

Science & Technology Trends

科学技術動向

6
2009
No.99



レポート

p2.9 生体の遺伝子発現制御機構である
エピジェネティクス研究の最近の動向

p3.22 電磁気学における混乱とCPT対称性の意義
—対称性に結びつく単位系—

トピックス

ライフサイエンス分野

p4 肥満解消に期待される
褐色脂肪細胞における新知見

ナノテク・材料分野

p6 電気・磁気変換の新しい原理で
あるスピン起電力を実証

フロンティア分野

p8 彗星核に含まれる結晶質珪酸塩に
関する観測および理論的研究

情報通信分野

p5 computational knowledge engine
の一般公開

エネルギー分野

p7 非食用農作物残渣からの
バイオ水素生産実証試験

2009
No.99

6

Science&Technology Trends

科学技術動向

今月も「科学技術動向」をお届けします。

科学技術動向研究センターは、約 2000 名の産学官から成る科学技術人材のネットワークを持ち、科学技術政策において重要な情報あるいは意見の収集を行い、また科学技術予測に関する活動も続けております。

月刊「科学技術動向」は、科学技術動向研究センターの情報発信手段の一つとして、2001 年 4 月以来、毎月、編集・発行を行っています。意識レベルの高い科学技術関係者の方々、すなわち、科学技術全般に関して広く興味を示し、また科学技術政策にも関心をお持ちの方々にご読んでもいただけるものを目指しております。「トピックス」では最近の科学技術および政策から注目される話題をとりあげ、また、「レポート」では各国の動向や今後の方向性などを加えてさらに詳しく論じています。これらは、科学技術動向研究センターの多くの分野のスタッフが学際的な討議を重ねた上で執筆しています。「レポート」については、季刊の英語版の形で海外への情報発信も行っています。

今後とも、科学技術動向研究センターの活動に有効なご意見を読者の皆様からお寄せいただけることを期待しております。

文部科学省科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター センター長
奥和田 久美

このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします。

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「科学技術動向・月報一覧」でご覧いただけます。

文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

【連絡先】 〒100-0013

東京都千代田区霞が関 3-2-2 中央合同庁舎第 7 号館東館 16 F

【電話】 03-3581-0605 【FAX】 03-3503-3996

【URL】 <http://www.nistep.go.jp>

【E-mail】 stfc@nistep.go.jp

生体の遺伝子発現制御機構である エピジェネティクス研究の最近の動向

最近、「ゲノム変異以外のメカニズムで遺伝子発現を制御し、細胞や生体に変化を生じさせる現象」と定義されるエピジェネティクス研究が活発である。それは、エピジェネティクスが、多くのライフサイエンス分野の研究領域に横断的に関連し、生物の発生・分化から、環境汚染物質の生体への影響、がんや生活習慣病の発症メカニズムの解明や治療のための創薬研究など、幅広い研究領域を含んでいるからである。

近年、エピジェネティクス研究において動きがある。「遺伝子発現制御機構の解明」のテーマの下、様々な領域の研究者が集まり、関連する論文数の急増がみられ、欧米を中心に多くの研究集会の開催や研究ネットワークの形成がされている。日本においても2006年に日本エピジェネティクス研究会が発足した。これらの動きに対応して、米国のNIHは2008年からの5年間で190億円以上の出資予定を発表し、欧州においてもEUの研究資金が投入されている。日本では大規模プロジェクトレベルの推進は無く、JSTのiPS研究プログラム内でiPSに関連するエピジェネティクス研究が支援されている。

エピジェネティクスの観点から言えば、ヒトは、「誕生時に大まかなことは既に決定済みであるが“詳細は未確定で様々な可能性をもつ存在”」であり、「外界の影響を受けて一生を通じ変化し続けるもの」である。

エピジェネティクスは、生体内の恒常性維持のための遺伝子発現制御に関する科学的知見の蓄積や、生体内の遺伝子発現の人為的制御を可能とする技術開発など、今後の進展と成果が期待される国際的に注目度の高い研究領域であり、日本においても積極的な研究支援が必要である。もし、最優先の研究課題を一つ挙げるとすれば、それはエピジェネティクスの解析装置開発であると考えられる。

クローン猫（右）は三毛猫（左）とゲノムが同一であるが毛皮模様や性格が異なる

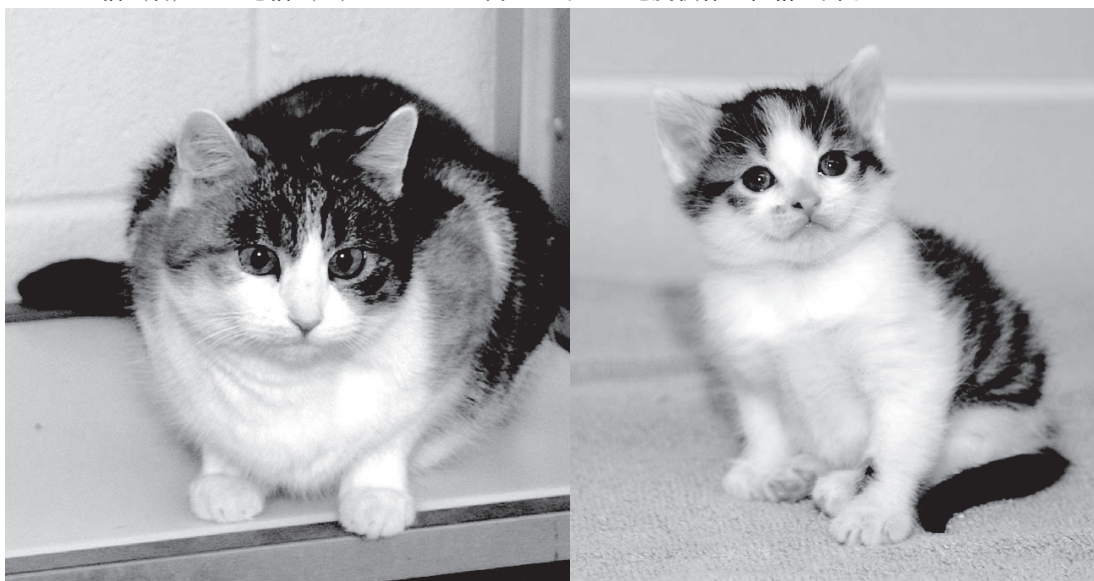


Photo courtesy : TAMU College of Veterinary Medicine

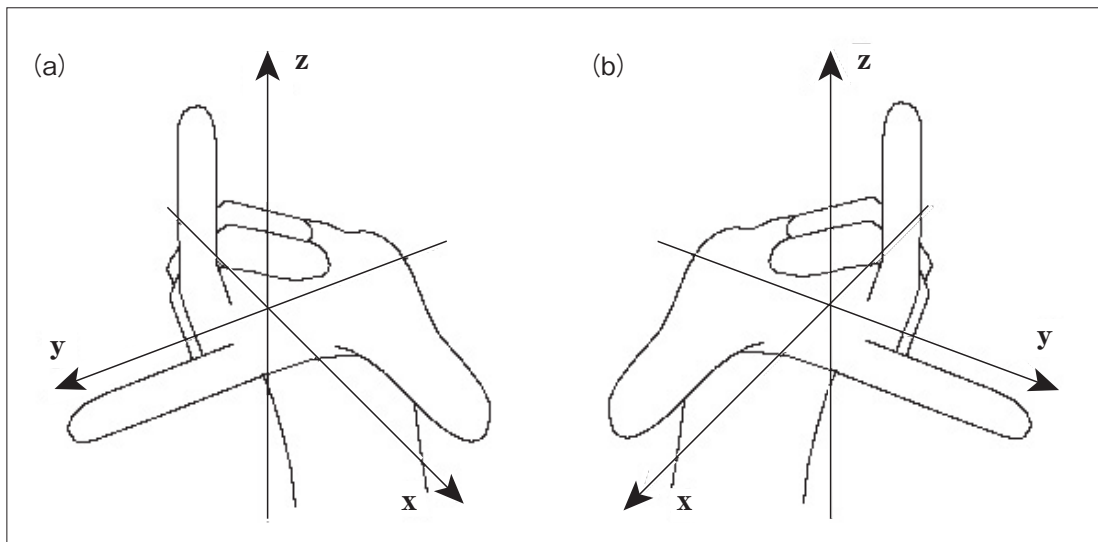
電磁気学における混乱とCPT対称性の意義 —対称性に結びつく単位系—

物理学は19世紀後半から20世紀初頭にかけて「電磁気学」「相対論」「量子力学」という大きな革命を経験したが、それから1世紀以上を経て、それに匹敵する新たな革命が起きる兆しが見え始めている。そのキーワードは、2008年のノーベル賞の対象ともなった「CPT対称性」、すなわち時間反転と空間反転と粒子反転に関する対称性である。物理学の普遍定数、例えば、光の速度 c 、真空の誘電率 ϵ_0 または透磁率 μ_0 、そして電子の電荷 e 、あるいはプランク定数 h はなぜ一定であり、そしてなぜその値をとらねばならないかという疑問に、通常使われる国際単位系（MKSA単位系）では答えられず、普遍定数の本質的な意味が理解できない。ここで、 $c^2 = \epsilon_0^2 = e^2 = h^2 = 1$ となる単位系をとり、反転対称性という概念をこれらの普遍定数に関連づけるとその意味も明らかとなり、次の新たな革命のヒントが見えてくる。

Maxwellが確立した「電磁気学」は、電子・電気工学や材料工学などの様々な分野においても重要な基礎学問であるが、その電磁気学の教科書において E - B 対応か E - H 対応かという混乱が生じている。これは、磁場には H （磁場）と B （誘導磁場または磁束密度）の2種類の間があり、どちらを本質的と考えるかという立場の違いである。しかし、この混乱は電場や磁場に関する空間反転対称性の議論が不足していることが原因の一つであり、この対称性の議論を通じて、 ϵ_0 や μ_0 の意味も理解される。

Maxwellは「Faradayの提唱した場の実態は何か」という疑問から電磁波の存在の予言に至り、Einsteinは「自分が光の速さで走ると光はどの様に見えるか」という疑問から後に相対性理論を導いたと言われている。当然と信じられていることでも良く考えるとわかっていないことが多く、それ以外にも未知の疑問も多いと思われる。一見突飛でも素朴で妥当な疑問が、科学にとって大事であり、このような問題に真剣に向き合える人材と研究環境を日本にも整えることが重要である。

(a) 左手座標系（左手系）と (b) 右手座標系（右手系）の座標の決め方



科学技術動向研究センターにて作成

脂肪細胞には、脂肪を蓄積する白色脂肪細胞と、低温時に脂肪を燃焼してエネルギーに変換する褐色脂肪細胞の2種類があり、後者の褐色脂肪細胞の性質を利用した肥満解消法が期待されている。この細胞は新生児には多く存在するものの、成人になるとほとんど消失するため生理的な意義はないと考えられていたが、今回、オランダ・米国・スウェーデンの各研究チームはそれぞれ生体イメージング技術を用いた研究を実施し、褐色脂肪細胞が成人においても存在し、かつ正常に機能することを同時期に発表した。今回のような新知見が、褐色脂肪細胞を用いた肥満解消法など、肥満に関する研究開発を活発にするのではないかと期待される。

トピックス / 肥満解消に期待される褐色脂肪細胞における新知見

脂肪細胞には、褐色脂肪細胞と白色脂肪細胞の2種類の細胞がある。脂肪細胞の多くは、脂肪を蓄積する白色脂肪細胞であり、一方の褐色脂肪細胞は、寒い時に脂肪を活発に燃焼してエネルギーに変えて体温を維持するという役割をもつ。後者は、その性質を利用した肥満解消法の開発が期待されてきた。しかし、褐色脂肪細胞はマウスのような小動物やヒトの新生児には多く存在するが、成人ではほとんど消失し生理的な意義はないと考えられていた。

最近進展した生体イメージング技術を用いて、オランダのMaastricht Universityのvon Marken Lichtenbelt博士¹⁾、米国のハーバード大学医学部ジョスリン糖尿病センターのKahn博士²⁾、スウェーデンのUniversity of GoteborgのEnerbäck博士³⁾らの各研究チームは、成人にも褐色脂肪細胞が存在し機能することをそれぞれ確認して、2009年4月9日発行のNew England Journal of Medicine誌に発表した⁴⁾。

3つの研究グループは、いずれも、放射性同位体で標識したグルコース誘導体 (¹⁸F-FDG) を成人に投与し、これが代謝される体内の部位または組織を、PET (陽電子放射断層撮影装置) とCT スキャンを組み合わせた装置 (PET/CT) を用いて明らかにした。PET/CT装置の進展により、代謝などの体内の生化学的な状態の情報と共に同じ部位の解剖学的な情報を同時に得ることができるようになっている。

von Marken Lichtenbelt 博士のグループは、健康な24人 (10人がBMIで標準、14人が肥満) の若年男性を22℃と16℃に置いて、¹⁸F-FDGの代謝を観察した。その結果、24人中23人において、低温 (16℃) 下

で首・胸・腹の各部位で褐色脂肪細胞が活性化 (脂肪細胞の燃焼) していることを確認した。さらに肥満の程度 (BMI) と褐色脂肪細胞の活性化のレベルは逆相関することを示した。

Kahn 博士らは、様々な診断目的のために撮影したPET/CT画像と採取した褐色脂肪組織と推定されるサンプルを分析した。その結果、褐色脂肪細胞のマーカーである脱共役タンパク質 (UCP1) の検出などにより、1013人中の76人の女性と959人中30人の男性由来のサンプルに、褐色脂肪組織が存在することを確認した。さらに、女性は男性より褐色脂肪細胞の量が多く、その活性も高いことを示した。また、褐色脂肪細胞の量は、BMIの程度と逆相関することを示した。

Enerbäck 博士らは、健康な成人5人に対し、低温下で¹⁸F-FDGの取り込みが増加する脂肪細胞をPET/CTを用いて特定し、その部分の組織をバイオプシーにより採取して、褐色脂肪細胞のマーカーであるUCP1のmRNAの発現とタンパク質の発現を調べた。その結果、健康な成人において、活性の高い褐色脂肪細胞が十分な量存在することを遺伝子レベルおよびタンパク質レベルで確認した。

以上の3グループの研究結果から、成人においても、低温下で脂肪を活発に燃焼する褐色脂肪細胞が存在していることが明らかになった。

今回の新知見は、褐色脂肪細胞を利用した成人の肥満解消法の開発など、肥満に関する研究を活発にするのではないかと期待される。

(専門調査員の投稿を元に作成)

参 考

- 1) W. D. van Marken Lichtenbelt, et al., Cold-activated Brown Adipose Tissue in Healthy, New England Journal of Medicine, 360 (15) : 1500-1508 (2009)
- 2) A. M. Cypess, et al., Identification and Importance of Brown Adipose Tissue in Adult Humans, New England Journal of Medicine, 360 (15) : 1509-1517 (2009)
- 3) K. A. Virtanen, M. E. Lidell, et al., Functional Brown Adipose Tissue in Healthy Adults, New England Journal of Medicine, 360 (15) : 1518-1525 (2009)
- 4) Mirch Leslie, Researchers Find "Good" Fat in Human Adults, Science Now Daily News (2009.4.8)

米国 Wolfram Research 社は、computational knowledge engine (計算知識エンジン)「Wolfram | Alpha」を5月18日に一般公開し、Web 上での無料利用が可能となった。これは、入力した質問やキーワードに対して答えを含む文章を探すのではなく、データベースを利用して計算し、答えに相当する情報と様々な計算結果を出力するものである。利便性などの点でまだ改良の余地はあるものの、知識生成のための新たなコンセプトのエンジンをつくり、それをインターネットで誰もが無料で使えるようにした意義は大きいと考えられる。

トピックス 2 computational knowledge engine の一般公開

米国 Wolfram Research 社は、computational knowledge engine (計算知識エンジン)「Wolfram | Alpha」を5月18日に一般公開し、Web での無料利用が可能となった¹⁾。これは、入力した質問やキーワードに対して、データベースを利用して独自のアルゴリズムを用いて計算し、答えに相当する情報と様々な計算結果を出力するものである。入力したキーワードを含む文章や画像を探す Google や Yahoo の検索技術とは全く異なり、また Wikipedia のような単なる知識データベースでもない。Web 上で探すのではなく、質問に対して答えや関連情報を計算し、結果を生成して表示することに特徴がある。

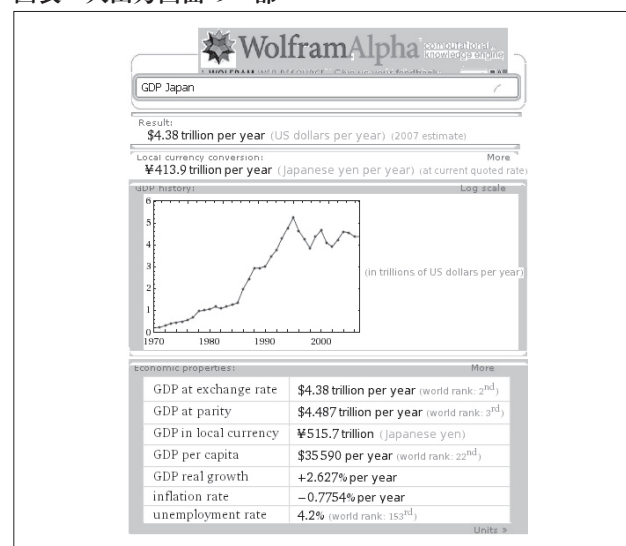
Wolfram Research 社は、1988 年から数学計算ソフト「Mathematica」を開発・販売しており、このソフトは科学技術計算では非常に多く用いられている。今回の Wolfram | Alpha のコア部分も、Mathematica のコードで書かれている。コードの行数は500万行を超え、5万種類のアロリズムやモデルも組み込まれている。データベースには手動や自動で入力された計算可能な10兆個のデータ(5月18日現在)が格納されている。さらに、質問を解釈するために、自然言語解析や構文解析などの1000ドメインの言語処理能力を持つ。

このエンジンは計算処理が中心となるために強力な計算能力が必要となる。そのため、Dell 社製のハードウェアを用いて R Systems 社が構築した世界ランキング66位(2008年11月時点)のスーパーコンピュータ「R Smarr」を2台用いている。R Smarr は、4608個のプロセッサコアを持ち、1秒に39.6兆回の演算を継続的に実行できる。また、データ保管には数百テラバイトのハードディスクが確保され、複数のプロセッサに高速インタフェースで接続することにより高速アクセスを果たしている。公開時のシステムでは、1日で1億7500万以上、1ヵ月で50億以上(300億回以上の計算に相当)の質問に答えることができる²⁾。

Wolfram | Alpha の入力画面に、例えば「1 apple + 2 oranges」と入力すればカロリーや栄養素の分析を出力し、「Tokyo」と入力すれば、人口や日本地図上での位置や現在の気温や天候を出力する。また、「GDP Japan」と入力すると、2007年の日本のGDPとともに、過去のGDP推移のグラフや世界順位を計算して出力し、インフレ率や失業率といった関連指標も出力する(図表参照)。また、「sin(x)」と入力するだけで、関数のグラフを描き三角関数の公式や定理、そして微分や積分についても出力される。さらに高度な因数分解や微積分や固有値問題などの数学の問題にも対応でき、複雑な図形も描画できる。

この computational knowledge engine は、利便性などの点でまだ改良の余地はあるものの、知識生成のための新たなコンセプトのエンジンをつくり、それをインターネットで誰もが無料で使えるようにした意義は大きいと考えられる。また、特に数学計算に関しての完成度は高く、教育現場での利用も可能と思われる。

図表 入出力画面の一部



参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて加工

参 考

- 1) 「Wolfram | Alpha」の公開ページ：<http://www.wolframalpha.com/>
- 2) Wolfram | Alpha 公式ブログ：<http://blog.wolframalpha.com/2009/05/12/the-computers-powering-computable-knowledge/>

