

nature DIGEST

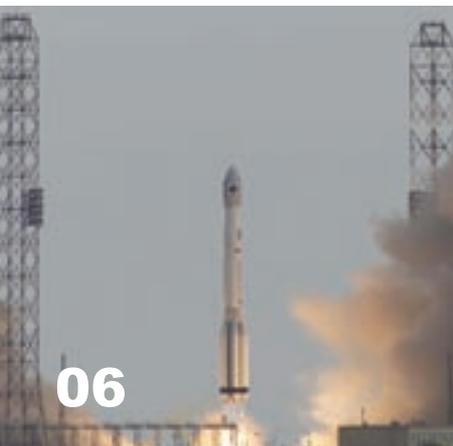
日本語編集版
FEBRUARY 2005
VOL.02, NO.2

2

<http://www.naturejpn.com/digest>

世界物理年：2005

アインシュタインはもういない



nature DIGEST

02 volume 2 no.02
February
www.naturejpn.com/digest

© 2005 年 ネイチャー・ジャパン
掲載記事の無断転載を禁じます。

editorial

世界物理年 2005 :
アインシュタインはもういない 02

editorial

アインシュタイン亡き今の、物理学 02

highlights

vol. 432 no. 7019, 7020 vol. 433 no. 7021, 7022 04

news

ロシアのロケット発射基地周辺の
健康被害調査 06
Jim Giles

news feature

インフルエンザと闘うベトナム 08
Peter Aldhous

21世紀の若きアインシュタインたち 13
Sarah Tomlin

量子とヨガとコンピューター 14
Haim Watzman

宇宙の始まりを目指す長距離走者 16
Quirin Schiermeier

physical sciences

相対性理論の進展の概略 18
A. Einstein

news and views

糖尿病：インスリン抵抗性に勝つ方法 22
Marc Montminy and Seung-Hoi Koo

銀でできたナノスイッチ 24
Jan van Ruitenbeek

commentary

バルーク計画を再考する 26
C. Paul Robinson

発行人：アントワーン・ブーケ
編集：津田純子、セラ・ハリス
デザイン/制作：村上武、佐藤恵
広告：浅見りの子
マーケティング：吉原聖豪

ネイチャー・ジャパン株式会社
〒162-0841
東京都新宿区弘方町 19-1
エムジー市ヶ谷ビル 5階
Tel. 03-3267-8751 Fax. 03-3267-8746

アインシュタイン亡き今の、物理学

Einstein is dead

Nature Vol.433(179)/20 January 2005

物理学の世界に次の革命が起こるまでの間、物理学の栄光の相当部分は工学が担っていくと思われる。工学の分野で相当の成果を挙げている物理学者たちが、そのことにほとんど言及しないのは残念なことだ。

論説

むかしむかしあるところに（そして今も）、金属の薄板を製造する多国籍企業があった。ある日、そこで働く研究者たちは、製造プロセスの信頼性を高める方法を思いついた。そして工場で使っている圧延ローラーのために熱伝導方程式を解き、その解を縮尺モデルで検証して、圧延薄板の厚みの誤差を大幅に減らすことに成功した。この薄板メーカーの主要取引先だった金属缶のメーカーは、たいそう喜んだ。それに原材料の消費量や不良品が減ったことで、数億円にのぼるコスト削減に役立ち、消費者も得をした（かもしれない）。おまけに物理系研究者たちにもボーナスが出たかもしれないというお話である。

このような薄板メーカーの研究を思うと、我々はずいぶんと遠くに来てしまったようだ。20世紀の物理学と関連技術のほとんどは、特殊相対性理論と量子力学世界という双壁をなす革命的なパラダイムを基盤としていた。今年、アインシュタインがこれらの分野に関する先駆的な論文を発表してから100年をむかえる。全世界の物理学者はたくさんの方に出席し、芸術作品の創作を委嘱され、お祭りを楽しんでいる。世間では生物学こそが21世紀のエキサイティングな研究分野だとする宣伝が盛んに行われ、若者の間では物理学への関心が低下している。こうした悪条件にもめげず、物理学者は、この記念すべき年を祝うために全力を尽くしている。

アインシュタインは物理学の守護聖人であるだけでなく、公正性、そして科学それ自体のために科学を探究しようという志の象徴だ。また、より広く一般市民にとっては魅力的な老紳士でもある。そのため、英国とアイルランドの物理学者たちが2005年を「物理年」ではなく、「アインシュタイン年」と命名することに決めた点にさほどの意外性は感じられない。しかし、アインシュタインが亡くなってからもう長い年月が経っている。彼の考え方、スタイル、そして彼が残した遺産は今でもインスピレーションにあふれているが、現実世界における量子論の否定や彼の夢だった統一場理論については、量子絡み合いや、時空構造についてのより深いパラダイムから20世紀の法則を導き出そうという（それは深遠であるかもしれないが）極めて難解な試みの導入と展開に取って代わられてしまった。

「物理年」の焦点をアインシュタインばかりに当てていると、先ほどの薄板メーカーの話の重大な教訓、すなわち、物理学は宇宙を理解する（例えば「ダークマター」とか「ダークエネルギー」を知ろうとする）上で中心的な役割を果たしているだけでなく、有益な、時にはインスピレーションにあふれたモノづくりにとっても大切な役割を持つということが忘れられてしまう。モノ作り、応用物理学の話のなかで、金属の薄板は「平凡」な側に位置している。その対極に位置する物理学として浮かぶのは、先頃、アップ

nature

ル社 CEO のスティーブ・ジョブズが最新型 iPod の発売を発表した際の言葉である。「ほとんどの人は、製品の見かけのことをデザインだと誤解している。そうではない。デザインとは、製品がどのように機能するのか、なのだ」セクシーなデザインとは、工学技術そのものがセクシーであり、その背後にある科学がセクシーであることを意味するのだ。

「タクシー運転手のための物理学」という名のコンクールを創設したブリストル大学（英国）の理論物理学者 Michael Berry の言葉にも耳を傾けてほしい（*Physics World* December 2004, p. 15; <http://physicsweb.org/articles/world/17/12/2>）。彼は、タクシーの中で CD プレーヤーとカーナビの構造を説明して、運転手にいかに物理学が面白いかを納得させた話をしている。人々が物理学の重要性を理解できないのではないかという点は、さほど心配することはないだろう。この点については、「世界物理年 2005」の主催者が、同年を祝うイベントとして行った 10～16 歳の若者によるポスターコンクールが称賛に値する。それよりも心配なのは、大学や高校などでの話である。物理学の重要性を称賛して伝えたり、それに、若者にとって重要な就職に関する適切なメッセージを送ったりということをほとんど重視せず、そういった着想も見られないのだ。これは今年に限った話ではない。

モノ作りという課題によってインスピレーションを受けることについて、現代の多くの若者たちはこれまでの世代の若者にまったく劣ってなどいない。量子的不確定性にもかかわらず、驚くべき精度でのエンジニアリングを行っているし、見事な機能設計を生み出し、画期的、有用でなおかつ社会に変化をもたらすような日用品を作り出しているのだ。*Nature* の論文ページをめくれば、21 世紀の製造業の基礎をなすような知見である原子・分子状態の量子制御、量子情報やオプトエレクトロニクスにおける研究の進展が示されている。

こういった論文の著者の一部は、今後、工学分野で興味深いキャリアを重ねていくことが予想される。各種学会による意識調査で何度となく示されているように、物理学を専攻した卒業生の多くは工学技術や情報技術の分野において高給で充実した職を得ている。ところが、このような調査を行った学会や政府、物理学者一般は、この情報を一般市民や子どもたちにほとんど伝えてきていない。世界物理年の今年、アインシュタインが偉大だったというメッセージを詳しく繰り返し伝えるのも大切なことかもしれないが、上述したような「有望で役立つ物理学」のメッセージを伝えることもまた、確かに大切なはずである。■

化学反応の現場を画像化

Picturing the place where chemistry happens

窒素分子を巡る電子軌道が画像化された。この新しい技術は、化学反応の間に起こる電子の運動の変化を直接画像化するのに使えそうだ。D M Villeneuve たちは、数フェムト秒の長さの強力なレーザーパルスを用いて、単一の窒素分子から電子を揺すって引き離してから戻し、光を放出させた。電子が分子に衝突すると、放出されるレーザー光のスペクトルはその衝突角度によって変わる。一連の異なる衝突角度にわたるスペクトル変化を測定することで、電子が通常存在する領域、すなわち軌道の画像を描くことができた。

「近い将来、化学反応が起きる間に変化する分子結合の様子を直接見るできるようになりそうだ。これは、化学反応の最も基本的なステップの1つを考察する手がかりとなるだろう」と、H Stapelfeldt が News and Views で述べている。

16 December 2004 Vol.432/Issue no.7019 articles p.867, N&V p.809 参照

X線ホログラフィー

Lensless imaging at the nanoscale

ナノテクノロジーの時代である今、ナノ構造を観察でき、かつ現在の科学技術の速度限界である10億分の1秒より速い時間スケールで調べられる技術が追求されている。X線の直接結像の分解能に限界を与えるレンズを使わずにナノ構造のX線像を記録する新しい方法では、こうした測定が可能になるかもしれない。レンズによる結像のかわりに、コヒーレントなX線散乱パターンが反転されて実空間の像となるのである。原理的には、空間分解能の限界は軟X線の波長だけで決まり、現在レンズで達成できる分解能の10倍になる。表紙は、金属薄膜中にランダムに存在する磁区の様子を分光学的にコントラストを上げて示したX線ホログラフィーによる図。空間分解能は50 nmである。この値によって、X線ホログラフィー法が今日の実用的なX線結像技術としての地位を



確立したと言え、将来はX線レーザーを用いて超高速の画像を撮れる可能性もでてきた。
16 December 2004
Vol.432/Issue no.7019
letters p.885 参照

赤ちゃんの命をつなぐ栄養リサイクル

Recycling nutrients helps babies survive birth

赤ちゃんは、胎盤からの栄養供給を絶たれ、まだミルクを吸い始めていない誕生直後、突然厳しい飢餓状態におかれる。今回、赤ちゃんがこの期間を乗り切れるのは、自身の細胞の内容物を栄養としているためであることがわかった。

マウスの新生仔を対象に、水島昇たちは、自食作用（オートファジー）と呼ばれる細胞現象が誕生直後に高まり、数時間活発な状態に保たれると報告している。自食作用の際、細胞は自食胞と呼ばれる消化機能をもつ袋状の小器官内で細胞質の成分を分解する。

自食胞を形成できないように遺伝子操作したマウスは、生後一日以内に死んでしまい、アミノ酸量が著しく減少していることがわかった。水島たちは、エネルギー源として、また新しいタンパク質の構成単位として用いられるアミノ酸の産生に、誕生直後の自食作用が不可欠であると示唆している。

23/30 December 2004 Vol.432/Issue no.7020 letters p.1032, N&V p.963 参照

もっと安くできる遺伝子合成

Gene synthesis gets cheaper

実験室における遺伝子合成に大変革を起こす可能性のあるDNA配列合成法が開発された。プログラム可能な「DNAマイクロチップ」を使うこの方法で、遺伝子合成に必要な費用の大幅な削減が始まりそうだ。

DNAマイクロチップには、オリゴヌクレオチドと呼ばれる短いDNA配列が数千種結合している。使用するオリゴヌクレオチドは2組で、「構築用」オリゴヌクレオチドは、対応する遺伝子配列の複製の鋳型となる。もう1つの「選択用」オリゴヌクレオチドは、エラーを最小限に抑えて正しい配列を増やすのに使われる。次に1段階の反応でこれらの短いDNAをつないで長い配列を組み立てる。この方法のテストとしてG Church たちは、リボソームと呼ばれるタンパク質合成装置の一部を形成するのに必要な21種類の大腸菌遺伝子全ての構築に成功した。また構築用オリゴヌクレオチドの配列を微調整することで、これらの遺伝子がタンパク質に翻訳される効率を高めることができた。これは、完全な人工リボソームを作るという目標に一步近づくものである。この手法がうまくいくなら、遺伝子配列を組み立てるのに必要な費用は急

激に減るだろう。現在1ドルで合成できるDNAはほぼ9文字だが、新しい方法では1ドルで20,000文字の極めて正確なDNAの合成が可能となるかもしれない。

23/30 December 2004 Vol.432/Issue no.7020 letters p.1050 参照

地球に降り注ぐ宇宙の塵

Cosmic dust on Earth

隕石の煙粒子は地球外起源の粒子が地球大気に突入して燃え尽きるときに形成される。この過程に関連する金属原子は惑星間粒子に対する代理指標として用いられるが、こうした金属原子がどういった運命をたどるのかは長い間わかっていなかった。今回グリーンランド氷床コアの解析から、イリジウムと白金の流量が、過去1万年にわたり、そしておそらくは最終氷期の間を通じて、地球外物質の定常的な降水量と一致することが明らかになった。モデル計算では、宇宙からの物質のほとんどは、地表へ降り注ぐ前に高度60 km以上での卓越風の流れにより極域に運ばれ、このような隕石物質の降下は全球で年間14 ± 5 キロトンになることが示唆されている。

23/30 December 2004
Vol.432/Issue no.7020
letters p.1011 参照



シジュウカラが教える小進化のヒント

Great tits show how differences can flourish

シジュウカラ (*Parus major*) を長期にわたって調べた2つの研究から、隣り合う個体群同士で個体がしょっちゅう行き来しても遺伝的な多様性が維持される仕組みが明らかになった。専門家たちはこれまで、近接する個体群間では遺伝子が行き来し（これを遺伝子流動という）、2つの個体群の遺伝子プールが混じり合って一樣になるだろうと考えてきた。オランダのフリーラント島にすむシジュウカラは、生息する地区が異なると産む子の数が結構違う。島の西部のシジュウカラでは東部のものに比べて、1回の産卵で産む卵の数（一腹卵数）が平均して1.15個多いのだ。これはなぜなのか。E Postma と A J van Noordwijk の報告によると、一腹卵数が少ないほうが生存の確率が高まって自然選択に有利だが、島西部への外部からの移住率が東部より高いため、西部ではこの選択の及ぼす

