

研究会・学会スケジュール

第221回アメリカ電気化学会「ナノカーボン・シンポジウム」
The 221st Electrochemical Society Meeting: Nanocarbon Symposium
開催日：2012年5月6日(日)～10日(木)
開催場所：シアトル(アメリカ)
主催：アメリカ電気化学会
問い合わせ：篠原久典 理学研究科 教授
noris@nagoya-u.jp / 052-789-2482

日本古生物学会総会・年会
開催日：2012年6月29日(金)～7月1日(日)
開催場所：名古屋大学野依記念学術交流館
主催：日本古生物学会
問い合わせ：大野樹生 博物館 教授
oji@num.nagoya-u.ac.jp / 052-789-5761

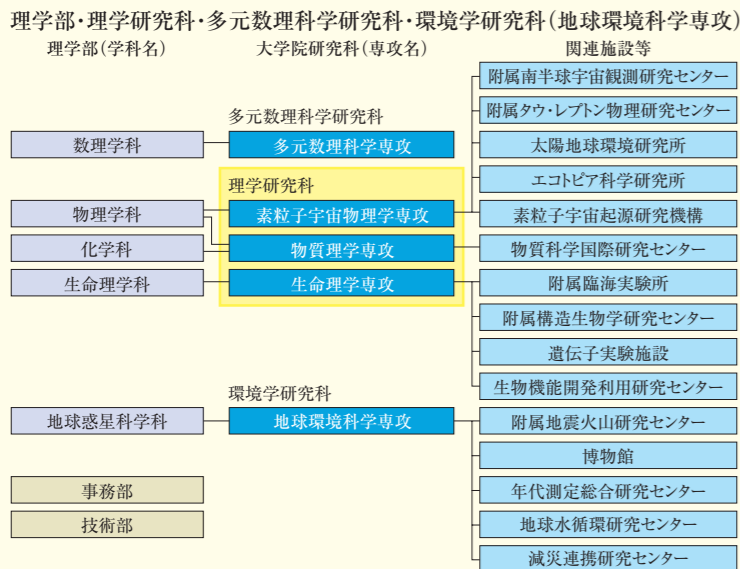
第24回形式的べき級数と代数的組合せ論国際研究集会
24th International Conference on Formal Power Series and Algebraic Combinatorics (FPSAC'12)
開催日：2012年7月30日(月)～8月3日(金)
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール
主催：FPSAC'12 組織委員会
問い合わせ：岡田聡一 多元数理科学研究科 教授
okada@math.nagoya-u.ac.jp / 052-789-5596

タウ・レプトン国際ワークショップ 2012
The 12th International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU2012)
開催日：2012年9月17日(月)～21日(金)
開催場所：名古屋大学理学南館坂田・平田ホール
主催：タウ・レプトン物理研究センター
問い合わせ：戸本 誠 理学研究科 准教授
makoto@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2902

日本生物物理学会第50回年会
開催日：2012年9月22日(土)～24日(月)
開催場所：名古屋大学豊田講堂、シンポジオン他
主催：日本生物物理学会
問い合わせ：本間道夫 理学研究科 教授
g44416a@cc.nagoya-u.ac.jp / 052-789-2991

「新奇熱電材料－従来の設計指針を越えて－」
(シンポジウムC-9, IUMRS-ICEM2012)
"Novel thermoelectric materials –Beyond conventional design rules–"
(Symposium C-9, IUMRS-ICEM2012)
開催日：2012年9月23日(日)～28日(金)
開催場所：パンフィコ横浜
主催：International Union Materials Research Society
問い合わせ：寺崎一郎 理学研究科 教授
terra@cc.nagoya-u.ac.jp / 052-789-5255

組織図



編集だより

語り継がれる記憶は人ひとりの人生より長い。歌はその一例だ。イギリス出身の私は、卒論研究のために、アイルランド西部で地質調査を行ったことがある。宿泊した田舎のパブでは、毎晩、現地の人たちが集まり、アイルランド語を交えた歌声が鳴り響いていた。私はギネスを飲みながら音楽を満喫していた。ある晩、アイルランド人が17世紀にイギリス軍と戦った時の思いを歌った歌が始まり、私は一瞬ドキッとした。東日本大震災から1年が経ち、テレビには、連日震災の映像が映し出される。それらの番組を見ると、震災直後の自分や家族のことが思い出される。次は名古屋かもしれないと考え、子供と津波や地震について話すこともある。私は昨年「理Philosophia」の編集に携わるようになった。その役割は名古屋大学理学部の活動を広く紹介することにあると思う。それに加えて、今回の「理Philosophia」が、長く歌い継がれる歌のように震災の教訓を残すための助けになればうれしく思う。(ウォリス・サイモン)

表紙説明

2011年3月11日に発生した巨大地震はマグニチュード9を記録、福島第一原子力発電所では、放射性物質の漏洩を伴う重大な原子力事故が起きた。あれから1年、大きく揺れ動いた私たちの立ち位置を理学の観点からもう一度見つめ直す。



理 *philosophia* — No.22
spring-summer 2012
2012年4月10日発行

広報委員 篠原久典(研究科長)
松本邦弘(副研究科長)
杉山 直(評議員)
粟田英資(数理学科)
福井康雄(物理学科)※委員長
中村光廣(物理学科)
寺崎一郎(物理学科)
大木靖弘(化学科)
杉山 伸(生命理学科)
瀧口金吾(生命理学科)
ウォリス・サイモン(地球惑星科学科)
河本達吾(事務長)

編集発行 名古屋大学理学部・大学院理学研究科広報委員会
〒464-8602 名古屋市千種区不老町

ご意見、ご感想をお待ちしています。
本誌の原稿執筆や取材などにご協力いただける方を求めています。
広報委員会までご連絡ください。
なお、ご投稿などの採否については当委員会にお任せください。
次号は2012年10月発行の予定です。

制作 株式会社電通
編集協力 株式会社コミケ
デザイン 株式会社ティ・エム・シー

・本誌記事、写真等の無断複写、転載を禁じます。 ISSN 1884-8486

TEL 052-789-2394 FAX 052-789-2800 E-mail kouhou@sci.nagoya-u.ac.jp URL http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/

東日本大震災をめぐる理学

特集

- 05 科学の可能性と境界◇寺崎一郎
- 06 なぜM9地震は予見できなかったのか◇鷺谷 威
- 10 もう一度原子力を考える◇福井康雄
- 14 生命から学ぶ太陽光エネルギー利用◇野口 巧
- 17 フクシマレポート◇高木 新 / 安井幸夫
- 02 時を語るもの(富田英夫博士)◇堀 寛
- 03 理のエッセイ◇南 雅代
- 18 理学部交差点

富田英夫博士——メダカを生涯のメダルに

「トミタ・コレクション」とよばれる生きたままのメダカ変異体100種類余りを集めた貴重な遺伝資源がある。生涯をかけてこれを集めたのが富田英夫である。体色の変化したもの、ヒレや眼のないもの、体軸の対称性の崩れたものなどもあり、興味深い。しかも富田は放射線や変異剤などはいっさい使わず、ひたすら自然の変異のみを野外から分離した。その点でも貴重なコレクションである。

メダカはヒトと同じ脊椎動物で、小さく飼育しやすく繁殖周期も短いため、富田が研究を始めた1960年代、すでに遺伝や発生のモデルとして期待はされていた。それがヒトの全ゲノムDNAの塩基配列が2003年に、さらにメダカのゲノムが2007年に決定された。このことでヒトとの遺伝子

構成の比較が容易となり、ゲノム配列の相似度の高さからモデルとしての価値が高まった。変異体を集めたトミタ・コレクションもヒトの遺伝病のモデルとして再評価されている。その最初の例がよく知られたヒメダカであり、ヒトの肌の色の違いを決める遺伝子 *Slc45a2* の特定に結びついた。人類の肌の色へのこだわりを思うと感慨深い。

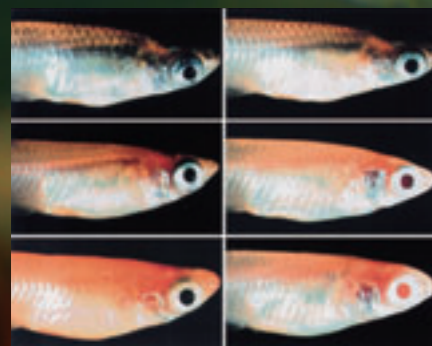
真っ黒に日焼けし、麦わら帽に作業服のおっさんが真夏の朝から夕までメダカの飼育場に立ち、何百もの水がめをのぞき込んでいる。それは時流に流されず、自分の分離したメダカたちが役に立つ日が将来、必ずくると信じた後ろ姿であった。

(堀 寛 名古屋大学名誉教授)



写真提供：成瀬清

富田 英夫 (1931-1998)
元名古屋大学理学部助教授、
生物分子応答研究センター教授



◇写真の説明

左ページの左下は、富田が名古屋近郊の田圃や池から分離したヒメダカと、その多様な変異体(写真提供:鳥田敦子、東京大学理学部)。富田は皮膚の色の違うヒメダカ同士を交配することによって、その中の何種類かが同一の遺伝子内の変化の違いによることを、突き止めた。やがてゲノム研究の時代となり、その遺伝子が *Slc45a2* と同定された。ヒトのアルビノ(白子)には少なくとも4つの型があり、当時まだ不明であった4型アルビノはヒメダカをヒトに原因遺伝子が *Slc45a2* であることが判明し、それが人類の肌の色の多様性を決めていた。真ん中は、2002年まであったメダカの野外飼育場(写真提供:溝口明)。現在は理農館と理学館が建つ。右はトミタ・コレクションを飼育する生物機能開発利用研究センターの飼育室。バックの写真は、今も名古屋大学に残るトミタ・コレクションの一部。

