

この20年の科学、 その偉大なる発展を振り返る

Part 1 — 物理科学分野

竹内 薫

この20年は、科学にとっていったいどんな年月だったのか。最も偉大な発見や研究について、その軌跡を追ってみよう。Part 1では、宇宙・地球・物理・化学・テクノロジーなど物理科学分野の発展を、科学作家としてテレビや出版界で活躍中の竹内薫氏が概観する。

この小論では、この20年間(1987-2007)の物理科学分野の発展を振り返ってみたい。実をいえば、このような試みは「暴挙」とよぶにふさわしい。なぜなら、現代科学の研究の裾野は広大であり、物理科学だけに話を限っても、毎年のナンバーワンの研究を追うだけで紙数が足りなくなってしまうからだ(スポーツ競技などと違って、科学では、そもそも、その年のナンバーワンの研究など決められやしない…)

そこで、いろいろと思いを悩んだ末、「日本人の研究」「インパクトの大きさ」「Natureに掲載」という3つのキーワードを頼りに、宇宙・地球・化学・物理・

テクノロジーの各分野から、それぞれ数本の研究をピックアップして解説することにした。それでも、ほとんどの重要な研究を取りこぼすことになるが、あくまでも、筆者が個人的に「この20年を振り返って」書いているのである。あらかじめご了承ください。

精密科学の仲間入りを果たした宇宙論

過去20年の天文・宇宙物理学の発展はすさまじく、理論面では、超ひも理論やDブレーンをもとにした宇宙論まで登場した。だが、そういった数学的な色彩の強い研究は、ここでは取り上げない。もう少し「地に足のついた」研究を中心に

振り返ってみよう。

まず、どうしてもはずすことができないのが、COBE (Cosmic Background Explorer、宇宙背景放射探査機)による宇宙背景放射の観測である(図1、ちなみにCOBEの発音は「コービー」である)。宇宙背景放射は、宇宙初期の放射の痕跡であり、日常生活においても、携帯電話の雑音や、アナログテレビの砂嵐として「見たり聞いたり」することができる。1989年に打ち上げられたCOBEによる観測から、1992年には、宇宙初期の放射分布に小さな「ゆらぎ」があることが判明した。このゆらぎこそが、銀河や星といった宇宙の構造が生まれるために必