影響があまり強く現れないのだという。別別の報告では D Garant たちが、英国のワイトムの森にすむシジュウカラについて、小規模の多様性に関する同じような例を報告している。ここに暮らすシジュウカラは、林地の東部地区のものは一般に体が小さく、北部地区では大きい。これは、東部地区では密度が高く、体が大きいシジュウカラは巣を作るためにどこか他の場所に移る確率が高まるからである。「この2つの研究報告は、小進化のしくみに新たな光を当てるものだ」と D W Coltman が News and Views で解説している。

6 January 2005 Vol.433/Issue no.7021
letters p.60,65, N&V p.23 参照

抗生物質による神経の保護

Neuroprotection offered by antibiotics

神経機能の喪失は、ときには致命的ともなりうる衰弱性疾患につながることもある。そのため、このような神経細胞間の連絡を促す新たな方法を見つけることが重要になる。J Rothstein たちは、神経系の主要な興奮性神経伝達物質であるグルタミン酸の輸送体に着目し、これを増産する方法を報告している。神経の機能不全を防ぐのに有望な方法となるかもしれない。

今週号の報告によれば、ある種の抗生物質によって、グルタミン酸輸送体の増産が起こるといふ。さらに、この増産はこの抗生物質が適切な遺伝子を活性化することによって起こることもわかった。著者らはこの方法を使って、マウスでの輸送体の発現を増加させたと述べている。

彼らは致死性疾患である ALS (筋萎縮性側索硬化症) の動物モデルでこの抗生物質を使うことにより神経の消失が遅くなることを実証した。今回の研究で、このような抗生物質に予想外の神経保護作用があることが明らかになった。

6 January 2005 Vol.433/Issue no.7021
letters p.73 参照

脳はどうやって感情を認知するのか

How the brain detects emotions

人は常時他人の顔を見て、相手が嬉しがっているか悲しがっているか、怒っているか怖がっているか、などの気分を判断する。しかし脳の扁桃体に損傷をもつ患者は、顔から恐怖を読みとることができなくなる。最新の研究で、なぜそうなるのかがわかった。両側の

扁桃体に損傷を持つという珍しい被験者の眼球運動を調べたところ、顔から恐怖を読みとれないだけでなく、他人の目を見ることができなくなっていたことがわかった。しかし、目を見るように教えられると、恐怖認識は正常になった。この結果は、人の脳は環境中にある重要な社会的手掛かりを積極的に探していること、自閉症などの病気で見られるこの機構の障害は、患者に外界の見方を変えるよう教えることで、克服できる可能性があることを示している。



6 January 2005 Vol.433/Issue no.7021

letters p.68, N&V p.22 参照

恐竜を餌食にした、たくましい哺乳類

Beefy mammal feasted on dinosaurs

中国の化石ハンターたちが、大型犬に近い大きさの1億3,000万年前の哺乳類の新種を見つけた。この *Repenomamus giganticus* は恐竜の子どもを獲物にするほど体が大きく、中生代の哺乳類はどれもみな体が小さめだったとする通説は今回の発見で大きく揺らぐことになる。

報告した Y Hu たちによると、*R. giganticus* の体長は1メートルを超え、頭骨もごく近縁の *R. robustus* の50%増しの大きさである。この化石は、近年多数の恐竜化石が見つかった中国北部の遼寧省で出土した。*Repenomamus* 属に属する仲間はおそらく肉食だった、と Hu たちは考えている。近くで見つかった *R. robustus* の化石には、胃の内容物に恐竜であるプシッタコサウルスの子どもの骨が含まれていたのだ。Hu たちによると、当時のこれらの哺乳類の餌は多種多様で、肉だけでなく植物も食べていたと思われる。その歯や顎はおそらく生きて獲物を捕食するのに十分なほど強かっただろうという。

「これらの最新の知見を踏み台にして新たな疑問や推測が今後次々と浮上してくるに違いない」と AWeil が News and Views で論じている。

13 January 2005 Vol.433/Issue no.7022

letters p.149, N&V p.116 参照

イソギンチャクがきっかけ

Evolution of complexity

Wnt ファミリーのタンパク質は、進化の過程で高度に保存されており、胚発生で細胞がたどる運命を支配するシグナル伝達分子であって、癌などのヒト疾患に関与すると見られている。今回この Wnt ファミリーの進化の根源が、意外にも動物界の系統の根元深くまでたどれることが明らかになった。表紙 (提供: T Nüchter) にあるイソギンチャクの一種 *Nematostella vectensis* はクラゲやサンゴを含む刺胞動物の仲間であり、こうした刺胞動物は左右相称動物が進化するより前に現れた。下等動物であるイソギンチャクが複雑性を備えているとは予想されていなかったが、このイソギンチャクの胚には Wnt 遺伝子がほぼ全種類そろっていて複雑な動きを遂行していることが今回わかった。したがって、太古に登場したこのパターン形成機構がきっかけとなって、カンブリア紀爆発として知られる体制の多様化が進んだ可能性がある。



13 January 2005

Vol.433/Issue no.7022

letters p.156 参照

遺伝子組換え原虫由来のマラリアワクチン

Malaria vaccine from GM parasites

効果的なマラリアワクチンの大量生産が将来可能になるかもしれない。マラリアによる死者は毎年100万人を超えており、特に子供が多く、サハラ砂漠以南のアフリカで深刻である。世界中では3億~5億の人がマラリアに罹患している。急性のマラリアでは発作が起こり、マラリア原虫は従来の治療法や予防薬に対する耐性がどんどん強くなっている。感染した雌のハマダラカ *Anopheles* に刺されると、マラリア原虫 *Plasmodium* が体内に入って肝細胞に感染する。今回 A-K Mueller たちは、逆遺伝学手法を用いて原虫の *uis3* 遺伝子を除去し、原虫を弱毒化した。この遺伝子は、原虫が生活環の次の段階へと進んで、最終的にマラリアを発症させるのに必要とされる。弱毒化したマラリア原虫を注射したマウスは、正常な感染力をもつマラリア原虫に対する免疫を獲得した。効果的なヒトワクチンへの道が開けそうだ。

13 January 2005 Vol.433/Issue no.7022

letters p.164, N&V p.113 参照

ロシアのロケット発射基地周辺の健康被害調査

Study links sickness to Russian launch site

Nature Vol.433(95)/13 January 2005

カザフスタンでの宇宙ロケット発射によって、発射台周辺の住民が重い病気にかかっているとする未発表論文を *Nature* は入手した。

国際宇宙ステーションへの飛行を目指す数多くのロケットが、バイコヌール宇宙基地から発射されている。ところが、発射直後に燃え尽きる打上げロケットから排出される毒性の強い燃料が同基地周辺の過疎地域に落下してきており、それが深刻な健康上の問題を引き起こしている、とノボシビルスク（ロシア）にあるベクター（国立ウイルス学生物工学研究センター）の研究者たちが主張している。汚染区域内における一部の疾患（内分泌障害や血液疾患など）の発症率が、地域全体での平均値の2倍を超えているというのだ。

この研究論文を読んだロシア国外の疫学研究者は、データ収集方法の詳細がわからない現段階では、今回の新知見を検証するのは難しいと語っている。また、ロシア国内の医療記録は時に十分に整理されていないケースがあるため、今回の研究結果は慎重に取り扱うべきだが、それでもこの問題は世界各国が関心を持ってしかるべきものだとも言う。バイコヌール宇宙基地は、Rosaviakosmos（ロシア航空宇宙局）によって運営されており、米国航空宇宙局（NASA）や欧州宇宙機関（ESA）のロケット打ち上げも同基地から有償で行われている。

ベクターの疫学研究者 Sergey Zykov をリーダーとする今回の研究報告論文では、シベリア南辺の山岳地帯に位置するアルタイ共和国の子供たちについて最も詳細に記述されている。Zykov がアルタイ共和国を研究対象としたのは、ロシアの一部の打上げロケットにジメチルヒドラジンなどの推進燃料が使用され、それによる汚染が同共和国内で続いているからだ。

Zykov は、通常のロケット発射で数十リットルの未燃焼燃料が数平方キロメートルの区域に撒き散らされていると推測している。「この推進燃料は、たちの悪い有毒物質です。大きさ1杯のヒドラジンをスイミングプールに入れてみればわかります。プールの水を飲めば、誰でも死にます」欧州宇宙研究技術センター（オランダ・ノルドバイク）に所属するエンジニア Fabio Caramelli は、このように説明した。

病気の不安

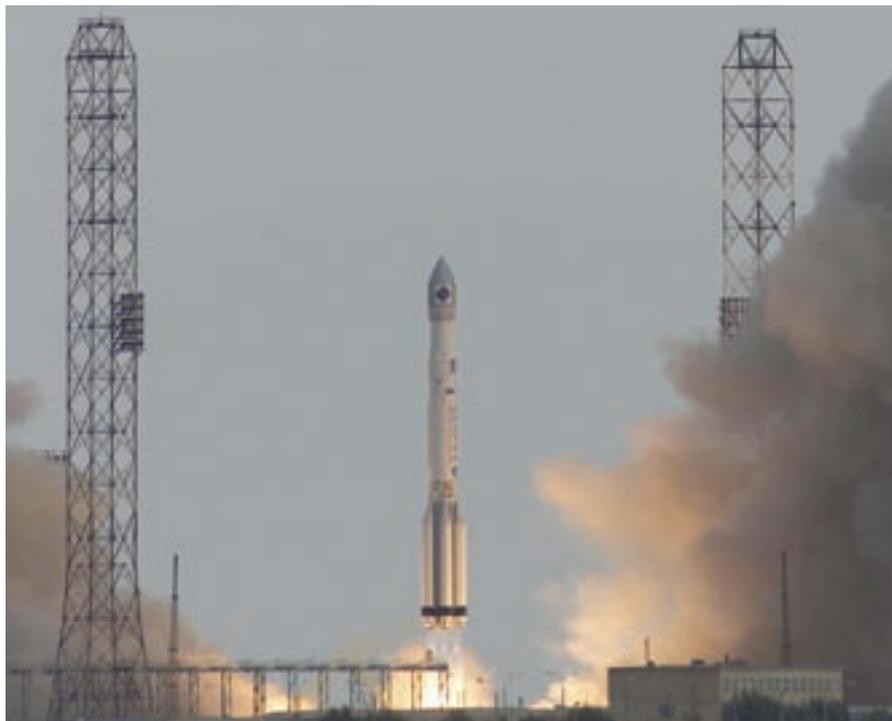
Zykov は、2つの汚染地域で約1,000人の子供たちについて1998～2000年の医療記録を調べ、近郊の、汚染のほとんどない対照地域に暮らす330人の医療記録と比較した。すべての疾患事例を分類した結果、3年間の調査対象期間に汚染による影響を最も大きく受けた地域に住む子供たちが治療を受けた確率は、対照地域の子供たちと比べて最大2倍に達し、治療期間も2倍の長

さを必要としていたと、Zykov の研究チームは結論づけた。

地元の環境団体が汚染に反対する運動を行ったが、国外への影響力はほとんどなかった。Zykov は、これが現実の問題であることを確認するために必要な詳細な医事統計を初めて収集できたと述べている。Zykov の研究グループは現在、研究規模を拡大させるための資金を求めている。

これに対して一部の論者は、ロシア当局は汚染問題を認めるつもりがないのではないかと考えている。バイコヌール宇宙基地は、世界で最も頻繁にロケット発射を行っており、ロシア政府にとってかなり大きな収入源となっている。匿名を条件に同国の宇宙産業の専門家が語ってくれたところによれば、1回の商業用ロケット発射につき最大2,500万米ドル（約26億円）の利益が推定されている。

Zykov によると、この問題についてロシア航空宇宙局の関係者との話し合いがもたれたが、航空宇宙局以外で行われる研究については「否定的な態度」だという。また、バイコヌールでのロケット発射に反対する運動を行ったある研究者は、旧ソ連邦のKGBを主に継承したFSBによる嫌がらせを受けたと主張している。化学反応速度論・燃焼研究所（ノボシビルスク）に所属する生態学者のSergey Pashenko は、2000～2004年にわたって、同じアルタイ共



バイコヌール宇宙基地で発射されるロケットの未燃焼燃料が、シベリアで病気を引き起こしているかもしれない。

S. CORVA/ESA

和国のビスクにあるロケット打ち上げ試験場による環境汚染を調べた。その際に彼は2度逮捕され、測定機器が没収されたという。

公式見解

Nature の取材に対し、ロシア航空宇宙局は、Zykovの研究による結論を認めなかった。広報担当のVyacheslav Davidenkoによれば、航空宇宙局では地元住民の健康調査を行っており、ロケット発射による問題は見つかっていないとのことだ。ただ、航空宇宙局は汚染の発生を認めており、汚染区域では補償措置が実施されていると彼は語った。ただし補償額の詳細に関する資料は提供されなかった。またDavidenkoは、汚染区域は人口が極めて少ないため、燃料による人的被害はほとんどなく、むしろ健康上の問題はアルタイ地方の生活水準（ロシア全体で見ると平均以下である）が原因となっている可能性が高いと語った。

