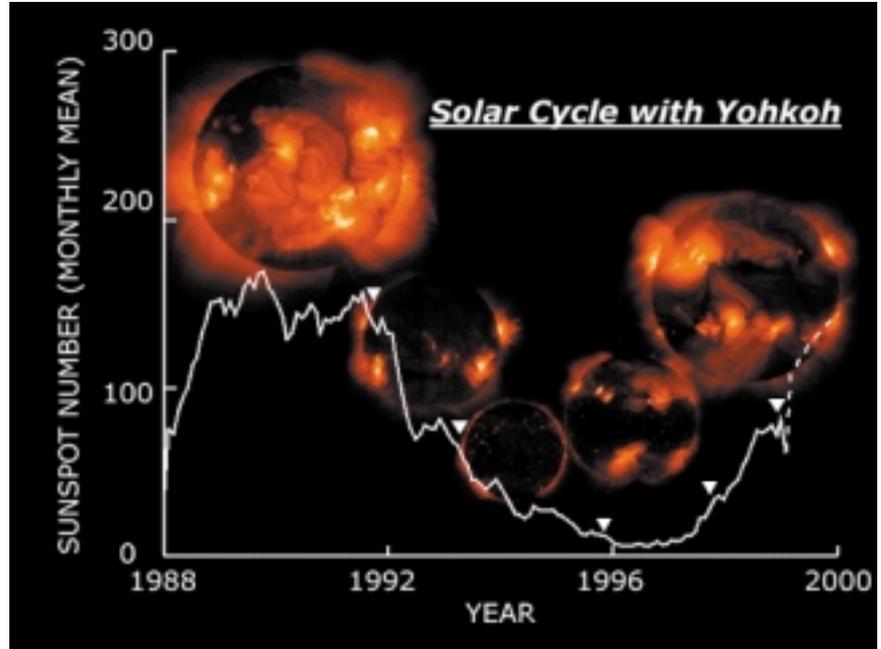
太陽は今も活発に活動を続ける星です。

現在、太陽が光や熱以外にもさまざまなエネルギーを放出していることがわかってきました。

その一部は、オーロラのように私たちの目を楽しませてくれる現象も引き起こします。

太陽の11年周期活動

太陽観測衛星「ようこう」は、太陽の活動周期である11年近くにわたって連続観測を行い、躍動する太陽面とコロナ領域の現象の詳細を捉えました。それにより、太陽面の爆発現象であるフレアの物理機構を解明して、さらにそれが地球におよぼす影響を実用に役立てようとする宇宙天気予報の研究に大きな途を切り開きました。図には活動度の指数として広く用いられている太陽黒点数と、「ようこう」のX線観測で得られた太陽像を対比させて示してあります。黒点数の増減に呼応して太陽面のX線輝度分布が変化する様子が良くわかります。



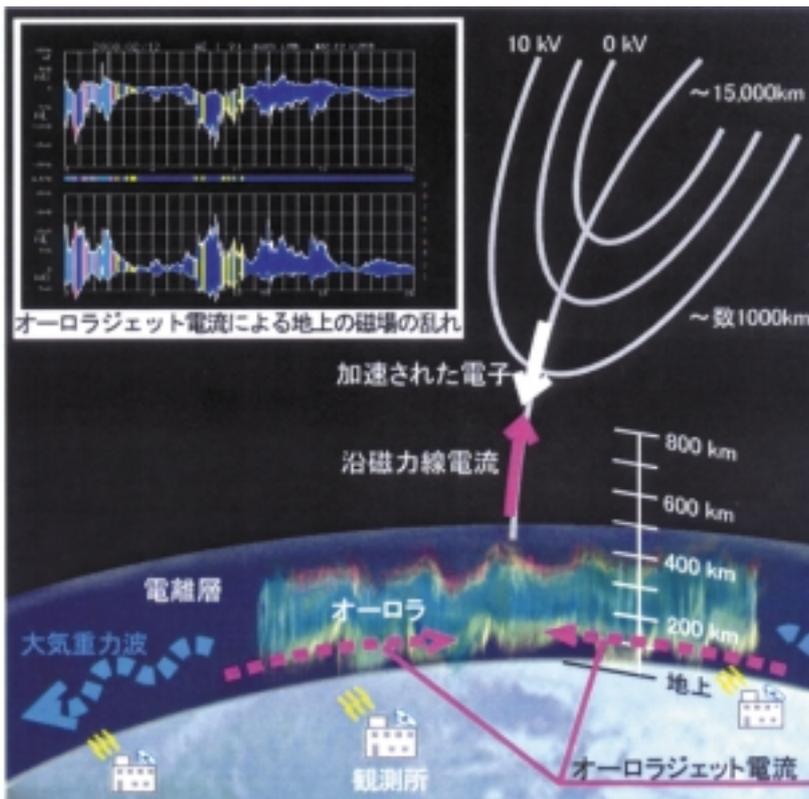
資料提供：宇宙科学研究所

太陽活動とオーロラ

太陽活動が盛んになるとその表面から放出される光や電波、プラズマ粒子のエネルギーが増大します。地球の磁気圏はその周辺に太陽から放出された

プラズマ粒子が運んでくるエネルギーの一部を取り込んで活動しています。極地の夜空を彩るオーロラは磁気圏の電子が加速されて降ってきて、大気中

の原子に衝突することによって引き起こされる発光現象ですが、もとをたどると、太陽からやってくるエネルギーがその源です。電子が磁力線に沿って高速で移動しますから強い電流が流れます。その電流はさらに電離層を流れてジェット電流と呼ばれるものを形成します。ジェット電流が現れると、地上の磁場が大きく変動します。その変動をオーロラの出る領域に多数の観測所を分布させて捉え、そのデータをもとに、ジェット電流の強さを示す指数（AEインデックス）が算出されています。その指数はジェット電流の強度とオーロラの活動を知る重要な手がかりを与えてくれています。さらに、この指数から太陽からやってくるプラズマ粒子や磁場の状態を推定しようとする試みが行われています。

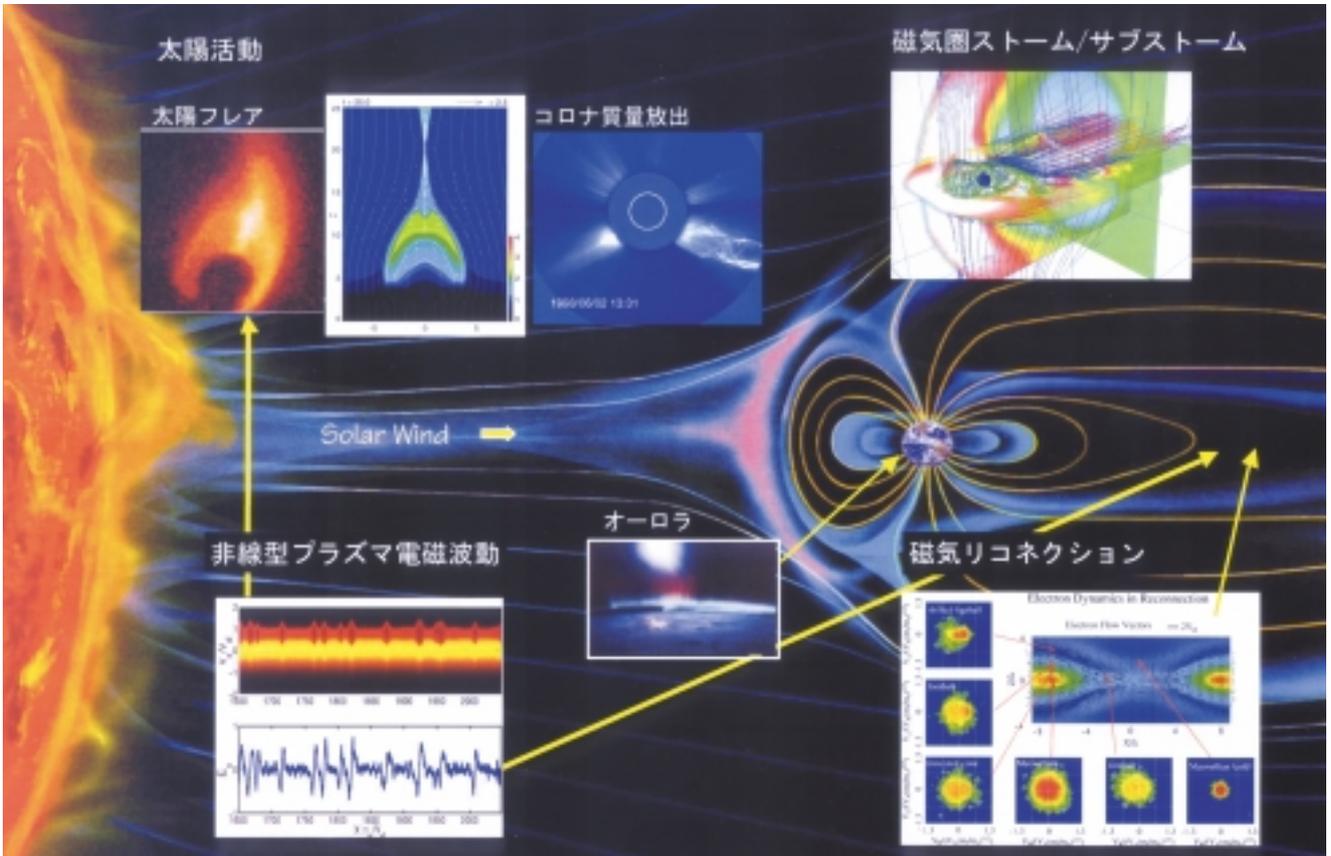


宇宙天気予報とモデル計算

太陽活動と地球の磁気圏および電離圏の活動は密接に結びついています。個々の重要な領域における基礎過程について計算機シミュレーションが行われ、その非線形的な発展の様子が解明

されつつあります。また、さらにそれらを組み合わせた総合的な計算機コードの開発も検討されています。図には太陽面でフレアが起こり、加速されたプラズマ粒子が地球に到達し、それ

によって地球の磁気圏にも不安定現象が起こって、活動的なオーロラの出現する一連の過程が示されています。



地上望遠鏡による太陽の観測

望遠鏡による太陽の黒点、コロナなどの観測が定常的に行われています。飛騨天文台のドームレス望遠鏡は、条件のよい日に太陽の細かい模様まで観測できる高い分解能をもっています。また、乗鞍岳にある国立天文台の太陽観測用のシステムなど、地上望遠鏡による太陽面の観測は、衛星観測と相補的に重要な役割を果たしています。

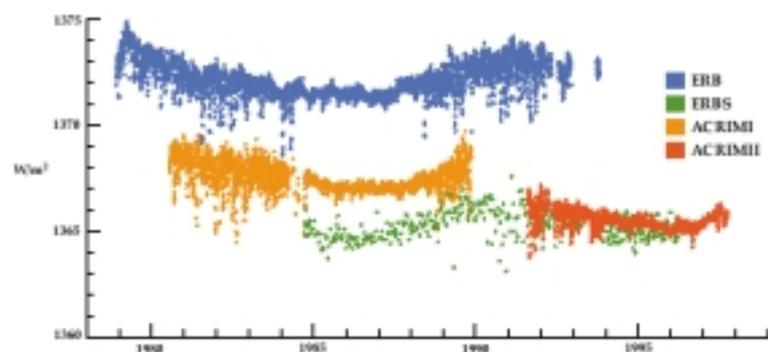


変動する太陽定数

過去においては太陽から放射されるエネルギーフラックス（太陽定数）は時間的に一定と考えられていましたが、大気圏外における直接観測を行うと、その考えが誤りであることがわかってきました。図には複数の衛星によって求められた太陽定数の時間的な変化をプロットしてありますが、ゆっく

りとした経年変化と共に非常に短時間の変化が見られます。この変動幅は小さいのですが、地球の大気・海洋システムに大きな影響をもたらしている可能性があり、太陽と地球を一つのシステムとして扱う必要のあることが指摘されています。

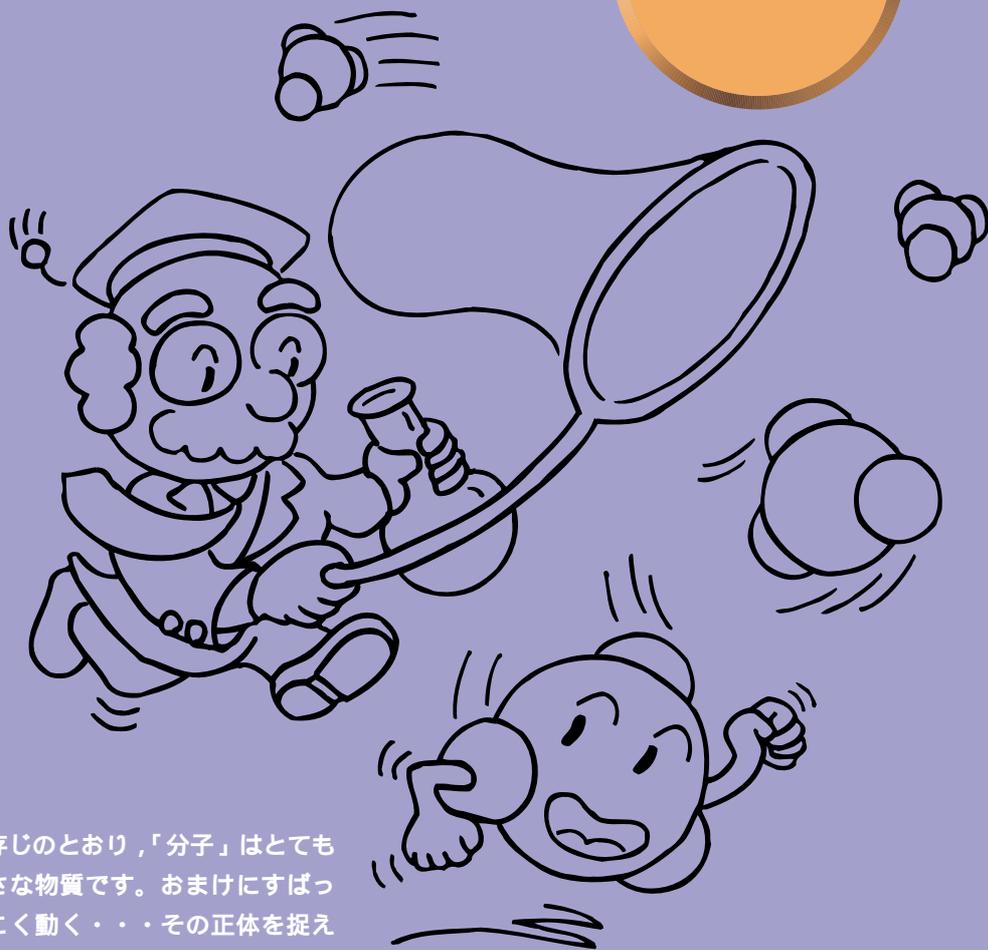
TOTAL SOLAR IRRADIANCE



資料提供：NASA

分子を捕まえる！

分子物性



ご存じのとおり、「分子」はとても小さな物質です。おまけにすばしこく動く・・・その正体を捉えるにはとてもやっかいな相手です。しかし、科学者も負けてはいませんでした。

さまざまな工夫を凝らし、分子を「捕まえる」ことに成功しました。科学者がこしらえた「仕掛け」とはどんなものなのでしょう？

化学

分子の反応過程を追う

分子が吸収したり，放出したりする光の波長を調べる（分光する）ことで，分子の検出，分子構造の決定などができます。またレーザーなどの技術的進歩によって，化学反応が進行する最中の原子や分子の動きを，実時間（1/1兆秒の時間分解能）で追えるようになりました。

その結果，「分子が変形し結合を組み替えて生成物を生み出していく」反応の過程が，詳細に明らかになりつつあります。

特異な構造の分子を創る

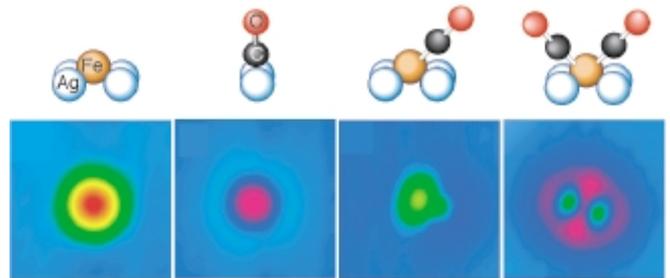
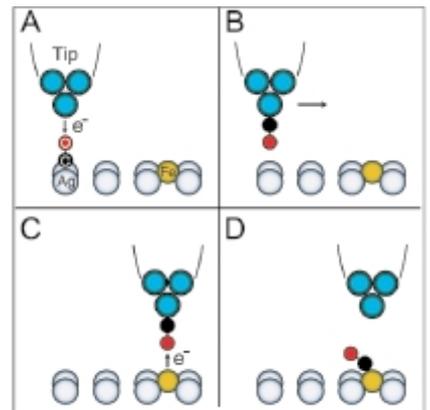
高電圧で放電したプラズマ中には通常は存在しない様々な分子ができます。たとえば水素分子とメタンの混合ガスを放電すると，正電荷を帯びたイオン分子が多数生成します。その中には CH_5^+ という古典的には考えられない分子も存在することが，吸収される光の波長の解析から明らかにされています。このように通常安定には存在しない分子の構造やエネルギー状態を明らかにするうえで分光学は威力を発揮します。その成果は，宇宙空間に存在する多様な分子の同定に役立っています。



水素ガスの放電

原子・分子一つ一つの制御

原子・分子を一つ一つ操作して，望みの物質を作り上げることは可能でしょうか？ そのような試みが今まさに始まっています。例えば，銀表面上に吸着した一酸化炭素分子を一つずつ動かして，別の場所にある鉄原子と反応させることに成功しました。生成した FeCO 分子や $\text{Fe}(\text{CO})_2$ 分子は，走査トンネル顕微鏡によって識別し，構造を決定することができます。



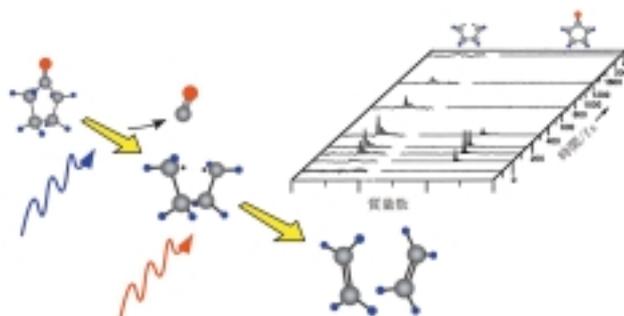
走査トンネル顕微鏡で得られる画像

分子の動きを直接見る

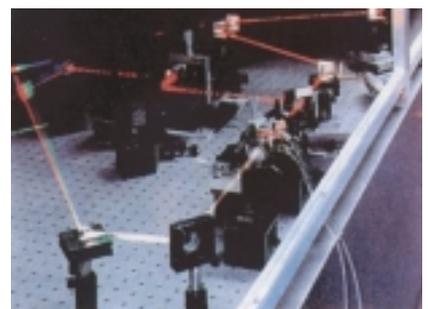
最新の超高速レーザー技術を用いると，化学反応の途中の分子の動きをリアルタイムで追跡することができます。たとえば，環状の有機化合物