NASA; NASA

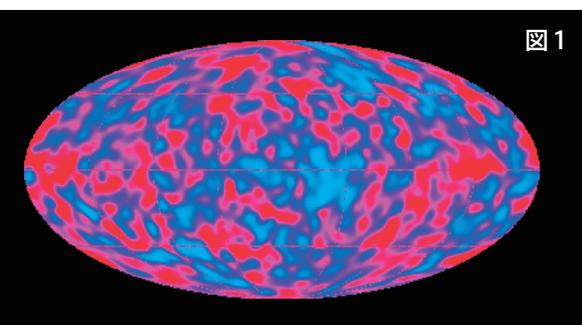


図1

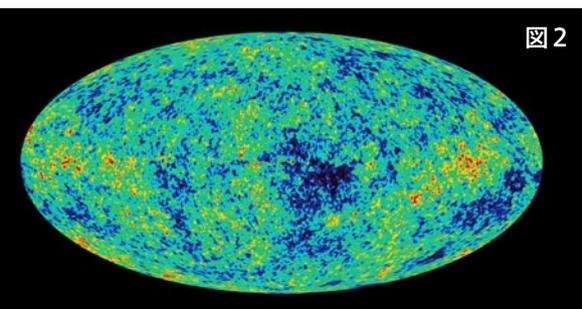


図2

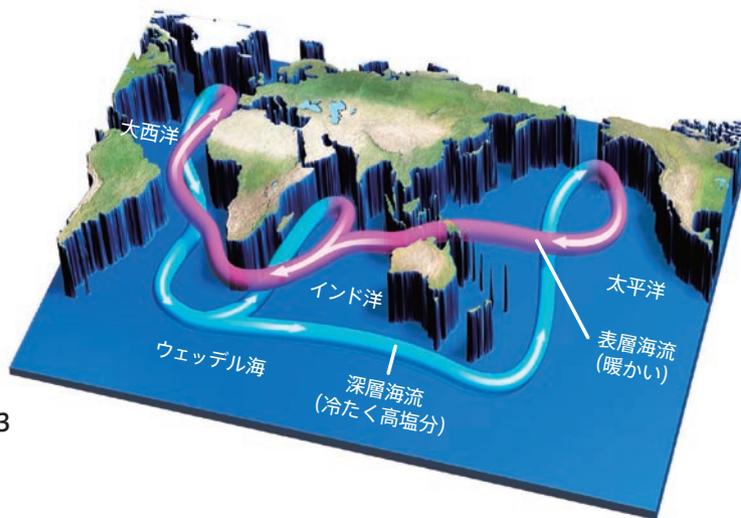


図3

図1は、1992年にCOBEが観測した宇宙マイクロ背景放射の全天マップ。図2は、COBEの後継機として2001年に打ち上げられたWMAPがより精密に観測した宇宙マイクロ背景放射の全天マップ。図3は、1980年代に提唱され始めた海洋深層大循環の流れ。高緯度の寒冷な海の水が冷やされて深層に沈み込むが、深海を流れている間に表層から伝わる熱によってだいに軽くなり、また表層に出てきて循環する。一巡するのにおよそ2000年かかるといわれている。

日本佳代美

要な「種」の役割を果たす。COBEによる観測チームを率い、我々の宇宙の成り立ちを解明した功績により、2006年度のノーベル物理学賞は、J・C・マザーとJ・F・スムートに授与された。

そのCOBEの後継機として、2001年に打ち上げられたのがWMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) である。さらに精密な観測が行われた結果、さまざまな宇宙のパラメータが確定した(図2)。例えば、宇宙の年齢は約137億年であり、宇宙の組成は4%が通常の物質、23%が暗黒物質、73%が暗黒エネルギーであることがわかった。COBEとWMAPによる精密観測により、宇宙論は、数学的な仮説の集まりから、精密物理学の仲間入りを果たしたといえよう。

天文分野では、太陽系外惑星の発見も見逃せない。太陽系外惑星の探査の歴史は古く、19世紀にまで遡ることができるが、そのほとんどは誤りであったと考えられている。現在では、発表された論文としては、1988年のB・キャンベル、G・A・H・ウォーカー、S・ヤングによるものが最初の太陽系外惑星として認められている¹。しかし、個人的に印象深かったのは、やはり、1995年のM・マヨールとD・クロによるペガサス51番星の惑星の発見だ²。なにしろ、太陽と同じ種類の恒星(主系列星)の周りの惑星が見つかったのである。現在、太陽系外惑星は200個以上が発見されている。果たして、その中に生命の宿る惑星は存在するのだろうか。

大気圏・岩石圏・水圏から見た地球科学の進展

まず、大気圏では、なんといっても、地球温暖化論の確立が目につく。特にGCM (General Circulation Model、一般循環モデル)の果たした役割が大きい。GCMは、大気循環に海洋大循環を組み合わせた複合的な気候変動モデルだが、やはり、日本の真鍋淑郎の先駆的な業績に注目すべきだろう³。

次に、岩石圏に目を向けてみると、地震国日本に住む我々としては、どうしても地震研究が気にかかる。そのなか



図4 2002年、日本は小柴昌俊と田中耕一のノーベル賞ダブル受賞(物理学賞と化学賞)に沸いた。

でも、いわゆる「スロー地震」(Slow Earthquake)がここ20年における最大の収穫といえるだろう。日本の川崎一朗が主な提唱者だ。スロー地震はほとんど地震波を放出しない「非地震性すべり」である。普通の地震は秒速2~3kmで断層面が拡大するが、スロー地震は、非常にゆっくり断層面が拡大するので、地震として感知されない。プレートの動きと地震の総量との差を埋め合わせるため、「プレート沈み込み帯の暗黒物質」ともよばれる⁴。