◎理のエッセイ

“ものに触れる”ことを惜しまない

南 雅代 年代測定総合研究センター准教授



Illustration: Lisa Tezuka

小学生の頃、「〇年の科学」という、今はすでに廃刊となってしまった科学雑誌を定期購読しており、付録教材の簡単な実験・観察セットがとて楽しみだった。人体組み立て模型や岩石標本セットなど、誌面からは得られない“ものに触れる”という体験をさせてもらった。石膏を流し込んでつくったアンモナイトの模型は特に私のお気に入り、化石へ興味をもつきっかけとなった。今こうして地球科学の道歩んでいるのは、このころに養われた科学的好奇心が原因の1つであることは間違いない。

大学院生の頃、某塾で化学実験助手なるアルバイトを経験したことがある。実際の実験で観察力や思考力を養いつつ、化学を理解し実践力を身につけるといっただけで、進学校に通う学生ほど、時間の無駄という高校の方針で化学実験の授業をほとんど受けていなかった(現在は状況が改善されていることを願う)。化学に興味をもち、博識の彼らが実際に化学実験をしたことがなく、“ものに触れる”経験をしていないという事実が驚いた。彼らの知る化学は仮想世界の出来事であり、実世界のものではなかった。

ここ10年の間にインターネット通信の発展はめざましく、ボタン1つで必要な情報やものが簡単に手に入るようになった。しかし、世の中に情報やものが溢れる一方、逆に“ものに触れる”という実践力は低下しているのではないか。最近の大学生は、実際に“ものに触れ”て確認するという泥臭いことを避け、わかりやすい答えだけを手軽に求める傾向が強くなったと感じる。

理学研究において重要なことは、誰も理解しえなかった現象を解説し、新たな発見をめざすことである。泥臭い作業の先に失敗が待ち受けることもあり、答えが1つでない場合もあり得る。学生の皆さんは若い今こそ、“ものに触れる”ことを惜しまず、その際にわき上がる好奇心を大切にしながら、未知の道を切り開いていく冒険を是非経験してほしいと願う。

Masayo Minami

1964年大阪生まれ。東京大学理学部化学科卒。同大学院理学研究科化学専攻修士課程修了。博士(理学)取得(電気通信大学)。日本学術振興会特別研究員(PD)、名古屋大学助手、助教授を経て2007年より現職。専門は地球化学。岩石、堆積物、骨などの同位体分析を行っている。

特集

東日本大震災をめぐる理学

科学の可能性と限界

寺崎 一郎 物質理学専攻教授



Ichiro Terasaki

1963年生まれ、1990年東京大学大学院工学系研究科博士課程中退。東京大学助手、超電導工学研究所主任研究員、早稲田大学教授を経て2010年より現職。専門は物性物理学の実験的研究。とくに、遷移金属酸化物や有機伝導体の新機能開拓。機能性物質物性研究室ウェブサイト <http://vlab-nu.jp/>

写真：2011年6月宮城県石巻市（撮影：鷲谷威）

まずは、この度の震災で被災された皆様に心よりお見舞い申し上げます。あの日の地震は、ここ名古屋でも異常な長周期の揺れとして感じられた。震源地から遠く離れていたこともあり、ここ名古屋大学理学部の周辺ではほとんど被害はなかったが、親類・縁者・友人・共同研究者などまで対象を広げれば、誰もがこの大震災を身近に感じていることと思う。私は神戸の出身で、阪神大震災のときにはたまたま京都で地震を直接体験した。それと比べても、今回の震災は規模がまったく違うと感じる。

本誌は名古屋大学理学部の広報誌であり、理学部の広報委員会によってその企画・編集が行われている。昨年4月の広報委員会では、当然ながら大震災に関連した企画が議題となった。本誌は年間2冊の刊行であり、震災から1年後の出版が最短であり、時流に即応した出版は不可能である。そこで拙速にことを運ばず、10年後に読み返しても意味のある、理学の読み物にしようと皆で知恵を出し合った。そして最終的に、私たちは地震、原子力、太陽エネルギーという3つの話題を選んだ。

一般の人たちが知りたいことは、地震の予知はできるのか、放射能はどれくらい浴びても安全なのか、といったものだろう。広報委員会での議論を通じて私が感じたことは、それらの疑問に明解な答えを

出せるほど私たちの科学は進んでいないということである。これには科学の方法論そのものが関わっている。

私たちは、ある実験や観測をいつ何度やっても誰がやっても同じになるとき、そのもとになる理論は正しいと判断する。つまり、科学では再現性が本質的に重要であり、多くの出来事を統計的に処理して正誤を判断する。科学は、個別の事象の個性を捨象することによって、類似の多数の現象を統計的に予言する力をもっており、私たちの未来をある確率で指し示すことができるが、個々の事象を正確に予知することはできないし、そのように発展してこなかった。

たとえば、あるステージのガン患者をある術式で手術したとき、その5年生存率は定量的に算出できる。しかし、その手術をした目の前の患者さん個人があと何年生きられるかを予言することはできない。今回の震災に関していえば、本当に知りたいのは、自分の町に起きるかもしれない地震の予知や、被爆したかもしれない自分自身の健康と将来についてであるが、こうした個別の事象について科学は断定的な答えをくれない。ここに科学の限界がある。そのうえ、ガン手術の場合に比べて大地震の経験回数は少なく、この方面では統計的方法そのものがまだ満足に使えない。放射能の健康への影響に至っては、人体実験ができるはずもなく、信頼できる研究データすらおぼつか

ないのが実態だと思う。

とはいえ科学には限界があると同時に、素晴らしい強みもある。今後何年の間に、大地震がどこかに起きる確率や、それがもたらす被害の大きさはある程度予測可能であり、それらをもとにリスクを数値化することができる。地震保険が成立するのは、科学としての地震活動の理解の成果である。もっと予測可能な現象は、天体の運動であり、先日の皆既月食のときは、実に正確に予言した時間に月が欠けてゆくのをみて感動した。科学のなかった太古には、魔術に属する現象だったことだろう。

科学の叡智が技術に結実したものが原子力発電であったはずだが、科学としての原子力をどれくらい私たちは理解していたのだろうか。原子力発電が核分裂の連鎖反応を利用する以上、反応回数がねずみ算式に暴走する寸前の状態、つまり限界を制御しなければならない。それが技術的に可能であったとしても、科学はこのような不安定状態の制御の原理的難しさを教えてくれる。科学と技術は似て非なるものだが、私たちは両者を混同して論じてはいないだろうか。

こうした想いを著者のみなさんと共有しつつ、本誌の企画は出来上がった。本誌が、科学とは何か、科学は何を教えてくれたのか、そして私たちはそれをどう生かせばよいのか、という問題を考えるきっかけになれば望外の幸せである。

なぜM9地震は 予見できなかったのか

鷺谷 威 減災連携研究センター教授

3月11日に起きたこと

「M9」（マグニチュード^{*1}9）とは、地震研究者にとって、一生に一度遭遇するかどうかの歴史的な超巨大地震を象徴する形容詞であった。それが、よりもよって我々が住む日本で起きようとは、ほとんど誰も真剣に考えていなかった。しかし、先入観にしばられた研究者をあざ笑うかのように、2011年3月11日14時46分（日本時間）、宮城県沖の地下約24kmを震源として、2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）は発生した。

東北地方の東方沖に位置する日本海溝では、太平洋プレートが約8cm/年の速度で沈み込んでいる（図1）。沈み込んだ太平洋プレートの上面の深さは沿岸付近で50km

程度になる。この日本海溝から太平洋沿岸の地下50kmに至るプレート境界面で生じた大規模な断層運動がM9地震の正体である。地震後に得られたさまざまなデータの解析によれば、断層運動は南北方向に約400km、東西方向に約200kmの範囲に広がり、断層のずれの量は震源域全体の平均で15m程度、最大では50m以上に及んだ¹⁾。巨大な断層運動によって3分以上も続く強い揺れが生じ、地盤の液状化や建物被害をもたらした。断層運動は、また、震源域周辺で顕著な地殻変動を生じた。震源域の直上では約30mもの東向き変位が生じ²⁾、東北地方の陸地は東西方向に約3mも伸び、太平洋沿岸は最大で1m沈降した³⁾。震源

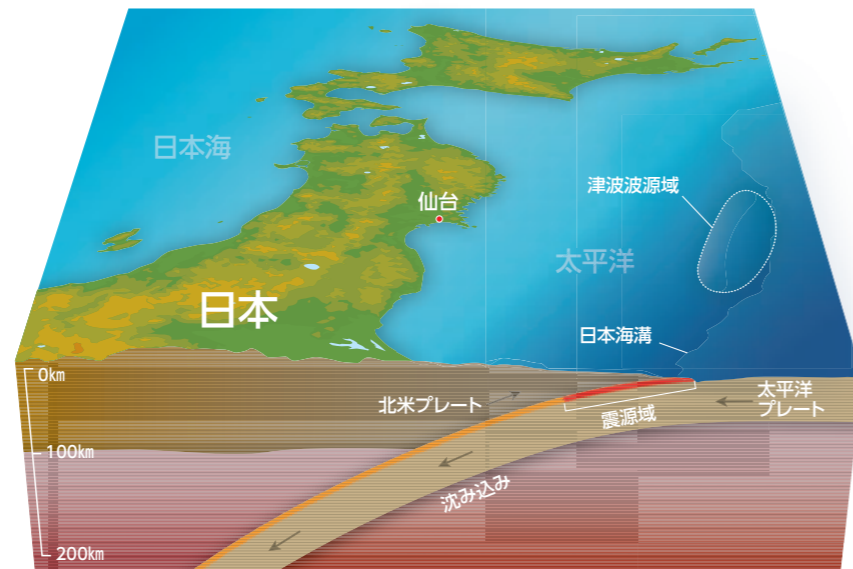


図1 2011年東北地方太平洋沖地震の発生イメージ



Takeshi Sagiya

1964年栃木県生まれ。東京大学大学院中退。国土地理院、名古屋大学大学院環境学研究所助教授、准教授、教授を経て、2012年1月より現職。専門は地殻変動学。

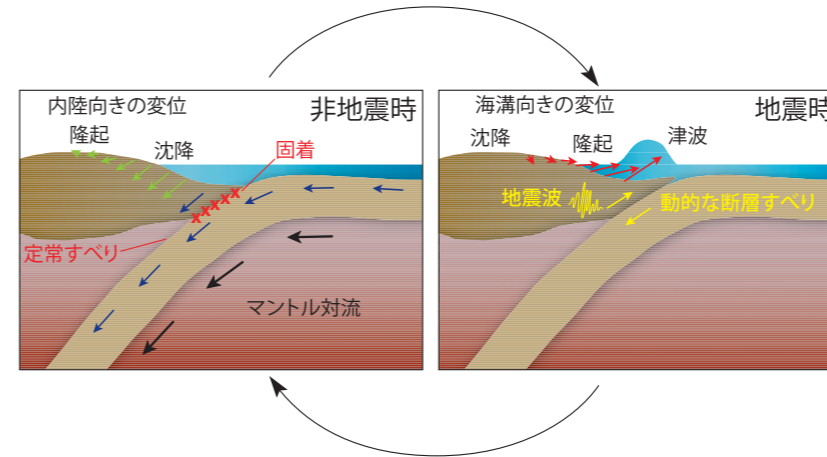


図2 プレート沈み込み境界における地震サイクルの概念図
地震間にはプレート境界が固着してプレート運動とともに陸側プレートに歪みが蓄積し、地震時にはプレート境界の断層を破壊して歪みエネルギーを解放する。