東京大学の田中雅明教授、東北大学の前川禎通教授、および米国マイアミ大学の S. E. Barnes 教授の共同研究グループは、静磁場により起電力が発生する「スピン起電力」の存在を世界で初めて実証したと発表した。強磁性体であるマンガニヒ素 (MnAs) のナノ粒子を電極とする磁気トンネルデバイスを作製し、10k ガウスの静磁場を 3K の極低温下で印加することで起電力の発生を観測した。この研究は、2007 年に Barnes 教授と前川教授が提唱したスピン起電力の理論を実験的に証明しようとしたものであり、今後、他の研究者の追試によって、理論および実験の正当性が議論されていくものと考えられる。

トピックス 3 電気・磁気変換の新しい原理であるスピン起電力を実証

東京大学大学院工学系研究科の田中雅明教授、東北大学金属材料研究所の前川禎通教授、および米国マイアミ大学物理学科の S. E. Barnes 教授の共同研究グループは、強磁性ナノ粒子を含む磁気トンネルデバイス^{注)}において、静磁場により起電力が発生する「スピン起電力」の存在を世界で初めて実験的に実証したと発表した^{1, 2)}。この研究は、強磁性体であるマンガニヒ素 (MnAs) のナノ粒子を電極とする磁気トンネルデバイスを作製し、これに一定の大きさの静磁場を印加して起電力の発生を観測することに成功したもので、磁場の時間的変化が起電力をもたらすというファラデーの電磁誘導の法則では十分に理解できない実験結果が示された。

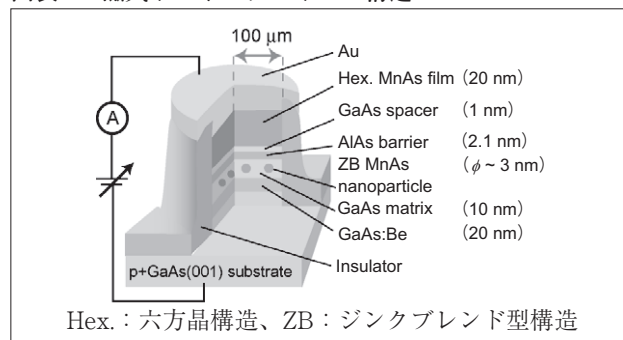
同研究グループは、マンガニ (Mn) やヒ素 (As)、ガリウム (Ga) などを材料にして図表 1 のような磁気トンネルデバイスを作製し、3K の極低温かつ 10k ガウスの静磁場下で電流電圧特性 (I-V 特性) を測定した (図表 2)。素子に静磁場を印加した時には、I-V 特性は原点を通らず、電流が 0mA であっても 21mV の電圧が発生している。これが今回初めて観測されたスピン起電力である。スピン起電力は、図表 1 中の ZB MnAs ナノ粒子を含む GaAs matrix 層で生成される。これを観測するため、Hex.MnAs film 層 (強磁性体) と AlAs 層 (絶縁体) および MnAs ナノ粒子 (強磁性体) で磁気トンネル接合を作製した^{注)}。

スピン起電力を利用すると、磁場の時間的変化がなくても起電力が生じるため、将来的には新しいタイプの電池や超高感度磁気センサーとしての応用が期待できる。ただし、実験時の温度は約 3K と低いため、今後は室温でも同様の現象を示すような素子の開発が必要になる。

スピン起電力については、すでに Barnes 教授と前川教授が 2007 年に提唱した理論があり³⁾、今回の

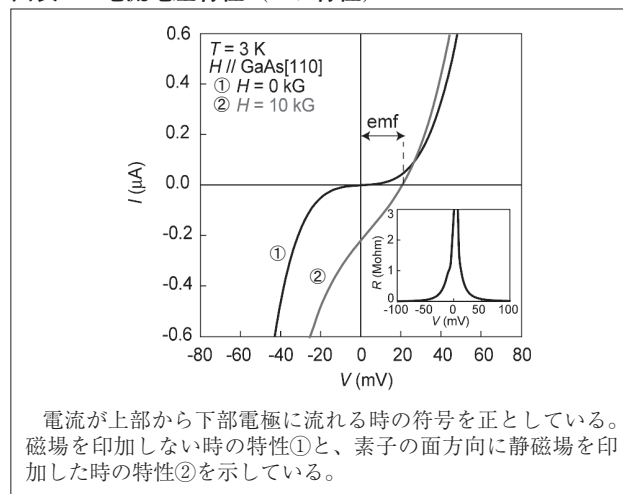
研究はこの理論を実験的に証明しようとしたものである。今後、他の研究者の追試によって、理論および実験の正当性が議論されていくものと考えられる。

図表 1 磁気トンネルデバイスの構造



出典: 参考文献²⁾

図表 2 電流電圧特性 (I-V 特性)



出典: 参考文献²⁾

注: 強磁性電極/トンネル障壁/強磁性電極の3層構造からなるトンネルデバイス。

参 考

- 1) Pham Nam Hai et al., "Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions" Nature, Vol. 458, 489-492 (2009)
- 2) 東北大学プレスリリース (2009年3月5日): 電気・磁気変換の新原理「スピン起電力」の実現に成功
- 3) S. E. Barnes and S. Maekawa, "Generalization of Faraday's Law to include nonconservative spin forces" Phys. Rev. Lett., Vol. 98(24), 246601 (2007)

サッポロビール(株)は、ブラジルのPETROBRAS社およびERGOSTECH社と共同で、非食用農作物残渣バイオマスを用いた水素等のバイオ燃料生産実証試験をブラジルにおいて2009年9月から実施すると発表した。バガス(サトウキビの搾汁残渣)など非食用農作物残渣からのバイオ水素生産の実証試験は、世界初の試みとなる。資源量が世界の一次エネルギーの約30%に相当する農作物残渣などのセルロース系バイオマスは、食料資源と競合しない化石燃料代替エネルギーとして有効利用が期待されている。バイオ燃料先進国のブラジルにおいて、今後10年以内に商用プラントによる産業利用に資するバイオ水素生産の実現を目指す。

トピックス 4 非食用農作物残渣からのバイオ水素生産実証試験

資源量が世界の一次エネルギーの約30%に相当する農作物残渣などのセルロース系バイオマスは、分解し難い性質から、生物的・化学的変換による利活用が困難とされているが、食料資源と競合しない化石燃料代替エネルギーとして有効利用が期待されている。

サッポロビール(株)は、PETROBRAS社(ブラジル最大のエネルギー企業)およびERGOSTECH社(ブラジルのバイオ燃料研究開発企業)と共同で、ブラジル国内で農作物残渣バイオマスを用いた水素等のバイオ燃料生産実証試験を2009年9月から実施すると発表した¹⁾。

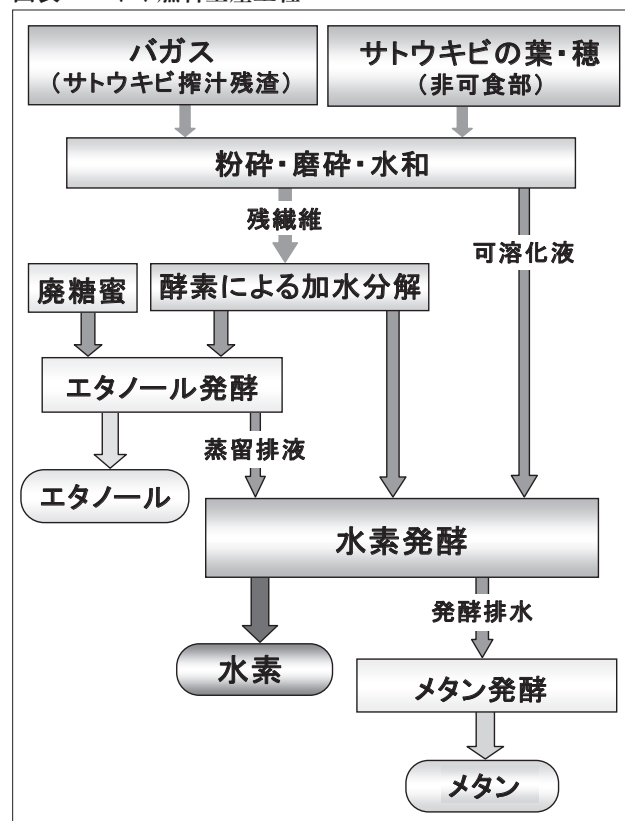
農作物残渣バイオマスを用いた水素生産技術の開発は、各国で進められてきたが、安定した発酵が得られないこと、投入エネルギーに対する水素生産量が不十分なこと、化石燃料に対する生産コストが高いことなどの問題から、十分に進展していなかった。サッポロビール(株)では、同社が有する発酵技術を基に、2005-2006年度環境省地球温暖化対策技術開発事業による食品工場・レストラン残渣からのバイオ水素製造試験(水素発酵槽容量:0.1m³規模)²⁾などを通じて技術開発を進め、今回実証試験として世界初の試みとなるバガス(サトウキビの搾汁残渣)やサトウキビの葉・穂(非可食部)など非食用農作物残渣からの水素製造試験(1.2m³規模)をバイオ燃料先進国であるブラジルで実施する。

従来のエタノール発酵では、バガスなどに含まれるブドウ糖など炭素6個の糖類(ヘキソース)しか利用できなかった。このバイオ水素生産技術では、ヘキソースに加えて、従来のエタノール発酵では利用できなかった糖類をも利用でき、かつ安定した水素発酵ができる水素生産微生物を見だし、試験に用いる。バイオ燃料の生産工程は、図表に示す通りであり、実証試験で

は、エタノールを生産しない場合で、サトウキビ1トンから水素約20m³、メタン約15m³の生産量を計画している。

この実証試験を通じ、発酵前処理方法、季節や原料品質変動に対する発酵条件、設備、操作方法などの最適化、経済性の検討を行う。そして、10年以内には発酵槽容量200m³規模の商用プラントにより、産業利用に資するバイオ水素生産を実現する計画である。

図表 バイオ燃料生産工程



科学技術動向研究センターにて作成

参考

- 1) サッポロビールプレスリリース：<http://www.sapporobeer.jp/CGI/newsrelease/detail/00000133/>
- 2) 環境省ホームページ：<http://www.env.go.jp/earth/report/h20-03/ref06.pdf>

彗星核は、太陽から5天文単位以遠の冷たい領域で太陽系形成初期に誕生した始原天体と考えられている。米国航空宇宙局(NASA)の彗星探査機「スターダスト」が採取した試料の分析などから、彗星核には結晶質の珪酸塩が存在することが確認された。しかし結晶質の珪酸塩の生成には、高温加熱による融解およびその後の冷却による凝結過程が必要であることから、彗星核に含まれる結晶質の珪酸塩がどのようにして生成されたのかが謎とされていた。観測および理論的研究によって、この謎が解明されつつある。

トピックス 5 彗星核に含まれる結晶質珪酸塩に関する観測および理論的研究

彗星核には水、アンモニア、メタンといった揮発物の氷が含まれており、太陽から5天文単位(AU:1AUは地球と太陽との間の距離で、約1.5億km)以遠の最低温度30ケルビン(K:絶対温度の単位。絶対温度(K)=摂氏温度(°C)+273.15)程度の低温領域で太陽系形成初期に誕生した始原天体と考えられている。一方、米国航空宇宙局(NASA)の彗星探査機「スターダスト」が採取した試料の分析などからは、彗星核には結晶質の珪酸塩が存在することが確認されている。

太陽系などの惑星系は、星間塵および星間ガスから成る原始惑星系円盤から形成されると考えられており、この円盤の塵に含まれる珪酸塩は主に非結晶質である。結晶質の珪酸塩の生成には、1000K程度の加熱による融解およびその後の冷却による凝結過程が必要であるため、彗星核は低温領域に加え、高温領域で生成された物質を含むことになる。

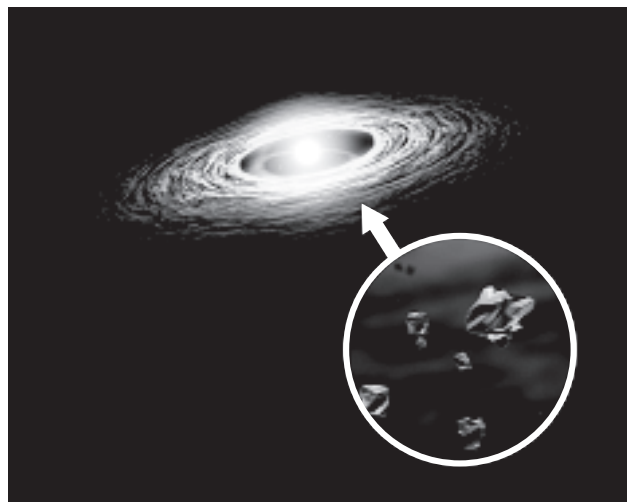
この彗星核の結晶質珪酸塩に関し、英科学誌「ネイチャー」2009年5月14日号に2編の論文が掲載された。ひとつは、NASA赤外線天文衛星「スピッツァ」による若い星である「おおかみ座EX星」の突然の増光(アウトバースト)の観測結果を報告した論文である。おおかみ座EX星は2008年1月、通常の100倍程度に増光し、同年4月に行われたスピッツァによる赤外線スペクトルの観測から、原始惑星系円盤の内側に結晶質の珪酸塩の存在が確認された。平穏期である2005年に観測された赤外線スペクトルからは、結晶質の珪酸塩の存在は確認されなかったため、アウトバーストの加熱により結晶質の珪酸塩が生成されたと推測され、主に非結晶質の珪酸塩を含む星間塵から結晶質の珪酸塩が形成される過程が初めて観測された事例となる可能性がある。

もうひとつの論文は高温領域由来の物質が彗星核に存在し得るかの理論的考察である。原始惑星系円盤の内側に在る μm オーダーの粒子が、円盤から発生する

赤外光の輻射圧によって浮遊し、恒星からの光の輻射圧によって円盤表面に沿って外側に輸送されることが理論的に解明された。粒子は、これを支えるのに十分な赤外光輻射圧を生成できない円盤外側の低温領域で円盤内部に戻ることになり、高温領域由来の結晶質珪酸塩が彗星核に存在することを説明できる可能性が有る。

原始惑星系円盤では、塵により可視光といった短い波長の光は遮られるため、観測による研究では赤外線天文衛星が活躍する。欧州宇宙機関(ESA)は2009年5月14日、赤外線・サブミリ波天文衛星「ハーシェル」を打ち上げた。我が国でも、赤外線天文衛星「あかり」が世界トップレベルの赤外線天体のカタログを作成すると共に、赤外線による原始惑星系円盤の塵の観測なども行っている。さらに、(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)およびESAは、口径3.5mの大型望遠鏡を搭載するなどして、今までに無い高い空間分解能・感度を実現する次世代赤外線天文衛星「SPICA」を共同で検討している。

図表 おおかみ座EX星のアウトバーストにより円盤の内側で生成される結晶質珪酸塩(想像図)



出典: NASA

参考

ネイチャー 2009年5月14日号掲載論文等

- 1) "Cosmic crystals caught in the act," Aigen Li, pp.173-176
- 2) "Episodic formation of cometary material in the outburst of a young Sun-like star," P. Abraham et al., pp.224-226
- 3) "Radiation-pressure mixing of large dust grains in protoplanetary disks," Dejan Vinković, pp.227-229

生体の遺伝子発現制御機構である エピジェネティクス研究の最近の動向

伊藤 裕子
ライフサイエンスユニット

1 はじめに

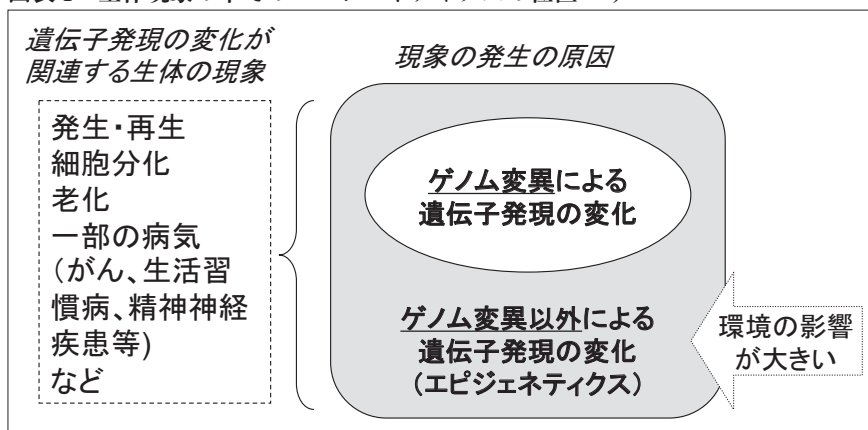
一般にはまだあまり馴染みは無いが、最近、「エピジェネティクス (epigenetics)」という研究領域の名称があちらこちらで聞かれるようになってきた。エピジェネティクスは、「ゲノム変異以外のメカニズムで遺伝子発現を制御し、細胞や生体に変化を生じさせる現象」と定義される^{注1, 2)} (図表1)。

この研究領域が目につけるようになったのは、ゲノム解読からゲノムの機能・制御の解明へとライフサイエンス研究の主流が移り、それ以前から遺伝子の転写調節機構の研究をしていた研究者、染色体やRNAなどの挙動を研究して

いた研究者、疾患の原因遺伝子について研究していた研究者、発生や再生を専門とする研究者などが、

「遺伝子発現制御機構の解明」のためにお互いの情報交換を通じて結集し始め、それによりこの研究領

図表1 生体现象の中でのエピジェネティクスの位置づけ



科学技術動向研究センターにて作成

注1：エピジェネティクスの定義

エピジェネティクスの定義はまだ十分に定まっているとは言い難いが、本稿では次の定義を採用する。

- ・日本エピジェネティクス研究会(2006年12月発足)ホームページの設立趣旨より、「ゲノムの持つ遺伝情報の発現が塩基配列と転写装置だけで制御されているわけではないことは周知の事実です。生物は、ゲノムDNAとヒストンなどの蛋白質から構成されるクロマチンの化学的、構造的な修飾による情報発現制御も受けています。このような制御は“エピジェネティクス”とよばれ、発生の過程で確立され、その後は細胞の記憶として働くことがわかっています」²⁾

参考までに、最初に提示されたエピジェネティクスについての定義を示す。

- ・「DNAの配列変化を伴わずに子孫や娘細胞に伝達される遺伝子機能の変化、およびこの現象を探求する学問(日本語訳)³⁾、(2001年Science誌)⁴⁾」

注2：エピジェネティクスの派生語

英語では、研究領域名を示す「エピジェネティクス (epigenetics)」に対し、「エピジェネティック (epigenetic)」は形容詞的な使い方として用いられる。日本語では、「エピジェネティック」も研究領域名として用いられる場合がある。また、ゲノム上のエピジェネティクス変化を指す「エピゲノムあるいはエピジェノム (epigenome)」に対し、「エピゲノミクスあるいはエピジェノミクス (epigenomics)」はエピゲノム学という研究領域名を示す。「エピゲノミックあるいはエピジェノミック (epigenomic)」はその形容詞的な使い方である。

域がまるで新興領域のように浮かび上がってきたことによる。つまり、ジグソーパズルのピースがいくつか入った(研究が進化した)ために、パズル面に大きな大陸の絵が描かれていることに研究者達が気付いた、とも言える。

このエピジェネティクスの新大陸は、多くのライフサイエンス分野の研究領域に横断的に関連し、生物の発生・分化から、環境汚染

物質の生体影響、ヒトの生活習慣病発症のメカニズムの解明や治療のための創薬研究など、幅広い研究領域をカバーしている。

がん研究領域のエピジェネティクス研究については、2003年の本誌『科学技術動向』で一度取り上げた¹⁾。しかし、その後6年間で、エピジェネティクス研究が様々な研究領域に発展し、さらに国際的な共同プロジェクトの必要性が提