水圏では、やはり、海の(表層ではなく)深層の大循環が忘れてはならない研究成果だろう。海流の主な原因は風にある。その風は海の表面に影響を与えるため、長い間、海流は海の表層に限られるものと考えられてきた。実際、私が学校で海流について教わったとき、その流れが、どれくらいの深さについてのものなのかは、あまり疑問にも思わなかった。80年代にW・S・ブロッカーが提唱し始めた海洋深層大循環(Great Ocean Conveyor Belt)(図3)は、「コンベアーベルト」というわかりやすい比喻とともに、海流に対する我々の認識を根底から覆した⁵。

最後に、この分野で忘れてはならないのが日本の「地球シミュレーター」だ。一時、スーパーコンピューターの演算速度で世界一を占めていたことでも有名に

なったが、無論、地球科学への貢献には特筆すべきものがある。

「基礎的な技法」から物理・化学・テクノロジーを振り返る

物理・化学・テクノロジーに関しては、あまりにも細分化されており、インパクトのある業績も数え切れないため、何本かの論文に絞ることは至難の業である。したがって、いささかたよることを承知で、「基礎的な技法」という視点を軸に、この20年を振り返ることとしたい。

まずは、2002年度のノーベル化学賞に輝いた田中耕一による「ソフトレーザー脱離イオン化法」を挙げたい(図4)。サラリーマンのノーベル賞受賞として世間の話題をさらったのは事実だが、もちろん、質量分析の手法によりタンパク質が研究できるようになった点で大きな業績といえる。病気の診断や薬の開発など、幅広い応用へとつながった「原点」のような基礎研究だ。化学が苦手な私など、「質量分析」という言葉すらコワイ感じがするが、極めて軽いタンパク質をその質量から判別するというのは、どこことなく職人芸の雰囲気がある。試料分子のイオン化を助ける補助剤と試料を混ぜた混合物に窒素レーザー光を照射し、気化させると、補助材のおかげで試料分子が壊れることなくイオン化される。そして、

イオン化された分子を電位差のある空間で飛行させると、「重いと遅く飛び、軽くと速く飛び」という単純な原理により、その質量がわかる。ただし、5人の共同研究なのに1名の受賞になった点については、個人的にノーベル賞の選考過程に素朴な疑問を抱いてしまった⁶。

続いて、さまざまな研究に使われる基礎技術の代表として「レーザー冷却」を取り上げたい(図5)。原子の移動速度を自在に変化させる技術、それがレーザー冷却である。レーザーを原子の集団に照射し、原子の運動エネルギーを減少させて止めることさえ可能になった。レーザー冷却の技術が発展したのは1980年代に入ってからである。まずW・フィリップスが原子ビームを減速させる方法を提案し、その後S・チューヤやC・C・タヌージらによって3次元や、さらなる低温の技術へと拡張された。3名は、これらの業績により、1997年度のノーベ

ル物理学賞を受賞している。現在、世界中で100を超える研究グループがレーザー冷却の分野で仕事をしており、原子光学、原子時計、光学格子、ボース-アインシュタイン凝縮などの分野に応用され、重要な基礎技術として、その地位が確立されている^{7,8}。

1990年代の材料科学界の幕開けは、「アーク放電によるフラーレンの大量合成」のニュースだった。アーク放電といえば、鉄鋼の溶接などに使われる古典的な技法である。放電の電流の通り道がアーク(arc、弓なり)になっていることから、こうよばれる。ようするに、正負の電極の間の放電を利用して、電極そのものの一部を蒸発分解させる手法だ。ドイツのW・クレッチマー、D・R・ハフマンらは、この地味ともいえる方法を使うことにより、世界で初めて、フラーレンの大量合成に成功した⁹。この研究により、それまで「応用研究」とは



図5 1980年代レーザー冷却の技術が発展した。写真は光と磁場の中に捕捉されたネオン原子。

程遠かったフラーレンに一気に注目が集まることとなった。ところで、フラーレンは、アーク放電の陽極側にできるのだが、誰も注目していなかった陰極側を調べて、フラーレンとはまったく異なる新材料であるカーボンナノチューブを発見したのが飯島澄男であった¹⁰(下コラム参照)。フラーレンの発見者の1人であるR・E・スモーリーが1996年にカーボンナノチューブの大量合成法を発見する