$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}$ が開裂して，2つの C_2H_4 （エチレン）と CO が生成する反応では，10兆分の1秒以下のパルス幅のレーザー光を用いることで，まず CO がはずれて

不安定な中間体の C_4H_8 が生成し，引き続きエチレンへと解離していく様子がリアルタイムで観測できる様になりました。



環状の有機化合物 $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}$ が開裂して，2つの C_2H_4 （エチレン）と CO が生成する反応の様子



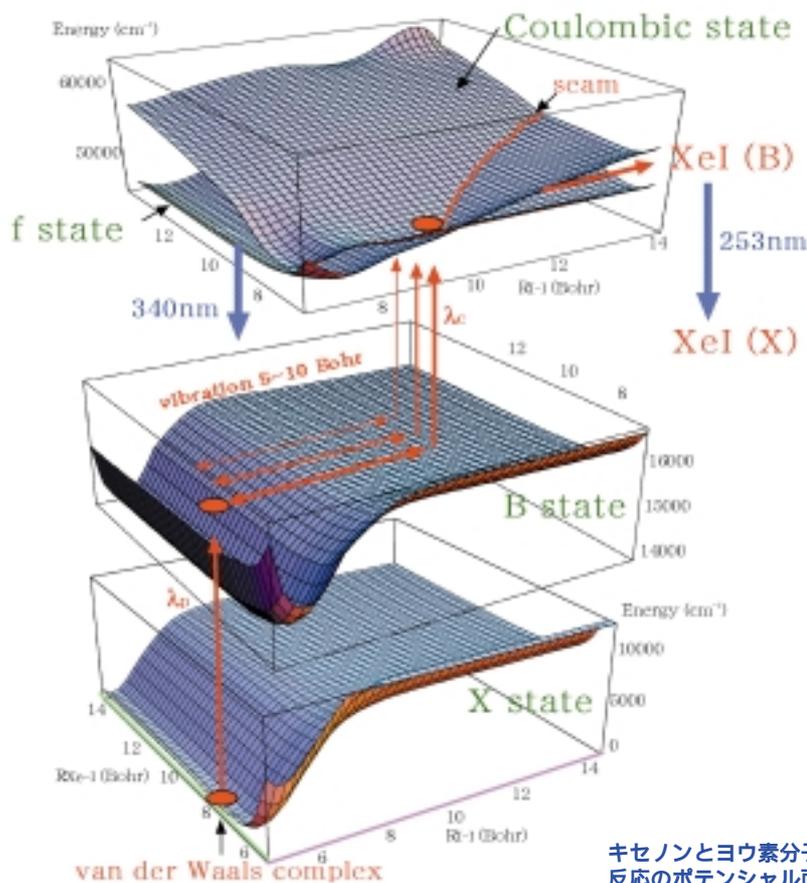
超高速レーザーシステム

コンピュータで分子を見る

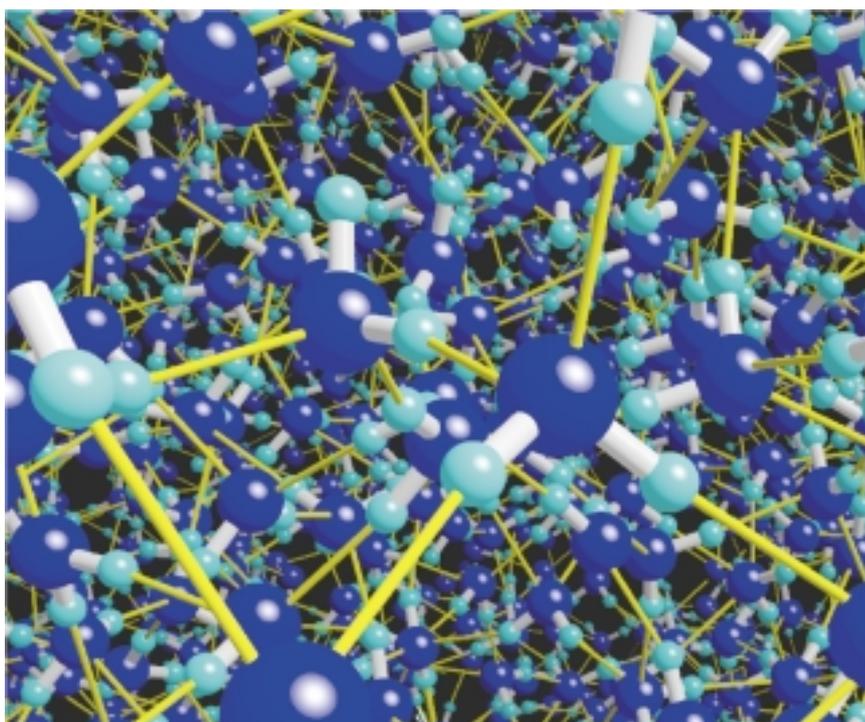
分子が形を変える化学反応は、身の回りにも多く見られます。最近では、こうした動きが理論的計算によって直接「見える」ようになってきています。

反応動力学

化学反応の途中では実際に何が起きているのか？それを実験でつかまえることは一般に非常に難しく、理論計算が特に必要とされる問題です。この図はその一例となるポテンシャル・エネルギー面を示します。これは現代の理論化学計算から求められました。キセノンXeとヨウ素分子I₂からなるクラスターが紫外線を吸収すると、電子励起状態に上がり、最後にXeIとIに分解していく過程では、ポテンシャル面の交差を通過することがわかります。



キセノンとヨウ素分子の反応のポテンシャル面



コンピュータで得られた水の水素結合ネットワーク

水

図はコンピュータで得られた水の水素結合ネットワークを示します。酸素原子（図では青色の球で表現）と2個の水素原子（水色の球）からなる水分子は、水素結合と呼ばれる弱い相互作用（図では黄色の細い線で表現）によって相互に結びつき、3次元的なネットワークを形成しています。この水素結合ネットワークは、4度Cで体積が最小になるといった水特有の性質や、雪の美しい結晶構造の根源です。また、生体内で水素イオンを輸送する経路となるなど、生物が生きていく上で重要な機能を担っています。コンピュータを用いた分子動力学計算により、こうした分子の動きが、一個一個明らかにされています。



分子をデザインする

分子創製

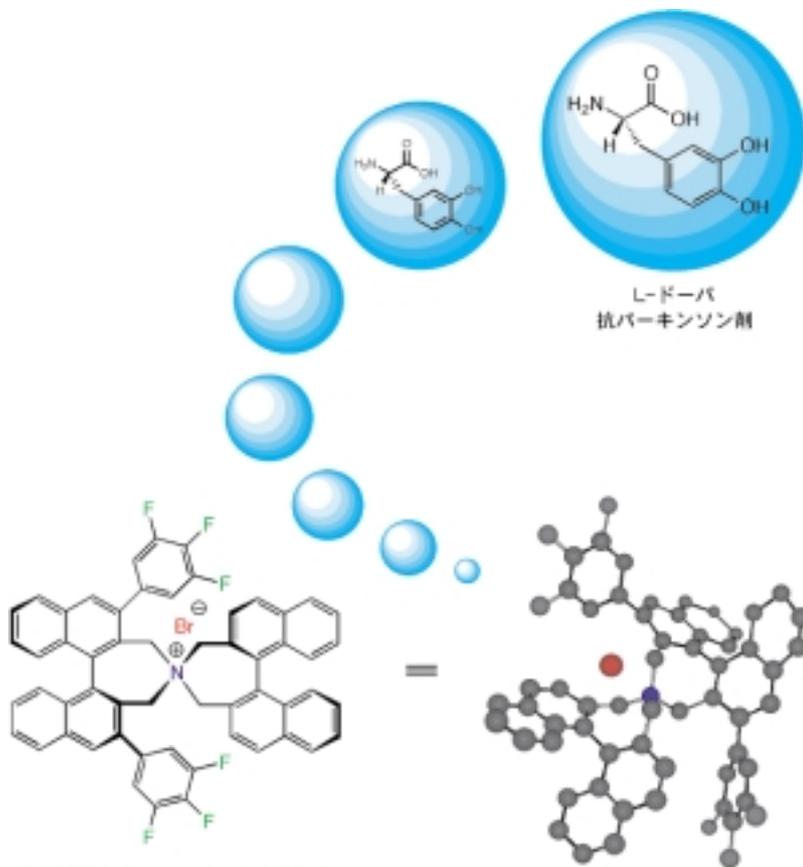
分子のしくみを知れば、こんどは分子を「組み立てる」ことが可能になります。さらには今までにない分子を生み出すことも可能です。その「デザインテクニック」は私たちの生活を一変させる可能性を秘めているといえます。

機能を持つ新しい分子を創りだす

原子の組み合わせによって作り上げられる分子の数は無限です。化学者はこれまで、自然界に存在する分子をヒントにして、特異的機能を発現するような分子を数多く生み出してきました。幾度ものフィードバックを経ながら、高機能性新規分子の創製へむけた研究者の挑戦は続きます。

グリーンケミストリー - 環境調和型有機合成 -

薬や調味料をはじめとして私達の生活は数多くの化学物質によって支えられています。21世紀を迎えて、それらを効率良くつくり出すためのできるだけ環境に優しい方法が強く求められ、グリーンケミストリーという考えが大切になってきています。これを実現するには、分子を自在にデザインできる化学の力が不可欠です。例えば、図中の人工アンモニウム塩[1]は金属を持たない有機化合物ですが、化学反応の際1つの分子が繰り返し仕事をして、天然型、非天然型アミノ酸を無尽蔵につくり出す力を持っています。パーキンソン病に有効な薬（L体のドーパ）を効率的に合成できるのは良い例です。将来、このようなアプローチで付加価値の高い化合物を思うままに合成できるようになることが期待されます。



光学活性な人工アンモニウム塩[1]

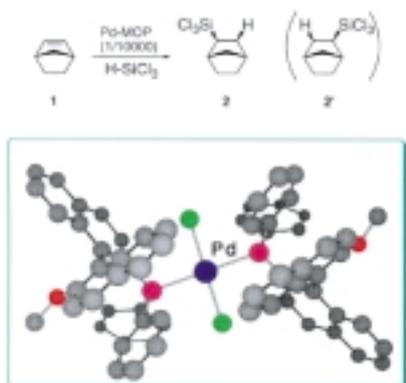
環境にやさしい人工触媒を利用した医薬品の合成

触媒的不斉合成

不斉合成とは、光学活性体を化学的に合成することです。それでは、光学活性体とは何かというと、右手と左手の関係のように同じ向きに重ねようと

しても重ならないが、鏡に映すとその一方と同じになる関係にあるもの（分子では鏡像異性体という）の一方のことをいいます。光学活性体を合成する

ためには不斉環境（簡単に言うと右手と左手を区別できる環境）が必要で、我々は触媒となるパラジウムなどの遷移金属に、図で示したようなMOPという不斉分子を配位させて実現させました。1から2の不斉合成ではこの不斉触媒を原料のわずか1/10000加えるだけで、ほぼ純粋な2を作り出すことに成功しました。



Pd-MOP 有機金属不斉触媒



左利きcatは、一方の面からの攻撃だけを許可します。

機能性材料

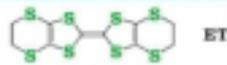
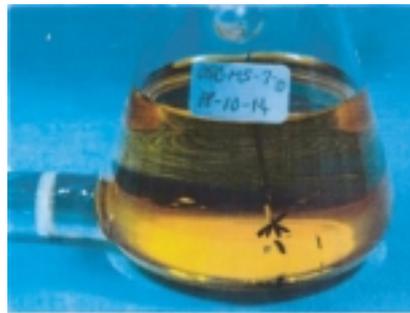
原子・分子は、集合体(結晶・薄膜・アモルファス)を形成すると、溶液や気相でのそれとは大きく異なる性質を示します。集合体の性質を理解し、その源を探る研究は、科学そのものとして重要であるばかりではなく、今、急展開が求められているナノテクノロジーや機能性材料の応用研究の基礎を与えます。

電気を流す有機化合物

砂糖やプラスチックに代表される有機化合物は、一般には電気絶縁体です。しかし、他の分子やイオンと組合せ、錯体を作らせることにより、金属と同じ様に電気を流す物質を作ることができます。錯体の構成成分を選び、望ましい結晶構造を取らせることにより、低温で電気抵抗がゼロとなる超伝導体を作成することも可能です。このような超伝導体は、一般に電解法と呼ばれる一種の電気分解により作成されます(写真)。

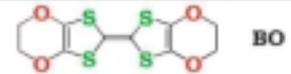
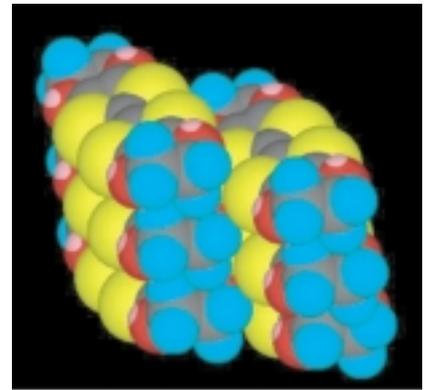
また、分子自身が、自分と同種の分子を認識し、錯体の中で独特な結晶構造を作るものもあります。BOは、そのような性質を持ち、金属的な電気伝導性を示す錯体を与える性質の強い分子です。その錯体を、高分子膜に組み込

み、透明でかつ金属と同じ導電性を示すフィルムを作ることができます(模式図)。



ET分子を使った超伝導体の結晶成長

白金電極の先端付近に見える黒い結晶が超伝導体。この錯体の場合、約10 K以下で超伝導状態(電気抵抗がゼロ)となる。



透明金属薄膜中でのBO分子の充填様式

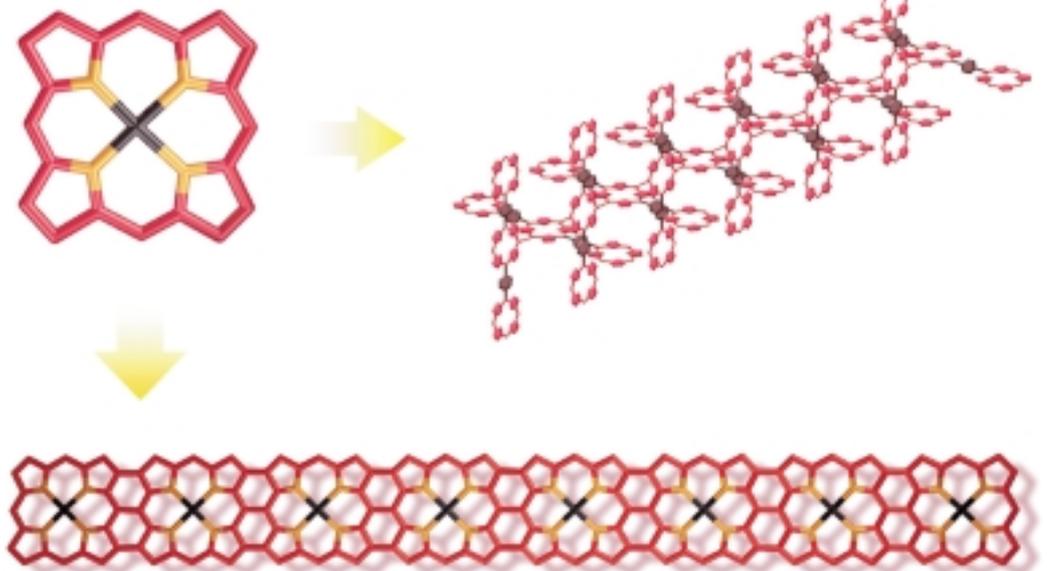
光機能性分子

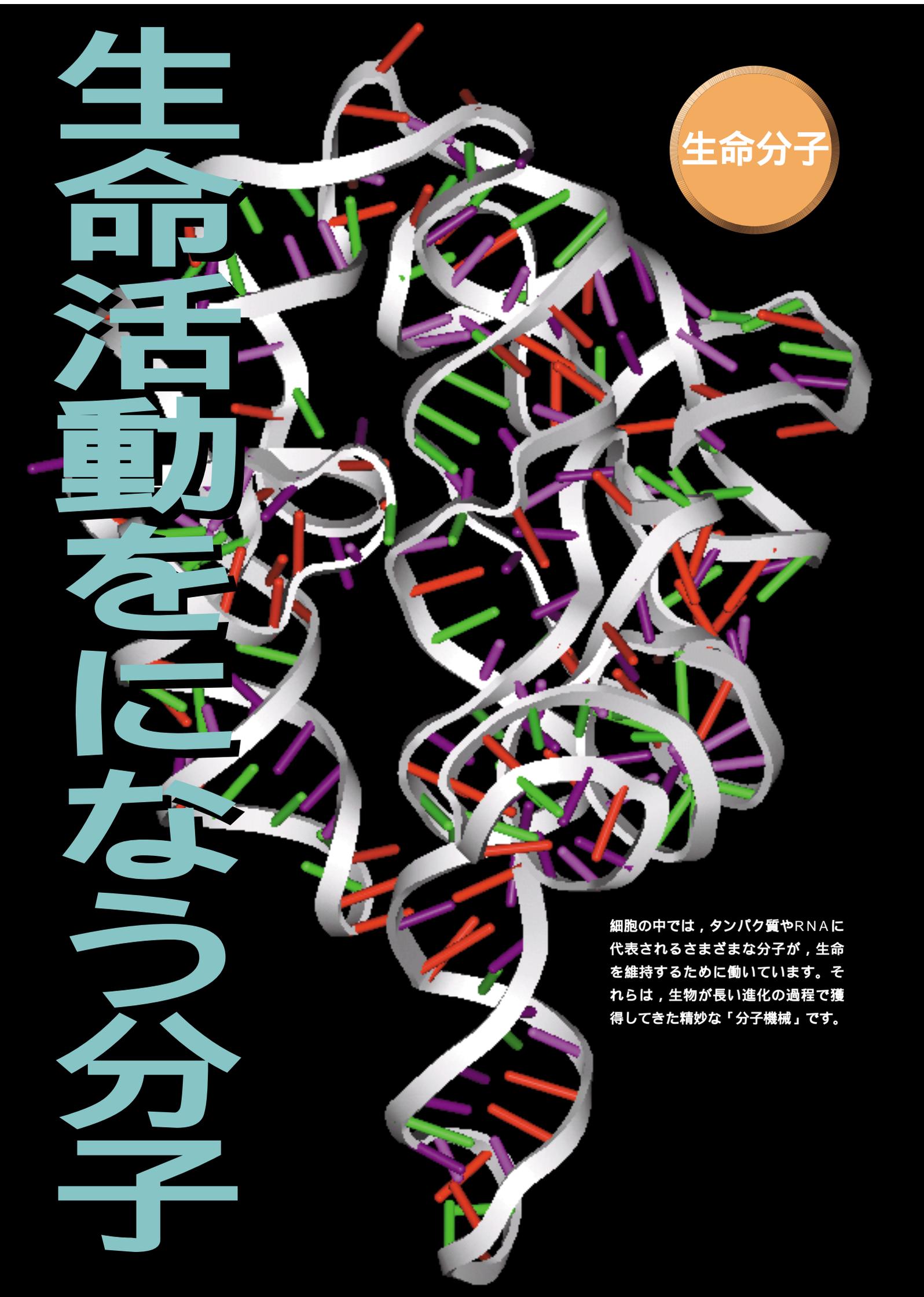
植物の光合成や生体内の電子伝達を担っている重要な色素化合物にポルフィリンと呼ばれる分子があります。このポルフィリンをつないだり、変形したりすることで、全く新しい機能をもつ