域付近の海底で生じた地殻変動は海面を動かして巨大津波が発生した。津波は地震発生から約30分後に沿岸に到達し、すべてを飲み込んだ。こうした一連の事象により、2万人近い死者・行方不明者をはじめ多大な被害をもたらされた。福島第一原発の事故も含め、この地震・津波が日本社会に与えた影響の大きさは測りしれない。以下では、この地震の自然科学的な側面に注目する。なぜこれほど巨大な地震が起きたのか、なぜ地震研究者は巨大地震の発生を事前に指摘できなかったのか考察し、この地震が地震学に与えたインパクトについて述べていきたい。

巨大地震はなぜ起きたのか

東北地方太平洋沖地震のM9.0という規模は、日本列島で記録された史上最大規模の地震であり、世界でも1900年以後の地震では4ないし5番目に大きい。これらの巨大地震は、例外なく海洋プレートが大陸の下へと沈み込む場所で発生している。

プレート境界が固着した状態でプレートが沈み込むと、周辺で変形が生じ歪みエネルギーが蓄積される（図2）。単純にいえば、プレート運動速度と大地震の発生間隔、地震時すべり量の間には、おおそ（プレート運動速度）×（地震発生間隔）＝（地震時のすべり量）と

いう関係が成立する。したがって年8cmの速度でプレートが沈み込む日本海溝では、650年間プレート境界が固着したままであれば50m程度の断層すべりが起こりうることになる。

今回の地震がこれほど大規模になった原因として、2つの可能性が指摘されている。第一の可能性は、今回の地震の発生間隔が500～1000年と長く、長期間エネルギーを蓄積したので規模が大きくなったというものである。今回の震源域の主要部分は過去100年ほどの地震の震源域とは重なっておらず、長期間固着したままエネルギーを蓄積していた可能性がある。今回の震源域の一部は過去にM7クラスの地震が発生した場所と重なるが、M7地震ではエネルギーが十分解放されず、数百年に一度、広範囲が同時に破壊してM9地震を起こし、エネルギーをほぼ完全に解放するのではないかと、いう考え方もある⁴⁾。いずれにしても、500～1000年という長い発生間隔の地震であれば、その間に十分なエネルギーを蓄積することができる。今回の地震が869年貞観地震と類似していたという指摘もあり、まさに1000年に一度の超巨大地震だった可能性が高い。

一方、第二の可能性として、プレート境界面の摩擦に関する考察から、地震規模の大きさを説明する仮説が出されている⁵⁾。

断層が1m/秒といった高速ですべると摩擦熱が発生する。岩石の熱伝導率は小さいため、摩擦熱はすぐには散逸できず、断層面付近で急激な温度上昇が起きる。この摩擦発熱によって間隙流体^{*2}の圧力が急激に増加し、断層の法線応力成分が低下する。その結果、実効的な摩擦係数が0に近くなって断層がすべりやすくなり、勢い余ってすべり過ぎたのではないかと、いうのである。1回の地震で50mを越える断層すべり量が推定されたのは世界でも初めてのことであり、そのメカニズムは大変注目されている。

*1 マグニチュード
地震の規模を表す指標。マグニチュードには、記録された地震動の振幅や断層運動の規模（断層面積とすべり量）など異なる定義が複数あり、定義によって値が異なることもある。マグニチュードは地震のエネルギーの対数に2/3を乗じたかたちになっており、マグニチュードが1増えるとエネルギーは約32倍に、2増えるとエネルギーは1000倍になる。

*2 間隙流体
地球内部の岩石には細かい隙間が存在し、その空間を液体や気体が占めている。

〈引用文献〉
1) たとえばIto, T., et al., Earth Planets Space, 63, 627-630, 2011.
2) Sato, M. et al., Science, 332, 1395, 2011.
3) Ozawa, S. et al., Nature, 475, 373-376, 2011.
4) Hori, T., and S. Miyazaki, Earth Planets Space, 63, 773-777, 2011.
5) Mitsui, Y., and Y. Iio, Earth Planets Space, 63, 755-759, 2011.

起こりえた M9 地震

今回の震源域において、これほどの超巨大地震が起きることは事前に想定されていなかった。政府の地震調査研究推進本部は、日本周辺で起きる大地震について、地震規模や長期発生確率を評価している⁶⁾。三陸沖から房総沖にかけては、プレート境界を7つの領域に区切り、それぞれの領域で起きる地震の規模や発生確率を示していたが、そこで想定されていた最大のマグニチュードは8.2であった。しかし、実際に発生したのは、7つの領域中ほぼ6つにまたがる広範囲を同時に破壊する超巨大地震であった(図3)。

予見できなかった原因の1つは評価手法にある。この評価は、固有地震説^{*3}に基づいて行われ、江戸時代以降の約400年間の地震活動から、各領域で繰り返し発生した固有地震と思われる地震を特定し、その規模や発生間隔を見積もっていた。すなわち、対象とする大地震の発生間隔が400年以下であることが暗黙のうちに仮定されていたことになる。こうした仮定が間違いであることは、869年に発生した貞観地震の調査から明らかになりつつあった。貞観地震については「日本三代実録」という古文書に津波による被害の記載が知られていた。近年、津波堆積物の調査によって過去の津波の存在が確認され、浸水範囲もほぼ特定されて、政府の評価よりも大規模な地震の発生が推測されていた⁷⁾。しかし、こうした一連の研究成果がまとめ、防災対策に反映させようとしていた矢先にM9地震は発生したのだった。

一方、大地震発生の可能性を示す観測データも確かに存在していた。日本列島では1990年代にGPSの連続観測網が整備され、

プレート運動によって日本列島が変形する様子を精密に観測できるようになった。東北地方は年間2cmほど東西方向に縮み続けていることがわかり、その原因として、宮城県沖を中心にプレート境界がほぼ完全に固着していると推定されていた(図4)⁸⁾。一方、過去100年間に日本海溝沿いで発生した大地震の地震波解析から、断層が大きくすべった場所、いわゆるアスぺリティ^{*4}の分布が推定されていた(図4)⁹⁾。GPSに基づく固着域とアスぺリティ分布を比較すると、前者がべったりと広がっているのに対して後者では比較的小振りなアスぺリティが点在し、明らかに分布が異なっている。また、推定された断層すべり量は、プレート運動速度と地震の発生間隔から予想される量より明らかに小さかった。こうしたデータ同士の矛盾は超巨大地震発生のポテンシャルを示唆していたのだが、当時はそう解釈していなかった。GPSは陸上のみの観測なので沖合の固着域の推定精度が悪い。それに加えて、これもGPSのおかげで、プレート境界が地震を起こ

さずにずるずるとすべる「スロースリップ」や大地震後に断層がすべり続ける「余効すべり」が見つかったため、過去100年のどこかで、そうした現象ですべりの収支が合ったのだろうと考えていた。データが示していた矛盾を、観測データのない時代に押しつけてしまっていたのである。直接的な証拠がない以上、別の解釈、すなわち、エネルギーが蓄積して巨大地震が起きる可能性について考慮すべきであったと悔やまれる。

日本では1995年の兵庫県南部地震以降、地震やGPSの観測網が全国的に整備され、スロースリップや深部低周波微動^{*5}など、さまざまな現象の新発見が相次いだ。こうした成功体験を通じて、我々地震研究者は、自分たちの足元にある日本列島のことをわかったような気になっていたのかもしれない。

2004年12月にインドネシアのスマトラ島沖でM9.1の巨大地震が発生したが、この地震も世界の地震研究者にとってまったくの「想定外」であった。こうした事態に、海外では、それまでの地震学の「常識」に関する

見直しや検証が盛んに行われた。そうした研究成果の中には、日本も含めて世界のプレート沈み込み帯ではどこでもM9地震が起こりうる、という衝撃的な結論を述べたものもあったのだが¹⁰⁾、東北沖で実際にM9地震が起きるまで、日本国内でそうした警告が顧みられることはほとんどなかった。こうした一連の経緯を振り返ると、わずかな成功体験によってうねられた研究者が、地球から痛烈なしっぺ返しを食らったようにも思えてくる。

今後の地震研究のあり方

これからの地震研究において、我々研究者は、先入観を捨て、いまいちど虚心坦懐に地球と向かい合う姿勢を取り戻す必要がある。地球科学は、分野横断的なアプローチによって研究対象たる地球の正体を解き明かすのが本分のはずだが、最近の科学研究のご多分に漏れず、高度に専門化され

て細分化が進んでおり、異なる分野間のコミュニケーションは必ずしもうまくできていない。巨大地震や津波の発生する可能性について、地質学的(津波堆積物)、測地学的(GPS)、歴史学的(古文書)にその端緒をとらえていたにも関わらず、それらを総合的に解釈し損ない、発生ポテンシャルを察知するチャンスを逃したことは、その何よりの現れである。