ナノテクノロジーと Nature

もともと材料に強い日本だが、フラーレンからカーボンナノチューブにいたる研究を眺めると、波乱万丈の感がある。フラーレンの発見は1985年のH・クロトー、R・カール、R・スモーリーらに帰せられる。3人は1996年度のノーベル化学賞を受賞した。フラーレンの存在自体は、大澤映二が1970年頃に着想していたものの、邦文雑誌にしか発表しなかったため、世界に知られることはなく、「幻の予言」に終わった。

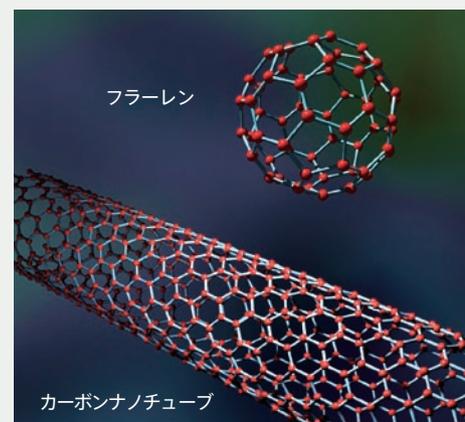
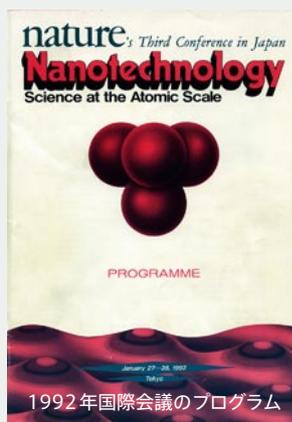
1992年の1月にNatureは、東京で3回目となる国際会議を開催した。「Nanotechnology: Science at the Atomic Scale」と題された会議には、本文でも取り上げた外村彰やスモーリーらの名前も見える。スモーリーは、会議のプログラ

ム(写真)の中で次のように述べている。「フラーレンの他にも(中略)同じように曲がったグラファイトをもとにしたトポロジカルな構造が存在する。特に直径数nmで長さ1μmくらいまでのグラファイトの閉じた微小チューブが、最近になって合成された(竹内訳)」多少意識したが、もちろん、飯島澄男により発見されたカーボンナノチューブのことである。この時点では、おそらくカーボンナノチューブという用語さえ定着していなかったのであろう。それどころか、当時のNatureをめぐってみると¹⁷、ナノテクノロジーなる分野の存在自体が、ようやく物理の世界において認知されつつあったようで、まさにナノテクの揺籃期だったことに気がつく。

興味深いのは、1986年から開催されたNatureによる東京国際会議は、ほとんどが生物・医学分野であり、物理科学は1992年のナノテクノロジーだけであることだ。Nature姉妹誌の相次ぐ創刊をみても、2002年のNature Materialsま

では、すべて生物・医学分野であることに驚かされる。この20年の最初の10年間、Natureは生物・医学分野に力を注ぎ、後半になって、バランスを取るように、ようやく物理科学に目が向けられるようになったようすがうかがわれる。KT

月本佳代美



に及び¹¹、今では、全世界で夢の新材料を使った研究が活発に行なわれるようになっている (p.48 参照)。

電子線ホログラフィーで見る

日本のお家芸である電子顕微鏡の話題に移ろう。電子顕微鏡は、もともと光学顕微鏡では見えないような小さな物体を見るために開発された。ところが、電子顕微鏡には大きな弱点があった。それは、凸レンズはあっても凹レンズがないことである。カメラ好きの人なら誰でも知っているように、レンズは、必ず凸レンズと凹レンズを組み合わせて「収差」を補正している (収差とは、レンズによってできる像のズレや歪みのこと)。なぜ、凹レンズがつかれないのかの説明は省くが、その対策として登場したのが「電子線ホログラフィー」である。ホログラフィーというと、身近なクレジットカードに付いている鏡のような虹色の輝きを思い浮かべるが、もともと、電子顕微鏡の解像度をアップさせる目的で考案されたのだ。

