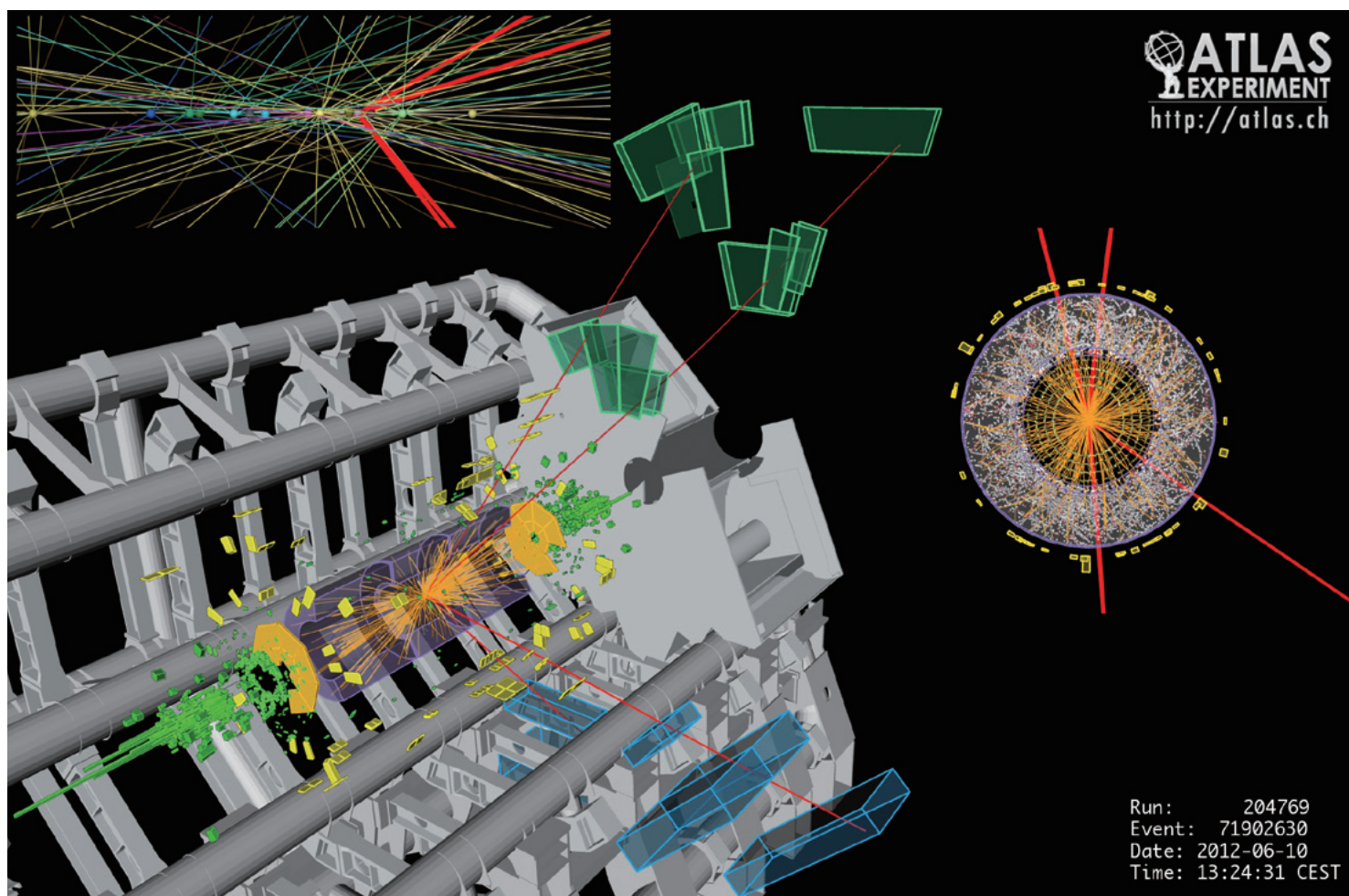


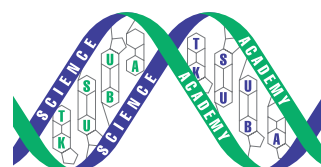
Science Academy of Tsukuba

SAT

No. **22**
October. 2012
<http://www.science-academy.jp/>



- ▶ 巻頭言：ヒッグス粒子を探す
- ▶ 特集：つくばの研究Ⅱ—科学・技術のもたらすもの
- ▶ 科学の散歩道：
東京スカイツリー® 建設について ～世界一への挑戦～
- ▶ 研究室レポート：
再生医療のための新しい生体材料の研究開発



つくばサイエンス・アカデミー
SCIENCE ACADEMY of TSUKUBA

ヒッグス粒子を探す

高エネルギー加速器研究機構(KEK)素粒子原子核研究所教授 徳宿克夫

2012年7月4日にスイス・ジュネーブにある研究機関 CERN で「ヒッグス粒子らしき粒子が発見された」という発表があり、日本の多くの新聞も翌日の朝刊の一面で大きく取り上げた。素粒子物理学の標準理論で未発見の最後の粒子であり、素粒子の質量の起源と関係した粒子であるということだが、きちんと説明しようとするの大変難しい。一言では、この宇宙の成り立ちがゲージ理論という美しい理論で説明できるということだ。

CERN に建設した巨大な陽子・陽子衝突型加速器 LHC での物理課題はたくさんあるが、その中でも特に「標準理論のヒッグス粒子があるなら必ず見つけられるように」と設計された加速器で、世界中の協力のもとに建設された。日本からも高エネルギー加速器研究機構と多くの大学が、加速器・測定器の設計・建設から貢献している。LHC 建設が決

まったのが 1994 年であるから、ほぼ 20 年かけて主目的の一つが達成されつつある。

ヒッグス粒子が存在するなら、実は LHC ではたくさん作られる。24 時間運転で 1 年の半分ぐらいの期間継続して陽子を衝突させているが、数十秒に 1 つぐらいは作られる。それでも発見が容易でないのは、ヒッグス粒子が 1 つできる間に、100 億ぐらい他の反応が起こり、その中にはヒッグス粒子と見間違えるような反応がたくさんあるためである。例えていえば、世界中の人の顔写真を集めてきてその中から特定の人の写真を見つけるようなもので、他人の空似に騙されないで見つけるのは難しい。一枚の写真でなく、横顔やあるいは動画などがあると俄然わかりやすくなる。LHC での実験も同じで、陽子・陽子衝突点の周りを高精度の測定器で何重にも囲み、発生粒子をいろいろな情報を使って選

別していく。発見には、よい測定器とうまく事象を選別する解析技術が鍵になる。LHCの測定器はすでにあるものではなく、研究者と企業が長年協力しながら開発してきた特注品ばかりである。個数も限られているので儲けにはならない仕事であろうが、日本にもハイテクなうででそういうものを面白いと思って協力してくれる企業が多くある。今回の発見は、多くのそのような人々の上に成り立っている。ヒッグス粒子自身が将来何の役に立つかは今の時点では何ともいえないが、それを見つけ出すために開発した技術・アイデアは多く、それは近未来に実生活に役立ってくるはずだ。

ヒッグスと思われる粒子が本当に標準理論のヒッグス粒子なのかを検証するにはまだまだ長い時間がかかる。研究者の多くは精査すれば標準理論からのずれが見えてくると思っ

ている。そのずれは、さらに初期の宇宙の成り立ちを探る鍵を与えてくれ、宇宙にたくさんある暗黒物質などの正体にも踏み込めるのではないかと考えている。私たちはLHCの実験をこれからも10年以上続け、これらの謎に迫っていくことになる。

徳宿 克夫（とくしゅく かつお）

ヒッグス粒子探索の先頭に立つトラス実験（スイス、ジュネーブにある欧州原子核研究機構 CERN の世界共同実験の一つ）グループの日本共同代表者。高エネルギー加速器研究機構（KEK）素粒子原子核研究所教授。茨城県出身。



特集：つくばの研究Ⅱ—科学・技術のもたらすもの

科学・技術の進歩は、人類社会の進歩に多大の貢献をしてきた。我々の生活は便利で豊かになり、多くの病気も克服されてきた。しかし一方で、科学・技術の進歩には、原子力発電所事故に見られるような大きなマイナス面が付随することも見逃してはならない。

これからの科学・技術のあり方として、そういったマイナス面・リスク面も十分検討し、その影響を最小に抑えるという姿勢が必要であろう。さらには、人間がミスを犯す存在であることにも目を向けなければならない。

本特集では、今後期待される科学・技術について、いくつかの具体例を取り上げ、多面的な検討の必要性を提起したい。つくばには、多分野の研究者が集積しており、異分野の交流・連携で科学・技術のマイナス面を抑える指針が与えられることも期待される。

なお、本特集はSAT会誌16号特集「つくばの研究を追う—I」（2009）の続編である。

iPS細胞への期待

(独) 理化学研究所バイオリソースセンター細胞材料開発室 中村 幸夫

細胞培養の歴史

細胞培養が行われたのは20世紀に入ってからのことであり、1907年に報告されたカエルの神経細胞の培養に成功した事例が記録としては最も古いようである(図1)。1912年には継代培養が報告され、細胞培養の基本が確立されたと言える。細胞培養の歴史における次のマイルストーンは、不死化細胞株即ち試験管内で半永久的に増殖が可能な細胞の樹立であり、1940年にL細胞の樹立が報告されている。これにより、細胞特性が比較的安定した細胞を多くの研究者が共有して使用できる事への道が開けた。次のマイルストーンは、ヒトがん細胞からの不死化細胞株の樹立であり、1952年に子宮頸癌由来のHeLa細胞の樹立が世界で最初に報告された。がん細胞の継代培養を繰り返すことで不死化細胞株の樹立が可能であるという事実は、当然のことながら、多種多様な癌に関して同様な方法で不死化細胞を樹立しようという流れとなり、今日に到っている(理研細胞バンクで即時提供可能な状態に整備できているヒトがん細胞株は500種類近い)。そして、こうしたがん細胞株が、がん研究分野に限らず、広く多くの生命科学研究分野で非常に大きな貢献をした。

細胞培養の歴史における次のマイルストーンは、マウス胚性幹細胞(embryonic stem cells, ES細胞)の樹立であろう。受精胚の胚盤胞期における内部細胞塊を培養することで、不死化細胞株の樹立が可能であることが1981年に報告された。樹立されたES細胞の最大の特徴は、全身のありとあらゆる組織細胞に分化する能力を

保有していることであった。また、正常な胚細胞と混ぜてやると、そのまま発生過程を経て、個体が生まれ、産まれた個体の中では正常な胚細胞由来細胞とES細胞由来細胞とのキメラ状態になることも分かった。そして、質の良いES細胞を樹立すると、キメラ状態の個体から、ES細胞由来の生殖細胞も発生してくることが分かり、遺伝学的な解析に応用が可能であることも重要な事実であった。そして、ES細胞の中では、遺伝子の相同組換えが高頻度で生じることも分かり、遺伝子欠損マウスの作出による遺伝子機能の解析研究が、20世紀終盤の生命科学分野を席巻することとなった。

研究者の多くは当然のことながらヒトES細胞の樹立を目指すこととなったが、一筋縄ではいかなかった。そもそも、一般論として、ヒトの正常細胞は継代培養を繰り返すことのみで不死化することはない。がん細胞は疾

図1

細胞培養の歴史

- 1907年 カエルの神経細胞の培養に成功
- 1912年 鶏の細胞で継代培養に成功
- 1940年 化学物質による不死化細胞樹立:L細胞
- 1952年 ヒト癌細胞から不死化細胞樹立:HeLa細胞
- 1962年 カエルで核移植による細胞初期化に成功
(1962年 山中伸弥教授生誕)
- 1981年 マウス胚性幹細胞(ES細胞)樹立
- 1997年 羊で核移植による細胞初期化に成功
- 1998年 ヒトES細胞樹立
- 2006年 マウスiPS細胞樹立
- 2007年 ヒトiPS細胞樹立

患細胞しかも増殖アドバンテージを有する細胞としての例外なのである。従って、研究者の中にはマウスと同様な方法でヒト ES 細胞を樹立することは不可能なのではないか、と考えていた研究者もいたはずである。ところが、1998 年、ヒト ES 細胞の樹立成功が報告された。マウス ES 細胞と同様に、全身のありとあらゆる組織細胞に分化する能力を有するヒト ES 細胞の誕生は、様々な細胞の移植治療を模索していた多くの研究者の注目を浴びたことは言うまでもない。ヒト ES 細胞に由来する分化細胞を細胞移植に応用しようと考えた場合の最大の問題点は、組織適合性の問題である。骨髓バンク登録に膨大な登録者が必要であると同様に、組織適合性抗原を完全に一致させようと思えば、膨大な数のヒト ES 細胞株が必要となるのである。ある程度の不一致は許容するとしても、かなりの数のヒト ES 細胞株が必要となる。ところが、ヒト ES 細胞は生命の萌芽である受精胚を減して作出するものであり、安易に大量樹立を試みることは難しい。

iPS 細胞へ

ここで話を iPS 細胞 (induced Pluripotent Stem Cells) の誕生物語に転じる (図2)。後に細胞培養の歴史に大きな影響を与えることになる生物学的に非常に重要な発見が 1962 年に発表されている。それは、カエルの体細胞の核を徐核した未受精卵の中に移植すると、細胞分裂及び発生過程を経て、カエル個体が誕生するというものであった。発生及び分化過程はエピジェネティックな変化 (DNA のメチル化やヒストンの修飾) によって引き起こされ、この変化は不可逆的なものであると信じられていたので、カエルにおいては、核移植によって細胞の初期化 (reprogramming) が生じるという事実は大発見であった。しかし、哺乳動物のような高等動物ではカエルと同様な現象は観察できない即ち哺乳動物ではやはり細胞の初期化は生じないのではないかと考えていた研究者が

多かったものと思われる。私もその一人であった (恥ずかしながら、カエルで細胞の初期化が可能であったという事実すら知らなかった)。ところが、1997 年、羊の体細胞の核を徐核した未受精卵の中に移植すると、細胞分裂及び発生過程を経て、羊個体 (ドリー) が誕生するという事実が Nature 誌に発表された。青天の霹靂であった。その論文を読んだ際の驚きの感覚は今でもよく覚えている。

こうなると当然の流れとして、ヒトでも同様な実験を目指すことになる。ヒトの体細胞の核を徐核した未受精卵の中に移植し、細胞分裂及び発生過程を経て、ヒト個体を作出するような研究は勿論どの国でも禁止しているが、細胞分裂及び発生過程を経て胚盤胞期胚を作出し、その内部細胞塊から ES 細胞 (以下、「核移植 ES 細胞」という) を樹立しようという研究が始まった。何故なら、核移植 ES 細胞の樹立が可能となれば、細胞移植を受けようとする患者自身の体細胞から ES 細胞が樹立できることになり、組織適合性の問題を完全にクリアできるからである。そして、韓国の黄教授グループがその成功を報じたが、後にそれは捏造であったことが判明した。現時点でも、核移植による細胞の初期化はヒトでの成功例は報告されていないが、非ヒト霊長類では既に成功している。

ドリー羊誕生が明確に示した事実は、体細胞の初期化が哺乳動物の体細胞でも可能であるという事実である。従って、徐核した未受精卵への核移植という技法を用いずとも、何らかの別の方法で体細胞の初期化を誘導できるのではないかという作業仮説に基づいて研究を進めた研究者も多かった。一つには、徐核した未受精卵の中のどの因子が細胞の初期化を誘導し得るのか、その因子を探索する研究であり、もう一つは、初期化状態の細胞 (ES 細胞) の中で働いている因子が初期化にも関与しているという作業仮説に基づいて当該因子を探索する研究であったと思われる。そして、後者の研究を進めた京都大学山中伸弥教授のグループが、世界に先駆けてその探索を行い、体細胞に強制発現させることで体細

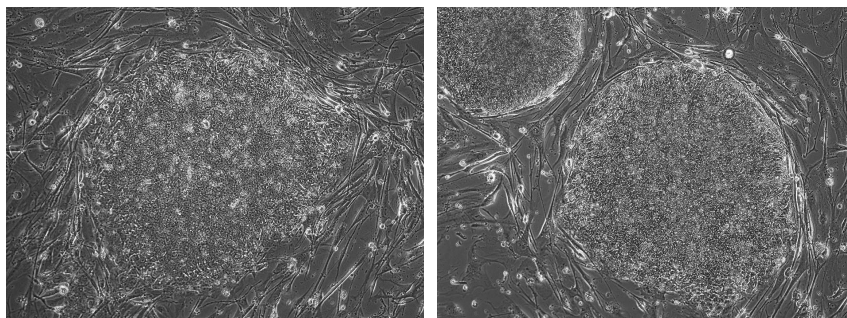


図2 ヒトiPS細胞 (induced Pluripotent Stem Cells) の写真
左の写真: 中心部にある丸い細胞集団がiPS細胞コロニー。周辺部にある細胞は栄養細胞と呼ばれる細胞で、iPS細胞の維持培養に必要。
右の写真: アルカリフォスファターゼを染色した写真。iPS細胞はアルカリフォスファターゼを発現しており、赤く染まっている。周辺の栄養細胞はアルカリフォスファターゼを発現しておらず、染まっていない。

胞の初期化を誘導し、体細胞をES細胞のような多分化能を有する細胞へと変化させる4種類の因子の同定に成功した。マウスでの成功例が2006年に、そして、ヒトでの成功例が2007年に、相次いで報告された。

用いた体細胞は皮膚に由来する線維芽細胞（紡錘形細胞）であり、培養方法が確立されている汎用細胞である。また、細胞内で特定の遺伝子を一個あるいは複数同時に強制発現させるという技術も、20世紀中に確立されていた分子生物学的方法である。即ち、iPS細胞樹立技術は、ものすごく特殊な技術を必要とせず、上記の技術さえあればどこの研究室でも追試が可能な技術であった。そして、事実、その後多数の研究室によってiPS細胞は比較的容易に樹立されることとなった。しかし、これは両刃の剣でもあった。即ち、しっかりと細胞特性の解析をしないままiPS細胞という名称で使われる「iPS細胞もどき細胞」を看過できないこととなった。そこで、現時点では、様々な手法を用いてiPS細胞の標準化を図ろうとする研究が進められており、客観性と定量性に優れた解析手法が開発される日はそう遠くないと思われる。

iPS細胞への期待

iPS細胞樹立技術が脚光を浴びた最大の理由は、言うまでもなく、ヒトの未受精卵を必要とする核移植ES細胞技術を代替できるものであるからである。即ち、細胞移植を受けようとする患者由来のiPS細胞を樹立し、そこから目的の移植細胞を分化誘導できれば、組織適合性の問題がない拒絶反応が皆無の細胞を入手することが可能だからである。

iPS細胞は何の問題点も有さない夢のような細胞材料なのかというと、答えは「ノー」である。ES/iPS細胞共通の問題点は、それが不死化細胞株であるという点である。ヒトES/iPS細胞を免疫不全マウスに移植するとテラトーマという良性腫瘍ではあるが腫瘍を形成する。テラトーマを形成してその中に外胚葉、中胚葉、内胚葉に由来する組織が観察できる事が、ヒトES/iPS細胞の多分化能の証として実施されている。従って、ヒトES/iPS細胞に由来する分化細胞を移植に用いようとした際には、元のヒトES/iPS細胞が完全に除去されている事を確認する必要がある。それは技術的にどの程度難しいことかを勘案するに、移植する細胞数が多ければ多いほど、元のヒトES/iPS細胞が混在（残存）している可能性は高くなると言える。従って、ヒトES/iPS細胞に由来する細胞移植がより早期に実現が可能と思われるのは、移植細胞数が比較的少なくて大丈夫な疾患かと思われる。