ロシアの研究者については、不安を

抱かせるような新知見を作り出すことで西側から研究資金を得ようとしたと非難された過去の事例に注目する論者もいる。英国の癌研究所（オックスフォード）に所属する疫学研究者 Valerie Beral は、1986年のチェルノブイリ原発事故に関する研究論文の一部に再現不能な結論を示しているものがあつたことを指摘する。Beralは、バイコヌール基地の問題には当然注意を払うべきだと語る一方で、今回の研究にも同じ問題が潜んでいるかもしれないと警告している。

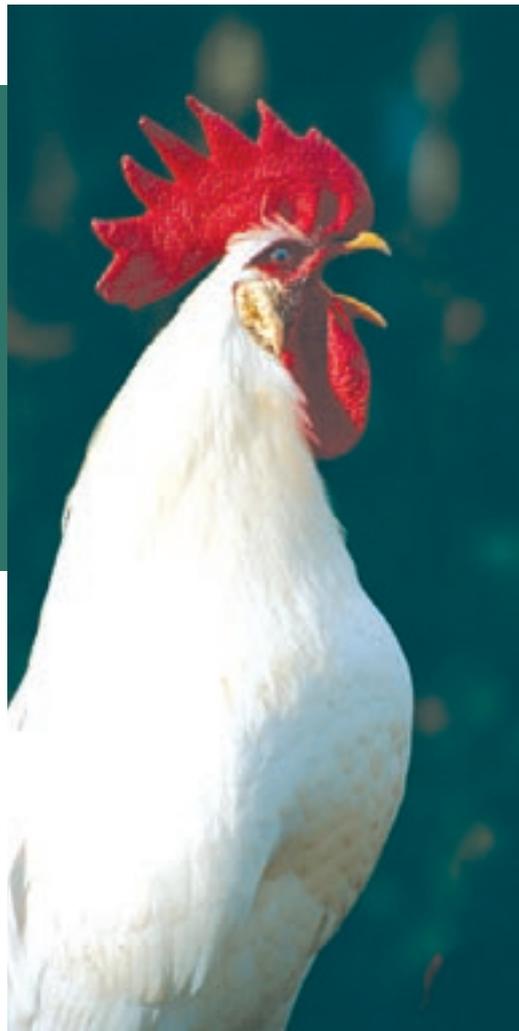
ただ、今回の研究は、評判の高い国際科学技術センター（モスクワ）の支援を受けている。Zykovによれば、研究には35人の研究者が参加しており、同センターやその他の資金提供団体から毎月約11,000米ドル（約120万円）を得ている。

ロシア航空宇宙局は、ヒドラジンに代わる燃料の使用を検討しているが、早急に新燃料に転換する計画はない。ロシアでは3つのタイプのロケットに

ヒドラジンが使用されており、その1つである「プロトン」打上げロケットは、今年、バイコヌール宇宙基地での通信衛星2機の打上げに使用される予定になっている。

NASAもESAもロケット発射にバイコヌール宇宙基地を使用しているにもかかわらず、同宇宙基地が関係する問題に対する責任を認めていない。NASAは、汚染の事実を認識しているが、ロシア航空宇宙局は発射後の打上げロケットから排出される燃料を削減する努力をしており「事態は好転している」との判断を示している。また、ESAの報道官は、ESAはバイコヌール宇宙基地で提供されるサービスを購入しているだけで、ロケットに対する責任はないと語った。NASAやESAが使用している他のほとんどの主要な宇宙基地（例えば米国フロリダ州ケープ・カナベラル宇宙基地）では、ロケットを海上に向かって発射している。 ■

JIM GILES, London



Vietnam's war on flu インフルエンザと 闘うベトナム

Peter Aldhous

Nature 433 (102-104)/13 January 2005

2004年に鳥インフルエンザによる大打撃を受けたベトナムでは、今度は人間を脅かすインフルエンザの流行が起ころうとしているかもしれない。しかし Peter Aldhous が報告するように、農村部の研究者たちには、このリスクを調査する設備や情報が十分あるとは言えない。

1月下旬。例年のこの時期、ベトナムではホーチミン市の車道をけたたましく走るオートバイの音がやみ、オフィスや商店のシャッターは下ろされる。この「テト」と呼ばれる旧正月の休みは休息の時であり、また一族が集う時でもある。

ところが、昨年旧正月、街はのんびりとした風景からはかけ離れていた。街に蔓延した病気がその原因だった。市内の熱帯病病院と、その近くにあるパスツール研究所では、ウイルス学者たちがテトの祝祭そっちのけで、呼吸器に異常を訴えた患者から採取した鼻や喉のぬぐい液の分析を慌ただしく行っていた。致死的な H5N1 型の鳥インフルエンザウイルスを検出するため。「1日10時間は働いていました。週に1度も休みはありませんでした」と、同病院のウイルス学者 Tran Tan Thanh は振りかえる。

そして今年のテトを迎え、不安感が

再び広がりつつある。昨年12月30日以降、2人のベトナム人少年が鳥インフルエンザで死亡した。また16歳の少女が1人、未だ危篤状態にある。

H5N1型の鳥インフルエンザは2004年、アジア全体の家禽の間に拡がった。人間の症例はこれまで、ベトナムで少なくとも22人、タイで12人の死者を数える。万が一、このウイルスが進化して簡単に人間から人間への感染が可能となれば、H5N1型ウイルスは、世界中で数百万人もの生命を脅かす流行病となる恐れがある。流行メカニズムの解明や、またウイルス監視のためにやるべきことが十分行われていないと公衆衛生の専門家が危惧する理由はここにある。

ベトナムは特に注目されている。特にひどいウイルス被害を受けているだけでなく、いまだに国民の多くがニワトリやアヒルのそばの不衛生な環境でその日暮らしをしているからだ。明るい面

もある。ウイルスの適切なモニタリングを可能とする研究環境が整いつつあることだ。しかし、資金不足に悩まされており、流行が今後どう展開するかと考えている現場の専門家たちは、国際社会がそうした取り組みに高い優先順位を与えていないと不満を訴えている。

「たくさんの活動が進められてはいますが、多くのエネルギー、多くの資金、そして多くの情報交換がこれまで以上に求められています」と、首都ハノイにある世界保健機関 (WHO) の出先機関で伝染病監視部門の責任者を務める Peter Horby は語る。

最初の流行

昨年、ヒトでの最初の症例が見つかるより以前、H5N1型のインフルエンザは数か月間にわたってアジア全体の家禽に拡散し、地域全体における大規模なニワトリの処分が行われた。研究者たち

は、このウイルスがヒトに感染する可能性があることを知っていた。そして昨年1月8日、ハノイにある国立衛生疫学研究所 (NIHE) のウイルス学者 Le Thi Quynh Mai の研究チームは、この不安が的中したのを知ることになる。ベトナム人の H5N1 型ウイルス感染患者が1人、確認されたのだ。

その後、感染者の報告は相次いだ。活動の最前線にいる人々にとって、初期段階での状況は一刻の猶予も許されない、また過ちも許されないものだった。「当時はまさに危機的な状況での診断でした」と、熱帯病病院に設立予定だったウイルス学研究室立ち上げに協力するため、そのわずか数か月前にアムステルダムから赴任していた Menno de Jong は語る。

Mai たちが最初の患者を確認してからあとの数週間、Mai の研究室とホーチミン市にある主な2つの臨床検査室は、WHO と米疾病管理予防センター (CDC) が派遣した28人の国際専門家チームとともに密接に研究を進めた。外国人研究者たちは、必要不可欠な試薬類と相当の専門技術を携えていた。H5N1 型インフルエンザに罹患した最初の10人のベトナム人患者について報告した論文は直ちに医学誌 *The New England Journal of Medicine* に投稿され、2月25日にオンラインで速報された¹。

公衆衛生上の緊急事態へのベトナムの対応は総じて、控えめながらも賞賛を得た。「その環境と資金状況を考えれば、ベトナムはよくやっていると思います」と Horby は語る。当初からベトナム政府は、前年に中国が踏んだ轍は避けると決めていたようだ。重症急性呼吸器症候群 (SARS) の出現に対する海外からの支援活動が、秘密主義のために阻まれた二の舞は演じまいと言うわけだ。ホーチミン市立パスツール研究

所の微生物免疫学部門を率いる Phan Van Tu は今回の取材の席で、南ベトナムの20の各地域における H5N1 型インフルエンザの全症例を記した公的データシートを見せてくれた。「我々には隠すことは何もありません」

ただし、当初の勢いは保たれていない。初期診断と疫学的調査を支援する緊急対策チームは久しく派遣されていない。依然として、H5N1 型を始めとするインフルエンザウイルス監視の必要性はほとんど変わらない。流行性のインフルエンザウイルス株が拡がるすべての要素はいまだに残っており、感染報告は続いている。最近の一群の症例に加えて、昨年の8月から9月にかけては4人の死者が確認されている。

危険と隣り合わせに暮らす

ベトナム経済は急速に伸びていると言ってよい。しかし、国民の多くは今でも小規模農業にたずさわる。住まいのまわりでニワトリやアヒルを放し飼いにする生活だ。「ベトナムの農村部は事実上、囲いのない1つの巨大な養殖場だ」と、国連食糧農業機関 (FAO) ハノイ事務所の代表 Anton Rychener は語る。専門家も同意するように、この状況はまさに致死性の高いインフルエンザ株の理想的な温床となる。さまざまな家畜や人間の間を通過し、またその過程で遺伝物質が混合することで、致死性の高いインフルエンザ株出現の可能性が高まる。

似たような状況は中国南部でも見られる。ただし同地域では2004年、H5N1 型ウイルス感染者の報告はなかった。中国においてはおそらくこれが真の状況なのだろう。だが、家禽の間でインフルエンザの拡がりが見られるカンボジアやラオスで H5N1 型ウイルスによる犠牲者がいないことを信ずる専門家はまずいない。この貧しい2か国で



鳥が近くにいる生活環境のために、H5N1 型ウイルスに感染した少なくとも20人の子供や若年成人の死亡が報告されている。

Peter Aldhous

は、伝染病監視システムはなきに等しい。タイでは死者が報告されている。しかし、順調な鶏肉の輸出を保護したいという思惑から、実際の感染規模の公表が妨げられているのではないかと個人的に疑念を抱く専門家もいる。

だからこそベトナムにとっては、いまが H5N1 型インフルエンザによるリスク回避の手立てを考え、しつこい質問にも答えてゆくのによい機会なのかもしれない。現在の危機的状況をこのウイルスに関する過去の経験と比較すると、いくつかの不思議な点が浮かんでくる。1997年の香港で H5N1 型ウイルスが家禽から人間にも初めて感染するようになった時 (このときは、ストックの大量処分ですらも流行は押さえ込まれた)、感染者の年齢層はもっと幅広かった²。そして感染者の多くは、生きた家禽を売る市場でニワトリと接していた。しかし、ベトナムとタイで確認された患者はいずれも小児か若者成人である。ヒトの症例と、職業的に家禽に対する接する機会があるかどうかとの間に

はっきりした関連は認められていない。流行のピーク時に数百万羽のニワトリ処分に参加した約 15,000 人のベトナム人のなかで病気になったものはいなかった。作業者の大半が、手袋などの防護衣を着用していなかったにもかかわらず。

これを説明する 1 つの説が、ベトナム人の成人、特に家禽と近いところで働く人たちは、H5N1 型ウイルスに対してある程度の免疫をもつというものである。近縁の鳥インフルエンザウイルスに、彼らは小さな頃から曝されている。ところが、ベトナム人の小児はウイルスに対する早期暴露がまだなく、裏庭で家禽と遊んでいる時にウイルスに接触することになるのだろう。たとえば、ホーチミン市で確認された最初の症例は、ペットとして飼っていたアヒルが病気になって死んだ 8 歳の少女だった¹。

このような説を確認するにせよ否定するにせよ、多数のヒト血液検体を調べて、H5N1 型ウイルスに対する抗体の存在を確認する必要がある。抗体保有者のウイルス暴露過程を明らかにするためには、詳細な疫学データも必要だろう。

同時に研究者たちは、家禽、他の家畜動物、そして H5N1 型ウイルスの拡散に重要な役割を果たしている可能性のある渡り鳥³の調査も行いたいと考えている。これらの動物がウイルスに対する抗体をもつか否かを確認するためだ。家禽のアヒルは特に憂慮される。なぜなら、感染したアヒルは大量のウイルスを糞便中に排出するが、外見上は病気に見えないからである⁴。昨年 3 月下旬の撲滅宣言後の 6 月になって H5N1 型インフルエンザがベトナムのニワトリのなかで再び現れ始めたことに、こうした一見は無症状のウイルス保有動物の存在が関係していることだろう。

H5N1 型ウイルスの遺伝的進化を追

跡することも、伴う危険性を評価する上で重要だ。タイで、ある女性とその娘から感染したという報告が 1 件あったが、H5N1 型ウイルスが人から人へ感染することを示す明らかな証拠はまだ得られていない。しかし、感染性の哺乳動物に緩やかに適応してゆくか、または人間に感染するインフルエンザウイルスと遺伝子を交換することで、致死的で容易に伝達可能な株となるのではないかという大きな不安が残る。仮にこうした状況に至れば、すぐに世界的な公衆衛生上の危機が起こるだろう。

今回の流行を引き起こしたウイルスが、1997 年に香港を襲ったウイルス株とは遺伝的に微妙に異なることが既に報告されている³。また H5N1 型ウイルスが進化しつつあり、さまざまな種の動物に感染するようになるのではないかという不気味な報告がある。セント・ジュード小児研究病院（ミネソタ州メンフィス）のインフルエンザウイルス研究の第一人者 Robert Webster は、未発表の研究で、H5N1 型ウイルスがブタに感染可能なことを確認している。あるベトナム人患者から分離されたウイルスがイエネコに疾患を引き起こしていたことも既に報告されている⁵。ネコは通常、H5N1 が含まれる亜種である A 型インフルエンザに耐性を示す動物だ。そして昨年 10 月には、タイ東部の動物園で飼育されていたトラで H5N1 型インフルエンザが集団発生した。

