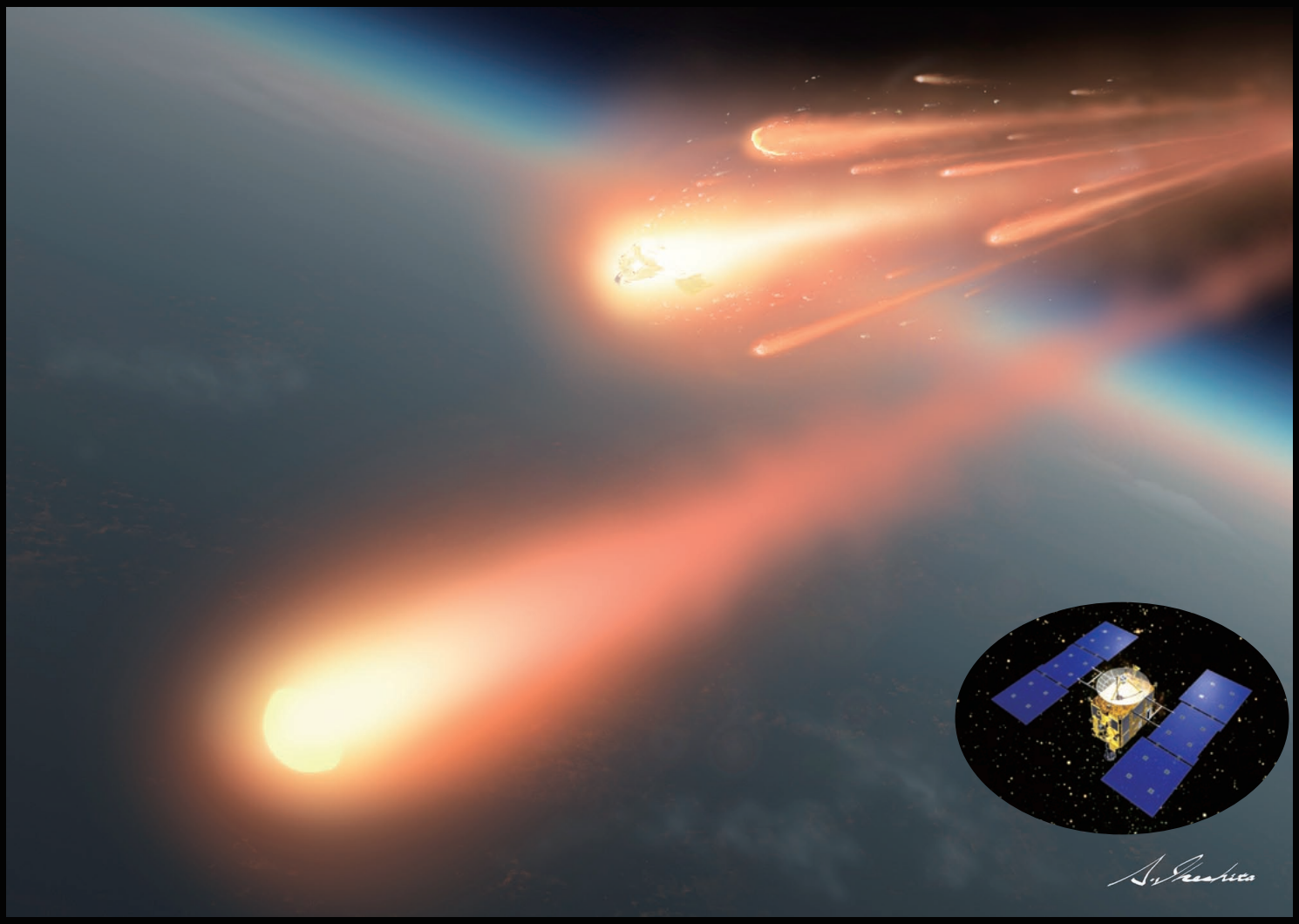
SAT

Science Academy of Tsukuba

No.20
October. 2011
http://www.science-academy.jp/



▶巻頭言：不確実な情報とのつきあい方

▶特集「東日本大震災－科学・技術の役割を考える」

▶科学の散歩道：
電気ロケットの未来～イオンエンジンによる
「はやぶさ」探査機の宇宙往復航行を終えて～

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

巻頭言

不確実な情報とのつきあい方

防災科学技術研究所 理事長　岡田義光

2011年3月11日、わが国の観測史上最大となるM9.0の「東北地方太平洋沖地震」が発生して巨大な津波が押し寄せ、およそ2万人もの死者・行方不明者を生じる未曾有の大災害となった。この地震により、福島第一原子力発電所では重大な機能障害を生じ、放射性物質による環境汚染が今後どこまで拡がっていくのか懸念される。地震災害と原子力災害の同時発生という、かつて経験したことのない深刻な事態を迎え、一般市民の間では科学や技術に対する不信感や懐疑の念が強まっているようだ。原子力技術への信頼感は瓦解し、地震の長期発生予測に対しても、あてにならない、役に立たないとのきびしい声が聞こえる。

わが国では、1995年1月の阪神・淡路大震災を契機として創設された地震調査研究推進本部の方針に沿い、約10年間にわたって全国の活断層および海域で発生する地震の長期予測に関する組織的研究が続けられ、その成果は「地震動予測地図」として世に公表されている。これは、過去の経験に基づいて作成された確率論的なマップであるが、我々の経験は限られているため、どうしてもある程度の不確実性は避けられない。とくに福島県沖や茨城県沖については、これまでM8級地震の発生は知られておらず、沿岸部が今後30年以内に震度6強以上の揺れに見舞われる確率はほとんどゼロに等しいと見積もられていたが、今回は思いもよらぬ巨大地震に襲われてしまった。この場合、非常に確率の低い現象が起こったのだと解釈するのが正しい態度なのであるが、一般の人々からは「外れた」としか見られない。これが高じて、地震動予測地図のすべてが信用されなくなり、近未来の発生が確実視されている東海・東南海・南海地震についてさえ「本当か？」との疑いの声が上がっていると聞く。

だが、これはとんでもない考え違いである。確かに我々の知識はまだまだ乏しく、自然に対しては謙虚であらねばならない。しかしながら、その乏しい知識に照らしてすら、東海・東南海・南海地震の発生は必至である。地震動予測地図のように不確実性を多く含む情報を見る場合、確率の高い場所は本当に危険であると考えるべきだが、一方、確率の低い場所を「安全」だと解釈することは正しくない。不確実性をもった確率の概念を正しく理解してもらうことは、なかなかむつかしい。そもそも確率というのはイエス・ノーがはっきりしない状態であり、人々に不安感をもたらす。100 ミリシーベルトの放射線被曝はガンになる確率を 0.5% 高めるが、それ以下の線量では影響が不明というのも不安だけを残す。このように不確実な情報と、我々はいかにつきあっていくべきであろうか？

岡田 義光（おかだ　よしみつ）

1969 年 12 月	東京大学大学院地球物理学専門課程修了
1970 年　1 月	東京大学助手（地震研究所富士川地殻変動観測所）
1980 年　3 月	国立防災科学技術センター地殻力学研究室長
1985 年　4 月	同地震前兆解析研究室長
1987 年　4 月	同地震活動研究室長
1988 年　4 月	同主任研究官（地震予知総括）
1990 年　6 月	防災科学技術研究所地震・噴火予知研究調整官
1993 年　4 月	同地震予知研究センター長
1996 年　5 月	同地震調査研究センター長
2001 年　4 月	独立行政法人防災科学技術研究所企画部長
2006 年　4 月	同理事長

受賞

■ 研究功績賞（科学技術庁長官表彰）（1993 年）
■ 紫綬褒章「地殻変動の定量的推定モデルの開発」（2006 年）

特集「東日本大震災－科学・技術の役割を考える」

3月11日の東日本大震災とそれに続く東京電力福島第一原発事故、この未曾有の大災害の記録映像を見ると、今でも胸ふさがる思いがする。そしてその被害総額は数十兆円にも達するという。

「日本の科学・技術のレベルは高い」と、国民の多くは思ってきたであろう。しかしこのような大災害に対する備えは十分だったのであろうか？

本特集では、東日本大震災と原発事故に関連し、クローズアップされた諸問題について専門家の意見を求め、復興・防災への科学・技術の役割、科学者・技術者の役割を考えるきっかけとしたい。

執筆者には、震源から離れているとはいえこの大地震に遭遇したつくばの研究者を中心にお願いした。もとより、あらゆる課題を取り上げることは困難であるが、ここで取り上げた8件の各分野の専門家による分析・問題提起を多くの科学者・技術者に役立たせていただきたいと思う。

（SAT会誌編集委員会）

東日本大震災における防災科学技術研究所の取り組みについて

独立行政法人防災科学技術研究所　アウトリーチ・国際研究推進センター　センター長　橋本　俊幸

本年3月11日に発生した東日本大震災は、地震による家屋の直接的被害はもとより、直後に発生した津波により、北海道から千葉県に至る広い範囲に大きな被害をもたらし、15,000人を超える尊い人命が失われた。また、大規模な津波により、福島第一原子力発電所では、1号機から4号機までの冷却機能が失われ、原子炉建屋における水素爆発の発生や、閉じ込め機能の喪失などの重大な事故が発生し、広範囲にわたり放射性物質が放出され、第一原子力発電所を中心に高濃度の放射性物質に土壌が汚染される結果となった。

今回の大地震は、日本における観測史上最大のマグニチュード（M）9.0を記録する史上まれなる巨大地震であったことはもとより、地震が発生した場合に発生しうるさまざまな震災被害が、映像や写真などでも克明に記録された初めての経験ともいえる。また、都心部における帰宅難民の大量発生や、渋滞、長周期地震動による超高層ビルの揺れなど都市部ならではの問題の発生から、農漁村における、ライフラインや幹線道の不通による物資の途絶、広い地域で発生した液状化など、我が国が抱える防災上懸念される点がいっぺんに現れた。

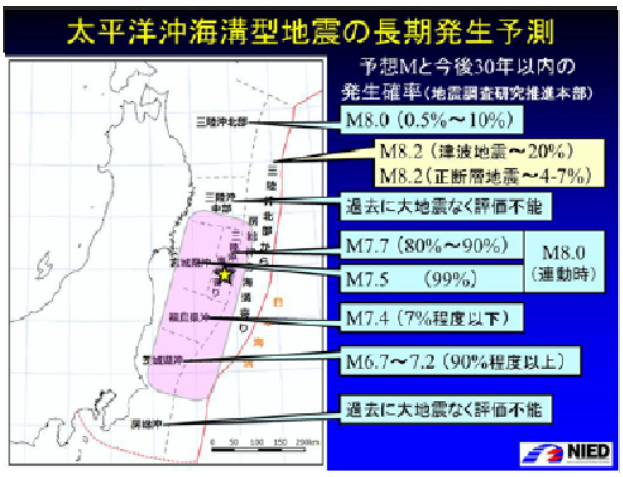
何よりも今回の地震で我々に突き付けられたのは、これまで地震研究で確立されてきたと思われてきた常識が、あっさりと覆させられたということであろう。

本稿では、今回の大震災における防災科学技術研究所（以下：防災科研）の対応状況と、今回の地震で突き付けられた課題について経験も交えて記載する。

1．今回の地震の特性

今回の地震についてはすでに様々なところで説明がなされているため、詳細な説明は省くが、基本的な地震の様態としては、震源は牡鹿半島の東南東約130kmの三陸沖で、震源の深さは約24kmの、プレート沈み込みによる海溝型地震とされている。今回の地震では、破壊の出発点から南北に破壊が広がっていったが、これまで発生してきた地震とは比べ物にならないほど、破壊が進んだ。図に示す通り、震源域は南北約500km、東西約200kmの広い範囲にわたり広がっている。

宮城県沖や三陸沖はこれまでも数多くの地震に見舞われ、長期評価においても、各々の海域において発生が予想される地震のマグニチュード、今後30年間における地震発生確率が詳細に定められている。また、複数の海域が連動した場合の評価も行われている。し



かしながら、今回の地震では結果的に「三陸沖中部から茨城沖までの海溝寄り」を含む巨大な領域を巻き込むものとなったため、地震の強さも桁違いに大きいものとなった。

また、今回の地震では死者・行方不明者の大部分が津波によるものであり、我々に衝撃を与えた。これほどまでに、映像で津波の姿がはっきりと示されたのは初めてであるが、その中でも特徴的だった映像は、津波災害は波の持つエネルギーだけが脅威なのではなく、津波により流される船や、家屋、車なども被害の拡大につながるということであろう。今回の津波災害はまだまだ得られる情報や教訓が数多くあることを示したものといえるであろう。

その他、東京湾沿岸で特に被害が多くみられた液状化現象や長周期振動なども、映像に残ることで初めて、その脅威が一般の者に知られることとなったことは、不幸な災害ではあったものの、意義深いものと思われる。

2. 地震発生による研究所の被害と事業の継続

今回の地震の発生では、防災科研の所在地であるつくば市も、震度６弱を記録する地震に見舞われた。地震発生時刻は金曜日の午後であり、多くの職員が勤務中であったが、揺れは５分近く続き、所内の施設にも被害が出た。幸いなことに負傷者は出なかったが、継続して起こる余震や、執務室内に物が散乱している状況のためであり、一部の者を残して帰宅となった。

また、一帯が停電になったことにより、防災科研のサーバーがダウンするなど、地震波等のデータ供給にも支障をきたすこととなった。ホームページ等についても、サーバーがダウンしたため、二日後の３月 13 日に東京大学の WEB ページを通じて、データ発信等

地震後、書類が散乱する執務室

を行った。また、地震の波形データを収集するための K-NET、F-net 等、Hi-net などの観測網についても停電や通信網のマヒなどにより、一部のデータが途絶するなどのトラブルに見舞われた（津波で地震計等を設置している建屋自体が被害を受けた地点もあった）。

志津川観測点（宮城県南三陸町）

これらの様々な障害の回復や、勤務体制等がおおむね平常時に戻るには１週間近くの時間を要しているが、幸いにも、各職員の尽力により、研究所としての責務を果たすことができたものと思われる。

今回の災害で本研究所にとって、特徴的であったことは、防災を所管する研究機関として、①データ・情報の提供、マスコミその他の機関からの問い合わせへの対応などの、対外対応の責務を果たしつつ、②自らの研究所の活動体制の復旧、という両面作戦を同時並行で行わなければならなくなったことであろう。

大規模災害時に BCP（Business Continuity Plan）を策定することは、企業では常識となってきているが、研究機関などで、同様のプランを詳細に定めている例は必ずしも多くない。緊急事態が発生した直後の対応や手続きについては、おそらくほとんどすべての研究機関がそのためのマニュアルを定めているが、これらは、CP（Contingency Plan）といえるものである。本

研究所のように、発生した災害をリアルタイムに分析し、それらにより得られた情報を適切に発信する役割を担う機関では、事業が継続することこそが最重要の責務である。もし、今回のようなケースが、首都直下型の地震として発生し、研究所の機能のみならず、周辺のインフラも含めて機能を失わせしめることとなったら、どうなるか。今後、研究所としては、このようなケースも考慮に入れつつ、対応方針を定めていくことが必要であろう。

3. 地震発生後の研究所の活動について

地震発生直後から、本研究所は研究所の機能復帰のための活動と並行して、現地調査や、説明会の開催、学会等での発表その他の活動を行ってきた。それら活動の中から特徴的なものを紹介する。

(1) 現地調査

地震発生直後から､本研究所の研究員が現地に入り、被災地の調査を行った。調査の中では、今まで想定されていなかった現象や、現地を見て初めて分かる、復興がなかなか進まない原因などが写真でも確認できる。

がれきを置ける平地が不足するために、がれき処理がなかなか進まない。(6 月 11 日撮影：岩手県大船渡市)

4 階建ての鉄筋コンクリート製の建物が、津波で基礎の杭が抜けて横転。(6 月 12 日撮影：宮城県女川町)

これらの調査結果写真は、所内展示スペースに説明を付して展示している。

(2) 災害復旧支援活動

1995 年に発生した阪神淡路大震災は、ボランティア元年であると同時に、ネットの活用による安否の確認など、災害対応に関する新しい芽が生まれる契機ともなったといわれている。今回の地震では、被災者の安否確認や、ボランティア活動にかかる情報集約、生活情報の発信など様々な場面にネットの機能が活用された。

特に防災科研では、地震発生後 3 日後には、被災地の災害対応や復旧・復興に役立つ信頼できる情報を、全国のさまざまな機関や個人の方々と協働して集約・作成・発信する「ALL311：東日本大震災協働情報プラットフォーム」を開設した。これは、防災科研が開発した､「e コミュニティ・プラットフォーム」を活用し、各種地図・地理空間情報の配信や利用、地震動や土砂災害等の災害情報、震災疎開・避難の受け入れ活動支援をするものである。この取り組みに 30 を超える企業や NPO 団体の協力をいただき、このプラットフォームを軸に、地図・地理空間情報、交通情報、生活情報、避難所マップ、情報災害ボランティア運営支援など、参加者が情報の利活用に積極的に参加してもらうことにより、災害復旧支援をバックアップすることとなった。

また、津波に流された写真や思い出の品々の収集と所有者への返還、災害時の撮影映像・画像などのデジタルアーカイブ化などにより今回の未曾有の災害を次世代に残すため 3.11 まるごとアーカイブスを立ち上げ、積極的に支援を行った。これらの災害復旧支援活動は現在進行形の活動であり､今後も防災科研として、研究所の能力やリソースを生かして支援していくことが求められる。