加齢黄斑変性症は高齢者に多い視力低下の原因であり、視野の中心部が見えなくなる病気である。原因は網膜の栄養細胞的な役割を担っている網膜色素上皮細胞

の機能不全であることが分かっており、正常な網膜色素上皮細胞を疾患部位に移植（置換）することで視力回復が望めることも分かっている。理研発生・再生科学総合研究センター（神戸市）の高橋政代博士（医師）は、加齢黄斑変性症の患者さんからiPS細胞を樹立し、そのiPS細胞から網膜色素上皮細胞の細胞シートを作成して、これを患者さんに移植する治療法を開発している。早ければ来年あるいは再来年にも臨床研究（実際に患者さんで移植治療を試みる）が始まる予定である。当該治療が早期に実現できそうな理由は、移植すべき細胞数が比較的少なくて大丈夫だからである。また、移植細胞はその名のとおり色素（黒色）を保有しており、元のiPS細胞とは明瞭に区別が可能である点も大きなメリットである。

iPS細胞が加齢黄斑変性症の治療から他の疾患分野へも応用が広がっていくことは大いに期待されることであるが、もうひとつiPS細胞に期待されている大きな側面がある。それは、疾患研究への応用である。例えば、脳神経の変性を来す疾患患者がいたとしても、その患者さんから脳細胞を採取して研究を実施することは不可能である。このような場合、まずは、患者さんの皮膚細胞を少し採取し、線維芽細胞を培養し、線維芽細胞からiPS細胞を樹立する（最近では血液細胞からiPS細胞を樹立することも可能となっている）。患者さんから樹立されたiPS細胞は一般に「疾患特異的iPS細胞」と呼称されている。樹立したiPS細胞から脳神経細胞を分化誘導すれば（技術的にも可能となっている）、当該細胞は疾患モデル細胞とも呼べる細胞であり、従来は不可能であった研究が可能となる。神経細胞に限らず、肝臓細胞や膵臓細胞など、患者さんから直接入手する事には大きな危険性を伴う細胞が、同様な方法で取得できる。また、iPS細胞から分化誘導した細胞を用いて、薬のスクリーニングや代謝研究なども可能であり、創薬研究分野でもiPS細胞に大きな期待が寄せられている。

【エピローグ】

この原稿を投稿したのは9月10日のことであった。ちょうど4週後の10月8日、今年のノーベル医学・生理学賞の受賞者が発表され、本原稿の主役である京都大学山中伸弥教授の受賞が報じられた。本日は10月23日、この原稿の校正とこのエピローグの追記を行っている。



中村 幸夫（なかむら ゆきお）

長野県上田市出身。新潟大学医学部卒業。信州大学、自治医大等で4年間は内科臨床に従事。その後、理化学研究所筑波研究所で基礎研究を開始。筑波大学、オーストラリア・メルボルン市 Walter and Eliza Hall Institute (WEHI) 留学などを経て、2003年より理研バイオリソースセンター細胞材料開発室室長。

より豊かな作物品種の育成を目指して

(独) 農業・食品産業技術総合研究機構作物研究所稲研究領域 主任研究員 川岸 万紀子

作物研究所は、農林水産省所管の独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構に所属し、食料自給率の向上を目指した穀類の先端的品種育成と基盤技術の開発を担っている。ここでは、筆者の所属する稲研究領域で行われている研究を中心に紹介させていただく。

はじめに

世界の人口は70億を突破し、今世紀半ばには90億に達するとも推測されている。世界の穀物需要は拡大を続け、穀物生産は豊作の年でも需要をぎりぎり満たしている状態とされている。今年穀倉地帯である米中西部やロシアなどで干ばつなどの天候異変が続いているため、国連食糧農業機関(FAO)は、穀物生産量が前年より減少すると予測している。

日本のお米はとてもおいしく、新しいイネ品種の開発はもう必要ないと思う方もおられるかも知れない。しかし将来の気象や社会情勢の変動に対応できるよう、今より以上に、病気に強い、栽培が容易、収量が高い、干ばつや高温・低温などの気象条件によるストレスに強い、などの特性をもつ品種の育成が望まれる。栽培可能地域の拡大や栽培の省エネルギー化も見据え、また新しい用途の拡大にも適応できるよう、できるだけバラエティーに富んだ品種や系統のコレクションを備えるのが理想といえる。

作物研究所で育成されたイネ品種(図1)

異なる性質をもつ個体をかけ合わせ、得られた子孫から双方の優れた性質をあわせもつ個体を系統化することを繰り返し、いろいろな品種が生み出されてきた。作物研究所のホームページ(<http://www.naro.affrc.go.jp/nics/index.html>)には、近年、作物研究所で育成された品種が紹介されているのでご参照いただきたい。その



図1. 「あきだわら」の特性
左：一穂粒数が多いため多収である。
右：「こしひかり」に比べて短稈で耐倒伏性に優れる。

ひとつ「あきだわら」は、収量性に優れる「ミレニシキ」と品質・食味の優れた「イクヒカリ」の交配により育成され、良食味で玄米品質の良い多収品種である。「こしひかり」に近い良食味であり、一穂粒数が多いため多収で、「こしひかり」より短稈で耐倒伏性に優れており、低価格で質の良いお米として生産・流通が期待されている。また、作物研究所で構築・公開されているイネ品種・特性データベース検索システム(<http://ineweb.narcc.affrc.go.jp/>)は、さまざまなイネ品種の特性や来歴を知りたい場合に有用である。

野生稲からの有用遺伝子の発掘(図2)

交配による品種改良のためには、望ましい性質をもつ系統を探す必要がある。現在の栽培品種は、野生種から長期間にわたり農業上有用な性質をもつものが選抜されてきたと考えられる。しかしその過程で、有益性が認識されないまま選抜されずに失われた遺伝子もある。こうした有用遺伝子の発掘を目指し、タイやスリナム原産の野生稲の染色体の一部が日本品種「こしひかり」や「いただき」に導入された系統群が作出され、研究素材として配付されている(作物研究所プレスリリース2012年9月10日、http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/nics/043558.html 参照)。野生稲は草型や収量性などに関する不良形質も多く、野生稲そのものの観察からは有用な情報を得にくい。しかし、染色体断片導入系統は、全体の特性が元の日本品種に近いので、様々な形質についての評価が行いやすく、これまでに知られていなかった有用遺伝子が見つかることが期待されている。

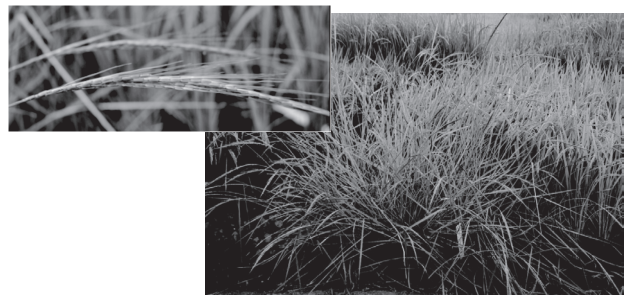


図2. スリナム原産野生稲 *Oryza glumaepatula* の草型
倒れやすく、米の収量は低い。一穂粒数が少ない。脱粒性が強く種子が容易に脱落する。

DNA マーカー選抜技術

品種改良に欠くことのできない技術として、DNA マー

カー選抜技術がある。目的の形質と染色体上の距離が近く一緒に遺伝しやすいDNA配列をDNAマーカーと呼び、選抜の目印として利用される。特定の形質をもつ個体を選抜する場合に、表現型で判定する代わりにDNAマーカーの有無で判定するので、迅速かつ簡便に選抜ができるという利点がある。前項で紹介した染色体断片導入系統群でも、染色体のどの部分が日本品種で、どの部分が野生稲由来かは、DNAマーカーによって判定され、野生稲の全ゲノムがカバーされるように適切なサイズの断片が導入された系統が選抜されている。交配により目的とする形質を導入する際に、望まない形質まで一緒に導入されるのを防ぐことにも、DNAマーカーは効力を発揮する。望む形質のできるだけ近傍の染色体断片だけを導入するため、いろいろなDNAマーカーが開発されている。作物研究所でも、日本の水稻品種を識別できるDNAマーカーについての解析を行い、その一覧をホームページ上で公開している (http://www.naro.affrc.go.jp/nics/webpage_contents/dna_marker/index.html)。

需要拡大を目指した研究 (図3)

米の需要を高めるため、ごはんとして食べる以外の利用も進められている。最近注目されている米粉パンに関して、作物研究所では、膨らみや食味のよい玄米粉パンの簡便な製造法を開発し、その成果はフード・アクション・ニッポン アワード 2011 に入賞した (http://www.naro.affrc.go.jp/project/research_activities/laboratory/nics/018729.html)。さらに、米粉として利用するには、炊飯米とは違った特性が求められるので、米粉パンに適したイネ品種の研究も進められている。また、飼料自給率の向上を目指して、「たちすがた」「モミロマン」など様々な飼料用イネ品種も育成されているので、前述の新品種紹介のページを参照いただきたい。

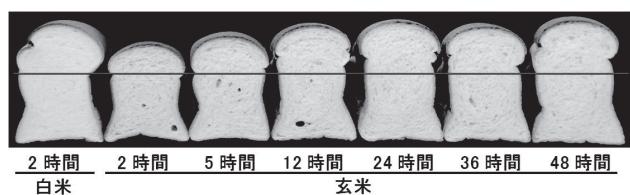


図3. 玄米粉パンの膨らみの改良法の開発

玄米を12時間以上水に浸すことによりパンの膨らみが向上する。

イネの遺伝子研究

イネは世界の人口の半分近くを支える主食であると同時に、すぐれたモデル生物のひとつでもある。イネの全ゲノムの完全解読は2004年に終了し、その成果は翌年Nature誌に発表された (Nature. 2005, 436: 793-800)。その後も、遺伝子予測や遺伝子発現解析等のデータが蓄

積され広く利用されている。その過程で、独立行政法人農業生物資源研究所が大きな貢献を果たしている。イネアノテーションデータベース RAP-DB (<http://rapdb.dna.affrc.go.jp/>) を中心に多様なデータベースが公開されており、農林水産生物ゲノム情報統合データベースのなかのイネゲノムデータベースのページ (<http://togo.dna.affrc.go.jp/rice/database.html>) からアクセスできる。またイネゲノムリソースセンター (<http://www.rgrc.dna.affrc.go.jp/jp/>) や農業生物資源ジーンバンク (http://www.gene.affrc.go.jp/index_j.php) からDNAや植物系統などの研究材料が世界の研究者に提供されている。これらの分子生物学的情報は、イネ品種の開発だけでなく、他の作物も含めた植物科学全般にも大きく寄与している。

モデル生物として欠くことのできない条件として、形質転換技術が確立していることがあげられる。「遺伝子組換え」という言葉から浮かぶイメージは人によってさまざまであろうが、私たちは遺伝子の機能解析のために遺伝子組換え技術を日常的に用いている。ある遺伝子の機能を知るためには、その遺伝子が働かない状態を作り出し、その効果を調べることが第一歩となる。遺伝子組換え技術を用いて、遺伝子の発現抑制や過剰発現などの状態を作り出すことは、分子遺伝学的解析の基本である。

遺伝子組換えイネの開発研究 (図4)

一方、遺伝子組換え作物の開発についてはどうだろうか。国際アグリバイオ事業団 (ISAAA) によると2011年の世界の遺伝子組換え作物の栽培面積は1億6千万ヘクタールに達したと報告されている。特に多い大豆とトウモロコシについては、作付面積がそれぞれ7千5百万ヘクタール、5千万ヘクタールを超えた。日本では、穀類の遺伝子組換えについては、研究段階の取り組みはあるものの商業栽培された例はまだない。

遺伝子組換えイネの開発研究の一例として、作物研究所が進めている「必須アミノ酸含量の高いイネ」の作出



図4. トリプトファン含量の高いイネの栽培

2010年に作物研究所の隔離圃場で栽培試験を行ったときの様子。

があげられる。必須アミノ酸は、動物が自らの体内で合成できないので食物から摂取する必要がある栄養素であるが、イネやトウモロコシなどの穀類にはその含量が低く、家畜の飼料としての利用には合成アミノ酸の添加が必要な場合が多い。そこで飼料価値の向上を目指し、必須アミノ酸のひとつであるトリプトファン含量を高めたイネの開発に取り組むこととした。植物や微生物では、余剰のトリプトファンが合成経路上のアントラニル酸合成酵素を阻害して合成反応を停止させるため、過剰な産生は抑制されている。このフィードバック制御機構を逆手に利用して、阻害を受けないような変異型酵素遺伝子を導入することにより、トリプトファンが通常より多く蓄積される組換えイネ系統を作出した。

試験研究用に広く用いられる品種「日本晴」に上述の変異型遺伝子を導入した系統と飼料用イネ品種「クサホナミ」を用いた改良系統の、二度にわたる屋外栽培試験の結果、トリプトファンの高蓄積という形質は安定して発現することが確認されたが、含量が高すぎると種子の稔実率が低下し収量も低くなる傾向が認められた。実用的に必要なトリプトファン含量と稔実に影響を与えないことのバランスを考え、特異的に遺伝子発現を制御するなどの手法も検討して、さらなる改良を行っている。また、他の必須アミノ酸の含量も向上させるなど、多角的な取り組みが進行している。

最初に変異型遺伝子の効果が実験室レベルで確認されてから10年以上が経つが、実用化までの道のりは遠い。遺伝子組換え作物の開発研究には、遺伝子組換え生物の取り扱いを規制するカルタヘナ法や栽培実験指針などの遵守や社会的受容に対する配慮など、通常の植物科学研究とは違った側面がある。今後の開発研究の発展のためには、まず第一に、どのような形質が求められているのかを探り、適切な開発目標を定めること、次に、生物学実験以外の手続き等を分担遂行するスタッフの養成などにより、研究を合理的に進める体制を整えることが重要であろう。

遺伝子組換え作物のまわりで (図5)

遺伝子組換え作物の開発とともに、その栽培にあたって、従来の非組換え作物との共存を図る研究も行われている。花が開かないため花粉が外に飛び出さないが正常に稔実するという閉花性イネが開発された。この性質を利用すれば、遺伝子組換えイネの花粉飛散による交雑を抑制できると考えられる。また、早朝に開花するという性質を野生稲から導入する研究も進められている。通常の栽培品種と開花時間が重ならないように工夫することにより、交雑を抑制する効果が期待される。



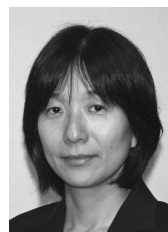
図5. 閉花性イネ系統の開発
左の普通のイネが開花しておしべが外に出ているのに対し、右の閉花性イネは花が開かないので花粉が飛散しない。

品種育成の未来へ

遺伝子組換え技術は、一振りで夢の品種を作りだせる魔法の杖ではなく、バリエーションを生み出す手法の一つである。遺伝子組換えでない品種改良と遺伝子組み換え技術との両方の利点を組み合わせて行くことが必要である。

例えば、高温登熟性に優れるイネの開発を考えてみる。近年、イネの登熟期の高温により、米の胚乳部分が白く濁ったような状態になり、玄米の外観形質が劣ることが問題となってきている。イネの栽培期間の気温は上昇傾向にあり、今後もますます重大な問題となると考えられ、高温に強い系統の開発が求められている。このような育種目標は、単純に何か一つの遺伝子を導入すれば実現するとは考えにくく、温度ストレス応答やデンプン代謝経路など複雑な制御機構の全体を見渡し、多様な解析結果を勘案して、よりよい方針を探っていくことが重要と考えられる。

どのような手法を用いるかは、局面に応じて適したものを選択すべきであり、何よりも大事なものは、望む形質を実現するのに、どの遺伝子(群)に着目し、どのようにその働きを制御するのか、である。従来から積み重ねられてきた、農業上の有用形質の選択の長い長い歴史のうに、作物のもつ未開発の潜在力を発揮させるようにすることは、最新の知識と技術を駆使しても容易なことではない。できるだけ広い視野に立ち、遺伝子の働きを正しく把握するための研究を積み重ねることが、将来の作物開発に役立つと信じている。



川岸 万紀子 (かわぎし まきこ)

1994年 東京大学大学院理学系研究科生物化学専攻 修了 博士(理学)
1994年 岡崎国立共同利用機構 基礎生物学研究所 特別協力研究員・非常勤講師
1994年 アメリカ合衆国 National Institute of Health 博士研究員
1997年 農林水産省 農業研究センター研究員
2001年 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 作物研究所 主任研究官
2006年より 現職

農地における放射性物質の除染と作物への移行低減 —農研機構における技術開発の取組—

(独) 農業・食品産業技術総合研究機構 震災復興研究統括監 木村 武

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災に伴う東京電力福島第一原子力発電所の事故により、多量の放射性物質が放出された。その後の降雨等によって放射性物質は地表の植生や土壤に降下し、福島県をはじめ関東から東北にかけての広域が汚染された。被災直後には一部の野菜で放射性ヨウ素が食品の暫定基準値を超え、出荷制限の措置が採られた。現在では、中長期的に問題となる放射性核種はセシウムに絞られているものの、汚染レベルの高い地域は居住や作付けが制限されるとともに、食品の基準値を超える農産物は出荷停止となるのみならず、放射性セシウムを含む農産物が流通業界・消費者から敬遠されるなど、被災地農業は大きな打撃を受け続けている。

農業生産における放射性物質汚染のリスクとしては、外部被ばくの点で農業生産を行う場である農地における空間線量率と、内部被ばくの点で生産物の放射性物質濃度があり、それらの低減・解消が喫緊の課題である。そのため、農地土壤の除染と作物への放射性物質の移行低減は、被災地農業の復旧・復興に向けて、鍵となる技術に位置づけられる。

2. 農研機構の組織と放射能対策研究への取組

(独) 農業・食品産業技術総合研究機構（以下、農研機構）は、14の内部研究所を有し、農業、食品産業、農村の健全な発展のための研究開発を行っている。放射能対策研究に関する研究蓄積はなかったが、「農研機構震災復興対策本部」を設置して、被災地農業の復旧・復興に組織を挙げて取り組むこととした。

2011年度は、緊急的に実施された科学技術戦略推進費「農地土壤等における放射性物質除去技術の開発」において、汚染土壤の物理的除染技術の開発と現地検証、カリウム施用等による放射性セシウムの作物への移行低減技術の開発、そして、ヒマワリ等による除染効果の評価などを行った（表1）。また、農林水産省（以下、農水省）の「放射性物質に関する緊急的研究」などによって、農作物への放射性セシウムの移行動態の解明や低減技術の開発、除染技術の高度化などに取り組んだ。