狭い専門分野の研究でとらえることができる地震や地球の姿は、全体のごく一部に過ぎない。自分が見えない部分も含めて全体像を描こうとすれば、他分野との連携を進めることが当然必要になる。地震研究における今回の地震の最大の教訓は、まさにそうした分野横断型の連携研究の大切さである。分野を越えた交流を深めることで、根拠の不確かな「常識」は検証を迫られ、互いに矛盾して見える結果の原因を突き詰めることで新たな

ブレイクスルーが開けるかもしれない。

日本は世界有数の地震国であり、地震研究に対する世間の関心も高く、予算や人員の面でも厚遇されてきた。そうした恵まれた待遇は、地震予知など防災に役立つ科学を進めてほしいという期待の現れであったと思う。しかし、我々の実力は実用的な地震予知の実現にはほど遠く、基本的なところも満足に理解できていなかったことを改めて思い知った。

だが、ここでは1000年に一度という低頻度のイベントにあと一步のところまで迫っていたことをあえて前向きにとらえたい。日本を襲う次なる脅威として、南海トラフの巨大地震や首都圏直下の大地震の発生が懸念されている。今回の苦い経験を生かし、次なる大地震の正体を解明するとともに、地震による災害をできるだけ減らすのである。そうした取り組みはすでに開始されている。

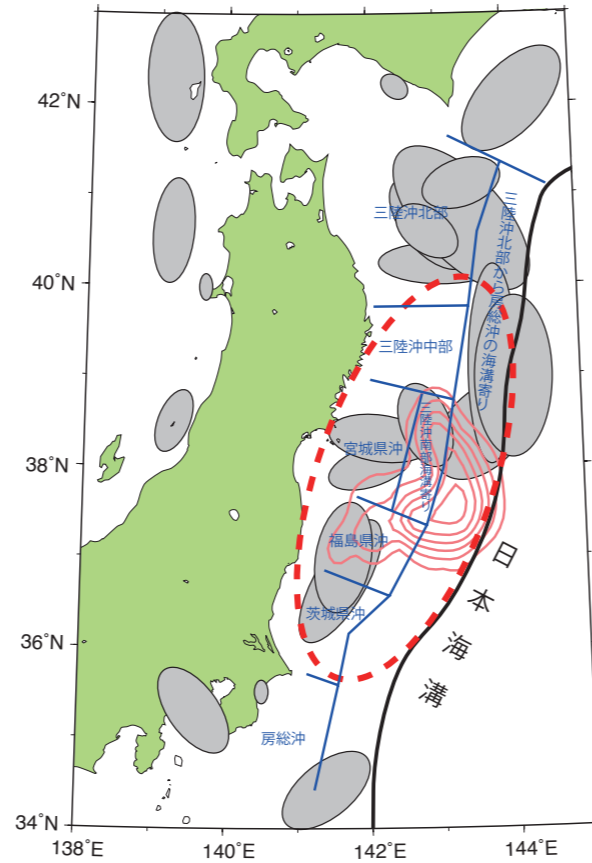


図3 東北地方太平洋沖地震および過去の大地震の震源域と長期評価の地域区分
赤の破線は余震分布から推測される震源域の広がり。ピンクの等値線はGPSデータから推定された断層すべり量の分布(10m間隔)。灰色の楕円は1885年以降の主な地震の震源域。青線は、地震調査研究推進本部による長期評価の際の地域区分。(Ito, T., et al., Earth Planets Space, 63, 627-630, 2011)

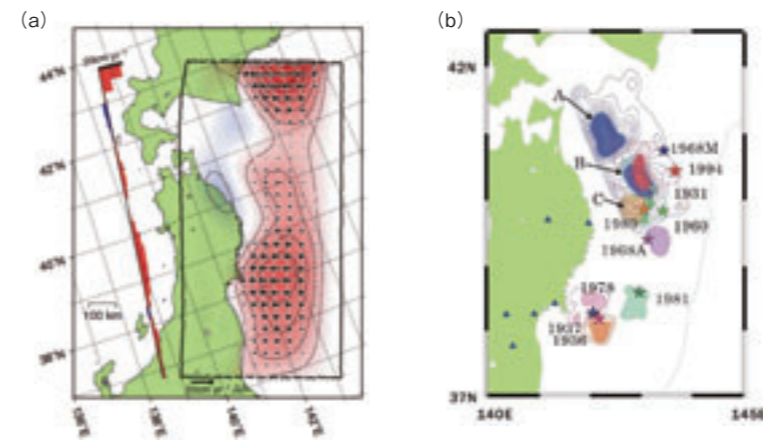


図4 GPSから推定した固着域と地震学的に求められたアスぺリティ分布の比較

(a)GPSデータに基づくプレート境界面上の固着域分布。コンターは固着によるすべり遅れの等値線を2cm/年毎に示したものである。(Nishimura, T. et al., Geophys. J. Int., 157, 901-916, 2004) (b)地震波形データに基づく日本海溝沿いプレート境界面上のアスぺリティ分布。地震時のすべり量が最大値の1/2以上となる範囲を塗りつぶしてある。宮城県沖では、GPSで見るとほぼ完全に固着した領域が広がっているが、アスぺリティの分布は限定的ですべり量も小さい。(Yamanaka, Y., and M. Kikuchi, J. Geophys. Res., 109, doi: 10.1029/2003JB002683, 2004)

*3 固有地震説
ある地域で起きる最大級の地震については、ほぼ同規模の似たような地震が繰り返し起きているという考え方。

*4 アスぺリティ
プレート境界面上で周囲よりも破壊強度が大きく、地震時に大きくずれて強い地震波を出す場所。もともとは「でこぼこ」の意。

*5 深部低周波微動
西南日本に沈み込んだフィリピン海プレートの深さ30km付近を発生源とし、通常の地震よりもゆっくりとした長時間続く微弱な揺れ。日本で初めて発見され、沈み込みに関係した現象として注目されている。

(引用文献)
6) 地震調査研究推進本部, <http://www.jishin.go.jp/>
7) 穴倉正展・他, 平安の人々が見た巨大津波を再現するー西暦869年貞観津波ー, AFRC NEWS, No.16, 2010/8
8) Nishimura, T. et al., Geophys. J. Int., 157, 901-916, 2004.
9) Yamanaka, Y., and M. Kikuchi, J. Geophys. Res., 109, doi: 10.1029/2003JB002683, 2004.
10) McCaffrey, R., Geology, 36, 263-266, 2008.

もう一度 原子力を考える

福井康雄 素粒子宇宙物理学専攻教授

放射線とは

原子力は人類が100年足らず前に手に入れた新しいエネルギー源である。化石燃料に比べると、桁違いに大きなエネルギーが取り出せるが、その源は、簡単に人間の手では制御できない「ミクロな世界」である。科学研究の歴史を振りかえると、原子力の発見は必然であったと思われる。あらためて、その意味をとらえ直したい。

放射線の正体は、粒子や電磁波である。ここで電磁波は、光、電波、X線を含む電氣的な波であり、すべて光速で伝わる。空気も、酸素や窒素などの粒子で構成される。放射線と空気の違いは、エネルギーの大小にある。放射線の粒子1個のエネルギーは、空気の粒子1個のエネルギーの数万倍から1億倍以上もある。このように桁違いに大きなエネルギーの粒子が人体にあると、細胞をつくる生体の分子は破壊される。これが放射

線による害を生む。

放射線としての粒子や電磁波は、 α 線、 β 線、 γ 線などよばれる。 α 線はヘリウムの原子核、 β 線は電子、 γ 線は光子（電磁波）である。ヘリウム原子核は、正の電荷をもつ陽子2個と、電氣的に中性な中性子2個できている。陽子と中性子は、原子核を構成する粒子という意味で、核子とよばれる。ヘリウム4は、原子番号 $Z=2$ （陽子の数）、質量数4（核子の数）の原子核である（図1）。ヘリウム4は安定で、100億年経っても変化しない。人体をつくっている炭素12、酸素16、窒素14などの元素も安定で変化しない。これらの元素の原子核は、原子番号30以下の「小さな」原子核である。原子番号 Z の原子核の中には Z 個の陽子がある（図2）。これにほぼ Z 個の電子が結びついたのが、原子である。原子のまわりの電子は、原子核の10万倍以上の広がりをもつ。



Yasuo Fukui

1951年大阪市生まれ。東京大学理学部卒（1974）、同大学院理学系研究科天文学専攻修了（1979）。専門は電波天文学。チリ共和国に電波望遠鏡「なんてん」を設置し、星の生まれるガス雲の観測を行っている。

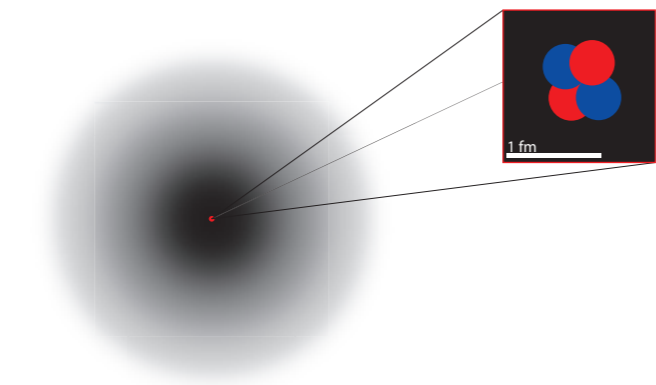


図1 ヘリウム4原子の構造

1オングストローム程度に広がる電子（グレーの部分）の中心に、小さなヘリウム原子核が位置する。原子核の大きさは、電子の広がりの10万分の1に過ぎない。電子分布の濃さは、各位置での電子の存在する確率を表す。原子核は、陽子（赤丸）と中性子（青丸）からなる。