電子線ホログラフィーでは、まず、物体に電子線を当てて散乱させる。次に、この散乱波に参照波とよばれる別の波を干渉させ、その干渉パターンを記録する。この記録が「ホログラム」だ。こうやってできたホログラムに、今度は (電子ではなく!) 光を当てると、最初の電子の散乱情報は光に置き換えられる。光の像ならば、凹レンズが存在するので、収差の問題も解決できる。この電子線ホログラフィーの歴史は、50年ほど前から始まったが、ここ20年の間に2つの画期的な応用研究がなされた。代表的な研究者として外村彰を挙げたい (図6)。

第1の応用は、超伝導体中の磁束量子の姿を捕らえたことである^{12,13}。超伝導薄膜にかけた磁場が細い糸のように絞られ、超伝導体を突き抜けるのが磁束量子だ。この磁束量子を直接「見る」ことができるようになり、超伝導研究に大きなインパクトを与えた。第2の応用として、ベクトルポテンシャルの観測が挙げられる。電磁気現象はマクスウェルの方程式で記述される。我々に馴染み深い電場・

磁場は、数学的には(ベクトル)ポテンシャルから導かれる。特に量子力学では、電場・磁場よりもベクトルポテンシャルのほうが主役に躍り出る。外村彰らは、世界で初めて、このベクトルポテンシャルを「見る」ことに成功した¹⁴。電子線ホログラフィーは、強誘電体や半導体内部の電場観測にも応用されつつあり、今後の発展が非常に楽しみである。

極微の世界に挑む

SFの古典「スタートレック」では、宇宙船エンタープライズ号のカーク船長が「スコッティ、上げてくれ」というと、機関士長のスコッティが転送装置で惑星の上から船長を宇宙船まで転送する。そんなSFの夢が、現実のものとなった。ただし、転送されるのは人間ではなく、ずっとずっと小さい「量子」なのであるが……。1997年にA・ツァイリingerらが*Nature*に発表した論文は、量子のテレポーテーション (=転送) を実証したことで、大きな話題をよんだ¹⁵。

量子テレポーテーションをFAX送信と比較してみると、両者の似ている点と異なる点が理解できるだろう。まず、量子の世界には「複製不可能」という仕組みがあるため、量子テレポーテーションでは、転送されるオリジナルは送信側に残らない。そして、受信側に出現するのは完全なオリジナルなのだ。それに対して、FAXの場合は、オリジナルは送信側に残り、その不完全な複製が受信側で作られる。ツァイリingerらの論文は、量子テレポーテーションの実証、という点で大きな意味をもつが、送信者と受信者のほかに制御者を加えた3者間での量子テレポーテーションを実証したのが古澤明らのグループである¹⁶。「なんだ、2者から3者に増やしただけじゃないか」というなかれ。この場合、2と3の差は極めて大きい。なぜなら、3者になって初めて「ネットワーク形成」の可能性が開かれるからである。3者での方法は、すぐに4者、5者と一般化することができるのだ。量子テレポーテーションは、単なる学術的な興味だけでなく、将来的



図6 IMVホログラフィー電子顕微鏡と外村彰博士。

には量子コンピューターなどへの幅広い応用が見込まれている。

自然界を作っている物質の構成単位である素粒子は、電子の仲間とクォークに分かれる。電子の仲間には、ミュー粒子、タウ粒子のほかに、3種類のニュートリノがある (ニュートリノについては次ページのコラム参照)。クォークは、アップ、ダウン、チャーム、ストレンジ、トップ、ボトム の6種類がある。この6つのうち、最後に発見されたのが、最も重いトップ・クォークであった(1995年)。その質量は、不思議なことにアップやダウンと比べて、約10万倍も重い。現在、この重い粒子をつくることのできるのは、フェルミ研究所にあるテヴァトロンという粒子加速器のみである。トップ・クォークの発見に先駆けて、その質量を間接的な実験結果と理論から予測していたM・J・G・フェルトマンとG・トーフフトは、その業績により、1999年度ノーベル物理学賞を受賞した。