分子に変換できることが明らかになりつつあります。例えば、分子を平面状にどんどんつないでいくと分子ワイヤーに、3次元に組み上げると光捕集アンテナ分子になります。いろいろな金

属を自由自在に取り込む能力もあり、ポルフィリンは光機能性分子として、大きな期待がもたれています。

ポルフィリンから合成されるワイヤー分子やアンテナ分子





生命分子

生命活動を司る分子

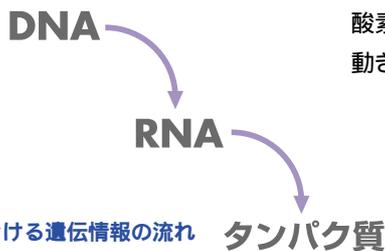
細胞の中では、タンパク質やRNAに代表されるさまざまな分子が、生命を維持するために働いています。それらは、生物が長い進化の過程で獲得してきた精妙な「分子機械」です。

タンパク質のメカニズム

生命活動は、生体を構成しているタンパク質の化学反応によって維持されています。最近では、こうした動きを理解するために、レーザーを利用した様々な分光法が開発され、また理論的計算によってもダイナミクスが「見える」ようになってきています。

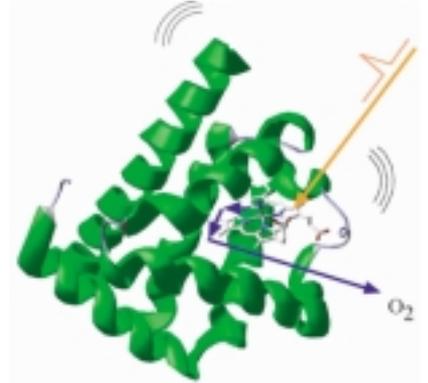
タンパク質の役割とは

DNAの上にかかれた遺伝情報をもとにして、細胞の中でRNAとタンパク質がつくられます。RNAには、タンパク質を合成する際の遺伝情報の受け渡しに関わる分子のほか、それ自体で酵素反応をおこなったり、他のタンパク質の機能を調節したりする「機能性RNA」もあります。タンパク質は、細胞内でさまざまな反応をおこない、また、細胞の機能を調節する働きをしています。RNAやタンパク質は、生命活動の維持において中心的な役割を演じています。



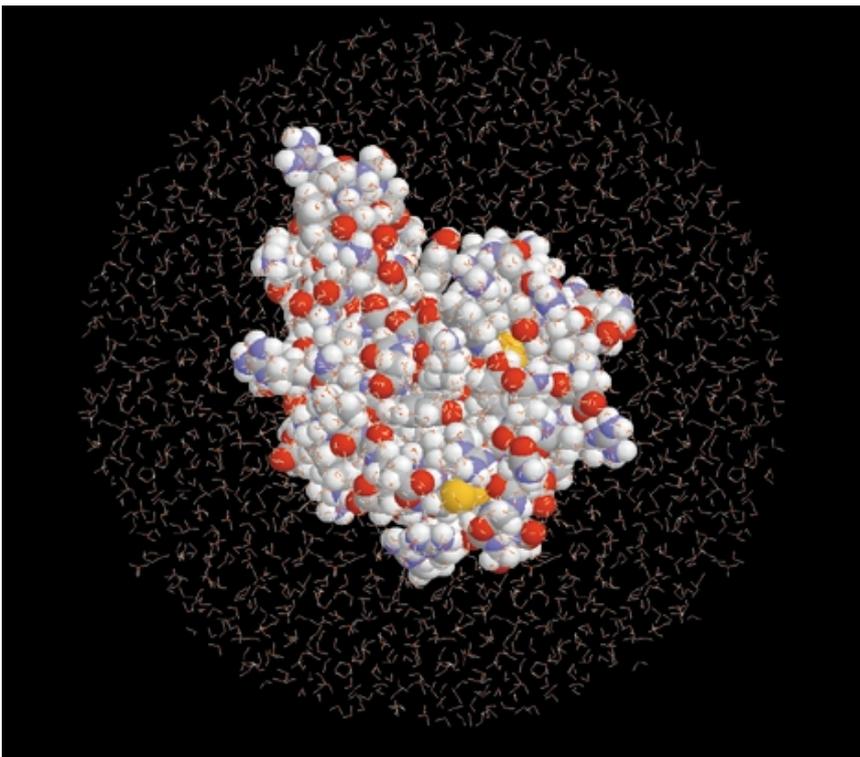
タンパク質の動きを直接見る

生体タンパク質は、あるきっかけによりタンパク質全体の構造が変化し、機能を果たすようにできています。多くの原子が、ある目的のためにいっせいに動く、その動きのメカニズムはどうなっているのでしょうか。非常に短い時間（フェムト秒：100兆分の1秒）から長い時間（1000秒）のオーダーの動きを観測することで、初めて原子を動かす機構が明らかになります。例えば生体内で酸素を蓄える働きをするミオグロビンタンパクの構造変化を明らかにするために、パルスレーザー光で酸素を解離させ、その後のタンパクの動きが調べられています。



パルスレーザー光でミオグロビンタンパクの酸素を解離させたときのタンパクの構造変化

化学



分子シミュレーションで得られたリゾチームとその周りの水分子の配置

蛋白質の分子シミュレーション

分子シミュレーションは、分子や分子の集合体の振る舞いをコンピュータ上で再現する方法です。実験だけでは知ることが難しい分子が機能を発揮する際の詳細なメカニズムを調べることができます。

タンパク質を結晶化して、これにX線を照射し蛋白質のような巨大分子の振る舞いを再現するためには、蛋白質分子とその周りにある水分子も含めた数万から数百万の原子から構成される系をコンピュータ上で再現します。原子間の相互作用エネルギーをすべて考慮することで、各原子がどのように動いているのかを観ることができます。この図には実際の分子シミュレーションに用いたリゾチームという蛋白質とその周りの水分子が示してあります。

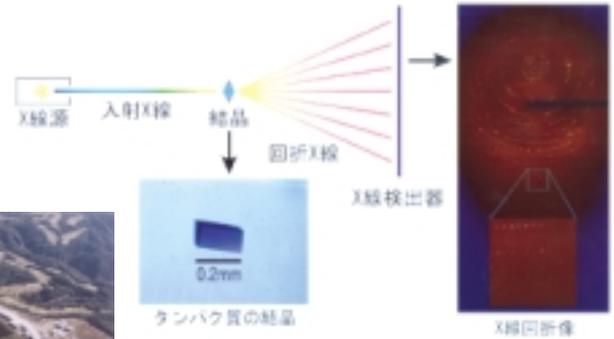
タンパク質の立体構造を知る

生体内の化学反応をつかさどるタンパク質の立体構造を知ることによって、その生物学的な機能を理解することができます。

X線結晶解析によるタンパク質の立体構造の決定

タンパク質を結晶化して、これにX線を照射し結晶からの回折を測定することで、結晶を作っているタンパク質の3次元立体構造を原子レベルで決定することができます。タンパク質はほとんどの生体内化学反応を触媒していますが、折りたたまれて立体構造を形成することで初めてその機能が発現されます。したがって、タンパク質の機能を理解するためには立体構造を知ることが不可欠です。X線結晶解析の方法は、結晶さえできればどんなに大きなタンパク質分子（あるいはその複合体）でも、原子レベルでの立体構造を知ることができます。X線には極めて

輝度の高いシンクロトロン放射光が用いられます。シンクロトロン放射光では、X線強度が非常に大きいのみならず、その測定に用いる波長も自由に選ぶことができ、このことは結晶構造の解析の手法に用いられています。



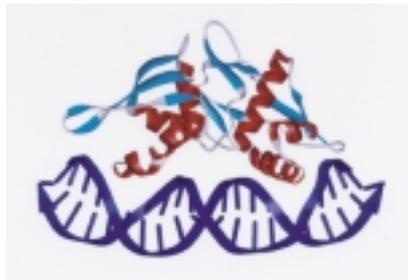
左：シンクロトロン放射光施設 Spring-8（兵庫県西播磨）

写真提供：（財）高輝度光科学研究センター

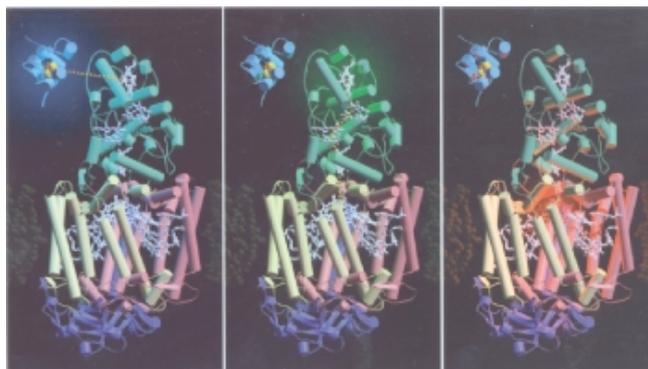
DNAの複製を開始するタンパク質とDNAとの複合体の立体構造

DNAの複製が起こる時、これを制御することのためにもタンパク質が使われています。DNAが複製を開始するときにタンパク質がDNAに結合して、複製を開始するシグナルを与えます。この図は大腸菌の、あるプラスミドの複製開始を制御するタンパク質とDNAとの複合体の立体構造で、タンパク質（上部）の2箇所（ヘリックス部分）がDNA（下部）の2つの大きな溝にそれぞれ結合していることがわかります。このようにタンパク質がDNAを認識す

ることで、複製を開始するシグナルを与えています。



DNA複製開始タンパク質とDNAとの複合体の立体構造



光合成の光エネルギー変換反応を行う膜タンパク質

膜タンパク質は生体膜（脂質二重層）に埋もれて存在するタンパク質で、生体膜という反応の場の上で、多くの重要な生物学的な働きを担っています。光合成反応中心複合体は最初に立体構造が解明された膜タンパク質で、光合成反応において、吸収した光エネルギーを化学的なエネルギーに変換するという役目を担っています。生物の生命維持に必須である光合成の中で、最も重要な最初のステップの鍵を握っているタンパク質です。光合成反応中心の立体構造からは、その中で起こる電子伝達反応において、電子が複合体の中をどのように伝わっていくかが手に取るように理解できます。

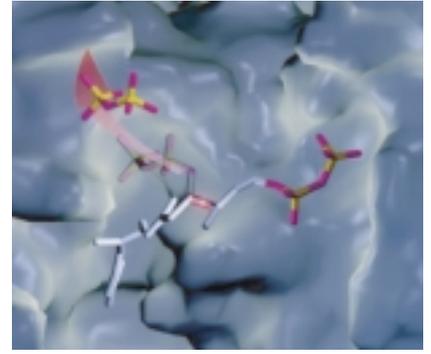
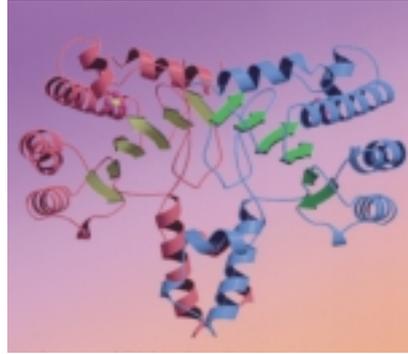
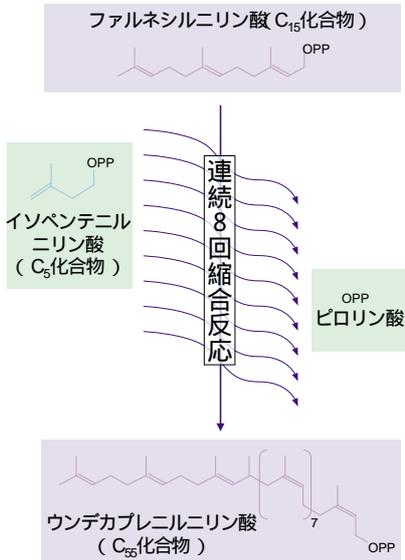
光エネルギーを化学エネルギーに変換する光合成反応中心複合体での電子伝達反応のようす

酵素が触媒する化学反応の解明

ウンデカプレニルニリン酸合成酵素は、細胞壁の合成などに関与する生命維持に必須の酵素タンパク質です。この酵素はイソプレノイドの一種であるファルネシルニリン酸（炭素15個の化合物）に、炭素が5個のイソプレンを次々と連続的に8回付加させて、炭素

55個のウンデカプレニルニリン酸を合成します。その立体構造が決定され、酵素は二量体として働いており、酵素の表面にはリン酸基を結合する部分と長い疎水性の炭素鎖を認識する窪んだ部分があることが分かりました。酵素の表面で基質と生成物をうまく反応さ

せるのに都合よい構造をつくっているわけです。そのような酵素の表面の窪みで、基質分子がどのように反応するかということも酵素の立体構造から理解することができます。

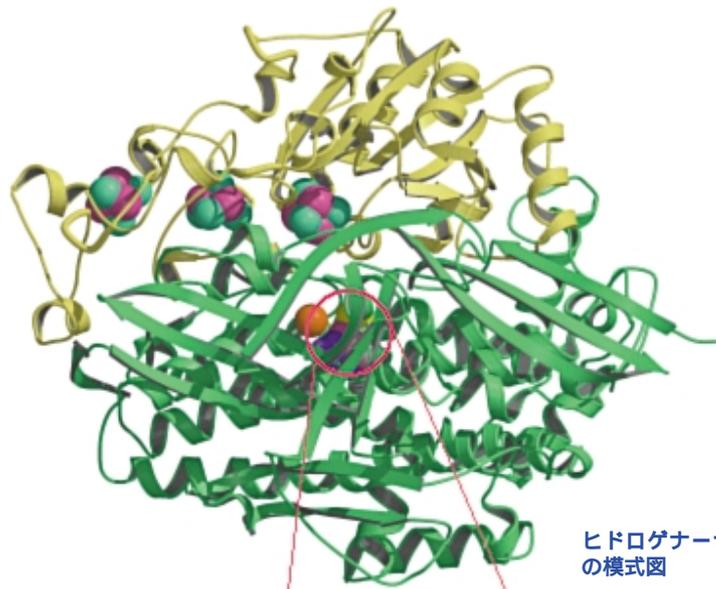


左：ウンデカプレニルニリン酸合成酵素が触媒する反応
 右上：ウンデカプレニルニリン酸合成酵素の立体構造
 右下：酵素の分子表面で進行中の触媒反応のようす

炭素15個の出発物質 + (炭素5個の化合物 × 8回反応)
 = 炭素55個の反応生成物

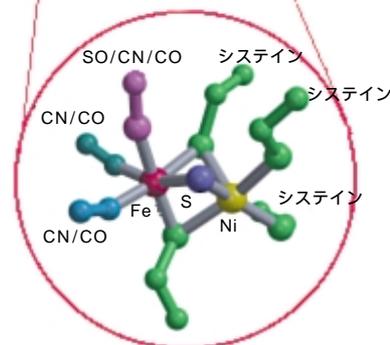
水素を合成したり分解したりする酵素・ヒドロゲナーゼ

多くの微生物は、水素を合成したり分解したりする酵素・ヒドロゲナーゼというタンパク質を持っています。ヒドロゲナーゼは、 $(\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-)$ の反応を触媒し、細胞の中のプロトン濃度を調節する働きをしています。ヒドロゲナーゼの触媒としての働きをその化学構造から解明できれば、水素をもっと効率良く合成したりすることが可能となります。つまり、将来、水素をエネルギー源として利用できるようになるかもしれません。図で示したように、ヒドロゲナーゼはNiやFe原子（酵素反応部位）を持ち、そこで上に示した反応を触媒します。



ヒドロゲナーゼ分子全体構造の模式図

酵素反応部位の拡大図 (Ni-Feを含む金属錯体)

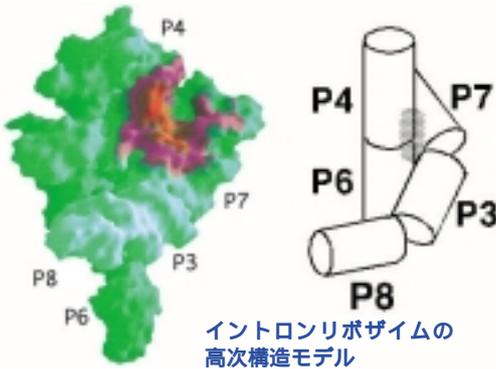


機能性RNA

RNAは、細胞の中で遺伝情報を伝える働きをしていることが古くから知られていましたが、それ以外にも、さまざまな働きをしているRNAが存在します。それら機能性RNAの研究をもとにして、自然界には無い、新しい機能性RNAを創り出すことも可能になりつつあります。

リボザイム (RNA酵素)

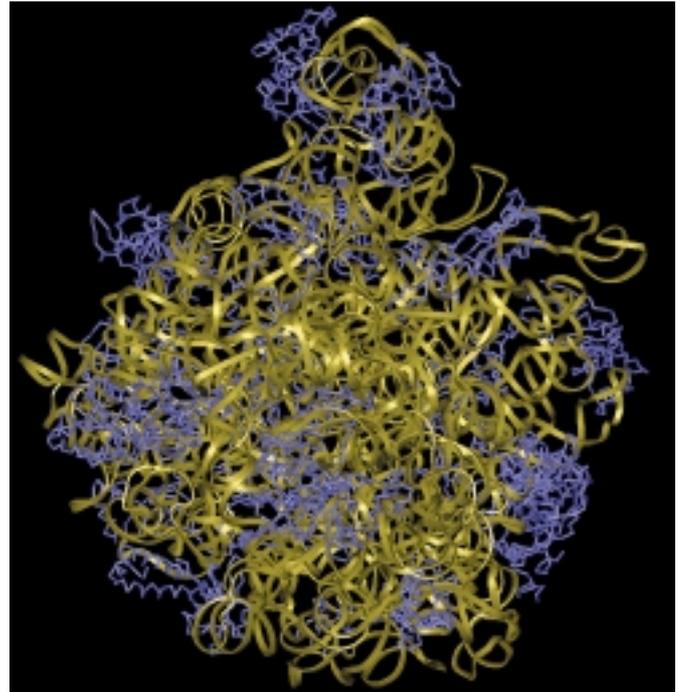
約20年前に酵素活性を持つRNA (リボザイム) が発見されて以来、RNAは細胞内で情報担体としての働き以外にも多様な働きをしていることがわかってきました。図は、リボザイムの中で現在もっとも研究が進んでいるテトラヒメナのイントロン・リボザイムの活性中心の構造です。RNAの二重らせんがいろいろな相互作用で折り畳まれ、2本の二重らせんの間に形成された溝 (クレフト) が活性中心を形成しています。



タンパク質合成とRNA

タンパク質合成の際にも、リボゾームRNAが触媒として働いていることがわかっています。RNAは、遺伝情報を担うことができると同時に、タンパク質合成でも中心的な役割を果たしていることから、地球上に生命が誕生した際には、