1Å = 100,000 fm

Å（オングストローム）
fm（フェムトメートル）

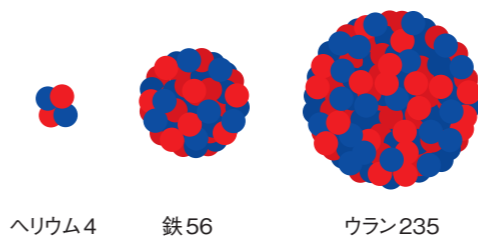


図2 ヘリウム4、鉄56、ウラン235の原子核

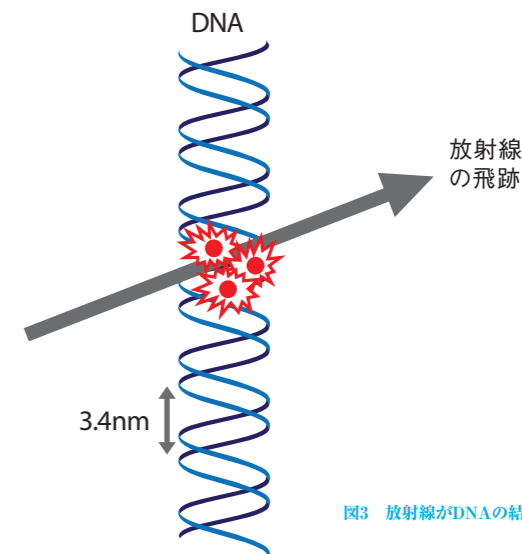


図3 放射線がDNAの結合を切る様子

生命と放射線

生物は、常に新しい細胞をつくりながら生きています。細胞をつくる分子、とくに大事な遺伝情報を担うDNAが壊されると、生体を維持できなくなる。DNAを含めて、分子は原子がいくつか結びついたものである。その結合の力は、放射線のエネルギーよりもはるかに小さい。分子が放射線を受けると結合が壊され、別の分子に変化する。強い放射線を受けると、数日から数週間でその影響が現れ、細胞をつくり続けることができなくなる。生物にとって致命的なダメージである（図3）。

一方、弱い放射線でも、長い期間にわたって受けると影響が蓄積する。遺伝子が破壊され、異常細胞「がん」の発生につながる。弱い放射線については、実験データも限られており、個人差も大きく、その影響は正確には確かめられていない。発がん性についても、放射線が弱くなると、他の原因との区別ができないために、実験的に影響を確定できない。一般論としては、できる限り放射線を浴びないほうがよいのはもちろんであるが、その量的な根拠は実証されていない。

過去の被ばくの例から、幼児が浴びても害が増えない1回の被ばく量は、100ミリシーベルトと推定されている。ただし、長い期間

に100ミリシーベルトを浴びても、人体の細胞の修復作用のために、害は少ないと推定される。ふつう、年間1ミリシーベルトが許容被ばく量とされるが、これは100ミリシーベルトの100分の1という、大まかな基準に過ぎない。一方、地球の地殻や人体そのものもカリウムやラドンを含み、自然放射線を出すために、年間2.4ミリシーベルト程度の被ばくが起きている。宇宙線による被ばくも、宇宙飛行士ではレベルが高くなる。いずれも、有害と実証されるレベルよりも桁違いに低いレベルである。

原子核の世界

原子核は、日常生活では人間が感じることのない、ミクロな強い力で結びついている。この力「核力」は、とても小さな距離でしか働かない。この距離は、原子の大きさ1cmの1億分の1のさらに10万分の1と小さい。原子核の大きさも、おおむねこの程度である。

このように小さな空間に核子を閉じ込めると、核子のエネルギーは大変大きくなる。原子核中で1個の核子のもつエネルギーは、空気の粒子の1億倍を超える。安定な原子核では、このエネルギーはしっかりと原子核の中に閉じ込められて、外側にはめったにもれない。とても丈夫な「殻」の中に核子が

閉じ込められていると思ってよい。

大きな原子核は、不安定になりやすい。陽子をたくさん含む大きな原子核は、陽子間の電氣的な反発力でバラバラになろうとする。強い力「核力」で結合し原子核としてのまとまりを維持するが、 Z が83を超える原子核はすべて、しだいに崩壊してより安定した小さな原子核に変化する。 Z が83より小さくても、陽子と中性子の個数によっては不安定なものがある。炭素14、コバルト60などの放射性同位元素である。

原子核の安定性や崩壊の仕方は、中性子が1個変わるだけで大きく変化する。原子核の内部の構造が、崩壊に微妙な影響を与える。 $Z=83$ 以上の元素は、すべて放射性元素である。ある確率で自然に崩壊し、より安定になろうとする。このときに、原子核内に閉じ込められていたエネルギーが原子核の外、つまり、日常生活空間に放射線として出でてくる。放射線のエネルギーが大きいのは、原子核内の高いエネルギーを放射線がもち出すためである。たとえば、ウランという重い元素がある。ウラン235は、235個の核子できている。陽子92個、中性子143個を含む。ウラン235は自然に崩壊しトリウムなどを経て、最後は安定な鉛になって崩壊が終わる。

研究の歴史

19～20世紀の科学研究によって、人類は「原子核の世界」の扉を開いた。今から70年ほど前の1940年代、人類初の原子炉がつくられ、10年余りという短い期間に原子力使用は実用化された。1つが原子力発電、もう1つが原子爆弾である。ともにウラン235の分裂のエネルギーを利用している。発電と爆発の違いは、コントロールしてゆっくりと分裂させるか、一瞬で爆発的にエネルギーを解放するか、である。

放射線を発見したのは、ベクレル*1である。1896年のことだった。レントゲン*2のX線の発見に刺激されて、同様の現象がほかにか調べらるうちに、ウランの化合物の出す放射線の存在に気がついたのである。すぐに、キュリー夫妻*3がラジウムの放射線を発見し、物質が自然に出す強いエネルギーの存在が明らかになった。こうして放射性物質という言葉もつくられた(図4)。

同時に、苦い歴史も多い。キュリー夫人は、

実験中に、そして戦争中のX線による看護活動によって、大量の放射線を被ばくしたと推測される。1910年代には、放射線の脅威は理解されていなかった。1920年代になってキュリー夫人の研究所の職員にもガンや白血病が多発し、ようやく、放射線が癌や白血病を引き起こすことが疑われた。

画期的な元素の転換も行われた。最初はα線を他の原子核にぶつけて、元素が別の元素に転換された。しかし、α線は陽子2個のプラス電荷をもち、原子核のプラス電荷に近づくと反発されるため、反応は限られる。やがて、フェルミは、電気力の効かない中性子をぶつけることで、元素変換を一気に加速した。そのような実験の中で、ウランに中性子を当てるとう核分裂が起こることがわかった。ウランは、ヨウ素やセシウムなどを含む2個の原子核に分裂するのである(図5)。そのエネルギーは、α崩壊よりも1桁大きく、夢のエネルギー源となりうることが期待された。これが、原子力の実用化への幕開けとなった。ウラン1個の解放

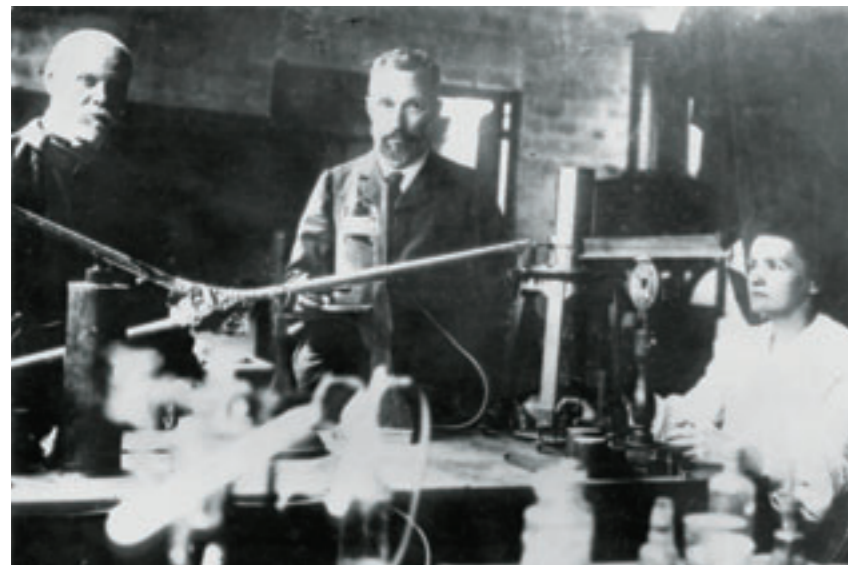


図4 ベクレルとキュリー夫妻
左からベクレル、P.キュリー、M.キュリー。1903年に3人でノーベル物理学賞を受賞した。

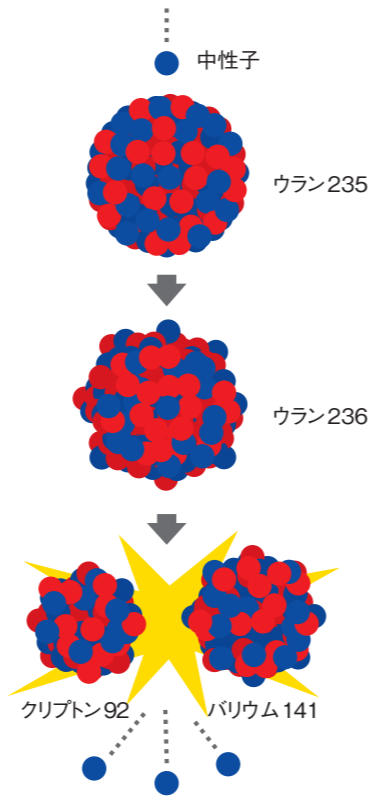


図5 ウラン235の核分裂

するエネルギーは、空気中の粒子1個のエネルギーの、実に100億倍である。

原子核の中の核力による結合の強さは、普通の燃料の化学結合よりもエネルギーが桁違いに大きい。原子核の結合がこわれることによって、膨大なエネルギーが生み出される。そのために、一歩間違えると、原子燃料は人間の手に余る危険な物質になってしまうのである。原子炉では、ウラン235をセラミックと金属で覆い、棒状にした核燃料を密に装填する。燃料棒の間には水などを満たして、発生する中性子の数をコントロールする。核反応の割合を制御して一定のエネルギーを取り出し、水蒸気を加熱する。この水蒸気が、発電機のタービンをまわして発電する。原子炉全体は鉄の格納容器などで囲われ、核物質が簡単には飛び散らないようにしてある(図6)。