拡大する恐怖

Webster と共同研究を行った中国の獣医学者たちが報告した知見は、さらなる警告となる。彼らは 1999 ~ 2002 年に中国南部のアヒルから採取した検体の中に H5N1 型ウイルスを検出し、これがマウスに伝染することを確認したのだ。この実験から判断すると、H5N1 型ウイルスは哺乳類に対する病原性を

次第に増していると言える⁴。また別の未発表の研究で Webster は、2003 年と 2004 年にベトナムで採取した H5N1 検体がアヒルに感染することを確認している。特に 2004 年のウイルスを感染させた個体は、長期間にわたってウイルスを排出し続けた。

しかし、こうした厄介な結果にもかかわらず、また H5N1 型ウイルスがもたらす危険性に関する我々の知識がまったく十分とは言えないなかで、ベトナムにおけるウイルス監視のための資金源を見つけることは困難になりつつある。こうした調査は無視されていると Horby は語る。疾患の流行に対する当初の緊急対策費ではカバーできず、研究資金の獲得につながる従来の道も極めて細くなっている。このため Horby は、H5N1 抗体をもつ人々を調べる研究を立ち上げるための支援費を少額でも求めて、最近まで走り回らねばならなかった。しかし残念ながら、こうした研究をベトナムで継続的に実施するために必要なインフラを構築するために十分な額は集められていない。

ベトナム政府関係者は、H5N1 型インフルエンザの流行に対する国際社会の対応を批判しようとはしない。しかし、この国で研究に従事する外国人研究者たちは遠慮がない。「問題が起こると、研究者が海外から大挙してやってくる。そして少なからずの混乱を巻き起こし、すぐに帰国してしまう。状況を変えるために必要なことは何も残さない」と、ホーチミン市の熱帯病病院に設けられた、オックスフォード大学の臨床研究ユニットを率いる Jeremy Farrar は不満を述べている。

国際協力機構 (JICA) から、ハノイの国立獣医学研究所に派遣されているウイルス学者の乾健二郎も Farrar と同意見だ。乾によれば、最初の流行発生後、海外の研究者からそれぞれ自分た



ホーチミン市立熱帯病院とオックスフォード大学の臨床研究ユニット。ただし、国際的な研究・資金援助は十分とはいえない。

ち自身のプロジェクトのために、施設の訪問および検体の採取の要望が殺到した。ところが、これがどれほどベトナム人研究者たちのためになったかは不明だ。また、モニタリングに必要なインフラの構築についてベトナム側を援助しようという申し出はほとんどなかった。「研究者の訪問は歓迎したい。問題なのは、ただ検体を集めるためにやってきて…」という乾の言葉を、そばにいた同僚 Nguyen Tien Dung が顔をしかめながらつないだ。「…さっさと帰国してしまう人たちです」

ただ Dung は、Webster やインフルエンザウイルス研究のもう 1 人の権威である香港大学の Malik Peiris たちとの間で続いている、ベトナム国内の家畜を対象とした H5N1 型ウイルスの進化を調べる共同研究には満足している。また、ハノイの獣医学研究所の所員のなかには、香港で訓練を受けた者もいる。

緊急チーム

さらに De Jong と Thanh の臨床検査室の存在は、真の共同研究で何が可能かを示す。ベトナム政府と英国最大の生物医学研究慈善団体ウェルカムトラストから共同資金援助を受けている、ホーチミン市の Farrar のユニットはその答えの 1 つだ。仮に、このウイルス学研究室が当時なかったとしたら、昨年 1 月の状況は大混乱に陥っていただろうと、熱帯病院の副院長 Tran Tinh Hien は語る。「患者はパニックになっていました。

呼吸器に異常を感じた人たちが、先を争うようにやってきたのです」

このウイルス学研究室による迅速な診断検査のおかげで医師たちは、症状の組み合わせが H5N1 型インフルエンザの症例を示しているかどうかを速やかに判定することができた。ちなみに特徴的な症状には、胸部レントゲン写真上の重度の病変、高熱、白血球数の減少などが挙げられる¹。こうして多くの患者が、自分たちが H5N1 型ウイルスに感染していないことを確認して帰宅することができた。「優れた診断能力の存在は実に重要でした」と Hien は語る。

しかし開発の遅れている中部ベトナムの医療施設では、最新の診断研究室は望めない。これは、H5N1 型ウイルス感染者が見逃されているのではないかと危惧する Mai にとって頭痛の種だ。NIHE にある Mai の研究所のもとには昨年、中部ベトナムから感染の疑われる検体がいくつか送られてきた。しかし

検体がハノイに到着した時には、分解してしまっていて解析はできなかった。

たとえヒトの症例を監視する環境が改善されたとしても、家禽や他の家畜動物にウイルスを見つけるという大量の仕事は残る。このため、仮にベトナムの能力が望ましい基準にまで底上げされてもやるべきことは山ほどある。現時点では、地方の小規模動物病院では、確実につながる電話やファックスといった基本的な設備さえおぼつかない。「スタッフの能力を高めなくてはなりませんし、地域レベルでの作業環境、設備やインフラを改善しなくてはなりません」と、農務省家畜衛生局の疫学部門の責任者 Hoang Van Nam は語る。

FAO は問題の存在を承知している。そして世界銀行と共同で 2 年間の「ベトナム・鳥インフルエンザ緊急回復プロジェクト」をまとめた。この計画には、臨床検査、野外監視、および鳥インフルエンザに関する他の研究に対して 280 万ドルが供与される。しかし Rychener は、東南アジアを舞台にまさに今 H5N1 型ウイルスが拡がりつつあることを考えれば、額が非常に少ないと主張する。「国際社会は適切に応えていません。事態の重大性を過小評価しています」

想像してみたいと Rychener は付け加えている。「同じような状況がヨーロッパや北米で起きたとしたら、巨額の資金が投じられることでしょう。でも東南アジアでは、雀の涙ほどの資金に汲々としているのです」 ■

Peter Aldhous は、ネイチャーのニュースと特集記事担当チーフエディター。

1. Hien, T. T. *et al. N. Engl. J. Med.* **350**, 1179–1188 (2004).
2. Yuen, K. Y. *et al. Lancet* **351**, 467–471 (1998).
3. Li, K. S. *et al. Nature* **430**, 209–213 (2004).
4. Chen, H. *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* **101**, 10452–10457 (2004).
5. Kuiken, T. *et al. Science* **306**, 241 (2004).

21世紀の若き アインシュタインたち

So, what's your theory?

100年前、アルバート・アインシュタインがブラウン運動、光電効果、特殊相対性理論に関する画期的な論文を書いたとき、彼はまだ26歳だった。これほど若くして科学界で名声を得ることは当時でも例外的だったし、今日ではもっと難しいといえるかもしれない。しかし、21世紀の物理学について知ろうとすると、若い物理学者に尋ねてみることによってこそ見えてくるものは多い。「あなたの理論は？」と。

Nature Vol.433(8)/6 January 2005

P. GINTER

Nature は今回、それぞれの研究分野で波紋を投げかけている4人の若手理論家（全員が35歳未満）の研究生活の一端を追った（*Nature* 2005年1月6日号に英文全文を掲載。ダイジェスト2月号では以降のページに、そのうちの2人についての日本語翻訳を掲載する）。

アインシュタインの青年時代、理論物理学の中心地はヨーロッパだった。ニールス・ボーアはコペンハーゲンに、マックス・プランクはベルリンにいた。今日、理論物理学の中心地を見つけることは難しい。共同研究は国際的になり、ほとんどの理論家にとって必要なものはノートパソコンぐらいで、どこにいても研究できる。

しかし、多くの若手理論研究者は米国を修行の地に選ぶようだ。米国に来る外国人大学院生の数は近年減少しているものの、物理学では大学院生の約半分を外国人が占め、そのうち約40%が理論研究者だ。むろん、こうした学生のすべてが米国にとどまるわけではない。この特集で取り上げる3人を含め、多くの研究者はよいポストを求めて故国に戻るだろう。

今回取材した4人全員が、自分たちの野心的な理論を広く知ってもらいたいと考えているが、一方でそうした理論がどうすれば検証されるのか、またそれはどれほど先のことになるのかを知りたがっている。アインシュタインは、1915年に発表した一般相対性理論の予測が日食の観測で確かめられるまで、数年を待つだけですんだ。しかし、多くの理論家は、自身の理論を実験的に検証されることなく研究生活を終える。今回取材した若い理論家たちは、理論は野心的でなければならないと知っていると同時に、その野心的な理論は実際に検証されなければならないことも分かっている。

今後数年間、理論家の多くの関心は、スイスのジュネーブ近郊に建設中の世界最大の加速器に集中することだろう。物理学者たちはこの加速器を使って、余分な次元といった新奇な概念について何らかの証拠を見つけたいと考えている。一方、欧州宇宙機関（ESA）の観測衛星「プランク」のような計画は初期宇宙のデータをもたらし、宇宙創造の瞬間に関する理論を裏づけるかも

しれない（16ページの「宇宙の始まりを目指す長距離走者」）。待ち望まれている量子コンピューターの開発は、量子の世界の基礎概念をテストすることになるだろう（14ページの「量子とヨガとコンピューター」）。

2005年は世界物理年だ。これまでの100年間を振り返ると、理論家たちが解決を望む20世紀の難問はまだたくさん残っているし、一方で、またすぐにでもまったく未知の問題が登場する可能性もある。こうした課題に取り組むのは、今回取り上げたような若い理論家たちに違いない。

またダイジェスト2月号では、アインシュタインが1921年に*Nature* に寄稿した「A Brief Outline of the Development of the Theory of Relativity（相対性理論の進展の概略）」の日本語翻訳を18ページに特別収録。まさに今を生きる若手理論家の姿とともに、アインシュタインの筆に目を通していただきたい。

news feature 特集担当：
Sarah Tomlin（ニューヨーク）

量子とヨガと コンピューター

A theorist of errors

Nature Vol.433(9)/6 January 2005

イスラエルのハイファにあるアインシュタイン通りで育った Dorit Aharonov は、物理学を研究する運命だったのかもしれない。しかし、最終的に量子コンピューターを専門に選ぶまで、彼女は別の問題に関心を寄せていた。

Haim Watzman が報告する。

Dorit Aharonov のオフィスに入ると、秩序から無秩序への突然の移行を体験する。エルサレムにあるヘブライ大学コンピューターサイエンス学部のビルの廊下は、白く整然として殺風景だ。しかし、Aharonov のオフィスに一步足を踏み入れると、赤とオレンジ色の模様のクッション、論文の別刷り、枝編み細工の家具がごちゃ混ぜになっている。これこそが、乱雑さがあるレベルに達すると、量子の世界が私たちが日々経験している古典的な世界に切り替わることを証明した理論家にふさわしい環境だろう。

Aharonov は、量子コンピューターの基礎理論を専門としている。量子コンピューターはまだ実現してはいないものの、巨大な整数の因数分解といった、従来のコンピューターには困難な仕事をも量子力学の威力を利用してやってのけるだろう。Aharonov は現在 34 歳だが、すでにそうした目標の実現に重要な貢献をしている。環境はノイズをとまなうにもかかわらず、量子コンピューターは確実かつ正確に機能しうることを証明したのだ。

物理学への適性は、Aharonov の家系に強く遺伝している。彼女のおじ、

Yakir Aharonov はテルアビブ大学の物理学者だ。彼女の父も数学者で、彼女が小さいときに数の美しさについて教えてくれた。後に彼女は物理学と数学を学部の専攻に選んだが、当初は量子の世界には関心を持っていたわけではない。彼女は、物理学を使って脳を研究したいと考えていた。

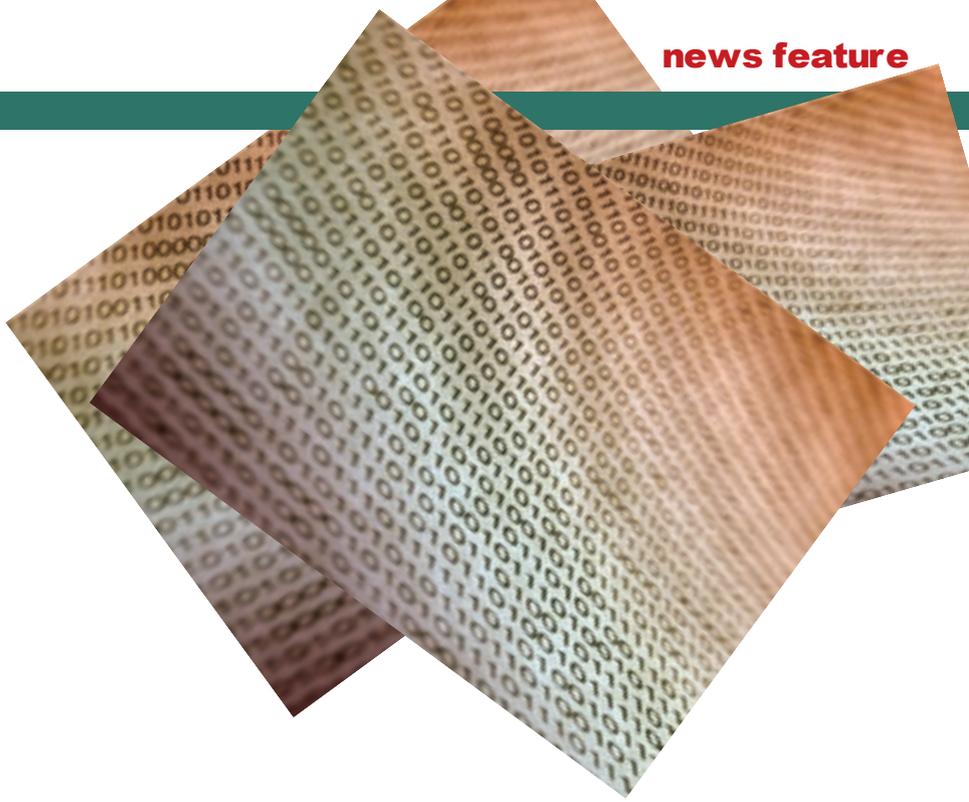
偶然の出会い

「私は意識の問題を解決したかった」と Aharonov は振り返る。しかし、その問題は現在の科学で手の届く範囲を超えた難問だと彼女は考え始めた。「ある日結婚式に出席していたら、友人のひとり、『脳の研究でどういう分野を選ぶべきだろうか』とアドバイスを求めてきたの。私は彼に、コンピューターサイエンスの人たちが何をやっているかを調べるべきよ、とアドバイスしたわ」と彼女は話す。