それらの取組成果は、農水省に提供して行政施策対応へ反映するとともに、後述のものを含め、プレスリリースや成果情報として公表した（http://www.naro.affrc.go.jp/disaster/research_tech/index.html）。

2012年度には、農研機構の中期計画に、農地の除染技術及び作物への移行低減技術の開発からなる放射能対策の研究課題を位置づけるとともに、組織内に「震災復興研究統括監」、「農業放射線研究センター」を設置して継続的に取り組む体制を構築した。また、新たな農水省プロジェクト研究「農地・森林等の放射性物質の除去技術の開発」（表2）にも取り組んでいる。

表1 科学技術戦略推進費「農地土壤における放射性物質除去技術の開発」における課題の柱と担当機関

① 代かき後の強制落水による表層土除去と土砂の補足（農研機構・農工研）
② 表層土剥離のための農業用機械の開発と土壌の処理方法の確立による汚染低減（農研機構・中央研、農工研、農環研、福島県）
③ 除去後の残渣処理（日本原子力研究開発機構、農研機構）
④ カリウム等の施用による放射性セシウムの農産物への移行低減栽培技術の開発（農研機構・中央研、果樹研、東北研、宮城県、茨城県、栃木県、群馬県、千葉県、農環研、岡山県、東京大）
⑤ 天然鉱物等の無機材料を利用した環境からの放射性物質回収、除去技術の開発（物質・材料研究機構）
⑥ プルシアンブルーを利用した環境からの放射性物質回収・除去技術等の開発（産業技術総合研究所）
⑦ 高分子捕集材を利用した環境からの放射性物質回収・除去技術の開発（日本原子力研究開発機構）
⑧ 放射性物質を吸収するヒマワリ、微細藻類を用いた浄化、回収技術の開発（農研機構、東北研、農環研、福島県、水産総合研究センター）

表2 農研機構が参画した放射能対策プロジェクト研究

科学技術戦略推進費（内閣府・農水省、H23） 農地土壤等における放射性物質の除去技術の開発
放射性物質に関する緊急的研究（農水省、H23） 植物から農畜産物への放射性物質移行低減技術の開発 麦類、ナタネ及び秋冬野菜における放射性セシウムの移行制御技術の開発 茶・果樹の放射性セシウム濃度低減技術の開発 既耕転農地の放射線量低減のための低コスト客土及び土壌攪拌技術の高度化 プラウによる反転耕のすき込み精度の向上と影響評価 圃場での雑草の処理等に伴う放射性セシウムの飛散防止技術の開発 放射能汚染地域内水田等における除染作業用トラクタおよび作業機の開発 農業用施設、畦畔、農道等の除染技術の開発 放射性物質を含む作物等の安全な減容・安定化技術の開発（H23～24）
農地・森林等の放射性物質の除去技術の開発（農水省、H24～26） 高濃度汚染地域における農地土壤除染技術体系の構築・実証 高濃度汚染農地土壤の現場における処分技術の開発

3. 農地土壤の除染技術

農地土壤における放射性物質の除去については、幾つ

かの手法に関して国内外で研究レベルでの取組があるものの、実際のフィールドにおける大規模な事業展開を行うために、最適な方法の絞り込みや、その適用効果の検証等を行われておらず、速やかにこのための技術を確認することが重要であった。

セシウムは土壤に保持され易いため、フォールアウト後に作付制限などで耕耘されていない農地では、極表層に分布する。旧計画的避難区域となった福島県飯舘村での調査では、表層 2.5cm の部位に深さ 0～30cm の土層全体の 95% 以上が分布していた。そのため、汚染表土の物理的な除去技術を飯舘村の農家圃場において実施（図1）、その効果を検証した。



図1 飯舘村での除染技術の検証地点

(1) 農用機械による表土除去

農家が保有する農用機械の利用を基幹として、まずトラクタにバーチカルハローを取付けて極表層をほぐし、次にリアブレードを付けて削り取り、最後にフロントローダを付けて圃場から排出し、フレキシブルコンテナに充填して保管場所へ移動する作業体系を構築した。深さ約 4cm の表土除去を目標に、10a 当たり 140 分～175 分の所用時間で実施できることを示した。土壤（作土）の放射性セシウム濃度は約 10,000Bq/kg から 2,600Bq/kg に、空間線量率は処理前の 7.14 μ Sv/h から処理直後には 3.39Sv/h へ低減した。また、除染後に通常の施肥管理下で水稻を栽培し、概ね通常の収量レベルであること、玄米の放射性セシウムは 20Bq/kg 未満であることを確認している。

また、圃場面だけでなく、農道、法面、畦畔、用水路などの農地周辺部に対応した除染作業機や、高濃度汚染地域での作業者の安全を確保するためのシールドキャ

ビン付トラクタに関しても、農機メーカーと連携し、技術の体系化に取り組んでいる (http://www.s-affrc.go.jp/docs/nogyo_gizyutu/pdf/1_3.pdf)。

(2) 固化剤を利用した表土除去

マグネシウム系の土壤固化剤を農地表面に散布後、7～10 日程度において表層土を固化させ、パワーシャベルをワイパー状に動かして汚染表土を削り取る方法である。パワーシャベルのバケット部からホースを通じて圃場外の運搬車へ連続的に土壤を移送できるため、作業効率が高い。作土の放射性セシウム濃度は処理前の約 9,000Bq/kg から 1,670Bq/kg に低減し、空間線量率も 7.55 μ Sv/h から 5.57 μ Sv/h に低下した。

(3) 代かき除染

代かき除染は、放射性セシウムを保持している粘土などの細かい土壌粒子を懸濁水とともに圃場外へ取り出し、凝集剤を用いて固液分離して放射性セシウムを含有する粒子を除去する技術である。1回の除染効果は高くないが、耕耘後でも繰り返し実施可能な技術である。飯舘村での現地検証では、処理前 16,100Bq/kg が処理後 9,860Bq/kg となり、空間線量率では、7.50 μ Sv/h から 6.48 μ Sv/h に低減した。

(4) プラウによる反転耕

上記の表土除去や代かき除染では、汚染土壤が排出されるが、反転耕は汚染表土を下層に埋却するため、汚染排土を生じない。農機メーカーの協力により、ジョイント付プラウや二段プラウを改良し、地表面の空間線量率として、未耕起土壌の場合に 7～8 割、耕起済み土壌の場合に 3～6 割の低減効果を得ている。ただし、反転する下層土が営農に適しているかの事前調査や、水田では耕盤が壊れるため、鎮圧・代かきなどの対策が必要となる (http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/publication/files/narc-hantenkou-plow.pdf)。

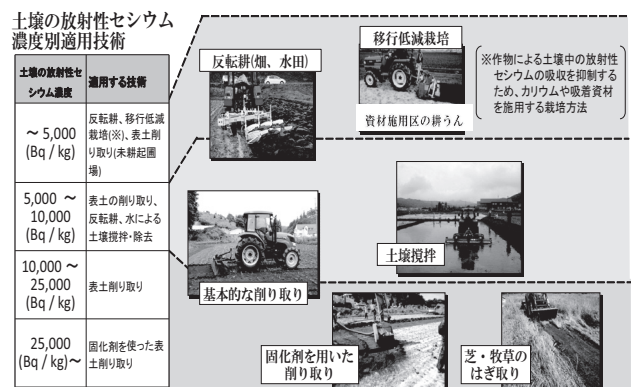


図2 汚染レベルに対応した除染技術

以上の除染技術は、農水省の「農地土壌の放射性物質除去技術(除染技術)作業の手引き 第1版」(<http://www.saffrc.go.jp/docs/press/pdf/120302-01.pdf>)として、環境省の除染ガイドラインに反映すべくとりまとめられ、汚染レベルに対応して図2のように位置づけられている。また、農水省の除染モデル事業にも活用され、表土削り取りでは、作土中放射性セシウム濃度で約7~9割、空間線量率で約6~8割の低減率が示されている(http://www.maff.go.jp/j/nousin/seko/josen/pdf/gijyutsusyo_sanko.pdf)。

4. 除染により発生する廃棄物の処理技術

農地の除染を実施すれば、汚染土壌や、草木類などのバイオマスといった廃棄物が多量に発生する。その減容化・安定化技術がなければ、除染は進まない。農研機構では、民間企業との共同研究や農林バイオマスの研究シーズを活用した取組を行っている。

(1) バイオマスの減容・安定化

草木類などのバイオマスは、その儘ではかさばるので運搬・保管の効率が悪い。また、水分がそこそこあると分解し、温度上昇、ガス発生、液状化などを起こす恐れがある。そのため、草木系バイオマスについて、①粉塵の発生を抑えた収穫技術、②減容化のための乾燥・粉碎・成型技術によって、水分15%未満、かさ密度500kg/m³以上のペレット化を、200kg/hで行う減容化設備を構築し、被災地へ移設して、検証試験等を実施中である。放射性セシウム濃度の異なるバイオマスを組み合わせて8,000Bq/kg未満となるペレットを調製すれば、焼却施設へ運搬して処理・利用が可能となり、除染の推進に貢献すると期待される。

(2) 乾式処理による土壌からのセシウム除去

高濃度汚染農地の表土除去によって生ずる多量の土壌について、粘土鉱物に固定された放射性セシウムを引きはがすことができれば、除染の推進に貢献する。そこで、太平洋セメント(株)の技術を用いた共同研究を行い、乾式熱処理によって、福島県内の放射性物質に汚染された農地土壌(60,000Bq/kg超)から、復旧・復興用土工資材等に利用可能なレベル(クリアランスレベル:100Bq/kg以下)まで含有する放射性セシウムを分離・除去(99.7%以上)できることを確認した(http://www.naro.affrc.go.jp/publicity_report/press/laboratory/narc/027564.html)。

5. 作物への移行動態の解明と移行低減技術

2012年4月に食品中の放射性セシウムの新しい基準値が設定され、農作物の生産過程での移行低減が一層求められる。稲・麦・大豆や野菜などの1年生作物については土壌から可食部への移行リスクの把握と低減技術、また、果樹、茶樹、牧草などの永年作物では土壌からの移行に加えて、樹体や地上部植生に沈着した放射性セシウムの可食部への影響解明と低減技術の開発をポイントに調査・研究に取り組んでいる。以下に各々の対策技術に関する研究成果の例を示す。

(1) カリ供給力の向上による玄米への移行低減

連携協力県との連絡試験によって、土壌の交換性カリ含量が増加するほど玄米への移行係数は低下し、その効果は交換性カリが25mgK₂O/100g以上では小さいことを明らかにした。そこで、カリの少ない水田では、土壌の交換性カリが25mgK₂O/100gとなるように土壌改良した上で、地域慣行の施肥を行うことが玄米の放射性セシウム濃度の低減に有効と考えられ、この結果は各県の指導に活用された。カリ施用による移行低減は水稻以外の作物においても検討している。(図3)

(2) せん枝による茶への移行低減

茶樹では、土壌に施用した安定同位体セシウムが殆ど吸収されないが、葉面散布では移行すること、及び放射性セシウムは大部分が樹体に分布することから、せん枝による除染が1番茶への移行低減に有効であることを示し、農水省による指導に活用されている。

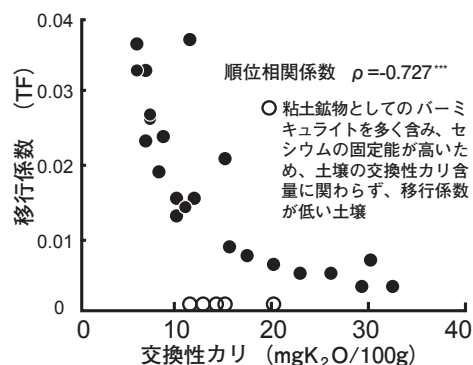


図3 土壌の交換性カリ含量と玄米への放射性セシウムの移行係数



木村 武(きむら たけし)

1953年、東京都生まれ。東京農工大学大学院修了後、農林水産省入省。草地試験場、農業研究センター、野菜・茶業試験場を経て、中央農業総合研究センターに勤務。2011年土壌肥料研究領域長、2012年より現職。

風力発電を考える

筑波大学システム情報系 准教授 岡島 敬一

1. 風力発電の導入量

2011年3月の東日本大震災・福島第一原子力発電所事故を機に、太陽光発電と共に風力発電が再び脚光を浴び始めている。本年7月より再生可能エネルギーの固定価格買取制度も始まり、一層の普及拡大が期待されている。風力発電は原発事故前から主要再生可能エネルギーの一つとして環境問題対策の追い風もあり普及ブームがあった。図1に日本の風力発電における累積設備導入量を示す¹⁾。90年代後半から導入量が伸び始めており、特に2005～2006年あたりは大きな伸びが見られ、近年はやや鈍化傾向にあったが、2010年度には累積で1,814基、総設備容量は約2.44 GWに達している。

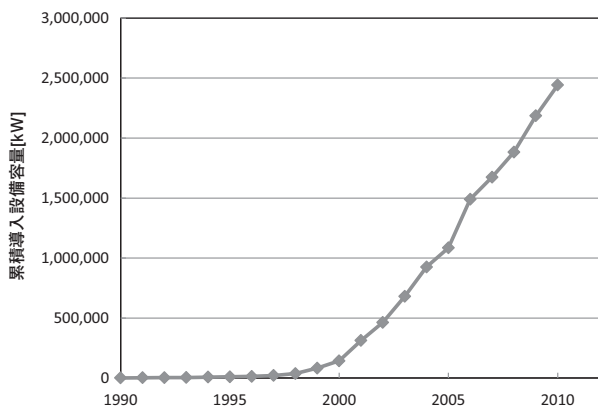


図1 日本の風力発電導入量

2. 期待通りにはいかない風力発電

このように右肩上がりで導入拡大がなされてきていた風力発電であるが、建設が全国に広がった一方で、問題がある事例も散見されるようになった。

つくば市においても、環境省の「環境と経済の好循環のまちモデル事業」に2004年6月に採択された「つくば市草のNeCO₂（ネコ）ちっぷ事業」の一事業として風力発電事業が開始された。市立の小中学校に小型風車を設置し、その売電代金相当額を原資として、CO₂削減行動を実践した市民等に対して地域通貨「ネコちっぷ」を発行するというもので、CO₂の排出量を減らしながら、地域経済の活性化を進めることを目指した先進的な試みであった。平均風速2 m/sで発電

すると謳われていたダリウス・サボニウス併結型風車を選定され、2005年7月までに19小中学校に23基設置されたものの、実際には想定していた発電電力量が得られず、事業は中止に追い込まれた。

残念ながら発電量が見込み通り得られず失敗に終わったが、エココインのコンセプトは評価されるものであった。地域通貨と関連づける試みは封印すべきではない。再生可能エネルギーの固定価格買取制度では20 kW未満の小型の風力発電の買取価格が57.75円/kWhと、太陽光発電の42円/kWhを上回る価格で買い取られる。風況がさほど高くない市街地でもそこそこ発電量が見込める小型風車の開発が進めば、再び注目されるであろう。

この事例は小型風力発電機によるものであったが、電力供給としての発電所と位置づけられる、複数の大型風車から構成されるウィンドファームにおいても期待通りに行かなかった事例が見受けられ始めている。2004年に北海道旧恵山町の第3セクターの風力発電事業会社が自己破産した他、京都府太鼓山風力発電所では予測した発電量が見込めず事業の見直しの議論が続いている。この発電所に限らず採算性を巡る議論は他所でも起こっているのだが、導入の際に受けた補助金の返還が必要になる可能性もあり、撤去するという単純な対処では済まされない状況に陥っている。

3. 風速と設備利用率

失敗した事業での根底にある問題は何であろうか？やはり、「風況が悪かった」ということであろう。では「風況が悪かった」とはどういうことだろうか？風速が小さかっただけであろうか？風力のエネルギー P (W) は、空気密度を ρ (kg/m³)、受風面積を A (m²)、風速を V (m/s) とすると以下の(1)式で表すことが出来、エネルギーは風速の3乗に比例する。

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

風速の3乗に比例するとなれば、風速が高い場所が望ましいが、風速だけでの議論は正しい面も当然ある一方で、十分条件とはいえない。例えば「筑波おろし」

は強烈な風ではあるが、風速が高すぎる場合は風車の破損の要因になりカットアウト対応をとる。風車にもよるが、通常カットアウト風速は 25 m/s 程度が一般的である。つまり瞬間的な風速の高さよりも安定した風速が得られるかが重要といえる。

風は気まぐれと言うが、機器側はいつでも受けられるように保守管理されていることも大事である。この観点での指標にアベイラビリティが用いられる。アベイラビリティとは機器の動作可能な時間の割合であり、風力発電においてアベイラビリティは「風が吹いているときに正常に運転できるか?」という能力を示している。風が吹いたかどうかは別として、発電できる機能を維持している時間が割合にしてどのくらいかを示すものである。風力発電はこのアベイラビリティにおいては非常に優秀で、近年では 98% を越えるケースもある。

しかしながらこれに風況の影響が加わり、実際に風が吹いてどの程度発電できるかを示す設備利用率になると、20～25% 程度まで低下してしまう。信頼性の観点から見ると機器としてのシステム信頼性は高いが、このように風力発電では発電量が風に左右されてしまうというのがご存じの通り最大の弱点である。

風速に話を戻すと、風速は高ければ高いほど良いわけでは無く、大型風車の場合には 12～25 m/s 程度が定格出力で発電する風速と設計されている。常時 20 m/s の風が吹く場所というのは現実的な候補地としては存在せず、年平均風速で 5～7 m/s 程度が最低限望まれる条件となる。図 2 は高さ 30 m と 70 m の年平均風速の局所風況マップである²⁾。(a) の高さ 30 m のマップにおいて茨城県をみると、風速 3～5 m/s を示す青色と水色がほとんどを占めていることがわかる。(b) の高さ 70 m となると、茨城県南地方の平地部でも風速 5～6 m/s の緑色の範囲が大幅に増えてくる。ということは高さ 70 m ならばある程度の風況は期待できることになる。高さ 70 m というのは現在の主流となってきている設備容量 2 MW の風車のハブ高さに相当する。茨城県南地方の平野部にも 2 MW 風車 50～100 基で構成されるウィンドファームの建設が期待できてしまう。

一見実現できそうに見えてしまうが、既存電力系統への接続の問題をひとまず無視したとしても、民家に近い地域への建設は、近年になって顕在化してきた騒音問題を無視するわけにはいかない。

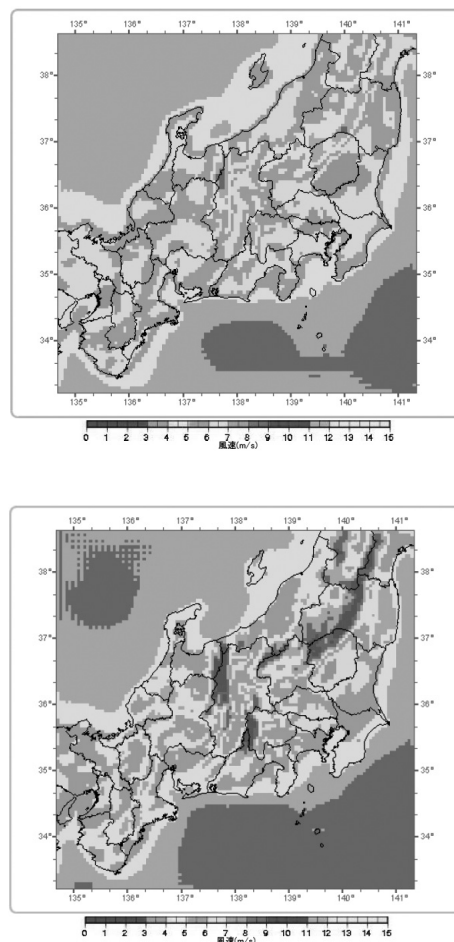


図 2 年平均風速局所風況マップ 2)