RNAが大きな役割を果たしたものと考えられています。



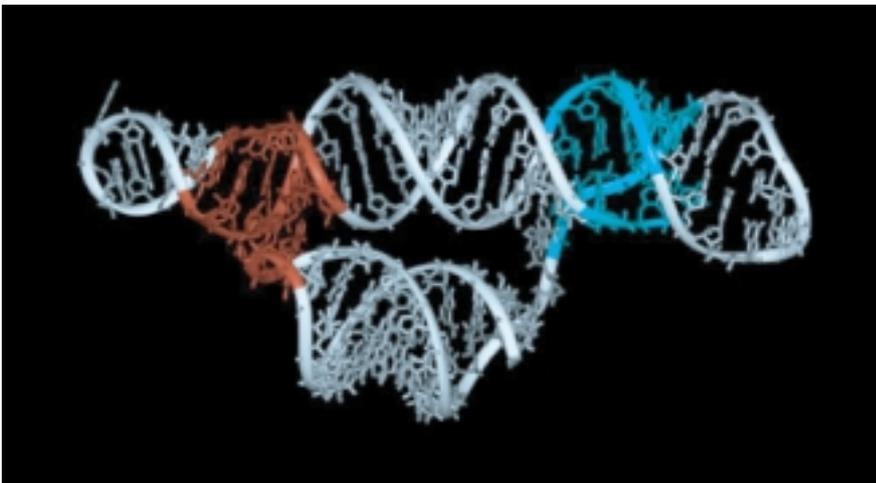
リボゾーム

機能性RNAをデザインする

自然界に存在するRNA分子の構造の研究から、RNAの高次構造の形成に関わるいろいろな構造単位が明らかにな

りました。それを利用して、希望する高次構造を持ったRNA分子を人工的に設計することができるようになりつつ

あります。図は、2本の二重らせんが近接するように設計したRNAの一例です。中央の溝の部分の塩基配列を改変することによって、この部分で触媒反応を起こさせることができます。このように、RNAは自由に構造を設計することができるうえに、そのRNA上で特異的な触媒反応を起こさせたり、細胞内の特定の分子を識別させたりすることができ、はかりしれない応用の可能性を秘めた素材です。



人工的に設計したRNA

2つの近接した二重らせんの間で、触媒反応を起こさせることができます。

生命の本質に迫る

遺伝子

「お父さん似」「お母さん似」
これは偶然ではありません。
お父さん、お母さんの遺伝
情報、いわゆる「プログラ
ム」を受け継ぐことによっ
て起こるのです。
「情報」とか「プログラム」
とかまるでコンピュータみ
たいだと思いませんか？
その通り、まさに生物はミ
クロの要素で構成された緻
密なシステムなのです。

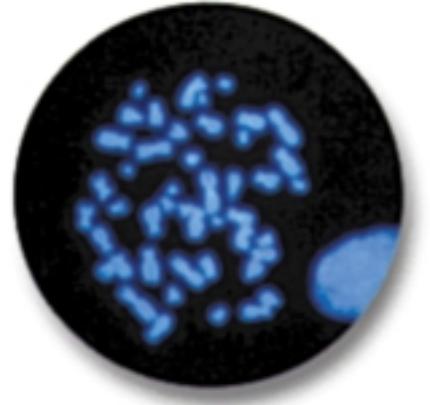
ゲノムの謎を解く

それぞれの生物に特有な遺伝子に書き込まれた1セットの遺伝情報、これを「ゲノム(GENOME)」と呼びます。この「情報」を読み解くことが生命現象や生物の進化を解明するカギとされています。

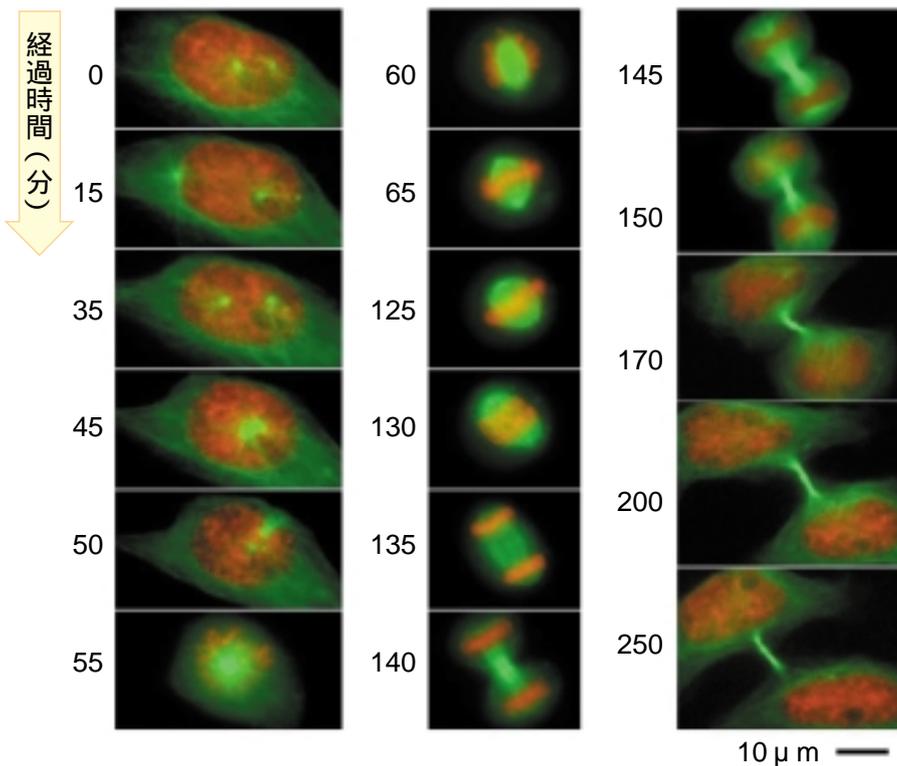
ゲノム・サイエンス

生物はそれぞれの種に固有な遺伝子の1セットを親からもらい、そこに書き込まれた遺伝情報に従って自身を作り上げます。この1セットの遺伝情報をゲノムと呼び、その実体はDNA(デオキシリボ核酸)という有機物質であることがわかっています。DNAはA, G, C, Tで表される4種類の塩基が2本のらせん状に結合したもので、この配列が遺伝子情報となります。近年、一つの生命現象には驚くほど多くの遺伝子が関わり、一つの遺伝子は複数の現

象に関わっていることがわかってきました。遺伝子ではなく、ゲノム全体を調べる必要性が高まってきたのです。すでにヒトのゲノム30億塩基対が解読されており、遺伝子機能、遺伝子産物、生命機能、健康や病気との関連など、さまざまな研究がはじまっています。



ゲノムの本体である染色体の蛍光顕微鏡写真



現実の細胞の中の微細管

生きているヒト細胞分裂 - 染色体(赤)と微細管(緑)
染色体はDNA 特異的蛍光色素 Hoechst 33342 で染色し、微細管はローダミン蛍光色素でラベルしたチューブリンタンパク質を細胞に顕微注入して染色した。同じ細胞の5分ごとの変化を追跡、記録した。資料提供: 通信総合研究所

生きている細胞を見る

細胞が生きていくためには、DNAに書かれている遺伝情報だけではなく、細胞膜と細胞内の骨格としてはたらく微細管のダイナミックな変化が必要です。光学顕微鏡技術の進歩によって、その微細な世界の動きを直接見るできるようになりました。微細管はチューブリンというタンパク質がらせん状に重合したもので、必要に応じて形成され、消滅します。この生成と解体がエネルギーの高低の変化を利用した動的不安定性という巧妙な仕組みであることがわかってきました。

生物

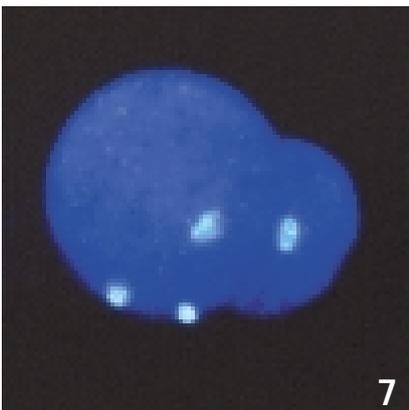
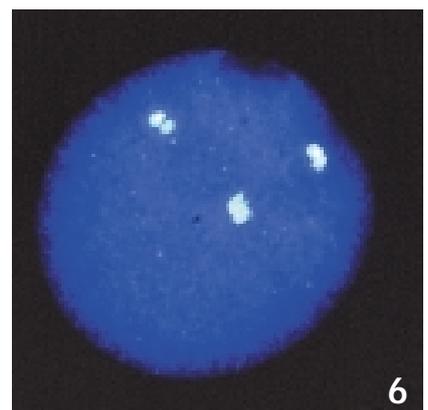
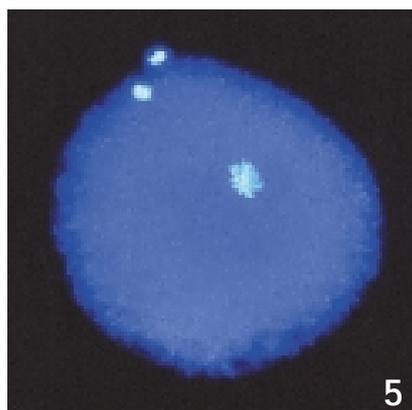
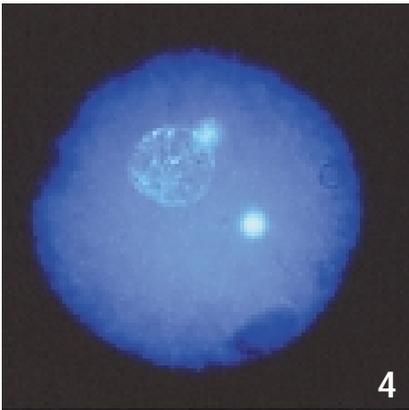
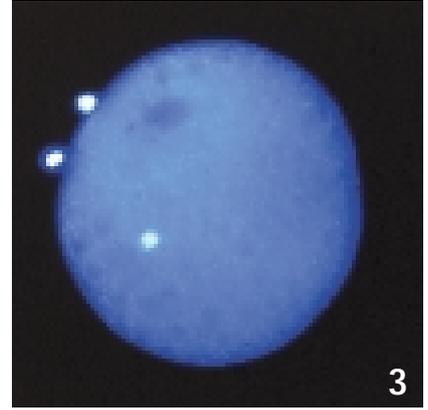
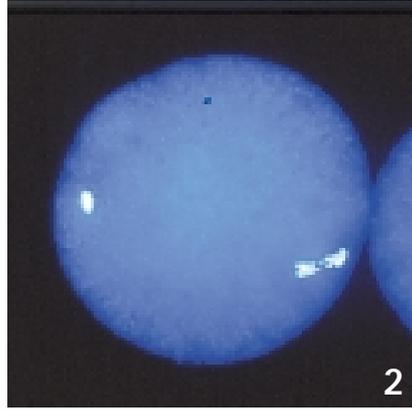
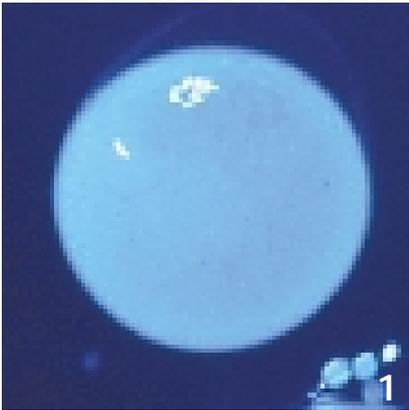
生物

ゲノム・リプログラミングと自然界のクローン

遺伝子組成が等しい細胞や生物の集団をクローンといいます。未受精卵への体細胞核の移植技術や細胞融合を用いてクローン動物をつくり出したり、ゲノムを再プログラム化することができるようになりました。この機構は細胞を若返らせながら生命をつなぐものと考えられています。また、自然

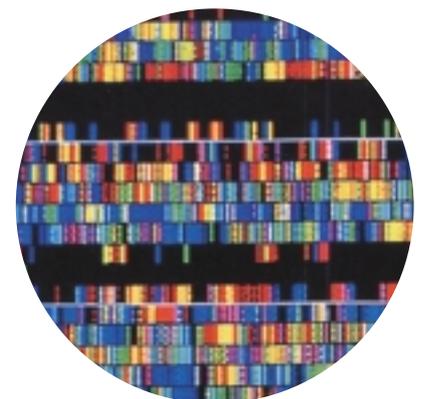
界で無性生殖をするプラナリアやホヤなどはみなクローンとして増殖していますが、両性生殖をする動物にもクローンで増えるものがあることがわかってきました。二枚貝のマシジミは、雌雄同体で卵子と精子の両方をつくって自家受精しますが、受精後まもなく卵由来のゲノムが捨てられて精子のゲノ

ムだけで個体発生が進行します。また、日本の河川にいるフナやドジョウにはメスのゲノムだけで増える種がみつかっています。なぜ、このような現象が自然界に存在するのか、クローン技術の安全性や成果を問うためにも重要な研究課題と言えるでしょう。



雄性発生するマシジミの卵

マシジミの発生は、精子のゲノムだけで進行する。1) 受精直後の卵。卵の核は第一減数分裂の中期(2つにわかれ始めたところ)。鎌形に見えるのが精子の核。精子の核は減数分裂を省略し、染色体数は体細胞と同じ。2) 第一分裂後期(卵の染色体が2つにわかれたところ)。3) 卵の核は2つとも第一極体として放出される(通常の両性生殖する動物では、卵内に核が残り、精子由来の核と合体する)。卵内に見られるのは精子核が変化した雄性前核。4) 雄性前核は次第に大きくなり、前核内に糸状の染色体がみられるようになる。5) 雄性前核由来の染色体は赤道板上にならぶ(第一卵割中期)。6) 第一卵割後期(染色体が左右に分離)7) 二細胞期(二枚貝の第一卵割は不等分裂。左右の細胞の大きさが異なる)。放出された卵の核は2個の極体として卵の動物極(上側)に付着しており、発生には関与しない。以後精子由来の遺伝情報のみで発生が進行する。(写真: 三重大学生物資源学部)



ヒトのDNAパターン

生物の形と起源

「百花繚乱」の例えに使われるように、植物はその種類ごとに異なるさまざまな花を咲かせます。ところで、たとえどんな花であろうと、その構成は必ず外側から「がく」「花弁」「雄しべ」「雌しべ」の順になってますよね？その謎に迫ってみましょう。

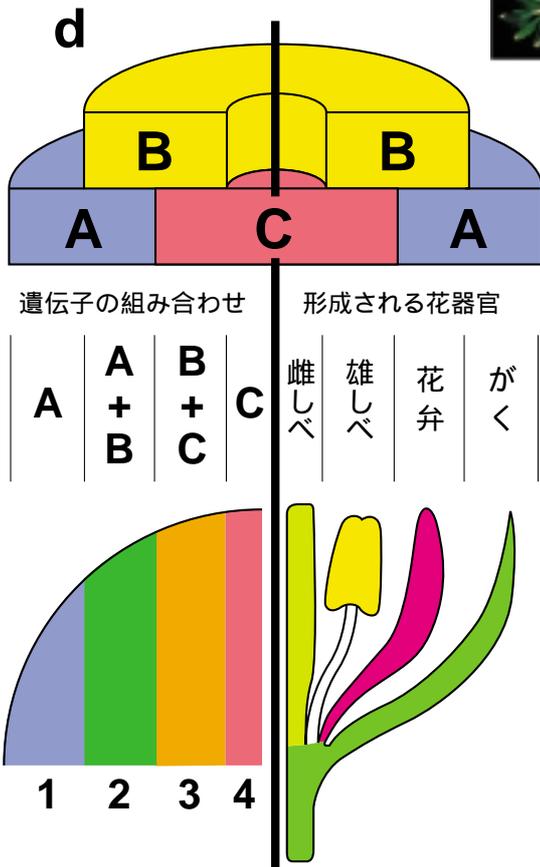
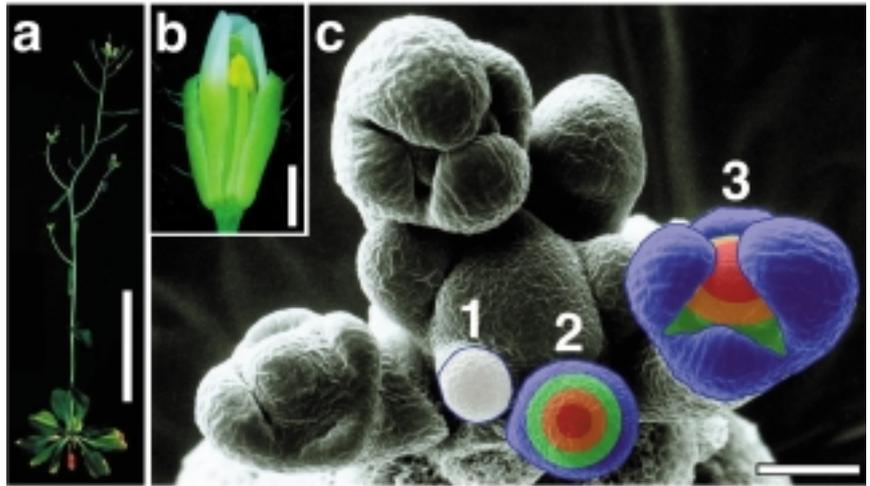
花はどのようにしてつくられるか

八重咲きの花は2000年以上も昔から人々の注意をひいてきました。八重咲きの花は雄しべが花弁（花びら）に転換してしまうことにより生じますが、このように相同な器官の間で転換が起こることをホメオシスと呼び、ホメオシスを引き起こすような突然変異をホメオティック変異と呼びます。花がどのようにつくられるかというしくみは、八重咲きを含む様々なホメオティック変異を研究することによって明らかになってきました。

例えば、花を構成する4種類の器官（がく、花弁、雄しべ、雌しべ）の並び方は、外側から内側に向かって、がく、花弁、雄しべ、雌しべの順になっていて、これは植物の種類によらず不変です。ホメオティック変異の研究から、この並び方は、A, B, Cという3つ

のグループの遺伝子のはたらきの組み合わせによって決められていることが明らかになりました（ABCモデル）。Aグループの遺伝子とCグループの遺伝子は互いのはたらきを抑え合い、Cグループの遺伝子の機能が失われるとAグループの遺伝子が内側の2つの区画でもはたらくようになります。八重咲きの花はそのようにして生じます。

A, B, Cグループの遺伝子（MADSボックス遺伝子）の発見を期に花の起源についての研究方法は大きく変わりました。個体の発生過程で花がどのようにつくられるかについての理解が、系統発生の過程で花がどのようにして進化してきたかを理解する重要な鍵を提供しているというわけです。



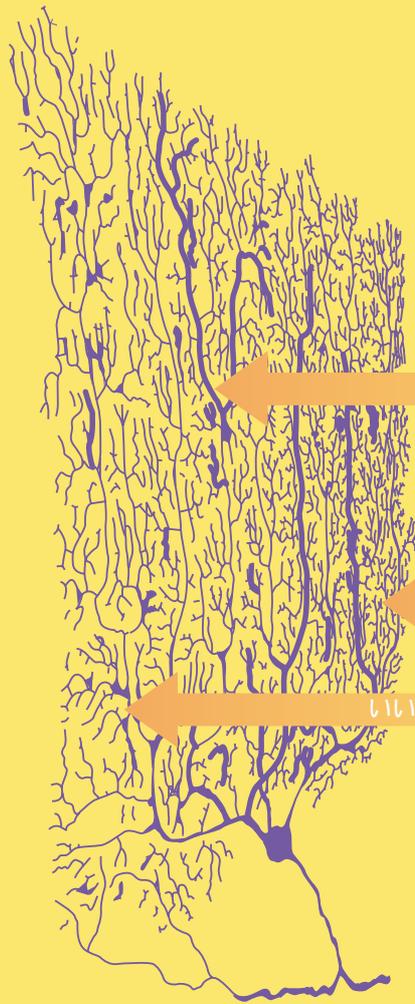
花はどのようにしてつくられるか（器官の並び方がどのように決まるか）

- 花がつくられる機構がもっともよく研究されている植物シロイヌナズナ（アブラナ科）。根を除く植物の全体像を示す（スケールは5cm）。
- シロイヌナズナの開花直前のつぼみ（スケールは0.5mm）。がくと花弁を1枚ずつ取り除いてつぼみの内部にある雄しべと雌しべが見えるようにしている。
- 花芽が盛んにつくられているシロイヌナズナの茎の先端部の走査型電子顕微鏡写真（スケールは50μm）。発生段階が異なる3つの花芽（若い順に1から3）の上に彩色を施している。1は形成されたばかりの花芽で、まだ区画分けがされていない（白で示す）。2は区画分けがされた花芽で、(d)のABCモデルの説明図の左下と同じ色で彩色している。3はさらに発生が進んだ花芽で、青色で示す一番外側の区画には4枚のがくが形成されている。
- 花の器官の並び方を説明するABCモデル。このモデルでは、形成され始めたばかりの花芽に同心のリング状に4つの区画（1～4）を想定する。Aグループの遺伝子（青色で表す）は区画1と2で、Bグループの遺伝子（黄色で表す）は区画2と3で、Cグループの遺伝子（赤色で表す）は区画3と4でそれぞれはたらくと考える（上）。はたらく遺伝子の組み合わせは4つの区画で異なり、区画1ではAグループのみ（青色で表す）、区画2ではAとBグループ（緑色で表す）、区画3ではBとCグループ（橙色で表す）、区画4ではCグループのみ（赤色で表す）がそれぞれはたらく（下右）。これらの遺伝子の組み合わせにより、区画1にはがく、区画2には花弁、区画3には雄しべ、区画4には雌しべがそれぞれ形成される（下右）。

生物

頭の中のアンテナ

高次生命現象



おいしい!