Aharonov は、そんな自分のアドバイスを我ながらもっともだと思い、自分自身も相談できる人を見つけようとヘブライ大学のコンピューターサイエンス学部のビルに行った。教えられた先は Michael Ben-Or のところだった。Ben-Or の部屋のドアをノックすると

き、何か重要なことが起ころうとしているという強い感じがあった、と彼女は言う。そして、実際にそのとおりになった。Ben-Or は量子コンピューターについて彼女に語った。「量子コンピューターは私をとりこにしたわ。そこには数学、物理学、哲学のすべてが含まれていたから」と彼女は話す。

1994 年当時、Ben-Or ら理論家が直面していた問題は、量子コンピューターが動作不能になるのをどうやって防ぐかという問題だった。あらゆるコンピューターは動作時にエラーを起こす。量子コンピューターはエラーの影響を特に受けやすい。これは、演算の土台となっている量子状態がきわめてデリケートだからだ。量子情報は原子核のスピン状態といった複雑な現象に蓄えることができるが、この情報は粒子が環境と相互作用すると簡単に失われうる。コンピューターが環境から完全に分離されることはありえないので、系には常にノイズがあるはずだし、エラーが起こることは避けられないだろう。そのうえ、エラーの訂正は計算を行うのとはほぼ同じくらい難しい。それでは、確実に量子計算を行うことは可能なのだろうか。



「それが私が Dorit に出した問題だった」と Ben-Or は言う。彼は、Aharonov の学位論文の指導教官になり、後に彼女の共同研究者になった。Aharonov は Ben-Or と研究を進め、系のノイズが一定して低レベルであれば、量子コンピューターは正確な計算結果を出せることを証明した¹。

インスブルック大学（オーストリア）の理論物理学者 Peter Zoller は「彼女はこの分野でもっとも優秀な若手研究者の一人だと思う」と話す。Zoller は量子コンピューターを作りたいと考えている。Aharonov は実際の量子コンピューター作成の基礎となるであろう理論の構築に貢献してきた、と Zoller は話す。彼はその例として、量子コンピューターのエラー許容度に関する研究のほかに、Aharonov がカリフォルニア大学バークレー校で研究しているときに Oded Regev らと示した重要な証明を挙げた²。この証明は、量子計算の2つの既存のモデルが実際は等価であることを示し、その結果、量子アルゴリズムを書くことが容易になった。

バークレー校にいる間に Aharonov は量子コンピューターの研究をさらに広げ、量子力学の基本的な難問に取り

組み始めた。なぜ、量子力学の法則は素粒子の世界では明らかなのに、日々の生活では目にするのがないのか。世界が、量子的なふるまいから古典的なふるまいへ切り替わるのは、どのポイントなのか。それは単なるスケールの問題なのだろうか。

Aharonov は、ノイズを伴う量子系の多くにおいて、それより上では古典的なふるまいへの移行が避けられなくなるノイズレベルが存在することを示した。ほかの理論では、量子的ふるまいから徐々に変化すると予測しているが、Aharonov によるとそういった従来の予測よりもずっと急に切り替わるのだという³。

Aharonov の特徴はその大胆さにある、と Ben-Or はみる。彼女は大学院生のとき、その分野の指導的人物とコンタクトをとって議論するのをためらわなかった、と Ben-Or は振り返る。モデル等価に関する論文で Aharonov と共同研究したニューヨーク市立大学の数学者 Zeph Landau は、「彼女は研究に神経を集中しているが、ひとつのことだけにとらわれてはいなくて、ほかのことについても議論したりする時間を見つけている」と評する。

「生活と仕事のバランスをとることは、研究にとってとても大切なこと」と Aharonov は話す。多くの理論家と同じように、彼女も研究についてまったく考えていないときにこそ、もっともよいアイデアが出るという。毎日参加しているヨガの会が特に効果がある、と彼女は話す。「ヨガをすると霧が晴れ、直観力が鋭くなる。無理に努力しないときほど、アイデアはクリアだわ」

あらゆるものの相互連結性をとる東洋の思想も、彼女の研究に影響している。たとえば、Aharonov は量子コンピューターを実現することには執着していない。「量子コンピューターを作る研究で得られるもっとも興味深い結果は、それは不可能だという発見だと思うの。量子コンピューターの実現に失敗することで、まったく新しい物理学が発見されるかもしれないのよ」と彼女は話した。 ■

Haim Watzman は、イスラエルのエルサレムを拠点とするフリーランスライター。

1. Aharonov, D. & Ben-Or, M. Preprint at <http://xxx.lanl.gov/quant-ph/9611025> (1996).
2. Aharonov, D. et al. Preprint at <http://xxx.lanl.gov/quant-ph/0405098>, (2004).
3. Aharonov, D. Phys. Rev. A 62, 062311 (2000).

宇宙の始まりを 目指す長距離走者

The long-distance thinker

Nature Vol.433(12)/6 January 2005

Martin Bojowald は、時間をさかのぼる旅路にある。ビッグバンのときに何が起こったかを調べる旅だ。Quirin Schiermeier が、この旅に同行した。

ベルリンから南西へ。ポツダムに近い小さな村、ゴルムへの旅は、世界の果てへと向かう 90 分間の鉄道旅行だ。霧のかかった 12 月の朝の列車の旅は、そんなふうに思えた。ポツダム郊外では、車窓から見えるのは水平線まで広がる農地だけだ。霧の中に最先端のガラスばりのビルが姿を現すまでは。

何の変哲もない場所にあるこの研究所は、マックス・プランク重力物理学研究所だ。アルバート・アインシュタイン研究所と呼ばれることも多い。ご想像どおり、ここは物理学のもっとも深遠な問題と取り組む理論家たちの生息地だ。宇宙はどうして始まったのか。その最後はどうなるのか。宇宙の始まりと終わり、時間、空間、物質には何が起こるのか。

研究所を囲むわびしい風景は、31 歳のドイツ人の理論研究者 Martin Bojowald には合っているといてもよい。彼は、ほとんどの時間を宙を見つめて過ごしていると認める。Bojowald は、論文を書くときか、Eメールを書くとき以外はほとんどコンピューターを使わない。そして、思索のほとんどは自宅で行う。自宅でなら、自分が活発な人間ではないように人に思われることを気にしないで済むからだ。

Bojowald は、「ループ量子重力理論」

を支持している。これは極微のスケールでの重力の理論で、この理論を応用すれば、ブラックホールの内部を調べたり、宇宙の始まりの瞬間を調べたりすることができる。

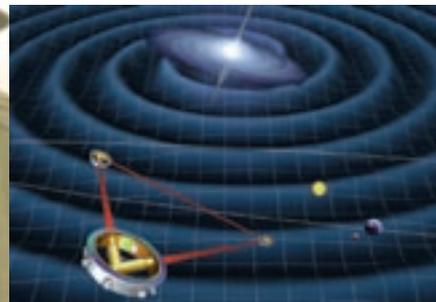
ループ量子重力理論は、一般相対性理論（重力がどのように宇宙を形作っているかに関するアインシュタインの理論）と、原子の世界の量子力学的描

像を調和させるひとつの方法だ。自然界の 4 つの基本的な力のうち、重力だけが量子力学の法則を重んじていないらしい。ループ量子重力理論は、アインシュタインの方程式を量子力学の枠組みの中で書き直すことにより、この問題に直接的に取り組もうと試みている。これとは別の量子重力理論で、よく知られているのがひも理論だ。ひも理論は素粒子論から起こったもので、宇宙のすべてのものは観測不可能な振動する「ひも」でできていると主張する。

量子論と一般相対性理論の統合を主張する理論は、一般相対性理論で未解決であるいくつかの宇宙論の難題を解決できなければならない。長年の難題のひとつは、ビッグバンのときに何が起こったかを解明することだ。ビッグバンは、約 150 億年前に起こった宇宙



Martin Bojowald はアインシュタインを尊敬している。Bojowald は、ビッグバンに関する自身の理論の証拠が NASA の LISA 計画（右図）で得られるはずだと期待している。



LISA/JPL/NASA

Q. SCHIERMEIER

の重大事件で、高温で高密度の火の玉を生み出し、星や銀河や人間のもととなった。アインシュタインの方程式は宇宙の歴史の大部分を記述できるのだが、この創世の瞬間に近づくと役に立たなくなる。

基本はループ

従来学説では、ビッグバンは時間を含めたすべての始まりだとされている。だから、ビッグバンそのものやそれ以前に何があったかを問うても意味がない。これまではそう説明されてきた。しかし、創世の瞬間に物理法則が役に立たなくなる問題（特異点問題）のため、宇宙の初期条件について分かることが限定される。これでは、勝手な仮定が可能になってしまう。たとえば、現在の宇宙を実現するための、初期宇宙の急速な膨張（インフレーション）などだ。

ループ量子重力理論にもとづいた宇宙論が、異論も少なくはないものの、高く評価される理論となったことには Bojowald も貢献している。英国・ポーツマス大学の宇宙論研究者 Roy Maartens は、「ループ理論にもとづく宇宙論による予測を計算し、その予測が観測で検証されるかどうかを決定する可能性への扉を Martin が開いた」と話す。

ループ量子宇宙では、時間を含めたすべてが量子化され、つまり、離散的になる。空間はわずか 10^{-99} 立方センチの「キューブ」に分割される。ひとつの「キューブ」は空間の最小単位だが、空っぽではない。各キューブは、交わりあう「ループ」という形の空間、時間、物質を含んでいる。

Bojowald は「この理論は、現実世界の理解にはほとんど関係しない」と話す。ループは、私たちが知覚できる世界よりもずっと小さなスケールで作用する。「しかし、ループ理論の離散性のおかげで、初期宇宙との矛盾をなくすことが数学的および概念的にずっと簡単になった」と彼は説明する。

ビッグバンを超えて

ループ理論は複雑だが、その背景にある数学はエレガントだ。Bojowald は、ビッグバンの特異点でも物理法則がだめにならない枠組みを作った (M. Bojowald *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5227-5230; 2001)。彼の研究結果は、極端に小さなスケールでは量子重力が斥力となり、時空の特異点への崩壊を防ぐ可能性があることを示唆した。「この効果は、一般相対性理論とは矛盾するだろうが、アインシュタインの方程式の量子化の結果かもしれない」と Bojowald は話す。

特異点問題が片付いたため、Bojowald はビッグバン「以前」の時間を考察できるようになった。彼は、時間が逆向きに流れるにもなって膨張する、ビッグバンの向こう側の「反転した宇宙」（私たちの宇宙の鏡像）を発見した。

Bojowald のモデルは、インフレーションがどうして起こるのかについても、気になる描像を与えた (M. Bojowald *Phys. Rev. Lett.* **89**, 261-301; 2002)。重力の反発作用は、収縮する宇宙の崩壊を防ぐだけでなく、拡大している宇宙を引き離しもする、と Bojowald は考えている。Maartens は、「この理

論が人を納得させるものになるまでには、まだいくらかの道のりがある」と注意する。だが、Bojowald が遠い道のりにためらうことはない。彼は、実生活でも研究の面でも長距離ランナーなのだ。

「理論が登場した初期には批判が多かった。しかし、事態は変わった。そしてその間に、多くの宇宙論研究者がループ方程式に強い興味を持ってくれるようになった」と Bojowald は言う。

欧州宇宙機関 (ESA) が 2007 年に打ち上げる観測衛星「プランク」で得られるデータが、Bojowald の理論の間接的な証明になることを彼は期待している。この衛星は、ビッグバン当時から今も残っている放射を調べることで、初期宇宙の理論を検証するものだ。米航空宇宙局 (NASA) が 2011 年に打ち上げる予定の「宇宙レーザー干渉計重力波アンテナ」(LISA) は、時空のさざ波を観測して、初期宇宙からの量子重力効果を見つけ出すかもしれない。

シカゴ大学（米国イリノイ州）で理論的に宇宙論を研究している Sean Carroll は、「ひも理論が量子重力に関する多くの問題を解決してきたことを考えれば、今後ひも理論はループ量子重力理論よりも人気があるだろう。しかし、新しいアイデアは歓迎するし、真剣に検討されなければならないと思う」と話した。 ■

Quirin Schiermeier は Nature のドイツ特派員。

相対性理論の進展の概略

A Brief Outline of the Development of the Theory of Relativity

筆者 A. Einstein 教授

(英訳 Robert W. Lawson 博士)

一連の考え方の進展を、できるだけ簡潔な形で、なおかつ発展の連続性を完全に保ちながら俯瞰するというのは、どこか抗し難い魅力がある。私たちはそれを、相対性理論について試み、すべての進歩は、小さな、ほとんど自明な思考の積み重ねからなっていることを明らかにしたい。