原子炉では、核物質は常に崩壊を続けるために、稼働中であっても冷却が必要である。これができなくなると、短時間で炉内は1000度Cを越え、格納容器が溶けてメルトダウンする。何かの事故で冷却のための電源が使えなくなる事態に備えて、非常用電源を用意

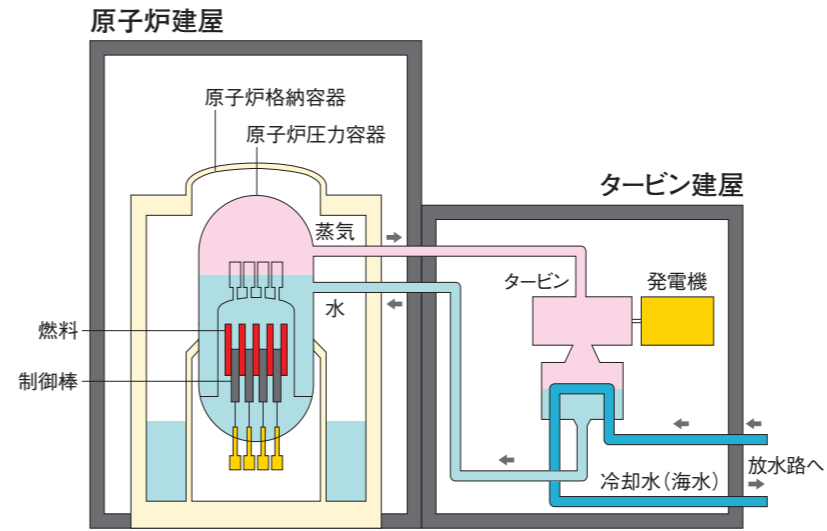


図6 原子炉の仕組み

するが、信頼度は高いとはいえない。一旦大災害で長期に通常電源が使えなくなると、問題は深刻である。福島原発の事態は、十分に予想された。

原子力の利用と将来

今日、放射線はさまざまな分野で利用されている。医療、農業、工業など、放射線抜きでは、今の人間の暮らしは考えにくい。害虫の駆除、遺伝子の改良、タイヤなどの化学製品の強化などに役立っている。がん治療の場合、中性子を使うと特定の元素だけを狙って中性子を当てることができる。がんが吸収しやすい元素を前もって体内に注入し、中性子をあてることで高い精度でがん細胞だけを破壊できる。

これらと質が違うのが、核兵器と原子力発電である。とくに大電力の発電を行う原発では、大量の核燃料を使うために大掛かりな装置に大量のウランを集中する。そのため、一旦事故がおこるとたいへん処理が難しい。個々の放射性物質の性質は克明に理解されている。しかし、一旦放射性物質が爆発など

で拡散すると、それを無害なかたちに処理することは、まことに厄介な作業となり、多くの労力と犠牲を要する。2011年、チェルノブイリ、スリーマイル島を上まわる原発事故が、福島でおきてしまった。世界に前例のない大規模な事故である。人類の直面した、原子力発電に関わる最大の困難である。

炉の爆発等で外に放出される放射性セシウムの半減期は30年である。60年を経てもなお大量に、当初の4分の1のセシウムがどこかで放射線を出し続ける。これが、除染の対象であるが、半世紀をこえる安定な保管が必要である。さらに、原子炉の核燃料のサイクルは閉じていない。最後の使用済み燃料の保管法は解決されていない。高速増殖炉による核燃料の再利用というスキームも、実用化のめどは立っていない。長期的に、原発も使い続けることの是非が問題とされている。

原子力の発見は、人類の科学研究の過程で必然的なものであった。1600年代始めのガリレオに始まる実証的な科学研究の発展は、物質の究極の姿を求めてきた。原子核は、当然解明すべき課題であった。今の素粒子と

1604	落体の法則(ガリレオ)
1687	万有引力(ニュートン)
1861	電磁場の方程式(マクスウェル)
1869	陰極線の直進性(ヒットルフ)
1895	X線の発見(レントゲン)
1896	ウランの放射線発見(ベクレル)
1898	ラジウムの放射線発見(キュリー夫妻)
1903	放射性元素の崩壊説(ラザフォード、ソディール)
1905	特殊相対性理論(アインシュタイン)
1911	原子核の存在(ラザフォード)
1919	α粒子による原子核破壊(ラザフォード)
1933	β崩壊の理論(フェルミ)
1934	中間子論(湯川秀樹)
1938	ウランの核分裂の発見(ハーン、シュトラスマン)
1942	ウランの連鎖的な核分裂反応による原子炉の開発(フェルミ)
1945	広島・長崎への原爆投下
1979	スリーマイル島事故
1986	チェルノブイリ事故
2011	東日本大震災 福島原発事故

表1 原子力の歴史

宇宙の物理学は、それを超えて、さらに高いエネルギーの現象を最先端とする。原子核の物理学は、20世紀に始まり、20世紀半ばに頂点を迎えて、21世紀の物理学の基盤となった。同時に、その知識は原子力工学として、発電に実用化されたのである。

核兵器の廃絶については、世界的にも広い合意が形成されつつあるように見える。原子力発電については、代替エネルギーの見直しを含めて、なお、先行きは不透明である。はっきりしているのは、当面、現存する原発を安全に運用しなくてはならないこと、そのために、優れた研究者と技術者を育成しなくてはならないことである。また、基礎科学の基盤として、原子力の知識を絶やすことはできない。原子力に関わる暴力と事故に対処するためにも、それは必要不可欠である。

*1 H.ベクレル(1852-1908) フランスの物理学者。ノーベル物理学賞(1903年)を受賞。

*2 W.レントゲン(1845-1923) ドイツの物理学者。ノーベル物理学賞(1901年)を受賞。

*3 キュリー夫妻 夫のP.キュリー(1859-1906)はフランスの物理学者。妻のM.キュリー(1867-1934)はポーランドの物理学者。

生命から学ぶ 太陽光エネルギー利用

野口 巧 物質理学専攻教授

エネルギー危機を実感する

3月11日の大災害とそれに続く原発事故によって、日本人は人類が直面するエネルギー危機を身をもって実感した。もはや原発に頼れない我々は、今こそ本気で、地球が享受できる唯一の外來エネルギーである太陽光エネルギーを活用するためのシステムをつくり上げる必要に迫られている。太陽光エネルギーは無尽蔵のエネルギーであるものの、それを固定化して、保存可能なかたちに変換するのは容易ではない。これほど普遍的なエネルギーでありながら、未だにその利用法が確立せず、エネルギー供給における割合が少ない(3%以下)ことがこの困難さを如実に物語っている。

ところが地球上の生命はその活動の究極的なエネルギー源を太陽光から得ており、植物や藻類は光合成によって高い量子効率で光エネルギーを化学エネルギーに変換することができる。我々は、この自然がつくった光エネルギー変換系を完全に理解し、そこから学ぶことにより、人類独自の太陽光利用システムをつくり出すことができるはずである。

地球を変えた生命のエネルギー革命

それでは生命はいかにして太陽光エネルギーの利用を始め、現在のような光合成系をつくり上げたのか。残念ながら、その進化の詳細な道筋はわからない。ただ明らかなことは、光合成の進化には2つの大きな段階があったことである。

約46億年前の地球誕生から数億年のうちには、すでに生命が誕生していたと考えられ

ている。生命の最大の関心事はそのエネルギー源をどこに求めるか、ということである。当然、地球上に存在していた化学エネルギーを消費しつくしてしまえば、あとは地球外からもたらされる太陽光エネルギーを利用するしかない。35億年ほど前には、太陽光エネルギー利用を本格的に始めた最初の生物、光合成細菌が誕生した。この段階ですでにクロロフィル類による光吸収と励起移動、電荷分離と電子移動、そしてCO₂の還元による糖の合成などの光合成の基本的なシステムが出来上がったと考えられている。しかし、この光エネルギー変換系は極めて不完全なものであった。それは、CO₂還元のための電子供与体として硫化水素や有機酸などを利用していることであり、それらの枯渇がこの生命種の終焉を意味する。

約25億年前に大きな展開が起こる。それは地球上に普遍的に存在する水を電子供与体として利用できるシアノバクテリアの誕生である(図1)。これにより、光エネルギーを用いて水から電子を引き抜き、その電子によってCO₂を糖に還元固定するという、現在植物が行っている光合成系の基本が確立したことになる。思わぬ副産物は水の酸化による酸素発生であった。のちに葉緑体へと進化するこのシアノバクテリアの酸素発生が、地球大気に酸素をもたらした(現在21%)、その後の呼吸生命の進化を促した。またオゾン層の形成によって有害な紫外光が遮断され、生命の爆発的な進化が起こった。このように、水を電子源とする酸素発生型光合成の確立は、地球と生命の共進化の決定的な転換点であった。

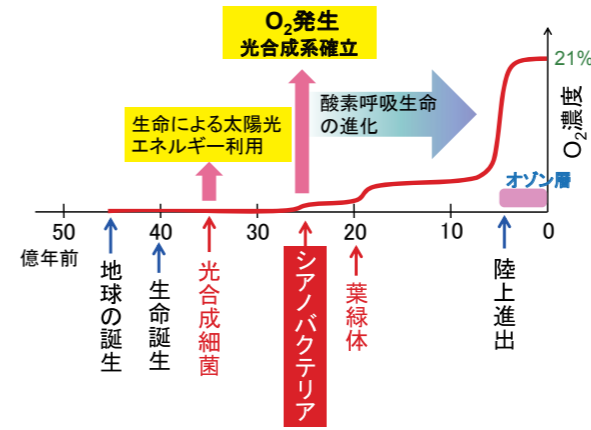


図1 地球大気中の酸素濃度の遷移と生命の進化
生命誕生(約46億年前)から数億年のうちには光合成細菌が光合成による光エネルギー変換を始めた。さらに、約25億年前に誕生したシアノバクテリアが、水からの電子をCO₂還元を用いる現在の光合成システムを確立した。水分解の副産物である酸素の放出により、地球大気が酸化型大気へと変化し、呼吸生命の進化が促された。