新たな『科学の黎明 (はじまり)』

137億光年のひろがりをもつ宇宙の話から始めて、地球、化学、ナノテク、量子、そして、極微の素粒子であるトップ・クォークまで……駆け足でみてきたが、あらためて、科学の探究に終わりなどないことを実感させられた。

残念ながら、ハッブル宇宙望遠鏡、すばる天文台、地球物理学のブルーム説、

材料科学のフォトニック結晶、ボース-アインシュタイン凝縮の実証等々…、多くの話題に触れることができなかった。研究に関わっていた方々には、心からお詫び申し上げます。

私は、サイエンスライターであるとともに翻訳家でもあるので、『科学の終焉（おわり）』という本を訳したことがある（ジョン・ホーガン著、竹内薫訳、1997年徳間書店刊）。その中で、ホーガンは、科学における「収穫逓減の法則」を提唱していた。成熟した科学という分野は、どんどん収穫が減っていく運命にある…重要なことは、すべて20世紀までに発見つくされてしまった…、そんな意味のことが書かれていた。2007年の今、私は、ホーガンの主張がとんでもなく間違いであったと確信している。科学の営みに終わりなどない。逆に、研究が進めば進むほど、

謎は深まり、未知の世界が開ける。今から20年後、果たして、科学は我々にどのような驚きの世界をみせつけるのだろうか。それは、誰にもわからない…。 ■

謝辞

地球分野については、加藤茂生氏（早稲田大学人間科学学術院・専任講師）から情報をいただいた。物理・化学・テクノロジー分野については、金子雄太氏（横浜国立大学大学院博士課程）にリサーチをお願いした。トピックスの選定も記述内容も、おふたりに負うところが大きい。ここに記して感謝したい（ただし文責はすべて竹内にある）。

竹内薫（たけうち・かおる） / 科学作家、翻訳家。1960年生まれ。東京大学理学部物理学科卒業、カナダのマギル大学大学院博士課程修了。専門はエネルギー物理学。著書に『99.9%は仮説』（光文社新書）、『世界が変わる現代物理学』（ちくま新書）、『Natureを英語で読みこなす』（ブルーバックス）など多数。1990年から12年間、Nature（日本印刷版）の巻頭翻訳に携わった。

参考文献：COBEやWMAPのように大きな研究チームによる共同研究については参考文献を省略した。また、複数の関連論文がある場合、筆者の視点から代表的なもの1点を選んだ。以下は、決して網羅的なものではないことをお断りしておく。

1. Campbell, B. et al. *Astrophysical Journal*, Part 1331, 902-921 (1988)
2. Mayor, M. & Queloz, D. *Nature* **378**, 355-359 (1995)
3. Manabe, S. & Stouffer, R. J. *Nature* **364**, 215-218 (1993)
4. Heki, K. et al. *Nature* **386**, 595-598 (1997)
5. Broecker, W. S. *Nature* **367**, 414-415 (1994)
6. Tanaka, T. et al. Second Japan-China Joint Symposium on Mass Spectrometry Abstract (1987)
7. Chu, S. et al. "Three Dimensional Viscous Confinement and cooling of Atoms by Resonance Radiation Pressure." (in *Laser Spectroscopy VII*, T.W. Hänsch and Y.R. Shen, eds., Springer-Verlag.) (1985)
8. Lett, P. D. et al. *Phys. Rev. Lett.* **61**, 169-172 (1988)
9. Krätschmer, W. et al. *Nature* **347**, 354-358 (1990)
10. Iijima, S. *Nature* **354**, 56-58 (1991)
11. Thess, A. et al. *Science* **273**, 483-487 (1996)
12. Matsuda, T. et al. *Phys. Rev. Lett.* **62**, 2519-2522 (1989)
13. Harada, K. et al. *Nature* **360**, 51-53 (1992)
14. Tonomura, A. et al. *Am. J. Phys.* **57**, 117-120 (1989)
15. Bouwmeester, D. et al. *Nature* **390**, 575-579 (1997)
16. Yonezawa, H. et al. *Nature* **431**, 430-433 (2004)
17. Ball, P. & Garwin, L. *Nature* **355**, 761-766 (1992)