4. 風車による騒音問題

風力発電による環境影響というと、鳥類が風車のブレード(羽根)に衝突する、バードストライクが真っ先に思い浮かばれるだろう。しかしながら風力発電の導入拡大に伴い、バードストライクよりも騒音問題が大きくなってきている。この問題は風力発電設備導入量が伸びた直後の 2007～2009 年あたりから顕在化してきた。

環境省が 2010 年に稼働中の風力発電所を対象として、騒音・低周波音の苦情等に係るアンケート調査を実施したところ、回答があった 389 箇所の風力発電所のうち、騒音・低周波音に関する苦情が寄せられたり、要望書が提出されたことがあるものは 64 箇所にも上った³⁾。愛媛県伊方町では 2007 年に 1 MW 風車 20 基で構成されるウィンドファームが運転を開始したが、住民から不眠や頭痛を訴える苦情が相次ぎ、住宅近くの 4 基が夜間運転を停止した。また、静岡県東伊豆町では風力発電施設からの低周波音による健康被害原因裁定申請が、兵庫県淡路市における風力発電事業へは風力発電所建設差止調停申請がなされる事態に

発展している。

5. 洋上風力発電

ここまで風況と騒音問題について述べてきたが、これらを打開する一つの方向として、洋上風力発電が注目されている。陸上と比較して海岸や洋上は風速の高さと安定性という風の必要二条件に対して望ましい立地である。前述の局所風況マップを見ても（図2）、高さ70mのケースでは黄色で示される風速6～7m/sの領域に入ってくる。陸上と比較して地形上の影響が少なくなるため、一般的に洋上では風速の安定性も高くなる。

また、上で記した騒音問題の面からも洋上風力発電は優位といえる。筆者らは過去に海岸に大型風車が多数ある神栖市波崎地区において、街頭で風力発電環境影響に対する意識についてのヒアリング調査を行った。図3に風車騒音についての意識調査結果を示す⁴⁾。回答数は神栖市波崎地区で56、一般地区で70と少ないながらも、有意な差が見られている。一般地域の結果からは、対策が必要だとの意見が最も多く、漠然とした悪印象を受けている傾向が見受けられる。一方、神栖市波崎地区の調査結果では、現状で構わないという意見が約80%を占めた。神栖市波崎地区では風車設置エリアが市街地中心部から離れていることと、夜間は市街地方向から風車設置地域である海岸線に向かって風が吹くために、騒音影響が少ないと思われる。

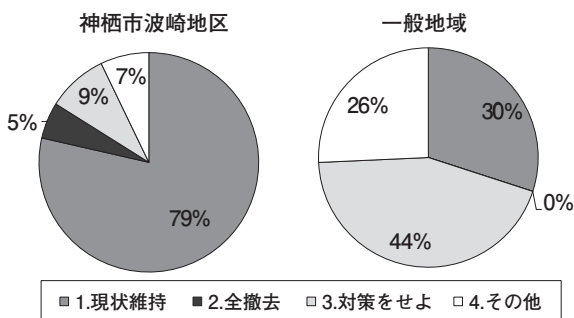


図3 風車騒音に対する意識調査結果

このヒアリング調査時点での対象は海岸の陸上に設置された風車群であり、洋上風力となればさらに風況および風車騒音問題の双方にとって望ましい設置環境となり得る。洋上風力発電では、漁業権との調整や建設コストの抑制、保守管理の方法など課題も残るが、鹿島灘には既に固床式の半洋上風力発電が建設され運転を開始しており、現在増設工事が進められている。さらに、茨城県では鹿島港の600m沖に、風力発電施

設の専用区域を指定し発電事業者を公募した⁵⁾。680ha（幅約7km、奥行約1km）の水域を確保しており、洋上ウィンドファームとして国内で初めての事業となる。5MWの大型風車50基程度、設備容量約250MWの発電施設が建設され2017年頃より運転開始が予定されている。設備利用率は約30%が見込まれており、洋上としての風況メリットとあわせると、洋上風力発電はメガソーラーを上回る供給安定性が期待できよう。



図4 鹿島灘の風力発電（筆者撮影）

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：日本における風力発電の状況、<http://www.nedo.go.jp/library/fuuryoku/state/1-01.html>
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）：局所風況マップ、<http://app8.infoc.nedo.go.jp/nedo/webgis>
- 3) 環境省：風力発電施設に係る環境影響評価の基本的考え方に関する検討会報告書（2011年6月）、http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=17727&hou_id=13908
- 4) 岡島ほか：風力発電に関するTCMとCVMを用いた環境価値付け分析、第26回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文要旨集、pp.147-150（2007）
- 5) 茨城県港湾課：鹿島港洋上風力発電公募事業に係る事業予定者の選定結果について、http://www.pref.ibaraki.jp/news/2012_08/20120829_01/index.html



岡島 敬一（おかじま けいいち）

1998年 東京大学大学院工学系研究科化学システム工学専攻博士課程単位取得退学、博士（工学）
 1998年 静岡大学工学部 助手
 2005年 筑波大学大学院システム情報工学研究科 講師
 2011年 筑波大学システム情報系 講師
 2012年 筑波大学システム情報系 准教授（現職）
 専門分野：エネルギーシステム分析、ライフサイクル・信頼性評価

ナノテクノロジーと社会

(独)産業技術総合研究所ナノシステム研究部門ナノテクノロジー戦略室 阿多 誠文

はじめに

科学技術の研究開発分野としてのナノテクノロジー・材料分野に対する優先的戦略的研究開発投資は、2001年4月に施行された第2期科学技術基本計画から、2011年3月末までの第3期科学技術基本計画までの都合10年に及んだ。この間、新興の科学技術である「ナノテクノロジーと社会」の課題がどう展開したのかを簡潔に概要するとともに、この課題に取り組んできた者の視点からみた現状と課題について整理してみたい。

科学技術と社会

21世紀元年の2001年度から科学技術政策に基づいて戦略的研究開発投資が行われるようになったナノテクノロジーの研究開発には、科学技術の世紀と呼ばれた20世紀末までの研究開発の方法論にはなかった二つの際立った特徴があった。一つはナノテクノロジーの研究開発が学際領域として展開したことである。学際領域の研究開発に必須の異分野融合や産学官の連携が重要視された点で、ナノテクノロジーの研究開発は従来の学術分野の研究開発とは異なっていた。もう一つは、科学技術の研究開発と並行して、その科学技術が社会に及ぼす影響を検証し、研究開発の場にフィードバックする、いわゆる科学技術の社会的影響がナノテクノロジーの研究開発で考慮された点である。科学技術の研究開発側から一方的に社会に応用(Application)を図るのではなく、その社会的な影響(Implication)を考えながら研究開発を進める研究開発の方法論が、ナノテクノロジーではじめて試みられた。

科学技術の研究開発に「社会」が意識された背景には、国際連合教育科学文化機関(UNESCO)と国際科学会議(ICSU)が共催した世界科学会議が1999年7月1日に取りまとめたブダペスト宣言がある。宣言はそれまでの科学の研究開発の目的に、「社会における科学、社会のための科学」という新しい理念を加えた。2001年1月に内閣府に発足した総合科学技術会議は、同年4月に施行された第2期科学技術基本計画にこの理念を盛り込んでいる。ナノテクノロジーが材料の科学とともに「ナノテクノロジー・材料分野」と

して定義され、科学技術政策に基づく戦略的優先的研究開発投資が開始されたのもこの第2期科学技術基本計画からである。2000年以降、欧米では「科学技術と社会」に関する研究会やプロジェクトが活発に行われていたが、日本では科学技術の研究開発の課題として広く認識されていたわけではなく、ナノテクノロジーの研究開発でも具体的な動きはなかった。そのような現状に鑑み、我々は2004年に月例の公開討論会「ナノテクノロジーと社会」を展開した。この公開討論会の参加者の枠組みを、翌2005年には物質・材料研究機構、国立環境研究所、国立医薬品食品衛生研究所などと共同で、文部科学省の科学技術振興調整費プロジェクト「ナノテクノロジーの社会受容促進に関する調査研究」へと発展させた。このプロジェクトは5つのワーキンググループによる1年間の調査研究に基づいて、ナノ材料のリスク研究などの取り組みに関する政策提言を行った。翌2006年4月に施行された第3期科学技術基本計画及びナノテクノロジー材料分野政策に、「ナノテクノロジーの社会受容のための研究開発」の項目が明記され、ナノ材料のリスク管理策やナノテクノロジー国際標準化などの方針が具体的に示された。また2007年度からは内閣府総合科学技術会議が科学技術連携施策群「ナノテクノロジーの研究開発と社会受容に関する基盤開発」を実施、社会受容にかかわる関係省庁の連携が図られた。以降今日まで、国際協力開発機構(OECD)におけるナノ材料のリスク管理、国際標準化機構(ISO)におけるナノテクノロジーの標準化といった国際的な協働作業が展開してきた。ナノ材料のリスク管理策やナノテクノロジーの国際標準化については、産総研の安全科学研究部門のナノ材料リスク評価書やナノテクノロジー標準化国内審議委員会事務局のナノテク国際標準化ニューズレターをご参照いただきたい。

日本におけるナノテクノロジー研究

以上「ナノテクノロジーと社会」に係る動向について概要したところで、ここからは我々独自の解析に基づいてこの課題の本質を掘り下げてみたい。まずナノテクノロジーへの社会の関心という視点で行った、統

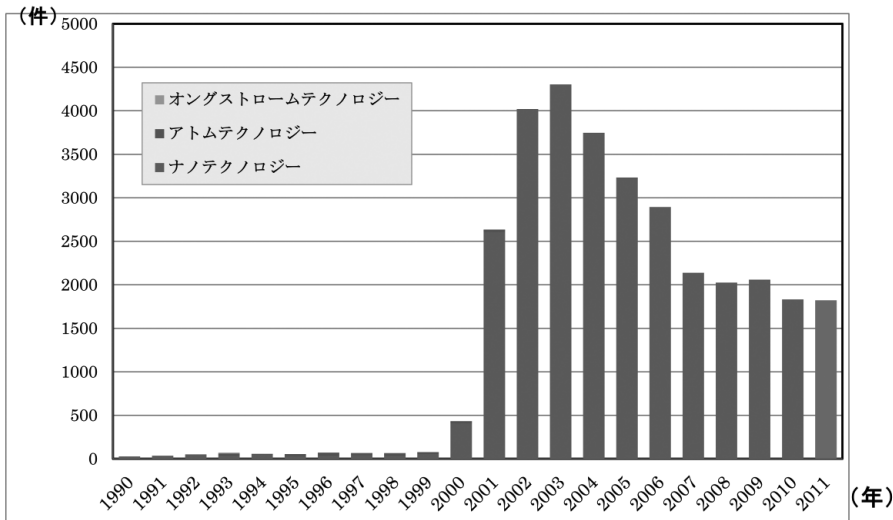


図1 新聞および雑誌におけるナノテクノロジー関連記事数の推移

計的な解析を示す。図1に、1990年以降の国内の新聞や雑誌に掲載されたナノテクノロジー関連記事の年推移を示した。そもそもナノテクノロジーという言葉は1974年に日本で開催された国際生産技術会議において、故谷口紀男氏が最初に提唱された言葉である。その後1980年代からE. H. Drexler氏らによって使われるようになった。ところが図1に示すように、1990年代、日本ではナノテクノロジーという言葉はほとんどメディアに取り上げられていない。当時日本にナノテクノロジーの研究開発がなかったわけではない。実際に1992年から10年間にわたり原子・分子のボトムアップ技術の開発を目的としたアトムテクノロジープロジェクトも行われていた。そこで「アトムテクノロジー」や「オングストロームテクノロジー」という言葉も調べてみたが、ナノテクノロジーと同様に、日本ではこれらの言葉がメディアで取り上げられることはほとんどなかった。

1990年代後半になると、ナノテクノロジーは次の21世紀、少なくともその前半にはもっとも重要な科学技術との認識が広まり、欧米をはじめとして戦略的研究開発投資が準備されるようになった。上述したとおり、日本でも2001年4月からナノテクノロジー・材料分野への研究開発投資が始まる。将来価値への期待が高まり、夢の未来社会が描かれ、ナノテクノロジーに対する社会の期待は急速に高まってきた。研究開発の実態はほとんどないにもかかわらず、研究開発投資を開始したわずか2年後の2003年には、その過剰な期待の高まりがピークに達している。いわゆるナノ・ハイプである。その後この期待への高まりは急速に冷めていき、現在では2003年当時の40%程度にまで低

下している。

図2に、イノベーションハイプサイクルのプロファイルを示す。前半のピークが過剰な期待であり、後半のなだらかな立ち上がりが社会への応用展開を示す。

図1の統計をイノベーションハイプサイクルに基づいて解析するとき大事なことは、早くも2003年に現れた過剰な期待の高まりが覚めていくどの時点で再度なだらかに立ち上がっていくのか、言い換えるならネガティブハイプがどこで底を打つかで

ある。図1の統計プロファイルは、日本のナノテクノロジーが今まさに過剰な期待から覚め、その研究開発の成果がまさにこれから応用展開していく過渡期にあることを示している。これまで10年に及んだナノテクノロジーの研究開発の成果を効果的に応用展開していくために、科学技術政策に基づいたコヒーレントな研究開発支援と、ナノテクノロジーの様々な社会受容の課題への具体的な取り組みが求められている。

技術の社会受容

日本のナノテクノロジーの研究開発は、戦後発達した精密加工技術が基盤となった「ものづくりシステム」の強みに加え、二酸化チタン光触媒やカーボンナ

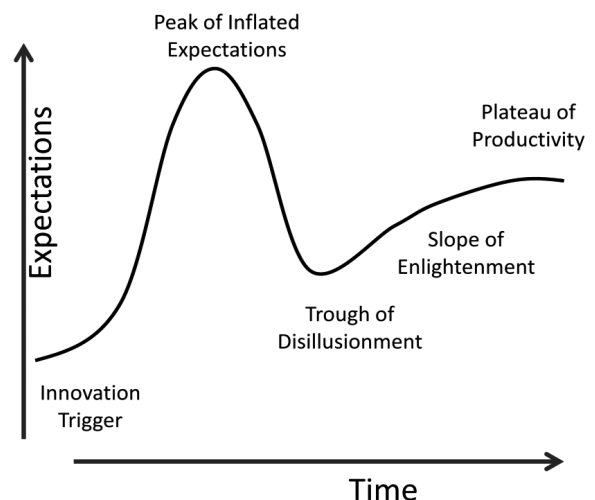


図2 イノベーションハイプサイクル。[Mastering the Hype Cycle]、J. Fenn, M. Raskino, Harvard Business Press, 2008

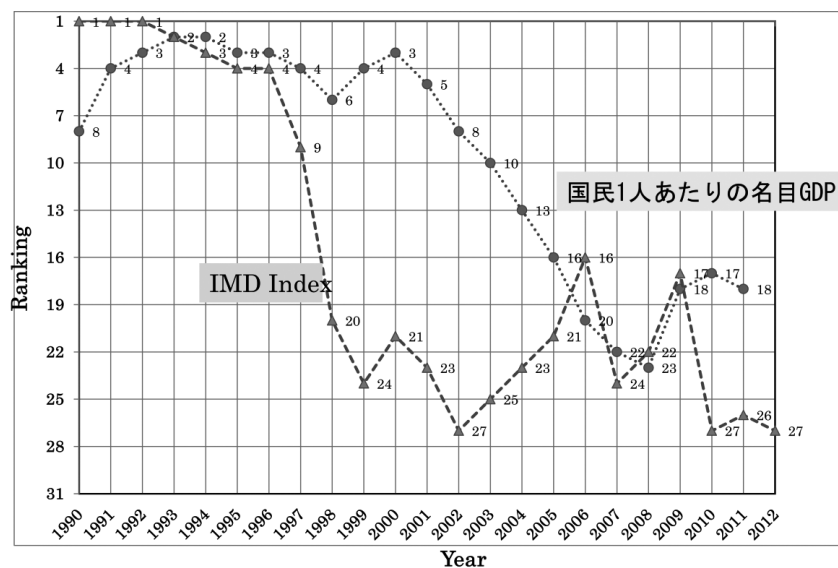


図3 IMD 国際競争力と国民1人あたりの名目GDPの推移

ノチューブの発見といった材料の科学技術の強みに支えられてきた。学术论文や知的財産の分野でも健闘してきた。「日本の科学技術のポテンシャルは世界的にも高い水準にある」という言葉は、客観的に見て間違いではない。ところが1990年頃のバブル経済の崩壊以降、日本は20年以上に及ぶ長いデフレ型の経済に停滞に見舞われている。そのエビデンスを図3に示す。一つはスイスの国際経営開発研究所(IMD)が経済のパフォーマンス、ビジネスの効率性、政府の効率性、インフラ整備度の4分野での調査結果に基づき毎年公表している「IMD世界競争力ランキング」である。日本は1989年から1993年までは総合1位だったが、1996年頃から急速に国際順位が下降し、この3年ほどは26～27位で推移している。もう一つ図示したのは「国民1人あたりの名目GDPの国際順位」で、こちらも世界のトップレベルにあったものの、2000年以降2008年まで断続的な下降傾向を示した。図3は、国際競争力の低下が数年のタイムラグを経て確実に経済に反映されることを示している。科学技術の研究開発のポテンシャルはあるのに、国際競争力が大きく低下している、この問題はなぜ生まれたのだろうか。科学技術政策とイノベーション政策が両軸で推進され、産学官の連携が叫ばれ、ニーズシーズマッチングの試みが続けられてきた。しかし、国際競争力という尺度でみるかぎり、現時点でそれがうまく機能しているとは言えない。

個人的な意見ではあるが、これから研究開発が始まる新興の科学技術領域における社会受容の課題への積極的な取り組みが、将来の国際競争力の回復に必須で

はないかと考える。我々はこれまで、大阪大学ナノサイエンスデザイン教育研究センターで、社会受容の課題への取り組みを展開してきた。これは大学院生と社会人に同時に公開された18時間に及ぶ土曜講座で、大学の教育・人材育成と社会人再教育のなかで科学技術の社会受容の課題を取り上げたプログラムである。リスク管理策や国際標準化、オープンイノベーション環境下での知財戦略、テクノロジーガバナンスなどの社会受容の課題を、社会人受講生と共に議論する経験は、理工系の学生が社会に出た時大きな資産として活かされるはずで、10年20年後に新