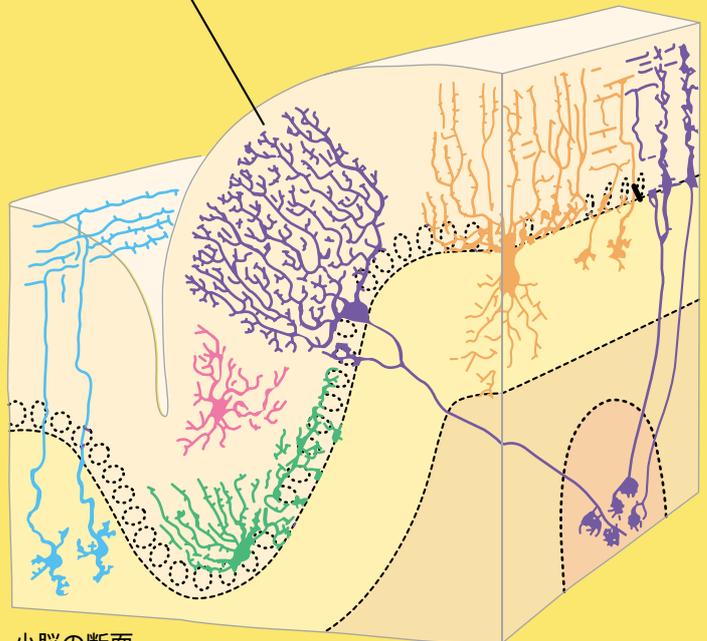
まぶしい!

熱い!

うるさい!

いい匂い!

この樹木のように複雑に枝分かれしたものが何だかわかりますか？
これは私たちの小脳の中にある「プルキンエ細胞」と呼ばれる神経細胞です。驚くことに、この複雑な形が一個の細胞なのです。
私たちの五感から得られるたくさんの情報をとらえるため、あたかも魚を捕らえる網、もしくはレーダーアンテナを想像させますね。
そしてこのアンテナは、同時に150,000の情報を得ることができる、性能をもっているといわれています。



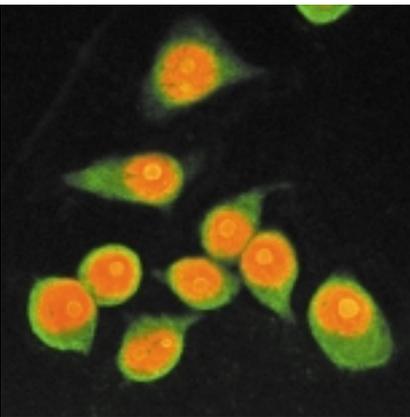
小脳の断面

高次生命現象を探る

生物の体は小さな細胞の集まりです。そしてこの「集まり」はたったひとつの細胞からの分化を出発点としています。分化した細胞は、その後手や足になるものもあれば脳になるものもあります。その違いはどこにあるのでしょうか？

細胞運命とアポトーシス

生物の個体を構成する神経細胞や白血球など特殊化した細胞は、もともと一つの受精卵に由来しています。このような細胞運命の違いを調べるために、細胞分裂によって生じた姉妹細胞が異なる運命をもつ非対称細胞分裂が注目されています。また、それぞれの細胞には遺伝的に死がプログラムされており、DNAの断裂、核の分断化などを起こして消滅することが知られています。このアポトーシスは、発生過程で器官や組織が形成されていくのに重要で、この機構に損傷を受けたために細胞死が起こらず、がん細胞が増殖する現象も知られています。アポトーシスのプログラムがどのような情報伝達によって起こるのか、どのようにして発生過程に組み込まれたのかについて、解析が行われています。

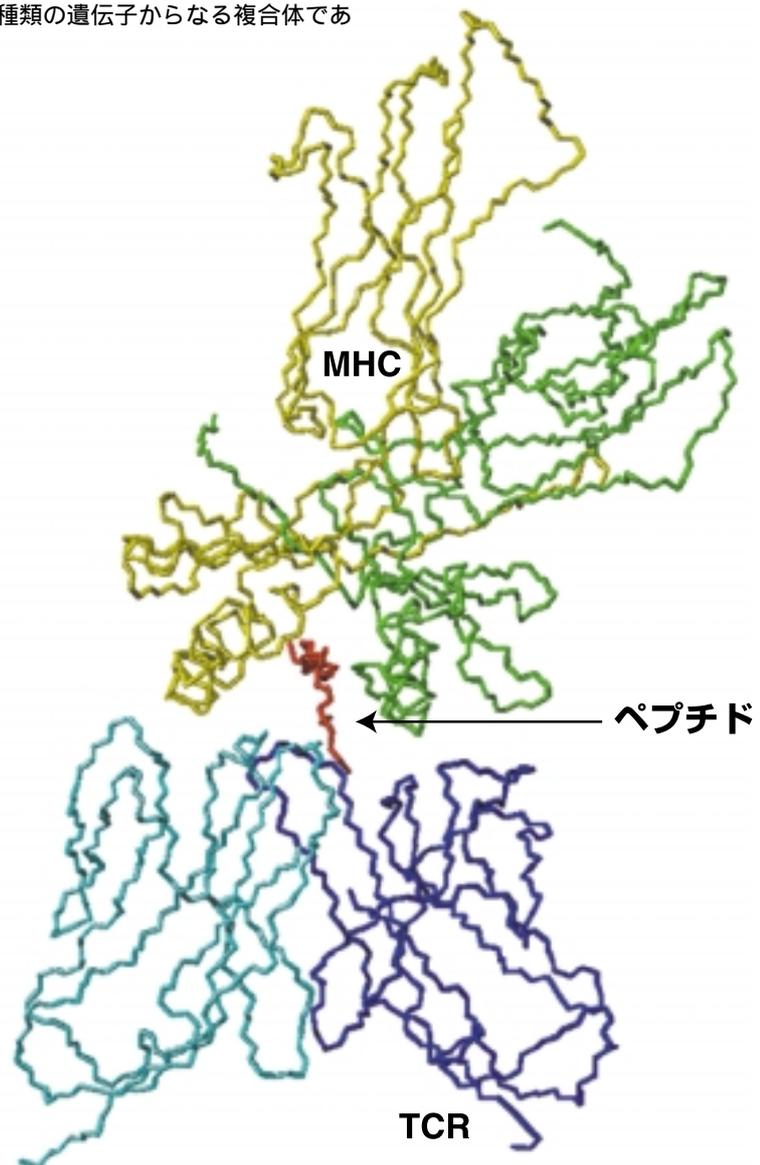


細胞膜透過性ペプチドを用いた蛍光標識タンパクの細胞内導入と核移行

免疫に見る自己と非自己

自分以外のものが体に侵入してくると、それを正確に識別して体外へ追い払う機構を免疫と呼びます。この機構が病原微生物のみを排除するのではなく、他人の血液や臓器を移植する際にも発現することがわかってきました。細胞表面にあるMHC（主要組織適合遺伝子複合体）が自己または非自己由来のタンパク質の断片（ペプチド）を細胞外に提示し、それをリンパ球の上にあるTCR（T細胞抗原レセプター）が認識するのです。MHC抗原は非常に多型性のあるたんぱく質で、ヒトでは6種類の遺伝子からなる複合体であ

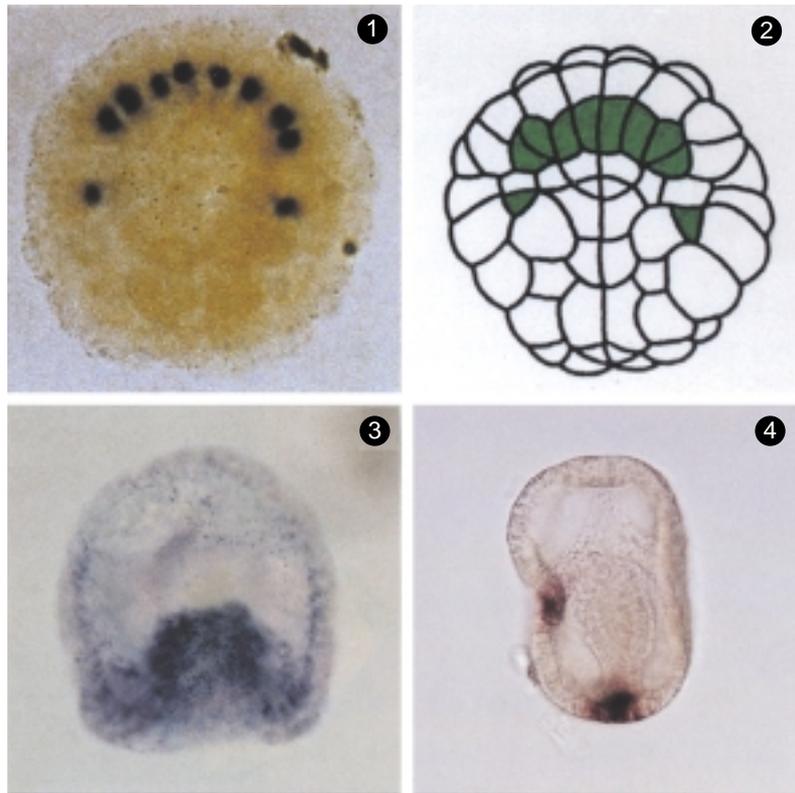
ることが知られています。TCRは無数の非自己を識別する能力が必要ですが、それが限られた遺伝子でどのようにして作り出されているのか、というのが免疫学の難問でした。それを利根川進博士は、染色体上の遺伝子の配列がリンパ球では後天的に変化する「遺伝子再構成」と呼ばれる現象であることを突きとめたのです。



生物

発生過程と決定因子

動物や植物の体は、受精卵から染色体上に書き込まれたボディ・プランと呼ばれる遺伝子的プログラムに従って胚形成を経て高次構造をもつ個体へと変容していきます。ホヤや脊椎動物で見つかった「脊索を作るための遺伝子」は、生物の体がどのようなプログラムに従って作られていくかを教えてください。T遺伝子と呼ばれる原因遺伝子は、ホヤの初期胚の中で将来脊索になる予定の細胞でのみ発現しますが、この遺伝子を脊索にならないはずの細胞で強制的に発現させるとそれらの細胞が脊索に変わります。T遺伝子は脊索を作らない棘皮動物や半索動物にも存在し、中胚葉の形成に重要な働きをしていると考えられています。また、細胞分裂を経てそれぞれの細胞に別々の運命をたどらせるようにするのは、卵の細胞質の中にある特定のRNAやタンパク質だということがわかってきました。個体発生の引き金を引く決定因子の働きが明らかになるうとしています。



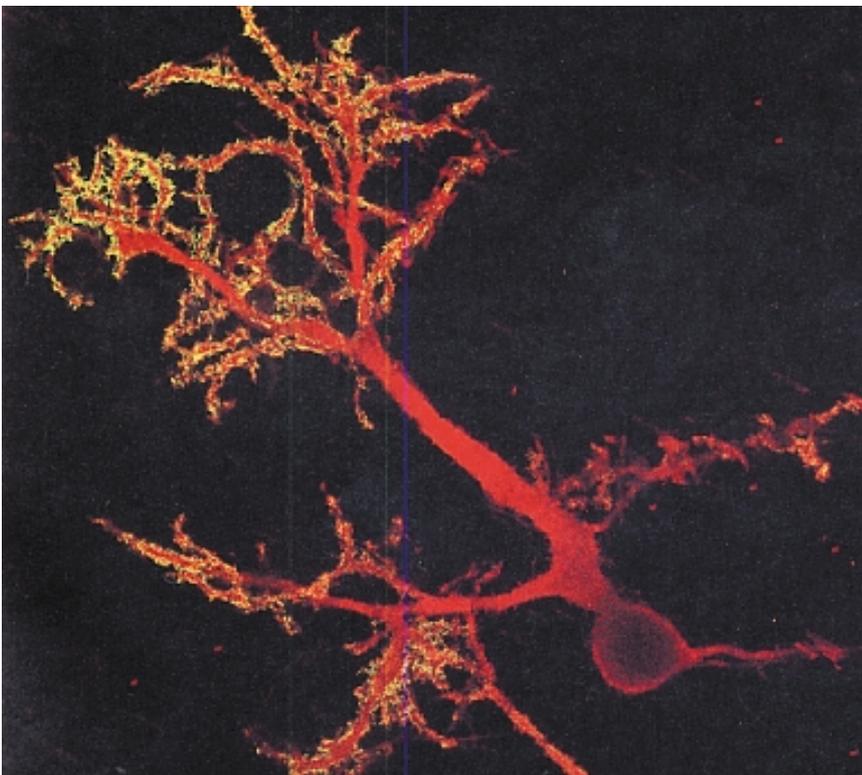
ホヤにみる発生過程

(1) ホヤ胚におけるT遺伝子の発現。将来脊索になる細胞(2で緑色で示した部分)のみで発現している(黒く染まった部分)。ウニ胚(3)およびギボシムシ胚(4)でのT遺伝子の発現。青および紫色に染まった部分で発現がみられる。

脳の不思議を探る

私たち人間の脳が、いかなる仕組みで意識や感情を生み出すのか。視覚や聴覚の受容器の解析からロボットの製作まで、脳科学は多岐にわたっています。人間に固有な高次な脳活動であっても、その萌芽や原型は他の動物にも認められるはずですが、そこで、ショウジョウバエやマウスなど人より単純なモデル動物を使って、分子・細胞・組織・個体の各レベルで脳の働きが調べられています。

また、脳の構成要素である神経細胞のはたらきや神経細胞間での情報伝達部位であるシナプスの機能や形成機構を解明する研究もさかに行われています。将来、脳ではたらくそれぞれの遺伝子や神経細胞が、どのようにして脳をつくり、行動をひきおこしているかがわかるようになるでしょう。



ネズミの神経細胞

脳から神経細胞を取り出しペトリ皿中で培養したもの。神経細胞での分子のはたらきを調べる実験などに用いられる。

カンブリア爆発

今から約6億年前の海底で、動物たちはその数と種類を急激に、そして大幅にふやしました。それは「カンブリア爆発」と呼ばれています。ほんの1000万年ほどの短い時間のなかで、現在私たちが目にすることのできる、ほとんどすべての動物グループが出そろったと言われていいます。

分子進化の機構を探る

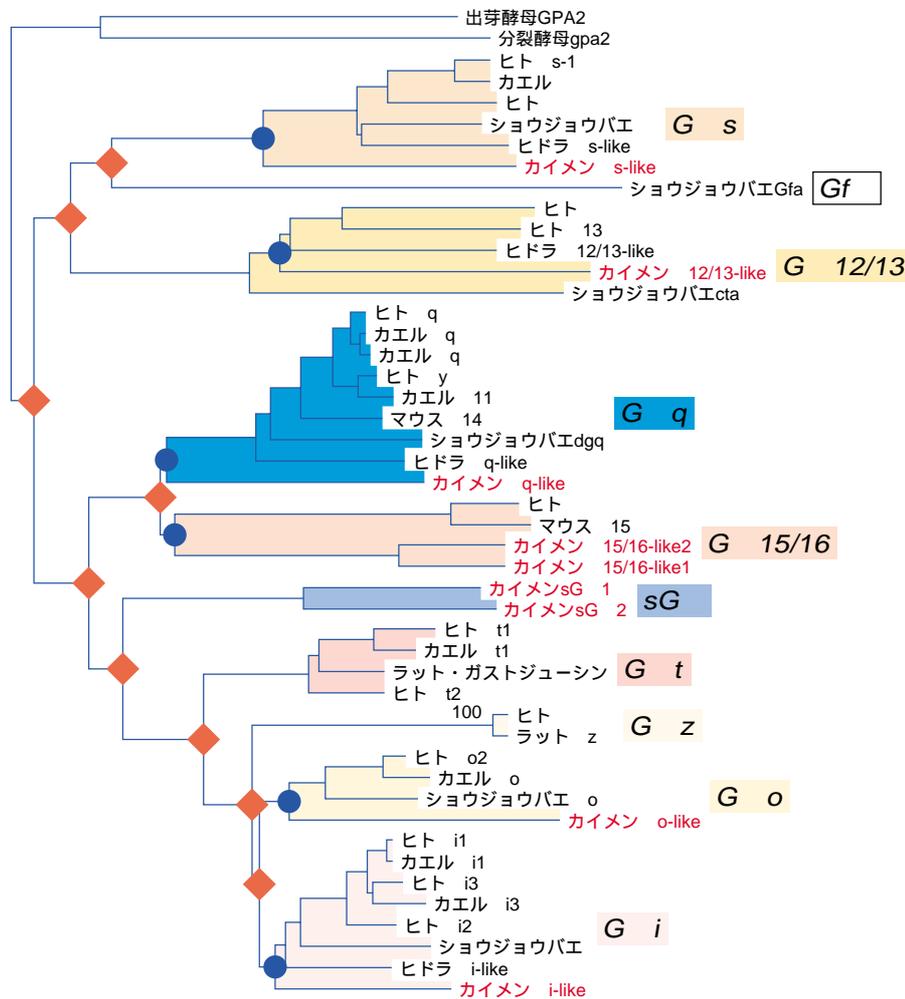
進化も遺伝子によって引き起こされたものです。したがって逆に遺伝子を調べていくことで進化の痕跡をたどっていくことが可能なのです。