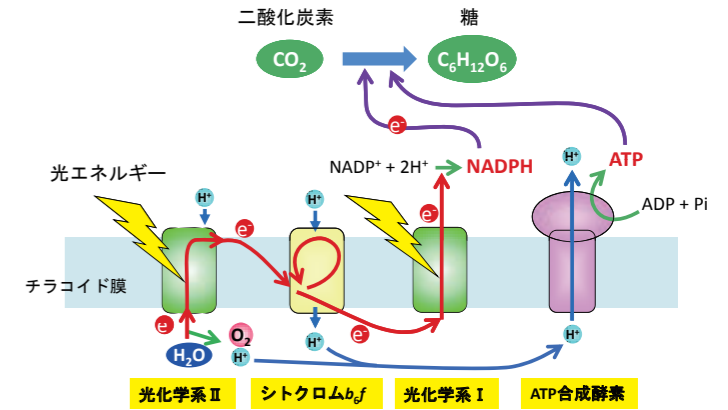


図2 光合成のエネルギー変換システム
光エネルギー変換は、チラコイド膜に埋め込まれた4つのタンパク質で行われる。光化学系IIにおける水分解によって得られた電子は、シトクロムb₆fを経由して光化学系Iに入り、NADPHに蓄積される。膜を貫通する電子移動によって生じたプロトン濃度勾配を用いてATP合成酵素においてATPが合成される。

究極の光エネルギー変換システム

光合成のエネルギー変換のしくみを簡単に説明しよう。光エネルギー変換の主役は光化学系Iおよび光化学系IIとよばれるタンパク質複合体である(図2)。これらのタンパク質に結合するクロロフィル分子が光を吸収し、そのエネルギーを用いて電子移動が起こる。電子は、まず光化学系IIにおいて水から引き抜かれ、光化学系Iを通過する。この電子移動過程において膜の内外にプロトン濃度勾

配が形成され、それによって化学エネルギーATPが合成される。最後にATPと水からの電子を用いてCO₂を還元し、糖を合成する。光化学系Iや光化学系IIなどの光合成蛋白質中では、どのように電子が動いていくのだろうか。光化学系IIの場合について、電子移動と水分解のしくみをもう少し詳しく見ていこう。光吸収によって生じたクロロフィルの励起状態から電子が飛び出し、電子はフェオフィチンやキノンなどの色素上を移動

していく(図3a)。一方、電子移動により生じたクロロフィルのラジカルカチオンは、水分解の触媒部位であるMn₄CaO₅クラスターから電子を引き抜く。ここで2分子の水が4電子酸化され、酸素分子とプロトンに分解する(図3b)。複数の成分上のすみやかな電子移動により逆反応が抑えられ、0.9以上の極めて高い量子効率で反応が進んでいく。これらの反応は水の電気分解と対比するとわかりやすい(図3c)。水の電気分解では、



Takumi Noguchi
1963年生まれ、1991年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。理化学研究所研究員、筑波大学助教授、同准教授を経て2010年より現職。専門は生体系の分子分光。とくに、光合成機構の生物物理学的研究。

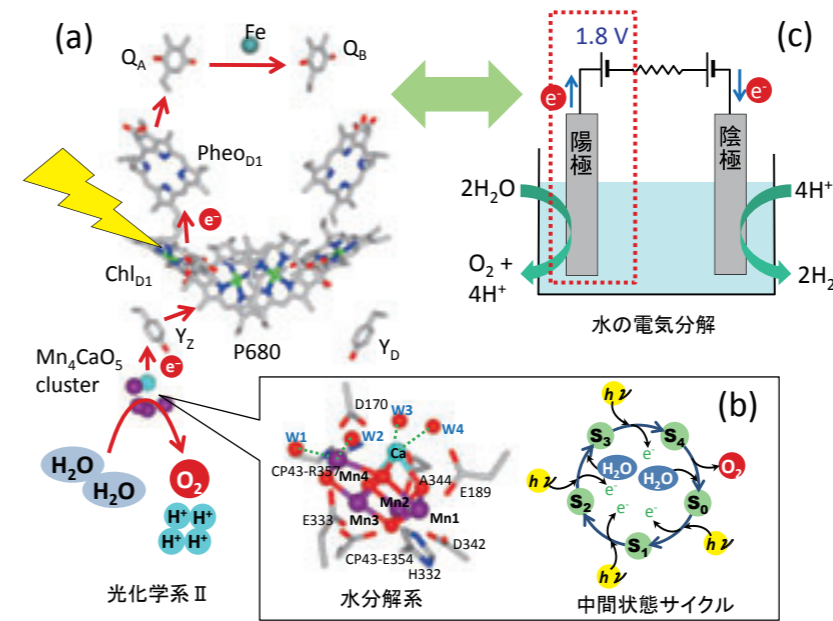


図3 光化学系IIにおける光誘起電子移動と水分解反応
(a) 光化学系IIの反応中心における色素配置と電子移動経路。(b) 水分解系(Mn₄CaO₅クラスター)の構造(左)と水分解反応の中間状態サイクル。(c) 水の電気分解との比較。光化学系IIの水分解反応は、水の電気分解の陽極の反応(1.8Vの電池を含む)に対応する。

陽極において水の酸化による酸素発生、陰極ではプロトンの還元による水素発生が起こる。一方、光合成では、光吸収が電位差を生み、電気分解反応が進む。クロロフィルが吸収する赤い光は約 1.8 V の電池に相当し、光化学系IIと光化学系Iの電子伝達鎖はこの電池が直列につながれていることを意味する。光化学系IIにおける水分解反応は、水の電気分解の陽極の反応と全く同じである ($2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$)。一方、陰極での反応は大きく異なり、水素発生の代わりに、 CO_2 の還元が起こる。

生命から学び生命を超える

25億年前に生命が創り上げた光合成を人間が人工的に再現することはできるのだろうか。今のところ、天然の光合成の再現は実現していない。光合成反応は多くのステップよりなるが、それぞれのステップは極めて精密に制御されている。各ステップの再現

(たとえば光による電子移動)はある程度可能であるが、それを組み合わせて目的とする物質変換を成し遂げるのは極めて困難であろう。

実は、人工光合成の研究は天然の光合成反応を再現することを目的としていない。なぜなら、光合成の化学エネルギーとしての最終生成物はセルロースやでんぷんなどの多糖であり、それはそのまま燃料としては使用できないからである。現在、これらの光合成生産物はバイオマスとして利用されているが、そのためには糖を分解して燃料アルコールを合成するというプロセスが必要であり、そのためのエネルギーを必要とする。

それでは人類が目指すべき人工光合成とは何か。それは「光合成を超える光合成」であり、光エネルギーと水からの電子を用いて、直接、水素やメタンなどの燃料をつくるシステムである(図4)。こうした人工光合成においても電子源はやはり地球上に豊富

存在する水であり、水からの電子獲得反応は天然の光合成と同じものである。よって、光化学系IIにおける Mn_4CaO_5 クラスターの構造や反応機構が解明できれば、それはそのまま人工光合成系の開発に応用することができる。一方、還元側の反応は目的に応じてさまざまに変化させることができる。 CO_2 削減の観点からは、 CO_2 を還元して CO や CH_4 にするというシステムが有効である。しかし、最も魅力的なシステムは、クリーンエネルギーである水素の生成であろう。すなわち、水の電気分解を光エネルギーによって行うことであり、無尽蔵な資源である水と太陽光だけで燃料を得ることができる究極の人工光合成である。それが原理的に可能であることは TiO_2 の光水分解の例などにより40年以上前から知られていたが、最近、さまざまな光触媒が開発され、その実用化も現実味を帯びてきた。

約25億年に起こったシアノバクテリアによる光合成系の確立を「生命による第一のエネルギー革命」とするならば、人類による人工光合成系の確立は、「生命による第二のエネルギー革命」とよぶべきものであろう。それにより、もはや化石燃料にも原発にも頼らず、地球環境を一切破壊せずに、太陽光と水からエネルギーをつくりつづけることができる。それを達成するにはまだ多くの課題が乗り越えなければならないが、近い将来、人類が永久にエネルギー問題から解放されることも夢ではない。

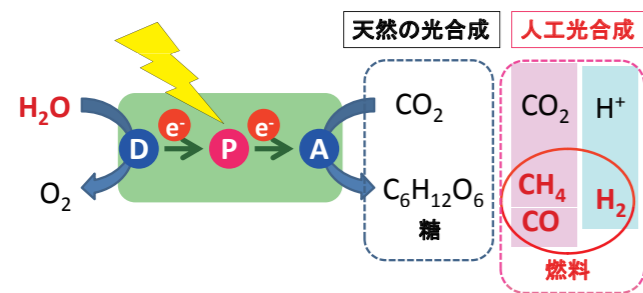


図4 天然の光合成と人工光合成の比較
天然の光合成では、光エネルギーと水からの電子を用いて糖を合成するが、人工光合成では、それらから水素やメタン、一酸化炭素などの燃料を直接合成する。

非日常の世界を垣間見る

生命理学専攻准教授
高木 新 (Shin Takagi)

私は2011年6月25日~26日、福島での一時帰宅者スクリーニングに参加した。放射線・原子力は門外漢である一市民として現場を垣間見た印象を記させていただく。

当日は名古屋大学工学部の人たちのレンタカーに同乗させてもらい雨の中を南相馬市へ向かった。福島市内では毎時1マイクロシーベルト前後を示していた線量計の値が、川俣町を過ぎ飯館村への峠を越えると毎時3~4マイクロシーベルトに跳ね上がり、スピーカーから警戒音が鳴り続けた。トンネルに入ると音はピタリと止み、測定値もバックグラウンド程度の毎時0.1マイクロシーベルトまで下がるのが印象に残った。