興産業の国際競争力向上に貢献すると確信する。

さて、10年間、120ヶ月に及んだナノテクノロジーへの戦略的研究開発投資のそのまさに最後の月に3.11東日本大震災が発生、福島第一原発の事故が起きた。責任ある科学者の顔が見えず、科学的影響に関して科学者が異なる意見を述べ、科学者への信頼は揺らいでいる。科学技術の問題ではあっても科学技術の方法論だけで解決できない、社会との合議に基づいて意思決定をしなければならない問題はさらに増えてくるだろう。リスク管理や標準化といった社会基盤が整わない段階で、さらに多様な不確実性を有する今後の新興の科学技術の研究開発をどう進めていくか、改めて科学者は社会と真摯に向きあい、コミュニケーションを図っていく必要がある。新興の科学技術に関する社会との双方向コミュニケーションのツールとして、私どもは現在情報誌PENを発行している。「PEN産総研」とキーワードを2つ並べて検索するとアクセスできるので、是非ご購入いただきたい。



阿多誠文(あた まさふみ) 理学博士

- ・民間研究開発部門勤務を経て、2004年4月産総研入所
- ・2005年度文部科学省科学技術振興調整費プロジェクト「ナノテクノロジーの社会受容促進に関する調査研究」プロジェクトリーダー
- ・2006年度経済産業省ナノテクノロジーの社会受容委員会委員長
- ・2007～2009年、内閣府総合科学技術会議科学技術連携施策群「ナノテクノロジーの研究開発と社会受容に関する基盤開発」主監
- ・2011年4月より産総研ナノシステム研究部門ナノテクノロジー戦略室長

温熱環境の快適性から考える都市デザイン

筑波大学芸術系 准教授 橋本 剛

1. 快適な環境を目指して

1970年代初めに名古屋市郊外で生まれた私は、幼少期に身近な生活環境が急変していったのを記憶している。家の周りの田んぼや蓮田は埋め立てられて宅地などになり、雨が降るたびに水たまりができていた未舗装の道路は次々にアスファルトで覆われていった。より快適な環境を目指して土木工事が次々に行われていたある意味華やかな時代ではあるが、子どもにしてみれば魅力的な遊び場としての身近な自然環境が喪失していく寂しさも少なからずあった。

高度経済成長期以降、日本の都市は急速な勢いで高層化・高密度化してきた。都市の高層化・高密度化を支えてきた科学・技術には様々なものが挙げられるが、室内環境の快適性を実現してきた空調、照明、換気、給排水などの機械設備の存在は外せない。機械設備による環境制御の技術が向上するにつれて人間の室内環境に対する要求レベルも上がっていった。かつては健康や生命へのリスクを軽減するための「衛生的な環境」が室内環境設計の目標であったが、機械設備による高次元での制御が当たり前の現代では「衛生的な環境」は最低限の犯すことができない目標として位置づけられ、「より快適な環境」の実現が新たな目標として掲げられるようになった。

しかしながら、こうした人工エネルギーに依存した生活や、建築物の過剰な高層化・高密度化は、快適な室内環境を生み出す代償として屋外環境に多大な負荷を与えており、地球規模から身の回りの生活環境まで様々なスケールでの環境問題を引き起こしている。その一例として、近年夏になると毎年のように話題になる都市の高温化、いわゆるヒートアイランドが挙げられる。

2. ヒートアイランド

ヒートアイランドとは都市部が郊外に比べて高温となる現象で、気温分布図を作成すると等温線によって都市部があたかも島のように描かれることからその名が付けられた。ヒートアイランドの原因は人口の過度な集中とその生活を支えるための都市構造にあり、人体からの代謝による放熱、建築物でのエネルギー消費や交通による膨大な量の排熱、都市化による緑地や水面の減少、地表面

構造の複雑化による日射吸収率の増加と放射冷却の抑制、風速の減衰などの複合影響の結果として現れるものと考えられている。

人が集まって生活をする、少なからず自然界に熱的な負荷を及ぼす。その証拠に、小さな集落の営みであってもヒートアイランドは形成される。図1は福島県喜多方市の下三宮集落で行った小気候観測調査の結果の一例（気温分布図）である。住民基本台帳によると、調査時に下三宮地区では38世帯157人が暮らしていた。集落内の建築物のほとんどは低層の木造である。この東西約250m、南北約250m程度の小さな塊村の気温は、日中において周辺の水田よりも3℃以上高温となっている。あらためて我々の生活が自然界に及ぼす影響の大きさに驚かされる。

ところで、元々ヒートアイランドは風が静穏な冬季の早朝において最も顕著に現れる現象であると言われており、19世紀から20世紀前半のヨーロッパにおける近代気候学では、大気汚染の常態化の要因の一つなどとして注目されてきた。ヒートアイランドが形成されると都心部の高温地域で上昇気流が発生し、上空で冷やされた空気は郊外へと下降する。一方、都心部の上昇気流を補完するように郊外から都心部へと空気が移流する。このようにしてヒートアイランドにより都市と郊外の間で都市ドーム

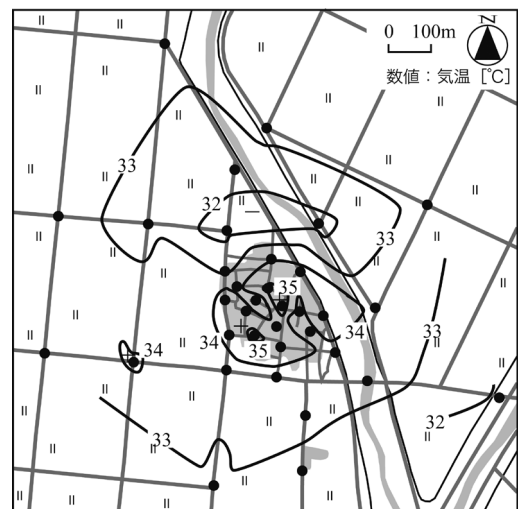


図1 福島県喜多方市下三宮集落における気温の観測結果の一例 (2010年8月28日15時) 水田に囲まれた集落にヒートアイランドが形成されている。

(ダストドーム)と呼ばれる大気循環系が形成される。都市内で発生した粉塵や温室効果ガスなどの大気汚染物質は都市ドーム内に留まり続けることになり、大気汚染がますます深刻化するのである。

一方、現在の日本では夏季の暑熱環境と関連づけて話題になることが多い。東京やその近郊で異常なほど高い気温が観測されたり、熱中症による救急搬送者数が増加するとヒートアイランドに関連する話題として取り上げられる。また、夏季に発生する都市での局地的な集中豪雨の要因がヒートアイランドであると指摘されたりする。都市が「熱くなる」ことも問題であるが、「冷めない」ことも問題である。気象庁などによる観測結果からも、最低気温が年々上昇傾向にあることは間違いない。図2に東京管区気象台における1876年から2011年までの日平均気温、日最高気温、日最低気温の年平均の推移を示す。この推移には、ヒートアイランドによる影響だけではなく地球温暖化などの他の要因も含まれているが、日平均気温、日最高気温、日最低気温ともに上昇傾向であり、特に日最低気温の上昇が著しい。最低気温の上昇は夏季における睡眠障害を引き起こすなど、我々の健康に直接的な影響を及ぼす。冬季の最低気温上昇は、暖房負荷の抑制に繋がるなど一見すると悪いことばかりではないように感じるかもしれないが、生態系への影響などが懸念されている。例えば、冬季の高温化によりこれまで日本では越冬できなかった昆虫が越冬できるようになる可能性もあり、病原菌を伝搬する媒介昆虫の生息域が拡大したり繁殖力が増強すると、我々の都市生活に多大な影響を与える恐れがある。

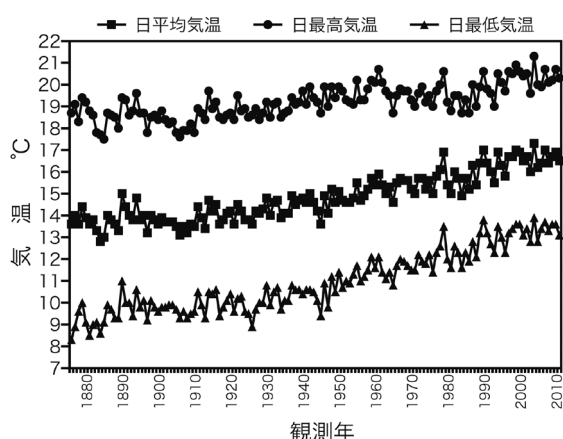


図2 1876年から2011年までの東京管区気象台における気温の観測値

3. 風の道計画

そこで、ヒートアイランドの緩和策として様々な提案が挙げられている。簡単に言ってしまうとヒートアイランド

の形成要因と逆のことを行えばよいわけだが、ここでは少しユニークなアイデアとして風の道計画を紹介したい。風の道計画とは、自然界のポテンシャルにより発生する空気の循環系を活用してヒートアイランドを緩和させようとする都市デザイン手法である。

風の道計画の実践例としては、ドイツのシュトゥットガルトがよく知られている。ネッカー川の谷合に位置し周辺を緑豊かな丘陵地帯に囲まれているシュトゥットガルトはドイツを代表する工業都市の一つであり、自動車産業などで有名であるが、20世紀の都市の急速な発展に伴って大気汚染が深刻な問題となった。そこでシュトゥットガルトでは夜間冷気流を主とした山谷風の循環系に着目し、都市周辺の丘陵緑地から新鮮で清浄な空気を都市へと導く風の道計画を入念な気候観測調査の結果に基づいて立案した。具体的には、連続的な緑地帯を整備・保全する、主風向を考慮して道路を配置する、建築物の高さや形態、隣棟間隔などを規制するといった都市デザイン手法により「呼吸する都市」を実現し、ヒートアイランドや大気汚染の緩和に取り組んでいる(図3)。

日本では、ドイツにおける風の道計画の事例を参考にし、海風を主とした海陸風の循環系に着目した風の道計画がヒートアイランド緩和策の一つとして有効であると考えられており、各地で研究が進められてきている。これは、海風により相対的に冷涼な海上の空気が都市へと移流する現象に着目したものであり、海上から都心部へと続く連続的なオープン空間である河川を都市の風の道として積極的に活用することにより、環境に配慮した快適な街づくりを実現しようとする提案で、夏季の暑熱環境の緩和を目指した都市デザイン手法である。ここでは、早くから研究が実施されてきた名古屋市での観測結果の一例を示す。夏季日中に海風が発達している時には、河口付近と名古屋市北部では5℃以上の気温差が生じており、海風による都市の暑熱環境を緩和する効果が十分に期待できることを示している(図4・5)。また、適度な風が吹くことにより、体感温度を下げる効果も期待できよう。

さて、先日、中国の少数民族である侗族の集落を訪れる機会を得た。そこには風雨橋と呼ばれる木造の橋写

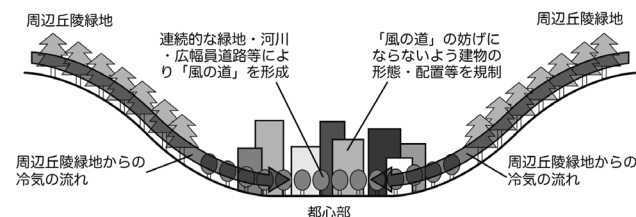


図3 シュトゥットガルトにおける風の道計画のイメージ

真1)があり、川の上を吹く涼しい風を愉しみながら休息をとったり談笑したりする人々の姿があった(写真2)。風の道計画が単なる都市スケールの提案ではなく、ヒューマン・スケールからのデザイン提案という側面を持っていることを示す好事例である。

4. 快適性の再考 ～粋な快適性～

実は、熱的快適性には2つの状態がある。一つは「暑くも寒くもない」という熱的に中立な状態であり、「消極的な快適性」と呼ばれる。もう一つは「心地よい」「気持ちいい」といった感情を伴う快適性で、「積極的な快適性」と呼ばれる。積極的な快適性は、暑い時に風が吹くと気持ちいいと感ずる場合など、温熱環境要素の適度な変化や他の感覚(視覚・聴覚など)との複合的な影響に伴って体感できることが多いようである。これまでは消極的な快適性に関する研究・技術開発が先行的に進んできた感があるが、今後は積極的な快適性についても科学・技術のさらなる進展が望まれる。

最後に、これからの都市デザインについて温熱環境の快適性から私見を述べると、積極的な快適性を感じられるシーンを都市生活の中に積極的に創出し、四季の移ろいや日々の変化を味わい、自然環境との対話を愉しめるような空間設計、すなわち単なる省エネではなく本当の意味でのエコロジカル・デザインが重要であると考えている。また、都市スケールでのデザインとヒューマン・スケールでのデザインを有機的に繋げていく視点も重要だ。前述のように風の道計画はその一例として位置づけることができよう。かつての日本には夕涼みや雪見酒など、消極的な快適性で評価すると多少不快な環境条件でも、それを愉しむ文化があった。そのような快適性の求め方

を私は「粋な快適性」と呼んでいるのだが、粋な快適性を愉しめる空間、自然観、人間関係が文化として日本の都市空間に再構築されることを期待している。

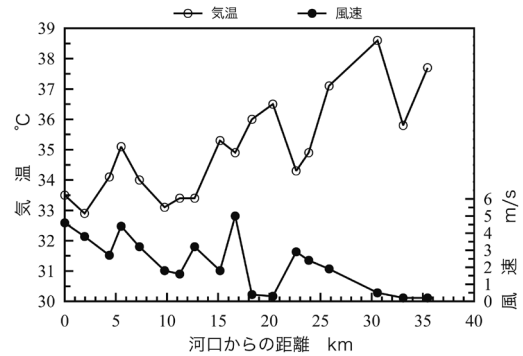


図5 名古屋市の庄内川における気温と風速の観測結果の一例(2001年8月3日14時) 河口から遠くなるほど風速は弱くなり、気温が高くなっている。



写真1 風雨橋(外観)



写真2 風雨橋(内観)

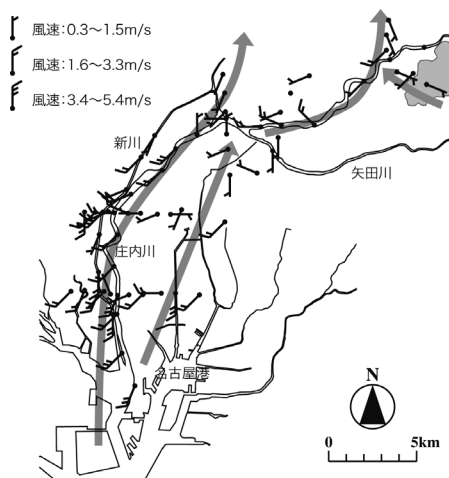


図4 名古屋市の庄内川・新川における風の観測結果の一例(2001年8月3日14時) 河川軸に沿って海風が名古屋市北部へと吹いている。



橋本 剛(はしもと つよし)

専門分野: 建築・都市環境学
1994年名古屋工業大学大学院工学研究科博士前期課程修了。都市計画コンサルタントに勤務後、2004年名古屋工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。名古屋工業大学ベンチャービジネスラボラトリー・講師を経て、2005年より筑波大学大学院人間総合科学研究科・講師。2012年より現職。

ヒューマンエラーの科学

(独) 産業技術総合研究所セキュアシステム研究部門 研究員 中田 亨

1. 人間はなぜ間違えるのか

将棋のプロ棋士は、その読みの深淵さは常人の及ぶところではないが、彼らでもまれに初心者レベルのミスをする。わずか一手先が読めず自玉が詰んでしまうという「一手頓死」などの、信じがたいほど初歩的なミスを犯すのである。プロが簡単なミスを犯すという理解しがたい現象について、そのメカニズムを理論的に説明したり、ミスを予測することは極めて難しい。ましてや、「こうすればヒューマンエラーが絶対に起こらない」という保証を付けることはできない。

しかし、逆に「こうすればヒューマンエラーがほぼ確実に起こる」という事例は数多く知られている。

【問題1】

群馬県の県庁所在地は「タカサキ」であるか、「タカザキ」であるか？

【問題2】

あるお店では、A・B・Cの3つの箱があって、このうち1つだけに賞品が入っているというクジをやっていた。あなたはAの箱を選んだ。残りのBとCのうち、少なくとも1つはハズレであるが、店の人が「Cはハズレでした」とCの箱を開けて見せてくれ、さらに「今ならAをBに選び直してもいいですよ」と持ちかけてきた。Bにかえる方が有利なのだろうか？

【問題3】

ある工場では、表面には数字、裏面にはアルファベットが1文字書かれたカードを製造している。このカードは表面に偶数が書かれている場合には裏面は母音の文字でなければならないという規則があり、あなたはその検査係だとする。今、あなたの作業台の上に図1のように4枚のカードが並べられている。規則が守られているか確かめるには、どのカードをめくって反対側の面を調べなければならいだろうか？



図1：4枚カード問題



図2：4枚カード問題の具体化

問題1は、誘導尋問でよく使われる手口であって、選択肢を不当に操作して誤答を導き出すというものである。正解は「前橋」である。

問題2は、あるテレビ番組のくじ引きのシステムがこうなっていたので、その司会者の名前にあやかってモンティホール問題と呼ばれる。これがある雑誌で取り上げられて、AからBに選び直した方が当選確率が2倍になって有利であるという正解が掲載されたところ、これに納得できない数学者達からの間違った異議申し立てが続出したことでも知られる。

問題3は、Wasonの4枚カード問題として有名である。「偶数なら母音」を確かめるには、「4」のカードをめくって裏を確かめるべきことは明白である。そして、母音の「E」のカードもめくって反対側が偶数かどうかを調べようとするのが普通の人間の考え方であろう。だが、「E」のカードをめくる必要はない。正しくは、論理学でいう対偶にあたる「K」のカードの裏が偶数ではないかを確認するべきなのである。

なぜ、これらの問題に大多数の人間が間違えるのか理由ははっきりしないが、問題内容の具体性が正答率に関与することは分かっている。例えば、4枚カード問題を、カードと文字という抽象的な題材ではなく、「未成年ならば飲酒してはいけない」という身近なルールに置き換えてみよう。4枚のカードは、未成年者・成人・素面の人・酔っぱらいという4人の人物に置き換えることができる(図2)。検査しなければならないのは、未成年者が飲酒していないか、そして酔っぱらいが未成年ではないかである。これは誰でもすぐに正解できる。論理的には全く同じ問題なのに、問題

に具体性が備わると正解率が急激に上昇するのである。

我々人間は、対偶のように初歩的なことすら適切に扱えないほどに愚かであるが、具体的なイメージを湧かせた推論を使えば正解にたどり着けるらしい。たとえて言えば、メインのCPUにバグがあるが、グラフィック処理装置は高性能で高信頼なので、そちらにシミュレーションによる推論を肩代わりしてもらってなんとかやっていけるコンピュータというのが、人間の知能の実像に近いのだろう。

2. 事故とヒューマンエラー

ヒューマンエラーを分析するにあたっては、表1に掲げる三つの原則に立たねばならない。これらの原則は、世間の常識からはやや外れているかもしれない。どの産業分野の統計を調べても、事故のおよそ8割はヒューマンエラーが原因で起こっているという結果であり、ヒューマンエラーは深刻な災いであるかのように見える。