唱されるようになるまでに研究活動が高まってきたことを受け、再度、エピジェネティクスの研究動向に焦点をあてることにした。したがって、本稿ではエピジェネティクス研究における最近のトピックスを紹介し、その意義と重要性および今後のエピジェネティクス研究への期待を示す。

2 エピジェネティクスの具体例

一卵性双生児は、ゲノムの遺伝情報が同じであるにもかかわらず、その身体的特徴および性格や嗜好に違いがあり、さらに、病気の発症の有無や症状の程度に差が見られることが知られている。しかも、これらの両者の“違い”は、幼少期には小さく、成長するに従って大きくなる。また、動物では、ゲノムが同一であるにもかかわらず、元の動物の毛色や模様のパターンがクローン動物に受け継がれない

ことが知られている。可愛がっていた三毛猫のクローンをつくることを試みても、誕生したクローン猫は似ても似つかぬパターン模様の二色の毛色のネコになってしまうということである^{5, 6)}(図表2)^{注3)}。これらは全てエピジェネティクスの身近な例である。

また、生物は発生・分化の各段階において、必要なゲノムの遺伝子を発現させ不要な遺伝子の発現を止めるという厳密な調節を行っ

ている。この調節、すなわち遺伝子発現の制御により、同じゲノムを持つ細胞が心臓や肺や脳神経など形も機能も異なる組織や臓器に分化し、その状態のまま体内で長く維持される。これもエピジェネティクスの例である。

さらに、エピジェネティクスは病気にも関係している。エピジェネティクスには可塑性があり、一度決定された遺伝子発現の状態が、環境や生活習慣などの外部からの刺激や老化などの影響を受けて変化し、通常とは異なる遺伝子発現の状態になることがある。これは“エピジェネティクスの破綻”と呼ばれ、がんなどの病気の発症と深く関連している。

一方、このような可塑性は、病気の治療に利用できるのではないかと考えられ、異常な遺伝子発現を正常な遺伝子発現の状態に戻すといったエピジェネティクスに関する基礎研究が進められている。また、再生医学でもエピジェネティクス研究の発展が期待されている。

図表2 クローン猫(右)は三毛猫(左)とゲノムが同一であるが毛皮模様や性格が異なる

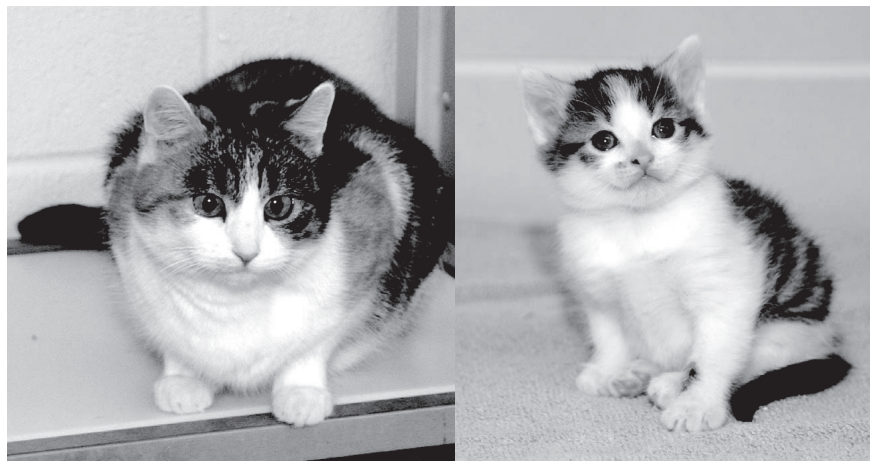


Photo courtesy : TAMU College of Veterinary Medicine

注3：クローン猫の毛色

クローン猫作成の際、核移植に用いた細胞の核(三毛猫由来)が完全には初期化されていなかったため、茶色の毛色を決定する遺伝子が存在しているX染色体上で一部の遺伝子の発現が抑制され、その結果、茶色の毛色が欠如し、二色の毛色の猫が誕生したと考えられた。しかし、最近の研究では、胎児期の子宮内環境や誕生後の成育環境(これもエピジェネティクスであるが)も、毛色や模様に影響を与えることが示されている。詳細なメカニズムはまだ不明であり、本当の意味での“コピー動物”の作成には、まだ時間がかかりそうである

再生医療で利用される ES 細胞や iPS 細胞のような全能性をもつ細胞(どの組織や臓器にも分化できる細胞)から、目的の細胞や臓器を自由に作製(カスタマイズ)するためには、エピジェネティクスについてのより多くの進んだ知識が必要になるからである。

エピジェネティクスにおける遺伝子発現のメカニズムには、代表的な「ゲノム DNA のメチル化」以外にも様々なものが知られている注4)。このメカニズムにはまだ不明な部分も多く、解明研究も活発に進められている。

注4：エピジェネティクスにおける遺伝子発現の代表的なメカニズム

エピジェネティクスによる遺伝子発現の代表例	メカニズム
ゲノム DNA のメチル化と脱メチル化	DNA のシトシン塩基がメチル化修飾を受ける。メチル化により遺伝子の転写が抑制される。
クロマチンリモデリング	細胞内のゲノム DNA はヒストンなどと結合して複合体を形成し、これがいくつも連続して、クロマチンと呼ばれる構造をとっている。クロマチン構造の変化で、遺伝子の転写活性化と抑制が生じる。
ヒストンのメチル化とアセチル化	ヒストンがメチル化やアセチル化の修飾を受けることにより、クロマチン構造を変化させる。
ゲノムインプリンティング	DNA メチル化パターンが異なることにより、母方と父方から受け継がれた遺伝子が識別されて、異なる遺伝子発現を示すこと。
X 染色体不活性化	哺乳類のメス XX は、オス XY との遺伝子量の補正のために、2 本の X 染色体の一つを不活性化すること。
Non-coding RNA の機能	タンパク質をコードしない RNA の内、RNAi などの遺伝子発現の調節に関わる RNA が、ゲノムインプリンティングや X 染色体不活性化のメカニズムに関与している。

科学技術動向研究センターにて作成

3 エピジェネティクスに関する研究は活発化している

ここでは、近年の論文数や研究コミュニティの活動状況などから、エピジェネティクス研究が活発化している様子を示す。

3-1

エピジェネティクスに関する論文数

エピジェネティクスに関する研究は、ここ 10 年程度の期間にどの程度、規模を拡大したのか？世界や日本の研究状況はどうか？

それらを示すために、キーワードによる論文検索を実施した。データベースは ISI web of Knowledge の Web of Science (THOMSON REUTERS 社)で、検索キーワードは epigen* である。期間は、2000 ~ 2008 年で、この間に発表された論文(Article または Review)が対象である。論文数の経年変化・国ごとの論文数・研究領域別の論文割合・著者の所属別の論文数を、ISI web of Knowledge の Analyze

Results の機能を利用して図表化した。

(1) 論文数の変化

2000 年から 2008 年までのエピジェネティクスに関する論文の総数は、10,110 報であった(2009/02/23 現在)。時系列で変化をみると、2004 年からの論文数の伸びが顕著である(図表 3)。

(2) 国別の論文数

論文を国別でみると(図表 4)、米国が突出して論文数が多く、全体の半分近くを占める。一方、日本の論文数は米国に次ぐ 2 位であるが、全体の 10% 程度の論文数(1,072 報)であり、ドイツや英国と同程度である。

(3) 研究領域別の論文の割合

図表 4 において論文数の多い米国・日本・ドイツ・英国において、研究領域別の論文の割合(%)の上位 10 領域について比較を行った(図表 5)。

その結果、4 カ国に共通して、「生

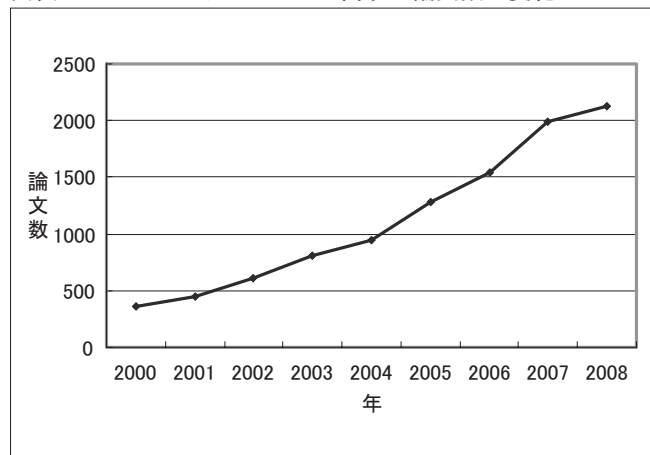
化学 & 分子生物学」、「腫瘍学」、「細胞生物学」、「遺伝学」の論文割合が高いことが示された。特に、米国とドイツは類似した論文割合のパターンを示し、日本や英国には挙げられていない研究領域である「バイオテクノロジー & 応用微生物」の論文が含まれる。一方、日本では「腫瘍学」の割合が他の 3 カ国と比べて高く、「生物物理学」や「生殖細胞学」が特徴的な研究領域である。また、英国では「植物科学」や「内分泌 & 代謝学」が特徴的な研究領域である。このようにエピジェネティクス研究は、幅広いが、各国でそのポートフォリオにやや違いがある。

(4) 日本の研究機関

日本でエピジェネティクス研究を担っているのはどこの大学・公的研究機関だろうか？

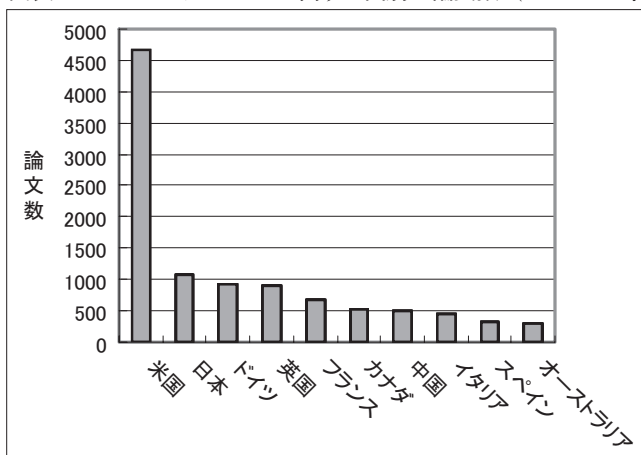
図表 6 に、2000 ~ 2008 年の日本のエピジェネティクスに関する論文 1,072 報について、論文著者の所属する研究機関を示した。大学としては東京大学、京都大学、

図表3 エピジェネティクスに関する論文数の変化



科学技術動向研究センターにて作成

図表4 エピジェネティクスに関する国別の論文数 (2000-2008年)



科学技術動向研究センターにて作成

および札幌医科大学の論文数が多く、公的研究機関としては、国立がんセンター、(独)理化学研究所、国立遺伝学研究所、愛知県がんセンターの論文数が多い。しかし、全般的には地域に偏ることなく様々な大学や公的研究機関でエピジェネティクス研究が実施されている。

3-2

研究コミュニティの活動状況

近年、欧米や日本において、エピジェネティクスに関する研究コミュニティの活動が活発になってきている。以下に代表的な例を示す。

(1) 米国における大規模な研究会合の開催 ～米国から国際共同プロジェクトへ～

米国におけるエピジェネティクスに関する大規模な研究会合として、2003年に開催された第69回コールドスプリングハーバーシンポジウム^{注5)}「ホモサピエンスのゲノム」がある⁷⁾。ゲノムが同じでもエピジェネティクスが違うことを暗喩するように、抄録の表紙において、一卵性双生児の少女の写真が使用され、多くの研究者の関心を引いた。会議名からは、ヒトを対象にした研究会が想像されるが、実際には、ヒトのモデル生物である酵母や線虫、ショウジョウバエ、植物(シロイヌナズナ)、マウスに関するエピジェネティクス研究についての発表が大部分を占めた。

また、「エピジェネティクス」を会

議名とするゴードン研究会議^{注6)}が1995年から2年ごとに開催されている。公開されている2007年の会合のプログラムをみると、従来発表の中心だったモデル生物を用いたエピジェネティクスによる遺伝子制御のメカニズムに関する研究とともに、ゲノム上のどこの位置にエピジェネティクスが生じているのかを解析する「エピゲノム解析^{注7)}」やヒトの疾患に関するエピジェネティクスについても発表されたようである⁸⁾。2009年8月にも会合が予定されており、今回は、「行動、健康、疾患における環境とエピジェネティクスの役割」という副題がついていることから、今までよりも、ヒトの疾患や環境影響に関する研究テーマが増えるのではないかと考えられる⁹⁾。

さらに、米国がん研究会議

注5：コールドスプリングハーバーシンポジウム

コールドスプリングハーバー研究所は、米国ニューヨーク州ロングアイランドの生物学(特に遺伝学)の最先端の研究・教育を実施している世界的に有名なNPOの研究所である。バーバラ・マクリントック(トウモロコシのトランスポゾン)ら多数のノーベル賞受賞者を輩出している。シンポジウムは1933年から毎年開催され、最新の研究テーマを採り上げている。

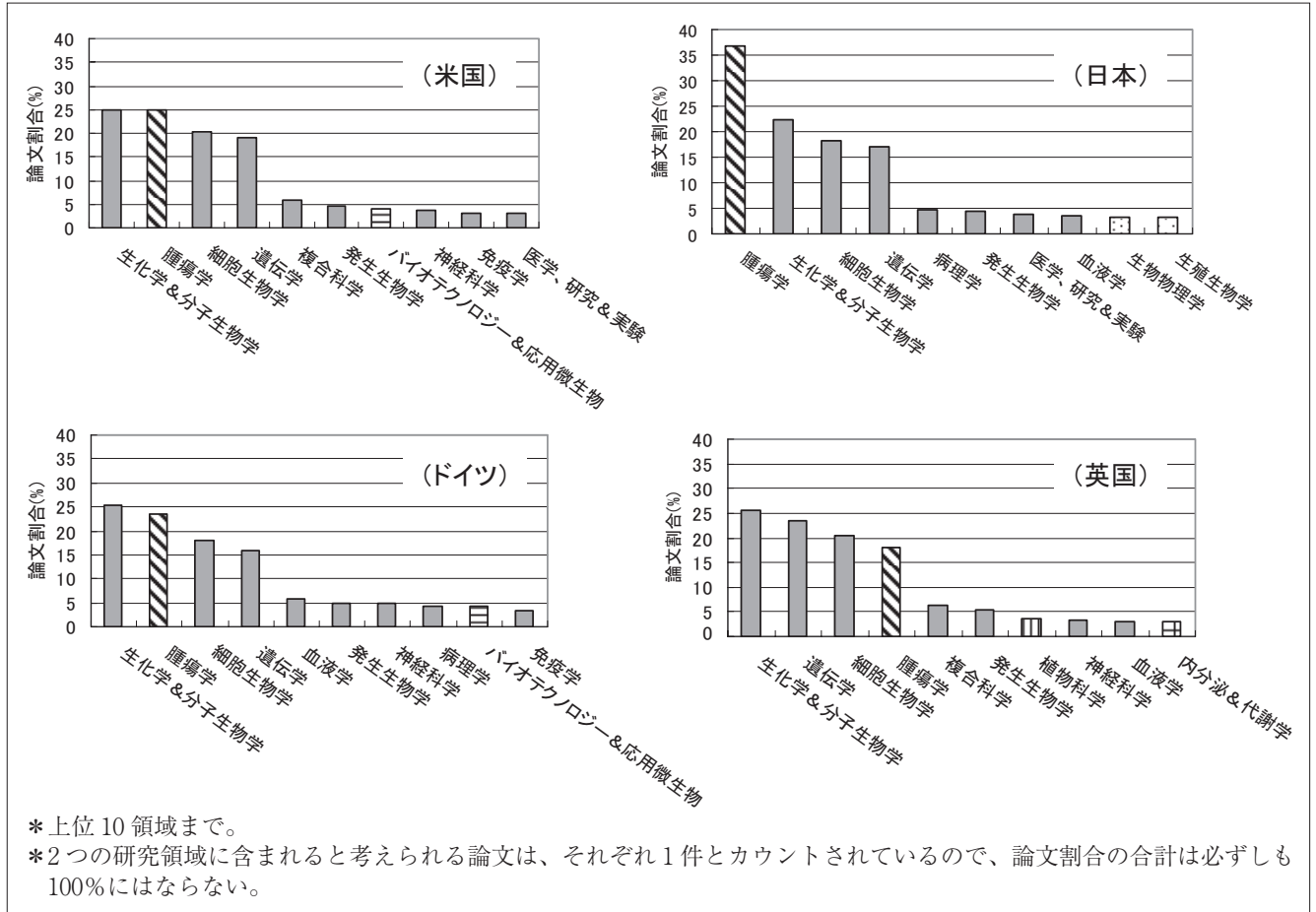
注6：ゴードン研究会議(Gordon Research Conference)

1931年から開始された、生物学、化学、物理学などの研究者間の交流と自由な討論が目的の研究会議である。世界的に権威があり、研究テーマごとに分科会(400以上)がある。会の運営は、個人の参加費以外に政府、企業、財団などからの資金援助により実施されている。会議の内容は非公開で、参加者が会議内容を論文等に引用することなども禁じられている。

注7：エピゲノム解析(マッピング)

エピゲノム解析とは、ゲノム上に生じるエピジェネティクス(エピゲノム)について、エピジェネティクスが生じる時期やそのゲノム上の位置などを解析すること。

図表5 国別の研究領域論文割合 (2000-2008年)



* 上位 10 領域まで。
 * 2つの研究領域に含まれると考えられる論文は、それぞれ1件とカウントされているので、論文割合の合計は必ずしも100%にはならない。

科学技術動向研究センターにて作成

(American Association for Cancer Research)の“ヒトエピゲノムタスクフォース”は、2005年に「ヒトエピゲノムワークショップ」を開催し、2006年にはフォローアップワークショップとして、ヒトエピゲノムのマッピング注7)に関する国際共同プロジェクトの計画立ち上げに焦点を絞った会合を開催した¹⁰⁾。その会合において、国際的な専門家グループである AHEAD (The Alliance for the Human Epigenome and Disease)の構築の必要性が提唱された。2006年のタスクフォースのメンバーは29名であり、米国以外に、英国、スペイン、オランダなどの欧州の専門家や、日本、中国、韓国、シンガポールのアジアの専門家が含まれている。米英が主導的だったヒトゲノムプロジェクトと比較すると、発足時からアジアの各国が関わるなど、より国際的なプロジェクトに発展し

そうである。ゲノムに比べ、エピゲノムは解析の対象とする情報の量をはるかに多いため、多くの国の協力が必要と考えられている。

(2) EUにおける大規模な研究ネットワークの構築

EUは、研究開発支援制度であるフレームワークFP6(2002-2006年)のプロジェクトとして、12.5Mユーロを投入し、Epigenome Network of Excellence (NoE)を2004年に設立した¹¹⁾。NoEは、エピジェネティクス研究コミュニティに対して明確に研究上の利益をもたらすことを目的とし、学会やワークショップ、研修、リソースの共有について支援している。実施期間は2004～2009年であり、FP7(2007-2013年)でも資金の支援が継続されている。

現在、NoEには英国、フランス、ドイツ、スペイン、オランダ、ベ

図表6 日本の機関別論文数(2000-2008年)

論文の著者らが所属する機関	論文数
東京大学	117
京都大学	91
国立がんセンター	84
(独)理化学研究所	79
札幌医科大	63
(独)科学技術振興機構(JST)	51
名古屋大学	50
大阪大学	46
九州大学	44
東北大学	44
東京医科歯科大	42
千葉大学	35
国立遺伝学研究所	35
岡山大学	34
広島大学	29
群馬大学	25
愛知県がんセンター	24
北海道大学	23
熊本大学	22
鳥取大学	22