発展の全貌はファラデーとマクスウェルの考えに端を発し、その影響は最後までおよぶ。すなわち、あらゆる物理過程は（遠隔作用ではなく）近接作用によるのであり、数学的に言えば、偏微分方程式で表わされる。マクスウェルはこれを、真空の変位電流の磁気効果の概念、ならびに、誘導により生じた電気力学場と静電場の性質が同一であるとの仮定に基づいて、静止物体の電磁過程に適用することに成功した。

電気力学の動く物体への拡張は、マクスウェルの大勢の後継者たちの肩にかかることとなった。H. ヘルツは、重さのある物体とよく似た物理的特性を空っぽの空間（エーテル）に与えることにより、この問題の解決を試みた。とりわけ、エーテルは重みのある物体と同じように、どの点においても決まった速度をもつにちがいない、と。静止物体のように、電磁気あるいは磁電気の誘導は、それぞれ、電気または磁気の流量変化率によって決まる。ただし、そのような変化の速度は物体と共に動く面積要素について語られているのだという条件付きで。しかし、ヘルツの理論は、流れる液体中を伝搬する光についてのフィゾーの基礎的な実験に反することとなる。マクスウェル理論の、最も明白と思われた動く物体の場合への拡張は、実験の諸結果とは矛盾してしまったのである。

この時点で、H. A. ローレンツが救いの手を差し伸べ

た。物質の原子論に絶対の信頼をおいていたローレンツは、原子を、連続的な電磁場の座とみなすことなどできないと感じた。彼は、電磁場は、連続的と思われていたエーテルの条件ではないだろうかと考えた。ローレンツは、力学的および物理学的な観点の両面から、エーテルは本質的に物質とは無関係だと考えていた。つまり、エーテルは物質の運動に関与しておらず、エーテルと物質の相互関係が想定されるのは、物質が、付着する電荷の運び手とみなされる場合だけだと考えていた。ローレンツの理論の大きな価値は、静止物体と動く物体の電気力学全体が、空っぽの空間におけるマクスウェルの方程式に帰せられるという事実にある。この理論は、方法論から見てもヘルツの理論を凌ぐだけでなく、H. A. ローレンツはまた、理論の助けを借りて見事に実験事実の説明に成功したのだ。

この理論は、根本的に重要なある一点においてのみ、不十分なように思われる。どうやら、動いている他のすべての座標系と比べて、特殊な運動状態（エーテルに対して静止状態）にある、一つの座標系だけを優先させているようなのだ。この点で、この理論は古典力学と真つ向から対立しているように思われる。古典力学では、互いに一様に動いているすべての慣性系は、同等な座標系として認められている（特殊相対性原理）。ちなみに、電気力学の領域におけるあらゆる経験（特にマイケルソンの実験）も、あらゆる慣性系が同等であるという考えを裏付けるもので、特殊相対性原理を支持している。

特殊相対性理論は、その根本的な性質のために容認できないと思われてしまう困難さのお陰で生まれた。この理論は、次の疑問に対する答えから始まる：特殊相対性

原理は、本当に、空っぽの空間におけるマクスウェルの場の理論と矛盾するのだろうか？ この疑問に対する答えは、イエスであるかのように見える。なぜならば、方程式が一つの座標系 K で成り立つとして、もし、どこから見ても容易に立証できる変換方程式と一致する新しい座標系 K' を導入すれば、マクスウェルの方程式は、新しい座標 (x', y', z', t') ではもはや成り立たなくなるからだ。

$$\left. \begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned} \right\} \text{ {ガリレオ変換}}$$

しかし、見かけに騙されてはならない。時空の物理的な重要性についてさらに綿密な分析が行なわれるにしたがって、ガリレオ変換があいまいな仮定の上に成り立っていることが明らかになったのだ。特に、何かと同時にあるということは、使われた座標系の運動状態から独立して意味をもつ、と仮定されている。真空の場の方程式は、次のような変換式を使用すると、特殊相対性原理を満たすことがわかった。

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{aligned} \right\} \text{ {ローレンツ変換}}$$

この方程式で、 x, y, z は、座標系に対して静止した物差しで測った座標を表している。そして、 t は、静止状態にある、調整済みの同じ造りの時計で測った時間を示している。

ところで、特殊相対性原理が成り立つためには、物理学のあらゆる方程式が、一つの慣性系から別の慣性系への変換に際して、その恰好を変えない必要がある。その際、その変化を計算するためにローレンツ変換が利用される。数学の言葉を使うのであれば、物理法則をあらわすあらゆる方程式は、ローレンツ変換に関して共変的でなければならない。というわけで、方法面から見るかぎり、特殊相対性原理は、第二種の永久運動の不可能性に関するカルノーの原理に匹敵する。なぜならば、後者（カルノーの理論）のように、特殊相対性原理はあらゆる自然法則が満たすべき一般条件を私たちに与えてくれるからだ。

後に、H. ミンコフスキーが、この共変条件について、きわめて優美で示唆に富む表式を発見した。それは、三次元のユークリッド幾何学と物理学の時空連続体の形式的な関連をあらわにしている。

このことから、物理学の方程式での役割からすれば、物理学的な意味合いは別として、時間は空間座標と同等だといえる（実数との関係は別だが）。この観点から、物理学はいわば四次元のユークリッド幾何学、いや、もっと正確には四次元のユークリッド連続体の静力学なのである。

特殊相対性理論は、二つの主な段階を経てつくられる。一つは、時空の「計り方」をマクスウェル電気力学に合わせる作業であり、もう一つは、変更された時空の「計

り方」に他分野の物理学を合わせる作業である。初めの過程からは、同時刻の相対性、運動が測定用の物差しと時計へ与える影響、運動学の修正、そして特に、速度の新しい加法定理が出てくる。第二の過程からは、速度が大きい場合のニュートンの運動法則の修正、ならびに、慣性質量の性質についての基本的に重要な情報がもたらされる。

慣性は、物質の基本的な性質ではない。実際、より基本的な属性に遡ることのできない量ではなく、エネルギーの一つの性質にすぎないことがわかった。もし、 E というエネルギー量が、ある物体に与えられるとすれば、その物体の慣性質量は、 E/c^2 の大きさだけ増大する。ここで、 c は真空中の光速である。一方、質量 m の物体は、 mc^2 という量のエネルギーの貯蔵庫と考えられる。

やがて、自然なやり方で重力の科学を特殊相対性理論

と結びつけるのは不可能であることがわかった。これに関して、私は重力には基本的な性質があり、それが重力を電磁力と区別している事実に気づいて、驚きを隠せなかった。あらゆる物体は、重力場のなかで同じ加速度で落下する。あるいは、同じ事実の別の言い方にすぎないが、ある物体の重力質量と慣性質量は互いに数値的に等しい。この数値的な等しさから、その性質も同じであることが予想される。重力と慣性は同じものなのだろうか？ この疑問が、直接、一般相対性理論へとつながる。たとえば、地球に対して静止しているあらゆる物体に作用する遠心力を、「実在」する重力場か、そうした場の一部だとみなせば、地球は回転していない、と考えることはできないだろうか？ もし、この考えが実行できれば、本当に重力と慣性の同一性を立証できるだろう。なぜならば、回転に関与しない系から見て慣性とみなされ

三次元のユークリッド幾何学

空間の隣接した2点に対応して、尺度となる数値(距離 ds) がある。それは、次の式である。

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$$

それは、選ばれた座標系と無関係で、単位長さの物差しを使って測ることができる。

許される変換は、 ds^2 の表式を不変に保つ。すなわち、線形直交変換が許される。

そのような変換により、ユークリッド幾何学の法則は不変である。

特殊相対性理論

時空の隣接した2点(点事象)に対応して、尺度となる数値(距離 ds)がある。それは、次の式である。

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 + dx_4^2$$

それは、選ばれた慣性系と無関係で、単位長さの物差しと標準時計で測られる。 x_1, x_2, x_3 は、ここでは直交座標で、一方、 $x_4 = \sqrt{-1} ct$ は、時間に虚数単位と光速を掛けたもの。

許される変換は、 ds^2 の表式を不変に保つ。すなわち、 x_1, x_2, x_3, x_4 の実数性が保たれるような線形直交な置き換えが許される。そのような置き換えがローレンツ変換である。

そのような変換により、物理学の法則は不変である。

る性質が、回転に係わる系との関係では重力と解釈できるからだ。ニュートンによれば、こうした解釈は不可能である。ニュートンの法則では、遠心力の場が物質によって創られるとは考えられず、またニュートンの理論では、「コリオリ場」の型の「実在」する場は許されないからだ。しかし、もしかしたらニュートンの場の理論は、「回転」座標系を含む場に適合する、別の理論に置き換えられるのではないか？ 慣性と重力の質量が同じものだという私の信念は、心の中で、この解釈は正しいのだという、絶対的な確信の感触にまで高まった。この点について私は、次のような考えに刺激された。私たちは「みかけ」の場をよく知っているが、それは、慣性系に対して任意の運動をしている座標系において成り立つ。そのような特殊な場の助けを借りて私たちは、重力場がすべからず満たすべき法則を研究できるにちがいない。この点について、私たちは、量られる質量が、場を創る決定因数になるか、あるいは、特殊相対性理論の基本的な結果によるのであれば、エネルギー密度（テンソルの変換性をもつ量）が場をつくるという事実を考慮すべきだろう。

他方では、特殊相対性理論の計量的な結果に基づく考察から、ユークリッド計量は加速された座標系に関してはもはや妥当ではありえないという結論に至る。このことが理論の進歩を数年も滞らせたのであるが、ユークリッド計量が、小さい領域にしかあてはまらないのだということがわかって、この大いなる困難は解消された。結果として、これまで特殊相対性理論で物理学的に定義されてきた大きさ m は、一般相対性理論においても、その重要性を保ち続けることとなった。しかし、座標そのものは、もはや直接的な重要性を失い、物理学的な意味合いを持たない、時空の点を数えるだけが目的の単なる数値へと成り下がった。つまり、一般相対性理論では、座標は、表面の理論におけるガウスの座標と同じ機能を果たしている。以上に述べたことから、こうした一般的な座標では、測定できる量の m は次の形式で表示できなければならない。

$$ds^2 = \sum_{uv} g_{uv} dx_u dx_v$$

ここで、記号 g_{uv} は、時空座標の関数である。上記のことから、また、因数 g_{uv} は一方では時空の計量を決定し、他方では質点の力学的なふるまいを司る重力場を決定することがわかる。

重力法の法則は、主に次の条件から決定される：第一に、それは、座標系の選び方によらず成り立たなければならない。第二に、それは、物質のエネルギー・テンソルにより決定されなければならない。第三に、それは、二階より高い因数 g_{uv} の微分係数を含んではならず、線形でなければならない。このようにして、一つの法則が得られる。それは、ニュートンの法則と基本的には異なるものの、それから導かれた近似が後者に正確に対応しているので、その理論が、実験で明白に検証できそうな基準は、数えるほどしか存在しない。

次にあげるのが、今のところ解決が待ち望まれる、重要な疑問のいくつかである。電気と重力の場は、本当に性質が違いすぎて、両者を帰着させることのできる形式的な単位など存在しないのか？ 重力場は、物体の構成に関与しているのか、そして、原子核内の連続体は、認めるほどに非ユークリッドなのか？ 最後の疑問は、宇宙論の問題に関係している。慣性は、遠くの質量との相互作用まで追跡されるべきか？ そして、これに関連して：宇宙の空間的な広がりには有限なのか？ 私の見解がエディントンと異なるのは、まさにこの点なのだ。マッハと同様、肯定的な答えが避けがたいと私は感じているが、当面の間、何も証明されないだろう。大規模な恒星系の力学的な研究が、宇宙の広大な領域に対するニュートンの重力法の妥当性の限界の観点から実施されるまで、最終的に、この魅惑的な疑問の数々を解決するための確固たる基盤を得ることは、おそらく不可能だろう。 ■

※(原文は1921年の*Nature* vol.106に掲載された)

糖尿病：インスリン抵抗性に 勝つ方法

Outfoxing insulin resistance?