(3) 今回の地震にかかる、マスメディア等を通じた情報の発信、説明会の開催、職員の派遣

今回の地震のメカニズムや大きな災害については、地震直後から、様々な問い合わせがあった。防災科研は理事長をはじめ多くの職員による地震のメカニズムの説明や、専門家の派遣に積極的に行ってきた。地震発生後 2 週間後の 3 月 25 日には、理事長名で「東北地方太平洋沖地震について(速報)」を発表し、一般の方向けの地震の内容・メカニズムについて発信をした。

さらに、地震発生ひと月後の 4 月 17 日には、東日

緊急報告会（4 月 17 日）の会場内での様子

本大震災への防災科研の研究活動、取り組みのほか、津波、放射線に関するリスクなどについて、他機関の研究者からの講師も招き、「緊急報告会―東日本大震災への対応―」を開催した。この報告会では、市内外から 200 人を超える参加者が集まり、参加者からは真剣な質問が寄せられ、講師からも丁寧な説明が行われ、予定の時間を超えて、質疑が行われるなど活発なものとなった。また、参加者に対するアンケートでも、報告会の内容及びその意義について高い評価をいただいた。

これら活動以外にも、座談会への出席や、防災に関する意見の表明、学会等における発表や論文の投稿などを行ってきたところであるが、今後も防災科研として、今回の地震に対する積極的な発信が求められる。

４．最後に

未曽有の災害を前にして、防災関連機関は大きな衝撃を受けていることは想像に難くない。しかしながら、それに対してニヒリズムに陥ってはならず、国民の生命第一の視点を守り続けなければならない。防災科研も、国民の負託に応えるとともに、高度な研究成果の発信により世界の防災力強化に貢献していくことを肝に銘じたい。

橋本　俊幸（はしもと　としゆき）

1991 年 3 月：京都大学大学院工学研究科衛生工学専攻修了
1991 年 4 月：総理府科学技術庁科学技術政策局　入庁
2001 年 1 月：内閣府原子力安全委員会事務局管理環境課
2003 年 4 月：経済産業省産業技術環境局技術調査室
2005 年 3 月：タイ国家科学技術開発庁政策アドバイザー（JICA 専門家）
2006 年 8 月：独立行政法人理化学研究所横浜研究所研究推進部次長
2008 年 4 月：香川大学産学官連携推進機構社会連携・知的財産センター教授（この間、香川大学学長特別補佐を兼任）
2011 年 4 月：独立行政法人防災科学技術研究所アウトリーチ・国際研究推進センター長

巨大地震による地形変化

国土地理院　地理地殻活動研究センター　地理情報解析研究室長　小荒井　衛

１．はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（M9.0）は、津波による被害をはじめ、我が国がかつて経験したことの無いような激甚な災害をもたらした。国土地理院の電子基準点による連続観測の結果では、今回の地震で最大で水平方向に約 5.3 m、上下方向に約 1.2 m のかなり大きな地殻変動が観測されている。ここでは、地震による広域の地殻変動以外の、地震に伴う局所的な地形の変化について、災害等に結びつきやすいものを中心に簡単に紹介する。

２．斜面崩壊による地形変化

巨大地震の強い揺れにより、大規模な斜面崩壊が発生している。ただし、今回の地震は震度に比較して斜面崩壊は少ない状況で、平成 20 年岩手県・宮城県内陸地震と比較すると極めて少ない。被害の大きい土砂災害は、福島県白河市、栃木県那須烏山市など、沿岸部よりは中通り地方で発生しており、震度や震源域からの距離には必ずしも規定されていない。

白河市で発生した地すべりは、土塊が撹乱されて流動化し、移動距離が比較的長く、かつ、土塊が広範囲に広がった。特に葉ノ木平では甚大な被害が発生し、13 名の死者が出た。葉ノ木平の地すべりを写真 1 に示す。地すべり発生前の斜面は明瞭な地すべり斜面を呈さず、初生的な地すべりと考えられる。発生箇所の地形は、凸型斜面、または凹型斜面の谷頭部であった。

写真 1　白河市葉の木平の大規模斜面崩壊

写真２　（左）標高 90m 付近の変動の状況。（右）斜面上部からの圧縮により側溝が短縮している（国土地理院佐藤浩氏撮影）

３．造成宅地の盛土崩落による地形変化

1978 年の宮城県沖地震（M7.5）では、丘陵地を宅地開発した地域で盛土の崩壊が多発したが、今回の巨大地震でも同様の被害が出た。 宮城県仙台市緑が丘地区の地表変動の状況を写真 2 に示す。同地区は 1957 年に宅地造成が始まり、1978 年の宮城県沖地震でも地表変動が見られている。市内では、緑が丘地区以外にも住宅地の地すべり性地表変動が報道されている。

図 1 は、盛土・切土分布図に調査地点を重ね合わせた図である。この盛土・切土分布図は、2000 年の仙台市数値地図の等高線（10 m 間隔）データから生成した 5 m グリッドの数値地形モデル（Digital Elevation Model, DEM）から、1951 年米軍撮影の空中写真をもとに写真測量の手法で作成した 2 m 間隔の等高線図から生成した 5 m グリッドの DEM を差し引いて作成した図である（新旧等高線データは東北学院大学宮城豊彦教授提供）。赤いほど盛土の厚さが厚く、青いほど薄いかあるいは元の地形が削られた場所を示している。黒点は写真 2 に示したような変動が見られた地点であり、星印は変動が認められなかった地点である。変動の認められた地点は概ね盛土の部分であることが判る。

４．液状化による地形変化

東北地方太平洋沖地震によって、関東地方でも広範囲にわたり液状化－流動化現象が発生し、構造物の傾斜や沈下、地表の段差や陥没、波状変形などの被害が生じた。特に、東京湾岸と利根川下流域で著しかった。

利根川以外でも、つくば市近傍の鬼怒川、小貝川、霞ヶ浦沿岸等で液状化―流動化被害が生じている。このうち、茨城県下妻市鬼怒と千葉県我孫子市布佐の２例を紹介する。現地の被災状況と、時系列地理情報を活用

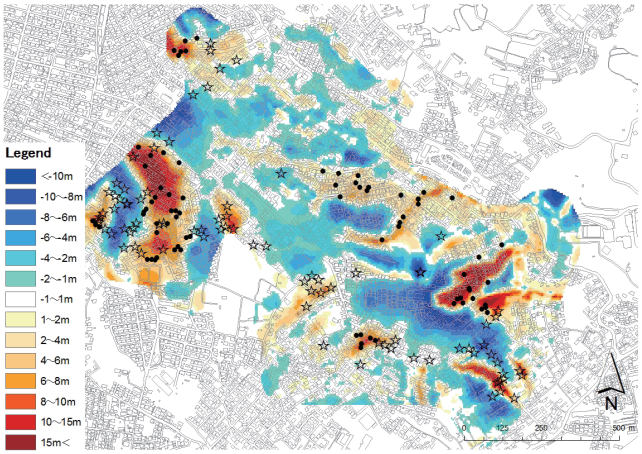


図１ 盛土・切土分布図と調査地点の重ね合わせ。暖色ほど盛上厚が、寒色ほど切上厚が厚いことを示す。黒点が変動、白星が無変動を示す。背景図には国土地理院の基盤地図情報 2500 を利用（佐藤・中埜, 2011）

して土地の成り立ちを把握した結果である。時系列地理情報は Web 等で容易にアクセス出来るものに限定した。活用したものは、迅速測図原図（歴史的農業環境閲覧システムを使用）、過去の空中写真（国土地理院の HP にある国土変遷アーカイブ：http://archive.gsi.go.jp/airphoto/）、土地条件図（国土地理院の HP にある閲覧サービス http://www1.gsi.go.jp/geowww/themap/lcm/）である。

下妻市鬼怒は土地条件図では鬼怒川の旧河道となっている（図 2）。旧河道は地震後の地盤沈下や地下水位の上昇により、旧河道自体が水没したような状況になっている。周辺の道路等の構造物を見ると、10 cm 程度は沈下している。周辺の道路には激しい亀裂や地波現象が発生しており、通行止めの措置がなされている（写真 3）。鬼怒ニュータウンの周辺部の旧河道内の住宅では、埋土の大きな沈下や擁壁の崩れなどにより家屋が基礎から歪んでしまい、大きな破損が生じていた（写真 4）。

図２ 土地条件図「水海道」の一部
楕円部は鬼怒ニュータウン

図３ 迅速測図原図（下妻市宗道付近）
楕円部は鬼怒ニュータウン

写真３　通行止めの道路。亀裂や地波現象が認められる。

写真４　住宅を南西側から撮影。盛土が北西側に傾き、家屋も傾いている。

写真５　裏通りでは電柱が傾いている。

写真６　建物側が沈下し、道路と接する側溝の部分が持ち上がっている。

図４　千葉県我孫子市布佐周辺の被害状況（楕円部は液状化被害集中域）

図５　米軍 1947 年撮影空中写真 USA-M675-1

図６　国土地理院 1962 年撮影空中写真 MKT621-C11-17

この場所は、明治 10 年代の迅速測図原図では鬼怒川の蛇行した本流となっている（図 3）。その後の河川改修で閉鎖された水部として残され、1947 年撮影の米軍空中写真では、旧河道が水田になっていることが確認できる。かなり湿った軟弱な地盤環境下に立地していることなどが、液状化被害をもたらした要因と考えられる。

我孫子市の JR 成田線布佐駅周辺で液状化現象が認められた。液状化の被害が顕著な箇所は限定的である（図 4 に楕円で示す）。噴砂、電柱やブロック塀、家屋の傾動、沈下、地波現象などの深刻な液状化－流動化被害が生じていた。現地調査時点では、道路等は修復されていたが、電柱や家屋の傾きや沈下は手つかずで残されている状況であった（写真 5，6）。1947 年撮影の米軍空中写真を見ると北東－南西方向に延びる細長い水部が存在している（図 5）。今回の地震で液状化が激しかった県道沿いの帯状の箇所が、その細長い水部の箇所に一致している。1962 年撮影の空中写真（図 6）では、その水部に該当する箇所が埋め立てられ住宅地となっている。

このように、旧河道や水部の埋立地などで液状化現象が発生しやすい傾向がある。

５．活断層の活動による地形変化

2011 年 4 月 11 日に福島県浜通りの地震（M7.0）が発生した。この地震は日本では珍しい正断層型の内陸活断層の地震である。このようなタイプの地震は、M9.0 の東北地方太平洋沖地震の発生で応力場が引っ張りに変化したために誘発された可能性がある。この地震で、確実度Ⅱの活断層である井戸沢断層と湯ノ岳断層に沿って地表地震断層が出現した。地球観測衛星「だいち」（ALOS）に搭載された合成開口レーダー

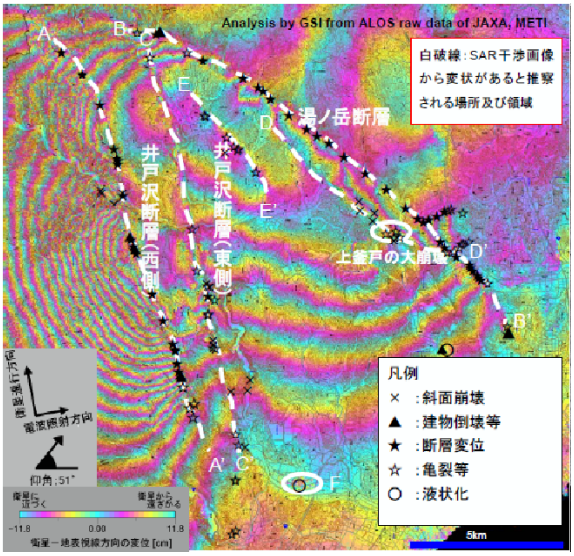


図７　SAR 干渉画像（2011.3.3-2011.4.18）に見られる変位の不連続の分布

写真７　井戸沢断層に沿った地表地震断層（塩ノ平：垂直変位は約 190cm）

（PALSAR）のデータを干渉解析した SAR 干渉画像（図 7）を見ると 5 箇所ほど干渉縞のズレの連続が認められるが、今回の地震による地盤変状と関連性がある。

井戸沢断層（西側）沿い及びその延長部（A-A’）では、干渉縞の不連続が明瞭であり、ほぼ南北から北北西－南南東方向に延びた西落ち（落差最大で約 2 m）の地表地震断層が長さ 10 km 以上にわたり出現した（写真 7）。断層露頭では、断層粘土や破砕帯が確認されており、過去にも活動を繰り返していたものと考えられる。湯ノ岳断層沿い及びその延長部（B-B’）でも干渉縞の不連続が明瞭であり、ほぼ西北西－東南東方向に延びる西南落ち（最大で約 80 cm の南西側低下）の地表地震断層が出現している。一方、井戸沢断層（東側）沿い及びその延長部（C-C’）では干渉縞の不連続は明瞭だが、位相のズレは 1 ～ 3 周期程度と小さい。干渉縞のズレに沿って舗装道路で変位を伴わない 5 cm 程度の幅の開口亀裂や林道を通行止めにする規模の斜面崩壊が認められた。干渉縞のズレが大きい箇所では、未舗装の徒歩道や山間部でも垂直ズレを伴う地表変位が確認された。変位の下には、断層粘土を伴う断層露頭等が確認されており、地質断層の存在が何らかの影響を与えているものと考えられる。亀裂や斜面崩壊が顕著に認められたのは、断層線の近傍のみであったので、東側の断層に沿って何らかの受動的な変位や大きな揺れがあったものと推定される。

このように SAR 干渉画像の干渉縞の不連続部では、不連続のズレの大きさに対応した地盤変状が表れており、SAR 干渉画像は明確に地盤変状を捉えている。依って、SAR 干渉画像は、大地震時の活断層調査などに有効に活用出来る。

６．おわりに

M9.0 の東北地方太平洋沖地震に関連した地形変化について、広域的な地殻変動以外のものを紹介した。造成宅地の危険性については、新旧地形の比較によって盛土の分布を押さえること、液状化の危険性については、古い地図や昔の空中写真等を参照することで、その土地の成り立ちを知ることが重要である。従って、時系列地理情報を有効活用することが重要である。また、活断層の地震についても、近傍の既存地質断層（弱線）等で被害が増幅される傾向があるので、そのような基礎情報を知っておくことも防災に役立つものと考えられる。

引用文献

佐藤浩・中埜貴元（2011）：仙台市の丘陵地における地すべり性地表変動の状況について．日本地球惑星科学連合 2011 年大会予稿，MIS036-P150. http://www2.jpgu.org/meeting/2011/yokou/MIS036-P150.pdf

小荒井　衛（こあらい　まもる）

1962 年生まれ。茨城大学理学部地球科学科卒業。国土地理院に勤務し、地理調査部、測図部写真測量技術開発室長、中国地方測量部長、企画部地理情報システム推進室長等を経て、現職。専門は地形学、第四紀地質学。GIS やリモートセンシング技術を用いた、防災研究や自然環境研究を行っている。博士（理学）、技術士（応用理学）など。

巨大地震による農地・農業用施設等被害と今後の課題

独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構　農村工学研究所　企画管理部　防災研究調整役　鈴木　尚登

はじめに

未曾有の大災害となった東日本大震災は、超巨大地震と併せて巨大津波が発生することで、多くの尊い生命と財産を一瞬にして奪い、国内有数の食糧生産基地の農地・農業用施設等に多大の被害と深刻な傷跡を残した。農研機構・農村工学研究所は災害対策基本法に基づく指定公共機関として、災害発生翌日から農林水産省等の要請で専門家を被災地に派遣し、被災調査や応急対策等の技術支援を行っている。今回の震災を契機とした農業生産基盤の防災・減災対策の再検討が求められる中、その記録を永遠に残し、科学的に分析し、教訓として伝承し、国内外に発信することが重要である。これまでの震災被害情報から、農地・農業用施設等への被災状況を概観し、今後の課題を考察した。

1．震災の特徴と規模

（1）震災の特徴

2011年3月11日午後2時46分頃、三陸沖、牡鹿半島の東南東130 km付近、深さ24 kmを震源とするマグニチュード（M）9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。地震規模は国内観測史上最大、世界でも過去100年間で4番目と言われ、宮城県北部で最大震度7、東北・関東8県で震度6以上など、東日本を中心に北海道から九州にかけて日本列島全体が大きく揺れた。

今回の地震は、太平洋プレートと陸のプレートの境界で発生した海溝型で、大規模な津波が発生し、最高潮位9.3 m、津波遡上高は国内観測史上最大の40.5 mであった。

（2）震災の規模

M9.0の地震は日本列島全体で大きな揺れを引き起こし、その被害は広範かつ多数の都道県に及んだ。図1では、過去4年間で最大震度6強以上を観測した地震を比較している。今回の地震は、推計震度5弱以上が過去3回の約8倍～20倍で、全国土の3割近くが震度4以上の揺れを受けており、我が国全体が如何に超巨大な地震動を受けたかが理解できる。