しかしこの統計は怪しい。内実は、機械は故障しておらず、悪天候でもないという状況で事故が起きた場合、事故の原因は消去法で人間のせいにしてカウントしているだけではないだろうか。「作業員Aがあと2秒速くボタンを押していれば事故にならなかったから、事故はAのせいだ」などと悪者探しをする事故調査が横行している。これでは、どんなに機械が扱いにくくても、作業状況が劣悪であっても、その問題は追及されず、作業員が悪かったとするだけで事件が幕引きされてしまう。そして使いにくい機械は放置され、別の事故が引き起こされるだけである。

我々は、ヒューマンエラーが起きた原因を探るべきである。「ヒューマンエラーが事故原因だ」として分析を打ち切ってはならない。

実は「エラー」という言葉も本来は使うべきではない。計測工学では、「エラー」や「誤差」という言葉は使わず、代わりに「不確かさ」という概念で考える。

この考えはヒューマンエラー分析でも見習うべきである。人間の行為には常に不確かさが伴っていて、エラーをゼロにすることはできない。例えば、「長さ10cmの線を描け」と言われて、ナノメートルオーダーまでぴったり正確な線を描ける人はいない。我々の行為から誤差を取り除くことはそもそも不可能である。

しかし、それでも我々が簡単に事故に至らないのは、

行為の結果を反省し、修正して不確かさを押し縮めているからである。線の長さが長すぎても、それを見付けて、問題の無い値に修正して事なきを得ている。こうしたフィードバック制御によって、手遅れになる前に異常を検知して事態を修正し安全を作り出していると言える。

それゆえ、事故を防ぐことに最も有効な能力とは、異常を検知する能力であると言える（表2）。これは常識に反する。作業員全員が熟練者であってミス犯さない能力が十分であれば事故が起きないというのが常識であろう。しかし、これでは他人のミスによる異常を検知して事故を阻止できるとは限らない。たとえミスを連発する初心者であっても、異常を漏れなく発見できる体制である方が安全を作る上で勝る。

もう一つ忘れてはならない能力が、異常の発生箇所を特定できる能力である「間違い源逆探知力」である。この能力には事故を防ぐ力はないが、いざ事故が起きた後には絶大な効果を発揮する。というのも、事故の発生箇所が特定できなければ、原因不明のまま再発防止策も立てようがないからである。

間違い源逆探知力を備えるには、モノや情報の移動を追跡できる体制を整えねばならずコストがかかるが、いざ事故が起きた際の復旧コストを考えれば十分引き合う投資である。それゆえ間違い源逆探知力は間違い検知力に次いで重要な能力と言える。

表1：ヒューマンエラー分析の三原則

1. ヒューマンエラーは事故の原因ではなく、事故の途中経過である。
2. 「ミス」や「エラー」ではなく「不確かさ」と考える。
3. 手遅れになる前に不確かさを修正できれば事故にならない。

表2：事故に関わる人間の3つの能力

力	意味	効果
間違い検知力 (Risk Sensitivity)	間違いが潜在していることを事故が起きる前に発見できる能力	事故件数を減らす。最も重要。
間違い源逆探知力 (Traceability)	問題の発生箇所と汚染範囲を特定できる能力	事故復旧コストを抑える。2番目に重要。
作業成功力 (Dexterity)	間違いをしない個人的技能	普段のランニングコストを抑える。

3. ヒューマンエラーの効用

プラトンの著作のひとつ『メノン』には、ヒューマンエラーが教育に与える効用を示すエピソードが書かれている。プラトンの師ソクラテスがある少年に対して、「正方形の長さを2倍にすると、面積は何倍になるか？」という問題を出した。少年は「2倍になります」と間違えた答えをした。ソクラテスは間違いをとがめず、少年に図3のように描きながら改めて考えるように指示する。少年も、図を見れば一目瞭然、面積が4倍になることを悟ったのであった。

ソクラテスの考えによれば、人間に知識を与えることは難しい。他人が教えても、うわべだけの知識を丸暗記するに留まる。本当に知識を獲得できるのは自分の内部から知った時だけである。この少年は自分の考えに誤りがあることを自力で見付けられたので、知識をしっかりと身につけることができた。

ヒューマンエラーは知識を獲得するチャンスである。科学上の大発見や大発明も、間違いから偶然に発見されたものがたくさんある。失敗実験から生まれた発明には、ステンレスや、ペニシリン、トランジスタなど挙げればきりが無い。導電性ポリマーや蛍光タンパク質などの最近の日本人のノーベル賞受賞研究も失敗の中から偶然に見つかったものだという。

もちろん、単に実験を失敗させればよいわけではない。成功を求めて徹底的に工夫したからこそ、珍しい現象に偶然出会えるのである。平凡な条件で雑な実験して間違えても面白いことは起こらない。ヒューマンエラーは固定観念を打破してくれる効用を持つが、それが意義のある新天地への入り口となるかは科学者のセンスと工夫しだいである。

SFの大家アイザック・アシモフはエッセイ『誤りの相対性』にて、「 $1 + 1 = 3$ 」は間違いだが「 $1 + 1 = \text{紫}$ 」よりは間違いが少ないと述べている。凡人は間違えたり失敗したりすると「正解ではないからダメだ」と簡単にギブアップしてしまうが、偉大な科学者は「間違えたにしても筋は良くなってきた」と相対的に評価できるのであろう。そして、より良く間違える方向に進み、やがて大発見にたどり着くのである。

学校教育では、一つに定められた正解以外は全てバツとする採点をしてしまうが、これはソクラテスやアシモフの意見から見て、はたして有益な教育法なのかと疑問に思う。山本五十六は「やってみせ、言って聞かせて、させてみせ、ほめてやらねば、人は動かじ」

と言った。実際にやってみて、試行錯誤を経なければ、人は学ばない。教えられた正解をオウム返しに答える教育は効果が薄い。間違えることで自力で真実を知る教育を尊重しなければならない。

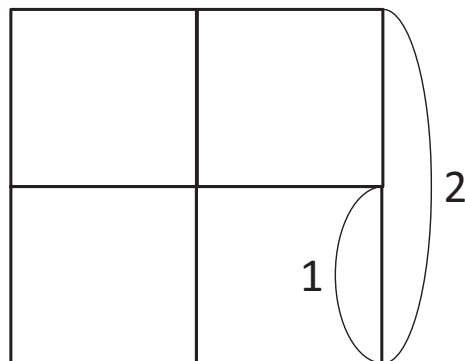


図3：ソクラテスが描かせた図



略歴

2001年、東京大学大学院工学系研究科修了。博士（工学）。同年、独立行政法人産業技術総合研究所に入所。現在、セキュアシステム研究部門、研究員。ヒューマンエラーの研究に従事。著書に、『ヒューマンエラーを防ぐ知恵』（化学同人）、『防げ現場のヒューマンエラー』（日科技連出版）、『事務ミスをナメるな!』（光文社）などがある。
以上

これからの SAT の主な行事予定

<http://www.science-academy.jp/>

○ 2012.11. 8 (金)：SAT つくばスタイル交流会

○ 2012.11.22 (火)：第8回 SAT 賛助会員交流会

企業側：(株)育良精機、(株)つくば研究支援センター
研究側：3件「産官連携による SiC ホトニクスを用いた光スイッチの開発」、「小麦粉・グルテンなしで米粉生地を膨らませる食品加工技術」、「宇宙医学に学ぶ高齢者の健康長寿」

○ 2013. 1.22 (火)：SAT テクノロジー・ショーケース 2013

(ポスター募集中)

リスクの管理技術と偶然

筑波大学システム情報系 准教授 伊藤 誠

1. はじめに

経済が複雑にグローバル化した今日においては、たった一つの事業体が機能停止しただけで、世界中で他企業が混乱に巻き込まれるというケースも珍しくない。このため、天変地異があったとしても、最低限の事業を継続し、早期に復帰する能力を企業は求められるようになってきている。リスクを制御する工学的技術、組織的にリスクを管理する技術の重要性は今や非常に高いものになっており、学界、産業界において研究が進められているところである。リスクの管理は実学であり、筆者の見たところ、実務が理論に先行する場面は少なくない。実例から学ぶことはこの分野における研究の重要な第一歩のようであり、筆者も事例の調査を行っている。

良くも悪くも、リスク管理の結果には、「偶然」が大きな影響を与える。本稿では、リスク管理と偶然との関係について、事例調査の結果を踏まえて、筆者の考えを述べてみたい。なお、本稿では、厳密さにこだわらず、リスクという用語をなるべく広い意味でとらえることとする。

2. Accident

Accident には、「事故」という意味もあるが、「偶然」という意味もある。この「偶然」という意味において、accident と chance とは同義語である。このような意味での accident の多義性は、実に深い意味を持っているように筆者は思っている。

「自分は運が悪い」ということを言いたいときに、「交通事故に遭ったようなものだ」と表現することがある。実際、大腸がんで亡くなったある女性は、自分の死が数か月後に迫ったある日「交通事故に遭ったと思ってあきらめる」と両親に語ったそうである。ちなみに、日本において交通事故でけがをする人は 2011 年で 89.6 万人であり、割合でいうと 1000 人中 9 人弱である。過去に遡ってみても、毎年 100 万人前後、概ね日本人全体の 1% 程度の人が毎年交通事故で怪我をしている(図1)。もし、交通事故がまったくランダムな事象として発生するとするならば、100 年の人生において 1 回は交通事故で怪我をすることは覚悟をしておかなければならないことになる。交通事故に遭うのは運が悪いからだ考えるのは、事故をもらう側ばかりでもなく、第一当事者の側もそのように

思っている場合が少なくない。しかし、事故を起こしたり、事故に遭遇することなく、天寿を全うする人は少なからず存在する一方で、事故を繰り返す人も残念ながら存在するのであり、交通事故は必ずしもランダムな事象であるとは限らない。

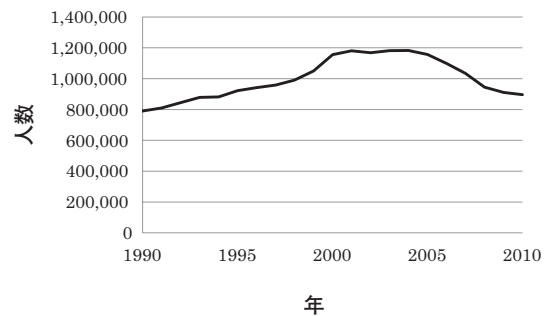


図1 日本における交通事故による負傷者数の推移

事故は accident (偶然) ではない。このことは、旅客機や発電プラント等に代表されるような大規模複雑システムにおいて、とくによく確認できる。過去に発生してきた事故を調べてみると、偶然だけによって起こった事故というものはほとんどない。むしろ、装置のインタフェースが悪くて誤操作をするように「導かれて」しまったり、業務を効率化するために意図的に規則違反を行うなどして、事故はいわば起こるべくして起きている。その意味で C. Perrow は、その著書において “normal accident” という皮肉な表現を用いている。

しかし、結果的に事故を防ぎえた事例を見てみると、不思議なことに、幸運の助けがあったというケースは少なくない。J. Reason も、著書 “The human contribution” において、驚異的なリカバリができたケースでは、幸運が果たす役割が少なくないことを指摘している。このことはどのように理解したらいいのだろうか。幸運によって救われたとみられるいくつかの事例を通して、考察してみようと思う。

3. 御巣鷹山事故とユナイテッド航空 232 便不時着事故

1985 年に発生した JAL123 便の事故では、機体後部の圧力隔壁の破壊によって、舵面を操作するための油圧 4 系統がすべて機能を失った。この当時は、機体メーカーも、エアラインも、油圧系統がすべてダメになるとい

う事態はそれこそ「想定していなかった」とされる。それは、油圧4系統が「偶然」同時にすべて機能を失うという事象は、「無視できるほど小さい」からである。御巢鷹山の事故は、冗長系を持たせたシステムが共通原因故障によって冗長性を失うことがあるということを、明瞭に示した事例であるといえよう。

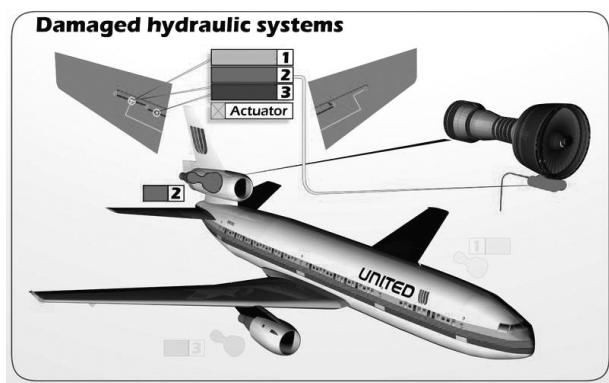


図2 ユナイテッド232便の油圧系統破断 (Wikipedia より転載)

ユナイテッド航空の機長 D.E. フィッチ氏は、御巢鷹山の事故を受けて、油圧系統がすべて機能を喪失してしまったときに何ができるかを考え、エンジンの出力調整で機体をコントロールする訓練を自主的に行ったといわれている。1989年7月19日、フィッチ氏はユナイテッド航空232便(DC-10型機)にたまたま客室に乗り合わせていた。巡航中、同機の2番エンジン(尾翼部)のファンブレードが破壊を起こし、油圧全3系統が破断した(図2)。フィッチ氏は、コックピットに協力を申し出、残る2つのエンジンの出力調整で空港まで機体を操縦することができた。着陸のときに操縦が一部うまくいかなかったことがあり、100人強の死者が出た。しかし、約200名が生還できたことは驚くべきことである。この事例では、たまたま天候が良かったこと、現地の病院等の勤務の交代の時間帯で、救助や手当に多くの人的リソースが活用できたこと、など、「信じられないほど多くの幸運」に恵まれたとされる。そうした幸運の中でも、フィッチ氏がたまたま乗り合わせていたことは、大きな幸運であったといえるだろう。しかし、こうした幸運を活かすことができたのは、クルー間の協調が優れていたからであって、その点こそが賞賛されるべき点である。

これらの事例を、運という視点から考えてみよう。思いもよらない共通原因故障に遭遇する不運の可能性に気付かない、あるいは気づいていないふりをしていると、御巢鷹山の事故のようなことになる。「そういう不運に遭遇したら潔くあきらめ、甘んじて害を被る」という覚悟を

持つ、というのは一つの答えである。保険というシステムは、まさに不運による被害は潔く受け入れて、そのうえでの救済のためにある。問題は、「潔くあきらめる」ということが社会に受け入れられるかどうかである。もし、潔くあきらめることができないならば、そういう不運に遭遇したときにどう行動するかを考えておく必要がある。その場合に考えておくことは、作業手順そのものというよりは、基本的な方針、なすべきことの優先順位、どこまでの権限をだれに移譲するか、ということなどのようである。今日、産業界では多くの企業が事業継続計画(Business Continuity Plan: BCP)を策定しているが、運よく利用できるリソースを上手に活用できたという点において、ユナイテッド航空の事例から学びとれることは数多くあるように思える。

4. 女川原子力発電所の津波対策：女川の奇跡

東北電力女川原子力発電所1-3号機は、2011年3月11日の地震に伴って約13mの津波が襲来したにもかかわらず、原子炉の安全は保たれた。女川町全体としては津波によって壊滅的な被害を受けたことに比べれば、女川原発が全体として安全だったことは奇跡のようである。これは、発電所の敷地が基準水位から約15mの高さにしてあったからである(図3)が、今回の地震でサイト全体が約1m沈降したことを考慮に入れると、15mはギリギリの高さであり、間一髪運よく助かったというべきものである。

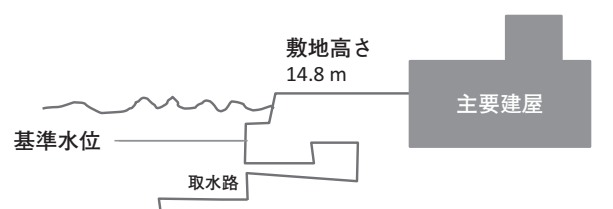


図3 女川原子力発電所の設置高さ

15mの高さに施設が設置されていたということ自体は、一見すると、たまたまそうならただけのように思えてしまうかもしれない。しかし、実際には、女川原子力発電所1号機の原子炉設置許可申請を出す段階で、意図的に約15mという値に設定されていたのである。興味深いことに、設置許可申請当時(昭和45年頃)の津波の評価としては、女川原発の敷地付近では、過去の経験等によると約3m程度の津波しか来ないと見積もられていた(ただし、やや離れたところでは、14m級の津波があった場所があるとされる)。この見積もりにもかかわらず、設置許可申請では、約15mという高さが設定される

ことになった。当時の記録がほとんど残っていないようで、確かなことはわからないのであるが、巷間に指摘されているところによると、元副社長の平井弥之助氏が、「869年に東北地方太平洋岸を襲った貞観地震・津波に言及し、この規模の津波に備えることを強硬に主張した」とのことである。なぜ15なのか、その根拠は今となっては明確ではないが、最新の津波評価（土木学会のいわゆる「津波評価技術」（2002）による）では、女川のサイトにおける最大の津波高さは13.6mとされ、実際に約13mの津波が襲来しており、結果的には実に適切な値であった。

この平井弥之助氏は、電力業界の伝説的な人物の一人で、設置高さ以外にも、「引き波で海底が露出して海水を汲み上げる冷却水ポンプが空転することがないように備えることを訴えた」などの逸話が残っている（実際、取水路が建屋に向かって低くなっていくように作られていて、今回の震災でも冷却水の確保に功を奏したとされる）。今回の「女川の奇跡」に対して平井氏を賞賛する声は少なくないのであるが、筆者としては、東北電力に組織としての優れた点があったと思われる点を指摘しておきたい。1号機の原子炉設置許可申請のために東北電力社内に「海岸施設研究委員会」が昭和43年7月に設置されたが、すでに平井氏は東北電力から電力中央研究所（電中研）に移り、電中研において理事を務めていた。平井氏が設置高さについて発言できたのだとしても、それは海岸施設研究委員会に委員として招へいされたからだといえる。この手の委員会を編成する場合、だれを呼べばどんな議論になるかをあらかじめ見越して人選するのが普通であるから、東北電力が海岸施設研究委員会に平井氏を招いた、ということが重要なポイントであったろうと思われる。また、15mという提案に対しては、社内でもいろいろ異論があったとのことであるが、最終的に15mを了承したのは、あくまでも当時の社長の判断であり、組織としての判断である。東北電力が組織としてこうした判断ができた背景には、何があるだろうか。平井氏自身、地元宮城県の出身であることに加え、昭和45年当時の原子力関係技術管理職名簿を見ても、仙台高専等出身者が3名いるなど、地元の土地勘があり、肌感覚で津波の怖さを知っている技術者が多かったのではないかと考えられる。さらには、本店がある仙台から女川原発までは直線距離で60km程度に過ぎず、本店にいても「地元」感が強く感じられるということもあるのかもしれない。東京新聞2012年3月7日の記事に、元東芝のプロジェクトマネージャーのコメントとして「東北で津波を考えなかったら何をやっているんだということ。そうい