* 著者の所属機関として複数の研究機関が含まれる論文は、それぞれの機関に1件と重複カウントされている。

科学技術動向研究センターにて作成

図表7 NEDO 調査によるエピジェネティクスの技術的課題の集約

課 題	実用化へ 向けた距 離	将来性 重要性	国際競 争力	国家的 支援の 必要性
1. がんの予防・診断・治療への応用				
個別がんでのエピジェネティック異常の解明	◎	◎	○	○
診断（がんのリスク、がんの存在、がんの性質）への応用	◎	◎	◎	◎
エピジェネティック修飾分子を標的とする活性物質探索	◎	○	○	◎
個別遺伝子のエピジェネティック異常を標的とした治療の開発	△	◎	○	○
2. がん以外の後天性疾患におけるエピジェネティック異常の解明				
がん以外の後天性疾患（免疫疾患、神経系疾患、糖尿病等の生活習慣病）へのエピジェネティック異常の関与の有無の解明	△	◎	○	◎
エピジェネティック異常の診断への応用	△	○	○	○
3. エピジェネティック異常の誘発要因				
エピジェネティック異常を誘発する要因・生活習慣の究明	○	◎	○	◎
機能的食品など、エピジェネティック異常予防法の開発	○	◎	○	◎
4. 化学物質安全性評価・試験系				
環境や化学物質のエピジェネティック異常誘発能の検出系開発	○	◎	○	○
胎児暴露におけるエピジェネティック異常誘発効果の解析	△	○	○	○
5. 再生医療・細胞治療・細胞バンク				
クローン、iPS細胞、ES細胞、再生臓器等における細胞の評価・タイピングへの応用	◎	○	◎	◎
エピジェネティック修飾の誘導による細胞の分化制御	△	○	○	○
個別遺伝子のエピジェネティック制御による分化制御	△	○	○	○
6. 検査・診断の機器・システム開発				
研究を進める上での技術・ツール（シングルセルの単離・分析等）	◎	◎	◎	◎
診断用高感度・高精度エピジェネティック修飾検出装置の開発	△	◎	○	◎
研究用ゲノム網羅的エピジェネティック修飾解析装置の開発	◎	△	△	○
細胞レベルでのエピジェネティック修飾動態解析法（イメージングを含む）	△	○	○	○
組織・個体レベルでのエピジェネティック修飾解析法	○	○	○	◎
エピゲノムデータベース構築	△	◎	△	○
7. 農業・畜産・食品				
エピジェネティック変異の導入による品種改良	△	○	○	○
機能的食品など、エピジェネティック異常予防法の開発	○	◎	○	◎
*参考文献 ³⁾ で開催された産学の有識者およびエピジェネティクス分野を代表する研究者から構成される調査委員会と調査ワーキンググループでの検討を経て、◎・○・△がつけられた。				
*図表中の◎・○・△は、それぞれポジティブの度合いの大・中・小を意味する。したがって、「実用化に向けた距離」は「◎近い、○やや近い、△遠い」、「将来性・重要性」「国際競争力」「国家的支援の必要性」では「◎ある、○ややある、△少ない」と解釈できる。				

出典：参考文献³⁾

ルギー、スイス、イタリア、オーストリア、クロアチア、デンマーク、スウェーデンの12カ国の46の大学や研究機関(83の研究グループ)が参加し、巨大なエピジェネティクス研究ネットワークを形成している。また、世界中の350の研究グループが、NoEのウェブサイトを通じて、現在実行中のEUの研究プロジェクトに参加している。

(3) 日本におけるエピジェネティクス研究コミュニティの組織化

日本エピジェネティクス研究会(The Japanese Society for Epigenetics)が2006年12月に設立され、2007年以降毎年、年次大会が開催されている。研究会設立の目的は次の通りである:「エピジェネティクス研究者が対象とする生物は、酵母から植物や哺乳類に至るまで幅広いため、研究者は多くの

学会(日本分子生物学会、(社)日本生化学会、日本癌学会、日本発生物学会、日本遺伝学会、(社)日本植物学会、日本人類遺伝学会、日本神経化学会、日本細胞生物学会、その他)に散在してエピジェネティクスの研究を行うという状態が続いていた。様々な学会を基盤とする研究者をエピジェネティクス研究のもとに横断的に統合して、情報交換の場をつくるのが研究の推進に欠かせないと考えて、研究

交流を促進することを目的として設立した」(日本エピジェネティクス研究会のホームページより)²⁾。

さらに、日本環境変異原学会(The Japanese Environmental Mutagen Society)の有志が集まり、エピジェネティクスをキーワードとして種々の毒性事象を討議する場として、環境エピゲノミクス研究会(Environmental Epigenomics Society)を2008年12月に設立した。環境要因と遺伝子発現との相互反応を研究する環境エピゲノミクスの重要性が、毒性学や臨床医学などで認められつつあることが設立

理由とされている¹²⁾。

また、エピジェネティクスの産業応用に向けた技術的課題を明らかにすることを目的として、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて(社)バイオ産業情報化コンソーシアムは、「エピジェネティクスに関する研究動向および産業応用への課題に関する調査」研究を2007年度に実施し、2008年2月に報告書が発表された³⁾。この調査研究では、産学の委員(エピジェネティクス分野を代表する研究者を含む)による調査委員会が設置され、委員会での講

師の講演や討論を基に、考察や提言が行われた。その結果、エピジェネティクスの技術的な課題が7つの学術・応用領域に集約され、それぞれ実用化に向けた距離と将来的な重要性が示された(図表7)。「実用化に向けた距離」の項目において「△(実用化は遠い)」が多くみられた(10課題)。これらは、現時点では、エピジェネティクス研究において、基礎研究の段階にある課題と考えられる。これらの課題については、基礎研究を推進することが次の技術開発へのブレークスルーをもたらすと考えられる。

4 エピジェネティクス研究で何がわかるのか?

エピジェネティクス研究で何がわかったのか、今後、何がわかるのかについて示す。

4-1

エピジェネティクス生物研究

(1) 哺乳類の誕生の謎がわかる

「哺乳類の発生にはなぜオスとメスが必要か」は生物学における謎の一つである。昆虫、魚類、爬虫類、鳥類などの一部にはメスだけで子孫をつくるという単為生殖の例が知られているが、哺乳類では有性生殖のみで、単為生殖は自然界では報告されていない。

哺乳類の発生には、オス(精子)とメス(卵子)の両方の遺伝子が必要であり、オス由来の遺伝子のみ、あるいはメス由来の遺伝子のみでは、胚(受精卵であって胎盤を形成する前のもの)の形成は生じても発生は進まず、個体は形成されない。実は、正常に発生した胚をみると、オス由来とメス由来のゲノム上のエピジェネティクス(DNAメチル化)のパターンが異なっており、こ

のように“エピジェネティクスの異なる”ゲノムを2つ組み合わせられることが哺乳類の発生に重要である、ということが現在までにわかっている。このことは、片方の卵子をオスのエピジェネティクスパターンに改変して、2匹のメス(卵子)のみで子マウスを誕生させることができたという2004年の研究報告¹³⁾で明らかになった。

今後は、なぜ、哺乳類において単為生殖が妨げられるようなメカニズムが発達したのか、についての研究が進展すると思われる。

(2) 哺乳類の進化がわかる

エピジェネティクスのうち、ゲノムDNAのメチル化は、植物、昆虫、魚類、鳥類、哺乳類など広い生物においてみられるが、父母由来の遺伝子を区別するゲノムインプリンティングは、哺乳類の中でも、胎生の哺乳類のみにしか見られない。つまり、卵で生まれる哺乳類であるカモノハシではゲノムインプリンティングはみられない。

また、胎生の哺乳類の中でも有袋類であるカンガルーやコアラと、それ以外のヒトやマウスなど(真獣

類)はゲノムインプリンティングに関わる遺伝子に違いがあり、有袋類と真獣類の共通の祖先が進化上でカモノハシと分かれた後にゲノムインプリンティングに関する遺伝子を獲得し、その後には有袋類と真獣類は分かれて、独自のゲノムの進化をとげたと考えられている¹⁴⁾。このように、エピジェネティクスの分析により、哺乳類の進化の道筋が明らかになることが示された。

(3) 植物の本質を知る

本稿では動物の研究を中心に紹介したが、もちろん、植物(シロイヌナズナ)のエピジェネティクスの研究も進んでいる。シロイヌナズナはエピジェネティクス(DNAメチル化)に関連する遺伝子の変異体を作成しても、動物のように致死にならないので、様々な形質(葉や花粉などの形態が正常と異なる)を示す変異体を作成されて研究が進められている。また、アサガオ、イネ、コムギについても研究が実施されている。

4-2

エピジェネティクス疾患研究

(1) がん発症の理解

様々な種類のがんの細胞において、複数のがん関連遺伝子上にDNAメチル化の異常がみられることは1990年代頃から多くの報告がなされており、がん発症とエピジェネティクスの関係に注目が集まっている。

特に、胃がんはエピジェネティクスの関与が大きいがんといわれている。胃がん発症のリスクを高める要因の一つにヘリコバクター・ピロリ菌の感染が指摘されているが、近年、ピロリ菌の感染によって、胃粘膜にエピジェネティクスの異常が誘発されることがわかってきた¹⁵⁾。胃がんで高頻度にDNAメチル化が生じることが知られている7遺伝子8領域について、ピロリ菌感染陽性者と陰性者から採取した胃粘膜を解析したところ、陽性者は陰性者の5～303倍もの高いメチル化の状態であることが示された。また、胃がん患者の非がん部の胃粘膜と健常者の胃粘膜の解析では、非がん部の胃粘膜の方が2～32倍のメチル化状態を示した。さらに、ピロリ菌の除菌後に特定の遺伝子ではメチル化の程度が下がるといわれており、今後、胃がんの発がんリスクの診断や胃がんの予防にエピジェネティクスの知見が活用される可能性がある。

エピジェネティクスの状態から発がんリスクの診断ができると考えられるがんには、胃がんの他に、大腸がん、乳がん、腎がんがある¹⁶⁾。

(2) 精神疾患の発症や行動異常との関連性

近年、精神神経疾患や精神発達障害疾患においても、エピジェネティクスの破綻が発症に関わって

いるのではないかという推論から、研究が進められている。

精神神経疾患に関しては、①抗うつ薬や電気けいれん療法の効果のメカニズムとエピジェネティクスの変化(ヒストン修飾状態の変化)との関連性の研究、②双極性障害(躁うつ病)は父母のどちらから遺伝したのかによって症状や発症年齢が異なることから、これらとゲノムインプリンティングとの関連性の研究、③双極性障害や統合失調症の患者の死後脳を用いて、発症に関連すると考えられる遺伝子のDNAメチル化状態を対照群と比較する研究、④一卵性双生児の双極性障害の発症不一致例(双生児の一方のみが発症)とDNAメチル化との関連性の研究などがある¹⁷⁾。いずれにおいてもまだ推定の段階で、明確なエピジェネティクスとの関連性はわかっていない。

精神発達障害では、DNAメチル化、クロマチンリモデリング(クロマチン構造変化)、ヒストン修飾、X染色体不活性化など、エピジェネティクスに関連する遺伝子の先天的な異常が原因で生じる疾患が、9疾患ほど知られている¹⁸⁾。また、動物実験ではあるが、誕生後の虐待により脳の精神ストレス耐性遺伝子であるグルココルチコロイド受容体遺伝子がメチル化されて、遺伝子発現が低下し、将来的に行動異常が出現することが2004年に報告¹⁹⁾され、後天性の精神発達障害においても、エピジェネティクスが関連する可能性がでてきた。

今後は、エピジェネティクスという科学的な根拠に基づいた、精神発達や行動に対する環境要因の重要性が、明確にされていくと思われる。また、この研究領域の進展により、行動異常の予防法や治療法なども検討できるようになるのではないかと期待される。

(3) 生活習慣病の発症との関連性

近年、生まれる前の胎児期に成

人病の素因が形成されるのではないかという説(成人病胎児期発症説: FOAD説)が提唱されている²⁰⁾。この説によれば、胎児期の臓器形成や代謝系の形成される臨界期に低栄養または過量栄養に暴露されることで、DNAメチル化などのエピジェネティクスの変化が誘導され、出生後の過量栄養・低運動に曝されることで病気を発症するという。また、胎児期などの環境により生じたエピジェネティクス変化は、その後の何世代にもわたり受け継がれるといわれている。これらは本当であるのか、またそのメカニズムはどうかは、まだ明らかにされていない²¹⁾。

2005年に報告された動物実験では、妊娠した母マウスを低栄養状態にし、出生後の子マウスには通常の食餌を与え続け、出生後50日目(成体)に肝臓の脂質代謝に関連した遺伝子を調べた。その結果、DNAメチル化が低減して、複数の遺伝子の発現量が3～10倍増加していることがわかり、胎児期の環境変化が成体にまで影響する可能性が示唆された^{21, 22)}。

また、2009年には、エピジェネティクスに関連する遺伝子であるJhdm2aを失わせたノックアウトマウスが、肥満と高脂血症を発症したことが報告²³⁾された。

このように、エピジェネティクスと生活習慣病の発症の関連性についての示唆が次々と得られている。

4-3

エピジェネティクス創薬

エピジェネティクスを標的とした医薬品として、がんに対する治療薬の開発が進められている。特に、DNAメチル基転移酵素(DNMT)の阻害薬やヒストン脱アセチル化酵素(HDAC)の阻害薬に

図表8 エピジェネティクスを標的にした代表的な医薬品の開発状況

阻害薬のタイプ	医薬品名	適応症	状況(2009年5月現在)
DNAメチル基転移酵素 (DNMT) 阻害薬	5-azacytidine (商品名 Vidaza)	骨髄異形成症候群	米国FDAで2004年に承認済み
	5-aza-2'-deoxycytidine (decitabine) (商品名 Dacogen)	骨髄異形成症候群	米国FDAで2006年に承認済み
ヒストン脱アセチル化酵素 (HDAC) 阻害薬	Suberoylanilide hydroxamic acid (SAHA) (商品名 Vorinostat, Zolinza)	皮膚T細胞リンパ腫	米国FDAで2006年に承認済み
	MS-275 (SNDX-275, Entinostat)	メラノーマ、血液がん、非小細胞肺癌などで検討	米国で臨床試験の第IIフェーズ
	FK228 (Romidepsin)	皮膚T細胞リンパ腫などで検討	米国で臨床試験の第IIフェーズ
	バルプロン酸	抗てんかん薬として承認済み、血液がんへの適応拡大が検討中	米国で臨床試験の第IIフェーズ

参考文献^{24, 25)}の参照により科学技術動向研究センターにて作成

において成果が示されている^{注8)}。図表8に示すように、2009年5月現在で、商品として市場に出ているエピジェネティクス医薬品は3品あり、いずれも米国で承認されている。また、図表に挙げた以外にも、米国において臨床試験の第Iまたは第IIフェーズに入っている医薬品候補がある (belinostat, MGCD-0103, panobinostat, romidepsin)²⁴⁾。

DNMT 阻害薬 decitabine は、高容量の短期投与よりも、低容量で長期投与することが効果的であると報告されている²⁵⁾。DNMT は正常細胞に必須であり、高容量投与では細胞死が引き起こされるので、低容量長期投与は副作用を避けることにも繋がると考えられる。しかし、なぜ、低容量長期投与でも効果が出るのかは不明である。また、decitabine と様々な HDAC 阻害剤とのコンビネーション投与

の臨床試験も実施されている。

日本では、まだ承認されたエピジェネティクス薬は無い。ただし、図表8のFK228は、1990年に藤沢薬品工業(現アステラス製薬株式会社)の研究者が発酵天然物の探索によって発見したものであり、それが後に米国の抗がん薬開発ベンチャー Gloucester 社にライセンスアウトされて開発された医薬品である²⁶⁾。

4-4

エピジェネティクスによる iPS 細胞の品質評価

幹細胞は様々な細胞に分化する能力を持つため、病気などで損なった組織や臓器などを再生する再生医療への利用が期待されている。

特に、受精胚からつくられる ES 細胞に比べて、iPS 細胞は体細胞への遺伝子導入によりつくられるため、倫理問題等が生じず、iPS 細胞作製技術により、再生医療の実現は現実味を帯びてきたと考えられている。しかし、現在の iPS 細胞技術では、作製した iPS 細胞の遺伝子発現特性に多様性があり、均一で高品質な iPS 細胞を作製するためには、さらなる技術の確立が必要である²⁷⁾。この多様性は、iPS 細胞作製に利用する体細胞にもともとエピジェネティクスの多様性があることに原因している。

したがって、iPS 細胞の医療適用の実現化には、エピジェネティクスの観点からの iPS 細胞の標準化の手法や品質評価システムの確立が必須であり、これによって、患者に安全な iPS 細胞を提供できると考えられる。そのためには、iPS 細胞を対象としたエピジェネティクス研究の重要性が今後、増すと考えられる。

4-5

エピジェネティクスの 検出装置の開発

ゲノム中のどの DNA 塩基配列にメチル化が生じているかを検出することは、エピジェネティクスの状態を知る上で重要であるだけでなく、将来的には、がんなどの疾患の診断用のマーカーとして利用できると考えられる。しかし、

注8：DNAメチル基転移酵素(DNMT)阻害薬とヒストン脱アセチル化酵素(HDAC)阻害薬

エピジェネティクスにおけるDNAメチル化は、DNAメチル基転移酵素(DNMT)により、生体内に存在するS-アデノシル-L-メチオニンのメチル基がDNAに転移することで生じる。DNMT酵素を阻害することによりメチル化が低減し、その結果、遺伝子発現が誘導される。

一方、遺伝子転写を活性化するヒストンのアセチル化には、ヒストンアセチル化酵素(HAT)とヒストン脱アセチル化酵素(HDAC)が拮抗して作用する。HDAC酵素が阻害されることにより、ヒストンがアセチル化される方向へ誘導され、その結果、遺伝子転写は活性化される。

以上のように、DNMTやHDACの阻害によって遺伝子発現や遺伝子転写が活性化することから、遺伝子発現や遺伝子転写が抑制されていることが発症原因である疾患に対し、上記2種の阻害薬は医薬品としての治療効果が期待されている。

通常の遺伝子検査ではメチル化部分を検出することはできない。

近年様々なメチル化部分の検出法が開発されているが、現在主に使用されているのは、DNA断片を重亜硫酸で前処理することにより別の塩基に変換してDNAのシーケンスを決定するという、Bisulfite sequencing法を用いたメチル化の検出である²⁸⁾。従来はこの方法の検出には長時間かかっていたが、近年の桁違いに効率の良い高速シーケンス装置を利用することによって、網羅的なメチル化解析が可能となってきている。その例と

して、2008年に、シロイヌナズナ (*Arabidopsis thaliana*) ゲノムのメチル化部位をショットガン式に解析した結果が報告された²⁹⁾。シロイヌナズナのゲノムサイズは約1億3000万塩基とヒトの30億塩基に比べると小さいものの、哺乳類のメチル化ゲノムの解析が現実的な段階に近づいて来た。

しかし、DNAメチル化以外の、ヒストン修飾やゲノムインプリンティングなどのエピジェネティクスの検出法については、従来法のクロマチン免疫沈降法やFISH法など³⁰⁾やや時間のかかる方法が実

施されており、今後、エピジェネティクスを臨床上の診断などに応用するためには、新しい試験法の開発やハイスループット(迅速な解析)を可能とする装置の開発が望まれる。また、前節で示したようにiPS細胞の品質評価にエピジェネティクスを用いる場合には、一細胞レベルでエピジェネティクスの状態を検出できる装置が必要となる。エピジェネティクス研究の成果の臨床応用を考えた場合に、最も必要度の高い研究課題は、エピジェネティクスの解析装置開発であると考えられる。