Marc Montminy and Seung-Hoi Koo



インスリンに対する抵抗性があると、糖尿病にかかりやすくなる。その特徴は、貯蔵脂肪の増加とグルコース合成停止不全である。こうした影響の分子レベルでの基盤が解明された。

Nature Vol. 432 (958-959)/ 23/30 December 2004

多くの先進国では成人のほぼ5%が2型糖尿病にかかっているが、インスリンに抵抗性がある人々の割合はこの数字をはるかに上回る。このインスリン抵抗性をもつと、つまりインスリンが効きにくい状態だと、糖尿病を発症しやすい。どういう仕組みでインスリン抵抗性になるのかは今のところ不明だが、関与する要因の1つとみられるのが、肝臓への特定脂質の異常蓄積（肝臓の脂肪沈着）である。Stoffel たち¹は、インスリン抵抗性の動物では Foxa2 というタンパク質の不活性化が脂肪沈着を促進し、糖尿病の発症に関与することを報告している（原著論文は *Nature* 12/23・30号を参照のこと）。この研究結果は、インスリン抵抗性や糖尿病の新しい治療薬の設計に大きくかかわってくるものだ。

哺乳類のエネルギー収支は現代のハイブリッドカーに似ている。我々はエネルギー源としてグルコースと脂質を使っており、その比率は食物だけで変化する。歩いたり食べたりしている時には、我々の体は効率よいエネルギー源としてグルコースを使い、たとえば睡眠中のように何も食べない絶食時には主に脂質を燃焼している。トリグリセリドと呼ばれる貯蔵脂質は血中脂肪酸に姿を変えて、脂肪酸の酸化という過程でさらに分解される。絶食時には肝臓も糖新生という過程でグルコースを新たに合成し、正常な血糖値（脳が機能するために必要とされる）を維持する。

肝臓がグルコースを合成し脂質を燃焼する能力は、1組の点火スイッチに制御されている。その正体は転写因子とよばれるもので、核内で働いて遺伝子のスイッチを

入れたり切ったりする²。これらのスイッチは血中ホルモン（おもにインスリンとグルカゴン）の濃度変化に反応し、そのおかげで肝細胞は摂食時と絶食時で代謝のギア切り換えができる。摂食に反応して分泌されたインスリンは、肝細胞内にタンパク質の連鎖反応を引き起こす。それぞれのタンパク質は「摂食中」のシグナルを、リン酸化という化学的修飾によって次のタンパク質へと順に伝えていく。ところがインスリン抵抗性の場合、インスリンに反応して起こるはずの特定タンパク質群の順序正しいリン酸化が損なわれており、インスリンはグルコースや脂質の代謝を正しく制御できなくなる³。結果として、肝臓での糖新生の亢進も一因となって、インスリン抵抗性の人は高血糖となる。

糖尿病の場合、インスリンはこのようにグルコース生成を抑えられないものの、絶食時に脂肪燃焼（脂肪酸の酸化）を促進させるスイッチを切ることはできるらしい。この現象は混合型インスリン抵抗性（mixed insulin resistance）として知られ、インスリンのシグナル伝達はグルコース生成よりも脂肪酸酸化のほうのスイッチに優先的に伝えられる（つまり脂肪燃焼のためのスイッチを切ってしまう）ことになるので、インスリン抵抗性のある人は、高血糖になるだけでなく、トリグリセリドを肝臓で分解せずに蓄積させるというまずい事態に陥ってしまう。

今回の研究で Stoffel たち¹は、肝臓ではグルコース代謝と脂質代謝を別々のスイッチが制御していて、一方のスイッチは他方のスイッチよりもインスリンに対す

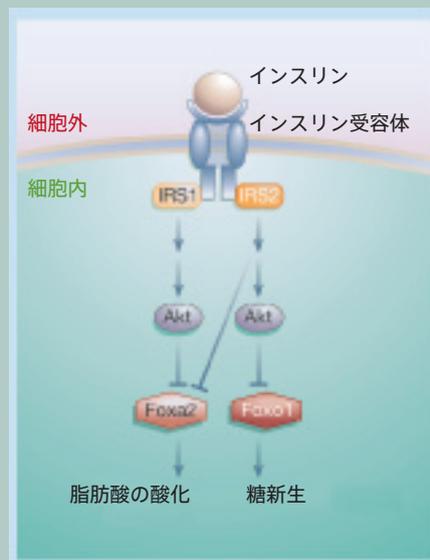


図1 肝臓でのインスリンのシグナル伝達モデル。食後、インスリンが肝臓にあるインスリン受容体に結合して、2つの主要な経路（1つはインスリン受容体基質-1、略してIRS1を含み、もう1つはIRS2を含む）を活性化する。Aktはどちらのシグナル伝達系でも重要な酵素である。2つの経路は、Foxo1やFoxo2のリン酸化により、グルコース合成や貯蔵脂質燃焼（脂肪酸の酸化）を止める。Stoffelたち¹は今回、Foxo1はIRS2経路を介してのみリン酸化されるが、Foxo2はIRS1経路にもIRS2経路にも反応してリン酸化されることを明らかにして、Foxo2のほうがインスリンのシグナルへの感受性が高い理由を説明づけている。

る感受性がずっと高いのではないかと、とする見方を検証した。そして、フォークヘッド型転写因子ファミリーの一員であるタンパク質Foxo2が、絶食時の肝臓で脂肪酸分解を制御する重要なスイッチであることを明らかにしたのである。Foxo2は、同じくフォークヘッド型転写因子ファミリーの一員であるFoxo1によく似ている。Foxo1は絶食時に肝臓の糖新生を促進させることがわかっている³。摂食時はFoxo1スイッチもFoxo2スイッチもリン酸化によって不活性化されるのだが、今回の報告¹が目玉を集めた核心部分は、インスリンのシグナルに対してFoxo1よりもFoxo2のほうがはるかに感受性が高く、そのためインスリン抵抗性があってもFoxo2のスイッチは切れ、Foxo1は切れないという点だ。

ではFoxo2はなぜこれほどインスリン感受性が高いのだろうか。その答えはまだ霧の中だが、著者たちが考

えた1つの説明づけはこうだ。摂食時にインスリンは肝細胞内の2種類のシグナル中継システムを刺激し、その両者を区別するのは2つの重要成分、つまりインスリン受容体基質のIRS1とIRS2である（参考文献4；図1）。そしてStoffelたちは、Foxo1スイッチはIRS2系の中継システムによってのみ切れるが、Foxo2はIRS1系によってもIRS2系によっても切れることを見つけた。つまり、Foxo2はIRS1シグナルとIRS2シグナルの両方に感受性があることで、インスリンによってFoxo1よりスイッチが切れやすいのかもしれない。

インスリン抵抗性があると、肝臓で異常な糖新生が行われるためもあるが、血中インスリン濃度は慢性的に高くなる。そこで著者たちは、こうした高インスリン血症のせいで、たとえ絶食時でもFoxo2は不活性なままになるのだと考えた。こうして脂肪酸酸化が止められるため、肝臓はトリグリセリドを蓄積し始めるわけである。このモデルを検証するため、Stoffelたちはインスリンに反応してFoxo2がリン酸化されない（つまり不活性化されない）ように、変異型Foxo2（名称はT156A）を使った。この変異型Foxo2を糖尿病マウスの肝臓に導入したところ、肝臓の脂肪沈着が改善されただけでなく、インスリン感受性も回復した。この結果は、インスリンがグルコース代謝と脂質代謝に別々の作用を及ぼす仕組みを説明する可能性をもち、また、肝臓の脂肪沈着がいかに発生して糖尿病につながるかを知らぬ糸口が得られる。

今回の研究成果からいろいろな疑問がわいてくるが、中でも最も関心と呼ぶのはきっと、インスリンがFoxo1よりもFoxo2のスイッチを優先的に切る仕組みについてだろう。この違いはおそらく、Foxo2のリン酸化に関与してこれを優位に進める特定成分が、IRS1とIRS2の2つの経路に含まれているせいだと思われる。こうした成分を突き止めることが、インスリンの選択性の基盤を理解するうえで重要なはずだ。ともあれ、変異型Foxo2によって肝臓の脂肪沈着を改善できたことは、糖尿病の新たな治療法に向けた可能性を開く成果であり、いずれはインスリン抵抗性から糖尿病への進行を阻止する新たな手だてにもつながるかもしれない。■

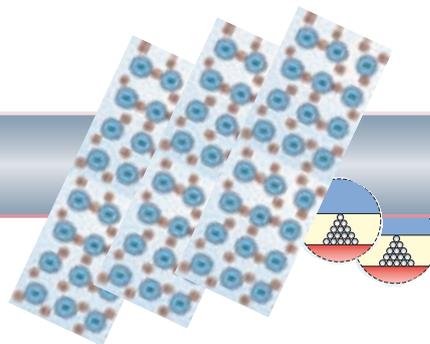
ソーク生物学研究所（米）、
Marc Montminy & Seung-Hoi Koo

1. Wolfrum, C., Asilmaz, E., Luca, E., Friedman, J. M. & Stoffel, M. *Nature* **432**, 1027–1032 (2004).
2. Spiegelman, B. M. & Heinrich, R. *Cell* **119**, 157–167 (2004).
3. Saltiel, A. & Kahn, C. R. *Nature* **414**, 799–806 (2001).
4. White, M. *Mol. Cell. Biochem.* **182**, 3–11 (1998).

銀でできたナノスイッチ

Silver nanoswitch

Jan van Ruitenbeek



イオン伝導体は、センサー、燃料電池や普通の電池などいろいろな使い道がある。イオン伝導体を基盤とするナノエレクトロニクス・デバイスは、今後シリコンにとって代わるのだろうか。

Nature Vol.433(21-22)/6 January 2005

ほとんどの電子機器はデジタルエレクトロニクスを基盤とする。そのデジタルエレクトロニクスは、組織的な連係で動作する数多くのスイッチを本質的に必要とする。このため、既存のシリコン技術を凌駕するような信頼性の高いスイッチング機構を見つけ、さらに小さく、強力なエレクトロニクスを実現することを目指して、多くの研究がなされている。理想的なスイッチとしては、原子サイズまでの縮小が望まれる。消費電力は小さく、メモリー

の読み出し書き込み操作のためにリード線2本のみを必要とする。寺部一弥たちはこの理想スイッチに近づく発明について述べている（原著論文は、*Nature* 2005年1月6日号を参照のこと）¹。彼らは硫化銀の魅力的な性質を利用した。この物質の電気伝導性は電子と銀イオンの双方が担う。その結果生まれたデバイスは高速のメモリー操作だけでなく論理演算にも用いることができ、室温で動作する。

ほとんどの固体では、原子は規則的な結晶格子中の一定の位置に存在する。ところが、寺部らが使った固体イオン伝導体では、一部のイオンが格子の中にくつもの等価な位置をもつことができ、物質中をさまよい動くことができる。図1は今回の関心の的となっている伝導体 Ag_2S におけるこの様子を図解したものだ。硫化銀を銀のリード線2本で電池に接続すると、硫化銀と銀の陽極との界面に Ag^+ イオンが作られ、もう一方の電極で還元される。つまりこの過程によって銀の輸送が起き、プラスのリード線から銀が取り去られ、マイナスのリード線に同量の銀が析出する。 Ag_2S は珍しい固体イオン伝導体で、2つの変った特徴をもつ。 Ag_2S は室温で動作し、電子だけでなくイオンも伝導するのだ。この両方の特徴が、今回寺部たちが創り出したデバイスにとって肝要なのである。

数年前、寺部たちは走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いた際に Ag_2S 結晶の表面にできたナノスケールの銀のコブについて報告している²⁻⁴。この実験では底面につけた銀の電極はプラチナの STM チップに対してプラスの電位を保持していた。チップから Ag_2S 表面へポテンシャル障壁を通り抜けた電子の一部は Ag^+ イオンを金属

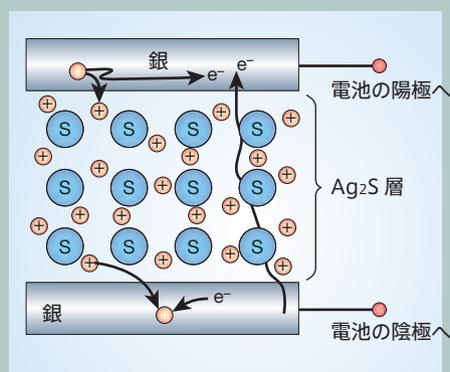


図1 硫化銀：電子・イオン混合伝導体。 Ag_2S の上と下に2つの銀接点と接触し、電池につながれている。電流の一部は電子によって運ばれ、一部は硫化物を通して反対方向に拡散するプラスの銀イオン（「+」を丸で囲んだもの）によって運ばれる。イオンは電極材料の酸化によって陽極で補給され、同時に陰極で銀が還元され析出する。

銀として析出させるために使われた。チップを表面から一定の高さに維持すると、チップと試料の間に金属銀の橋が形成された。この過程は電位を逆転させれば反対になり、銀の橋は溶けて硫化物内に戻る。これがスイッチの原理である。つまり、適切な符号の電圧を加えることで、接点をつないだり切ったりできる。近年、STMチップとサブストレート間に多くのスイッチング機構が発見されているが、個々のデバイスがそれ自身のSTMを必要とするために実用的な価値がほとんどなく、そういった研究はほとんど顧みられなかった。実用化するには、2つの電極間のこのようなトンネル結合をより簡単な、もっと再現性の高い方法で制御できる必要がある。

寺部たちはその巧みな解決法を見つけだした¹。彼らは必要とされるトンネル間隙をイオン伝導体自らが作り出し、制御する性質を利用したのである。銀線面の上のAg₂S層が厚さ1ナノメートルの銀層を介して太いプラチナ線と接触している(図2a)。そして、プラチナと銀のリード線は電圧源に接続され、上から下に電流が流れる。この電流にともなって硫化鉄を通して下へと向かう銀の移動が起こり、数秒後に上面の銀層は消失し、プラチナリード線との接触が切れる。こうしてデバイスは「オフ」状態になり、動作可能な状態になる。印加電圧の極性を逆転すると(図2b)、局所的な銀の橋が即座に形成され、プラチナとAg₂S間のギャップは再び閉じられ、スイッチは「オン」状態に切り替わる。この過程にはほんの数個の原子しか必要としないため、逆転と繰り返しが高速でできる。

さらに寺部たちは、振幅と持続時間が正確な短い電圧パルスが印加できれば、デバイスのコンダクタンスを1量子単位程度まで小さくできることを観測した。この場合、銀の橋はプラチナのリード線にちょうど1個の原子が接触するまで上方に成長するように思われる(概論は参考文献5を参照のこと)。「オン」と「オフ」状態を切り替えるには100 mVより高い電圧を必要とする。メモリービットの状態、つまりオンかオフかは、硫化銀の電子伝導特性を利用してこの電圧より低い電圧で破壊することなく読み出すことができる。

2つの硫化銀スイッチと抵抗器、コンデンサーを組み合わせて、寺部たちは基本的な論理演算AND、OR、NOTを行った。基本的には、より複雑な論理演算の実行に必要なものはこれですべてである。しかし、入出力を大きなデジタル回路内の別の論理ゲートと結合すると、この論理ゲートの効率性は著しく落ちるだろう。この問題を回避するには、ゲート信号を増幅する手段が必要となる。でなければ、このデバイスの論理回路への応用は限られたものになるだろう。著者らが観測した電圧の増加に伴う複数のステップ、つまり量子化伝導度も注目