う雰囲気は東北電力内にあった」との記載がある。このコメントは、こうした技術者の「地元」感の表れではないかと筆者は考えている。2004年のスマトラ沖地震と、2011年の東北太平洋沖地震とで、日本社会に与えたインパクトの大きさを比べてみれば、「地元」感は安全対策の動機づけにとって極めて重要であると筆者は思う。なお、東北電力における津波対策への熱意の高さは、原子炉設置許可申請書の添付資料において、津波に関する検討の状況が詳細に述べられている点に如実に表れている。

5. 幸運を活かすリスク管理

ユナイテッド航空の事例では、フィッチ氏が乗り合わせていたという偶然があったが、その偶然が活かされるためには、シミュレータで油圧喪失時の操縦訓練を行うなど、背後に長期にわたる様々な取組がなければならなかった。偶然にたよってはリスク管理はできないが、いざというときに利用できるものをすべて利用できるようにするための知識やスキルの積み重ねが重要である。

女川の事例では、結果的に今回の震災では運よく水没を免れたが、それは将来を見越した40年以上も前の取り組みが結実したものである。

いつ、何の役に立つのかわからない取組を地道に積み上げていくことが、いざという時のリスク管理に役立つ。日頃の活動のなかに、そうした取り組みをいかに組み込んでいけるかが、今後の課題であるように思われる。



伊藤 誠（いとう まこと）

1996年3月 筑波大学大学院 博士課程 工学研究科 電子・情報工学専攻 退学
 1996年4月 筑波大学助手 電子・情報工学系
 1998年10月 電気通信大学助手 大学院情報システム学研究科
 1999年3月 博士（工学）（筑波大学）
 2002年4月 筑波大学講師 電子・情報工学系
 2008年8月 国立大学法人筑波大学大学院システム情報工学研究科准教授

科学の散歩道

東京スカイツリー® 建設について ～世界一への挑戦～

株式会社大林組 技術本部企画推進室 田村 達一

高さ 634 m の「東京スカイツリー」は、2012 年 2 月 29 日に無事竣工し、同年 5 月 22 日の開業以降、想定を上回る入場者数を記録し順調な滑り出しを見せている。この「人気」は実は建設中から発生し、日に日に高くなる姿を見に訪れる沿道の衆人環視のもと工事を進めるといふ、大林組にとっても経験のない状態を生み出した。その時しか見ることのできない「途中の姿」が「世界一の高さ」という話題性と相まって興味を引いたものと思われるが、何人の方が毎日観察レポートをブログに綴られたのは、見るたびに姿を変える「変化の速さ」が「外側から見て楽しい」状況を生み出した気がしてならない。しかし「内側」で行われていた事は、3 年半余りで完成を目指す「未知の高さ」への「失敗の出来ない困難なチャレンジ」であった。これまでの高さ 240 ～ 250 m の超高層ビルが 3 年程度で建設されたことを考えると、その倍以上の「速さ」が必要となるからだ。

元々日本の建設会社は「やったこともない工事の費用と工期を事前に約束してしまう」という「請負業」を生業としているため、全ての工事が「チャレンジ」となるが、東京スカイツリーはそのチャレンジの度合いが群を抜く。風速 10m/s 以上の風が吹くとクレーン作業は中止となるが、未経験の領域では高くなるにつれ強さを増す風によるその頻度はまったく読めない。そしてその時間との戦いの中、相手にするのは、これも誰も経験の無い、大型のパイプとパイプが複雑に精緻に組み合わされる鉄塔の構造体だ。しかも、鉄塔が故の落下物を遮る床と壁がない中で、絶対に周囲に物を落とさない安全な施工が求められる。

当社はこの難題を昼夜作業などの力技ではなく技術を駆使して解決した。もてる英知を結集してシナリオを作成し、想定しうる全ての状況に対応策を準備して臨んだ結果、計画通りに東京スカイツリーを竣工させることが出来た。その概要を紹介する。

基礎杭の構築

東京スカイツリーは高さに対して足元の幅が狭く、風や地震で水平に揺すられると、倒れないように踏ん張る足元に大きな押し込み力と引き抜き力がかかる。そこで、これに負けず強固に支える基礎杭が必要となる。この問題を効率よく解決するため、当社が開発した「ナックル・ウォール工法」(図 1) という独自技術が採用された。壁状の杭がタワーを支える硬い地盤に 15 m 貫入し、その部分に節状のナックルをつける。これが硬い地盤に引っ掛かり、世界

一の高さをしっかりと支えるのだ。ナックルの効果の分、壁の厚みや長さを減らせるため、掘る土やコンクリートの量が少なくて済むので効率的で施工期間の短縮も可能となる。

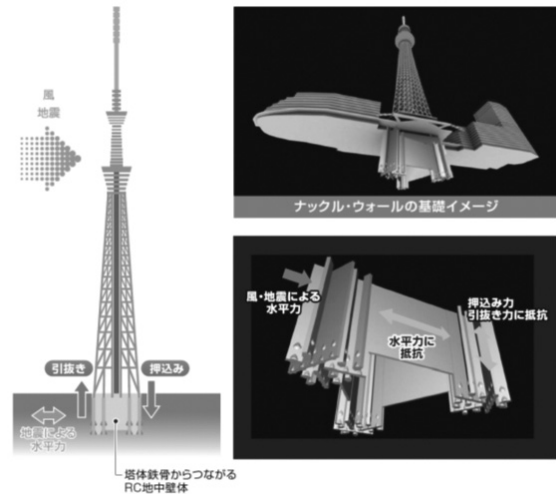


図1 ナックル・ウォール工法

ゲイン塔の設置

地上デジタル放送用のアンテナ等が取り付けられるタワー最頂部の鉄塔「ゲイン塔」は、地上 500 m を超える高さに位置する。そのため、風や湿度などの自然条件に対する工程確保のリスクが最も大きくなり、無理をすれば、安全・品質にリスクが及ぶ。この最大の難関には「リフトアップ工法」(図 2) で対処することとした。勝ち目の無い上空での自然との闘いを回避し、ゲイン塔の組み立て作業自体を地上で行うという逆転の発想だ。

ゲイン等を支える鉄塔本体中央の狭い空洞内で全長約 240 m (下部避難階段含む)、総重量約 3,000 t に達するゲイン塔を鉄塔本体と同時に組み上げ、鉄塔本体頂部に設置したジャッキを用いて 634 m まで引き上げるという方法だ。これは前代未聞のスケールであり、未経験要素も多く、技術的難易度は増すことになるが社内に蓄積された技術により勝算ありと判断し採用を決定した。

実施までには総力を挙げて取り組み、組み立て装置の開発、全体を吊ったままでジャッキを上部へ移動するなどのリフトアップ装置の工夫、組み立て時における精度確保方法の確立、施工中の風や地震に対する安全性の確保など、問題を一つひとつクリアし成功へと至った。また、リフトアップ終盤の工事安全上最も不利な条件で発生した東日本大震災に耐えたことは、計画の確かさを図らずも実証する結

果となった。

このリフトアップ工法は、上空のリスク低減だけでなく、周りの鉄塔本体の組み立てと並行して行えることによる大幅な時間短縮にこそそのメリットがあり、これ無くして全体の超短工期施工は成立しなかった。

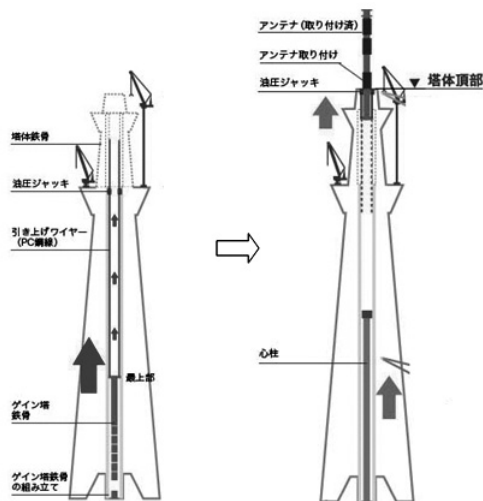


図2 リフトアップ工法

心柱の構築

いいことずくめのゲイン塔のリフトアップ工法にも欠点がある。地上で組み立てるためのスペースを確保するため、タワー中央部にある鉄筋コンクリート製の「心柱」の施工を、ゲイン塔のリフトアップ後としなければいけないことで、これが間に合わないと全体工程が成立しない。

「心柱」とは、地震時などに制振システムとして機能する筒状のコンクリート構造物。構造的に塔体と分離して「重り」として機能し、タワー本体と別々の動きをすることで揺れを打消し合う、設計上の大きな特徴の一つとなる新しい制振システムだ。

この心柱の施工に残る時間は半年余りで、この期間で東京タワーよりも高い375 mの鉄筋コンクリート構造物をつくらなければならないのだ。これを可能としたのが、当社の保有技術、スリップフォーム工法だ。

コンクリートを流し込むための型枠と作業床が一体となった装置を滑り上げながら上昇させ、連続的にコンクリートを打設する工法だ。毎日コンクリートを打ち続け、中央に残る限られたスペースの中だけで作業が可能のため、この短い期間での施工が可能となる。

こちらも、早く固まる高強度コンクリートの開発や施工中の地震対策などスカイツリーならではの難題の一つひとつクリアし、高さ200 mを超えていた施工途中の東日本大震災にも計画通り耐え、無事終了した。

鉄塔本体鉄骨の構築

劇的な工期短縮に貢献するゲイン塔と心柱の特殊な工法

の組み合わせが、いわば大技であるのに対し、最後に忘れてはならないのが、高さ約500 mまでとにかく積み上げるしかない鉄塔本体の構築だ。通常の超高層ビル建設の倍程度の速度を、全工程中もっとも長い1年8ヶ月の期間維持し続ける。この忍耐の要るチャレンジにはいわゆる小技の集積をもって臨んだ。

鉄塔本体の構築は、まずは一つひとつ形状の違う3万7,000ピースに及ぶ鉄骨が現場の工程に合わせ高精度に工場で製作される事が重要となる。ほとんど製作実績が無く難易度の高いこの鉄骨製作は、製作能力や製作速度に配慮して発注先の選定が行われ、全国19の工場に分散された。そしてこれらの工場と一体となった品質の作り込みやスケジュール管理などのマネジメントが当社現場職員の腕の見せ所となった。

次にこれを効率的に現場で組み立てる。その鍵となるのはタワークレーンだ。30 tもの鉄骨を吊上げる高能力にもかかわらずコンパクトな機種に、未知の高さ対策を施した特注クレーンを高密度に建物上に載せられるだけ配置し、揚重作業全体のスピードアップを図った。またそのクレーンに供給する揚重用資機材が途切れて各クレーンの稼働効率が落ちないように、荷捌きヤードを立体化して必要なスペースを確保した。

作業効率と安全を両立させる仮設足場も新しく考案した。特に絶対に物が外に落ちないように、全ての作業がネットの中で行えるように配慮した仕組みとした。

職人の高度な技量をサポートし、更に効率化を図るためのハイテク技術も開発し投入した。鉄骨の組み立て精度の計測調整を効率化する独自システム、強風等の気象条件による作業中止を時間単位で予測し、搬入や作業調整に活用するための、現場上空の高さ毎の週間気象予報システム、急な地震や雷、強風を察知し作業員の安全を確保する警報システムなどである。

他にも細かい問題は数限りなく存在したが、盲目的に慣習に倣うことをせず、その意味をゼロから考え直し、施工中も関係者が一体となり問題の抽出と解決を行い続け、決められた期間を予定通り走りぬいた。こうして工期遵守を大事な商品とする当社の伝統はまたも守られ、未知の工事に恐れずチャレンジするDNAが再確認できたと思っている。そういうチャレンジ精神が、当社の新しいパワーになると信じている。



田村 達一（たむら たつひと）

株式会社 大林組
技術本部企画推進室 部長
1986年株式会社大林組に入社。現場での施工管理や工事計画部門を歴任し東京スカイツリーの工事計画にも参画。2008年より現職で最先端の技術開発業務に従事。宇宙エレベーターのプロジェクトチームの一員

研究室レポート

再生医療のための新しい生体材料の研究開発

(独) 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
生体組織再生材料ユニット長 陳 国平

はじめに

けがや病気で失われた生体組織をもと通りに再生し治療する再生医療が近年注目されている。再生医療が実現すれば、ドナー臓器の不足など従来の治療法が抱えている問題が解決されるため、大きな期待が寄せられている。筆者のグループでは、再生医療の実現に寄与するため、大きな組織欠損の修復に役立つ多孔質材料や、再生医療で重要となる幹細胞の機能を制御するための材料の開発を行っている。以下では研究開発の概要を紹介する。

1. 多孔質足場材料の研究開発

大きく欠損した組織を修復するには、体内で徐々に吸収される多孔質材料が役立つ。このような材料は組織が形成されるまでの間、細胞の足場の役割を果たすことから足場材料とよばれる。組織再生を効率よく行うためには、多孔質材料に細胞を均一に分布させる必要がある。そのためには、多孔質材料の空孔の形や大きさ、空孔どうしのつながり具合などを制御することが重要である。ところが、従来の材料では、表面の空孔が閉じている場合や内部の空孔が孤立してしまう場合があった。このような場合、播いた細胞は均一には分布せず、結果として再生される組織も不均一になってしまう。そこで本グループでは、氷の微粒子を空孔の鋳型として用い、「表面に漏斗状の開いた空孔をもつ多孔質材料」を開発した。この材料を用いて軟骨細

胞を均一に分布させ、軟骨組織を効率よく再生することに成功した。さらに最近では、氷の鋳型の配置を自在にコントロールすることによって、表面の空孔をマイクロパターン状に形成させた多孔質足場材料の開発にも成功している(図1)。

またわれわれは、「生体吸収性高分子骨格材料とコラーゲンスポンジを複合化した多孔質足場材料」を開発した。従来、多孔質足場材料の原料には、乳酸/グリコール酸の共重合体(PLGA)等の合成高分子材料、およびコラーゲンなどの生体由来の高分子材料がよく用いられている。合成高分子材料は力学強度が高く、化学組成の調整により分解期間を制御することができるが、細胞の接着性や増殖性はすぐれているとはいいがたい。一方、生体由来のコラーゲンは細胞の接着性と増殖性にすぐれているが、力学強度が低い。そこで、PLGAのメッシュ状の骨格材料にコラーゲンのマイクロスポンジを複合化した多孔質足場材料を開発した(図2)。

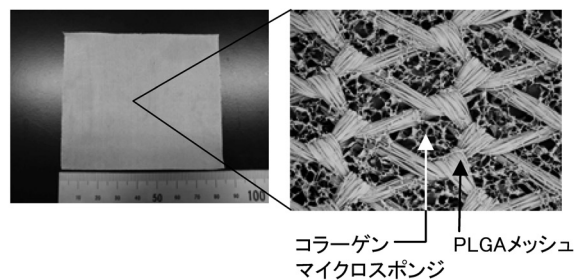


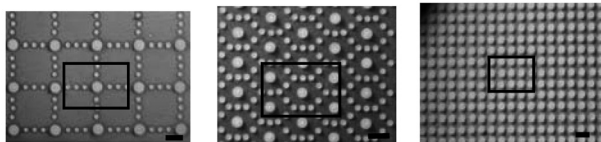
図2 コラーゲン/PLGA 複合多孔質足場材料
(右の写真は電子顕微鏡像、メッシュの隙間は数百μm)

コラーゲンとの複合足場材料では、PLGAのみの骨格材料に比べ細胞がよく接着し、増殖した。また、コラーゲンのみの足場材料に比べ高い力学強度を示した。この複合足場材料は軟骨や真皮などの組織の再生を促進し、再生医療のための有用な足場材料と期待できる。

2. 自家足場材料の研究開発

前述のように、足場材料の原料として、生体吸収性合成高分子や天然高分子がよく用いられている。一方、

パターン状氷微粒子の鋳型



コラーゲン多孔質足場材料

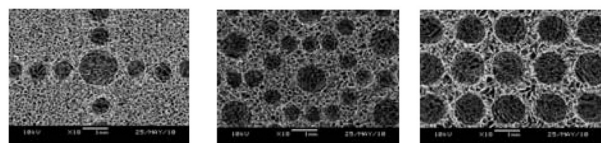


図1 パターン状の氷鋳型を利用して作製した多孔質足場材料

生体内で細胞を取り囲む環境はきわめて複雑である。細胞外マトリックスはコラーゲン、糖タンパク質、プロテオグリカンなど多種類の分子で構成されている。従来の足場材料では、生体内で細胞を取り囲む細胞外マトリックスと同様の機能を期待するのは困難である。また、生体組織や臓器を脱細胞化して得られたマトリックスの大部分は同種あるいは異種の動物からの組織が用いられ、免疫・炎症反応が起こることが多い。そのため、免疫・炎症反応のない自家細胞由来のマトリックス材料が待望されている。

われわれは、三次元細胞培養技術と材料技術を組み合わせ、「自家細胞由来のマトリックス材料」を開発した。選択的に除去できる鋳型を用いて患者自身の細胞を培養し、細胞外マトリックスを形成させた後、細胞成分と鋳型を取り除くことにより、自家細胞由来のマトリックス足場材料を作製した。マウスの皮下移植実験から、自家細胞由来のマトリックス足場材料は宿主組織により異物と認識されずに周辺組織とよく結合し、非常に高い生体親和性を示した。

3. 組織発生模倣型マトリックス材料の研究開発

細胞外マトリックスが幹細胞の分化を制御して組織形成と維持に深くかかわっていることが近年注目されている。幹細胞の分化制御における細胞外マトリックスの役割を理解することは、再生医療のための幹細胞機能制御技術の確立や骨粗しょう症などの疾患メカニズムの解明に不可欠である。細胞外マトリックスはその組成をダイナミックに変化させ、幹細胞の機能を制御しているが、十分には明らかにされていなかった。

われわれは、組織ができる過程で変化する細胞外マトリックスを模倣した材料を開発した。骨や脂肪のもととなる骨髄由来の間葉系幹細胞が骨芽細胞や脂肪細胞に分化する段階に対応する細胞外マトリックスを模倣した。骨分化初期マトリックス上では、間葉系幹細胞から骨芽細胞への分化が促進され、脂肪分化初期マトリックス上では、脂肪細胞への分化が促進された。この「生体組織発生模倣型マトリックス」は、幹細胞の分化を制御する材料開発に今後有用な知見を与えるものと期待している。

4. マイクロパターン化材料の研究開発

幹細胞の機能に影響するファクターの検討は、再生医療に関連する重要課題のひとつである。しかし従来

の方法では、別々の培養皿で細胞培養が行われていた。同一材料内で種々のファクターを変えて細胞を培養するほうがデータの直接的な比較が可能である。

われわれは、光反応性の高分子を合成し、光リソグラフィ法により、機能性高分子や生理活性物質をマイクロパターン化した細胞培養材料を開発し、幹細胞の形状や接着、増殖、分化などの機能を制御する研究を行っている（図3）。