5 米国および欧州のエピジェネティクス研究の推進状況

5-1

米 国

NIH (米国立衛生研究所)は、より効率的で生産的な医学研究を推進するために、NIHロードマップを2002年に策定し、全NIH (27機関)で共通して優先的に進めるべき研究課題を提示した³¹⁾。それ以降、ロードマップに含まれる研究課題は、基本的にあまり変更がな

かった。

しかし、エピジェネティクス研究が2007年にNIHロードマップ上のプロジェクトに加わり、2008年1月には以降の5年間で\$190 million (190億円)以上の資金投入が発表された³²⁾。このNIHの支援は、3-2で示した研究コミュニティの活発化に対応したものと考えられる。

参考として、2009年5月現在、NIHロードマップにおいて実行されている主なエピジェネティクス

研究プログラムを図表9に示した。

また、2009年3月にNIHロードマップに関する研究成果報告会として、「ヒト疾患のエピゲノム変化に関する顕在化してきた証拠 (Emerging evidence for epigenomics changes in human disease)」というテーマの会合がNIHにおいて開催されたなど、米国のエピジェネティクス研究の方向性は、急速にヒトを対象とした研究の方向に進んで来ている。

5-2

欧 州

欧州のエピジェネティクス研究に対する支援は2000年頃から実施されてきた。EPITRON (epigenetic Treatment of Neoplastic Disease)³³⁾というチーム参加型プロジェクトは、FP6の下で10.9Mユーロ(36億円)が支援され、フランスなど7カ国が参加している(2005~2010年)。また、HEROIC (High-throughput Epigenetic Regulatory Organisation in Chromatin) というチーム

図表9 NIHロードマップの主なエピジェネティクス研究プログラム (2009年5月現在)

研究プログラムの内容	担当する大学等
<ul style="list-style-type: none"> 様々なヒト細胞において、エピジェネティクスが生じているゲノム領域をマッピングする これらをリファレンスとして用いることができるような技術の開発 	MIT, UCSF, Ludwig institute for cancer research, ワシントン大学 (シアトル)
上記について協力する	ベイラー医科大学
<ul style="list-style-type: none"> エピジェネティクスのプロファイリング、細胞内のエピジェネティクスの変化の in vivo イメージング 	スタンフォード大学、ロックフェラー大学、フレッド・ハンチントンがん研究センター、シカゴ大学、ノースカロライナ大学、コーネル大学、ワシントン大学 (セントルイス)、UCSD、アーカンサス大学医学部
<ul style="list-style-type: none"> 哺乳類細胞における新しいエピジェネティクスの発見 	ノースカロライナ大学、マウントサイナイ医科大学
<ul style="list-style-type: none"> ヒトの健康や疾患に関わるエピジェネティクスの研究 	エモリー大学、ヴァージニア大学、がん研究所 Institute for cancer research、マサチューセッツ総合病院、テキサス大学

科学技術動向研究センターにて作成

参加型プロジェクトは、同じくFP6により12Mユーロ(4億円)が出資され、オランダなど8カ国が参加している(2005～2010年)³⁴⁾。また、どちらも、FP7においても継続的な支援がなされている。

5-3

日本

日本の場合、まだエピジェネティクスに関する大規模なプロジェクトレベル(複数研究機関の連携など)の推進はなく、研究コミュニ

ティの活発な動きが反映されていないようである。したがって、公的資金としては、科学研究費補助金(科研費)等の個人研究が主体である。2007年度から5年間、科研費の特定領域研究「生殖系列の世代サイクルとエピゲノムネットワーク」(領域長:国立遺伝学研究所・佐々木裕之氏)が実施されている(約23億円)。

ただし、(独)科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業さきがけ「iPS細胞と生命機能」(2008～2015年)のように、プログラム内にエピジェネティクス研究を含んでいるものがある。JST

は、2008年1月に発表したG-TeC報告書「幹細胞ホメオスタシス」³⁵⁾において、「エピジェネティクスはがん研究との関連が強いが、近年、幹細胞研究に対しても影響を与えて発展している」と記している。また、「欧米に引き続き、今後、日本もエピジェネティクス関連プログラムを本格的に推進すると予想される」と記述しており、日本において大規模なエピジェネティクス研究プロジェクトへの支援が開始されるのも遠い話ではないと思われる。

6 おわりに～今後のエピジェネティクス研究への期待～

昔から、ヒトを含めた生物を決定づけるものは何なのか、について議論されてきた。「氏(遺伝)」か「育ち(環境)」か、それとも両方なのか。日常感覚としては、我々は、その両方であることを知っている。しかし、それについての科学的な裏づけは無かった。

生涯において原則不変という性質をもつゲノムに対して、エピジェネティクスは、受精の瞬間から変化しつづける動的な性質をもつ。つまりエピジェネティクスは、ゲノムという生物の遺伝情報に「環境」という外部からの影響」と「時間(の経過)」という2つの変数を加えたものと考えられる。

ヒトゲノム計画などにより、「ヒトは生命としての誕生時に、既に将来の病気の罹り易さや行動様式などが決定されていて不変である」という考えが、一般の人々に広まっ

た。しかし、エピジェネティクスの観点から言えば、「ヒトは外界の影響を受けて変化し続ける存在であり、誕生時には大まかなことは決まっているが“詳細は未確定で様々な可能性をもつ存在”である」。

エピジェネティクスの研究はようやく成果が出始めたところであり、今後、さらに多くの成果を生むことが期待される。特に、①生体内の恒常性維持のための遺伝子発現制御に関する科学的な知見の蓄積と、その結果として、②生体内の遺伝子発現を人為的に制御することを可能とする技術の開発、が期待される。これは、社会に「遺伝子制御」についての議論を喚起することになるかもしれない。

さらに、今回はあまりふれなかったが、エピジェネティクスは、加齢(老化)とともに変化することが知られている。したがって、将来

的に、高齢者特有の症状や疾患に対する治療薬が、エピジェネティクス研究から生まれてくるかもしれない。さらに、エピジェネティクス研究の成果により、環境やストレスなどに対して生物が受けるダメージが正しく理解されてその測定法が開発され、その結果、ダメージに対する防御や生活の改善などの具体的な対策が立てられるようになるかもしれない。

このように、エピジェネティクスは、今後の進展と成果が大きく期待される国際的に注目度の高い研究領域であるので、日本においても積極的な研究支援が必要であると考えられる。また、もし、最優先の研究課題を一つ挙げるとすれば、それはエピジェネティクスの解析装置開発であると考えられる。

参考文献

- 1) 伊藤裕子「エピジェネティック・がん研究の必要性—ポストゲノム時代のがん研究—」科学技術動向、No.26、2003年5月号
- 2) 日本エピジェネティクス研究会：<http://www.nig.ac.jp/labs/NigPrjct/jse/index.html>
- 3) 「平成19年度成果報告書 エピジェネティクスに関する研究動向および産業応用への課題に関する調査」、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、2008年2月（委託先 社団法人バイオ産業情報化コンソーシアム）
- 4) C.-t. Wu, J.R. Morris. Genes, Genetics, and Epigenetics: A Correspondence. Science Vol.293 (5532), 1103-1105, 2001
- 5) 「注目のエピジェネティクスがわかる」編集・押村光雄（羊土社、2004）
- 6) 2003年1月21日 CBS News, “Cloned Cat Isn't A Carbon Copy.”：
<http://www.cbsnews.com/stories/2003/01/21/tech/main537380.shtml>
- 7) Epigenetics: Symposia on Quantitative Biology, Volume LXIX 2004（Cold Spring Harbor Laboratory Press）
- 8) Gordon Research Conference, 2007 Program（Epigenetics）,：
<http://www.grc.org/programs.aspx?year=2007&program=epigen>
- 9) Gordon Research Conference, 2009 Program（Epigenetics）,：
<http://www.grc.org/programs.aspx?year=2009&program=epigen>
- 10) The American Association for Cancer Research Human Epigenome task Force and the European Union, Network of Excellence, Scientific Advisory Board, Moving AHEAD with an international human epigenome project. Nature Vol.454, 711-715, 2008
- 11) Epigenome Network of Excellence（NoE）,：<http://www.epigenome-noe.net/>
- 12) Environmental Epigenomics Society（環境エピゲノミクス研究会）ホームページ：<http://eegs.web.fc2.com/>
- 13) T.Kono, et al. Birth of parthenogenetic mice that can develop to adult. Nature 428, 860-864, 2004
- 14) 金児 - 石野知子、石野史敏「ゲノムインプリンティングと進化」蛋白質核酸酵素 Vol.53, No.7, 836-843, 2008
- 15) 榎本祥太郎、安藤孝将、牛島俊和「H.pyloriによるDNAメチル化異常誘発と異発癌との関連」日本臨床 66巻, 増刊号 5, 89-94, 2008
- 16) 牛島俊和「がんエピジェネティクスの診断応用」医学のあゆみ Vol.225, No.7, 559-564, 2008
- 17) 加藤忠史「気分障害のエピジェネティクス」分子精神医学 Vol.8, No.1, 38-44, 2008
- 18) 久保田建夫「精神発達障害疾患におけるエピジェネティック異常」医学のあゆみ Vol.225, No.7, 570-574, 2008
- 19) I.C. Weaver, et al. Epigenetic programming by maternal behavior. Nature Neuroscience, 7, 847-854, 2004
- 20) D.J. Barker, C. Osmond. Infant mortality, childhood nutrition, and ischaemic heart disease in England and Wales. Lancet, 1 (8489), 1077-1081, 1986
- 21) 福岡秀興、向井伸二「胎生期環境と成人病素因の形成機序—成人病胎児期発症説」臨床検査 Vol.52, No.6, 637-641, 2008
- 22) K.A. Lillycrop, et al. Dietary protein restriction of pregnant rats induces and folic acid supplementation prevents epigenetic modification of hepatic gene expression in the offspring. Journal of Nutrition, 135, 1382-1386, 2005
- 23) K. Tateishi, et al. Role of Jhdm2a in regulating metabolic gene expression and obesity resistance. Nature, 458, 757-761, 2009
- 24) Drug Information Portal, NLM, NIH：
http://druginfo.nlm.nih.gov/drugportal/drugportal.jsp?APPLICATION_NAME=drugportal
- 25) 渡邊嘉之「エピジェネティック治療の現状と展望」最新医学 第63巻, 第4号, 50-59, 2008
- 26) 中島秀典「ヒストン脱アセチル化酵素阻害薬の探索研究経緯」日薬理誌 132, 173-176, 2008
- 27) 桜田一洋、石川哲也「ヒトiPS細胞技術の現状と課題」細胞工学 Vol.27, No.12, 1296-1302, 2008
- 28) 油谷浩幸「網羅的エピゲノム解析技術」臨床検査 Vol.52, No.6, 643-648, 2008
- 29) Cokus, S.J et al. Shotgun bisulphate sequencing of the Arabidopsis genome reveals DNA methylation patterning. Nature, 452 (7184) :215-219, 2008
- 30) 竹田真由、船渡忠男、斉藤邦明「エピジェネティクス研究に必要な手技」臨床検査 Vol.52, No.6, 649-653, 2008

- 31) 島田純子「米国国立衛生研究所 (NIH)の生物医学研究推進に向けた戦略 (NIH ロードマップ)」科学技術動向、No.34、2004年1月号
- 32) NIH Announces New Initiative in Epigenomics, NIH News (January 22, 2008) :
<http://www.nih.gov/news/health/jan2008/od-22.htm>
- 33) EPITRON : <http://www.epitron.eu/>
- 34) HEROIC : <http://www.heroic-ip.eu/>
- 35) G-TeC 報告書「幹細胞ホメオスタシス」国際技術力比較調査 (エピジェネティクス)独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター (2008年1月)

執筆者プロフィール



伊藤 裕子

ライフサイエンスユニット リーダー
科学技術動向研究センター

<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

薬学博士。ヒト染色体の構造・機能などの研究に従事。

現在の専門は科学技術政策。ライフサイエンス分野の先端科学の動向、競争的研究資金制度、科学の知見が社会に利用されるまでのプロセス等に関心がある。

電磁気学における混乱と CPT 対称性の意義

—対称性に結びつく単位系—

市口 恒雄
情報通信ユニット

1 はじめに

2008年4月の日本人または日本を母国とする人がノーベル賞を受賞し、日本の科学のレベルの高さを世界に印象づけた年となった。そしてまた、このノーベル賞は、基礎科学の重要性とそのロマンを私達に教えてくれた。基礎科学は人類の知識として重要であるばかりでなく、その素養を備えた人材が技術の分野で活躍することにより、単に現在の延長ではない新たなイノベーションを起こせる可能性が大きくなる。歴史をふり返ってみると、基礎科学の一つである物理学には、19世紀後半から20世紀初頭にかけて、MaxwellやHertzによる「電磁気学」、Einsteinによる「相対性理論」、Planck、Bohr、de Broglie、Shrödinger、Heisenberg、Diracなど多くの人が係わった「量子力学」という3つの革命を経験した。現在もなお、物理学だけではなく多くの工学分野が、「電磁気学」、「相対性理論」、「量子力学」に基礎をおいていることは言うまでもない。そして、それらは、単に学問というだけでなく、我々の生活にも大きな恩恵をもたらしている。例えば、我々が未だ電磁波の存在を知らないと仮定するならば、ラジオもテレビも携帯電話も存在しない。また、量子力学を

知らなければ、半導体素子の動作原理を理解できず、従ってコンピュータも存在しない。そして、相対性理論は、時刻や長さの単位に重要な役割を果たしている。

2008年のノーベル賞の対象ともなった「CPT対称性」は重要な概念である。CPT対称性のうちC対称性(荷電対称性)は粒子・反粒子の粒子反転の対称性を意味する。P対称性は空間反転に対する対称性で、パリティまたはキラリティとも呼ばれ右手系と左手系に関する対称性でもある。そして、T対称性は時間反転に対する対称性である。ここで、物理学の普遍定数、例えば、光の速度 c 、真空の誘電率 ϵ_0 または透磁率 μ_0 、そして電子の電荷 e 、あるいはプランク定数 h を反転対称性という概念に関連づけるとその意味も明らかとなり、次の新たな革命のヒントが見えてくる。我々が普段使っている国際単位系(MKSA単位系とも呼ばれる)では、メートル、秒、キログラム、アンペアが基本単位となっているが、それらは人間の都合で決めた単位であり、何ら普遍的な意味を持たない。従って、光の速度はなぜ秒速約30万kmという一定値を持ち、全ての電子はなぜ $-1.602773 \times 10^{-19}$ クーロンという寸

分違う電荷を持つのか説明できない。ところが、 $c^2 = \epsilon_0^2 = e^2 = h^2 = 1$ となる単位系をとれば、普遍定数はCPT対称性と関連がつき、その意味も明確となる。

Maxwellが確立した「電磁気学」は、電子・電気工学や材料工学などの様々な分野においても重要な基礎学問である。ところが、現在、その電磁気学の教科書において E - B 対応か E - H 対応かという混乱が生じている。これは、磁場には H (磁場)と B (誘導磁場または磁束密度)の2種類の場があり、どちらを本質的と考えるかという立場の違いである。しかし、MaxwellがP対称性の議論の重要性を1870年代の教科書で指摘しているにもかかわらず、現代の教科書ではP対称性の議論が不足していることが現代の教科書の混乱の原因の一つである。この対称性を考慮することにより、「 ϵ_0 や μ_0 が何を意味するのか」という疑問が解決される。

ここでは、この“混乱”を紹介するとともに、このような基本的な問題を追求していこうという粘り強い意志をもった研究人材が必要であることを強調したい。

2 時間と空間そして光—はじめに光ありき—

2-1

時間反転対称性について

CPT 対称性のうち T 対称性は時間反転に対する対称性である。Newton 方程式、Maxwell 方程式、Shrödinger 方程式など、運動を記述する方程式は、必ず時間 t をパラメータとして含む。このパラメータ t が正転している系から逆転している系 ($t' = -t$) に移っても、方程式が時間の正転逆転にかかわらず全く同じ方程式となる場合に、その方程式は時間反転対称性を保存している、あるいは時間反転対称性を満たしている、という。Newton 方程式や Maxwell 方程式は時間反転対称性を保存している。虚数単位 i が時間反転によって符号が変わると考えれば Shrödinger 方程式も時間反転対称性を保存している。Newton・Maxwell・Shrödinger のそれぞれの方程式は微分方程式であるが、それらを積分した形の方程式(例えば、自由落下の放物線)も時間反転対称性を満たす。時間反転対称性を議論する場合、時間の増加を時間の減少に変える(つまりフィルムの逆回し)というだけでは不十分であり、必ず、時間の正転系から逆転系に移る場合を想定することが必要である。

時間が正転系から逆転系に移った時、位置座標 $x(t) \rightarrow x(-t) = x(t)$ のように符号が変わらない量と、速度 $v(t) \rightarrow -v(-t) = -v(t)$ のように符号が変わる量が存在する。これを、時間反転に対する奇偶性という。符号が変わらないものには、位置座標(距離)の他には面積・体積・加速度・力・電場・電圧・電気抵抗・エネルギーなどがある。一方、符号が変わるものには、時間・

時間微分・速度・運動量・角運動量・電流・磁場などがある。時間反転に対して符号を変える量の対称性を $T(-)$ 、符号を変えない量の対称性を $T(+)$ と記し、それぞれ -1 と $+1$ とに対応させると、方程式の時間反転対称性を導きやすい。定義により、 $T(+)=T(+)\cdot T(+)$ 、 $T(-)=T(+)\cdot T(-)$ 、 $T(+)=T(-)\cdot T(-)$ が成立する。わざわざ T と付けたのは、C 対称性や P 対称性と区別するためである。また、ドット記号 (\cdot) は通常のかけ算を表し、後に出てくるベクトル積と区別するためにこの記号を用いている。例えば、 $x(\text{距離}) = v(\text{速度}) \cdot t(\text{時間})$ という式においては、 $T(+)=T(-)\cdot T(-)$ という対称性が成立しており、時間反転対称性が保存されることがわかる。このようにして、方程式が時間反転対称性を保存しているかどうかは容易に確かめられる。

どのような式でも必ず時間反転対称性は保存されるが、ただひとつ重要な例外が存在する。それは、エントロピー(乱雑さ)が増大する場合、即ち、エネルギーが熱として散逸する場合である。具体的には、Ohm の法則や、速度に比例して働く空気抵抗などが時間反転の対称性を破っている。Ohm の法則 $V(\text{電圧}) = I(\text{電流}) \cdot R(\text{抵抗})$ において、電流は時間反転すれば逆向きになり、その対称性は $T(-)$ であるが、電圧の対称性は $T(+)$ である。ここで、もし、時間反転により抵抗値が負となれば、今まで発熱によりエネルギーを消費していた抵抗が逆に発電することになり、熱力学の法則に反する。従って、抵抗 R の符号はつねに正であり、時間反転対称性は $T(+)$ である。この場合、左辺と右辺の対称性は一致しない。こういう状態を、時間

反転対称性が破れている、または、時間反転対称性を保存しない、と言う。時間反転対称性が破れる時には必ずエントロピーの増大を伴う。

2-2

1 秒の定義の変遷

物理学や工学で用いる時間の基本単位は 1 秒であるが、1 秒という単位は、かつては地球の 1 日に基づいて決められ、地球の自転周期に依存した。「1 秒は平均太陽日の 86,400 分の 1」として決められた天文時は、1930 年代から 1956 年まで用いられた。その後、地球の自転周期が潮汐などの影響でわずかに揺らいでおり、またわずかつ長くなっていることがわかり、地球の公転すなわち 1 年を基準とする天文単位「1 秒は、太陽年の 31,556,925.9747 分の 1」と改められ、1956 年から 1967 年まで用いられた。これは、公転周期は自転周期よりも安定なためである。ちなみに、5 億年前の 1 日は約 21 時間と推定されている¹⁾。