20km圏のすぐ外側に位置する馬事公苑が今回のスクリーニング会場だった。屋内馬場に臨時に床板を貼った会場で、東電をはじめとする電力団体関係者に官公庁・大学関係者が加わり、作業にあたった。帰宅者は世帯ごとにトランシーバーを渡され、タイベックス防護服・靴カバー・ラテックス手袋・マスク・キャップに身を固めて現地に向かわれた。戻って来られた方と持ち帰り品の汚染検査が私たちの仕事だったが、私の担当した限りでは問題になる汚染はなかった。

しかし、帰宅者の現地滞在時間は2時間、持ち帰り品もポリ袋1つ分と制限されており、自分がその立場だったらどうするだろうかと思った。また、津波の被害にあった地域の帰宅者には泥で汚れた年金の書類だけ、あるいはまったく手ぶらで戻って来られた方もおられた。この方たちはこれまで亡くなった家族の慰霊さえできなかったのだと思うと心が痛んだ。

私が福島で見たのは日常の顔をした非日常の世界だったとでもいえようか。通過した飯館村は栗の白い花が咲く美しい高原の村だった。高度汚染のこの地域でも、当時、人の暮らしは続いており、小さな子どもが傘も差さずに歩いているのを見かけたし、ガソリンスタンドや自動車整備工場も営業していた。その一方で、スクリーニング会場横の地面ですらガイガーカウンターを向けると毎分2000カウント以上の値を示した。人間の日常的な感覚をはるかに超える膨大なエネルギーを扱うことの難しさ、特に、常にプレーキを踏み続けると制御不能に陥るという原発が原理的に抱える危険性について、改めて深く考えさせられる。

冷静な行動に感動する

物質理学専攻助教
安井幸夫 (Yukio Yasui)

2011年7月23日~26日と8月22日~24日の2回、福島第一原子力発電所トラブルにより避難した住民が20km圏内にある自宅へ一時帰宅する際の放射性物質による汚染検査に行ってきた。福島へ応援に行ったのは、私の研究手段の1つが茨城県東海村にある研究用原子炉での中性子散乱実験であり、発電用と中性子発生用の違いこそあれ原子力にお世話になっているので、その恩返しをしたかったからである。

突然避難させられ、いつ自宅に戻れるかわからない状況にも関わらず、大半の住民は粛々と秩序立って一時帰宅を行い、その礼儀正しさに感心した。5時間以上、東電社員に文句をいいつづけている人もいたが仕方がないと思う。防護服に書いてある私の所属を見て、「名古屋から来てくれたのですか、ご苦労さまです」と声をかけてくださる方もいて、つらい状況でも他人への気遣いを忘れないふるまいに感動した。多くの人が袋いっぱい荷物を入れて持ち帰る中、津波にやられていたのか泥まみれで濡れたアルバム1冊だけを持ち帰るご老人の汚染検査は心が痛かった。一方、帰宅後の自分の被ばく量を見て、「東京電力のせいで被ばくした、本来なら被ばく量はゼロでなくてはならない」と抗議する人がいた。その被ばく量は自然放射線レベルだったので、「人は皆、地面や空気や体内にある天然放射性物質からの放射線や宇宙線によって年間約2000マイクロシーベルトの被ばくをするので、被ばく量は原理的にゼロにならない」と説明したが、自然放射線のことを理解してもらえず困ることもあった。体内にある天然放射性物質により通常、人体は1キロあたり約100ベクレル、70kgの体重の人は約7000ベクレルの放射能をもっていることもあまり知られていない。これらの経験はいろいろ考えさせられ人生勉強にもなった。



防護服を着て一時帰宅の準備をする住民(撮影:安井幸夫)

同窓生から

実験と英語の発想を融合させた化学教育

愛知県立松蔭高等学校 教諭
福田俊彦 (Toshihiko Fukuta)

福田俊彦氏は、1981年に本学化学科を卒業、以来30年にわたり高等学校の化学教師として教壇に立ってきた。2011年1月には文部科学大臣から優秀教員として表彰を受けているほか、2008年に中日新聞社より中日教育賞、2010年に日本化学会より化学教育有功賞、愛知県教育委員会より教員表彰を受けるなど、化学教育の分野で大きな実績を上げてこられた。同氏の授業は、実験の重視と英語の発想を取り入れた指導法の2つが大きな特徴となっている。

同氏の授業の特徴は、高等学校で学習するほとんどすべての単元で、実験を取り入れていることである。しかも事前、事後の解説にも十分な時間をかけているという。

代表的なものに「アルミニウム箔を使ってモルの概念を理解する実験」がある。

実験の目的は、アルミニウムと塩酸との反応により化学反応の量的関係とモルについての理解を深めることである。福田氏は市販のアルミニウム箔の厚さが12マイクロメートルであることに注目、これを2.5cm×3.4cmに切り取ると、ほぼ0.001molに当たる。通常高等学校にある機材でここまで精密な測定は不可能だが、市販のアルミニウム箔の厚さに注目することで、化学反応式の係数比を目に見えるかたちにして表現できることを実感できるようにした。

そもそも同氏が化学の教員を目指したきっかけも、高校生のときに受けた化学の授業で実験の面白さを知ったことだったという。実験を重視する校風であった名古屋大学の化学科で学んだことも現在につながった。

実験重視の授業とともに福田氏の指導法の中心をなすが、化学について理解を深める方策として英語の発想を取り入れていることである。化学を学ぶ生徒にとってとっつきにくく思われるのは、有機化合物名がほとんど片仮名で書かれていることである。片仮名を片仮名のまま理解しようとするとどうしても暗記にたよることになる。

福田氏は化合物の名称を英語の成り立ちから解きほぐすことによって、理解を深めることができるのではと考えた。ここでも、大学在学中に語学センター（当時）が全学向けに

開講していた授業を受講したこと、化学科の有機化学の教科書が英語で書かれていて悪戦苦闘したことが役に立ったという。

具体例をあげて説明する。教科書には次のように書かれている。「第一級アルコール(メタノール、エタノールなど)を酸化すると得られる化合物をアルデヒド(ホルムアルデヒド、アセトアルデヒドなど)という」。しかし、なぜそのような化合物をアルデヒド (aldehyde) とよぶのかは書かれていない。これでは暗記するしかない。

アルデヒド (aldehyde) の水素原子の数に注目すると、もとのアルコールより2個少ないことに気づく。つまりアルデヒド (aldehyde) という名前は、アルコール (alcohol) から水素原子 (hydrogen) を取り除いた (de) 化合物であることを意味している。

当初、こうした指導は有機化学のみを対象としていたが、その後、改善を加え今では化学全般に及んでいる。

現在、高等学校の生徒の中には、「化学は暗記科目」と思い込んでいる生徒もいるという。しかし、実験を重視することで化学反応を具体的にイメージさせ、英語の語源をひもとくことで名称を成り立ちから理解できると福田氏はいう。

「実験こそが化学の王道です」。その言葉には確かな重さがあった。(K)



(上) 実験を重視した授業
右が福田氏
(右) 自作の実験プリント

キャンパス通信

「げんさいカフェ」ただいま営業中

減災連携研究センター客員教授
隈本邦彦 (Kunihiko Kumamoto)

サイエンス・カフェは1990年代後半に英国で生まれた科学コミュニケーションイベント。ゲストである科学者と参加者の市民とが、コーヒー等を片手に対話をする。通常の講演会などと違って、質疑応答の時間をたっぷりとるのが特徴で、少人数で開かれることが多い。

減災連携研究センターでは、2011年6月から月1回、センターの研究者をゲストに「げんさいカフェ」を開いている。研究者が30分ほど自分の研究について語った後、会場からの質問に1時間ほどかけて答える。質問の仕切りと、難しい専門用語などが出た時にツッコむ役をファシリテーターである私が担う。

南海トラフ巨大地震に備え、この地域の防災力を上げることがめざす当センターでは、研究成果を社会に向けて効果的に情報発信することが責務と考えている。「げんさいカフェ」もその重要な方法の1つだ。

研究者にとっても、カフェで皆さんの質問攻めにあうことはいい経験になる。どう説明すれば一般の人たちによくわかってもらえるのか、一般の人たちは研究者にどのような期待をしているのかが「肌でわかる」からだ。

ちなみに「げんさいカフェ」の「さい」は減災とサイエンスの両方にかけているのだが、英語表記のGen Science CaféのGenはGeneralの省略形として「一般の」とか「普遍的な」といった意味があるらしい。そのことも気に入っている。



「げんさいカフェ」の様子。研究者を囲むように参加者が座り、じっくり対話する(左側が筆者)

キャンパス通信

一新されたキャンパス風景

生命理学助教
杉山 伸 (Shin Sugiyama)

セミナーをしていただいた客人と昼食に出かける際に、理学部の新しい建物を紹介しながら散策したら、思いのほか感心していた。気付いてみると、戦後のだった理学部の風景も、いつのまにか現代風に変身している。建物が順番に改築、もしくは新築され、徐々に進んだ変化だった。

しかし、最後に理学部の中を抜けるメインの通りに敷石が敷設され、それが風景のすべてのコンポーネントを視覚的につなぎ合わせたことにより、一気に統一性もたらされたように思う。四谷通から坂を上ってくるのは壮観ともいえる。中途段階ではわからなかった狙いが、完成してやっと理解できた次第である。

担当者に聞いたところ、この道は名古屋大学キャンパスマスタープランにのっとり、大学を東西につなげる「新たな交流軸」としての機能が想定されている。また、将来的には学内駐車場を大学敷地の周辺部に移し、ここを歩行者専用にする計画もある。しかし、そういう入車制限を待たずして、すでに効果が現れている。遊歩道的な空間は広場のようで、他の建物に出かける際にもちよっと気分がいい。人と会話しながら歩いていても話が弾む。外に出るとふっと散歩したくなる。一言でいえば、理学部もキャンパスらしくなったということだろうか。



理学部C館からの風景