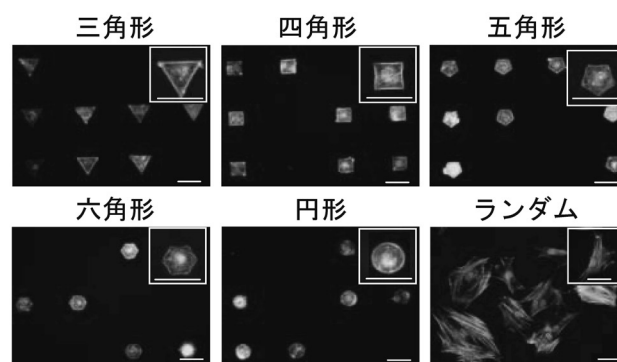


図3 マイクロパターン化材料による幹細胞の形状制御（スケールバーは50μm）

おわりに

これまでいくつかのプロジェクトを通じ、つくば地区の大学や研究機関と共同研究を行ってきた。また、TX テクノロジーショーケース in つくばに参加させていただき、実に様々な分野の参加者と交流することができた。このような交流の中から、新しい発想にもとづく再生医療用材料が開発されることを期待している。

陳 国平（ちん こくへい）

1997年 京都大学大学院工学研究科博士課程材料化学専攻修了、博士（工学）
奈良先端科学技術大学院大学、工業技術院の博士研究員を経て、
2000年 工業技術院産業技術融合領域研究所・研究員

2001年 独立行政法人産業技術総合研究所ティッシュエンジニアリング研究センター・研究員/主任研究員、

2004年 独立行政法人物質・材料研究機構生体材料研究センター・主幹研究員、

2007年 独立行政法人物質・材料研究機構生体材料センター・グループリーダー、

2011年4月より現職、専門分野 再生医工学、生体材料学



賛助会員企業訪問記

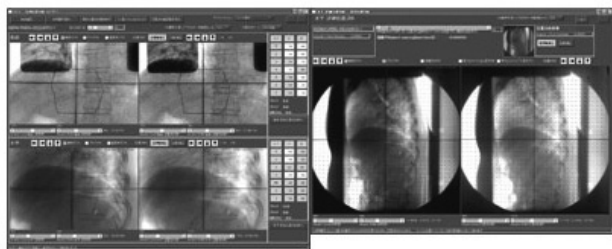
②⑤ ペンギンシステム株式会社

<http://www.penguins.co.jp>

ペンギンシステム(株)はソフトウェアの会社、数年前からつくばで頑張っておられます。ソフトというと、私(溝口)も現役時代、微分方程式や代数計算などのプログラムは作ったことがあります。現在ではワープロや表計算ソフト、通信用ソフト、ゲームソフト、動画ソフト・・・と、非常に複雑そうで、とても近づけないような気がします。ペンギンシステムでは研究支援ソフトの開発を中心にしておられるようですが、そもそも研究支援ソフトとはどういうものなのでしょうか?そのイメージをクリアに把握し、できれば学術間、産学間連携のきっかけを提案できるようにしたい、そんな思いでインタビューをお願いし、平成22年5月31日、つくば研究支援センター内の同社をお訪ねしました(溝口、野上)。同社からは、仁衡社長にお付き合いただきました。

(感想) ソフトウェアの会社を訪問するのは初めてのことで、十分なインタビューができるかどうか、ちょっと心配しながら出かけたのですが、2時間に近いインタビューで、研究支援の意味、あるいは支援ソフトの意味がクリアになり、個人的にも良い経験になりました。

第二の創業ということで、研究支援ソフトに特化し、つくばで地道に実績を積み上げてきたという事実は、それ自体たいしたものだと思いますが、まったく知識がない専門分野でも積極的に挑戦し、同じ質問を繰り返さないくらいに勉強するという姿勢には感銘を受けました。仁衡社長は「あくまで支援です」と謙遜しておられましたが、お話を伺っていると、支援を通り越して、実質的な共同研究になっているケースも多いように思えました。また、ある分野で開発されたソフトが、ほかの分野にも適用できる、という可能性も見えて取れました。ソフトウェア開発は、広い分野を横断的に見るという役割を負っているように思えます。これからも SAT に積極的にお越しいただき、交流・連携のひとつの核としてご活躍いただきたく思います。(溝口記)



(独)放射線医学総合研究所で行われている高度先進医療「固形がんに対する重粒子線治療」を支えるべく、どこに放射線を照射するかを決めるための治療現場用ソフトウェアを開発しています。

一抜粋(6)一

<http://academy-fureai/or.jp/>

②⑥ キッコーマン(株)研究開発本部

<http://www.kikkoman.co.jp/>

キッコーマンといえば、日本人ならだれでも知っている醤油メーカー、千葉県野田市に本社・工場・研究所があり、2年前に本会の賛助会員になっていただきました。野田は昔から醤油で有名です。それには何か理由があるのでしょうか?最近のバイオ技術の進展は醤油作りにどのように生かされているのでしょうか?

平成22年6月28日、同社研究開発本部をお訪ねしました(事務局長野上、コーディネーター溝口)。

キッコーマン(株)の概要ですが、同社は1917年、茂木・高梨・堀切の一族8家が集まって野田醤油株式会社を設立、その後、1964年にキッコーマン醤油(株)に社名変更、1980年にキッコーマン(株)となっています。売上高は約2856億円(平成21年度)、このうち海外売上げが半分近いとのこと。

同社研究開発本部の前身は、1904年設立の「野田醤油醸造組合醸造試験所」で、会社設立以前からあり、既に100年以上が経過という歴史のある組織です。現在はキッコーマングループ全体のために、微生物、発酵、その他環境・安全などのテーマに取り組んでおられます。遺伝子組換え技術にも1980年くらいから取り組んでいるが、診断用酵素の生産などだけに利用し、食品には使っていないとの事です。研究開発はグローバルに展開されており、ヨーロッパ、アジア、アメリカにそれぞれ研究拠点を設立、現地ニーズに合わせた食品開発を進めています。

(感想) 醤油原料の大豆や小麦をどの程度に蒸すのか(あるいは炒るのか)、麹菌をどの段階でどの程度散布するのか、その生育条件は、塩水を加えるタイミングは?・・・、細かく見ると質問がいくつでも出てきそうです。技術の根幹に触れる可能性があり、こういった質問は遠慮したのですが、お話を端々に、伝統企業の自信が垣間見えました。しかし「おいしい記憶」が世界中に広がるためには、原料と気象条件にあった地域ごとの製法を確立していかなければなりません。世界戦略として、そのような試みに挑戦しておられるキッコーマンさんにエールを送りたいと思います。

時代が違くと味覚も違って来ようにも思えます。伝統技術をベースにして、時代にあった技術を作り上げていくことも大切なのではないのでしょうか。そのようなときに、他分野の技術・考え方が役に立つのではないかとされます。交流、情報交換はそういう意味で重要でありましょう。我田引水ですが、SATの存在意義を確認させていただく有意義な賛助会員訪問となりました。(溝口記)



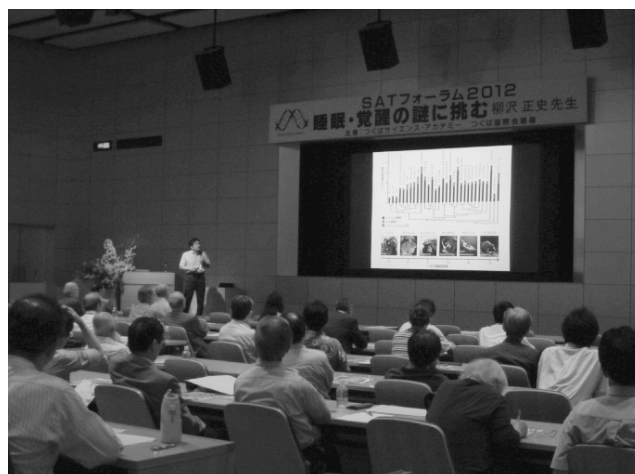
SAT フォーラム 2012 を開催

平成 24 年 7 月 6 日(金)、つくば国際会議場にて【SAT フォーラム 2012】を開催しました。

講師は、筑波大学教授およびテキサス大学サウスウェスタン医学センター教授で、睡眠学研究の第一人者である柳沢正史先生。

テーマは『睡眠・覚醒の謎に挑む』。人々の生活の中にある「睡眠」について、科学的な視点からお話し頂き、ほぼ満席となった参加者の皆さんが熱心に耳を傾けておられました。

「眠り」は全ての人にとって大変身近であるにも関わらず、未だ解明されていない問題が多数あるとのお話でしたが、興味深いスライドを用いて解説され、参加者からは「今度の創薬に期待したい」「睡眠障害の起こるメカニズムについて理解が深まった」などの声が聞かれました。



実験動画等も交え、大変興味深いお話をご披露いただきました



世界を股にかけてご活躍の柳沢正史先生



江崎先生司会で、会場との質疑

第 7 回 賛助会員交流会報告

つくばサイエンス・アカデミー(SAT)主催の第7回賛助会員交流会が、平成 24 年 6 月 21 日(木)午後、つくば国際会議場 404 号室にて開催されました。

SATをご支援下さっている賛助会員企業(SAT ホームページ企業訪問記参照)を中心に、学術サイドの皆さんも含め交流していただくことで、SATの基本的な目標である「知の触発」につながるのではないかと、賛

助会員交流会はそんな趣旨で開催されております。

今回の交流会では、次の3件の企業個別紹介(敬称略)、

- ① ペンギンシステム株式会社:「研究の伴走者としてのシステム開発」

社長 仁衡 琢磨

② (株)筑波銀行：「期待される “つくば力”」

経済調査室長 熊坂 敏彦

③ セルメディシン(株)：「がん免疫療法」

社長 大野 忠夫

および次の3件のつくば研究者側講演（敬称略）

① 「SOI イメージセンサーの X 線応用」

高エネルギー加速器研究機構 三好 敏喜

② 「数値解析技術を用いた競泳用水着の設計手法」

筑波大学大学院システム情報工学科構造エネ

ギー工学専攻 田邊 宙夢

③ 「東北地方太平洋沖地震における鉄筋コンク

リート造建築物の地震動被害」

(独) 建築研究所構造研究グループ 谷 昌典

が行われ、その後、これらにもとづいた総合討論が行われました。

ご講演の概要については、つくばサイエンス・アカデミーのホームページをご覧ください（下記）。

第1部の交流会は、参加者40名、予定を20分以上超過するほどで、充実した内容であったことがお分かり頂けると思います。

6:00pm には、第2部として懇親会（レストラン、エスポワール）が開催され、これには25名にご参加いただきました。いつも言うことですが、まったくの異分野の研究者・技術者が交流することは、つくばでもほかの地域でもめったにあることではなく、本懇親会は非常に有意義なものであると思います。ご講演の皆様、ご参加の皆様、ご協力有難うございました。

（SAT コーディネーター、溝口記）

つくばサイエンス・アカデミー ホームページ

<http://www.science-academy.jp/>



第7回賛助会員交流会風景

SAT ホームページ「生命科学—つくばの研究者群像」案内

<http://www.science-academy.jp/rensai/index.html>

つくばサイエンス・アカデミーのホームページで、「生命科学—つくばの研究者群像」が掲載されております。ぜひご覧ください。

（内容、執筆者敬称略）

推薦の言葉…………… 江崎玲於奈（つくばサイエンス・アカデミー会長）

序…………… 西村 暹（筑波大学生命科学動物資源センター客員研究員）

第1章 「RNA からがん研究へ」…………… 西村 暹

第2章 「RNA の世界」

…………… 富田耕造（産業技術総合研究所バイオメディカル部門 RNA プロセッシング研究グループ長）

第3章 「遺伝情報を制御する」…………… 柳沢 純（筑波大学大学院生命環境科学科教授）

第4章 「酵母の非対称分裂」…………… 入江賢児（筑波大学大学院人間総合科学研究科教授）

第5章 「謎解きの生命科学—偶然の発見からの出発」…………… 深水昭吉（筑波大学大学院生命環境科学科教授）

第6章 「ミトコンドリアっ!! ～素晴らしき彼女らの連携」…………… 中田和人（筑波大学大学院生命環境科学科教授）

つくばサイエンス・アカデミー賛助会員一覧

■企業・団体

アステラス製薬株式会社 筑波研究センター
 荒川化学工業株式会社 筑波研究所
 育良精機株式会社
 株式会社池田理化
 一般社団法人 茨城県経営者協会
 茨城県信用組合
 茨城県発明協会
 インテル株式会社
 (独) 宇宙航空研究開発機構 筑波宇宙センター
 エーザイ株式会社 筑波研究所
 株式会社 S・Labo
 オークラフロンティアホテルつくば
 独立行政法人 科学技術振興機構
 カゴメ株式会社 総合研究所
 株式会社カスミ
 キッコーマン株式会社 研究開発本部
 株式会社クラレ つくば研究センター
 クリタ分析センター株式会社
 株式会社クレフ
 公益財団法人 国際科学振興財団
 コクヨ北関東販売株式会社
 株式会社 Scientific Language

株式会社 JTB 法人東京 営業推進本部
 株式会社 常陽銀行
 関彰商事株式会社
 株式会社セノン 茨城支社
 大陽日酸株式会社 つくば研究所
 高橋興業株式会社
 筑波家田化学株式会社
 株式会社つくばエッセ
 公益財団法人つくば科学万博記念財団
 筑波学園ガス株式会社
 社団法人つくば観光コンベンション協会
 株式会社 筑波銀行
 株式会社つくば研究支援センター
 つくば国際会議場
 つくば市商工会
 ツジ電子株式会社
 テスコ株式会社
 東京化成工業株式会社
 戸田建設株式会社 技術研究所
 株式会社ともゑ
 日京テクノス株式会社
 株式会社日本触媒 筑波地区研究所

日本新薬株式会社 東部創薬研究所
 日本ハム株式会社 中央研究所
 日本エクシード株式会社
 日本電気株式会社 筑波研究所
 日本電子株式会社
 日立化成工業株式会社 筑波総合研究所
 株式会社日立製作所 日立研究所
 不二製油株式会社 つくば研究開発センター
 独立行政法人 物質・材料研究機構
 ペンギンシステム株式会社
 独立行政法人 防災科学技術研究所
 三菱化学株式会社 RD 戦略室 筑波センター
 水戸商工会議所
 公益財団法人 山田科学振興財団
 理想科学工業株式会社 K&I 開発センター
 (59 企業・団体)

■自治体

つくば市
 つくばみらい市
 (2 市町村)

編集後記

山中教授が iPS 細胞の研究で、今年度ノーベル医学・生理学賞を受賞されることになりました。何とも喜ばしいニュースです。

7 月には、「ヒッグス粒子の存在はほぼ確認」との大きな科学ニュースが報じられました。このニュースのもたらす意味について、高エネルギー加速器研究機構の徳宿教授に巻頭言をお寄せいただきましたが、この成果には、日本の研究者や企業が大きく貢献しているとのこと、昨年の東日本大震災とそれに伴う原子力発電所事故以来、科学・技術に対する信頼感が薄れてしまったように思えますが、ノーベル賞といい、ヒッグス粒子の話といい、あらためて日本の科学・技術のレベルの高さを確認する良い機会になったように思えます。

科学・技術は確かに人間生活を豊かにしましたが、それがもたらすマイナス面についてももしっかり目を向けなければなりません。今回の特集「つくばの研究Ⅱ—科学技術のもたらすもの」は、そんな意図で組まれたものです。編集委員会では、つくばの特徴を生かした興味深い記事を提案していただき、ご執筆の先生方からはそれにこたえて、読みでのある原稿をお寄せいただきました。SAT 会員の皆様にも、これからの科学・技術を考えるうえで、大いに参考にしていただける内容と思います。

「科学の散歩道」でのスカイツリーのお話、「研究室レポート」での再生医療用生体材料のお話、それぞれにわかりやすく興味あるお話と思います。編集が終わって、あらためて SAT の活動の大切さが理解できたように思います。

(溝口記)

編集委員

- 内山俊朗／筑波大学 芸術系
- 熊谷 亨／(独) 農業・食品産業技術総合研究機構
- 川添直輝／(独) 物質・材料研究機構
- 角田方衛／(財) 新技術振興渡辺記念会
- 竹中明夫／(独) 国立環境研究所
- 中村英慈／(株) クラレつくば研究センター
- 松崎邦男／(独) 産業技術総合研究所
- 宮本重幸／(株) 日本電気 スマートエネルギー研究所

SAT 編集事務局

- 岡田雅年／つくばサイエンス・アカデミー 副会長
- 後藤勝年／つくばサイエンス・アカデミー 総務委員長
- 篠田義視／つくばサイエンス・アカデミー 事務局長
- 溝口健作／つくばサイエンス・アカデミー コーディネーター

Contents No. 22 October 2012

- 巻頭言
ヒッグス粒子を探す 徳宿克夫 高エネルギー加速器研究機構(KEK)素粒子原子核研究所教授
- 2 ●特集「つくばの研究Ⅱ—科学・技術のもたらすもの」
 iPS細胞への期待
 中村 幸夫 (独)理化学研究所バイオリソースセンター細胞材料開発室
 より豊かな作物品種の育成を目指して
 川岸 万紀子 (独)農業・食品産業技術総合研究機構作物研究所稲研究領域 主任研究員
農地における放射性物質の除染と作物への移行低減 — 農研機構における技術開発の取組 —
 木村 武 (独)農業・食品産業技術総合研究機構 震災復興研究統括監
 風力発電を考える
 岡島 敬一 筑波大学システム情報系 准教授
 ナノテクノロジーと社会
 阿多 誠文 (独)産業技術総合研究所ナノシステム研究部門ナノテクノロジー戦略室
 温熱環境の快適性から考える都市デザイン
 橋本 剛 筑波大学芸術系 准教授
 ヒューマンエラーの科学
 中田 亨 (独)産業技術総合研究所セキュアシステム研究部門 研究員
 リスクの管理技術と偶然
 伊藤 誠 筑波大学システム情報系 准教授
- 26 ●科学の散歩道
東京スカイツリー® 建設について ～世界一への挑戦～
 田村 達一 株式会社大林組 技術本部企画推進室
- 28 ●研究室レポート
再生医療のための新しい生体材料の研究開発
 陳 国平 (独)物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 生体組織再生材料ユニット長
- 30 ●賛助会員企業訪問記 —抜粋(6)—
 ㊤ペンギンシステム株式会社
 ㊤キッコーマン(株)研究開発本部
- 31 ●事務局より
 SATフォーラム2012を開催
 第7回 賛助会員交流会報告
 SATホームページ「生命科学—つくばの研究者群像」案内
- 33 ●賛助会員一覧

表紙：写真提供 CERN アトラス実験グループ

SAT Science Academy of Tsukuba
 つくばサイエンス・アカデミー®
 発行：(財)茨城県科学振興財団つくばサイエンス・アカデミー

事務局

<http://www.science-academy.jp/>

■(財)茨城県科学振興財団つくばサイエンス・アカデミー

つくば市竹園2-20-3 つくば国際会議場内 〒305-0032

TEL:029-861-1206 FAX:029-861-1209 Email:academy@epochal.or.jp

発行日：2012年10月31日

発行人：江崎玲於奈

編集人：岡田雅年 後藤勝年 篠田義規 溝口健作
 内山俊朗 熊谷 亨 川添直輝 角田方衛
 竹中明夫 中村英慈 松崎邦男 宮本重幸