遺伝子の爆発

現在の動物門につながる動物グループは、今から6億年前のカンブリア紀初期に爆発的に多様化したと考えられています。では遺伝子の多様化はいつ起こったのでしょうか。新しい機能をもった遺伝子は、すでにある遺伝子のコピーから作られますが、多細胞生物

にはこの遺伝子重複によってできた細胞間伝達や形態形成に関わる特有の遺伝子が存在します。生物の系統を分子の比較から再現するように、遺伝子重複を再現していくと、遺伝子の爆発的な多様化はカンブリア爆発より3億年前に起こっていることがわかってきまし

た。生物多様性の分子機構はすでに存在している遺伝子をどう使って多様化したかという点にあり、その機構は単細胞原生生物との比較によって解明されつつあります。



遺伝多様化はいつ起きたのか？

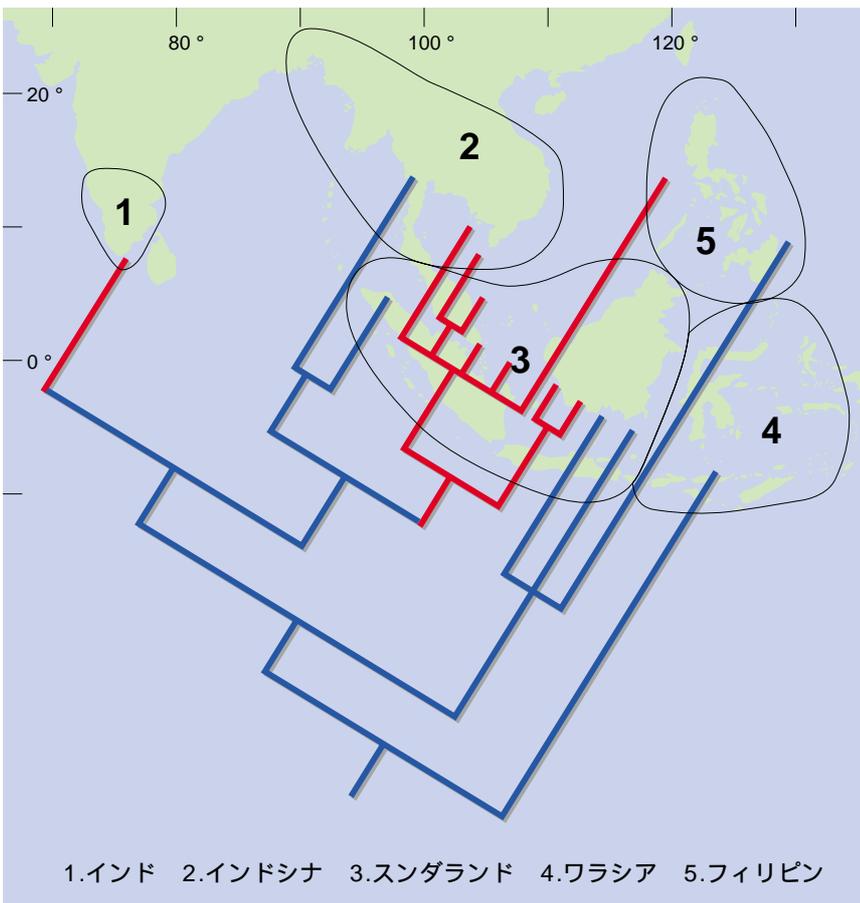
この系統樹は、Gタンパク質族の分子系統樹。Gタンパク質 サブユニットの比較から推定された。機能の異なる10のグループ（サブタイプ）に分かれ、同一サブタイプに属する枝（配列）は系統樹の上で一つの固まりになっている（色で塗りつぶした）。異なるサブタイプを作った遺伝子重複は で示した。 はカイメンとその他の動物が分岐した時期を示している。枝の右端は現在を示し、枝にそって左へいくほど過去に遡る。この系統樹から、異なるサブタイプを作った遺伝子重複（ ）のすべては、カイメンとその他の動物の分岐（ ）以前に起きていたことがわかる。すなわち、現存する動物の中でもっとも古い分岐に対応するカイメンとその他の動物の分岐以前に機能の異なる基本的遺伝子（サブタイプ）のほぼ完全なセットがすでにできあがっていたことになる。

分子系統樹をもとにして動物の移動や分化を推測する

DNAの塩基配列を異なる生物種の間で比較し、共通の祖先から分かれた後に蓄積した塩基置換の数をもとに系統樹をつくることができます。この方法を使えば、ある植物や動物の分類群が適応放散した時期を推定でき、大陸移動などの地史や氷河期などの気候変動と照らし合わせて考察することができます。これまで形態からではわからなかった違いが塩基配列の変異から明らかになり、シダ植物やコケ植物などが新しく分類され始めています。また、DNA分析は種内の遺伝的集団構造を明らかにする上でも有用で、生物の進化や種分化を解明するために重要な手法となっています。



トビトカゲ属とその近縁属の分子系統樹



1.インド 2.インドシナ 3.スンダランド 4.ワラシア 5.フィリピン

トビトカゲの起源と種分化

この仲間は約21種が知られており、東南アジア地域とインド南部に分布する。分子系統学的な解析の結果は、この属が単一起源であり、その種分化が地理的な分断と対応していることを示した。その種の分布域はインド、インドシナ、スンダランド、ワラシア、フィリピンの5つに大別できる。スンダランドとワラシアの間の分化は古いが、インドシナとスンダランドの間は分断と連続が繰り返され、互いに侵入し、分化することによって、多様化したことが系統樹から推定される。インドにはかなり初期に侵入し分化しているが、フィリピンにはスンダランドとワラシアで分化したものが侵入したものと考えられる。形態的な特徴から原始的とされる原生林内よりも、むしろ林縁部や、まばらな林に棲んでいるものが多く、進化的な特徴を持つものは、主にスンダランドで多様に分化したと考えられる。



上: ブチトビトカゲ(雌)の翼を広げたところ

下: 翼を畳んで樹幹にとまって眠るイツスジトビトカゲ(雌)

共生と共進化

地球上には約1000万種類の「生物」がいるといわれています。

しかし、それらの生物はそれぞれが別々に生きているわけではありません。

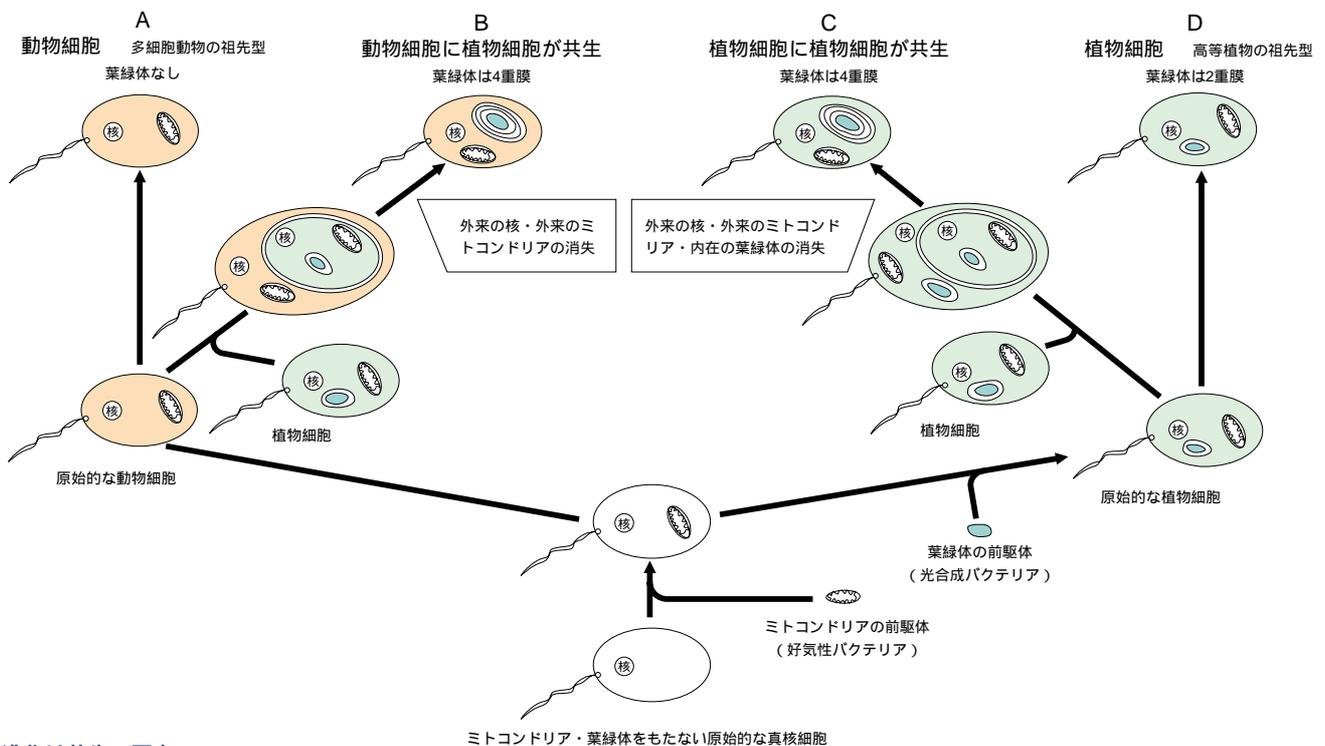
時として全く異なる生物同士の持ちつ持たれつの密接な関係もあるのです。

動物と植物の間

ミドリムシや渦鞭毛藻のような生物は食物を外部から取り込み鞭毛で泳ぐと同時に、葉緑体をもって炭酸同化作用を行うという性質を備えていることから、動物とも植物とも分類されます。こうした生物は、原生動物の細胞に藻類が入り込んで共生し、その後、藻類の核とミトコンドリアが退化し消失して葉緑体だけが残ってきたと考えら

れています。このような細胞内共生は進化の過程で何度も起こり、真核の藻類と原生動物が繰り返し共生することによって新たな藻類を作り出すメカニズムがあると考えられるようになりました。ミトコンドリアも20億年前に根粒菌や細菌の仲間が細胞内共生してできたもので、ゲノムが小さく、葉緑体と同じように細胞核によってコントロ

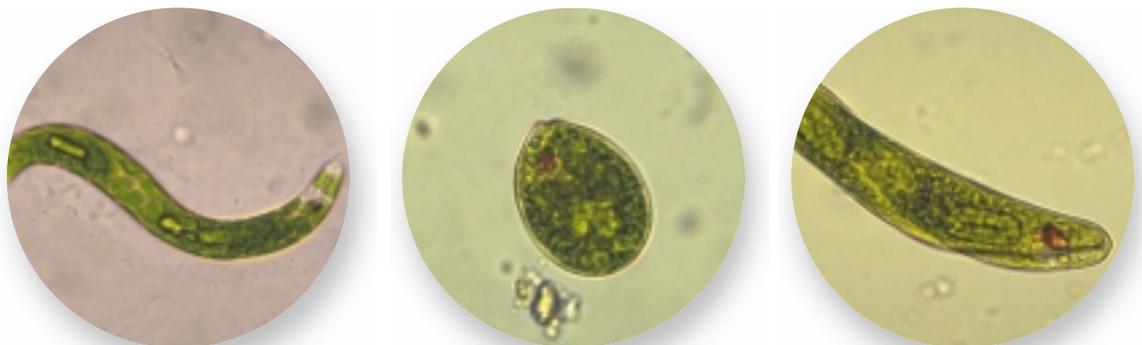
ールされています。こうした細胞内共生の進化機構を解明することによって植物や動物の起源、多様化の過程についても分析が進められています。



進化は共生の歴史

何回もの共生のステップを経て、多様な細胞形態が生まれました。ミドリムシは原始的な動物細胞に、さらに藻類（植物細胞）が共生したものだと考えられる。

資料提供：JT生命誌研究館

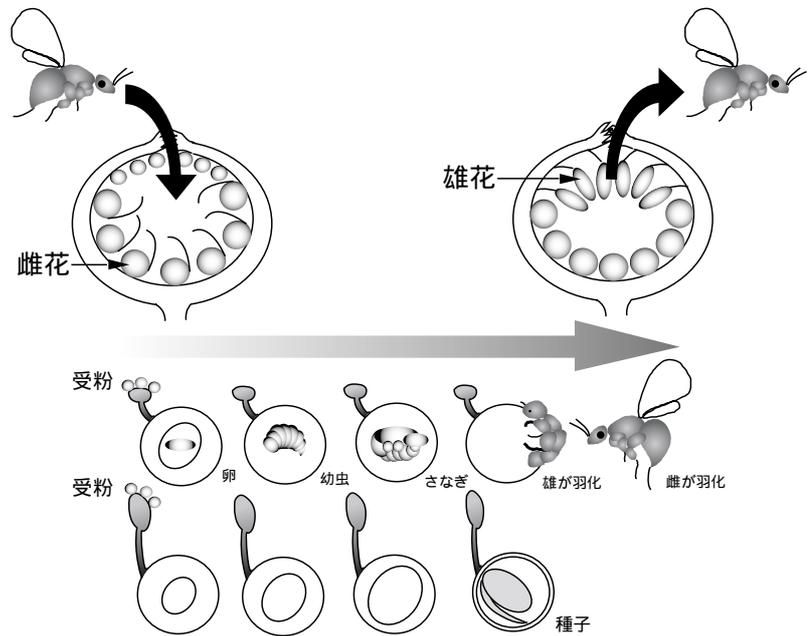


共生はどのように進化したか

異種の生物が一緒に生活して、行動・生理的に密接な関係を保っている状態を共生と呼びます。花や実をつける植物と、花粉を運ぶ昆虫や果実を食べて種子を運ぶ鳥、動物は、共生している例と言えるでしょう。例えば、イチジクはそれぞれの種によって共生するイチジクコバチの種類が決まっています。植物と動物の共生関係は、もとは食う食われる関係だったものが多様な関係をもつように進化した歴史を反映しています。ブナやフタバガキなどの樹木は根を菌糸でおおう外生菌根との共生によって繁栄していますし、病気を引き起こすウイルスも宿主と共生するように進化する例と言えます。

共進化には、共生だけではなく、捕食者と非捕食者や擬態する種とされる種など多様な例が知られており、

複数の種間に起こる場合もあります。その進化過程の解明はまだ始まったばかりです。



イチジク属植物の開花パターンとイチジクコバチ類の生活史との間の対応関係

イチジクコバチは体長2mm内外の小さな昆虫で、イチジクの花のうの小さな部分からもぐりこむ。内部に達したコバチは、持っている花粉を雌花につけると同時に、一部の子房に産卵する。産卵されなかった雌花は種子となるが、産卵された雌花では、幼虫が種子を餌に成長する。羽化はオスからはじまり、まだ子房内にいるメスと交尾をおこなう。イチジクの仲間は、花のうの中で雌花と雄花の咲くタイミングが大きくずれていて、ちょうどコバチが羽化する時期に合わせて、雄花が咲きはじめる。交尾後子房から出てきたメスの成虫は花粉を体につけて、産卵できるつぎの花のうを探して飛んでいく。資料提供：東北大学大学院生命科学研究所

人間と他の生物との共生

過去何世紀も人間は自然を支配し、人間にとって便利のように改造する努力を重ねてきました。しかし、その人為的な影響が大規模な自然破壊につながり、かえって人間に悪影響をもたらしているという反省がなされるようになりました。そもそも人間は自然とどのような関係をもって進化してきたのでしょうか。栽培植物の出現は植物と人間の共生、動物の家畜化は動物と人間の共生と見ることができます。栽培植物や家畜の品種の多様化は人為的に選択されたものでもあります。そういった人間と他の生物との生態史をさぐる研究が、生物学を超えて文化人類学、経済学、考古学、歴史学、社会学、栄養学、農学などの分野と協力して各地で試みられています。



食用としてゾウを解体するアフリカの狩猟採集民



多様性

生物の多様性

多い茂る熱帯雨林の木々をめぐる空中回廊。地上を歩くのが面倒くさい・・・からではありません。「樹冠部」と呼ばれる、いわゆるてっぺん部分での動植物の営みを観察するための足場なのです。さて「樹冠部」は私たちに何を教えてくれるのでしょうか？

熱帯雨林研究と生物の多様性

熱帯雨林は陸地の3%をしめるにすぎません。しかし、そこには地球上の生物種の約半数が生息している、まさに生物の宝庫なのです。

その奥深さからこれまで困難であった熱帯雨林の本格的な調査を進めていくことが、生物の多様性の謎を解くカギとなると考えられています。

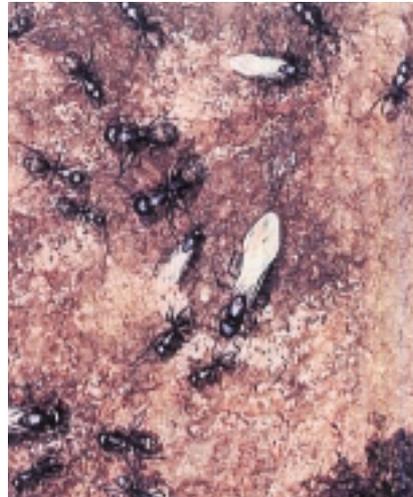
熱帯雨林の生物群集

現在、森林は全陸地上の植物のバイオマスの90%を担い、その約半分は熱帯雨林に生育しています。約1000万種と推定される生物種もその半分は熱帯雨林に生息しています。熱帯雨林が陸地面積の3%しかないことを考えると、いかにここが生物多様性の高い場所であるかがわかります。近年、その多様性を支えているのは花や実をつける樹冠部であることがわかり、空中回廊や林冠クレーンが建設されて詳細な観察が続けられています。その結果、さまざまな植物と動物の共生関係が種分化を促進し、熱帯雨林の生物の多様性をもたらしていることがわかってきました。熱帯雨林は生物相互の関係と共進化を追求する最も興味深い世界なのです。



クロオオアリ

初夏になると新女王アリとオオアリが誕生し、結婚飛行の準備が始まる。結婚飛行のタイミングをはかるのは働きアリの役目。(右) 結婚飛行が終わると、女王アリは産卵を始める。(左) 写真：山口進(下の2点とも)



化学物質によるコミュニケーション

植物は動物による食害を防ぐために、葉や未熟果にタンニン、アルカロイドなどの消化阻害物質や毒物を含んでいます。動物同士もフェロモンという揮発性の化学物質を出して情報交換をしています。アリやカメムシなどの昆虫は体からの水分蒸発を防ぐ体表ワックスをもっていますが、これはすべて種特異的な炭化水素からできていて、同種の仲間を識別するのに役立っていることがわかっています。アリによっては他種のアリの体表成分を体に擦りつけて化学擬態をして、他種にサナギを育てさせるものもいます。ハチ