その後、原子時計の開発により、地球の自転や公転に基づかない定義「1 秒はセシウム 133 原子の基底状態の 2 つの超微細準位間の遷移に対応する放射の 9,192,631,770 周期の継続時間」に変更され、原子時による定義となって現在に至っている。このように、セシウム 133 原子が発生する電磁波(マイクロ波)の周期が基準とはなっているが、それが直ちに地球の 1 日を基準としないということではない。もし、セシウム 133 原子が発生する電磁波の周期を基準として原子時を採用するならば、1 秒の定義

を9,192,631,770周期という中途半端な数字にせず、10,000,000,000周期とすれば良い。しかし、それでは天文時とのずれが生じて生活に不便であるため、9,192,631,770周期という中途半端な数字にしている。たとえ原子時を採用していても、時間の基準はやはり、地球の自転(正確には1日)すなわち天文時に置かれている。そして、地球の自転はわずかずつ遅くなり、この天文時もわずかずつ長くなるため、“原子時の修正”が必要となり、その修正のために「うるう秒」が適宜挿入される。2009年1月1日に「うるう秒」調整が行われ、午前8時59分59秒と午前9時00分00秒の間に「8時59分60秒」が挿入された²⁾。1972年以降、既に24回の「うるう秒」の挿入が行われており、この調整が必要なのは、本質的に地球の自転を基準とした天文時を使っているからである。地球の自転が少しずつ遅くなっている限り、将来はさらに頻繁に「うるう秒」を挿入する必要がある。

以上で述べたように、秒という時間の単位は物理や工学分野の基本単位になってはいるが、人間が地球の自転を基準に、人間が使いやすいように勝手に定めたものである。従って、普遍的な真理や現象を記述するのに適した単位というわけではない。

2-3

1 メートルの定義の変遷

空間は長さ(または距離)を基本単位として測られるが、我々は長さの基本単位としてメートルを使用している。当初は、北極からパリを通して赤道までの子午線の距離の1000万分の1と定義され、その値を用いて白金イリジウム合金製のメートル原器が作製された。現在では、北極から赤道までの正

確な距離は、10,002,288 キロメートルであることや、地球がわずかに扁平であることがわかっているが、地球1周がほぼ正確に4万キロメートルであることは偶然の産物ではない。メートル原器では、温度による熱膨張や腐食などで長さが変わるおそれがあり、1960年の第11回国際度量衡総会において、「クリプトン86原子の準位2p₁₀と5d₅の間の遷移に対応する光の真空中における波長の1,650,763.73倍に等しい長さ」という定義に変更された。光の波長を長さの単位として使用するという発想は、Maxwellの1870年代の著書の中ですでに示されており、実現までに90年近い年月を要したことになる。

長さの定義が質的に変化したのは、1983年の第17回国際度量衡総会においてである。「1メートルは、1秒の299,792,458分の1の時間に光が真空中を伝わる距離」として定義され、現在に至っている。しかし、正確に言えば、光の速度を $c=299,792,458$ メートル/秒と定義したのであって、長さを直接に定義していない。長さは、時間、即ち1秒の299,792,458分の1という時間が定まって初めて定義されることになる。つまり、長さは時間によって定義されることになる。そして、光の速度は実験で測定されるべき量ではなく、定義によって与えられる量に変わった。これで、特殊相対性理論の基礎の一つとなっている“光速不変の原理”に一步近づいたとも言える。光の速度が一定であることは実験で証明されてはいるが、なぜ一定でなければならないのかという物理的な理由は未だ説明されていない。Einsteinは、“正しいが理論的な証明はできない仮定”という意味で“光速不変の原理”と呼んだのである。

現在の長さの定義では、たとえば普遍量である光の速度を使ったとしても、基本的には、地球の大きさ

という宇宙から見れば特殊なスケールに基準を置いている。実際に、1秒ではなく、1秒の299,792,458分の1という中途半端な時間を用いて長さを定義している。これでは、地球の大きさを基準としてメートル法を定めるといった当初の思想をひきずっており、普遍量である光速を用いて距離を定義するという基本的な意味の理解にはつながらず、その本質的なメリットも享受できない。現在では、単位としてメートル法が導入されているが、それは世界の共通言語としての意味を持つに過ぎず、その単位に本質的な意味があるわけではない。従って、基本単位となっている秒やメートルやキログラムやアンペアという単位は、物理的には何ら普遍的意味を持たない。

2-4

光の速度はなぜ一定か

光の速度を利用して時間で長さを定義することになったのは、時間と長さとは独立には定義できなくなったからである。光が進む距離 x は、普遍定数である光速 c を用いて次のように表される。

$$x(\text{距離}) = c(\text{光速}) \cdot t(\text{時間}) \quad (1)$$

この関係式は、時間と長さ(距離)とは独立には決まらず、時間を決めれば長さが決まり、長さを決めれば時間が決まることを示している。つまり、我々は、時間か長さのどちらか1つを自由に決めることはできるが、両方を同時に決めることはできない。天体や宇宙の分野では、光が1年間に進む距離を意味する「光年」という単位が使われるが、これは長さを時間で表したものである。この流儀で言えば、現在の長さの定義は「1メートルは、299,792,458分の1光秒」ということになる。もし、地球の大きさという特殊な尺度にこだわらな

いならば、1光秒を長さの基本単位にとる方がより自然である。これは約30万キロメートルで、数字として大きすぎるならば、10億分の1を意味するナノを付けて、1ナノ光秒を長さの補助単位とすれば良い。1ナノ光秒は0.299792458メートルつまり約30センチメートルとなり、我々の生活実感の尺度に合っている。事実、尺貫法やポンドヤード法では1尺=0.303メートル、1フィート=0.3048メートルであり、1ナノ光秒は1尺や1フィートに近い値となる。あるいは逆に、長さを使って時間を定義する方法もある。例えば、「光が1メートル進むのに必要な時間を1光メートル」とすれば良い。ただし、これは天文時との対応が困難となる。遠い未来には必要となる単位かも知れないが、現時点では、時間をそのままにして、1光秒を長さの基本単位に採用する方が都合が良い。

1光秒を長さの基本単位に採用するという意味は、光の速度を1と定義するという意味である。物理学では、 $c=1$ とする自然単位が使われることがあり、これは、長さや時間の次元を同じにするという本質的な意味を持つ。従って速度は無次元となって単位を持たない。速度は光速の0.1倍とか

0.00001倍とかで表現すれば良く、時間や長さが定義されていなくても速度を表せる。現在使われている国際単位系はMKSA単位系とも呼ばれ、メートル、キログラム、秒(セカンド)、アンペアが基本単位となっており、4つの基本単位があると言う意味で4元単位系とも呼ばれる。しかし、 $c=1$ として時間と空間を統一すると、長さ(または時間)の単位が無くなって3元単位系となる。

エントロピーの増大を伴わない限り、どのような式でも時間反転対称性が保存されなければならない。式(1)もその例外ではない。距離 x の時間反転対称性は $T(+)$ であり、時間 t 自身の対称性は $T(-)$ である。従って、式(1)が時間反転対称性を満たすためには、光速 c の対称性は $T(-)$ でなければならない。つまり、時間反転した世界では $c=-1$ となり、光速は速度を表すということからも、符号が変わることは自然である。しかし、この場合でも、 c の2乗が1であることは成立する。従って、式(1)は、次のようにも書くことができる。

$t(\text{時間}) = c(\text{光速}) \cdot x(\text{距離})$ (2)
光速には単位がなく、時間と距離は同じ単位であらわされるから、この式が成立する。 c は+1か-1かのどちらかであるが、まだどち

らかに決めているわけではないので数値で書くわけにはいかない。式(1)は時間に光速を乗じれば(演算すれば)距離即ち空間になるという形をしており、式(2)は距離に光速を乗じれば(演算すれば)時間になるという形をしている。つまり、光速 c は時間を空間に変換し、そして空間を時間に変換する量(演算子)だったのである。時間→空間→時間と変換した時、あるいは、空間→時間→空間と変換した時、時間や空間が伸びたり縮んだりせずに、元のスケールを保つ条件が $c^2=1$ という条件である。この条件がまさに、光速不変の原理の説明になっていると言える。同時に、 $c^2 \neq 1$ の空間は歪んでいる(一般相対性理論)ことも示唆している。ある量に光速 $c(=\pm 1)$ を乗算する(演算する)とその式の時間反転対称性が変わる。従って、光速 c を時間反転対称性を変える演算子、あるいは時間反転の演算子とも解釈できる。この場合は、時間反転を2回行って時間方向を戻した時に、時間の伸び縮みがない条件が $c^2=1$ となる。ここで議論したように、空間や時間の対称性を議論する場合には、 $c^2=1$ という普遍的な単位系が重要であり、同時にその単位系は「相対性理論」の本質をも含んでいる。

3 空間反転対称性の電磁気学への適用

3-1

右手系と左手系

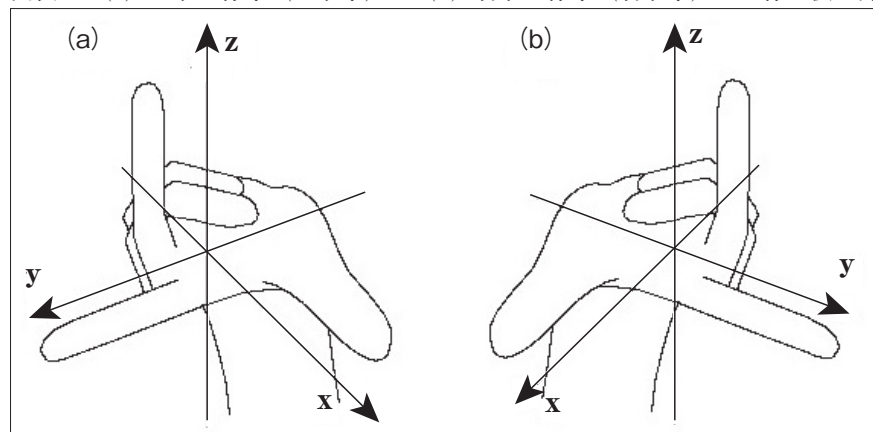
空間の並進対称性や回転対称性は、結晶工学・半導体物理・量子力学などでは重要な意味をもつ。しかし、本稿では、並進対称性や回転対称性を議論せず、反転対称性だけを議論するにとどめる。空

間反転対称性は、CPT対称性のうちのP対称性であり、パリティとも呼ばれている。また、空間反転対称性は、次に述べるような右手系から左手系に移した時にどう変換されるかという対称性でもある。

通常は、3次元空間内で互いに直交する3本の数直線で x 軸・ y 軸・ z 軸を設定することによって表される「直交直線座標系」(デカルト座標)を用いる。そして、 x 軸・ y 軸・

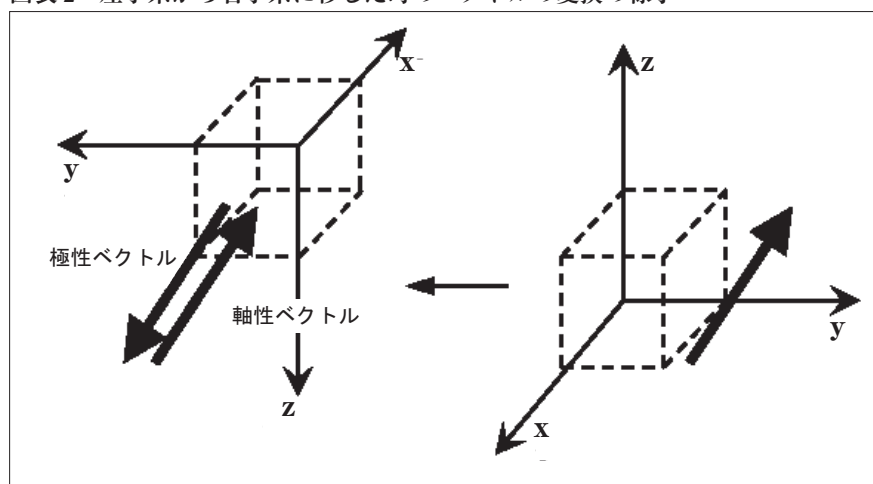
z 軸を総称して座標軸と呼び、この座標軸の設定のしかたは2種類ある。1つは、図表1(a)のようにして左手の各指に座標軸を対応させる方法で、もう1つは、図表1(b)のように右手の各指に対応させる方法である。それぞれ、「左手座標系」、「右手座標系」、あるいは単に「左手系」、「右手系」と呼ぶ。座標を回転しただけでは、左手系が右手系になることはないので、それ

図表1 (a) 左手座標系 (左手系) と (b) 右手座標系 (右手系) の座標の決め方



科学技術動向研究センターにて作成

図表2 左手系から右手系に移した時のベクトルの変換の様子



科学技術動向研究センターにて作成

それぞれの区別を厳密に付けることができる。通常は、右手系が便宜上用いられるが、自然界が右手系を選んだわけではなく、人間がそう決めただけのルールに過ぎない。右手系と左手系の対称性は、キラル対称性(または、カイラル対称性)とも呼ばれ、生物起源の物質、例えば生物によって作られるアミノ酸は左手系のものだけが存在することが知られている。しかし、物理法則では、ベータ崩壊(あるいは弱い相互作用)という例外を除いて、右手系で成立する物理法則は左手系でも成立する。

図表1の(a)と(b)の2つの座標系は、z軸をそのままにしてx軸とy軸とを入れ換えた形となっており、各軸がお互いに対等ではない。各軸を対等にして、右手系から左手系に移るためには、x軸・y

軸・z軸の全てを反転させれば良い(図表2)。ここで、長さや方向を持つ量であるベクトル(図表2の太い矢印)を右手系から左手系に移すと、そのままの方向で移るものと、方向が逆転して移るものと2種類が存在する。そのままの方向で移るものは軸性ベクトル(または擬ベクトル)と呼ばれ、方向が逆転して移るものは極性ベクトル(または真性ベクトル)と呼ばれる。位置ベクトル r 、速度 v 、加速度 a 、運動量 p 、力 F 、電場 E などが極性ベクトルであり、角運動量 L 、トルク N 、誘導磁場 B が軸性ベクトルである。軸性ベクトルの場合、何らかの形で回転に関するものが多い。

極性ベクトルと軸性ベクトルの区別は、通常のベクトル代数の教科書にも書かれており、例えば次

のような記述がある。「速度のような極性ベクトルは、その方向に垂直な平面鏡に映して見れば、速度の方向が反対になる。しかし、角速度のような軸性ベクトルでは、それを表すベクトルに垂直な鏡に映して映像を見ても、角速度の回転の方向は変わらない。…(途中省略)…右手系の各座標軸の方向を反対にして左手系に移るとき、軸性ベクトルの座標軸に関する成分は変化しない。しかし極性ベクトルでは、このような座標軸の変換を行えば、各成分の符号が変わる。」³⁾

確かに、速度はその方向に垂直な平面鏡に映して見れば、方向が反対になる。しかし、この時、その方向の座標軸も逆転している。右手系から左手系に移った時に、「軸性ベクトルの成分は変化しないが、極性ベクトルの成分の符号が変わる」という表現は、あくまで右手系の視点で左手系を眺めた表現である。いわば、鏡の中に写ったものを鏡の外から眺めて表現していることになる。しかし、図表2のように、空間自体が反転していること、あるいは各座標軸が反転していることを考慮すれば、「方向が同じものは極性ベクトル、方向が逆転するのが軸性ベクトル」という結論になる。各座標軸方向の単位長さの基本ベクトルとベクトル成分に分けて、数式を用いて説明すればより明瞭になるが、多少複雑となるのでここでは省略する。

空間反転によって、極性ベクトルは方向が変わらず、軸性ベクトルは方向が逆転する。空間反転により符号や方向を変えない対称性をP(+), 符号や方向を変える対称性をP(-)と記し、それぞれ+1と-1とに対応させれば良い。また、P(+)やP(-)の取り扱い方法は、既に述べたT(+)やT(-)と同じである。式の左辺と右辺で対称性が一致する場合には、対称性が満たされている、あるいは対称性が保存していると呼ぶ。このように、P(+)

やP(-)という記号を用いれば、空間反転対称性の区別は明確になり、式が空間反転対称性を満たすかどうかの判別も付けやすい。Newton方程式、Maxwell方程式、Shrödinger方程式など、弱い相互作用に無関係な方程式ではすべて空間反転対称性が保存していることが知られている。ただし、Maxwell方程式においては、後述するように、磁場 H と誘導電場 D の空間反転対称性の決め方に2種類あり、混乱が生じている。

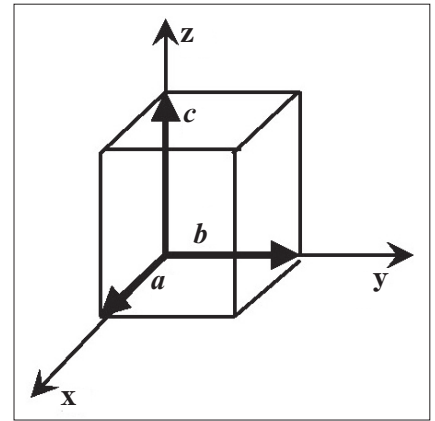
極性ベクトルどうしのベクトル積(外積)、例えば角運動量 $l = r$ (位置ベクトル) $\times p$ (運動量)やトルク $N = r$ (位置ベクトル) $\times F$ (力)は軸性ベクトルであることは良く知られている。 r, p および F の対称性はP(+)であるから、ベクトル積記号 \times の対称性をP(-)とすると、この2つの式の対称性はともにP(-) = P(+) \cdot P(-) \cdot P(+)となり、対称性は保存する。ここで、ベクトル積記号 \times 自身に対称性の記号を与えたのは、ベクトル積がスカラー積(内積)や通常の乗算とは空間反転の対称性が異なるからである。これは、ベクトル積の乗算の順序を変えると符号(方向)が変わるが、スカラー積や通常の乗算では順序を変えても符号が変わらないことと関係している。本稿では、この区別をはっきりさせるために、ベクトル積には \times の記号を用い、スカラー積や通常の乗算には \cdot の記号を用いる。P(+)やP(-)という記号を用いれば、極性ベクトルと軸性ベクトルとのベクトル積は極性ベクトルとなることは容易に導ける。この場合の例には、速度 v と誘導磁場 B とのベクトル積で表すことのできるローレンツ力がある。また、ベクトル微分(rot)の対称性もP(-)であり、この例としては、ベクトルポテンシャル A と誘導磁場 B との関係式($B = \text{rot}A$)がある。

空間反転によって、符号が変わる量も存在する。例えば、3つの

ベクトルの3重積 $V = (a \times b) \cdot c$ である。この3重積は、図表3のようにそれぞれのベクトルを稜とする平行6面体(あるいは直方体)の体積を表し、3つのベクトルの順序をサイクリックに変えても同じなので、単に $[abc]$ と記載されることもある。しかし、 a と b とを入れ換えると、即ち、 $[bac]$ とすると符号が変わる。これは、右手系と左手系とで符号が異なることを意味するので、この3重積の対称性はP(-)となる。これは3重積にベクトル積が含まれることが原因である。「このように座標軸のとり方によって符号の変化するスカラーを擬スカラーという」³⁾。これに対し、座標軸のとり方によって符号の変化しないスカラーを、真性スカラーまたは単にスカラーと呼ぶ。擬スカラーの対称性はP(-)であり、真性スカラーの対称性はP(+)である。

