



## 「概日時計」

深田 吉孝 (生物化学専攻 教授)

私たちが一日周期で目覚めたり眠くなったりするのは、外界が明るくなったり暗くなったりするからではない。光や温度など外部環境の変化を遮断した地下実験室で生活しても、約1日周期の活動や体温のリズムが継続する。この実験結果から、われわれが体内時計を持っていることがわかる。ヒトだけでなく、植物やバクテリアを含めて多くの生物は体内時計をもち、朝になると植物は花を開いて受粉に備え、シアノバクテリアは窒素固定をやめて光合成に切り替える。このような生物リズムは、概(おおむ)ね1日周期という意味で概日(がいじつ)リズムと呼ばれる。英語では、ラテン語の約(circa)と1日(dies)を連ねた造語“circadian”(約1日)を使ってサーカディアンリズムと呼ばれる。

ヒトの睡眠や体温のリズム周期は約25時間で1日より少し長い。ところが

通常の生活では外部環境の変化が刺激となり、体内時計の位相を前進させて1日周期に同調する。この同調因子として、ほぼすべての生物が光を利用している。ヒトの場合、眼の網膜で受容された光情報は視神経を通して視覚を担う脳内領域に運ばれるが、ごく一部の神経は、わき道へそれて視床下部の時計神経に入力し、その時刻合わせを行う。ヒトは、朝に浴びる光でリズムの位相を1時間だけ補正して(前進させて)いる。いっぽう、生物実験でよく使われるハツカネズミの系統では、リズム周期が23時間に近いので、重要な位相同調(後退)因子は日没前の光である。野外の観察によると、夜行性のネズミは夕暮れになると巣穴の入り口に近づいて外を窺うという。巣穴の入り口で浴びる夕暮れの光を使って位相を後退させているらしい。

この数年、概日時計が24時間を刻む分子機構の解析が爆発的に進み、多くの時計遺伝子が見つかった。特定の時計遺伝子が活性化されてタンパク質に読みとられ、これが自らの遺伝子の活性化を抑制する、という「自己制御フィードバックループ」が概日時計の分子骨格であることがわかってきた。しかし、このような単純なループがなぜ24時間というひじょうに長い周期の分子サイクルを安定に生み出すのか、また、いかにして明暗サイクルなどの環境因子に同調しているのか、といった多くの疑問が残されている。このような研究課題に対して本研究科では、生物化学専攻の深田研究室が概日時計の発振機構と位相同調の分子解析に取り組んでいる。また、広い意味での生物のリズム現象として、体節形成の時計機構に武田研究室(生物科学専攻)が取り組んでいる。



## 「元素代替」

一杉 太郎 (化学専攻 助教)

ニホンオオカミ、トキ、イリオモテヤマネコ。これらは日本から絶滅した、あるいは絶滅が危惧されている動物たちである。人間の経済活動による地球環境変化や乱獲により、多くの動植物が地球上から姿を消してきた。同様なことが資源にも当てはまり、いくつかの元素が枯渇の危機にある。

街なかの金属が盗難に遭い、転売される事件はよく耳にするところである。先日黄金製の風呂が盗難にあったとか。これら事件の背景に、希少元素資源の価格高騰がある。経済活動の発展による希少資源の取り合いがこの主要原因になっている。このような希少資源をめぐる社会の動きは急であり、希少資源産出国は希少元素を戦略物資ととらえて囲い込みをはじめ、資源

ナショナルリズムとも呼ぶべき外交カードに使う動きもある。さらに、近年は投機対象にもなっており、急激な価格変動にさらされている。政府もこのような資源枯渇問題対策が重要と考え、4R、すなわち、希少資源のリサイクル(Recycle)、再利用(Reuse)、削減(Reduce)、元素代替技術(Replace)を念頭に置いたさまざまな取り組みを始めている。

とくに元素枯渇の危機にさらされているのが、インジウム(In)、タングステン(W)、ジスプロシウム(Dy)である。Inは透明電極、Wは超硬工具、Dyは強磁性体用材料として産業上不可欠な元素となっている。Inでは、“最短で2011年にインジウムが枯渇する”とのレポートが2006年に新エネルギー・産業技

術総合開発機構(NEDO)から公表されているほど、代替技術開発は急を要している。科学技術には、これら元素を使わずに、現行技術を代替するための原理や手段を社会に提供することが強く望まれている。

化学専攻の固体化学研究室では、In消費量を削減するため、二酸化チタン(TiO<sub>2</sub>)で透明電極の代替を目指す研究を進めている。チタン(Ti)はクラーク数(地殻中の元素存在度)が10番目と、大量に地球上に存在する。またTiO<sub>2</sub>は毒性がひじょうに小さく、食品添加物でもある。持続的発展可能な社会の実現に向け、安心・安全な物質による社会の構築が求められている。“元素代替”は科学技術が目指すべきひとつの方向性である。



## 「スノーボールアース」

田近 英一（地球惑星科学専攻 准教授）

「雪玉地球」というこのユニークなネーミングは、カリフォルニア工科大学教授で本研究科にも在籍したカーシュビंक（J. L. Kirschvink）博士によるもの。原生代末期（約6億年前）には地球の表面全体がほぼ完全に凍りついていたのではないかと、という仮説である。「全球凍結仮説」とも呼ばれる。

原生代末期に大氷河時代が訪れたらしいことは、20世紀前半から知られていた。ところが、当時の赤道域に大陸氷床（大陸スケールの氷河で山岳氷河とは異なる）が存在していたという確実な証拠が得られた。赤道域に氷床とは、いったいどんな状況だったのだろうか？それだけではない。同じ時期には酸化鉄が大量に形成されている。これは地球史において約10億年ぶりの出来事である。カーシュビंक博士は、

地球全体が凍結したと考えればそうした「謎」が説明できることに気がつき、この仮説を発表した。1992年のことである。

その後、氷河堆積物直後に熱帯性の炭酸塩岩（キャップカーボネート）が堆積しているという「謎」がクローズアップされた。しかも、キャップカーボネートに炭素同位体比の異常値が発見された。ハーバード大学のホフマン（P. F. Hoffman）教授らは、これらは全球凍結直後の温暖化と生物活動の完全な停止を示す証拠である、とする論文を1998年にサイエンス誌に発表し、スノーボールアース仮説は一気にブレイクした。

この仮説は、従来の地球史観を覆すもので、大論争に発展した。なかでも、光合成藻類が液体の水が存在できない

ような環境を生き延びたとは考えられない、という反論は深刻である。しかし、数々の「謎」を統一的に説明できる魅力から、現在では多くの研究者がスノーボールアース仮説を大筋で受け入れるようになった。

全球凍結は、地球史において約22億2千万年前、約7億年前、約6億5千万年前の少なくとも3回生じたらしく、大気中の酸素濃度の増加や、真核生物と多細胞動物の出現といった生物の大進化と因果関係があったのではないかと考えられるようになってきた。もし本当だとしたら、われわれがいるのも全球凍結のおかげということになる。

本研究科では、筆者が中心となって地球惑星科学専攻の多田隆治教授や橘吾吾助教らと理論的・物質科学的両側面から関連した研究を行っている。



## 「超紐理論」

松尾 泰（物理学専攻 准教授）

一般相対論と量子力学の統合は、通常の場の量子論で用いられる発散の処理（くりこみ）が困難なため、長年にわたり未解決の問題として残されてきた。ここ20年ほどこれを解決するものとして注目され盛んに研究されてきたのが、超紐理論（超弦理論、スーパーstring理論などとも呼ばれる）である。

超紐理論では物質の基本的な構成物質である素粒子を点ではなく、紐で記述されていると考える。場の量子論に現れる発散の原因は、素粒子が点であるために点の周りに現れる場の近距離の積分（紫外発散）である。粒子を紐に置き換えることにより、このような発散が弱められ、さらに超対称性（統計性の異なる粒子の間の対称性）により残った発散の相殺が起こる。その結果、くりこみを必要としない理論体系ができあがる。

超紐理論は時空の次元が10次元でないと矛盾が生じてしまうので、高次元から現実の4次元を構成する必要がある。このとき余った6次元は小さな空間にする必要があるが、この空間の形に依存してさまざまな素粒子が得られる。巧妙に構成を行うと現在知られている素粒子をすべて含むモデルも得られることが最近わかってきた。この意味では超紐理論は4つの基本的な力（電磁気力、重力、強い力、弱い力）を統一的に記述する理論体系（大統一理論）と考えられている。超紐理論は点の代わりに紐という1次元の物体に基礎を置くため、無限自由度の厳密な取り扱いができて初めて具体的な計算が可能になる。このような性格のため超紐理論は数学との関連がたいへん深くなり、代数学や幾何学とくに大きな影響を与えて、活発な境界領域が構成

されている。

また超紐理論はさまざまな理論構築のアイディアの実験場という側面ももっている。必ずしも直接、実験に結びつかないアイディアであっても、超紐理論の枠組みの中で純粋理論として発展し、その後より現実的な理論の中に組み込まれることがある。たとえば高次元中の膜のアイディアは初期宇宙モデルの構成に新たな視点を与え、強結合系と弱結合系の間の対称性（双対性）は核力の計算などに重力理論を用いるなどといった、まったく新しい手法を提供している。

超紐理論の研究は本研究科では筆者の研究室で行われている。また大統一理論や宇宙論に関連する境界領域の研究は物理学専攻の柳田勉教授、濱口幸一准教授、佐藤勝彦教授の各研究室で行われている。



## 「量子暗号」

村尾 美緒（物理学専攻 准教授）

暗号とは、メッセージに何らかの方法で細工をすることによって、第三者がそのまま読んでもメッセージの内容がわからないようにして通信を行うことである。昔は、一般人にとって、暗号乱数表を用いてメッセージを送信する共有鍵暗号などに触れることは、スパイ映画などに出てくる程度の日常的なものであったと思う。しかしながら今日では、インターネットの発展によって公共回線を通して秘密情報のやりとりを行う必要性が増し、暗号は日常生活に不可欠なものになっている。実際、ネットショッピングなどをする際にクレジットカード番号を安全に送信することができるのも、公開鍵暗号と呼ばれるタイプの暗号の恩恵である。

暗号では、通常、暗号化のための鍵と復号化のための鍵の2種類の鍵を用いる。前述の共有鍵暗号では、暗号鍵と復号鍵が共通の乱数列からなり、鍵を再利用したり外部に漏らしたりしない限り、鍵を持たない者がメッセージの内容を解読す

ることは不可能である。このタイプの暗号では、「アリス」と呼ばれる送信者と、「ボブ」と呼ばれる受信者の間で、「イブ」と呼ばれる盗聴者にばれないように乱数列を共有する必要がある。鍵は使い捨てのため暗号通信を続けると乱数列が足りなくなってくるが、暗号乱数表そのものをイブが盗聴を待ち受ける通信路で送ることはできない。さて、どうするか？

この解決策が、量子鍵配送（QKD）と呼ばれる量子暗号（Quantum cryptography）である。量子鍵配送は、光のもつ量子力学的な性質を利用して、イブが待ち受ける通信路を通してアリスとボブの間で乱数を共有する方法である。量子力学では、未知の量子状態を測定して状態を知ることができず（不確定性原理）、また、未知の量子状態のコピーを作ることできない（クローン禁止原理）ため、アリスとボブにばれないようにイブが盗聴をすることができない。また、エンタングルメントと呼ばれる量子力学的な非局所相関

の性質から、無条件安全性が保障されている。公開鍵暗号と呼ばれるタイプの暗号は、量子コンピュータの出現によって安全性が脅かされるのに対して、このタイプの量子暗号は、量子コンピュータが実現されても安全性が失われない。ひじょうに高価ではあるが、既に市販品も存在している。

ところで、量子鍵配送を行うためには、アリスとボブの間で認証が確立していることが前提となっている。イブがボブになりすましていることに気がつかなければ、アリスはイブとの間で秘密鍵を共有してしまう。現状の認証では公開鍵暗号の性質を使うため、量子コンピュータが実現されれば、認証の安全性が保障されなくなってしまう。そこで、理学系研究科の村尾研究室では、量子コンピュータが実現される未来において認証の安全性が保障されるような量子暗号システムである、秘匿量子計算を提案して研究を進めている。



## 「錯視とウェーブレット・フレーム」

新井 仁之（数学科 教授）

私たちがものを見ているとき、眼から入った外界の情報は網膜から始まって、脳のさまざまな領域で処理されている。このとき脳はどこでどのように情報処理を行っているのだろうか。これは知覚心理学や脳科学における主要な研究テーマのひとつである。現在ではfMRIの発展により、「どこで」の方はだいぶわかってきた。しかし「どのように」という部分、つまりどのようなアルゴリズムで情報処理が行われているかは解明されていない部分も多い。筆者はそれを明らかにするために、ウェーブレットの一般化であるウェーブレット・フレーム、とくにフレームレットを使った新しい視覚系の数理モデルの開発とそれによる視知覚の研究を行っている。ウェーブレットは1980年代から工学、物理学、数学の研究者により新しいタイプの数学的道具として研究が進められ、これまでさまざ

まな分野に応用されてきた。たとえば画像データ圧縮の新方式JPEG2000にも使われている。これに対して、ウェーブレット・フレーム、フレームレットは2000年前後から研究が始められたものだが、ウェーブレットに比べ冗長であるためデータ圧縮への応用などには適さず、現時点での応用研究はまだ少ない。しかしフレームレットをうまく工夫して構成すると、視覚系のニューロンが連合して作る方位選択性と周波数選択性を兼ね備えた受容野の機能のひじょうに良い数理モデルを作れることを筆者らは見出した。しかも計算の高速アルゴリズムも可能であり、計算機実験に適していた。これを用いてわれわれは、まず視覚系の数理モデルの骨組みを作った。次に視覚野のニューロンが行うと考えられる統合的情報処理の数理モデリングを行い、その骨組みに組み込むことにより視覚の数理モ

デルを設計した。

この視覚の数理モデルを用いて、筆者らは錯視、すなわち視覚の錯覚の研究を進めている。もし数理モデルが適切ならばそれを実装した計算機も人間同様、錯視を起こすはずである。現在までにこの数理モデルによる統一的な方法で、明暗の錯視や色の対比錯視などを発生させる計算機シミュレーションを行うことができた。このことは錯視がどのような情報計算により発生するのかも示唆している。新しい数理科学的方法による錯視の研究が可能になってきたといえよう。ところで錯視を起こすアルゴリズムで自然画像を処理してみると、画像が鮮鋭化された。錯視は視覚系の欠陥であるという意見もあるが、われわれの研究結果は、むしろ錯視がものをよく見ようとするために形成された視覚系の副産物であることを示している。