の分業社会は個体が成長するにつれて幼若ホルモンの量が変わり、これに対応して役割が変化することによって支えられていることが判明しました。こうした化学的なコミュニケーションの働きや変化、神経系とのつながりについて分析が進められています。



ハキリアリ

葉を巣に持ち帰る大型の働きアリと、葉に産卵しようとする寄生バエを監視する小型の働きアリ。(右)

葉を切り取っている大型の働きアリ。巣の中で、この葉を発酵させキノコを育てて食べる。(左)



種と生態系の保全

環境破壊は今各地で急速に進んでおり、多くの種や貴重な生態系がまだその実態が解明されないまま消滅しているとしていいます。こうした事態をくい止めようと、絶滅危惧種を記載したレッドリストが国や都道府県、国際保護団体によって作成され、希少種の国際取引を禁じるワシントン条約や生物多様性条約などの国際協定が締結されています。しかし、法的な規制だけでは十分でなく、人間活動が生物の種、群集、生態系に与える影響を評価し、

種の絶滅や生態系の攪乱を防ぐ実践的な方法を開発して積極的な対策を講じていく必要があります。これには多面的なアプローチからの研究が不可欠で、生態学は言うに及ばず、生物地理学、進化生物学、遺伝学、環境科学、人類学、造園学、野生生物管理学など多くの学問分野と連携することが望まれます。遺伝子レベルから個体群レベルまで絶滅の危険度を測るパラメーターを作る必要があるのです。



アフリカ（ガボン）の熱帯雨林で1日に採集した果物

深海生物の多様性

熱水の噴き出す深海。生物が生きていくにはあまりにも劣悪な環境に思えますが、実は非常に多くの生物を育てているのです。

さらにそこには太古の生命の謎を解く鍵があるかもしれないのです。

原始生命の子孫たち

地球表面の約70%は海で、その多くは水深1000mより深い水域から成り立っています。かつてこれらの深海域には生物はいないと思われていましたが、最近の調査で無脊椎動物門のほとんどすべてが生息していることがわかってきました。とくに熱水噴出孔があ

る場所では生物の多様性が高く、次々に新しい種、属、科ばかりか門の動物が発見されています。そのひとつチューブワームは口も消化管も肛門もなく、体内に化学合成細菌を共生させ、それが生成する有機物を摂取しています。熱水噴出孔に見られる環境は太古

の地球環境とよく似ており、化学合成に頼っている微生物は原始生命の子孫と思われます。光合成によって形成された陸上の生態系とは別に、深海では太古の化学合成系が継承されてきたのかもしれない。



熱水噴出口にすむ生き物たち

- 1) ヘオリムシ（チューブワーム）。相模湾。
- 2) シンカイヒバリガイとエビの仲間。沖縄トラフ。
- 3) シロウリガイ。相模湾。

海底の地殻活動が活発な場所には、高温の熱水を噴出する煙突状の構造（チムニー）が見られ、その周りにはたくさんの生物が高密度で生息している。

4) 熱水を吹き上げる沖縄の伊是名海穴

写真提供：海洋科学技術センター

動物の行動と生態

生態

「社会」はなにも人間だけのものではありません。人間以外の動物にも立派な社会があり、そして「文化」あるのです。そして、動物の社会や文化を詳しく調べていくことは、私たち人間が人間として生きてきた生物学的歴史を知る手がかりとなるのです。

動物の行動を変化させる仕組み

個々の動物特有の行動。知れば知るほどその謎は深まるばかり。

しかし、「フィールドワーク」と呼ばれる、野外における綿密な調査と、時としてコンピュータを用いる分析がこの謎をひとつひとつ解明しつつあります。

分類とフィールドワーク

動物の行動や生態を理解するためには、まずその動物がどの分類群に属しているかを知らなければなりません。動物はそれぞれの形態に応じて動く範囲や利用する環境が異なっているからです。生物の多様性を知るためにはどんな動物がいるのかを同定し、分類する作業が不可欠になります。フィールドワークはその大切な研究方法の一つです。動物を採集し同定し、その行動をつぶさに記録します。得られた情報をデータ・ベースにして他の生息地の個体や近縁種と比較することによって、その動物の進化や適応の歴史を推定することができます。そういった調査をする中で、アリと共生する植物や魚の口内保育といった興味深い発見があるほか、サルの子殺し行動や魚の曲がった口の適応的意味が解明されます。



「右利き」「左利き」の魚

左側は右利き個体、右側は左効き個体（口が右、左にそれぞれ曲がっている）。

ナチュラル・ヒストリーと進化

ナチュラル・ヒストリーは自然史学、あるいは博物学と訳され、物の収集と記載をする学問と思われてきましたが、実は個々の動物が繰り広げるドラマに科学的なストーリーを付けて説明する学問です。それは、なぜその動物がそんな行動をするのか、という質問を発することから始まります。1) 生理学的メカニズム、2) 発達過程、3) 機能や適応度、4) 進化的理解、という4つの問いをティンバーゲンは設定しましたが、それぞれの質問に適合する異なった分野の説明があります。なぜハチやアリにはカーストがあるのか。なぜヤドカリは殻を借りるのか。なぜつがいの鳥でも浮気をするのか。とくに、4つ目の質問には、自然淘汰や性淘汰という進化現象について

ダーウィン以来の謎を解く鍵が隠されています。数理モデルを作ってそれを

コンピュータ上に再現するという方法も使われています。



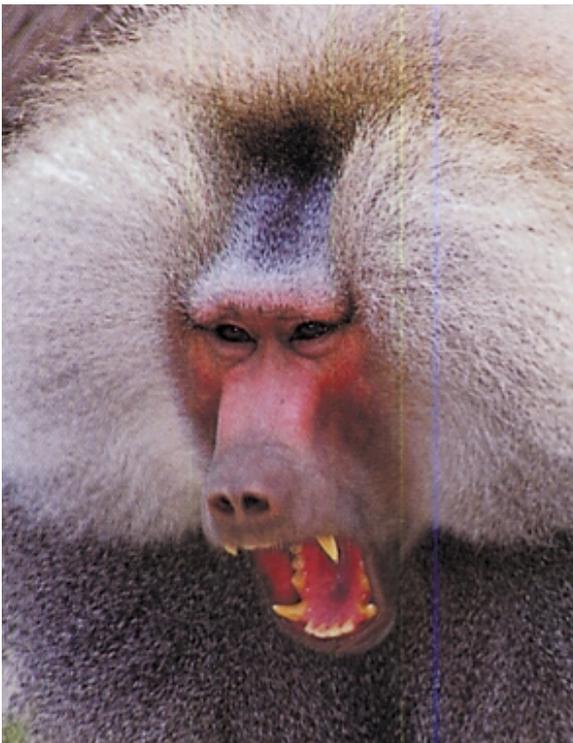
ヤドカリ同士の貝殻の交換

貝殻を奪われたヤドカリは攻撃したヤドカリが捨てた貝殻に入る。

性の不思議に挑む

多くの動物では性差は卵と精子の違いに発し、顕著な形態や行動上の性的二型を生み出しています。それは雄と雌で繁殖成功度を左右する条件が異なっているからです。卵に比べてコストの低い精子を生産する雄は、交尾の機会や配偶相手の獲得に投資します。一方、高価な卵の生産や育児に投資する雌は配偶相手を選択します。雄の方が交尾相手をめぐる競争が強いので、シカの立派な角やヒヒの長い犬歯のように武器となる形質が雄だけに発達するのです。しかし、武器にならないクジャクの羽のような形質も、雌に好まれて繁殖相手を獲得できるために発達したと考えられます。コウホウジャクの長い尾を切って、さまざまな長さにして調べた結果、雌が長い尾の雄を好むことがわかりました。雌は今まで考えられていた以上に積極的に雄を選び、

雄の姿や行動を変えているらしいのです。このような性淘汰によってつくられた形質は自然界にたくさん存在しています。



上：ウォーターバック

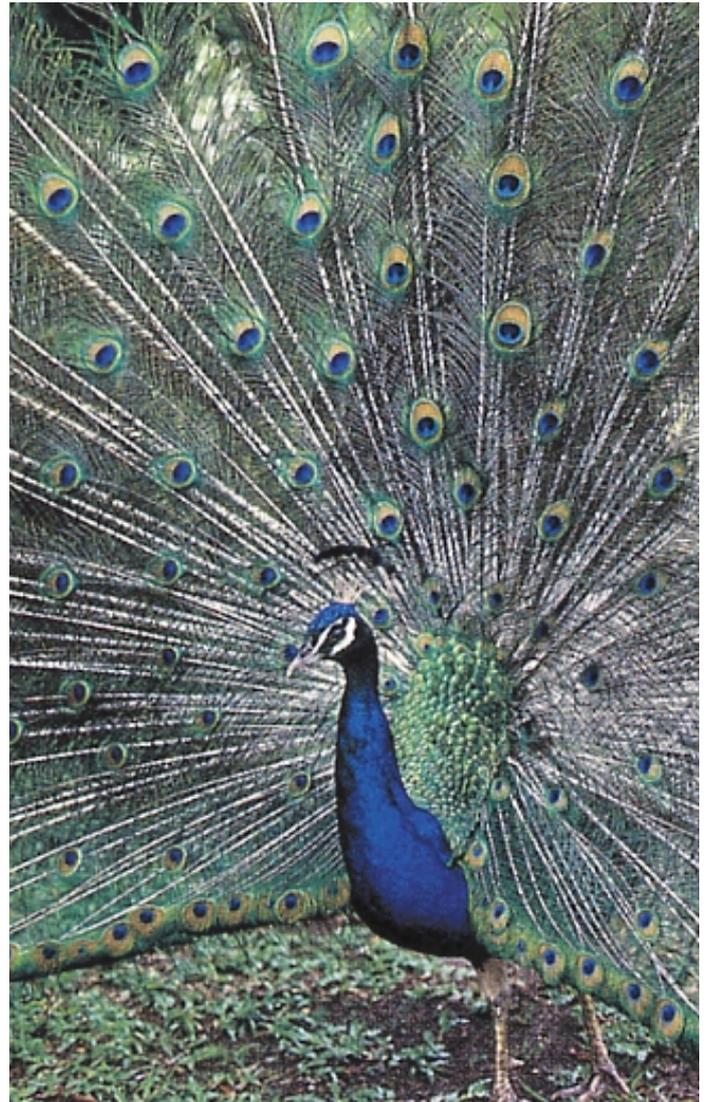
雄がもつ立派な角は雄間競争によって進化したと考えられている。

下左：ヒヒ

マントヒヒの雄はライオンの雄のような立派なたてがみと長い犬歯をもっている。

下右：クジャク

豪華な羽は雄が雌に好まれるための手段として発達した。



社会の仕組みと文化の起源を探る

「一匹狼」 本当にオオカミは一匹で暮らしているのでしょうか？

「猿まね」 本当にサルは他人のまねをするのでしょうか？

動物それぞれの独自の社会や文化の一端をご紹介します。

社会の多様性をつくり出す要因とは何か

動物は種によってさまざまな集団をつくります。単独生活をしていて交尾をするときだけ雌雄が一緒になるトラやクマ、つがいで暮らすオオカミ、雄がなわばりを構えて雌の集団を取り込むインパラやガゼル、大きなハレムをつくるオットセイ、複数の雌雄が一緒に暮らすニホンザルなど、多種多様です。なぜ動物は群れをつくるのでしょうか。その主たる理由は食物の摂取と捕食者からの防衛によって説明されます。小さな群れでは捕食者にねらわれる危険が大きく、大きな群れでは食物をめぐる競合が高くなります。この傾

向は食物の種類によっても、似たようなニッチを占める他の動物種の存在によっても、さらに交尾相手をめぐる雄の競合状態によっても異なってきます。生態学的条件の他に、おそらく系統的な制約や問題を解決する社会的知性のあり方がこうした違いを生み出していると思われるのです。

右：絶滅寸前にあるツキノワグマ

写真提供：社団法人高知県生態系保護協会

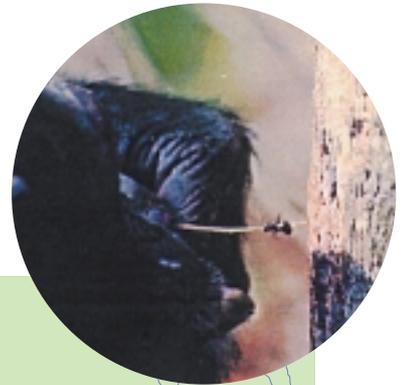


サツマイモを洗うニホンザル

文化的行動と道具使用

宮崎県の幸島に生息するニホンザルは、人から与えられたサツマイモを海水で洗い、砂を落とし塩味を付けて食べます。これは4歳の雌が始め、しだいに群れの仲間へと伝播していきました。こういった文化的な行動は霊長類によく見られます。とくに、チンパンジーは多種多様な道具を使うことで有名です。アフリカでは、チンパンジーの生息地に対応してそれぞれ違う道具が発見されており、文化圏と呼び得るものがあると考えられています。霊長類以外でも、カラス、ササゴイ、ダーウィンフィンチなどの鳥類にも道具を使って食物をとる行動が観察されています。これらの動物で文化的な行動がどのようにして定着し、他の集団や地域に伝播していくのか。人間が文化を獲得した生態学的背景や社会的条件は何か。人間以前の文化がしだいに明らかになりつつあります。

大アリを釣るチンパンジー

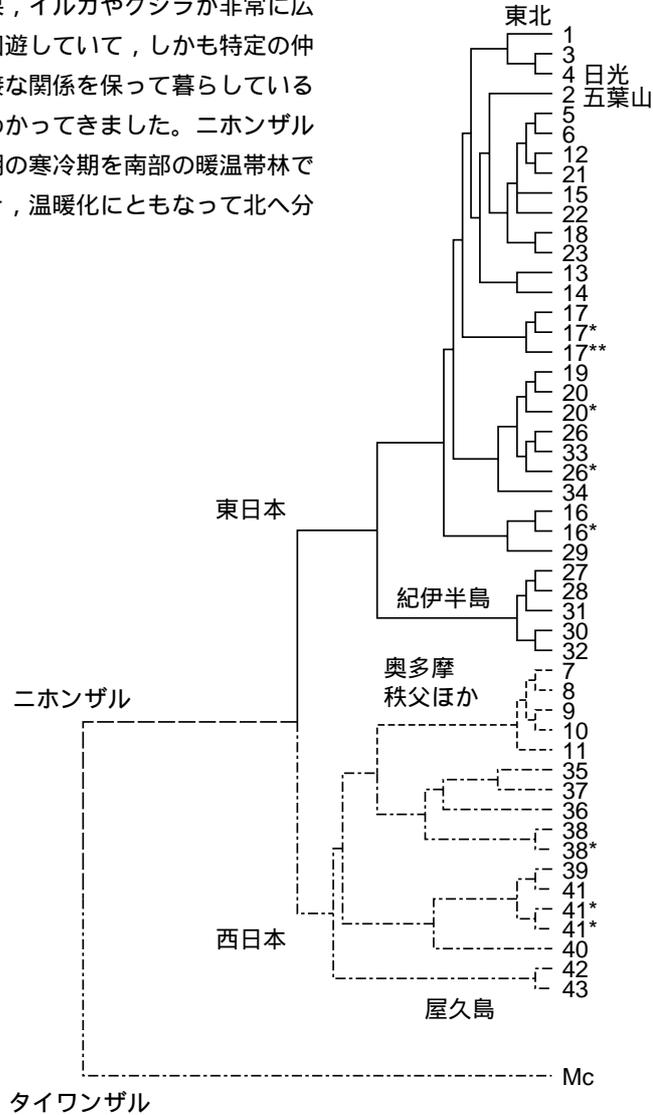


チンパンジー文化圏の地図

繁殖と行動を結びつけて考える

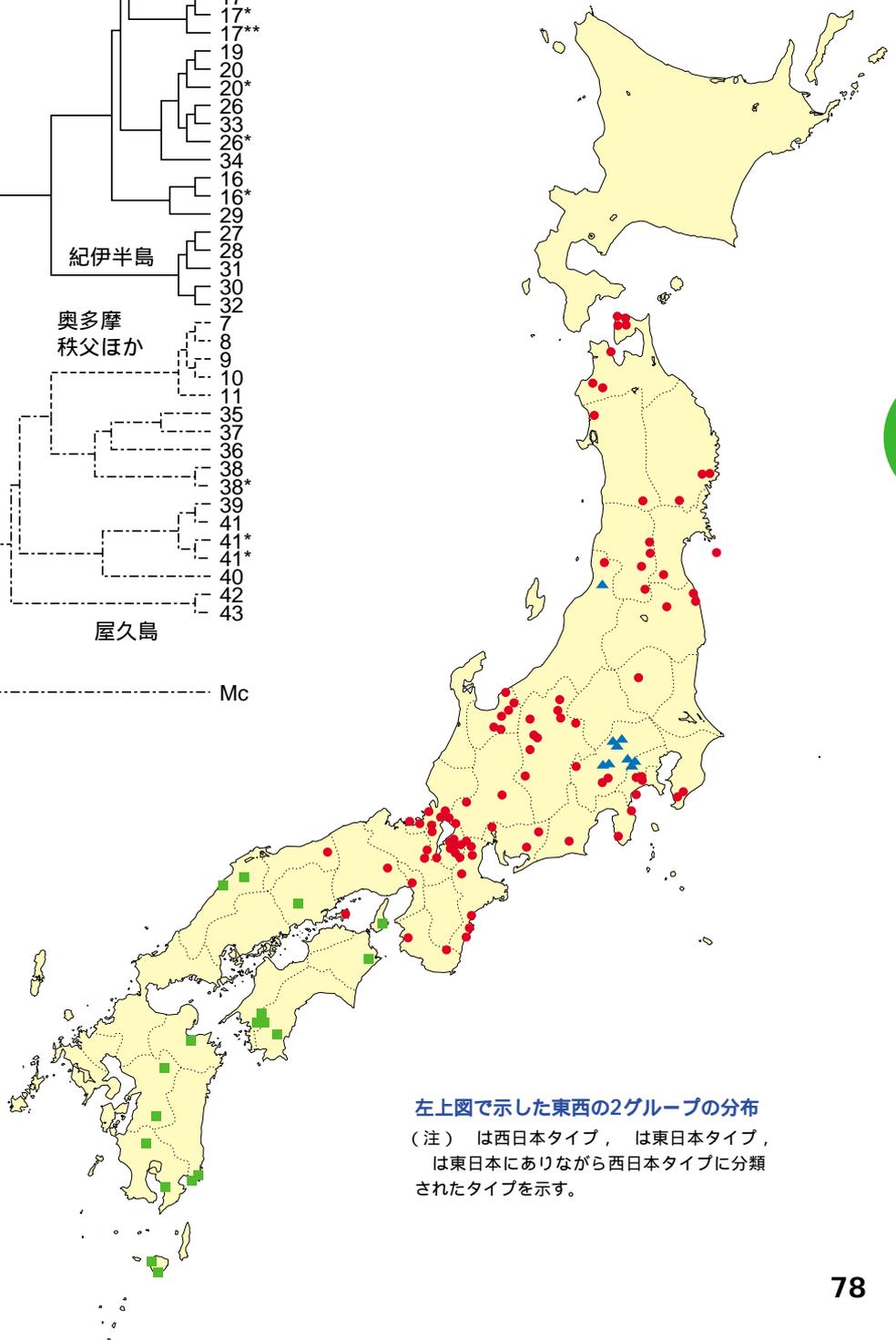
近年、わざわざ動物を捕獲して血液を採取せずに、体毛や糞といった残存物の資料から得られるDNAの配列を比較する手法を用いて、同一種の地域集団間の類縁関係を調べたり、子どもの父親を判定できるようになりました。その結果、イルカやクジラが非常に広範囲を回遊していて、しかも特定の仲間と密接な関係を保って暮らしていることがわかってきました。ニホンザルも氷河期の寒冷期を南部の暖温帯林で生き抜き、温暖化にともなって北へ分