上の議論は、右手系で体積が正とするならば、左手系では体積が負となることを意味する。これを指摘したのはMaxwellであり、1887年に書かれた電磁気学の有名な教科書「A Treatise on Electricity and Magnetism」⁴⁾に記述されている。その教科書の「右手系と左手系の関係について」という章には、「2種類のベクトル積 $dx \times dy$ と $dy \times dx$ は符号が異なり、掛け算の順序に依存する。そして、行列式 $[dx dy dz]$ の符号は、行または列の順序を入れ換えれば逆転する。同じ理由で、変数 x, y, z の順序がサイクリックな時には体積は正であり、サイクリックな順序が逆転している時には体積は負である。(Maxwellの教科書より著者和訳)」と記載されている。ここで行列式という言葉が使われているのは、3重積はベクトルを順番に並べた時の行列式に相当するからであり、行列式と3重積は同じ意味で使用されている。Maxwellも指摘しているように、左手系では体

図表3 3つのベクトル a, b, c の3重積は平行6面体(あるいは直方体)の体積を表す。



科学技術動向研究センターにて作成

積が負ということになる。これがどのような意味を持つのか、次章でもう少し詳しく議論する。

3-2

左手系での体積の解釈

左手系で体積は負であると明確に述べている教科書は、Maxwell自身によって書かれた教科書と、今井功著の「古典力学の数理」⁵⁾の2つのみである。後者は、Maxwellの教科書を下敷きにしたものであり、左手系で体積は負であるという記述になるのは当然といえば当然だが、その他にもMaxwellが電場や磁場をどの様に考えていたかを知る手掛かりをも与えてくれる教科書である。そして、木幡重雄著の「電磁気の単位はこうして作られた」⁶⁾では、電磁気学におけるMaxwell以降の混乱はSommerfeldの教科書に始まっていると指摘されている。

3つのベクトルの3重積は擬スカラーであり、左手系と右手系とでは符号が異なるということ自体は共通の認識であり、これ自体に反論する人はいない。問題は、それに絶対値を付けて必ず正として体積を定義するかどうかということである。右手系だけを考えて左

手系を考えないならば、体積はつねに正であるから、この問題は生じない。しかし、空間反転とは、右手系から左手系に、あるいは、左手系から右手系に移ることであるから、この問題は避けて通れない。ここで、絶対値を付けて体積を必ず正とするならば、そこに人為的な操作による不連続性が生じ、空間の記述に首尾一貫性を欠く。従って、本稿では Maxwell の意図どおり、左手系で体積が負として議論を進める。

左手系で体積が負になることは何を意味しているのであろうか。物体の質量をそれを占める体積で割り算した密度は、左手系では負となるということである。質量が負になると困るが、密度が負になっても、そのように定義していると考えれば何も困らない。 $M(\text{質量}) = \rho(\text{密度}) \cdot V(\text{体積})$ が成立し、対応する対称性の記述は $P(+)=P(-) \cdot P(-)$ となるため、対称性は保存している。同様に、左手系では、エネルギーは正であるがエネルギー密度は負となり、電荷と電荷密度の符号も逆になる。質量・エネルギー・電荷の空間反転対称性は $P(+)$ であるが、密度・エネルギー密度・電荷密度の対称性は $P(-)$ である。

電荷密度が $P(-)$ であるから、電流密度の対称性も $P(-)$ となる。Maxwell 方程式には電荷密度と電流密度が含まれるから、それらの空間反転対称性は、Maxwell 方程式の空間反転対称性に影響を与える。結果は、電場 E と磁場 H の対称性は $P(+)$ で極性ベクトルとなり、誘導電場 D (電束密度と呼ぶ場合もある) と誘導磁場 B (磁束密度と呼ぶ場合もある) の対称性は $P(-)$ で軸性ベクトルとなる。このことは、前述の「古典力学の数理」にもすでに述べられている(図表4)。Maxwell 自身も、 E と H を「線に関して定義される量」、 D と B を「面に関して定義される量」と明確に区

図表4 電磁的諸量の空間反転対称性

スカラー $P(+)$	q (電荷)
擬スカラー $P(-)$	ρ (電荷密度)、 U (電磁エネルギー密度) ϵ_0 (真空の誘電率) μ_0 (真空の透磁率)
極性ベクトル $P(+)$	E (電場)、 H (磁場)
軸性ベクトル $P(-)$	D (誘導電場または電束密度) B (誘導磁場または磁束密度) J (電流密度) g (電磁運動量密度) S (ポインティング・ベクトル)
テンソル $P(-)$	T_{ij} (マクスウェル応力)

出典：参考文献⁵⁾

別している^{4,6)}。この表現から、Maxwell 自身も、 E と H は極性ベクトル、 D と B は軸性ベクトルと考えていたことが推測される。

一方、左手系でも体積が正として議論を進めると、 E と D は極性ベクトル、 H と B は軸性ベクトルという結論が得られる。このように、出発点が異なると D と H の空間反転対称性に関して異なる結果が得られる。 E と B に関しては、左手系の体積が正であっても負であっても同じ結果が得られ、ベクトルポテンシャル A との関係からも E は極性ベクトルで B は軸性ベクトルであると言える。そのため、 E と B の対称性を明記してある教科書はあるが、 D と H については、参考文献5を除いて、対称性の明確な記述はない。しいて言えば、後に述べる E - B 対応の教科書のうちで H は B の補助場と考える教科書では、 H と B は同じ軸性ベクトルでなければならないことになる。このように、 E と D が同じ対称性であり、 H と B が同じ対称性である場合には、電場と磁場に関してそれぞれ2種類の場が存在しなければならない意義は見いだせず、結局、どちらかが基本的な場でどちらかが従属的または2次的

な場と考えざるをえない。また、左手系で体積を負とするか正とするかで、真空の誘電率(および透磁率)という普遍定数が擬スカラーか真性スカラーかの違いが生じる。誘電率が擬スカラーの場合は次章で述べるように空間反転に関わる量(演算子)という本質的な役割を持たせることができる。しかし、真性スカラーの場合は単なる比例定数という以上の意味をこの普遍定数に持たせることはできず、従って、その普遍定数の真の意味を理解することも困難となる。

3-3

誘電率と空間反転の関係

真空の誘電率 ϵ_0 ($=8.854187817 \times 10^{-12}$ F/m) と真空の透磁率 μ_0 ($=4\pi \times 10^{-7}$ N/A²) は、現在では定義値となっており、それらを用いれば、 E と D そして H と B の間には、真空中または空气中で次の関係式が成立する。

$$D = \epsilon_0 \cdot E, \quad B = \mu_0 \cdot H \quad (3)$$

ここで、 E と H は極性ベクトルで対称性が $P(+)$ 、 D と B は軸性ベクトルで対称性が $P(-)$ とすると、

ϵ_0 と μ_0 の対称性は $P(-)$ となる。即ち、 ϵ_0 と μ_0 は右手系では正となり、左手系では負となる擬スカラーである⁵⁾。また、電磁場のエネルギー密度の式に ϵ_0 と μ_0 が含まれるので、左手系でエネルギー密度が負ならば ϵ_0 も μ_0 も負となり、そのことからそれらが擬スカラー量であることが説明できる。

真空の誘電率 ϵ_0 、真空の透磁率 μ_0 、そして光の速度 c (あるいは、電磁波の伝搬速度)の間には、光の速度の2乗の逆数は真空の誘電率と真空の透磁率の積に一致する ($1/c^2 = \epsilon_0 \cdot \mu_0$) という関係式が成立する。事実、Maxwellはこの式から自身が予言した電磁波の伝わる速度を計算し、それが当時知られていた光の速度と一致したために光の電磁波説を唱えた。この関係式から明らかなのは、光の速度と誘電率とを決めると自動的に透磁率が決まるということである。本稿ではすでに、 $c^2 = 1$ となる単位系を採用すべきことを説明した。現在は、真空の誘電率 ϵ_0 の値も真空の透磁率 μ_0 の値も定義値であるから、それらをともに1と定義すれば、より簡単な単位系になる。実際に、そのような単位系は存在し、過去には使用されていた。c.g.s. 静電単位系では $\epsilon_0=1$ とし、c.g.s. 電磁単位系では $\mu_0=1$ とし

いた。c.g.s. 電磁単位系では、磁場 H の単位は Oe (エルステッド)、誘導磁場 B の単位は G (ガウス) であり、真空中や空気中では、 $1\text{Oe}=1\text{G}$ となる。しかし、静電単位と電磁単位とを同時に使うと、 $c^2=1$ となってしまう、秒速30万キロメートルという光速を与えないので、従来はこの単位系の同時使用は不可能であった。しかし、 $c^2=1$ とすれば、この単位系の同時使用が可能となる。ただし、すでに述べたように真空の誘電率と透磁率は擬スカラー量であるので負の値も含まれる。即ち、 $\epsilon_0 = \mu_0 = \pm 1$ 、従って、 $\epsilon_0^2 = \mu_0^2 = 1$ となる。 ϵ_0 と μ_0 は完全に同一視でき、また、完全に同じ意味を持つので、どちらか一方を扱えばそれで充分だが、ここでは混乱を避けるために、両方を並べて議論する。

$\epsilon_0^2 = \mu_0^2 = 1$ が成立するならば、式(3)は次のようにも書くことができる。

$$\mathbf{E} = \epsilon_0 \cdot \mathbf{D}, \quad \mathbf{H} = \mu_0 \cdot \mathbf{B} \quad (4)$$

式(3)と式(4)とを見比べると、誘電率 ϵ_0 および透磁率 μ_0 は、極性ベクトルを軸性ベクトルに変換し、軸性ベクトルを極性ベクトルに変換する役割を担っていることがわかる。そして、極性ベクトル→軸性ベクトル→極性ベクトル、あるいは、軸性ベクトル→極性ベクトル

ル→軸性ベクトルと変換した時に元のスケールを保つ条件が、 $\epsilon_0^2 = 1$ (および $\mu_0^2 = 1$) ということになる。そして、右手系で $\epsilon_0 = +1$ 、左手系で $\epsilon_0 = -1$ だから、 ϵ_0 は右手系と左手系とを区別する演算子、つまり空間反転の演算子ということもできる。

$c^2 = \epsilon_0^2 = 1$ という「普遍単位系」では、通常の4元単位系での基本単位である「時間」、「長さ」、「質量」、「電流」のうちの2つが消去され、2元単位系となる。 $c^2 = 1$ により「時間」と「長さ」が統一され、本稿では「時間」に統一したが、「長さ」に統一することも可能である。いずれにせよ、速度の単位はなくなるから、エネルギーは質量の単位で測定される。また、 $\epsilon_0^2 = 1$ により、「電流」は、残り2つの単位の組み合わせという形になり、「電流」の単位はなくなる。この単位系では、電磁場、 \mathbf{E} 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{H} 、 \mathbf{B} は全て同じ単位を持ち、異なるのは、時間反転と空間反転の対称性のみである。即ち、 \mathbf{E} は $P(+)$ かつ $T(+)$ 、 \mathbf{D} は $P(-)$ かつ $T(+)$ 、 \mathbf{H} は $P(+)$ かつ $T(-)$ 、 \mathbf{B} は $P(-)$ かつ $T(-)$ となり、4種類の電磁場の対称性は全て異なっていてどれ一つとして同じ物がない。これが4種類の電磁場の存在が必要な理由である。

4 電磁気学の教科書における混乱

定常電流(または電磁石)が作る磁場を出発点とするか、磁石(または単極磁荷)が作る磁場を出発点とするかで電磁気学の記述の仕方は大きく異なり、前者を E - B 対応、後者を E - H 対応と呼ぶ。その特徴をまとめると次のようになる。

E - B 対応:

1. 単極磁荷(モノポール)は存在せず、誘導磁場 \mathbf{B} は電流により発生する。Maxwell 方程

式($\text{div}\mathbf{B}=0$)より磁力線は連続であり、モノポールが単独で存在することを否定している。

2. 電子の速度を v とすると $v \times \mathbf{B}$ が電場に相当し、相対性理論との親和性が高い。また、電磁場のポテンシャルより導かれるのは \mathbf{E} と \mathbf{B} であり、電磁的な力を導くのも \mathbf{E} と \mathbf{B} である。

3. 磁石の両端に現れる磁荷の存在を否定するので、磁石による磁場を考える場合に磁石の周囲に流れる仮想的な電流を考えなければならない弱点がある。このモデルは、磁性体の電流モデルと呼ばれる。

E - H 対応:

1. 正負の単極磁荷の対として磁気双極子(または磁気双極子の集合)を考え、それが磁石

図表5 電磁気学の教科書における E-B, E-H 対応の立場

著者(訳者)	書名	出版社	E-B	E-H	注釈
バーガー, オルソン (小林, 土佐訳)	電磁気学(新しい視点にたつて)	培風館	○		
サーウェイ (松村訳)	科学者と技術者のための物理学 III(電磁気学)	学術図書出版	○		
ファインマン (宮島訳)	ファインマン物理学 III (電磁気学)	岩波書店	○		
長岡, 丹慶	物理入門コース 例解電磁気学演習	岩波書店	○		
桂井	基礎電磁気学	オーム社	○		
Stratton	Electro-Magnetic Theory	McGrow-Hill	○		
Jackson	Classical Electrodynamics	Wiley	○		1
中山	電磁気学	裳華房	○	○	2
飯田	新電磁気学	丸善	○	○	
溝口	電磁気学 - SI units -	裳華房		○	3
Bleaney, Bleaney	Electricity and Magnetism	Oxford		○	
電気学会	電磁気学演習	オーム社	○	○	4
ハリデイ, レスニック, ウォーカー (野崎訳)	物理学の基礎(3) 電磁気学	培風館	○		
後藤	なっとくする電磁気学	講談社		○	
熊谷, 荒川	電磁気学	朝倉書店		○	
高橋	物理学選書(3) 電磁気学	裳華房		○	
霜田, 近角	大学演習 電磁気学	裳華房		○	
東海大学物理学教室	物理学<電磁気学>	東海大学出版会	○		
広瀬	物理学 One point EとH, DとB	共立出版		○	
細野	電磁気学	森北出版	○		5
小塚	電磁気学 その物理像と詳論	森北出版		○	
ランダウ, リフシッツ (井上, 安河, 佐々木訳)	電磁気学	東京図書	○		1
末松	電磁気学	共立出版	○		
砂川	電磁気学	岩波書店	○		6
Slater, Frank	Electromagnetism	McGrowHill	○		
長岡	物理入門コース 電磁気学 I, II	岩波書店	○		
村上	電気磁気学	丸善		○	
Sommerfeld (伊藤訳)	電磁気学	講談社	○		
Purcell	Berkeley physics courses vol. 2 electricity and magnetism	McGrowHill	○		1
太田	電磁気学の基礎 I, II	Springer Japan	○		7

(注釈1から6までは文献7からの引用)

- 1) 古い教科書なのでガウス単位系 (c.g.s. 電磁単位系) で書かれている。
- 2) E-B, E-H並立だがどちらかというとE-Hよりの記述。
- 3) E-Hモデルの標準的な理論展開に近い立場をとるが、「磁荷」という考え方は仮想的な存在としても認めない。磁性体の本質はあくまで磁気モーメントの集合という立場をとる。
- 4) E-B対応とE-H対応を完全に平等に扱う教科書。
- 5) E-H対応に反対して書かれたユニークな本。磁荷が単独で動くと相対論的不変性を満たさないからE-H対応は誤りという主張。
- 6) E-BとE-Hの折衷的立場で書かれた教科書。磁性体は磁極モデルを使う。
- 7) 相対論ではEとBが混じるから、E-H対応は理論的根拠がないという主張。

出典：参考文献⁷⁾

による磁場 H の原因と考える。磁石の両端には磁荷が現れる ($\text{div}H \neq 0$) が、逆符号で等量の磁荷が反対側に現れることが Maxwell 方程式 ($\text{div}B=0$) により保証される。これは、磁性体の磁極モデルと呼ばれる。

2. 定常電流による磁場 H はアンペールの法則 ($\text{rot}H=J$) で与えられる。
3. 存在が確認されていない単極磁荷 (モノポール) という概念を使わなければならない弱点がある。

最近の教科書では E - B 対応の教科書が多いが、主に磁性やマイクロ波を扱う教科書では E - H 対応の教科書が多い。どちらを採用するかにより、磁気分極率や磁化率の定義と単位が異なってくるため、単なる趣味の問題では済まない混乱を生じている。この混乱の被害を最も受けているのは、初学者である学生諸氏であることは想像に難くない。

E - B 対応か E - H 対応かの混乱は、

最近の教科書の著者や電磁気学担当の教員の間では認識されており、そのことを議論した文献も多い⁷⁻⁹⁾。特に文献7では、主要な教科書がどちらの立場で書かれているかを分類した表があるので、図表5として引用する(ただし、元の表では磁化率の単位の記述についての欄もあるが、図表5ではその欄を省略した)。電磁気学の教科書には、特に次のような事情もある。「古典電磁気学の教科書は数多くあるが、著者の思い入れはどれも強く、従来の電磁気学の教科書を批判して書かれたものも多い。例えば E - H 対応は間違いであり絶対に使うべきでない、とする強い主張を持った本(細野著)がある一方、 E - B 対応の基本的考え方である磁性体の電流モデルを時代錯誤と切り捨てる教科書(溝口著)もある。」⁷⁾

E - B 対応と E - H 対応との違いは、誘導磁場 B を基本的な場と見るか磁場 H を基本的な場と見るかという立場の違いであり、必ずしもどちらかが正しくてどちらかが間違っているということではない。

E - B 対応の教科書では B を磁場と呼び H を一切使わないものもあり、マイクロ波の教科書では E と H だけをを用いる場合もある。 H と D の空間反転対称性について述べている唯一の教科書⁵⁾では、 E - H 対応従って D - B 対応に近い立場になるが、「電磁場を記述するためのもっとも基本的な量は D と B 」とも述べている。どちらがより基本的な量かということは主観の問題と言えようが、電磁場の空間反転対称性についての議論が不足している教科書が多いことは問題である。 E と H が同じ極性ベクトルであり、 D と B が軸性ベクトルならば4種類の場が必要という結論になる。しかし、 E と D が極性ベクトルであり、 H と B が軸性ベクトルである場合には、電場と磁場に関してそれぞれ2種類の場が存在する意義が見いだせず、どちらかが基本的な場でどちらかが従属的な場と考えざるをえない。このことが、 E - H 対応か E - B 対応かという、本来は無用な論争の原因となっている。

5 電荷と磁荷の関係と粒子反転対称性

電子や陽子は $1.6021773 \times 10^{-19}$ クーロンという単位電荷、即ち、素電荷を持つ。同じような意味での磁荷の基本的な単位が存在するかどうかは正確にはわかっておらず、そもそも、磁荷が単独で存在できるかどうかもわかっていない。しかし、電荷は電気力線の始点または終点となるのと同様に、磁荷が磁力線の始点または終点となることは間違いがない。従って、磁力線が連続なのか、それとも始点と終点を持つのかということが問題となる。球状の永久磁石では、 B に関する磁力線は図表6(a)のようになり、 H に関する磁力線は図表6(b)のようになる。教科書には

棒磁石の磁力線が描かれることが多いが、棒磁石内部の磁力線が多少複雑になることを除いて、球状磁石と棒磁石との違いはない。 $\mu_0=1$ であれば磁石の外側の B の磁力線と H の磁力線は一致し、磁石の内部での磁力線は H よりも B の方が密度が高い。そのことよりも、 B と H に関する磁力線の本質的な違いは、 B に関する磁力線が磁石の表面で連続であり始点も終点も存在しない(図表6(a))のに対し、 H に関する磁力線は磁石表面で連続ではなく必ず始点と終点を持つ(図表6(b))ことである。従って、その始点と終点の場所に磁場 H の源としての磁荷、N極とS極