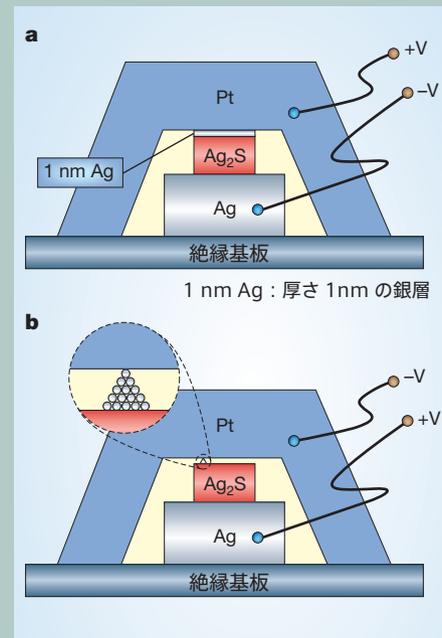


図2 硫化銀(Ag₂S)混合イオン伝導体の性質を利用した書き換え可能なメモリービット、寺部らの論文¹で説明されている。a. Ag₂S層の上に蒸着された厚さ1ナノメートルの銀層は、プラチナのリード線から銀のリード線に電流を流すと硫化物層内に消える。この結果、2つの電極間の接触が失われ、デバイスが初期化される。b. 電圧を逆にかけることにより、銀原子の橋が局所的に形成され、硫化銀とプラチナ間の接触が回復する。デバイスのコンダクタンスは1量子単位のコンダクタンスになることができ、銀の橋はたった1個の原子でプラチナのリード線に接触していることを示している。

に値するが、再現性の乏しさからみて、実用性はおそらく十分とはいえない。

とはいえ、研究の主たる成果は極めて明快なもので、ナノメートルサイズのアドレス可能なビットに縮小できる。特許出願によって著者らが研究成果を保護されたのは賢明であった。

ライデン大学カマリン・オンネス研究所(オランダ)、
Jan van Ruitenbeek

1. Terabe, K., Hasegawa, T., Nakayama, T. & Aono, M. *Nature* **433**, 47–50 (2005).
2. Terabe, K., Hasegawa, T., Nakayama, T. & Aono, M. *RIKEN Rev.* **37**, 7–8 (2000).
3. Terabe, K., Hasegawa, T., Nakayama, T. & Aono, M. *Appl. Phys. Lett.* **80**, 4009–4011 (2002).
4. Terabe, K., Hasegawa, T., Nakayama, T. & Aono, M. *J. Appl. Phys.* **91**, 10110–10114 (2002).
5. Agraït, N., Levy Yeyati, A. & van Ruitenbeek, J. M. *Phys. Rep.* **377**, 81–279 (2003).

Revisiting the Baruch Plan

バルーク計画を再考する

Nature Vol.432(441-442)/25 November 2004

C. Paul Robinson

核戦争の悪夢とは、振り払うことができるものなのだろうか。核開発をちらつかせる国は増えており、世界はその脅威と永遠に向き合わなければならないと結論づけるのは簡単だ。しかし50年以上も昔、バーナード・バルークというアメリカの政治家によって、合理的で綿密な解決法が国際社会に提唱されていた。核が拡散する今日の世界に照らしてバルークの考え方を見直してみるのには有意義なことかもしれない。

核兵器の拡散を抑制する試みは困難に満ちていると知ってなお、楽観的に考えることは可能である。振り返れば、核兵器が1945年に広島と長崎に惨状をもたらしたにもかかわらず、またその後はるかに強力な兵器が開発されているにもかかわらず、核兵器が二度と使われてはならないという永続的な信念が世界規模で生まれていないとは不自然な話である。悲しいことだが、戦勝国が直ちに「核爆弾との共存法の学習」や、さらなる核爆弾使用の回避に取り組むことはなかった。旧ソビエト連邦と西側諸国との不安定な同盟関係が崩壊し、モスクワが独力で核実験に成功すると、核の優位性を獲得し、維持しようという競争が繰り広げられた。

観念論的な出発点

だが、ごく始めはそうではなかった。1945年後半に作成されたアチソン＝リリエンソール報告で、ロバート・オッペンハイマーらは核兵器問題を国際機関の取り扱い項目にしようとした。これを受けて、バーナード・バルークはアメリカ代表として1946年6月14日の第一回国連原子力委員会に出席し、核兵器と原子力の管理を国連に行わせるという画期的な計画を提案した。

戦争と核兵器再使用の回避を目指して、第二次世界大戦終結直後に首脳会談がいくつか行われていたが、バルーク計画はその総仕上げとなるものであった。戦争や核兵器使用の回避という観念は、あまりにも悲惨だった第二次世界大戦を経て、国際社会は何としても再発防止を考えるにちがいないと

「核抑止力の意義は10年以上前の冷戦終結時に極大となったのであり、その後薄れ続けていることは間違いない」という希望から、はかない陶酔感を生み出した。このような考え方は失われてこそいけないが、冷戦のトラウマ以降、時として休眠状態にある。

バルーク計画のなかで、アメリカは原子力の独占権を新設の国連原子力応用開発機関に委譲することを考えていた。究極の目標は、原子力研究の国際的管理と核兵器の削減であった。

バルークは、「恐怖だけでは原子爆弾の使用は回避されない。兵器への恐怖は結局、それらを持つとさせてしま

う。新兵器が開発されるたびに、その対抗策が編み出されている」と語っている。

バルーク計画の提案は、旧ソ連が核兵器保有能力の開発を独自に進めていたという事実がなかったら、さらに進展していたかもしれない。しかし旧ソ連の核開発によってこの計画が受け入れられることはなくなり、結局は国際原子力機関(IAEA)という権限のかなり小さな国連機関が、原子力活動の監視という限定的使命を担うこととなった。

旧ソ連が最初に核兵器の試験を実施したのは1949年のことで、イギリス、フランス、中国がすぐその後に続いた。いったん核の魔神が瓶の外に出ると、核による攻撃を永遠に防ぐことのできない世界にあっては、望めるのはせいぜい、すべての国民国家が故意に大戦争を仕掛けることがないように方策を探ることだと考えられはじめた。そして生じたのが核の抑止力という概念であった。この概念は、命題や書物、学説などではなく、「導き出された真実」として緩やかに醸成された。これは冷戦の時代にはうまくいっていたと考えられる。しかし、これから将来も機能し続けると、いったいどうすれば確信を持てるだろう。

抑止力には代償があった。あり余るほど大量の爆弾と核分裂性物質が後に残されただけでなく、核兵器を国家の

核拡散を止めるための現実的な戦略を構築する

偉大さの象徴と捉える考え方が広まってしまった。この考え方の爆発はインドとパキスタンでみられた。この考え方がほの見えた後に消滅したのが南アフリカ（国内的理由から）とイラク（国際的圧力によるもの）だった。核武装している可能性が考えられる国が多数ある現在、国際社会は北朝鮮、それにほぼ間違いのないイランという新たな核保有国の出現に対処しようとしているところである。

重要なのは、核の抑止力は持続性のある解決法ではなく、恒久平和への道筋が見出されるまでの現実的な方便と捉えることである。そもそも、核の抑止力では危機につながる根本的要因が解消されない。また、インド亜大陸でみられたように、自らが相手国の核の「抑止力」に向かい合っていると考える国が結局は核兵器開発を進めるといふ不幸な結果が生ずることもある。

核抑止力の意義は10年以上前の冷戦終結時にピークを迎え、その後薄れ続けていることに間違いはないと考える。アメリカは、これまで自国保有分を含む、既存の備蓄核兵器を削減する国際的取り組みを主導してきた。現在は核拡散の流れに歯止めをかけようとしている。

現実的な期待

世界はこれからどこへ向かうのである

うか。人類はあまりにも複雑な性質をもっており、世界市民として連帯する能力の欠如を示す例は枚挙にいとまがないことから、戦争や侵略がすぐにも真に「非合法的なもの」とされることはあまり望めない。このため、筆者はバルーク計画の立案者とは異なり、「完全かつ包括的な軍縮」が短期的に実現可能な目標であるとは考えていない。

それに代わる平和への道は、北大西洋条約機構 (NATO) のような同盟関係の構築にあるだろう。この方式は今後、あらゆる地域での多国間同盟関係の構築に広げていくことができる。まずは東南アジアであり、次いでその他のヨーロッパとアジア諸国、南米、さらには中東とアフリカ。

核拡散に関して重大な問題をはらむ地域として、あらゆる兆候が、経済発展と技術の高度化が進む東南アジアを指し示す。パキスタンの核計画の創始者、アブドゥル・カディール・カーンは違法な製造施設をマレーシアに建設した。これには高濃縮ウラン用の遠心分離機製造も含まれていた。さらに、北朝鮮と韓国の活動が最近曝露され、両国が核兵器開発を長年研究していることが指摘されている。このことをみれば、この地域には核に手を染めている国がほかにもあるのではないかと考えられる。

NATO 諸国には、最新の加盟国を含

め、核兵器製造能力を持たない国はない。しかし、実際には製造していない国もあるのは、同盟関係によって核の負担が配分されると同時に防御力が得られているためなのである。東南アジア各国の大半はいずれ核兵器を手にしたたり製造したりする可能性があり、これを止めるには核拡散防止条約だけでは不十分である。しかし、核の同盟関係を包含する集団安全保障協定であればこれを解決することができると考えられる。この地域では、東南アジア条約機構がさらに幅広い安全保障協定につながる議論の場となっている。アメリカは以前からその主要支援国である。

東アジアの「NATO」に北朝鮮を含むべきか（あるいは含むことができるか）という疑問は当然ありうる。これに関して筆者は、歴史から得た教訓から楽観視している。NATO がもともとヨーロッパ諸国すべてを含むものでなかったことを思い起こしていただきたい。東欧諸国は戦争のない時期を経て民主主義を志向し、ソ連型共産主義が崩壊すると加盟を申請した。北朝鮮についても同じことが起こる可能性はある。

NATO に関していえば、ロシアが最近、一定の民主主義的規範から外れた挙動を示していることが、同国の加盟にとって大きな障害となっている。しかし、この流れは容易に逆転するも

Revisiting the Baruch Plan

バルーク計画を再考する

核拡散を止めるための現実的な戦略を構築する

のである。ロシアにとっては、敵対関係のリスクを冒すのではなく西側との同盟関係を維持することが、安定した未来に不可欠である。

求められる迅速な行動

世界をひとつにまとめ上げ、バルーク案のような計画に到達するという目標に関して、目下最大の問題となっているのは中東である。国家間紛争と内戦の長い歴史があるため、それぞれの国民国家が協力関係を構築するのは困難であろう。間違いなく、イスラエル、および同国が保有していると考えられる備蓄核兵器は、中東の安全保障条約のための対象とすべきであり、(アラブにとっての) 許しがたい例外として放置してはならない。

中東では、現在一般的となっている独立志向ではなく、集団安全保障の視点がもたれなければならないが、条約作成へ十分な時間があるわけではない。条約はまず、東南アジアで完成されるべきだと考える。東南アジアでは、技術が高度化するとともに経済的な豊かさから、どの国が1~2年以内に核兵器をもつことになって不思議はない。中東諸国がその水準に達するにはもう少し時間が必要であろうが、それもあくまでも数年のことであり、10年単位ではない。悠長なことを言うてはいられないのである。

核拡散防止条約の不備を修正して短期間で有効な不拡散体制を構築しようとするのは結構なことだが、それではあるべき姿はいつか崩れる。核拡散防止条約は根本的な構造的問題を持つ。それは、核兵器保有の正当性を5カ国のみを与え、それ以外の国には認めないという不公平が定められていることである。条約が認めていない核兵器保有国であるインド、パキスタン、それにイスラエルに関わる中途半端な状況をどう処理するかという重大な問題は、速やかに解決されなければならない。また、核拡散防止条約には不正のチェックが不十分であるという大きな抜け穴があり、これも正されなければならない。

待望されるリーダーシップ

つまり、世界は未だ核拡散防止条約の抱える問題のすべてを取り扱って解決する段階になく、現時点で核拡散防止条約をバルーク計画の体制に拡張しようというのが拙劣な話であるのは間違いない。その代わりとして、集団安全保障の世界共通概念が形成されるまでは、大陸ごとの地域同盟に精力を傾けるべきである。

現在IAEAは、核保有国と非保有国が核兵器問題に関して議論する場と

なっている。筆者が考えているのは、程度の差こそあれNATO方式に似た同盟に加わることによって、各国が「核保有国」となることである。集団安全保障協定の世界的ネットワークがあれば、踏み込んだ検査ははるかに実施しやすくなると考えられる。これが実現すれば、安全保障に関する脅威がかなり緩和されることになるのではなかろうか。そうすれば核拡散防止条約の

再構築とIAEAの強化が開始され、世界的権限をもった実効性ある核監視機構ができあがるものと思われる。

アメリカはもともと国連を介したバルーク計画の実行を考えていたが、残念ながら現在それは安全保障のリーダーシップが存分に発揮されるような組織になっていない。また、国連決議が軍事的手段で効果的に執行されるための、確かな機構も存在しない。国際機関がやがて一定の信頼を得るに足る能力をもつようになり、このような提案が真剣に検討されるようになることが望まれる。当面、バルーク計画の理念を少しずつ現実のものとするためにできることはいくらでもある。 ■

サンディア国立研究所理事兼所長、
C. Paul Robinson