布を広げた過程が推定できるようになりました。それぞれの動物種の繁殖特性が、社会の動態や分布域の拡大にどう関与しているかを分析できるようになったのです。



ミトコンドリアDNA配列から各地のサルが示すタイプ(番号で表示)の関係を推定した結果

(注) ニホンザルは単一系統で、東西の2グループに大別できる。ただし奥多摩、秩父など一部のサルは、西日本のサルに似たタイプを示す。



左上図で示した東西の2グループの分布

(注) は西日本タイプ, は東日本タイプ, は東日本にありながら西日本タイプに分類されたタイプを示す。



人類

人類の由来を求めて

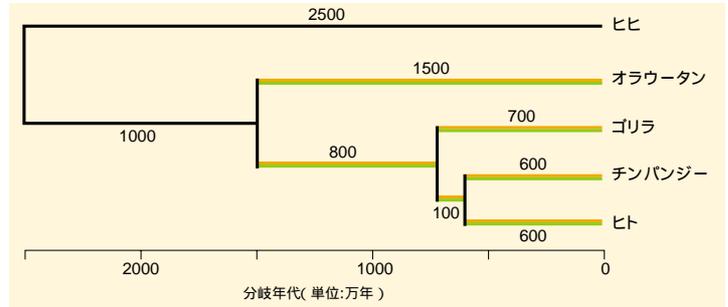
二本足だけで歩行する霊長類である人間。動物としてはきわめて「特殊」な存在ではありますが、決して「特別」な存在ではありません。しかし、なぜ人間が生まれたのか？この問題には、生物学の様々な手法を用いたアプローチが続けられています。

人類の系図をつくる

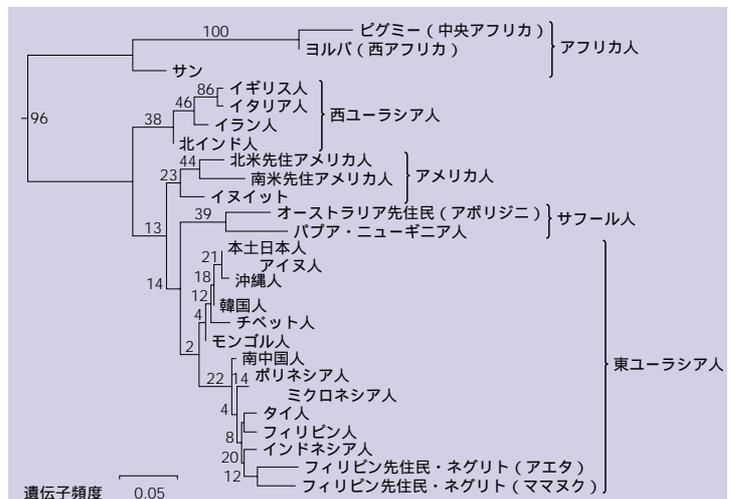
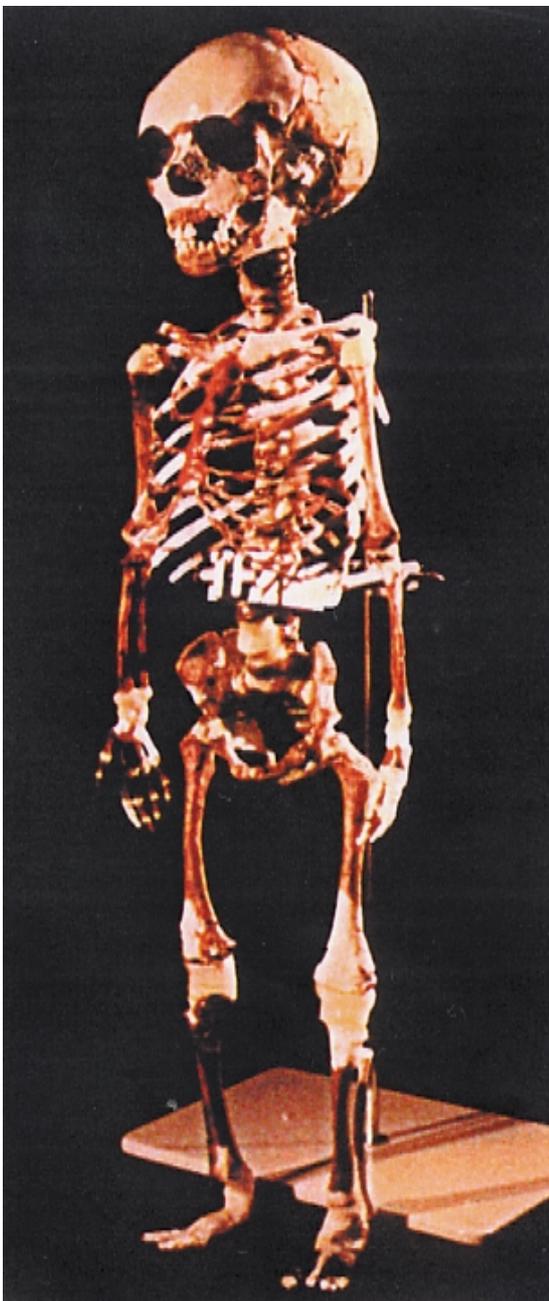
近年、DNAの塩基配列の比較から人類と類人猿の分岐時期を推測できるようになりました。この方法によれば、人類の祖先はチンパンジーの祖先と約600万年前に分かれ、両者の共通祖先はゴリラの祖先と約700万年前に分かれたこととなります。また、ミトコンドリアDNAが母性遺伝をすることをを用いて、現代人の共通祖先である女性のDNAに到達しようという試みも行われています。その結果、現代人の共通祖

先はアフリカで誕生したことや、モンゴロイドは新大陸へ複数回の移動を行っていることなどが推測されるようになりました。現在、類人猿のゲノム解析が急ピッチで進められています。今後は人類と類人猿の間でゲノムが比較

され、人類はどういった特徴をもとに類人猿と分化したのか。人類の多様化はどんな特徴に關与する遺伝子によるのか、などの疑問が明らかにされていくでしょう。



DNAの塩基配列から推測される人類と類人猿の分岐時期



遺伝子頻度からみた遺伝的な近縁関係

人類の祖先はどんな姿をしていたか

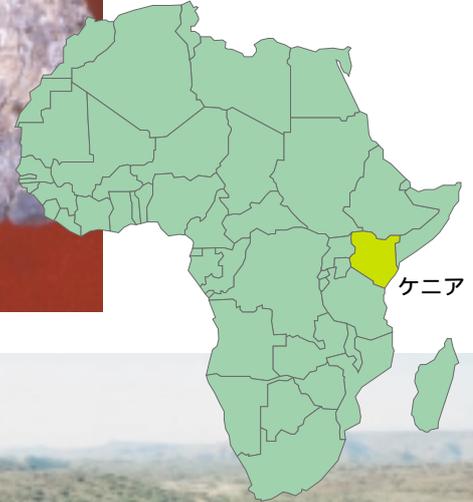
近年、人類発祥の地アフリカでは類人猿と人類をつなぐ祖先の化石や、人類最古の化石が次々に発掘されています。その結果、人類は類人猿の祖先と分かれてすぐ直立二足歩行で歩き始めたことがわかってきました。しかも、生息地は樹木の多い環境で、長い間果実を中心とした植物食をしていたことが地層や歯の形態から推定されています。また、ネアンデルタール人、縄文人、現代人の骨格、さらには人類に近縁な霊長類の骨格と比較することによって、人類の形態進化がどのようにして起こったかが詳しく分析されています。

写真：シリア・デデリエ洞窟出土のネアンデルタール人幼児の骨格復元

中新世ヒト上科化石とその発掘場所

左の化石は北ケニアのサンプルヒルズから発見されたサンプルピテクス・キプタラミ（学名）の上顎の化石。950万年前（中新世後期）の人類の祖先のもの。

下の2点の写真が発見場所（北ケニア，サンプルヒルズの第22化石産地）。日本の調査隊として初めてアフリカ中新世ヒト上科化石を発見した。



さらに祖先を遡って

北ケニアのナチョラで始まった京都大学の発掘プロジェクト。中新世中期，1500万年前の地層からヒト上科のナチョラピテクスが大量に発見されている。



類人猿から人類の心と社会の進化を探る

人間の行動や心の進化をたどるには、化石や遺伝子からではなく、生きている類人猿からヒントを得なければなりません。これまで人間に独自と思われていた特徴が類人猿にもあることがわかってきました。例えば、チンパンジーは食物をよく分配します。とくに、共同で狩猟をした時は分配行動がよく起こり、最優位の雄が肉の分配を権力の維持に利用します。ボノボでは性行動が日常的になっており、授乳中でも雌が発情して雄と性関係をもちます。ゴリラは特定の雄と子どもの関係が長期間維持される人間家族の原型のような集団を作って暮らしています。チンパンジーにコンピュータを操作させる実験では、人間の文字をある程度まで使いこなし、数字を記憶できることがわかっています。また、相手の心を理解したり、だましたりする高度な社会的駆け引きがあることもわかってきました。

人間性の進化の道筋が類人猿の目を通して明らかにされようとしているのです。



対面位の交尾

ボノボによく見られる人に似た対面位での交尾。他の類人猿と比べて、雌の性器がやや前についているため、このような交尾姿勢がとりやすくなっている。おとなの交尾が始まると、どこからともなく子どもが駆け寄ってきて、背中の上に乗って遊ぶ。

写真：古市剛史



ゴリラの家族

ゴリラは特定の雄と子どもの関係が長期間維持される人間家族の原型のような集団を作って暮らしている。

コンピュータを操作するチンパンジーの親子

生まれてからずっと親の後ろ姿を見ることで、子どもは知識や技術を学んでいく。

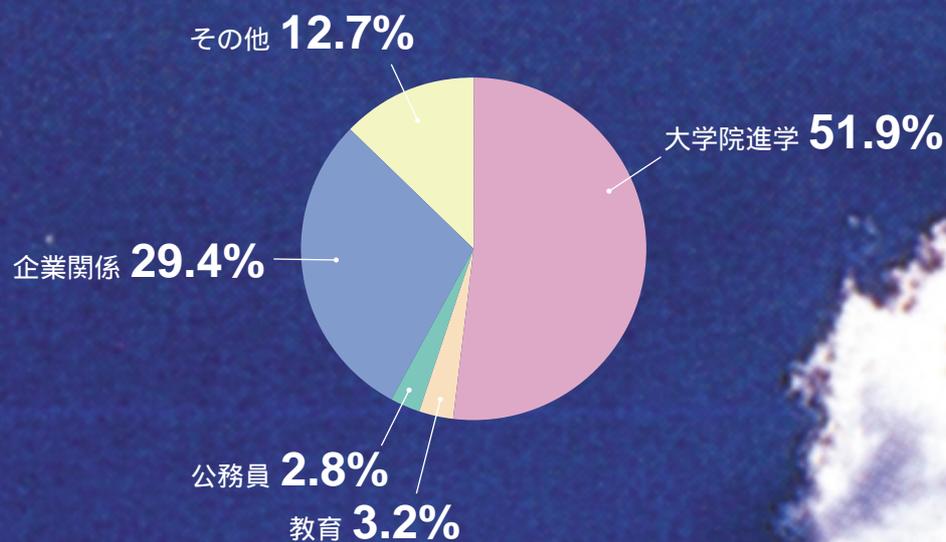


国立大学理学部卒業生の進路

理学部卒業生の約半数は、大学院に進学し、数学、情報、物理、宇宙物理、地球・惑星科学、化学、生物化学、生物科学、生命科学、人類学等の多くの分野で、第一線の研究者や研究および教育の指導者をめざします。他の約半数は、企業、国・公立の学校や研究所など多様な分野に就職します。

今、地球を取り巻く自然は大きな岐路に立たされています。これからの日本は世界各国と連携して新たな理論や科学技術を確立していくことが要求されています。そのため、科学の基礎を担う理学部の重要性がますます高まっていくものと思われます。この21世紀は、探求心に富み、独創性豊かな、実行力のある理学部の卒業生を広く求めています。

国立大学理学部卒業生の進路



この冊子の内容は、インターネットでもご覧いただけます。以下のアドレスにアクセスください。

<http://www.sclib.kyoto-u.ac.jp/whats/>

What's 理学？

平成14年5月発行

発行者：国立大学理学部長会議

編集委員：石田 英實

谷森 達

深谷 賢治

町田 忍

百瀬 孝昌

山極 壽一

(京都大学)

デザイン：GK京都

32国立大学理学部学科一覽

北海道大学

理学部
数学科
物理学科
化学科
生物科学科
地球科学科

弘前大学

理工学部
数理システム科学科
物質理工学科
地球環境学科
電子情報システム工学科
知能機械システム工学科

東北大学

理学部
数学科
物理学科
宇宙地球物理学科
化学科
地圏環境科学科
地球物質科学科
生物学科

山形大学

理学部
数理科学科
物理学科
物質生命化学科
生物学科
地球環境学科

茨城大学

理学部
数理科学科
自然機能科学科
地球生命環境科学科

筑波大学

第一学群
自然科学類
第二学群
生物学類

埼玉大学

理学部
数学科
物理学科
基礎化学科
分子生物学科
生体制御学科

千葉大学

理学部
数学・情報数理学科
物理学科
化学科
生物学科
地球科学科

東京大学

理学部
数学科
物理学科
天文学科
地球惑星物理学科
化学科
生物化学科
生物学科
地学科
情報科学科

東京工業大学

理学部
数学科
物理学科
化学科
情報科学科
地球惑星科学科

お茶の水女子大学

理学部
数学科
物理学科
化学科
生物学科
情報科学科

新潟大学

理学部
数学科
物理学科
化学科
生物学科
地質科学科
自然環境科学科

富山大学

理学部
数学科
物理学科
化学科
生物学科
地球科学科
生物圏環境科学科

金沢大学

理学部
数学科
物理学科
化学科
生物学科
地球科学科
計算科学科

信州大学

理学部
数理・自然情報科学科
物理科学科
化学科
地質科学科
生物科学科
物質循環学科

静岡大学

理学部
数学科
物理学科
化学科
生物地球環境科学科

名古屋大学

理学部
数理学科
物理学科
化学科
生命理学科
地球惑星科学科

京都大学

理学部 理学科
数理科学系
物理科学系
地球惑星科学系
化学系
生物科学系
数学分野
物理学分野
宇宙物理学分野
地球物理学分野
地質学鉱物学分野
化学分野
動物学分野
植物学分野
生物物理学分野

大阪大学

理学部
数学科
物理学科
化学科
生物学科

神戸大学

理学部
数学科
物理学科
化学科
生物学科
地球惑星科学科

奈良女子大学

理学部
数学科
物理科学科
化学科
生物科学科
情報科学科

島根大学

総合理工学部
物質科学科
地球資源環境学科
数理・情報システム学科
電子制御システム工学科
材料プロセス工学科

岡山大学

理学部
数学科
物理学科
化学科
生物学科
地球科学科

広島大学

理学部
数学科
物理科学科
化学科
生物科学科
地球惑星システム学科

山口大学

理学部
数理科学科
自然情報科学科
化学・地球科学科

愛媛大学

理学部
数理科学科
物質理学科
生物地球圏科学科
物理学系
化学系
生物学系
地球科学系

高知大学

理学部
数理情報科学科
物質科学科
自然環境科学科

九州大学

理学部
物理学科
化学科
地球惑星科学科
数学科
生物学科

佐賀大学

理工学部
数理科学科
物理科学科
機能物質化学科
知能情報システム学科
(他に工学系3学科)

熊本大学

理学部
数理科学科
物理科学科
物質化学科
地球科学科
生物科学科
環境理学科

鹿児島大学

理学部
数理情報科学科
物理科学科
地球環境科学科
生命化学科

琉球大学

理学部
数理科学科
物質地球科学科
海洋自然科学科
物理系
地学系
化学系
生物系

32国立大学理学部URL一覽

文部科学省	http://www.mext.go.jp/index.htm
北海道大学 理学部	http://www.sci.hokudai.ac.jp/
弘前大学 理工学部	http://www.st.hirosaki-u.ac.jp/
東北大学 理学部	http://www.sci.tohoku.ac.jp/
山形大学 理学部	http://www-sci.yamagata-u.ac.jp/index.html
茨城大学 理学部	http://www.ibaraki.ac.jp/html/gakubu/gakubu3.html
筑波大学 第一学群 自然科学類	http://www.nature.tsukuba.ac.jp/
第二学群 生物学類	http://www.biol.tsukuba.ac.jp/
埼玉大学 理学部	http://www.sci.saitama-u.ac.jp/
千葉大学 理学部	http://www.s.chiba-u.ac.jp/index.html
東京大学 理学部	http://www.s.u-tokyo.ac.jp/index-ja.shtml
東京工業大学 理学部	http://www.afs.titech.ac.jp/
お茶の水女子大学 理学部	http://www-s.cc.ocha.ac.jp/
新潟大学 理学部	http://www.sc.niigata-u.ac.jp/index.html
富山大学 理学部	http://www.sci.toyama-u.ac.jp/indexJP.html
金沢大学 理学部	http://www.s.kanazawa-u.ac.jp/
信州大学 理学部	http://science.shinshu-u.ac.jp/index-J.html
静岡大学 理学部	http://www.sci.shizuoka.ac.jp/
名古屋大学 理学部	http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/index-j.html
京都大学 理学部	http://www.sclib.kyoto-u.ac.jp/kusci/index-j-top.html
大阪大学 理学部	http://www.sci.osaka-u.ac.jp/index-jp.html
神戸大学 理学部	http://www.sci.kobe-u.ac.jp/
奈良女子大学 理学部	http://www.nara-wu.ac.jp/rigaku/Welcome-jp.html
島根大学 総合理工学部	http://www.riko.shimane-u.ac.jp/
岡山大学 理学部	http://www.science.okayama-u.ac.jp/
広島大学 理学部	http://www.sci.hiroshima-u.ac.jp/
山口大学 理学部	http://www.sci.yamaguchi-u.ac.jp/index.html
愛媛大学 理学部	http://www.sci.ehime-u.ac.jp/
高知大学 理学部	http://www.kochi-u.ac.jp/JA/gakubu/rigaku.html
九州大学 理学部	http://science.scc.kyushu-u.ac.jp/
佐賀大学 理工学部	http://www.se.saga-u.ac.jp/
熊本大学 理学部	http://www.sci.kumamoto-u.ac.jp/index-j.html
鹿児島大学 理学部	http://www.sci.kagoshima-u.ac.jp/jhsrsrc/index.html
琉球大学 理学部	http://www.cc.u-ryukyu.ac.jp/~fukami/tua/index.html