スーパーカミオカンデとK2K実験

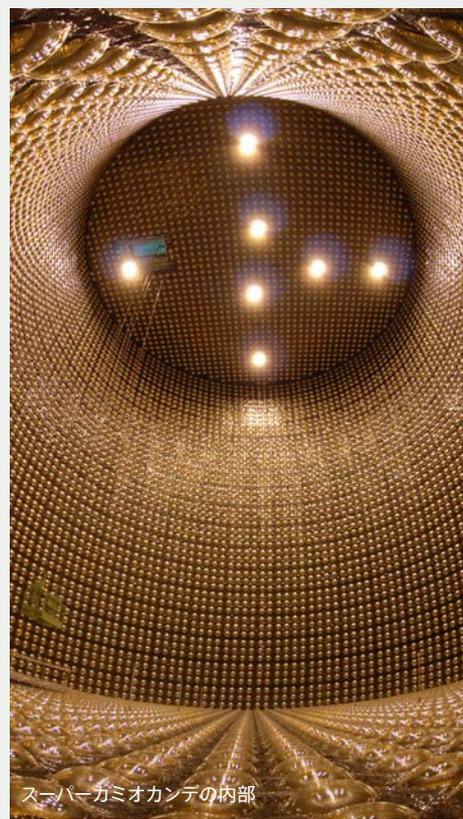
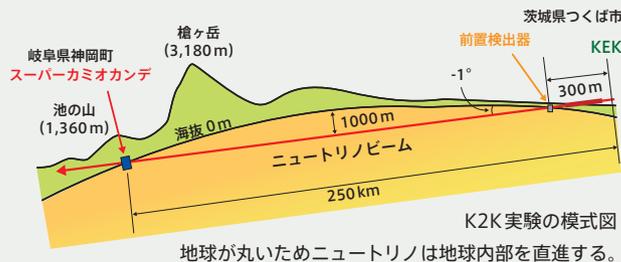
日本を代表するニュートリノ研究のメッカがスーパーカミオカンデ（右写真）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）である。ニュートリノは日本語では「中性微子」。その名のごとく電氣的に中性（＝電荷がゼロ）で、微小な素粒子なのだ。スーパーカミオカンデは、岐阜県飛騨市神岡町にある岩盤の中に5万トン水槽を作り、宇宙から飛んでくるニュートリノを捕らえる施設だ。ニュートリノはほとんど物質と反応しないため、地球も人間の身体も素通りしてしまう。その数は膨大で、親指大の面積を1秒間に660億個のニュートリノが通過する。そんな捕らえどころのない素粒子だが、5万トンの純水があれば、まれに水の分子と衝突し、チェレンコフ光という「青い光」が発生する。その光を観測することによりニュートリノの性質を調べることが可能になる。

このニュートリノは、長い間、質量がゼロだと考えられてきたが、実は、極めて小さい質量をもつことが、1998年にスーパーカミオカンデで実証された（ちなみに、スーパーカミオカンデの「ンデ」は、陽子崩壊実験（Nucleon Decay Experiment）の頭文字からきている。当初の目的は、ニュートリノの観測ではなく、陽子の崩壊実験だったのだ）。その後、茨城県つくば市にあるKEKで人工的に作られたニュートリノを250km離れたスーパーカミオカンデに撃ち込んで、ニュートリノが質量を

もつことは実験的にも確認された。この実験は、KEKから神岡まで、ということで、KtoKを文字で「K2K実験」と名づけられた（下図）。

捕らえどころのない素粒子の素顔がみえてきた。ニュートリノに関する一連の研究成果により、小柴昌俊は2002年度のノーベル物理学賞を受賞した（図4）。また、後継者の戸塚洋二は2007年度のフランクリン・メダルを授与された。まさに、日本が世界に誇る研究だといえよう。

KT



スーパーカミオカンデの内部