日本海溝付近の超巨大地震は、太平洋沿岸域約5万6千haに巨大津波による浸水被害（図2）を引き起こした。特に被害が甚大な宮城県では、県土全体の約4.5

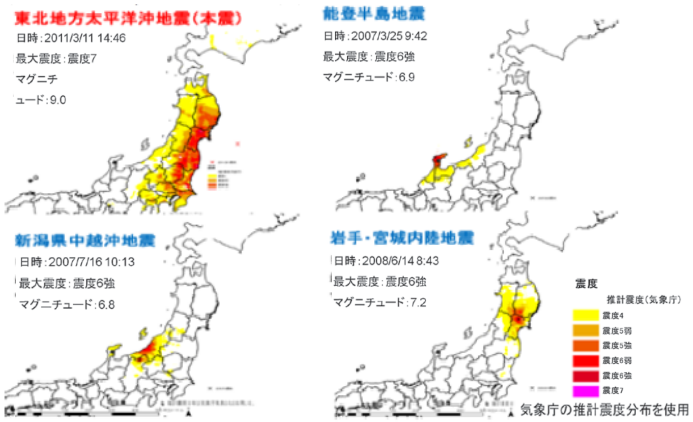
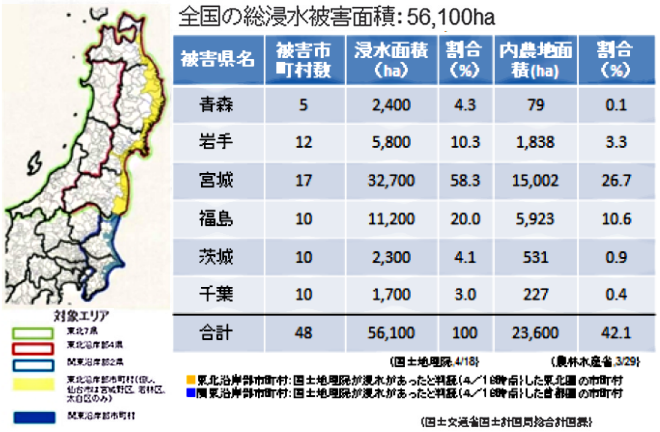


図1　近年生じた地震の比較



被害県名	被害市町村数	浸水面積（ha）	割合（%）	内農地面積(ha)	割合（%）
青森	5	2,400	4.3	79	0.1
岩手	12	5,800	10.3	1,838	3.3
宮城	17	32,700	58.3	15,002	26.7
福島	10	11,200	20.0	5,923	10.6
茨城	10	2,300	4.1	531	0.9
千葉	10	1,700	3.0	227	0.4
合計	48	56,100	100	23,600	42.1

図2　東日本大震災における津波浸水被害

%が浸水し、浸水被害農地全体の約3分の2、県内農地全体の約1割が被災した。

2．農地・農業用施設等の被災状況

（1）震災被害額

今回の震災では農林水産関係で約2兆3千億円もの甚大な被害が生じており、最大震度7の新潟県中越地震時と比較しても約17倍の被害額となっている。内訳は津波による漁船や漁港施設等の水産関係被害が全体の半分以上で、農業関係の農地・農業用施設等被害の3分の1と併せて農林水産関係全被害額の大部分をこの2分野で占めている。図3は、東日本大震災に伴い一箇所当り30万円以上の被害を受けた農地・農業用施設等についての市町村からの報告を集計したものである。被害総額約7,300億円の内、農地での被害額は津波などによって約4,000億円と全体の55%を占

め、被害額全体の 90％強が岩手・宮城・福島の津波被災三県のものである。農業用施設とは、ため池、頭首工（注：河川の流水を用水路に引き入れるための施設）、用・排水路、揚水機などのかんがい排水施設や農業用道路、農地保全施設などで、生活関連とは主に集落排水施設である。

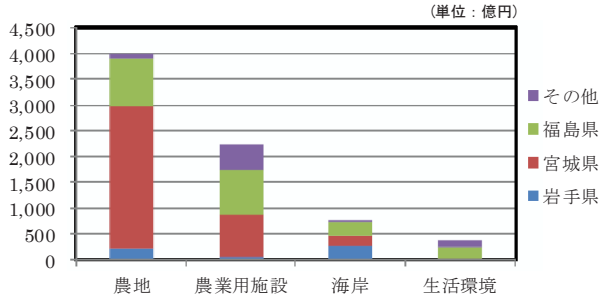


図３　東日本大震災の農地・農業用施設等被害額

データ：東日本大震災被害報告（農林水産省農村振興局 2011 年 6 月 16 日集計）
注）通常、市町村は災害発生後 60 日以内に農地・農業用施設等の被害に関する報告を行うことになっている。今回の震災では被災の甚大さに鑑み、一定の猶予措置がなされ、発表される被害総額は随時、更新されている。

（2）農地・農業用施設等の被災状況

東日本大震災に伴い現在までに全国で 4 万箇所近い農地や農業用施設等が被害を被ったと報告されている。このうち主な被災の状況としては、①大きな地震動による破損・破壊、②津波による海水、ヘドロ、瓦礫の侵入及び破損･破壊、③地盤の液状化による変形･破損などが見られた。図 4 は、農村工学研究所が被災地調査時に撮影した写真である。

図４　農地・農業用施設の被災状況

（その１：地震によるため池決壊）

（その２：津波による農地被害）　宮城県：亘理町

（その３：液状化による農地・水路の被害）　千葉県：栄町

３．被災状況の要因分析

（1）被災程度の地域分布

東日本大震災では広範な地域にまたがって膨大な数の農地・農業用施設等が大きな被害を受けた。中でも津波による被災が極めて甚大かつ集中したこと等から、被害全容を俯瞰することが困難であった。また、地震と津波がそれぞれどの程度被災に影響したかが、明らかになっていない。そこで図５は、被災状況を俯瞰するため、本震災に伴う市町村別被害総額を当該市町村毎の耕地面積（ha）で割り戻し、ランク分けして分布表示することを試みた。津波を受けた太平洋沿岸市町村はいずれも被災程度が著しく高いことと併せ、福島、茨城、千葉の 3 県では津波被害のなかった市町村でもそれに準ずる被害が発生していることが明らかとなった。

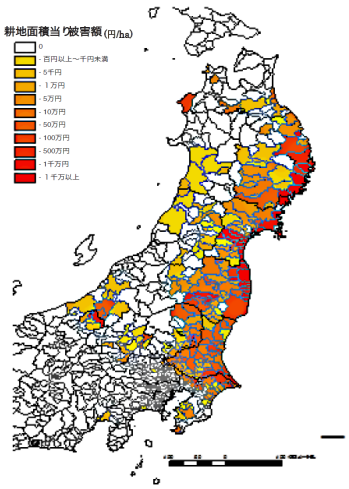


図５　東日本大震災の市町村別耕地面積 (ha) 当り被害額の分布

（2）震災被害の要因分析

大きな地震が発生した場合、その震度に応じて施設に対する被害（ダメージ）が大きくなると言われている。図 6 では、被災市町村毎の平均推計震度と耕地面積（ha）当り被害額の関係を津波被災市町村とそれ以外（地震）のものに区別して表示した。ここでは M9.0 を記録した東北地方太平洋沖地震で影響を受けた東北 6 県及び茨城、栃木、群馬、千葉、埼玉の関東 5 県の計 11 県の内、耕地面積（ha）当り被害額 100 円以上及び平均推計震度 3.5 以上で、津波被災 47 市町村、それ以外（地震被害）192 市町村の合計 239 市町村が対象である。

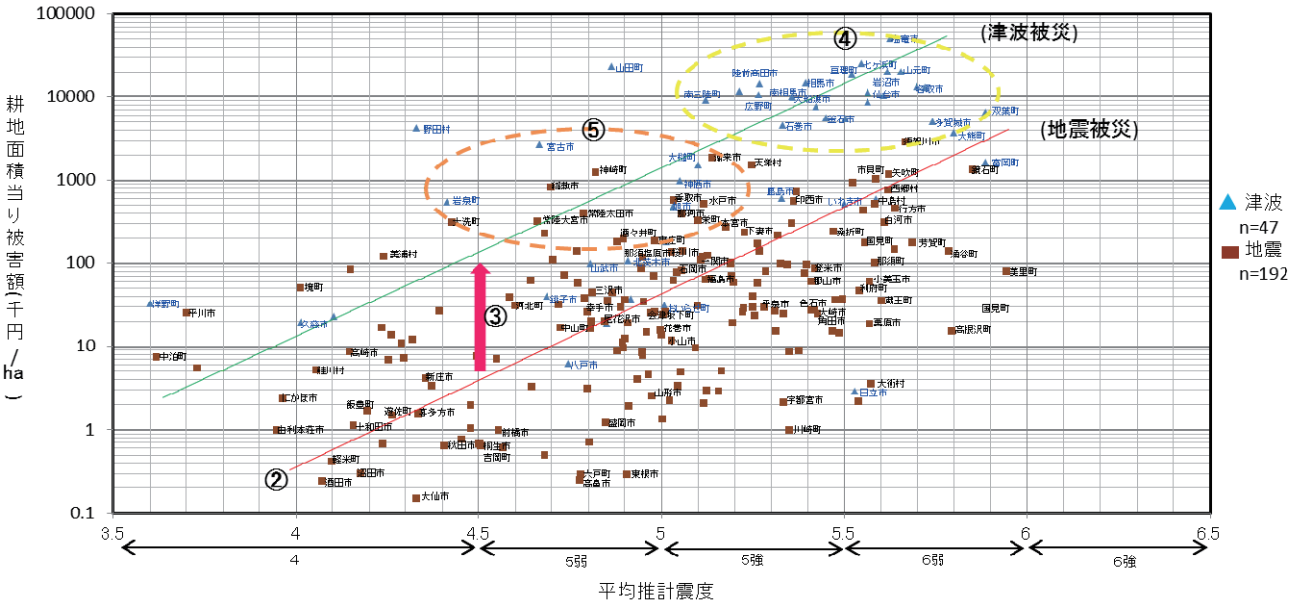


図６　被災タイプ別市町村耕地面積 (ha) 当り被災額と震度との関係

なお、11 県内の合計 468 市町村では、被害率が 51％である。これにより以下のことが明らかになった。

・津波被害を緑色線①、地震被害を赤色線②で相関性を示したが、全体的に大きな揺れを受けた市町村ほど、その被害程度が指数関数的に大きくなる傾向がある
・同じ震度でも津波被災によって被害程度が著しく（赤色矢線③では約 30 倍）増大する
・津波被災は震央から半径 200km 圏内の市町村（④の黄色破線）の被害程度が著しい
・茨城県稲敷市や千葉県神崎町など（⑤のオレンジ破線）では、小さい震度にもかかわらず液状化等によって比較的大きな被害程度となっている

（３）被災要因別の被害額

表１では、東北地方太平洋沖地震で影響を受けた東北６県及び関東５県に関して、被災要因別に農地と施設関係に分けて被害額全体を区分した。津波被災 47 市町村だけで被害総額全体の約 86％を占め、大震災に伴う被害額の大部分が津波によるものと理解できる。また、農地被害の 98％が津波被災市町村によるもので、津波被害がなかった市町村では、施設関係総被害額の３割近くを占めている。津波被災地は、地震のみ市町村と比較して平均約 43 倍の被災程度である。なお、津波被災地も事前に地震による被害があったと想定され、その分は被災程度全体の概ね２～４％（被災倍数の逆数）程度と推定される。

４．今後の課題

今回の考察によって、東日本大震災に伴う農地・農業用施設等の被災状況についてある程度俯瞰することが可能になった。しかし広大な面積の津波被災農地や膨大な数の農業用施設等の本格的な復旧・復興については、現在、緒に就いたばかりの段階であり、今後、さらに詳細な被災状況が明らかになってくるものと想定される。そもそも被災した農村地域では過疎化、高齢化が進み、食料生産の基盤である農地・農業用施設等の維持･保全が大きな課題となっていた。このため、大震災によって痛められた農地や施設等の一日も早い復旧・復興を通じて地域農業の再建を図ると共に、今後、そこで得られた知見や教訓を基に「粘り強い」農業基盤のあり方探求が必要である。

おわりに

日本は世界の陸地の 0.3％に満たない中で、発生する地震の 10％が日本とその周辺で発生するなど、地

表１　東日本大震災の被災タイプ別被害額の比較

（単位：億円，ha，千円/ha）

	被害総額	津波被害市町村				単位被災額	地震被害市町村				単位被災額	倍率
	①	個数	耕地面積②	被害額③	割合(%)③/①	④(③/②)	個数	耕地面積⑤	被害額⑥	割合(%)⑥/①	⑦(⑥/⑤)	④/⑦
被害全体	7,262	47	120,546	6,250	86.1	5,185	192	844,383	1,013	13.9	120	43.2
内農地	3,964	42	103,772	3,887	98.1	3,746	106	472,138	77	1.9	16	234.1
内農地以外	3,298	46	120,178	2,364	71.7	1,967	191	818,368	936	28.4	114	17.3

注)四捨五入の関係で合計が合致しない場合がある

震災害の最頻発国であり、近い将来にも高い確率で巨大地震の発生が予想されている。防災研究の基本は、直近で発生した災害の「記録による歴史化」にある。今回の大震災の検証と科学的分析を通して、持続可能な国土と農村地域の「備え」となることが大切であると考えている。

鈴木　尚登（すずき　ひさと）
1956年5月30日生まれ
1980年4月：農林水産省構造改善局（現在の農村振興局）入省
2005年4月：農林水産省近畿農政局巨椋池農地防災事業所長
2007年4月：農林水産省中国四国農政局中海干拓建設事業所長
2008年11月：エチオピア国農業農村開発省農業開発政策アドバイザー
2011年4月：農研機構農村工学研究所企画管理部防災研究調整役（現職）

地層から探る巨大地震の予測

独立行政法人産業技術総合研究所　活断層・地震研究センター　海溝型地震履歴研究チーム長　宍倉　正展

はじめに

昨年（2010年）12月24日、クリスマスイヴのこの日、つくば国際会議場でつくばサイエンスアカデミー主催のTXテクノロジー・ショーケースが開催された。筆者はそこで「平安時代の巨大津波を地層の証拠から再現」と題して出展し、そのプレゼン時間の中で「2004年のスマトラ島沖地震のような巨大津波が東北日本にも必ず来ます！」と声高らかに叫んだ。このとき、そのわずか3ヶ月半後にそれが現実のものになるとは、会場にいる誰もが思いもしなかったことだろう。なにしろ叫んだ張本人でさえ、まさかこのタイミングで起こるとは思っていなかったのだから。

2011年3月11日、東日本を激震が襲った。ほどなくして今度は巨大津波が沿岸地域を飲み込んでいった。東北地方太平洋沖地震と称されたこの地震は、マグニチュード（M）9.0という我が国の歴史上最大の規模で、東日本大震災という未曾有の大災害を伴った。まさに2004年スマトラ島沖地震（M 9.1）とほぼ同じ規模の巨大地震・津波が来たのだ。

筆者がなぜこの地震の発生を昨年12月の時点で、図らずもまるで予言者のように言えたのか。それは我々の研究チームが、地層に残された過去の津波の記録を丹念に読み解いていたからである。

これから起こる未来の事象を予測することは非常に難しい。しかし、過去に起きた事象であれば、知ることは可能である。そして過去に起きたことは将来も起こりうる。つまり我々は、過去に東北地方太平洋岸に巨大津波を伴う地震が起こっていたことを知っていたから、同様の地震が起こりうるということを言えたのである。ただし我々の予測は、あくまで地質学的な時間スケールの中での予測なので、それが起こるのが明日かもしれないし、30年後かもしれないというレベルの話であった。しかし、確かに地震は起きた。

過去の地震や津波について、歴史記録や地層などの記録から探っていく研究分野を「古地震学」という。本稿では、巨大地震の予測において有効な、古地震学の手法を用いて、我々がどのようにして過去の東北地方太平洋沖地震を解明していったのか紹介したい。

地質学的アプローチによる地震研究

独立行政法人産業技術総合研究所（以下、産総研）には地質分野のユニットとして、活断層・地震研究センターが設置され、地震に関する調査、研究を行っている。我が国には、地震に関する研究機関が、大学も含め多く存在するが、産総研における地震研究の特徴の一つは、地質学に基づいているということである。

一般的に地震の研究というと、器械観測によるデータを解析する地球物理学的な手法を用いた研究が主流である。しかし、器械観測でわかることは、おもに現在起こっている事象であり、過去に起こった地震のことを知ろうとしても、遡れるのは観測記録のある明治時代中期頃までである。そこからさらに時代を遡るには、古文書などの記載を解読していくことになる。ただし、史料が多く残されているのは江戸時代以降であり、それより前の時代の記録は非常に限られている。文書記録が残される前の先史時代に至ってはもうお手上げだろう。そうなると、頼りになるのは自然に記録された地震の痕跡である。

たとえば活断層による地表のずれは地形で認識できるし、津波は陸地に浸水していく際に、海岸付近の土

砂を侵食して内陸奥まで運んで地層となることがある。このような地質学的に確認される痕跡を探ることで、過去の地震や津波のあった事実を知ることができるのだ。では、具体的にどのようにして自然に記録された痕跡から、過去の津波の規模や波源を復元したのか、その背景も踏まえて詳しく説明していこう。

東北地方太平洋沖という場所

東北地方太平洋沖というのは、日本海溝が深く刻まれており、そこには太平洋プレートが沈み込んでいることから、このプレートの運動に伴う地震の多発地帯である（図 1）。たとえば 1896 年明治三陸地震や 1933 年昭和三陸地震では、三陸沿岸に大きな津波を伴い、多くの被害をもたらした。宮城県沖では 1978 年に M 7.4 の地震が起き、揺れによる被害をもたらしている。同様の地震は 30 ～ 40 年程度のくり返し間隔で起きると考えられており、実際に 1978 年の前は 1936 年、さらにその前は 1897 年に起きていたことがわかっていた。したがって次の宮城県沖地震は、1978 年から 30 年以上経っているので、いつ来てもおかしくない状況だと考えられていた。政府の地震調査研究推進本部が公表した今後 30 年以内の発生確率も、実に 99% だったのである。しかし、想定されるマグニチュードは 7.5 程度で、今回の地震のような広い範囲の断層破壊と、巨大な津波はまったく想定されていなかった。さらに福島県沖に至っては、歴史上、大きな地震や津波の記録がないことから、大地震は起こりにくい場所という認識が、地震学者の間でもあったのである。

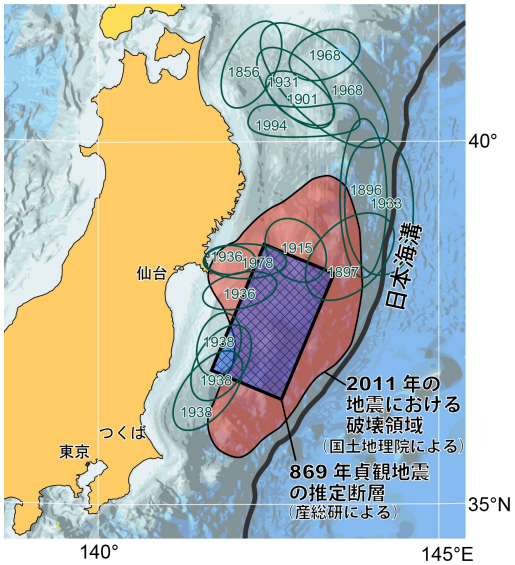


図 1　東北地方太平洋沖におけるおもな地震の震源と 869 年貞観地震の推定断層の位置

平安時代の歴史書に記録された大地震

これまで大きな津波を伴う地震が知られていなかった宮城県～福島県沖であったが、歴史をずっと遡っていくと、「日本三代実録」という平安時代の歴史書の中に、巨大津波を伴う地震の記録があったのだ。その地震は貞観十一年五月二十六日（西暦 869 年 7 月 9 日）に起きていることから「貞観（じょうがん）地震」と呼ばれる。古文書には、陸奥国が大きく揺れ、多くの建物が倒壊したこと、津波が城下まで達し、一面が水没して海のようになったこと、などが述べられている。ここで言う城下とは、当時国府があったと言われる多賀城のことを指す可能性が高い。海岸から数 km も離れた多賀城から見て、仙台平野が一面、海のような光景になっていたとしたら、今回の地震による津波と似たような状況だったことが想像される。

地層から復元する貞観地震の津波浸水域

貞観地震の存在は、実は古くから知られていたが、古文書だけでは情報が少なく、具体的な地震像がつかめない状況であった。一方で地層に記録された津波の痕跡（津波堆積物）から貞観地震の証拠を探る試みが、20 年ほど前から東北大学などによって行われていた。その後 2005 年から 2009 年まで行われた文部科学省の「宮城県沖地震に関する重点的調査観測」というプロジェクトの中で、産総研などによる津波堆積物調査により、貞観地震の津波の浸水範囲が明らかになってきた。

仙台平野や石巻平野は一面に水田が拡がっているが、元々は湿地のような場所であった。そのような環境では、泥炭と呼ばれる植物の遺体が少しずつ積もった土壌が形成されているが、その中に砂の層が挟まっていることがある（図 2）。通常は穏やかな湿地に砂の層を堆積させるには、何か強い水の流れを想定しないと説明できない。しかも砂の層には、海由来の生物化石が含まれているので、海から来たことがわかる。すなわち津波が運んだ砂と推定されるのだ。さらにその砂の層の直上には西暦 915 年に十和田火山の噴火で噴出した火山灰の層も観察された。したがって津波が西暦 869 年の貞観地震であることが同定できるのである。

このようにして津波堆積物を識別するのだが、調査の方法は、おもに人力による掘削調査である。専用の器械を用いるものの、基本的には体力勝負である。しかも掘削場所が水田であるため、土地の地権者を 1 軒 1 軒あたって許可を得なければならない。すんなり許

可をくれずに門前払いを食うこともあり、体力だけでなく精神的にもきつい仕事である。そのようにして地道に 400 カ所以上で掘削調査を行った結果、貞観地震時の海岸線から 3 ～ 4 km 内陸まで津波堆積物が分布することが解明された。すなわち少なくともそれだけ津波が浸水したと考えられるわけである。

津波シミュレーションによる断層の推定

次に貞観地震の津波の波源となった断層の推定を試みた。通常、断層の推定は地震計の波形や験潮所での津波波形など器械観測データに基づいて行われるのだが、1100 年以上も前の地震に関して、我々が知り得る情報は、古文書のわずかな記載と津波堆積物から明らかになった津波浸水域のみである。そこであらかじめいくつかのパターンで断層モデルを仮定し、コンピュータ上で模擬的に発生させた津波による浸水域の計算結果と、津波堆積物の分布とを比較して、どのモデルが最も適合するかを試行錯誤で決めていくのである。14 のパターンで検討を重ねた結果、宮城県沖から福島県沖にかけてのプレート境界で、長さ 200 km 以上、幅 100 km 以上の断層が 7 m 以上すべった場合に浸水域が再現でき、モーメントマグニチュードは 8.4 以上と推定された（図 1 の推定断層）。

くり返す巨大津波

さらに津波堆積物の調査からは、過去の巨大津波のくり返し性も解明されていた。大きな津波が、ある程度の間隔をもってくり返し起これば、津波堆積物もくり返し積み重なっていく。仙台や石巻の平野では、貞観地震より前に少なくとも 2 層、後にも少なくとも 1 層の津波堆積物が広く確認され、過去約 2500 年間に、貞観地震も含めて少なくとも 4 回の巨大津波が平野を浸水させていたことが明らかになった（図 2）。歴史上の地震と対比できているのは 869 年貞観地震のみだが、各イベントの年代測定を詳細に行っていくと、再来間隔は 450 ～ 800 年であることがわかってきた。すべてのイベントが同じ断層から生じているかどうかはまだ確定できていないが、貞観地震の後にも室町時代頃の痕跡があり、いずれにしても再来間隔からすると、次の巨大津波を伴う地震は、いつ起きてもおかしくない状況にあったのである。

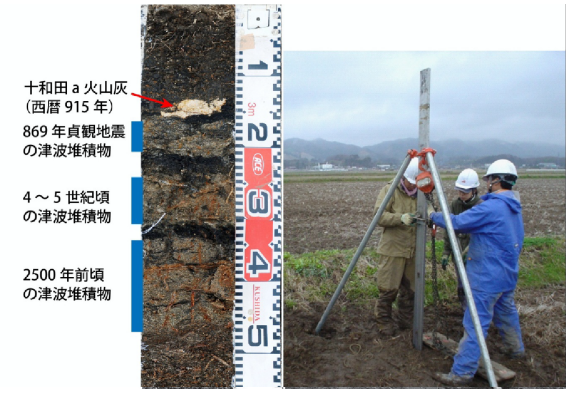


図 2　津波堆積物の調査風景（右）と採取した地層サンプル（左）の写真

今回の地震は予測できていたのか？

地震の予測には、いつ（時期）、どこで（場所）、どれくらい（規模）の 3 要素が必要である。このうち時期については、おおざっぱな予測ではあったが、確かに「いつ起きてもおかしくない状況」であった。場所も日本海溝沿いのプレート境界であることはわかっていた。問題は規模をちゃんと予測できていたかどうかである。今回の地震でよく言われる「想定外」とは、その巨大な規模である。津波の浸水域を貞観と今回とで比べてみると、驚くほどよく似ている（図 3）。実際には貞観地震時とは海岸線の位置が異なるし、浸水限界の位置の推定方法が異なるので、図 3 のように線が重なっていることが、そのまま浸水域の一致を示しているわけではない。しかし今回の津波後の現地調査を通じて、津波堆積物同士で比較すると、やはり浸水規模は同程度であることが明らかになってきた。つま

図 3　仙台平野における 869 年貞観地震の津波と 2011 年の津波との浸水域の比較

り津波規模に関しては、おおよそ予測可能であったと考えられる。

ただし、我々の調査の及ばなかった三陸海岸などは予測できていなかった。断層モデルが貞観地震（推定M 8.4）と今回の地震（M 9.0）とで規模に大きな差があるのは、三陸海岸や茨城県沿岸などでまだ貞観地震の津波の痕跡を見つけていなかったからである。もし今後これらの地域でも津波堆積物の調査が進めば、貞観地震の断層モデルも南北に延びて、今回の地震との類似性がより明確になるだろう。

今後に向けて

我々の貞観地震に関する調査研究は、前述の文部科学省のプロジェクトを通じ、2010 年春には報告書を提出していた。政府の地震調査研究推進本部では、その成果を踏まえた東北地方太平洋沖における地震の再評価を行い、2011 年 4 月に公表予定であった。その準備を進めていた矢先に起きたのが今回の地震である。事前に巨大津波の危険性を広く一般に伝えられなかったことは、痛恨の極みである。

地震の予測において、多くの人が期待する直前予知というのは、残念ながら現状では難しい状況である。しかし、規模については、事前にわかっていれば対処の方法があったであろう。宮城県南部や福島県沿岸では大きな津波はない、と考えられていたので、避難が遅れ、多くの犠牲が出たことは本当に残念である。

古地震学は過去の事実を明らかにし、将来の予測に資する情報を提供する。もちろん我々が知り得る過去の情報は限られているし、時期の予測も非常に幅がある。しかし、もし地震が起こったら、最大でどれくらいの規模になるかは、古地震学による詳細な調査で予め知ることが可能である。そしてその規模に対して、どのように対策を講じるかをハードとソフトの両面で考えていくことができる。すなわち過去を知って将来に備えることが重要なのだ。

宍倉　正展（ししくら　まさのぶ）

2000 年 3 月　千葉大学大学院自然科学研究科修了　博士（理学）学位取得
2000 年 7 月　通商産業省工業技術院地質調査所　入所
2001 年 4 月　独立行政法人産業技術総合研究所活断層研究センター　研究員
2009 年 4 月より現職
地形、地質に記録された過去の地震や津波の痕跡を探し求めて、国内外問わずフィールドワークに出かけている。著書：「次の巨大地震はどこか！」宮帯出版社

日本原子力研究開発機構の原子力災害ロボット
－ 福島第一原子力発電所事故への緊急対応とその教訓 －

日本原子力研究開発機構　福島支援本部　復旧支援部　技術主席兼遠隔操作技術室長　川妻　伸二

1．はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震と巨大津波により福島第一原子力発電所（1F）で全電源喪失、炉心冷却不能という事故が発生した。日本原子力研究開発機構（JAEA）が開発・保有していた原子力災害ロボットは、稼動できない状況であったが、JAEA は 1F 事故の終息にむけ、事故現場の状況に適応できるよう保有するロボットを改造等するとともに、東京電力を支援してきた。

本稿では、JAEA 原子力災害ロボットと、1F 事故緊急対応の概要と教訓について述べる。

2．JCO 臨界事故後の原子力災害ロボット開発

平成 11 年 9 月 30 日に発生した東海村 JCO 臨界事故の後、放射線量が高く作業員が立ち入ることが困難な事故現場で、事故の原因究明やその収拾・復旧に必要な情報を収集するロボットの開発を行った。

RESQ-A（2 台）は、事故現場の状況を迅速に把握するため、事故直後に乗用車等で急行し、現場の放射線量、映像・音声、機器類の温度を収集できる、機動性を重視した遠隔自走式小型軽量ロボットである。RESQ-B は、搭載している 1 台のマニピュレータで扉を開閉したり、階段の昇降等を行って事故発生場所に接近し、より広範な情報（放射線量、映像・音声、機器類の温度、室内の雰囲気、障害物等の位置）を収集する遠隔自走式ロボットである。RESQ-C は、マニピュレータ 2 台を装備し、扉の開閉、階段の昇降等を行って事故発生場所に接近し、汚染情報の収集や試料採取（気体・液体・固体・表面汚染試料の採取等）を行う遠隔自走式ロボットである。

RabOT は、電気・電子部品に耐放射線性部品を使用するとともに、放射線に弱いカメラ等はユニット化し簡易着脱コネクタを用いて現場で容易に交換できる構造としたことにより、耐放射線性は 10^5Sv 程度である。高放射線環境下の事故現場で継続的に情報収集や試料採取を行うことができる。

ＲＥＳＱ－Ａ

ＲＥＳＱ－Ｂ

ＲＥＳＱ－Ｃ

ＲａＢＯＴ

３．1F 事故発生後の JAEA の緊急対応の概要

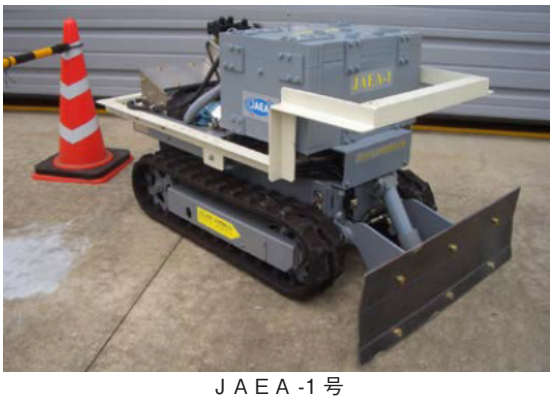
JAEA は 1F 事故発生後、事故現場の状況を踏まえながら、保有するロボット等を事故現場に投入できるよう、所要の改造および整備を実施してきており、以下にその概要を述べる。

3.1　JAEA-1 号

屋内に飛散している瓦礫除去を目的に、文部科学省原子力システム公募事業「セル内遠隔設備の開発」の遠隔保守移動装置を大幅に改造整備した。

瓦礫除去を確実かつ安全に行うため、ロボット幅より大きなブレードを新たに装備した。ロボット制御用電子部品を鋼板で遮へいし、数百 Sv 以上の耐放射線性を備え、高放射線量率下での作業が可能となった。有線による電力供給方式に改造し、長時間の作業が可能となった。さらに信号伝送も有線方式に改造したことで、無線が届きにくい原子炉建屋内での作業を確実に実施可能となった。メンテナンスの際の作業員被ばくを低減するため、ロボット自体を水スプレイ等で除染可能なように、水密構造としている。また、必要に応じて、耐放射線性カメラ、照明、放射線計測装置等を装着可能である。

概略寸法	1400mmL × 800mmW × 800mmH
重　　量	約 600kg
走行速度	1.5km/h



ＪＡＥＡ-1 号

3.2　JAEA-2 号

瓦礫を除去した後の屋内で、高圧水スプレイやブラシで屋内の除染を行う目的で、RESQ-A を大幅に改造整備した。

有線による電力供給と信号伝送方式にしたことにより、無線が届きにくい原子炉建屋内での作業を確実に

実施可能なこと、長時間にわたって現場に留まって作業を行うことが可能である。

また、ロボット制御用電子部品を減らし、耐放射線性カメラを装備することで、数万 Sv 以上の耐放射線性を備えた。メンテナンス時の除染のため、水密構造としている。また､必要に応じて､放射線計測装置（GM 管）等を装着可能である。

概略寸法	1000mmL × 400mmW × 700mmH
重量	約 35kg
走行速度	2km/h

ＪＡＥＡ－２号

3.3　JAEA-3 号

除染前後の屋内で、放射線モニタリングを行う目的で、RESQ-A を大幅に改造整備した。γ線計測装置「γ-eye」、放射線計測装置（GM 管）、ダストサンプラ等を装着している。ロボット本体は数万 Sv の、搭載している計測装置は数十 Sv の耐放射線性を備えている。メンテナンス時の除染のため水密構造としている。

JAEA-3 号は 7 月 2 日に 1F に投入された。

概略寸法	800mmL × 400mmW × 700mmH （センサー先端までは 1300mm）
重　　量	約 60kg
走行速度	2km/h

ＪＡＥＡ－３号

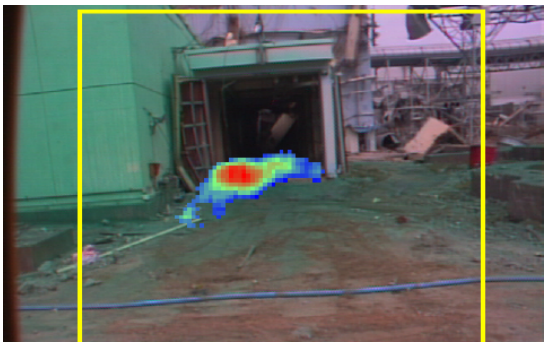
γ-eye で計測した際の PC 画面

3.4　ロボット操作車（愛称「TEAM　NIPPON」）

ロボット操作を迅速かつ安全に行えるよう、トラックバンに鉄板 80 mm 遮へい操作 BOX を搭載している。さらにガンマカメラや監視カメラ等を装備している。本ロボット操作車は米国アイダホ国立研究所から供与されたロボット TALON を搭載して 5 月 1 日に 1F に投入された。ガンマカメラにより屋外の汚染源確認等に活用されている。

また現在、東京電力の要請により 2 台目のロボット操作車を整備し、7 月 2 日に 1F に投入された。

ロボットコントロール車（愛称チームニッポン）



ロボットコントロール車で撮影した汚染源

4. JAEA の 1F 事故緊急対応での教訓

JAEA がこれまでに実施してきた 1F 事故緊急対応の中から、得られた教訓をまとめた。

(1) 長期的な維持管理体制（要員･予算確保）が重要。

事故現場でロボットを操作できる運用体制の整備が重要。（維持・運用体制）

(2) ロボット単体ではなく、遮へい体、計測機器、照明、発電機、ロボットコントロール車を含めたシステムの整備が必要。（システム化）

(3) 事故現場の様々な状況にあわせ、組合せ・改造等ができる即応力が必要。（即応力）

(4) 速やかに被災地に器材を搬送できる機動力が必要で、自衛隊等との連携も重要。（機動力）

(5) 継続したモックアップ試験、防災訓練、実践経験のフィードバックが重要。（継続性）

５．今後の対応

1F 事故の推移を注視するとともに、東京電力の要請を踏まえ、必要に応じて更なるロボットの改造整備を進めていく。

川妻　伸二（かわつま　しんじ）

専門分野：原子力用遠隔ロボット、原子力施設解体、クリアランス、放射性廃棄物処分

1982 年　早稲田大学理工学部機械工学科卒業、動力炉・核燃料開発事業団にて、原子力用サーボマニピュレータ開発に従事。1987 年から 1988 に交換技術者として米国オークリッジ国立研究所に駐在。

1997 年　核燃料サイクル開発機構経営企画部

2004 年　同機構バックエンド推進部環境技術グループリーダー

2011 年　日本原子力研究開発機構福島支援本部復旧支援部技術主席兼遠隔操作技術室長

福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の大気中の挙動

独立行政法人国立環境研究所　地域環境研究センター長　大原　利眞

１．はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災によって発生した、東京電力福島第一原子力発電所（以下、福島原発）の事故によって大量の放射性物質が大気中に放出され、福島県だけでなく、宮城県、関東 1 都 6 県、静岡県などの広い範囲で、土壌、水道水、農産物、畜産物、上下水道汚泥など様々な環境汚染を引き起こしている。大気中に放出された放射性物質は、風によって風下に運ばれながら（移流）、風の乱れによって水平・鉛直方向に広がる（拡散）。大気中を輸送される過程において、放射性物質は放射性崩壊して徐々に減衰するとともに、大気中でガスと粒子の両方の状態で存在しうるヨウ素 131 のような物質の場合にはガスになったり粒子になったりする。大気中の放射性物質は、最終的に、風の乱れ等によって（乾性沈着）、あるいは、降水に取り込まれて（湿性沈着）大気中から除去され、地表面に負荷される。このようにして大気から地上に落ちた放射性物質のうち、半減期が長い放射性セシウム（セシウム 134 とセシウム 137）が私達の生活と周りの環境に大きな影響を及ぼしている。本稿では、つくばでの環境測定と大気シミュレーション結果に基づき、福島原発から放出された放射性物質の大気中の挙動に関して報告する。

２．放射性物質の大気中の広がりと沈着

風が一定方向に吹いている場合には、放射性物質はプルーム（羽毛）状に大気中を輸送される。これが、いわゆる放射性プルームである。しかし、風が時空間的に一定・一様に吹くことは少なく、地形や地表面状態、海陸風や山谷風などの局地風、高低気圧などの影響を受けて複雑に変化する。福島原発周辺でも、低気圧の通過、西側にある山岳や局地風の影響を受けて、放射性物質は大気中を複雑に移流・拡散したと考えられる。放射性物質は、大気中を運ばれる過程において、乾性・湿性沈着によって大気中から除去されるが、一般的に、大気中の粒子は乾性沈着しにくく、湿性沈着しやすい性質がある。このため、大気中で粒子として存在している放射性セシウムは、乾性沈着よりも湿性沈着によって大気中から除去されやすく、その大気中濃度が高い所で雨・雪が降り始めた場合に、沈着量が多い地域（いわゆる「ホットスポット」）が出現する。一方、ヨウ素 131 は乾性沈着しやすいため、放射性セシウムに比べると降水による影響は少ない。

つくばの高エネルギー加速器研究開発機構と国立環境研究所は、事故直後から空間線量と大気中の放射性核種を測定し、分析結果をホームページで公開している（http://rcwww.kek.jp/norm、http://www.kek.jp/quake/radmonitor/）。図 1 は、3 月 14 日から一ヶ月間の空間線量の時間変化（図 1(a)）、ヨウ素 131 とセシウム 137 の大気中濃度の時間変化（図 1(b)）を示す。空間線量（図 1(a)）には、3 月 15 日と 16 日の午前中の鋭い

ピーク、3 月 21 ～ 22 日の上昇とその後の緩やかな減少が認められる。これらの時間変動は基本的に、福島原発から放出された放射性プルームの通過と降水によって説明できる。即ち、3 月 15 日のピークは、大気中の放射性物質が北風によって南に運ばれてモニタリングポストを通過したことを示し、通過後の減少は、大気中濃度が低下するとともに、乾性沈着した半減期の短いヨウ素 131 のような放射性物質が放射性崩壊したことを意味する。一方、3 月 16 日と 21 日のピークは、15 日のピークとは異なり、この時に降り始めた雨の影響が大きかったと考えられる。即ち、北風によって放射性プルームが通過したことによる線量の増加分に、降水によって湿性沈着して地表面に降下した放射性物質による線量の増加分が加算されたと解釈できる。特に、3 月 21 日には、ピーク後の線量の時間減少が緩やかであることから、大量の放射性物質が地表面に湿性沈着したことが伺える。3 月 21 日のピーク以降は、プルームもしくは湿性沈着の影響による多数の小さなピークが認められるが、全体の傾向として長期減少傾向を示し、新たに放出された放射性物質の影響が小さいことを示している。なお、3 月 15、16、21 日の 3 つのピークには、気象的には低気圧が福島原発近くを通過したことが深く関係しており、北風によって放射性プルームが南に運ばれたことも、降水によって放射性物質が湿性沈着したことも、そのためである。

図 1(b) は、大気中のヨウ素 131 やセシウム 137 の濃度の時間変動を示す。放射線量の上昇時には、ヨウ素 131 とセシウム 137 の濃度も上昇していることから、放射性プルームの通過によって放射線量が上昇していることがわかる。また、4 月上旬までのヨウ素 131 やセシウム 137 の大気中濃度の特徴は大きく異なり、ヨウ素 131 に比べてセシウム 137 の時間変動が大きく、濃度レベルが低いという特徴がある。しかし、4 月中旬以降には、時間変動も濃度レベルもともに両核種間の違いが小さくなっている。このような違いを生じる原因には、福島原発の放出源の違いや物質特性の違いを反映している可能性が考えられ、今後解明すべき課題と言える。なお、ヨウ素 131 とセシウム 137 だけでなく、その他の放射性核種も含めて、それらの構成比は時間的に大きく変化していたことが明らかになっている。

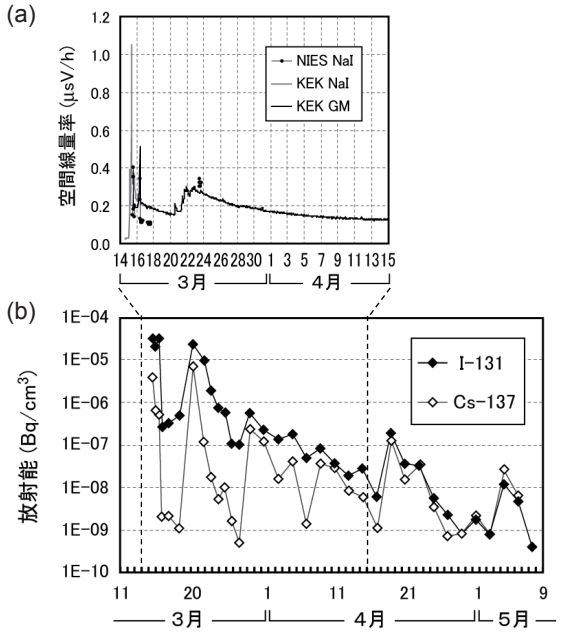


図 1　つくばで測定された空間線量の時間変化 (a)、ヨウ素 131 とセシウム 137 の大気中濃度の時間変化 (b)。図 (a) は、佐波ら (KEK Preprint 2011-4) をもとに作成した。

3．放射性物質の広域シミュレーション

このような放射性物質の複雑な挙動を把握するためには、大気シミュレーションが有効である。以下では、大気汚染現象をシミュレーションするために開発されたコンピューターモデルを用いて、放射性物質の広域的な挙動を解析した結果について紹介する。

使用したモデルは、米国・環境保護局で開発された大気質モデル CMAQ（Community Multi-scale Air Quality model）である。グリッドは 6 km、計算対象領域は関東・南東北地方を含む東西 700 km× 南北 700 km、計算対象物質はヨウ素 131 とセシウム 137 であり、ヨウ素 131 はガス 80% と粒子 20%、セシウム 137 は全て粒子として大気中に存在すると仮定した。CMAQ で使用する気象データは、気象庁の数値気象データをもとに地域気象モデルを使用して計算した。また、放出量データには、日本原子力研究開発機構による推計結果（Chino et al., J. Nucl. Sci. Technol., 48, 1129-1134, 2011）を使用した。モデルの結果を検証するために、文部科学省が実施した定時降下物モニタリングデータや航空機モニタリングデータなどと比較し、観測された降下量（沈着量）の時空間変化やレベルを、モデルがほぼ再現していることを確認した。しかし、放出条件、気象（風と降水など）、沈着モデルなどの不確実性が大きいことに注意する必要がある。

モデルによって計算されたヨウ素 131 とセシウム 137 の、3 月 11 日～ 3 月 29 日における累積沈着量の地域分布を図 2 に示す。この図によると、放射性物質の影響は福島県以外に、宮城県や山形県、関東 1 都 6

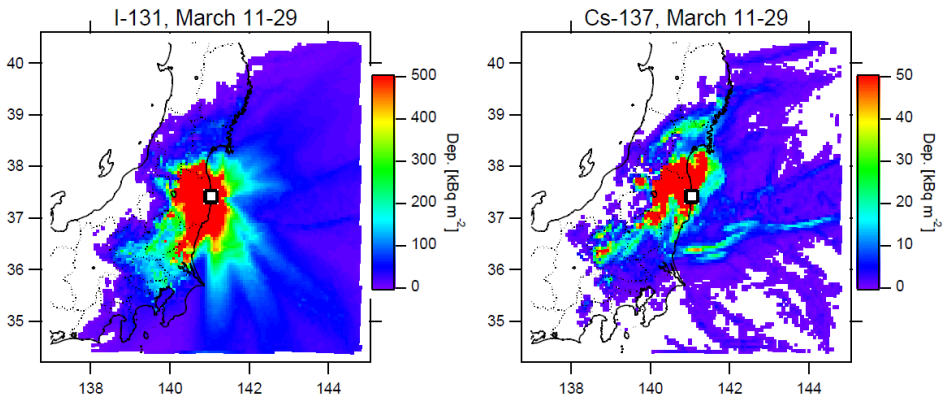


図２　３月 11 － 29 日に地表面に沈着したヨウ素 131（左図）とセシウム 137（右図）の積算量。

県、静岡県、山梨県、長野県、新潟県など広域に及んでいることがわかる。前述したように、ヨウ素 131 は乾性沈着が多く、湿性沈着は少ないため、沈着量は大気中濃度に強く依存し、福島原発からの放射性プルームが何度となく通過した福島県東部や茨城県などの関東地方北東部で沈着量が多い結果となっている。一方、セシウム 137 は、乾性沈着が少なく、湿性沈着が多いため、沈着量は大気中濃度と降水量の両方に依存し、大気中濃度が高い降水域で沈着量が増大する。このことを反映して、原発周辺だけでなく、風によって放射性物質が輸送され、且つ、降水があった福島県東部、宮城県南部、関東北部・西部などの地域で沈着量が多い。また、大気中に放出された放射性物質のうち、ヨウ素 131 は 13%、セシウム 137 は 22% がモデル領域内の陸上に沈着し、それ以外は海上に沈着したかモデル領域外（ほとんどが太平洋上）に流出したことがモデル解析の結果、明らかとなった。

それでは、放射性物質は、いつ沈着したのだろうか？モデル結果によると、沈着したのは３月 15 日～ 16 日と３月 20 日以降の数日の２期間で集中している。即ち、福島原発周辺において、高濃度の放射性プルームが通過し、更に、その通過と降水帯のタイミングが合った２期間に、大量の放射性物質が沈着したと考えられる。

４．おわりに

本稿では、つくばでの測定結果と大気シミュレーション結果に基づき、福島原発から放出された放射性物質の大気中の挙動について概説した。現在、文部科学省や学術研究機関などによって放射性物質の測定が進められ、放射能汚染の実態が把握されつつある。また、シミュレーションによって、放射性物質の大気中での挙動や地表面に沈着したメカニズムが明らかになってきた。しかし、様々なデータを統合して、広域的な汚染マップを作成すること、土壌・水・生物・生態系といった様々な環境媒体での放射性物質の蓄積量･移行経路･移行量（即ち、ストック･ルート･フロー）を把握・予測すること、その前提となる放出量の不確かさを小さくすること、といった汚染の全容を把握するための取組みがまだまだ不足している。放射能汚染が非常に深刻な環境問題・社会問題になっていることを踏まえると、測定とモデルによる調査・研究を更に強力に推進し、また、原子力分野、環境分野、影響分野などの研究者間の連携を強め、さらには、関係する研究機関や行政機関、事業者、一般市民の協働によって、放射能汚染の全容解明と汚染低減に向けた取組みを加速する必要がある。

謝辞

本稿を執筆するにあたり、高エネルギー加速器研究機構の桝本和義室長、独立行政法人国立環境研究所の田中敦主任研究員、森野悠研究員、土井妙子高度技能専門員に御協力頂いた。

大原　利眞（おおはら　としまさ）

1976 年　北海道大学工学部卒業後、同大学院工学研究科修士課程、博士課程を経て、
1984 年　財団法人計量計画研究所に入所。
1999 年　静岡大学工学部教授
2004 年　独立行政法人国立環境研究所に入所。
2011 年４月より現職。
2007 年から筑波大学生命環境科学研究科連携大学院教授を兼務。
専門は大気環境科学・工学で、大気汚染の数値モデリング、排出量推計、データ解析などの研究を実施している。環境問題の解決に貢献する研究を目指している。

放射線と人体

総合病院土浦協同病院 がんセンター長兼放射線科部長　大原　潔

はじめに

東日本大震災で被害に遭われた皆様方にまずお見舞いを申し上げます（この原稿を書いている間に、今度は西日本を大型台風が襲いました）。

終息しない原発事故や煽られる風評被害など、国民の不安は膨らんだままである。漱石は小説「草枕」の中で、「智に働けば角が立つ、情に棹させば流される、意地を通せば窮屈だ。とかくに人の世は住みにくい」と、人間の本質に関わる一見識を述べている。人間の本質を改めて問いかけることになったのが今回の大震災であろう。智（知）を追求する科学は人間の限りない欲望の一つである。知は世代を超えて進歩し、「正解（真実）」に近付き、やがて普遍性を獲得するであろう。しかし、情と意に進歩はなく、「正解」はなく、全く個別的なものである。情と意により一喜一憂する人間が、不安を膨らませるのは当然のことであろう。この稿では、放射線の人体に及ぼす影響について、知の立場から述べる。

放射線の人体影響に関する情報源

放射線に関する知のおおもとは国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection: ICRP）にある。その根源は主に広島・長崎の原爆被ばく者の追跡調査結果にある。放射線医療従事者や事故被ばく者の調査もあるが、研究の規模や精度などからみても、この追跡調査結果に勝るものはない。放射線の人体影響に触れる上で知の根幹をなすものである。

ただし現代科学としてはやや正確さを欠く。被ばく線量は、原爆の規模（放射線の種類や量）などから推定した値である。今話題となっている内部被ばくについては調査ができず、その線量は勘案されていない。線量率効果も勘案されていない。外部被ばくでも内部被ばくでも、放射線の影響には線量率（単位時間当たりの放射線量）が大きく関係することが、放射線診療においても分かっている。高線量率（急性被ばく）の方が低線量率（慢性被ばく）よりも影響が大きい。線量評価の不正確さに加え、統計解析上のかたよりもある。対照群（非被ばく）の中に、原爆以外で被ばくをした者が混じっていたりしていることである。しかし、ある程度の不正確さは当時としてはやむを得なかったであろう。

放射線の影響と線量

追跡調査で分かったことは、大線量被ばくによる致死的影響のほかに、様式が２つあることである。小線量の被ばくをすると、致死的ではないが臓器に障害が現れることと、がんが発生することである。ある量（しきい線量）以上の線量を被ばくすると、臓器などへの障害が検査結果の異常や症状として表れる。これを確定的影響という。しきい線量は注目する臓器や症状などによって異なるが、線量が増加するにつれて障害の重症度は増す。いわゆる放射線感受性が高いとされるものに白血球や器官形成期の胎児などがあり、白血球数の減少や奇形などが発生する。そのしきい線量は概して 100 mGy（ミリグレイ）、つまり 100 mGy 未満では確定的影響は生じないとされている。

がんの発生は確率的影響と称される。150-200 mGy 以下の被ばく線量では、対照群との間に統計学的有意差は見られていない。しかし、放射線防護上の考え方として、しきい線量はないと仮定することになった（直線無しきい値仮説）。この仮説を用いれば、放射線による発がんリスクを被ばく線量から計算できる。なお、放射線が遺伝子を傷つけるという原理からすると遺伝的影響も考えられるが、ヒトではこれが現れたとの証拠はない。

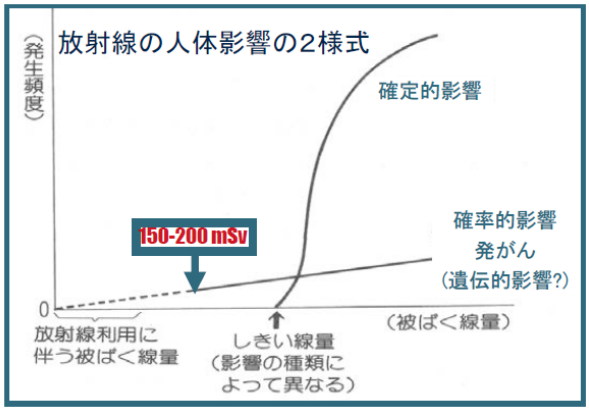


図 1

これに対して、ラジウム温泉やラドン温泉と称される“放射能温泉”は健康によいとされている。放射能温泉にはラドンガスなどの放射性同位元素が含まれているが、温泉は放射線が発見されるはるか前から存在していたのである。直線無しきい値仮説とは正反対の立場で、“微量の放射線は健康に良い”とするホルミシス効果が研究されている。決着には、莫大な数のヒトを長期にわたって精度よく調査する必要がある。

放射線の平和利用と低線量被ばく

放射線には利用できる様々な特性がある。その放射線にも様々な種類がある。電気的に作り出すエックス線や電子線などや、放射線を出す能力（放射能）を持った元素（放射性同位元素）から常時放出されているガンマ線やベータ線などがある。放射性同位元素は放射能が低い状態ではその特性能力も低いので、放射能を高く（濃縮）して用いる。濃縮すると、強力な爆弾として用いることもできるし、平和的な利用もできる。放射線は諸刃の剣である。

平和利用の一つに原子力発電があるが、身近なのは医学、特に医療への利用である。医療では、その発見から 100 年余りを経た現在も放射線が用いられている。諸刃の剣ではあっても、正の側面（病気の診断やがんの治療など）の方が負の側面（医療被ばく）よりもはるかに大きいと考えられ、しかも被ばくは患者個人のレベルに止まるからである。

医療と被ばく

放射線を用いた画像診断の代表に CT がある。体外から放射線を当て、手術をしなくても体内を詳しく観ることができる。がんの早期発見にも不可欠な検査法の一つとなっている。また、核医学検査法は放射性同位元素の化合物を患者に投与し、化合物の分布状態を体外から検出して、病気の有無や程度を診断するものである。がん診療の領域では PET 検査がその代表である。ちなみに、検査用の放射性同位元素化合物が医療で用いられる場合には、放射性医薬品と称され、体内に一旦投与されると放射性同位元素としての法令規制は受けない。医療の遂行を妨げないようにとの配慮からである。

問題は不使用の放射性医薬品の扱いである。投与しなかった放射性医薬品は、通常の放射性同位元素と同様に、放射性廃棄物として厳重な法令規制を受けることになる。放射性廃棄物は放射線施設に保管しておかなければならない。原発事故による放射能汚染物も同じ扱いを受ける。

日本は医療被ばく大国であるが、長寿大国でもある。放射線を用いた医療は当分続きそうである。

自然放射線

地球上の万物は太古から放射線を浴び続けている（自然放射線）。自然放射線による被ばく線量は地域によって異なるが、日本では平均年間に約 1.4 mSv（ミリシーベルト）とされている。世界平均は年間約 2.4 mSv で、多いところでは数 10 mSv に上るとされている。地球上の生物は昔から被ばくをしながら棲息し、進化してきたのである。20 世紀末以後の日本人の平均年間被ばく線量は、自然放射線による被ばく線量に医療被ばく線量を加えて、年間約 3.8 mSv となるとされている（世界平均は約 2.95 mSv）。自然放射線には、1950 年代から 60 年代にかけて世界中で盛んに行われた大気中核実験でのフォールアウト（主に放射性セシウムとストロンチウム）による線量も含まれている。なお、フォールアウトによる日本での線量は、1960 年代から 1990 年代の 30 年間に 1000 分の 1 程度にまで減少していることが分かっている。

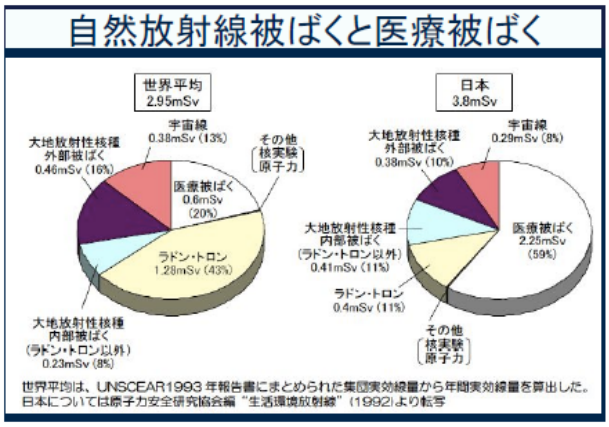


図２

放射線の防護体系

放射線は大量に受けると人体に悪影響を及ぼすことが分かったが、これを用いざるを得ないとなると“安全基準”を策定する必要がある。その勧告を行っているのが ICRP で、各国はこの勧告を基に放射線防護に関する法令を策定してきた。日本では現在、1990 年の ICRP 勧告を受けた法令が適用されている。法令で

は被ばく量を制限すべく、放射線量に制限を設けている（線量限度）。被ばくをその形体から三つに区分し、それぞれ異なる線量限度を決めている。三区分とは職業被ばく（職業人）、公衆被ばく（一般公衆）、そして医療被ばく（患者）である。職業人は放射線を用いることを生業としているので、リスクの大きさを他の職業におけるのと同等に揃えた。これを「直線無しきい値仮説」の数式で求めた結果、年 20 mSv が線量限度とされた。職業人は、個人の被ばく線量をガラスバッジなどの線量計を装着して測定し、かつ放射線に関する教育訓練を毎年受けることが義務づけられている。一般公衆は年1 mSvが線量限度である。放射線施設（医療施設や原子力発電施設など）から出る放射線量が、定められた量以下になるように遮蔽し、施設に境界を設けることで、公衆の被ばくが年 1 mSv を超えないように法令で定めている。これに対し患者には線量限度がない。ちなみに、職業被ばくや公衆被ばくの線量には、自然放射線からの被ばく線量や医療被ばく線量は加算しないことになっている。

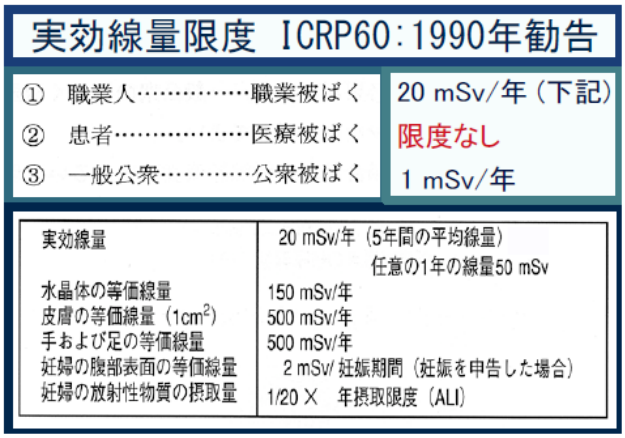


図３

放射線量とシーベルト

放射線は物理量であり測定が可能である。放射線の単位の代表にベクレル（Bq、放射性同位元素の単位時間あたりの崩壊数）、グレイ（Gy、吸収されたエネルギー）、シーベルト（Sv、等価線量と実効線量：生物量）がある。線量計には様々な種類があるが、測定できるのは Bq と Gy である。詳細は参考書に譲り、ここでは人体への影響を見る Sv について述べる。

Sv は測定された吸収線量（Gy）を生物効果の視点から換算したものであるが、二種類あることに注意が必要である。放射線は吸収線量が同じでも、放射線の種類やエネルギー（線質）が異なると生物効果も異なることが分かっている。吸収線量に、エックス線やガンマ線を 1（基準）とする放射線荷重係数を乗じて等価線量を計算することになる。例えば、エックス線やガンマ線の場合は、1 Gy は 1 Sv になるが、アルファ線の場合は、放射線荷重係数は 20 とされ、1 Gy は 20 Sv となる。

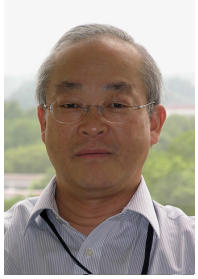
実効線量は純然と放射線防護を目的としたものである。等価線量に、臓器毎の発がんに関する感受性の程度（組織荷重係数、例えば肺は 0.12 とされている）を乗じて求める。組織荷重係数は足し合わせると 1 になる。全身が均等に外部被ばくをした場合は換算が容易であるが、不均等被ばくの場合は複雑であり不正確である。職業人では、ガラスバッジでの測定結果から、体表から 1 cm の深さの線量を用いて、概算している。内部被ばくについても計算式があるが、さらに複雑で不正確である。「知」といえるのは吸収線量までかと思われる。

おわりに

放射線の人体影響について、原爆被災者の追跡調査結果により分かったことを「知」として述べた。(1) 放射線感受性が最も高い臓器でも 100 mSv 以下では放射線影響は現れない（確定的影響）、(2) 被ばくによりがんが過剰に発生するが、150-200 mSv 以下では有意差が認められていない。

ICRP の放射線防護に関する基本姿勢に、ALARA（As Low As Reasonably Achievable）がある。“すべての被ばくは社会的、経済的要因を考慮に入れながら合理的に達成可能な限り低く抑えるべきである”とする姿勢である。Reasonably Achievable をどう受け止めるかは、日本国民の「情と意」にかかっている。

大原　潔（おおはら　きよし）
1973 年　広島大学医学部医学科卒 / 助手
1975 年　国立がんセンター病院医員
1978 年　広島大学医学部助手
1980 年　筑波大学臨床医学系講師
1986 年　筑波大学臨床医学系助教授
1994 年　筑波大学大学院人間総合科学研究科助教授 / 准教授
2008 年　総合病院土浦協同病院放射線科部長
2009 年　総合病院土浦協同病院がんセンター長（現職）
専門：放射線腫瘍学（がんの放射線治療）、放射線防護



原子力事故によるエネルギー政策とエネルギーシステムリスクについて

筑波大学大学院システム情報工学研究科　リスク工学専攻　教授　内山　洋司

（1）前代未聞の原子力事故

出してはいけない放射性物質が広範囲に放出されてしまった。それも、世界で最も安全と言われていた日本の原子力発電所において発生した事故である。米国スリーマイル島事故や旧ソ連チェルノブイリ事故は海外の事故で、日本の技術力と安全対策があれば、そういった大事故は発生しないと思っていただけに、今回の原子力事故への驚きと衝撃は大きい。

事故から7か月が過ぎても、避難生活を余儀なくされている人、放射性物質の汚染や風評被害で経済損失を被っている人、そして不安を感じながら毎日生活している住民の方々が数多くいる。また、汚染濃度が高い現場では、多くの電力関係者が事故の収束に向けて被曝と熱中症と闘いながら作業を続けている。おそらく、事故を起した原子炉を廃炉するまでには20年以上の歳月がかかるであろう。その間、人々は不安を抱きながら生活していかなければならない。放射性物質が外部に放出された原子力事故の影響の甚大さを改めて感じる。

前代未聞の原子力事故で、原子力という言葉を聞くのも嫌だ、原子力発電を廃止すべきだという人も数多くなっている。国会だけでなくマスコミも原子力発電に対して批判的になっている。大学や研究機関でも、これまで原子力推進を容認していた専門家も批判と反対に回った人がいる。しばらくは、脱原発あるいは減原発の流れが続くと思われる。日本のエネルギー政策の見直しが始まろうとしている。原子力発電への批判が高まっており、今後策定されるエネルギー政策では、事故前にあった原子力推進の流れは止まるであろう。

（2）再生可能エネルギーへの代替と国民の経済負担

日本にある原子力発電所の発電出力は、原子力事故前で4,885万kWであった。その発電能力は、年間80%の設備利用率で運転したとすると3,420億kWhになり、日本の電力量の約35%を供給することができた。福島県にある原子力発電所は東京電力の主力発電設備で、廃炉になる福島第一の原子炉と運転再開が難しくなった5号機の発電出力は470万kW、同じ福島県にあって現在、停止状態にある福島第二の原子炉を含めると910万kWである。その出力は日本全体の原子力設備の18.6%である。

福島県の原子力発電所の発電量を、もし太陽光発電で代替したとすると1,700万軒の家庭の屋根に太陽光発電を設置しなければならない（1軒当たり平均3.5kW、年間設備利用率12%で計算）。風力発電であれば4万8,530基の風車を設置しなければならない（1基当たり平均1MW、年間設備利用率15%で計算）。その費用は、太陽光発電の建設単価を60万円/kWとして計算すると36兆4,000億円、風力発電の建設単価を30万円/kWとすると14兆4,600億円の設備投資になる。それに対して、新たな原子力発電で代替したときの発電費用は、発電コストを6円/kWh（注）として計算すると年間3,826億円であり、太陽光発電と風力発電の設備耐用年数を20年とすると、その期間の総額は7兆6,500億円（ただし、割引率を0%で計算）となる。太陽光発電と風力発電の設備投資と、この原子力発電の発電費用の差額を求めてみると、それぞれ29兆円と7兆円にもなり、それらを再生可能エネルギー代替による新たな追加費用として国民が負担しなければならない。仮に、日本の原子力発電所をすべて太陽光発電、あるいは風力発電に置き換えると、国民負担額は5.4倍の156兆円、あるいは38兆円にもなる。

さらに、太陽光発電や風力発電は自然任せで出力が変動するために、電圧や周波数を安定にする費用、あるいは新たに設置しなければならない送電線費用が別途必要になる。もし、そういった費用が調達できなければ、電気の安定供給が脅かされ、停電への人々の不安が高まることになる。

太陽光発電や風力発電への代替を考えた時、国民負担を少なくするためには、大幅な建設単価の低減が求められる。しかし一方で、専門家は普及量が拡大するにつれて経済的な立地点が限られていくために、設置コストが上昇し建設単価はむしろ高くなると指摘している。それに対して、再生可能エネルギーの推進に積極的な人は、高くなった分が国内産業の生産額を高めて雇用創出につながると主張している。この考え方は、果たして本当だろうか。確かに普及が進めば産業創出

になる面はある。しかし、再生可能エネルギーを普及させていくためには固定料金買取制度（FIT）などが必要になり、電気料金を大幅に上げなければならない。太陽光発電や風力発電を構成する設備や装置は、その素材製造と組立にかなりの電気を消費していることがライフサイクル分析で明らかになっている。電気料金の上昇は装置費の高騰を意味しており、その費用増加は製造ラインの合理化等による技術進歩だけでは埋め合わせることができない。結果として、建設単価が高くなり、また円高の影響が加わって、米国や中国などFIT を導入していない、あるいは企業に FIT を課していない海外製品が導入されることになる。電気料金の値上げは、日本の国際競争力を低下し、FIT によって日本の市場が外国製品による草刈り場となり、日本の産業育成と雇用創出の効果はあまり期待できない可能性が高い。

（3）火力発電への代替と地球温暖化・エネルギーセキュリティ問題

原子力代替を経済性から考えるのであれば、火力発電へ代替していくことが最も現実的な選択肢になる。導入できる火力発電には、LNG 複合発電、超々臨界圧石炭火力や将来的には石炭ガス化複合発電がある。それらの発電コストは、燃料費の変動が大きいために正確な計算はできないが、6.5 円 /kWh 程度と見積もられている。原子力発電の発電コストが 6 円 /kWh であることから、その差はわずかである。

しかし、福島県以外の原子力発電所が停止した場合は追加費用が必要になる。定期検査で停止中のプラントが地元の理解が得られずに再開できなくなれば、その穴埋めとして火力発電所を稼働しなければならない。その場合は、燃料費は追加費用として国民負担となる。福島県の原子力発電所を除いた半分の設備、約 2,000 万 kW が稼働できなかったとすると、燃料負担額は燃料の種類と購入時期で異なるが、燃料単価を 3～4 円 /kWh 程度として計算すれば、年間 4,200～5,600 億円の負担となる。もちろん、この費用負担を緩和する方法はある。それは徹底した省電力政策である。社会の省電力を促進すれば、原子力発電によって発電されていた電力量をある程度まで補うことで、費用が緩和できる。

一方で、火力発電への代替には、日本のエネルギーセキュリティを脅かす問題と地球温暖化問題がある。中国やインドの急激な経済発展とエネルギー需要の増加によって、世界は化石燃料のエネルギーセキュリティを確保していくことが難しくなってきている。わが国は、長期的なエネルギーセキュリティ確保の視点から脱化石燃料政策を図ってきた。発電部門の代替エネルギーの本命が原子力発電であったが、脱原子力となれば、エネルギーセキュリティの確保は難しくなり、エネルギーの供給途絶と価格高騰といった不安を抱えることになる。

化石燃料への依存を高めるということは、地球温暖化対策としても逆行することになる。京都議定書によって第一約束期間である 2008 ～ 2012 年の間に温室効果ガスの排出量を 1990 年レベルより 6％削減しなければならない。この排出量の削減に対して、原子力発電は経済的に見て最も効果ある電源として開発が進められてきた。現政権は、ポスト京都議定書において、さらに高い削減目標を掲げようとしているが、原子力発電の再稼働なくしてその達成はほぼ不可能である。仮に福島原子力発電所と残りの半分のプラントが稼働できなかったとし（発電出力で約 2,900 万 kW）、その発電量（2,030 億 kWh）を火力発電が代替したとする。その分、二酸化炭素排出量が増えることになる。石炭火力（0.9 トン CO_2/kWh）が代替すれば 1,827 億トンが、LNG 複合発電（0.5 トン CO_2/kWh）であれば 1,015 億トンの CO_2 が年間に増加することになる。その排出量を炭素クレジットで購入（0.3 万円 /CO_2 トン）したとすれば、年間に約 550 億円（石炭）か約 300 億円（天然ガス）の額を海外に支払わなければならない。

原子力発電の停止は、わが国にエネルギーセキュリティと地球温暖化のリスクの上昇をもたらすことになる。更に新しいリスクが発生している。円高が進み、日本では国内で生産して海外に輸出していく、これまでの“ものづくり”が難しくなっている。中小企業を含め多くの企業が海外へ進出し始めている。もし、原子力発電を停止し、その分を再生可能エネルギーや化石燃料に置き換えれば、電気代は高くなり、企業の海外進出を加速することになる。それは日本の技術力の低下だけでなく、雇用問題にも影響する。

経済的なリスクを回避する当面の対策として、福島原子力発電所が発電していた分（全体の 18.6％）を省電力政策で削減し、定期検査が終わった原子力プラントは安全性を確認した上でできるだけ速やかに稼働していくことが望まれる。建設中と計画中のプラントに

ついては、その後にどのようにしていくかを議論すればよい。

（4）エネルギーシステムのリスク問題

私たちは、豊かさと快適さを得るために大量のエネルギーを水や空気と同じように無意識に使っている。しかし、エネルギーは水や空気と違って自然に得られるものではない。エネルギー源には、化石燃料、原子力、再生可能エネルギーがあるが、それらを石油製品や電気、都市ガスなど社会で使えるエネルギーにするためには、輸送、貯蔵、転換・変換などの供給システムを構築しなければならない。

社会の産業活動と人々の生活を支えていくためには、安全で安心できるエネルギーを供給することが必要となる。エネルギーの供給には、大別すると、次に示す３つの基本要件が求められている。

① 「エネルギーセキュリティの確保」：価格変動や供給途絶の心配がないエネルギー資源を長期にわたり安定に確保する。

② 「供給基盤の整備」：入手した資源を使いやすいエネルギー形態に変換するための施設を建設し、信頼性の高いエネルギーサービスを行う。

③ 「社会的な受容」：資源をエネルギーとして社会に利用する一連のプロセスで環境への影響や事故による被害をなくし、人々が環境や安全の面でエネルギーを安心して利用できるようにしていく。

上に述べた基本要件は、すべてを完全に満たすことはできない。エネルギー源である化石燃料、原子力、再生可能エネルギーには、それぞれが異なる利点と欠点をもっており、すべてに優れているものはない。表１は化石燃料、原子力、再生可能エネルギーについて、日本の立場から見た基本要件の特徴を示したものである。社会がエネルギーを使って持続可能な発展を遂げていくためには、各エネルギー資源の欠点を克服し、利点を最大限に発揮する利用方法を考えていくことになる。

表１に掲げた要因のリスクは完全になくすことはできない。リスクの多くは社会の経済活動の中で低減されるために、リスクと経済性との間にはトレードオフ関係がある。

（5）リスクを許容量として捉える

現代の高度産業社会において、エネルギーは産業や人々の生活を支える上で不可欠なものである。エネルギーは、国の安全保障、環境、経済、雇用などと密接に結びついており、さまざまなリスクをできるだけ最小にするエネルギー政策・計画が大切になる。反原発への感情論が先行している中、こういったエネルギー関連のリスクを客観的に同じように理解していくことは難しい状況にある。

原子力事故によって放射性物質が放出され広域的に大きな影響を与えている。マスコミは目に見えない恐怖として、連日、放射線問題を繰り返し報道している。安全を主観的にしか判断しようとしない日本社会では、マスコミによる報道に敏感に反応して不安感が高まる。また、多くの人々は、学校においてリスクを客観的に判断する教育を受けていないため、不安を解消することができない。

放射線影響は許容量で判断されている。人々は天然から放射線を日常的に浴びているが、それによる癌の発生は臨床医学でも明らかにされていない。人工的に放出された放射線の曝露量がどこまで許容されるかは、専門家の間でさまざまな議論があるが、低線量領域での許容量は疫学的に見て明確になってはいない。物理学者であった武谷三男によると、「放射線というものは、どんなに微量であっても人体に悪い影響を与える。しかし一方ではこれを使うことによって有利なこともあり、また使わざるを得ないということもある。有害さと引き換えに有利さを得るバランスを考えて“どこまで有害さを我慢するかの量”が許容量というものである。つまり許容量とは、利益と不利益のバランスをはかる社会的な概念なのである。」と指摘している。許容量の概念は、「害か無害か、危険か安全かの境界として科学的に決定される量」ではなくて、人間の生活の観点から、危険を「どこまで我慢しても、そのプラスを考えるか」という社会的概念である。このことは、すべてのリスク問題について言えることである。

表1　基本要件からみた化石燃料、原子力、再生可能エネルギーの特徴

基本要件		化石燃料	原子力	再生可能エネルギー
エネルギーセキュリティの確保	賦存性	・長期的に見た資源枯渇（石炭と非在来型資源の潜在的な量は豊富にある）	・長期的に見たウラン資源枯渇（ウランをプルトニウムに核変換すれば資源量は豊富にある）	・資源量は潜在的に豊富、しかし経済的な利用可能量は多くない。
	安定性	・資源の偏在性（石油の確認埋蔵量の３分の２は中東地域にある） ・供給途絶（資源保有国の政治経済問題やシーレーンでの海賊問題がある） ・燃料価格変動（石油や石炭などの資源高騰がある）	・長期契約による取引と炉内装荷期間が長いため、化石燃料に比べて供給途絶への不安は小さい。	・供給途絶がない（輸入バイオマスを除く）
供給基盤の整備	供給力	・設備能力（最大需要に合った設備能力を確保できる） ・立地問題（特に石炭火力には厳しい環境アセスメントが必要になる） ・設備投資（LNG 基地などインフラ投資が巨額になる）	・設備能力（最大需要に合った設備能力を確保できる） ・立地問題（発電所と核燃料サイクル施設を含め地元の理解を得るのに長期間が必要となる） ・設備投資（核燃料サイクルを含めてインフラ投資が巨額になる）	・設備能力（気象任せの発電である風力発電と太陽光発電は設備価値が小さい） ・立地問題（特に風力発電は立地場所によって電気出力が大きく変動する。また、資材の搬入や送電線の敷設問題がある）
	信頼性	・電気の質（安定した出力で、周波数・電圧の変動が小さい） ・需給調整（負荷変動へは優れた追従能力がある） ・自然災害、ヒューマンエラーによる停電（比較的早く復旧できる）	・電気の質（安定した出力で、周波数・電圧の変動が小さい） ・停電（大規模なプラント事故があると供給力不足の影響を与える）	・電気の質（太陽光や風力など間欠的なエネルギーは、出力だけでなく周波数・電圧が大きく変動する） ・需給調整（太陽光や風力は、蓄電池が必要になる）
社会的な受容	環境性	・大気汚染（SOx、NOx、ばいじんなどによる健康被害と生態系汚染） ・地球温暖化（温室効果ガスである二酸化炭素が放出されている）	・放射性物質の漏洩（健康被害と環境影響が大きい）	・最もクリーンと言われている（バイオマスの大量消費による森林破壊が懸念されている）
	安全性	・施設事故(タンカーの座礁、ガス爆発、炭坑事故の不安がある）	・施設事故（原子力施設の重大事故は長期にわたり健康被害と社会影響を与える） ・風評被害（原子力事故や放射性物質漏洩が地元生産物の販売に影響する） ・テロ行為、核拡散	・施設事故（工事中の落下事故などがあるが、全体から見て比較的軽微と考えられている）

注）標記の原子力発電コストは、事故以前に推計された費用である。日本で推計されたコストは、国際エネルギー機関の電源別コスト比較を見ると、他の先進国のコストよりも高くなっている。国際基準から見れば、６円／kWh はむしろ高いコストであって、日本の原子力発電コストの値が小さすぎるとは必ずしも言えない。ただし、事故を起こした福島第一原子力発電所だけを見たとき、現時点ではまだ明確にはなっていないが事故処理や廃炉費用、それに風評被害などの費用を加えれば、その発電コストはかなりの大きさになると予想される。今回の事故によって発生したそれらの追加費用を原子力発電コストとして一般のプラントにも考慮する考えには数多くの疑問が残されている。

内山　洋司（うちやま　ようじ）

1981 年３月　東京工業大学大学院理工学研究科原子核工学専攻博士課程修了、工学博士
1981 年４月　（財）電力中央研究所入所
1985 年９月　米国電力研究所（EPRI）客員研究員（～87 年３月）
1987 年４月　（財）電力中央研究所経済研究所、専門役
1995 年４月　東京工業大学大学院総合理工学研究科　人間環境システム専攻客員 教授（～2000 年３月）
1997 年７月　（財）電力中央研究所経済社会研究所、上席研究員、原子力政策室次長
2000 年４月　筑波大学、機能工学系　教授
2011 年 10 月　国立大学法人筑波大学システム情報系　教授
専門分野：エネルギー学、エネルギーシステム分析、ライフサイクル評価

科学の散歩道

電気ロケットの未来
～イオンエンジンによる「はやぶさ」探査機の宇宙往復航行を終えて～

宇宙航空研究開発機構（JAXA） 教授 國中　均

世界標準と一線を画し、独自技術として開発したマイクロ波放電式イオンエンジンは、「はやぶさ」探査機（打上質量 510kg）を深宇宙（注：地球の大気圏の外側すべて）動力航行させ、7 年間に渡る延べ 4 万時間の宇宙作動をもって地球～小惑星間往復を果たした（図 1 参照）。電気ロケットとしての本来の高性能や長寿命性のみならず、システム全体の窮地を何度も救いその器用さや臨機応変性をも存分に示せたであろう。イオンエンジンとは、推進剤キセノンを電離してイオンを作り、クーロン加速にて高速プラズマジェットを生成し推力とする。噴射速度は秒速 30km を優に超え、化学ロケットと比べ推進剤消費を低く押さえて、長時間作動を可能にする。我々が選択した方式は、マイクロ波放電による無電極プラズマ生成であり、それまで短命の要因となっていた電極損耗を根本から解決し、長寿命／高信頼を誇る。科学探査向けにあえて推力 8mN ／消費電力 350W と小ぶりにサイジングし、3 台同時作動にて 24mN の推力を得る。恩師栗木先生のご指導のもと、故長友先生からご支援をいただき、1980 年代後半に研究着手し、2003 年に宇宙投入、2010 年に地球帰還と、実に 20 年強を要してしまった。翻って省みると、NASA（米国航空宇宙局）は 1998 年打ち上げの Deep Space 1 探査機（490kg）にて、ESA（欧州宇宙機関）は 2003 年の SMART-1 宇宙機（350kg）にて、電気ロケットによる深宇宙動力航行を相次いで成功させた。「はやぶさ」は、地球～小惑星間の往復まで実現したのだから、彼らを少しだけオーバードライブできたかと思う。切磋琢磨する NASA ／ESA ／JAXA 世界 3 局の関係にあって、正しく先行投資がなされ実を結び、先達の恩に報いて日本の面目が保てたことにむしろ安堵している。

はやぶさが地球帰還を果たした 2010 年、推力で 1 桁を上回る電気ロケットがいよいよ登場した。米国企業が開発した BPT4000 という、300mN ／ 4kW のホールスラスタである。米軍の大型通信静止衛星 AEHF-1（6,000kg）は、アポジエンジン不調で静止軌道投入に失敗したものの、この電気ロケットにてスパイラル上昇中と聞く。ホールスラスタとは、旧ソ連で研究開発された電磁加速型電気ロケットで、燃費はイオンエンジンより劣るものの推力が大きいため、深宇宙よりも地球周回にて有利とされる。国内においても私企業が同種のシステムを開発中であり、米国技術を果敢に追尾している。

電気ロケットは、静止衛星の長寿命化に貢献し、さらに深宇宙動力航行を実現させた。その次に切り拓くべき新しい未来は、大量物資輸送と予測する。AEHF-1 が行っているスパイラル上昇は、EOTV（Electric Orbit Transfer Vehicle：電気式軌道間輸送機）の先駆け／デモンストレーションと言えるのだ。最終目標は太陽光発電衛星建設のための宇宙物資輸送であり、その前哨は月や火星有人活動を支えるロジス

図 1 「はやぶさ」探査機の深宇宙動力航行

ティクス（兵站）であろう。人員でなく物資であれば、迅速性よりも大量輸送が優先されるので、低燃費の電気ロケットの貢献が期待される。例えば月ミッションの場合、JAXA の大型打上ロケット H2B を用いても化学推進だけでは、月表面に全備重量 2 トンしか届けられず、ペイロード（注：貨物）に至っては 1 トンを切る。1 年間規模の遷移時間を要するが、高比推力電気ロケットや月重力圏オートキャプチャー技術を組み合わせれば、月表面にペイロード 2 トンを含む全 3 トンを配送できる。図 2 は、地球から月にまで続く Electric Lunar Fleet 電気式月物資輸送船団の隊列の想像図である。このような大量物資輸送時代を実現するには、10N ／ 100kW 規模の電気ロケットが必要となる。さらに大型のホールスラスタを目指すのか、それとも手堅く現行システムを 20 台級連ねたクラスターとなるのだろうか。しかし後者は宇宙工学として正しいとは思えない。NK-15 エンジンを 30 機並べたソ連の N-1 打上ロケットはついぞ宇宙に到達することはなかったのだから。今から超大型ホールスラスタに挑戦するには遅きに失しているので、もっと別のソリューションとして単体 100kW 級電気ロケットを提供できないものか思考し、外部磁場型 MPD アークジェットにて新たな道筋を拓くべく研究を進めている。（図 2 の想像図は、この推進機を主推進として描かれている。）

アカデミアは行政から「2 番ではいけないか？」という命題を突きつけられた。研究開発コミュニティから外向きに対しては、毅然と反論すべきだ。1 番を狙ってこそ、1 番になれるかもしれないのであって、初めから 2 番狙いでは馬群に沈むのがせいぜいだ。切磋琢磨する競争関係があってこそ科学技術が進歩するのであり、互いに尊敬できる相手同士となって初めて健全な国際共同／協力関係が構築できるのだ。一方、内向きに対しては、自己を律する意味も含め、世界最先端を極め、その科学や技術を完成させ、実証／実用までを、なるべく短時間でこなし、その成否を世に問い、社会福祉への貢献・還元を目指すと肝に銘じなくてはいけない。研究開発という自己陶酔に陥り、我田引水で独りよがりの目標を設定し、実現から逃避する活動であってはならない。日本は閉塞的社会風潮に苛まれ、人口減少に転じ、国内総生産 GDP は世界第 3 位に後退、国家的「後退局面」にあるとの指摘がある。さらに追い打ちをかけるように大きな震災に見舞われた。この厭世感を払拭し、日本をもとに戻し、さらに前進さなくてはならない。それには、従前概念に囚われず、新機軸・発明的・刷新的新手法をとることでしか未来は開けないと信ずる。先達の教えに従い、腐ることなく地道に研究開発を進め、同時に後進の育成に努めながら、先回りして 10 年後の未来で待っていて、その時日本の科学技術力を世界に示すような活動を標榜している。

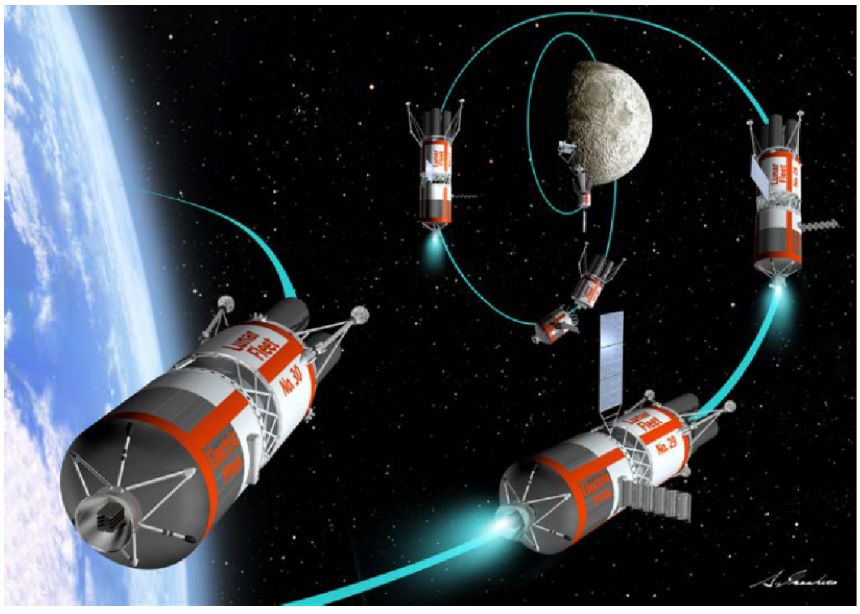


図 2　Electric Lunar Fleet 電気式月物資輸送船団

プロフィール
國中　均（くになか　ひとし）
1983 年 3 月、京都大学工学部航空工学科卒業。1988 年 3 月、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年 4 月、文部省宇宙科学研究所助手。2000 年 1 月、同助教授。2005 年 4 月、現職。2011 年 10 月より、月惑星探査プログラムグループ・プログラムディレクター。工学博士。東京大学大学院工学系研究科学際工学教授併任。1988 年～ 1996 年、宇宙実験・観測フリーフライヤーＳＦＵプロジェクトに従事。1996 年～ 2010 年、はやぶさ小惑星探査プロジェクトのためのマイクロ波放電式イオンエンジンの開発・運用を担当。豪州カプセル回収作業の安全主任。2010 年度文部科学大臣特別賞受賞。

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)　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)池田理化
(社)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)
(独)宇宙航空研究開発機構
　筑波宇宙センター
エーザイ(株)　筑波研究所
オークラフロンティアホテルつくば
(独)科学技術振興機構
(独)科学技術振興機構
　JST イノベーションサテライト茨城
カゴメ(株)　総合研究所
(株)カスミ
キッコーマン(株)　研究開発本部
(株)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)クレフ
(財)国際科学振興財団
コクヨ北関東販売(株)
(株)Scientific Language
(株)JTB 法人東京
　コミュニケーション事業部
(株)常陽銀行
関彰商事(株)
(株)セノン　茨城支社
大陽日酸(株)　つくば研究所
高橋興業(株)
筑波家田化学(株)
(株)つくばエッサ
(財)つくば科学万博記念財団
筑波学園ガス(株)
(株)筑波銀行
(株)つくば研究支援センター
つくば国際会議場
(社)つくば観光コンベンション協会
つくば市商工会
ツジ電子(株)
テスコ(株)
東京化成工業(株)
戸田建設(株)　技術研究所
(株)ともゑ
日京テクノス(株)
(株)日本触媒　筑波地区研究所
日本新薬(株)　東部創薬研究所
日本電気(株)　筑波研究所
日本ハム(株)　中央研究所
日本エクシード(株)
日本電子(株)
日立化成工業(株)　筑波総合研究所
(株)日立製作所　日立研究所
(株)ひたちなかテクノセンター
不二製油(株)　つくば研究開発センター
(独)物質・材料研究機構
ペンギンシステム(株)
(独)防災科学技術研究所
三菱化学(株)　イノベーションセンター
　筑波センター
水戸商工会議所
(財)山田科学振興財団
理想科学工業(株)　K&I 開発センター

（60 企業・団体）

■自治体

つくば市
つくばみらい市

（2市町村）

【五十音順 /2011.10.1 現在】

編集後記

3.11 東日本大震災、震源から遠く離れたつくばでも震度 6 弱を記録し、大きな被害が出ました。福島第一原発は巨大事故を起こし、つくばの近くでは、今でも空間放射線量の高いホットスポットが多く見つかっています。

日本の科学的考え方と技術に対する信頼感が揺らいでいるようにも思われます。しかし、つくばは日本における科学・技術の一大中心です。ここからあらためて、科学者・技術者の役割の重要性を訴えるべきではないでしょうか？

本号はそんな思いで大震災と原発事故の「特集号」としました。巻頭言に岡田防災科研理事長からご寄稿いただき、各分野の専門家の方から 8 件の原稿をお寄せいただきました。本号が、科学者・技術者の役割を考える上でのきっかけになればと思います。

一方、小惑星探査機「はやぶさ」の帰還は、最近にない朗報でした。「科学の散歩道」として、JAXA の國中先生にその技術の要点をお書きいただきました。興味深い刺激的な読み物としてご一読いただければと思います。

（編集委員会）

平成 23 年度 SAT の今後の主な行事予定

○ 2011.11.19（土）：SAT つくばスタイル交流会
○ 2011.12. 5（月）：賛助会員交流会
○ 2012. 1.13（金）：TX テクノロジー・ショーケース in つくば

編集委員

■熊谷　亨／(独)農業・食品産業技術総合研究機構
■目　義雄／(独)物質・材料研究機構
■角田方衛／(財)新技術振興渡辺記念会
■松崎邦男／(独)産業技術総合研究所

SAT 編集事務局

■岡田雅年／つくばサイエンス・アカデミー　理事
■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
■篠田義視／つくばサイエンス・アカデミー　事務局長
■齊藤具子／つくばサイエンス・アカデミー　事務局

つくばサイエンス・アカデミー運営規程

（名称）
第１条　本会は、つくばサイエンス・アカデミーと称する。
２　本会の英文表記は、Science Academy of Tsukuba（略称：SAT）とする。

（目的）
第２条　本会は、研究者相互の交流を促進することを通じて科学の振興に資するとともに、研究成果を産業や国民生活に反映することを目的とする。

（事業）
第３条　本会は前条の目的を達成するため、次の事業を行う。
（1）科学技術の発展に資するための、様々な分野の研究者の内外の交流促進
（2）科学に対する社会の関心を増進させるための啓発活動
（3）科学を産業に活かすための企業との交流
（4）その他前条の目的を達成するために必要な事業

（会員）
第４条　本会は、次に掲げる会員をもって組織する。
（1）一般会員　第２条の趣旨に賛同し、本会に加入を希望する研究者等の個人とする。
（2）賛助会員　第２条の趣旨に賛同し、本会に加入を希望する企業その他の団体とする。
（3）特別会員　第２条の趣旨に賛同する個人等であって、本会の会員とすることが本会の発展に資するものとして、会長が推薦し運営会議が承認するものとする。
（4）名誉会員　科学技術の発展に著しい功績を有するものであって、本会の会員とすることが本会の発展に資するものとして、会長が推薦し総会が承認するものとする。

（会費）
第５条　本会を運営する費用をまかなうため、会員は会費を拠出することとし、会費の金額は会員の区別に応じ、次の各号に定めるとおりとする。
（1）一般会員　5,000 円　ただし学生は 3,000 円
（2）賛助会員　１口 50,000 円（複数口の入会を認めるものとする。）
（3）特別会員　10,000 円

（役員）
第６条　本会に次の役員を置く。
（1）会長　　１名
（2）副会長　　２名
（3）運営会議委員（会長及び副会長を含む。）　40 名以内
２　役員は、会員の中から総会において選任する。
３　会長及び副会長は役員の互選により定める。

（役員の職務）
第７条　会長は、本会を代表し、本会の事務を統括する。
２　副会長は、会長を補佐し、会長に事故あるとき又は欠けたときはその職務を代行する。
３　運営会議委員は、運営会議を構成し、本会の事務の執行を決定する。

（役員の任期）
第８条　役員の任期は２年とする。ただし、再任を妨げない。
２　補欠又は増員により選任された役員の任期は、前任者又は現任者の残存期間とする。
３　役員は、任期満了後も、後任者が就任するまではその職務を行う。

（アドバイザー）
第９条　本会にはアドバイザーを置くことができる。
２　アドバイザーは運営会議の推薦に基づき会長が委嘱する。
３　アドバイザーは会長が諮問する事項について運営会議に意見を答申することができる。

（委員会の設置）
第 10 条　本会の目的達成に必要な事項を企画、執行するために、運営会議の決議により本会に所要の委員会を置くことができる。
２　委員会には、会長が指名する委員を置くものとする。

（会議）
第 11 条　本会の会議は、総会と運営会議とする。
２　総会は、すべての会員をもって構成する。
３　運営会議は、運営会議委員をもって構成する。
４　会議の議長は、会長がこれにあたる。

（会議の招集）
第 12 条　会議は会長が招集する。

（定足数）
第 13 条　会議は、その構成員の過半数の出席がなければ開会することができない。

（議決）
第 14 条　会議の議事は、出席構成員の過半数をもって決し、可否同数の場合は議長の決するところによる。この場合において、議長は、構成員として議決に加わることはできない。
２　やむを得ない理由のため、会議に出席できない構成員は、あらかじめ通知された事項について、書面をもって表決し、又は他の構成員を代理人として表決を委任することができる。
３　会長は、軽易な事項については書面等により賛否を求め、会議の議決に代えることができる。

（議事録）
第 15 条　会議の議事については、次の事項を記載した議事録を作成しなければならない。
（1）会議の日時及び場所
（2）会議の構成員の定数及び現在数
（3）会議に出席した構成員の数（運営会議にあっては氏名）
（4）議決事項
（5）議事の経過及び要領並びに発言者の発言要旨
（6）議事録署名人の選任に関する事項
２　議事録には、議長が指名する議事録署名人２人以上が署名押印しなければならない。

（総会の審議事項）
第 16 条　総会は、次に掲げる事項を審議する。
（1）役員に関する事項
（2）規程の改廃に関する事項
（3）事業計画、予算、事業報告、決算に関する事項
（4）会費に関する事項
（5）本会の解散に関する事項
（6）その他本会の運営に関する重要な事項

（運営会議の議決事項）
第 17 条　運営会議は、総会で審議された事項を踏まえ、次に掲げる事項を審議、決定する。
（1）財団法人茨城県科学技術振興財団理事会（以下「理事会」という。）の議決した事項の執行に関する事項
（2）理事会に付議すべき事項
（3）委員会の設置に関する事項
（4）理事会の議決を要しない業務の執行に関する事項

（会計）
第 18 条　本会の経費は、会費及びその他の事業収入をもって充てる。
２　本会が実施するサロン等の事業については、その内容に応じて実費相当分を参加者から徴収できるものとする。
３　本会の会計年度は、毎年４月１日から翌年３月 31 日までとする。

（委任）
第 19 条　この規程に定めるもののほか、必要な事項は、運営会議の議決を経て、会長が別に定める。

付　則
この規程は、平成 21 年４月１日から施行する。

つくばサイエンス・アカデミー役員

平成 23 年 9 月 30 日現在

◆会長

江崎玲於奈　（財）茨城県科学技術振興財団理事長／つくば国際会議場館長

◆副会長

村上　和雄　（財）国際科学振興財団理事／筑波大学名誉教授
岡田　雅年　（独）物質・材料研究機構名誉顧問

◆運営会議委員

池田　幸雄　（国）茨城大学学長
石田　瑞穂　（独）海洋研究開発機構　地球内部ダイナミクス領域特任上席研究員
市原　健一　つくば市長
潮田　資勝　（独）物質・材料研究機構理事長
餌取　章男　（学）東京工科大学客員教授
大垣眞一郎　（独）国立環境研究所理事長
＊太田　敏子　（国）筑波大学名誉教授
岡田　義光　（独）防災科学技術研究所理事長
小幡　裕一　（独）理化学研究所バイオリソースセンター長
小野　　晃　（独）産業技術総合研究所副理事長／つくばセンター長
貝沼　圭二　（国）九州大学大学院農学研究院特別顧問
川田　恭裕　（独）宇宙航空研究開発機構　筑波宇宙センター所長
＊木阪　崇司　（財）つくば科学万博記念財団理事長
岸　　輝雄　（国）東京大学名誉教授
北澤　宏一　（独）科学技術振興機構理事長
＊久野美和子　（株）常陽産業研究所　顧問　新事業・技術開発支援プロデューサー
小玉喜三郎　（独）産業技術総合研究所特別顧問
後藤　勝年　（独）科学技術振興機構ＪＳＴイノベーションサテライト茨城館長
澁谷　　勲　（株）常陽銀行相談役
鈴木　厚人　（大共）高エネルギー加速器研究機構長
関　　正夫　関彰商事（株）代表取締役会長／（社）茨城県経営者協会会長
塚本　紳一　アステラス製薬（株）コーポレート・オフィサー／上席執行役員／研究本部長
中川原捷洋　（社）農林水産先端技術研究所顧問
西川　和廣　国土交通省国土技術政策総合研究所長
西村　　暹　（国）筑波大学生命科学動物資源センター客員研究員
沼尻　　博　沼尻産業（株）代表取締役会長
野間口　有　（独）産業技術総合研究所理事長
橋本　　昌　茨城県知事
＊板東　義雄　（独）物質・材料研究機構フェロー
堀江　　武　（独）農業・食品産業技術総合研究機構理事長
丸山　清明　（学）東京農業大学客員教授
八木　浩輔　（国）筑波大学名誉教授／（学）浦和大学名誉教授
＊山田　真治　（株）日立製作所　材料研究センター長
山田　信博　（国）筑波大学学長
吉武　博通　（国）筑波大学研究センター長
＊和田祐之助　茨城県商工会議所連合会会長／（株）祐月本店会長

計 39 名（＊は新任）
（五十音順）

個人会員

（財）茨城県科学技術振興財団　つくばサイエンス・アカデミー

入　会　申　込　書

（ＦＡＸ　ＴＯ：029-861-1209）

※入会をご希望の方は、本申込書をＦＡＸまたは郵送にて下記事務局宛にお送りください。

			入会申込年月日	年　月　日
会員番号			会員種別	□正　□学生
フリガナ			性別	男・女
氏　名	姓	名		
英　文	Family	Given	生年月日	年　月　日
自宅住所	（〒　　）			
電　話		ＦＡＸ		
勤務先	名　称			
	所　属			
	部　課			
	職　名			
	所在地	（〒　　）		
	電　話	内線		
	ＦＡＸ	E-mail		
学歴	□学生　□学士　□修士　□博士　□その他　　最終学位取得年＿＿＿＿＿年（西暦）			
関連所属学会				
専門分野				
これまでの主な業績				
受賞記録				
代表的な論文テーマ				
簡単な履歴				
得意とする講演テーマ				
			連絡先	自宅・勤務先

●太枠内のみにご記入ください。

●経歴書、プロフィール等お待ちの方は、添付していただいて結構です。

●学生会員として入会を希望される方は、学生証等の証明書のコピーを合わせてお送りください。

入会申込みについて

■個人会員

1　入会申込書

入会申込書に必要事項をご記入の上、本会事務局宛お送りください。入会の承認は、諸手続きを経ますので、若干時間を要します。事務手続きが終了次第、会員番号を記載した入会承認書と会費納入方法に関する書類をお送りいたしますので、指定された方法によりご入金ください。

2　会費

本会では、入会金は不要です。下記の年会費のみお支払いください。

一般会員　　5,000 円

学生会員　　3,000 円

特別会員　　10,000 円

■賛助会員

1　入会申込みについて

下記事務局にご連絡ください。所定の申込書をお送りいたします。

2　会費

賛助会員　１口 50,000 円（複数口のご協力を期待しています。）

■申込み・問合せ先（個人・賛助会員とも）

（財）茨城県科学技術振興財団　つくばサイエンス・アカデミー　事務局

〒305-0032　つくば市竹園 2-20-3　つくば国際会議場内

TEL：029-861-1206　FAX：029-861-1209

E-mail：academy@epochal.or.jp

ISSN 2186-6627

Contents No.20 October 2011

●巻頭言
不確実な情報とのつきあい方 岡田義光 防災科学技術研究所理事長

2 ●特集「東日本大震災-科学・技術の役割を考える」

東日本大震災における防災科学技術研究所の取り組みについて
橋本 俊幸 独立行政法人防災科学技術研究所 アウトリーチ・国際研究推進センター センター長

巨大地震による地形変化
小荒井 衛 国土地理院 地理地殻活動研究センター 地理情報解析研究室長

巨大地震による農地・農業用施設等被害と今後の課題
鈴木 尚登 独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 企画管理部 防災研究調整役

地層から探る巨大地震の予測
宍倉 正展 独立行政法人産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター 海溝型地震履歴研究チーム長

日本原子力研究開発機構の原子力災害ロボット
－ 福島第一原子力発電所事故への緊急対応とその教訓 －
川妻 伸二 日本原子力研究開発機構 福島支援本部 復旧支援部 技術主席兼遠隔操作技術室長

福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の大気中の挙動
大原 利眞 独立行政法人国立環境研究所 地域環境研究センター長

放射線と人体
大原 潔 総合病院土浦協同病院 がんセンター長兼放射線科部長

原子力事故によるエネルギー政策とエネルギーシステムリスクについて
内山 洋司 筑波大学大学院システム情報工学研究科 リスク工学専攻 教授

28 ●科学の散歩道
電気ロケットの未来 ～イオンエンジンによる「はやぶさ」探査機の宇宙往復航行を終えて～
國中 均 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 教授

30 ●賛助会員一覧

31 ●つくばサイエンス・アカデミー運営規程

32 ●つくばサイエンス・アカデミー役員

表紙：小惑星探査機「はやぶさ」探査機本体、地球帰還カプセル再突入 イラスト：池下章裕
小惑星探査機「はやぶさ」想像図 ©宇宙航空研究開発機構(JAXA)

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：2011年10月31日
発行人：江崎玲於奈
編集人：岡田雅年 溝口健作 篠田義視 齊藤具子
熊谷 亨 目 義雄 角田方衛 松崎邦男