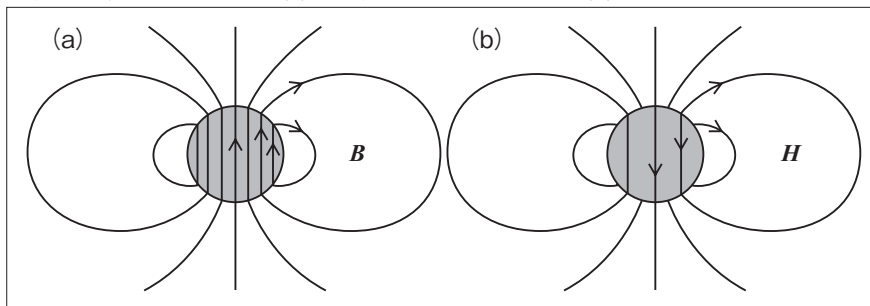
が存在することになり、磁石内で B と H の方向も異なることになる。これに対して、 E - B 対応の教科書では、磁荷の存在を認めないため、 H に関する磁力線の実在を認めないものも多い。

一方、反粒子を予言したことで有名な Dirac は、磁気単極子 (モノポール) が存在すればその磁荷 g と素電荷 e には次の関係があることを量子力学的な議論より求めた。

$$g(\text{単位磁荷}) = \frac{h(\text{プランク定数}) \cdot c(\text{光速})}{e(\text{素電荷})} \quad (5)$$

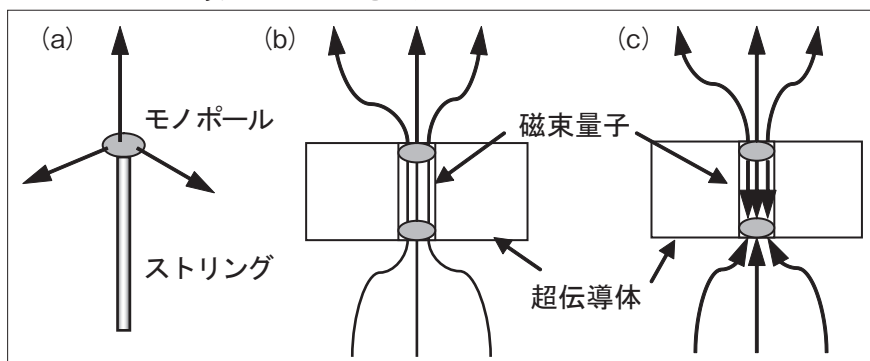
この式に含まれるプランク定数 h は量子力学に特徴的な普遍定数であり、 c はすでに議論した光の速

図表6 球状磁石内外の (a) 誘導磁場 B の磁力線と (b) 磁場 H の磁力線



科学技術動向研究センターにて作成

図表7 (a) Dirac の磁気単極子 (モノポール)、(b) 磁束量子の B の磁力線、(c) 磁束量子の H の磁力線。磁束量子の両端にはモノポールが付着していると考えられることができる。



科学技術動向研究センターにて作成

度である。Dirac によれば、磁気単極子からは位相の特異線(Dirac ストリング)、いわば渦の中心に現れる渦糸のような線が無限遠まで延びている(図表7 (a))。もし、宇宙に1つでも単極磁荷をもった粒子、即ちN極だけかS極だけを持った粒子が見つければ、式(5)より「宇宙の全ての電子がなぜ寸分違わず同じ電気量を持たなければならないのか」¹⁰⁾という疑問が解決するため、多くの人達が単極磁荷をもった粒子(モノポール粒子)を探しているが、未だ発見されていない。

しかし、素電荷 e の代わりに、クーパー対の電子2個分の電荷 $2e$ を用いれば、式(5)は超伝導体中の磁束量子の式に一致する。超伝導体中に磁場が侵入する時には、一様に侵入するのではなく量子化して侵入するため、それを磁束量子と呼ぶ(図表7 (b,c))。磁束量子は実際に観測されており、その存在は確定している。磁場が量子化

される直接の原因は、磁力線を取りまく永久渦電流であるが、その渦電流の中心は超伝導位相が定義できない特異線となっている。従って、磁束量子は渦糸と呼ばれることもあり、まさにDirac ストリングとなっている。Dirac が求めた単位磁荷とこの磁束量子の理論的根拠は全く同じであり、電子が1個か2個かの違いだけである。このことを考慮して、磁束量子の両端には単極磁荷が付随していると考えられることができる。この場合でも、誘導磁場 B の磁力線は連続(図表7 (b))であるから、単極磁荷は誘導磁場 B の源ではなく磁場 H の源(図表7 (c))となる。その意味で、図表7の(b)と(c)は、図表6の(a)と(b)に対応する。

Maxwell 方程式において、電気的な量を2倍にすると磁気的な量である H も B も2倍となる。従って、単極磁荷が存在すれば、その磁荷 g は電子の電荷、即ち、素電

荷 e に比例すべきことが予想される。

$$g(\text{単位磁荷}) = c(\text{光速}) \cdot e(\text{素電荷}) \quad (6)$$

この式で光速 c ($=\pm 1$) を掛けているのは電場 E と磁場 H とは時間反転対称性が異なるからである。磁荷は電荷に逆比例するという式(5)と比例するという式(6)とは一見矛盾するようだが実際には同時に成立しなければならない。このことより直ちに $e^2=g^2=1$ が求まり、正負の符号を除き素電荷も単位磁荷も唯一の値を持つことがわかる。以上では、 $h=1, c^2=1$ とおいたが、通常の MKSA 単位系に戻すと単位磁荷は 4.14×10^{-15} Wb (ウェバー) となり、超伝導体中で磁場が量子化される時の2倍の値に等しい。

慣習上は電子の電荷が負となるように定められているから、 $e^2=1$ において $e=-1$ は電子を表し、 $e=1$ は電子の反粒子である陽電子を表す。また、半導体中では、 $e=-1$ はn型キャリアである電子を意味し、 $e=1$ はp型キャリアであるホールを意味する。このように、素電荷 e ($=\pm 1$) は、粒子か反粒子を区別する量(または演算子)であり、CPT 対称性のうちのC対称性(荷電対称性または粒子反転対称性)に関わる演算子と考えてよい。粒子を反粒子に変えると符号が変わる対称性を $C(-)$ と記し、符号が変わらない対称性を $C(+)$ と記して、TやPで行ったのと同様な方法で式の対称性を議論できる。Maxwell 方程式に含まれる全ての電磁的量の対称性は $C(-)$ であるが、時間微分や空間微分そして誘電率や透磁率は空間や時間の性質であるからその対称性は $C(+)$ である。そのようにすれば、Maxwell 方程式が粒子反転対称性を保存していることは容易に証明できる。

6 粒子と波動との二重性の意味

以上で、 $c^2 = \epsilon_0^2 = e^2 = 1$ において、光速度 c は時間反転に、真空の誘電率 ϵ_0 は空間反転に、そして素電荷 e は粒子反転に関係しており、CPT 対称性に結びついた普遍定数であることを説明してきた。残る重要な普遍定数は、量子力学を特徴づけるプランク定数 h ($= 6.62606896 \times 10^{-34}$ ジュール・秒) である。電子は、粒子としての性質と波動としての性質の相矛盾した2つの性質を併せ持つことが、量子力学における最も重要な結論である。そして、粒子と波動とを結びつけるのが、プランク定数 h である。この定数は黒体放射のスペクトラムの解析より Planck により発見され、量子力学の発端となったが、Einstein と de Broglie は、光量子と物質波を与える重要な関係式

$$E = h \cdot \nu, \quad \mathbf{p} = h \cdot \mathbf{k} \quad (7)$$

を導いた。しかし、de Broglie 自身は、電子は波動と考えていたわけではなく、電子が波の上に乗っていると仮定して、電子の運動量と乗るべき波の波長の逆数としてこの関係式を与えている¹¹⁾。式(7)において、 ν は振動数、 \mathbf{k} は波動ベクトル(=波長の逆数)であり、ともに波動を表す量である。また、 E および \mathbf{p} は粒子または量子とし

てのエネルギーと運動量とであり、ともに粒子の状態を表す量である。従って、式(7)は、波動を表す量にプランク定数 h を乗算する(あるいは演算すると)粒子に関する量となることを示している。

ここで、 $h^2 = 1$ と仮定する、あるいはそのような単位系を用いれば、式(7)は、

$$\nu = h \cdot E, \quad \mathbf{k} = h \cdot \mathbf{p} \quad (8)$$

と変形される。従って、Planck 定数 $h^2 = 1$ は波動と粒子をお互いに変換する量または演算子と考えることができる。また、 $h^2 = 1$ はその変換に際してスケール(例えば、エネルギーや運動量)が変わってしまわないための条件である。また、 $h^2 = 1$ としているのだから、エネルギーと振動数は同じ単位となり、運動量と波動ベクトル(波長の逆数)も同じ単位となる。

しかし、式(5)および式(6)の存在を考えると、 $c^2 = \epsilon_0^2 = e^2 = 1$ と決めると h は自動的に決まってしまう量である。従って、 $c^2 = \epsilon_0^2 = e^2 = h^2 = 1$ としても、MKSA の4元単位系のうち、3つの単位がなくなるだけで、1つの単位は残る。この単位は何でもよく、例えば、時間の単位を残せば、全ての量は時間の単位で測られる。

$h^2 = 1$ と仮定することは、正のプ

ランク定数($h=1$)だけではなく、負のプランク定数($h=-1$)も存在することを意味する。この正負の値は、粒子-反粒子の対称性に結び付き、プランク定数 h 、虚数単位 i 、および波動的な量 ν と \mathbf{k} を $C(-)$ とし、粒子的な量 E と \mathbf{p} を $C(+)$ とすれば、都合良く説明できる。例えば、式(7)の粒子対称性は $C(+)=C(-) \cdot C(-)$ であり、式(8)の粒子対称性は $C(-)=C(-) \cdot C(+)$ である。式(7)で与えられるエネルギー E の粒子対称性は $C(+)$ であるから、粒子か反粒子かに関係なく、そのエネルギー E は必ず正の値となる。式(7)と式(8)は、波動にプランク定数を作用させると粒子になり、粒子にプランク定数を作用させると波動になることを表しているが、実態として何が起きているのかはまだ明らかでない。敢えて想像するならば、「粒子は波と異ならず、波も粒子と異ならない。何故なら、粒子は直ちに波となり、波は直ちに粒子となるから(色不異空、空不異色、色即是空、空即是色)」ということであろう。それぞれの電子が、こういう輪廻転生を繰り返すから存在が永遠のものとなるのであろうが、1つの電子がなぜ永遠に存在し続けるのかはまだ正確にはわかっていない。

7 おわりに

本稿では、物理学の普遍定数、例えば光の速度 c や真空の誘電率 ϵ_0 または透磁率 μ_0 、そして電子の電荷 e やプランク定数 h はなぜ一定であり、そしてなぜその値をとらねばならないかという疑問から出発し、それらは時間反転と空間反転そして粒子反転の対称性を意

味する CPT 対称性と密接に関連していることを導いた。そして、これを議論するためには、 $c^2 = \epsilon_0^2 = e^2 = h^2 = 1$ となる単位系が重要であることも指摘した。

この種の疑問を持っていた人達はすでにいた。例えば、特殊相対論は間違っていると主張する人達

である。彼らの主張は明らかに間違いであり、特殊相対論は正しいことは明らかだが、彼らが問題にしたのは、光速度不変の原理であり、「なぜ光の速度は一定なのか」という疑問である。専門家はこの疑問にまともに答えてこなかった。おそらく、当然のことと考えて疑

問に思わなかったか、あるいは、説明のできないあるいはする必要のない公理と考えていたからであろう。一方、「全宇宙に存在する全ての電子はなぜ寸分違わぬ電気量をもつのか」という疑問を発した科学者はいた。Diracであり湯川である。Diracはこの疑問を解決するために、単位磁荷即ちモノポールの存在を導入したが、疑問の完全な解決ということでは道半ばであった。電子はスピンという磁気モーメントを持ち、それが永久磁石の原因であることは良く知られている。最近では、スピンの性質を工学的に応用しようという試みも多く見られ、スピントロニクスという言葉も一般化してきた。電子のスピンは、電子の自転というイメージで語られることが多い。しかし、電子自体は点電荷であり大きさを持たないことも分かっており、点電荷が自転したところで磁気モーメントは発生しない。このように、スピンのモデルすら正確には確立していないのである。このように、我々が当然と思っていることでも、実は分かっていることが多い。一方、「粒子と波動の2重性をどの様に解釈するか」と

いう、多くの人が気付いている疑問も存在する。これは、波動関数の確立解釈をめぐる Bohr-Einstein 論争にも関連し、現在でも観測問題として議論されている。

このように「素朴だが妥当な疑問」が新たな革命のためには重要であり、まだ認識されていない重大な疑問も存在するであろう。「左手系で体積が正か負か」という疑問は120年前に Maxwell により提出されていたが、その後忘れ去られた疑問となった。この疑問が完全に解決されていないからこそ、現代の電磁気学の教科書には $E-B$ 対応か $E-H$ 対応かという混乱が生じている。そして、この混乱は、「Dirac の単位磁荷を電磁気学でどう扱うか」という疑問とも関連している。

「素朴で妥当な疑問」の発掘が重要であるが、該当分野の専門家からはこの種の疑問は出にくいであろう。しかし、「物理の歴史ではプランクの量子やドブロイの物質波のように当初多くの人にフィクションに類するとみえたことが本物になったりすることがあって油断ができない。」¹¹⁾ ことも事実である。従って、「疑問」を公募し、そ

れが妥当で基本的な疑問かどうかを判定し、もしそうであれば、「その疑問の解決方法」を懸賞論文として募集する方法もある。必ずしもこのような形態ではなかったが、18世紀から19世紀の欧州では懸賞問題が数学や物理学の基礎科学の発展に少なからず寄与したのは事実である。現在でも、数学の未解決問題に関しては懸賞問題が出されることがある。いずれにしても、一見突飛ではあるかもしれないが妥当な疑問を発掘して基本的な問題を追求していこうという粘り強い意志をもった研究人材が必要であり、そのような研究環境を日本にも整えることは重要である。

謝辞

本稿を執筆するにあたり、東海大学理学部物理学科の遠藤雅守准教授には、電磁気学教科書の混乱に関する情報とご意見を頂き、ホームページの内容を転載する許可も頂いた。同じく物理学科の安江正樹教授には、素粒子論から見た電磁場の解釈やモノポールについての情報とご意見を頂いた。お二人に深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 山賀進、宇宙の科学：<http://www.s-yamaga.jp/nanimono/uchu/jikokutokoyomi-02.htm>
- 2) (独)情報通信研究機構、報道発表：<http://www2.nict.go.jp/pub/whatsnew/press/h20/080912/080912-1.html>
- 3) 安達忠次著 ベクトル解析 p 32-33 培風館
- 4) James Clerk Maxwell 著「A Treatise on Electricity and Magnetism」(第3版) (Dover Publications, Inc.)
：<http://rack1.ul.cs.cmu.edu/is/maxwell1/>
- 5) 今井功著；岩波講座 応用数学「古典力学の数理」(岩波書店)
- 6) 木幡重雄著；「電磁気の単位はこうして作られた」
- 7) 「電磁気学教科書」論：<http://teamcoil.sp.u-tokai.ac.jp/classes/EM1/Unit/index.html> (東海大学遠藤准教授のホームページ)筆者との議論の後、文献5に関する記述が加筆されている。
- 8) EMAN の物理学・電磁気学・単位系による違い：http://homepage2.nifty.com/eman/electromag/em_unit.html
- 9) E-B対応と E-H対応；Wikipedia
- 10) 湯川秀樹、片山泰久、福留秀雄著；「素粒子」岩波新書(1961、第2版1969年)
- 11) 高林武彦；「量子論の発展史」筑摩書房(2002年)

執筆者プロフィール



市口 恒雄

情報通信ユニット リーダー
科学技術動向研究センター
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

理学博士。専門は半導体、超伝導体、磁性体の物理。
電磁波を用いた物性測定を中心に、米国の大学や日本の電機メーカーで研究に従事。

科学技術動向研究センターとは

2001年1月より内閣府総合科学技術会議が設置され、従来以上に戦略性を重視する政策立案が検討されています。科学技術政策研究所では、戦略策定に不可欠な重要科学技術分野の動向に関する調査・分析機能を充実・強化するため2001年1月より新たに「科学技術動向研究センター」を設立いたしました。当センターでは、「科学技術基本計画」の策定に資する最新の科学技術動向に係る情報の収集や今後の方向性についての調査・研究に、下図に示すような体制で取り組んでいます。

センターがとりまとめた成果は、適宜、総合科学技術会議、文部科学省へ政策立案に資する資料として提供しております。

センターの具体的な活動は以下の3つです。

1 「科学技術専門家ネットワーク」による科学技術動向分析

我が国の産学官の研究者を「専門調査員」に委嘱し、インターネットを利用して科学技術動向に関する幅広い情報を収集・分析する「科学技術専門家ネットワーク」を運営しています。このネットワークを通じ、専門調査員より国内外の学会合、学術雑誌などで発表される研究成果、注目すべき動向や今後の科学技術の方向性等に関する意見等を広く収集いたします。

これらの情報に、センターが独自に行う調査・研究の結果を加え、毎月1回、「科学技術動向」としてまとめ、総合科学技術会議、文部科学省を始めとした科学技術関係機関等に配布しています。なお、この資料は <http://www.nistep.go.jp> においても公開しています。

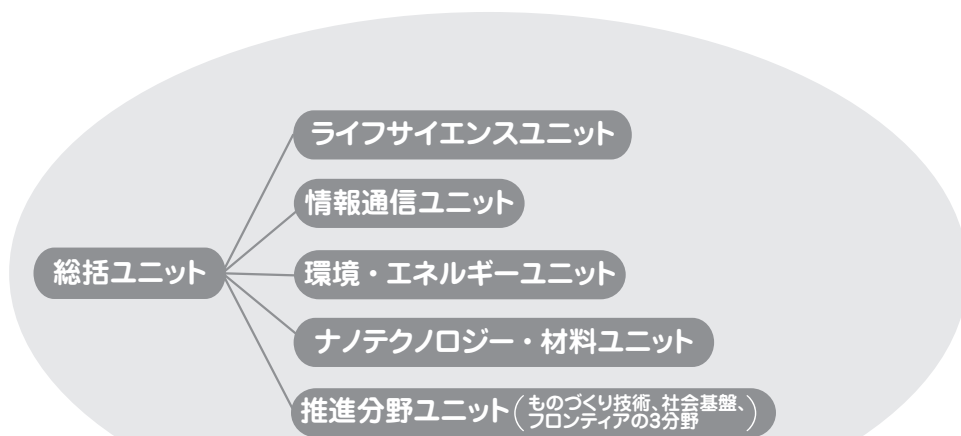
2 重要科学技術分野・領域の動向の調査研究

今後、国として取り組むべき重点事項、具体的な研究開発課題等を明確にすることを目的とし、重要な科学技術分野・領域に関するキーテクノロジー等を調査・分析します。

さらに、重要な科学技術分野・領域ごとの科学技術水準を欧米先進国と比較し、我が国の科学技術がどのような位置にあるのかについての調査・分析も行います。

3 技術予測に関する調査研究

当研究所では、科学技術の長期的将来動向を総合的に把握するため、デルファイ法を中心とする科学技術予測調査をほぼ5年ごとに実施しています。2005年には2年間にわたった「科学技術の中長期的発展に係る俯瞰的予測調査」を報告しました。



*それぞれのユニットには、職員の他、客員研究官（非常勤職員）を配置。

*センターの組織、担当分野などは適宜見直しを行う。

(2009年6月1日現在)

Science & Technology Trends

科学技術動向 6/2009



2009年6月号 第9巻第6号/毎月26日発行 通巻99号 ISSN 1349-3663



文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター