



Science & Technology Trends

科学技術動向

11-12
2011
No.126

レポート

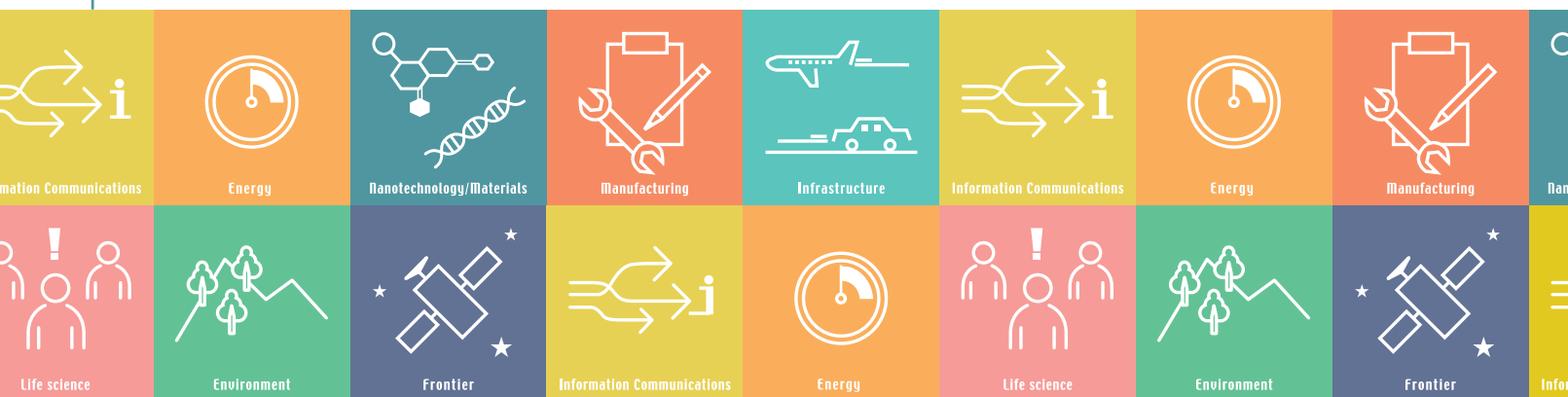
- p2,13** 地域イノベーションと震災復興に寄与する地熱エネルギーの利用
- p3,29** ふたつの大震災から見た我が国の地震研究の動向と課題

トピックス

- p4** 気候変動を前提とする高潮ハザードの予測
- p5** 工業用ナノ材料のリスク評価手法の開発
- p6** インクジェットにより高移動度単結晶有機デバイスを作製する技術
- p7** インターネットのトップレベル・ドメインの自由化
- p8** 使命を終えた大型人工衛星の部品落下
- p9** Facebook アプリケーション開発による経済効果の推定

特別記事

- p10** 2011年ノーベル賞自然科学3部門の受賞者決まる



地域イノベーションと震災復興に寄与する 地熱エネルギーの利用

地熱は、我が国固有の豊富な再生可能エネルギー資源であり、我が国にとって太陽光発電や風力発電以上にポテンシャルが高い。地熱発電に換算した資源量は約 23 GW 分（30 年間持続できる出力）で、現在の日本の国内一般電気事業者の電源容量の約 1 割以上と見積もられており、世界第 3 位の規模を誇る。しかし、これまでに設置された地熱発電所の容量は 540 MW にとどまっており、まだ大幅な増大の余地がある。他の再生可能エネルギーと比べ、地熱エネルギーの特徴は、電力のみならず多大な熱を供給できる点である。家庭で使用される電力の約半分は、給湯や暖房などの熱の生成に使用されているが、地熱は直接熱エネルギーとして供給できるメリットがある。しかも、太陽光や風力発電のように天候の影響を受けずに安定した供給源である。規模にもよるが、技術的には全国どこでも供給可能な地産地消のエネルギーとなるポテンシャルをもつ。

このように、地熱は持続可能な新たなエネルギー源となるだけでなく、熱を効率よく利用することによる省エネ効果はもちろんであるが、産業のあまりない地域に新産業をもたらす可能性を秘めている。つまり地熱の普及によって、直接・間接の要因を通じて地域住民の新たな雇用機会をもたらす、交流人口を増大させ、地域経済効果に寄与することも期待され、地域貢献のポテンシャルが大きい。実際に、地熱エネルギーによりエネルギー自給率が 100% 以上の地域が日本にもある。

特に大震災からの復興を目指す東北地方は、折しも地熱資源に恵まれたエリアであり、また比較的寒冷な気候であるために、持続可能な熱の供給は温暖な地域よりも恩恵が大きい。大規模集中型の地熱発電ももちろん重要であるが、建設に長い年月を要することから、震災復興の観点では、バイナリ発電や温泉発電など、比較的短期間で実施できるものを手始めに地熱を利用することが望まれる。

今後円滑に地熱発電を導入するためには、発電事業を単独で計画するのではなく、地域全体で地熱発電を核とした総合的な地域未来設計を行い、国がその全体計画を支援していく仕組みが有効であると考えられる。他国での事例を参考に、法律の改正や技術開発支援などが望まれる。日常生活において必要な熱供給源として地熱資源を活用し、地熱発電を核としたコミュニティを構築し、国がそれを支援することで、低炭素社会が構築でき、また地域の活性化にもつながる。そのためには、自然公園法と温泉法などの法律の改定、環境アセスメントの短期化、技術開発支援など、国による施策が望まれる。

ふたつの大震災から見た我が国の 地震研究の動向と課題

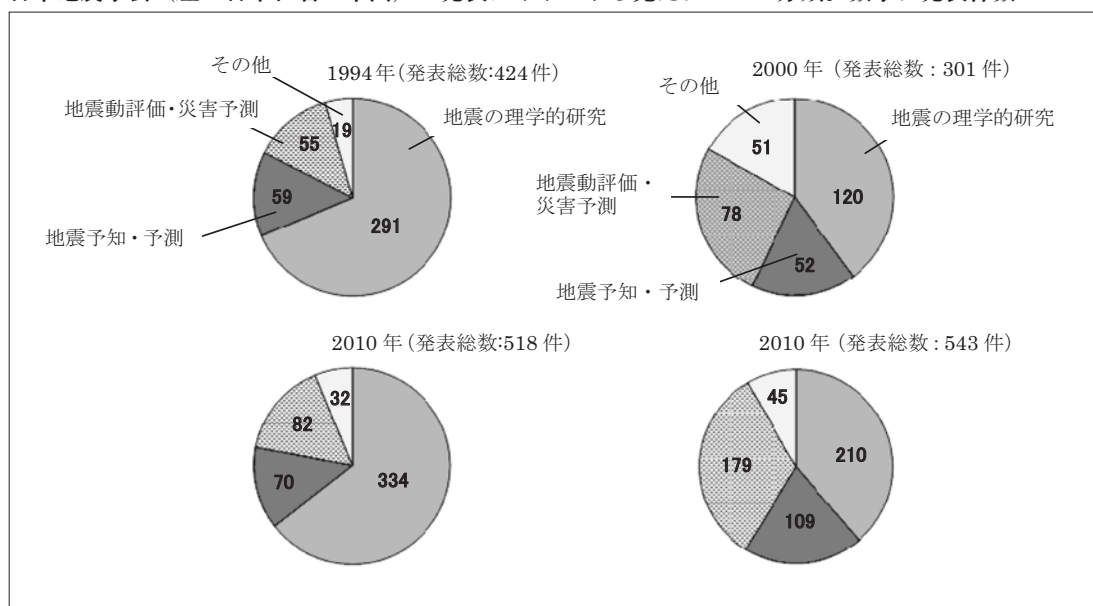
20世紀の100年間に、我が国では10人以上の死者・行方不明者の出た震災が平均3.2年に1回の割合で起きてきた。21世紀に入っても、同じペースで震災は続いている。

2011年3月11日に起きたM9地震による東日本大震災は、戦後最大の震災・津波災害とともに原発事故を誘発し、我が国全体に深刻な問題を投げかけた。地震調査研究推進本部は、宮城県沖に全国でもっとも高い確率をもってM7～M8レベルの地震が発生するとの警告を事前に発していた。しかし、M9レベルの大地震が発生し得るとまでの認識を示し得ず、起きた事態に地震研究の関係者は大きな衝撃を受けた。今回の震災は、今後の地震研究にどのような影響をもたらすのだろうか。

1995年の阪神・淡路大震災後に我が国の地震研究は大きな変革を遂げてきたとされている。しかしながら、(社)日本地震学会において、阪神・淡路大震災直前の1994年秋と今回の大震災直前の2010年秋の定期大会の研究発表タイトルを比較した結果からは、16年の時間経過による差がほとんどみられない。一方、米国地震学会との比較を行なうと、両国の学会の発表傾向に系統的な差異のあることが窺える。セッションの建て方からも同様の印象を受ける。その違いは研究の性向に見られるミッション性の濃淡であり、米国地震学会の発表には、ミッション指向性が強いと感じられる。

第4期科学技術基本計画では、科学技術全体に対して、国民生活に関わる種々の課題への具体的貢献の可否が問われている。これに沿うべき研究の方向性を決定づけるものは、研究評価の仕方であると筆者は考える。我が国の地震研究に、これまでよりもより高いミッション性を求めるとするならば、プロジェクト研究に対する研究評価の見直しだけでは不足であり、むしろ、研究者個人の評価方法を省みる必要があると考える。これは、研究管理の場に立つ者の手腕に関わる問題であり、真のリーダーシップが問われる課題でもある。

日米地震学会（左：日本、右：米国）の発表タイトルから見たテーマの分類。数字は発表件数



科学技術動向研究センターにて作成

地球温暖化による気候変動の影響のひとつとして、台風の被害の増大が懸念されている。2011年9月、(独)防災科学技術研究所と岐阜大学は、現在および地球温暖化を想定した2099年時点の伊勢湾岸等における高潮・高波のハザード分析の結果を発表した。今回のシミュレーションは、台風の強度や進路などとともに各地の潮位や波高を解析・予測したもので、1959年の伊勢湾台風を大きく超える被害の可能性を指摘した。東日本大震災以来、発生頻度は低い規模の大きい災害への備えの必要性が指摘されている。従来の災害経験からは想定しえなかったハザードを予測することは、実効性のある防災対策を図るうえでより重要になる

トピックス / 気候変動を前提とする高潮ハザードの予測

地球温暖化による気候変動の影響のひとつとして、台風の被害の増大の懸念が指摘されている¹⁾。日本でも、2011年台風12号は、観測史上の降水量記録を大幅に更新した。

2011年9月、(独)防災科学技術研究所と岐阜大学は、コンピューターシミュレーションによって、現在および地球温暖化を想定した将来の伊勢湾岸等において発生可能な最大級の高潮・高波の予測概要を発表した²⁾。高潮の再現精度が高い大気―海洋一波浪の一体計算モデルと、台風を任意の位置に与える手法の組み合わせにより、高潮・高波の極限ハザードを予測した初めてのものである。「将来」とは、IPCCの第三次報告書の中で中庸なA1Bシナリオによる2099年9月時点を指す。

高潮とは、台風等による①気圧の異常な低下、②沖の海水が岸(特に湾奥)に吹き寄せられること、の複合要因で、潮位が平常時よりも異常に上昇する(潮位偏差を生ずる)現象である。また、高波とは、強風によって波の振幅が大きくなることである。一般に波の高さは、一定時間内に観測される波高の上位3分の1の平均(有義波高)で表される³⁾。

今回のシミュレーションは、気候条件から発生しうる最大級の台風を設定して、紀伊半島南岸沖の海上に等間隔で50ケースの初期位置を与え、その後の台風の強度や進路などとともに各地の潮位や波高を予測している。

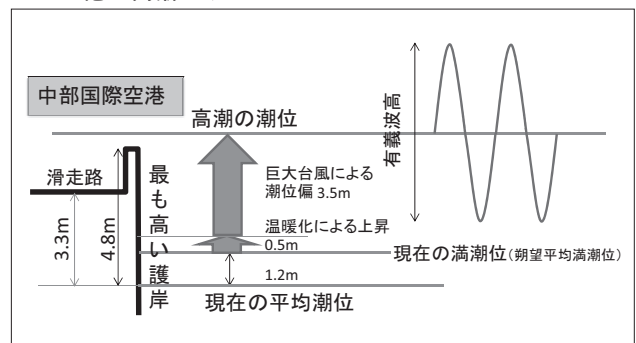
まず現時点でも起こりうる、最大の潮位偏差を引き起こすシナリオは、台風が1959年の伊勢湾台風よりもやや東寄りの尾鷲市付近～津市付近を通過するケースである。台風が海上に留まる時間が長くなるため、紀伊半島上陸時の中心気圧が伊勢湾台風の930 hPaよりも低い915 hPaとなる。このケースでは、名古屋港での潮位偏差は最大5.6 mとなり、伊

勢湾台風の際の観測記録3.5 mの約1.6倍となる。

2099年9月時点では、IPCCのA1Bシナリオによれば、大気中のCO₂濃度が710 ppmでなお濃度上昇が収束しないとされている。この気候条件では、最大級の台風の紀伊半島上陸時の中心気圧は、50ケースすべてにおいて895～905 hPaとなる。この場合、名古屋港の潮位偏差は最大6.9 mに達する。同様に中部国際空港の潮位は、温暖化による海面上昇や満潮位を考慮すると、潮位は現在の平均潮位よりも最大5.2 m上昇すると予測され、敷地全体が海面下に没する。その海面上を有義波高6 m超の高波が打ち寄せることとなり、空港施設に壊滅的な被害が予想される(図表)。

東日本大震災以来、発生頻度は低い規模の大きい災害への備えの必要性が指摘されている。その中で、地球温暖化による気候変動は、従来の災害経験では想定しえなかったさまざまな影響条件を与える懸念がある。今後あらゆる可能性を予測し、そのような場合でも実効性のある対応策が求められるようになる。その前提として、ハザード予測はより重要になる。

図表 気候変動を前提とした2099年における中部国際空港の高潮ハザード



科学技術動向研究センターにて作成

- 参考 1) 科学技術動向 2011年7・8月号 p8
 2) (独)防災科学技術研究所プレスリリース
 3) 気象庁ホームページ: <http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/db/wave/comment/term/youugi.html>

工業用ナノ材料は細胞より小さく比表面積が大きいため、人体への影響リスクも懸念されている。(独)産業技術総合研究所と産業医科大学を中心とする研究グループは、工業用ナノ材料の新しいリスク評価手法を開発し、特に二酸化チタン・フラーレン・カーボンナノチューブの3つの物質群について各許容曝露濃度を決定した。研究グループは、リスク評価の標準的な手法として、新規ナノ材料のリスク評価にも適用可能な2軸アプローチによる推定手法を提案している。これらのリスク評価手法と評価値は、今後、OECDやISO規格にも提案される予定である。

トピックス2 工業用ナノ材料のリスク評価手法の開発

ナノサイズの形態を有する材料は機能の大幅な向上や新機能の発現が期待され、新しい工業材料としての研究開発が活発化している。一方で、ナノ材料は、細胞より小さいことによる生体内部への侵入あるいは比表面積が大きいことによる高い表面活性や反応活性が予想されるため、従来材料とは異なる人体への影響リスクが懸念されている。

世界的に見ても、ナノ材料の形態規定もリスク評価手法はまだ確立されていない。一般の化学物質は、主に化学的な特性による有害性でリスクが評価されるが、ナノ材料は主に形態などの物理的な特性による有害性が問題となることから、リスク評価のアプローチは大きく異なる。日本では、2006～2010年の第3期科学技術基本計画において重点課題のひとつに挙げられ、ナノ材料のリスク評価の早期確立が進められてきた¹⁾。

2011年8月、(独)産業技術総合研究所と産業医科大学を中心とする研究グループは、工業用ナノ材料を対象にしたリスク評価の手法を開発し、特に二酸化チタン(TiO₂)・フラーレン(C₆₀)・カーボンナノチューブ(CNT)の3つの物質群については、作業環境下の各許容曝露濃度(PL:10年の時限付き)をTiO₂:0.6 mg/m³、C₆₀:0.39 mg/m³、CNT:0.03 mg/m³とそれぞれ決定した²⁾。

研究グループは、サイズや形態が正確に同定された試料で有害性試験を行うことを重要と考え、試料の調製と計測手法の確立を重点的に進め、その成果を「手順書」として公開した³⁾。例えば、粒子が凝集していない単分散の試料を基本とし、凝集した2次粒子においても100 nm以下まで分散させる技術を開発した。細胞に取り込まれたナノ材料については、分解能の高い電子顕微鏡で計測す

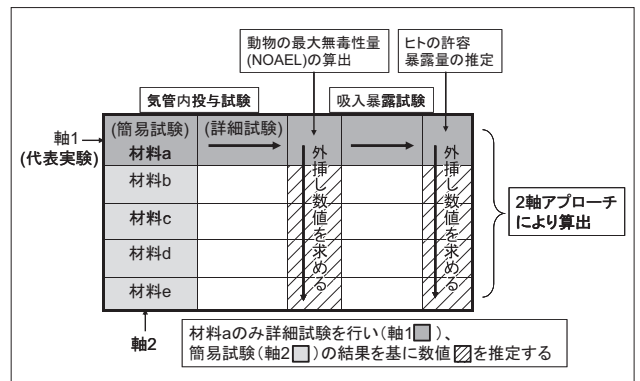
ることとした。

有害性試験としては、ラットを用い、ナノ材料の再凝集を回避するための短期(4週間)の吸入曝露試験と、それと並行して長期(2年間)の気管内投与試験を行い、ナノ材料が長期的に肺に残留することによる種々の影響を調べた。

ナノ材料の製品化に際しては、各企業が標準的な手法を用いてリスク評価を実施し、安全に関する情報を製品の付加価値とすることができる。しかし、物質的には同じでもサイズや形態が多様なナノ材料では、通常的手法では膨大な試験が必要となる。そこで、研究グループは、リスク評価の標準的な手法として、新規ナノ材料のリスク評価にも適用可能な2軸アプローチによる推定手法を提案している(図表参照)。

また、安全性確保のための世界的な取り組みとして、経済協力開発機構(OECD)で工業用ナノ材料作業部会が設置されている。研究グループでは今後、これらのリスク評価手法と評価値を、OECDならびにISO規格にも提案していく予定である。

図表 2軸アプローチによるリスク評価方法



参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

参 考

- 1) 竹村誠洋、「ナノテクノロジーの社会受容に関する取り組み」、科学技術動向、2008年3月号、p.24
- 2) 中西準子、ナノリスク評価書～考え方と結果の概略～(略称:考え方)、2011年8月17日(最終報告版)
- 3) 中西、本田、五十嵐監修、ナノ材料有害性試験のための試料調製方法と計測方法(略称:手順書)、2011年9月15日(暫定版)

2011年7月、(独)産業技術総合研究所を中心とする研究グループは、インクジェット印刷により基板上の任意の位置に単結晶の有機半導体膜を作製する技術を発表した。試作した有機薄膜トランジスタ(TFT)は、電界効果移動度が従来のTFTの約100倍の値で、現在液晶ディスプレイに用いられている非晶質シリコンTFTや酸化物TFTを超える性能であった。高い移動度を有する単結晶の有機半導体膜をTFTに用いたことで、液晶や有機ELディスプレイの高画質化が図れ、さらにインクジェット印刷技術の適用により、高コストの真空プロセスを不要とし省エネルギーかつ低コストでの製造を可能とする。さらに、高効率で低コストの大面积有機太陽電池の実現の可能性もある。

トピックス3 インクジェットにより高移動度単結晶有機デバイスを作製する技術

有機半導体を用いた電子デバイスは、軽い・薄い・落としても壊れない特徴を持った、より高度なマン・マシン・インターフェースの実現や、印刷技術が利用可能なため、省資源・省エネルギーによる低コストでの生産が期待できる。しかしながら、これまで結晶性の高い有機半導体膜を基板上に形成する技術はなく、非晶質シリコン半導体膜に比較して移動度が低いことが、実用化への課題の一つとなっていた。

2011年7月、(独)産業技術総合研究所を中心とする研究グループは、インクジェット印刷により基板上の任意の位置に単結晶の有機半導体膜を作製する技術を発表した(図表)¹⁾。この技術を用いて試作した有機薄膜トランジスタ(TFT)は、電界効果移動度が最大で $31.3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (平均 $16.4 \text{ cm}^2/\text{Vs}$)を示した。これは、従来の有機TFTの約100倍の値で、現在液晶ディスプレイに適用されている非晶質シリコンTFTや酸化物TFTを超える性能である。

単結晶有機半導体膜は、有機半導体(C₈-BTBT*)を含む半導体インクと結晶化インクの2種類のインクを用い、2基のインクジェットヘッドから塗布して作製された。まず、1基目のインクジェットヘッドから結晶化インクを塗布し、続いて2基目のヘッドから半導体インクを結晶化インクに重ねて塗布して、基板上に3ナノリットルの混合液滴を形成する。混合液滴の内部では、有機半導体は直ちに過飽和状態になり、液滴表面において緩やかに半導体結晶の成長が始まり、最終的には半導体結晶が液滴表面全体を覆う。膜厚は塗布条件により30~100nmと変えられるが、均一性は極めて高く、膜の表面は分子レベルで平坦である。さらに、基板上に予め親水/疎水表面処理を施して、塗布した液滴の形状を制御することにより、結晶の成

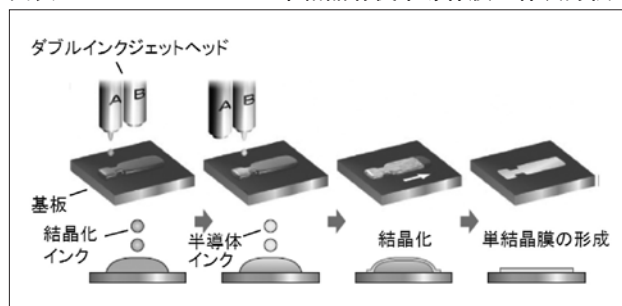
長方向も制御できる。

研究グループでは、単結晶有機半導体膜上に金電極と有機高分子からなる絶縁層を形成し、TFTを試作した。このTFTは高移動度特性を有し、スイッチング電流のon/off比が、実用化されている非晶質シリコンTFTと同等の5~7桁で、8ヵ月空気中に放置した後も電流値減少は10%以下であった。研究グループでは、今後、さらに素子の安定性の向上とともに、電極も含め全印刷方式でのプロセス開発を行う予定である。

大面积への形成が容易なインクジェットによる高移動度単結晶有機半導体膜を用いたことで、液晶や有機ELディスプレイの高画質化が図れ、さらに軽量性やフレキシブル性と併せての用途拡大に可能性がある。また、インクジェット印刷技術の適用によって、これまで半導体膜製造に不可欠であった高コストの真空プロセスを不要とし、省エネルギーかつ低コストでのデバイス製造が可能になる。さらに研究グループでは、有機半導体インクの研究開発が進めば、高効率で低コストの大面积有機太陽電池が実現する可能性もあると考えている。

*C₈-BTBT: 2,7-dioctyl [1] benzothieno [3,2-b] [1] benzothiophene

図表 インクジェットによる単結晶有機半導体膜の作製方法



参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

参考 1) H. Minemawari et. al., "Inkjet printing of single-crystal films", Nature, doi : 10.1038/nature10313.

インターネットのドメインを管理する国際団体 Internet Corporation for Assigned Names and Numbers (ICANN) は、2011年6月20日に分野別のトップレベル・ドメイン (gTLD) の自由化を決定した。gTLD には、「.com」や「.net」など22種類のドメインがあるが、新たに都市名や企業名あるいは製品名や製品分野名を登録できるようになる。日本でも申請と運用準備の支援を始めており、2012年1月12日から4月12日まで申請を受け付け、最短9ヶ月で承認される。使用許可を含めたサブドメインの直接管理により、日本語サブドメインの使用など目的に合ったサイト運営が可能となり、新たなビジネスモデルによるサービス・イノベーションが期待される。

トピックス4 インターネットのトップレベル・ドメインの自由化

インターネットのドメインを管理する国際団体 Internet Corporation for Assigned Names and Numbers (ICANN) は、2011年6月20日にシンガポールで開催した特別会議で、分野別のトップレベル・ドメイン generic top-level domain (gTLD) を自由化することを決定した¹⁾。トップレベル・ドメインには、「.jp」(日本) や「.us」(米国) など252の国別トップレベル・ドメイン (ccTLD) と、「.com」(商業組織用) や「.net」(ネットワーク用) など22の分野別トップレベル・ドメイン (gTLD) がある。今回の決定により、都市名や企業名あるいは製品名や製品分野名などを gTLD として登録できるようになる。アルファベット3文字以上の文字列であることが必要条件だが、将来的には日本語を含む各国語での対応も可能になる。

ICANN は、2012年1月12日から4月12日までの期間に新 gTLD の申請を受け付け、50項目の審査項目をもとに申請者の実績や技術力などの初期審査および追加審査と、システムテストなどの権限委譲準備を経て、最短9ヶ月で申請された新 gTLD を承認する予定である。ICANN への申請費用は185,000ドルで、承認後には年額25,000ドルの契約費用が発生する。

日本でも、GMOドメインレジストリ(株)や日本ベリサイン(株)が、新 gTLD の申請と運用準備の支援を始めている^{2,3)}。「.canon」、「.hitachi」、「.ryukyu」、「.okinawa」などが申請される予定であり、「.tokyo」や「.kyoto」も誕生する可能性がある。海外では、「.paris」、「.london」、「.nyc」、「.health」、「.movie」、「.eco」、「.shop」、「.sale」、「.music」なども申請予定である。

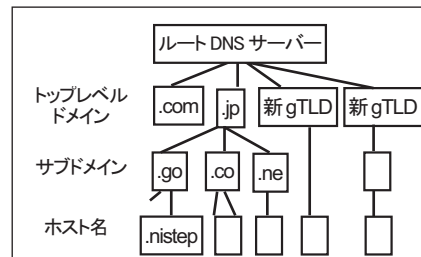
Webサーバーやmailサーバーには、IPv4の場合、202.241.05.04のように3桁ごとに区切った合計12桁のIPアドレスが付けられている。このような数字の羅列では覚えるのに不便なため、IPアドレスの代わりに nistep.go.jp のようなドメイン名が使われ、インターネット上の住所の役割を果たしている。ドメイン名を入力すれば、DNS

(Domain Name Service)サーバーによってIPアドレスに変換され、そのIPアドレスを持つwebサーバーに繋がる。

ドメインは、図表のような階層構造をしており、各ドメインには、少なくとも1つのDNSサーバーを置くことが義務付けられている。上層ドメインは、1つ下の階層のドメインのみを管理する。最上層には、世界各国の13の企業・団体が管理するルートDNSサーバーがあり、それぞれのサーバーは、トラフィック分散やリスク分散のため、世界各地の分散サイトで運営されている。新 gTLD がルートDNSサーバーに登録されると同時に、新 gTLD の取得者はサブドメインを管理する義務を負うことになる。

新しい gTLD の取得により、取得者の意思に基づいて、使用許可を含めたサブドメインの直接管理が可能となる。これにより、セキュリティの強化、顧客対話管理、日本語サブドメインの使用など、目的にあったサイト運営ができる。例えば、全国の病院を .hospital というドメインで統一すれば、医療機関どうしの連携が密になり、安全に電子カルテを交換することが可能となる。また、都市名の gTLD であれば、地元の商店街や観光施設との連携が可能である。検索エンジンはドメインの信頼性も考慮するため、信頼性の高いドメインを構築できれば、検索エンジンで上位表示される可能性も大きくなる。gTLD の自由化により、このような新たなビジネスモデルによるサービス・イノベーションが期待される。

図表 ドメインの階層構造



科学技術動向研究センターにて作成

参 考

- 1) ICANN ニュースリリース (2011年6月20日) : <http://www.icann.org/en/announcements/announcement-20jun11-en.htm>
- 2) GMOドメインレジストリ(株) ニュースリリース (2011年6月21日) : <http://www.gmo.jp/news/article/?id=3770>
- 3) 日本ベリサイン(株) ニュースリリース (2011年6月22日) : https://www.verisign.co.jp/press/2011/pr_20110622b.html

2011年9月、米国の地球観測衛星「UARS」が大気圏に再突入し、部品の一部が燃え尽きずに南太平洋に落下した。続いて10月には、ドイツのX線天文衛星「ROSAT」がベンガル湾上空付近で再突入し、海中に落下した。1993年以降、「国際機関間スペースデブリ調整委員会」ではガイドラインが作成され、衛星には種々なデブリ対策が施されているものの、宇宙活動の安全を脅かす問題が発生しており、これらの対策に加え、衛星同士の衝突回避や太陽風による衛星機能喪失などを防御する宇宙状況認識（SSA）への関心が高まっている。

トピックス5 使命を終えた大型人工衛星の部品落下

2011年9月と10月に、使命を終えた大型衛星の部品落下が相次ぎ、世界中の注目を集めた。どちらも海上に落下して、人的被害や物的被害は出なかった。

1991年に米国航空宇宙局（NASA）がスペースシャトルにより地球周回軌道に投入した質量6.5トンの上層大気観測衛星「UARS」（Upper Atmosphere Research Satellite）が、20年目の2011年9月24日に米領サモア付近で大気圏に再突入し、総計530kg程度の10数個の部品が燃え尽きずに800kmほどのエリアに散乱した。「UARS」は運用中にオゾン層の化学成分を計測するなど多くの科学成果を挙げ、2005年にその役割を終えていた¹⁾。「UARS」の軌道傾斜角（衛星の軌道面と赤道面のなす角度）が57度であるため、北緯57度から南緯57度まで、世界の人口の大部分が居住している広い地域で落下の可能性があった。特定の人々が落下物にぶつかる確率は22兆分の1、人間にぶつかる確率は3,200分の1と予測されていた。

一方、1990年に打ち上げられたドイツ航空宇宙センター（DLR）の天文観測衛星「ROSAT」（Roentgen Satellite）が10月23日にベンガル湾付近上空で再突入し、部品が湾内に飛散したと見られている。

「ROSAT」は搭載X線望遠鏡により全天の観測を行うなど大きな科学成果を挙げ、1998年に役目を終えていた²⁾。

「ROSAT」は打上げ時質量が2.4トンで「UARS」より軽かったが、燃え尽きずに落下した部品は最大1.7トンに及ぶと予想されていた。「ROSAT」の軌道傾斜角は約53度で、「UARS」と同様に広い地域に落下する可能性があった。人間にぶつかる確

率は「UARS」より高い2,000分の1と発表された。

飛行経路をウェブ情報³⁾により追跡したところ、10月23日の日本時間9時35分前後に屋久島、足摺岬、琵琶湖、北アルプスなどの上空を飛行して三陸海岸から太平洋へ抜けていた。その直後、10時45分から11時15分の間に「ROSAT」は消失した。

落下時刻の予測は、ドイツ国内のレーダ観測施設の観測データや米国戦略司令部（USSTRATCOM）の衛星追跡データなどに基づいてDLRが逐次発表した。最終予測は日本時間10月23日朝に、8時30分から14時の間と発表された。この中央値が11時15分であり、実際の消失時間帯は予測にかなり近かったと言える。

1993年以降、世界の主要な宇宙機関の研究者が集まって「国際機関間スペースデブリ調整委員会」（IADC = The Inter-Agency Space Debris Coordination Committee）という討議の場が設けられ、その中で有害な宇宙デブリを低減するためのガイドラインが作成された。その結果、最近の衛星は、落下時に人間にぶつかる確率が10,000分の1以下になるように設計されるようになった。また、燃え尽きやすい材料の選定、分解しやすい構造を採用することや、制御可能なうちに再突入させたり、安全な軌道まで高度を上げるなどの方策が実施されている。

今回のような過去の大型衛星だけでなく、人工衛星同士の衝突や、太陽活動により発生する磁気嵐による衛星機能の喪失など、宇宙活動の安全性を脅かす問題がいつでも起こりうる状況が発生しており、宇宙状況認識（SSA = Space Situational Awareness）への関心が高まっている。

参 考

- 1) 米国航空宇宙局（NASA） UARS : http://www.nasa.gov/mission_pages/uars/
- 2) ドイツ航空宇宙センター（DLR） ROSAT : <http://www.dlr.de/dlr/en/desktopdefault.aspx/tabid-10424>
- 3) REAL TIME SATELLITE TRACKING : <http://www.n2yo.com>

米国メリーランド大学のデジタルイノベーション技術戦略センターは、Facebookのアプリケーション開発によって創出された雇用から経済効果を分析した。急成長したFacebookアプリケーション開発企業および関係する他産業において創出された雇用は18.2～23.6万人で、他産業への波及を含めた経済効果は年間121.9～157.1億US\$と推定された。この推定には、雇用以外の経済的価値の向上は含まれておらず、それらも含めると、Facebookによる経済効果はこの研究で推定された値よりもかなり大きいと考えられる。

トピックス6 Facebookアプリケーション開発による経済効果の推定

ソーシャルネットワークサービスの1つであるFacebookの利用者は全世界で7億5000万人を越えている。2007年にFacebook上でアプリケーションを開発する環境が提供されて以来、ゲームなどのFacebookアプリケーションを開発する企業が急成長している。

2011年9月、米国メリーランド大学のデジタルイノベーション技術戦略センターは、Facebookのアプリケーション開発による雇用創出を中心とする経済効果の推定し、結果を発表した¹⁾。他産業への波及を含めた経済効果を定量的に解析した例はこれが初めてである。研究結果によれば、米国におけるFacebookアプリケーション開発によって創出された雇用は18.2～23.6万人であり、年間121.9～157.1億US\$の経済効果があると推定された。この数字は、2010年の米国GDP比0.08～0.12%にあたる。

この研究では、Facebookアプリケーション開発企業（以下、開発企業）における雇用創出という直接効果と、関連する他産業における雇用創出の間接効果に分けて推計を行ない、両者を合計している。

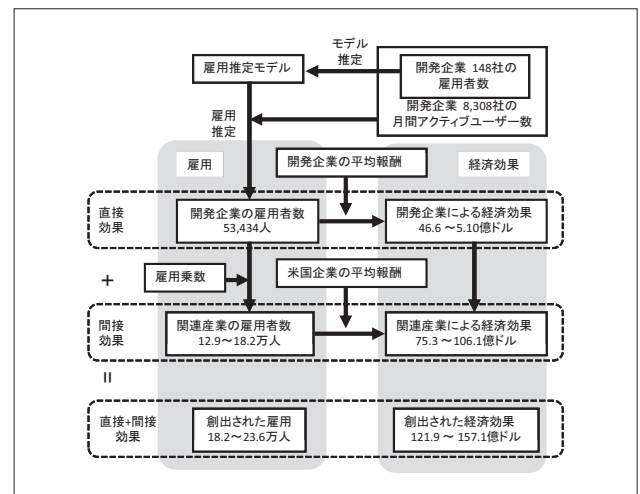
まず、雇用の直接効果は開発企業の雇用者数とし、アプリケーションの月間アクティブユーザー数と開発企業数の相乗効果を示すモデルを用いて推定した。雇用者数の得られた148社のデータから雇用推定モデルを決定し、開発企業8,308社の月間アクティブユーザー数から開発企業全体の雇用者数を53,484人と推定した。一方、雇用の間接効果は、直接効果である開発企業の雇用者数に、関連する産業の雇用乗数をかけることで求めている。具体的には、産業連関分析等により求めたブロードバンド産業、通信産業、インターネット・情報産業の雇用乗数をかけ合わせている。その結果、間接効果による雇用は12.9～18.2万人と推定された。直接・間接の両効果を合計し、創出された雇

用を18.2～23.6万人と推定した。

経済効果は雇用者数に平均報酬をかけて算出している。直接効果は、米国の全スタートアップ企業・ITスタートアップ企業・調査した開発企業63社の平均報酬を基に、46.6～51.0億US\$と推定した。間接効果は、米国企業の平均報酬を基に75.3～106.1億US\$と推定した。両効果を合計し、経済効果を年間121.9～157.1億US\$と推定した。

ただし、この研究ではアプリケーション開発による雇用創出のみに注目しており、推定結果はFacebookにより創出された経済効果の一部に過ぎない。ソーシャルネットワークサービスを含めたウェブサービスの場合、課金サービスや有料コンテンツによる収益に加えて、アクセス数の増加による商品・サービス、広告やブランドなどの経済的価値の向上も経済効果の一部と考えることができる。したがって、これらも含めると、Facebookによる経済効果は、この研究で推定された値よりもかなり大きいと考えられる。

図表 Facebookアプリケーション開発による経済効果の推定



参考文献¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

参考 II-Horn Hann, Siva Viswanathan, and Byungwan Koh, The Facebook App Economy, Center for Digital Innovation, Technology and Strategy, The University of Maryland, http://www.rhsmith.umd.edu/DIGITS/pdfs_docs/research/2011/AppEconomyImpact091911.pdf

特別記事

2011年ノーベル賞 自然科学3部門の受賞者決まる

2011年のノーベル賞自然科学3部門(生理学・医学賞、物理学賞、化学賞)の受賞者が決まった。10月3日にスウェーデン カロリンスカ研究所より生理学・医学賞が、同国王立科学アカデミーから4日に物理学賞、5日に化学賞が発表された。以下に受賞者と受賞理由について紹介する。

自然科学3部門受賞者と受賞理由の概要

(1) 生理学・医学賞

Bruce A. Beutler (米)：米スクリプス研究所教授

Jules A. Hoffmann (仏)：仏国立科学研究センター細胞分子生物学研究所ディレクター
ストラスブル大学教授

Ralph M. Steinman (米)：米ロックフェラー大学教授

受賞理由

「自然免疫の活性化に関する発見、および樹状細胞の発見と獲得免疫におけるその役割の発見」による

ヒトや動物は、免疫反応によって、体内に侵入した細菌や他の微生物から身を守っている。長い間、その免疫反応を開始するスイッチの正体について研究がなされた中で、Beutler氏とHoffmann氏は、微生物が体内に侵入した時に最初に働き自然免疫を活性化させるタンパク質を発見した。Hoffmann氏は、1996年にショウジョウバエを使った実験で、Tollというタンパク質が真菌のセンサーとして働くことを示した¹⁾。Beutler氏は、1998年にマウスのリポ多糖(LPS)を認識する受容体である、Toll様受容体を同定した²⁾。Steinman氏は樹状細胞を発見し、この細胞が自然免疫に続く獲得免疫を活性化し制御することを明らかにした(代表的論文として³⁾)。獲得免疫は、微生物を体内から排除する役目を担う反応である。

3人の受賞者の研究業績によって、自然免疫とそれに続く獲得免疫の活性化とその調節の仕組みが明らかにされ、その後、様々な疾患のメカニズムの解明に役立った。彼らの研究は、感染症、がん、炎症性疾患に対する新たな予防法や治療法の開発への道を開いた。

参考文献

- 1) Lemaitre B. et al., The dorsoventral regulatory gene cassette *spätzle/Toll/cactus* controls the potent antifungal response in drosophila adults. *Cell* 1996 ; 86 : 973-983. (背腹の制御遺伝子カセット *spätzle/Toll/cactus* は、ショウジョウバエで抗真菌反応をコントロールする)
- 2) Poltorak A. et al., Defective LPS signaling in C3H/HeJ and C57BL/10ScCr mice : Mutations in *Tlr4* gene. *Science* 1998 ; 282 : 2085-2088. (C3H/HeJ マウスおよび C57BL/10ScCr マウスにおける LPS シグナリングの欠損 : *Tlr4* 遺伝子の変異)
- 3) Steinman R. M. et al., Identification of a novel cell type in peripheral lymphoid organs of mice. *Journal of Experimental Medicine* 1973 ; 137 : 1142-1162. (マウスの末梢リンパ組織における新規の細胞種の同定)

(2) 物理学賞

Saul Perlmutter : (米) カリフォルニア大学およびローレンス・バークレイ国立研究所

Brain P. Schmidt : (豪) オーストラリア国立大学

Adam G. Riess : (米) ジョーンズ・ホプキンス大学

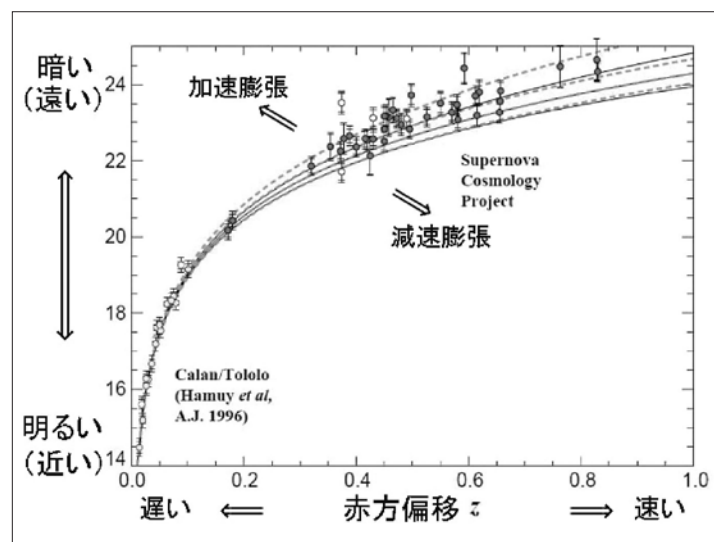
受賞理由

「遠方の超新星の観測による宇宙の膨張加速の発見」に対して

137億年前に起きたビッグバン以降、宇宙は膨張し続けていることはよく知られている。重力によって膨張速度は遅くなり、遅くなりながらも膨張を続ける、あるいは、収縮に転じてビッグクランチを迎える、という宇宙の未来についての2つのシナリオが描かれていた。Perlmutter博士は「超新星宇宙プロジェクト」を、Riess博士とSchmidt博士は「High-z超新星探査チーム」を率い、膨張速度がどの程度遅くなっているのかを求めするために、世界中の天文台の協力を得て、遠方の数十の超新星の観測を行った。観測結果を用いて宇宙の膨張速度を計算したところ、膨張速度は70億年くらい前に比べて速くなっているという、驚くべき結果となった。宇宙の膨張が加速するためには斥力が必要であり、その原因として、アインシュタインの宇宙項を一般化した「ダークエネルギー」が考えられているが、その実体は未だに謎に包まれたままである。

超新星とは爆発が起きて一時的かつ急激に明るくなる星のことである。太陽型恒星の終末形態である白色矮星は、近接連星を伴うと連星から水素が供給されて質量が増加し続ける。しかし、質量が太陽質量の1.44倍になった時に、超新星爆発を起こす。このタイプの超新星はIa型と呼ばれ、どのIa型超新星も同じ明るさを持ち同じ収束過程をたどる。Ia型超新星の明るさを測定することにより地球からの距離が分かり、発光または吸収スペクトルの赤方偏移を測定することにより地球から遠ざかる速度が分かる。図の一番上の実線は、宇宙が等速膨張する場合であり、また、上の破線ほど、ダークエネルギーの割合が大きい。遠い超新星の測定点は、等速膨張の理論曲線より左側にあり、遠い星ほど、即ち、時間を遡るほど、地球から遠ざかる速度は遅いことがわかる。このようにして、宇宙の膨張は加速していることが結論づけられた。さらに、ダークエネルギーは宇宙の全エネルギーの73%程度を占めると推測される。

Riess博士たちは16個のIa型超新星を、Perlmutter博士たちは42個のIa型超新星を観測して、同じ結論に達した^{1,2)}。今回の発見は、宇宙の常識を塗り替える大きな発見であるが、その原因については未だ未解明の部分が多い。



文献3より引用

参考文献

1) A.G. Riess et al., *Astron. J.*, 116, 1009-1038, (1998)

2) S. Perlmutter et al., *Astrophys. J.*, 517, 565-586, (1999)

3) Nobelprize.org. 5 Oct. 2011,

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/sciback_fy_en_11.pdf

(3) 化学賞

Dan Shechtman (イスラエル) : テクニオン-イスラエル工科大学 特別教授

受賞理由

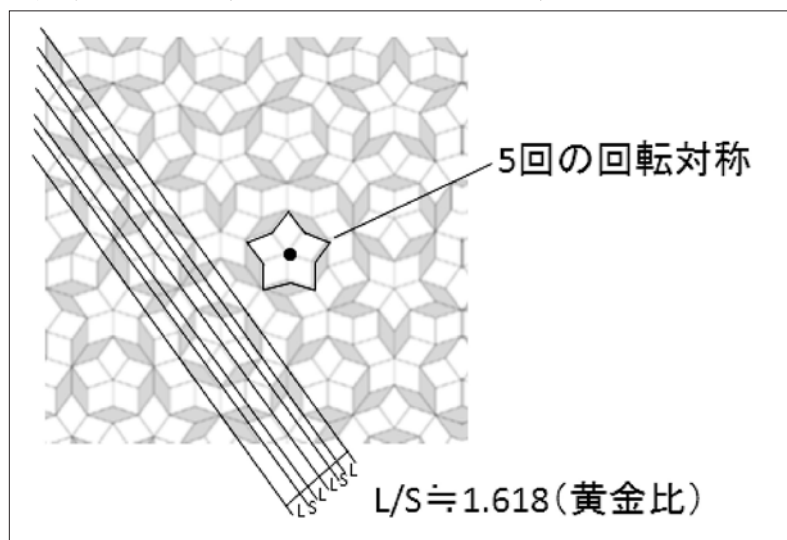
「準結晶の発見」に対して

固体物質の構造は、原子（あるいは分子、イオン）が空間的に規則正しく配列された結晶 (crystal) と、配列に規則性のない非晶質 (amorphous) に分類できると考えられていた。さらに、結晶には、単位となる原子配列を平行に移動すると周期的に重なる性質 (並進対称性) がある。1984年11月、Dan Shechtman 博士は、原子配列に規則性はあるが結晶と認められる周期性を持たない、新しい構造の固体物質を発見した¹⁾。博士は、液体状態から急冷して作製したアルミニウム (Al)-マンガン (Mn) 合金について、電子線をあてた際の原子配列により回折されたパターン (電子線回折像) を解析した。その結果、この物質が正二十面体相 (icosahedral phase) から成り、並進対称性をもつ結晶では存在し得ない5回の回転対称を持つことを見いだした。これが後に命名された準結晶 (quasicrystal)²⁾ の発見で、それまでの固体物質の概念を根本から覆す画期的な業績として、今回評価された³⁾。

準結晶の構造は、発見以前にすでに幾何学的に見いだされていたペンローズ格子をモデルと考えることができる (図表参照)。格子点を結ぶ直線の間隔は、 $L/S = (1 + \sqrt{5})/1$ で、視感的にも美しいとされるいわゆる黄金比となり、LとSの配列は、花びらの数など自然界にも存在するフィボナッチ数列 (LSLLSL...) をなしている。その後、準結晶の異形が相次いで見つかり、現在までに正十角形相、正十二角形相、正八角形相を含め、少なくとも4種類が報告されている。

なお、当初作製された準結晶は非安定相で欠陥も多かったが、その後の研究から、準結晶の安定相 (Al-Cu-Fe など) が結晶成長と同様の方法で作製できるようになり、研究が大きく進展した。準結晶では、電気抵抗が結晶や非晶質より高く異方性を示す、あるいは、比熱が高いといった物性を有し、新材料としても期待される。

図表 準結晶の構造 (2次元: ペンローズ格子の例)



参考文献

- 1) D. Shechtman, I. Blech, D. Gratias and J. W. Cahn, "Metallic Phase with Long-Range Orientational Order and No Translational Symmetry", Phys. Rev. Lett. 53, 1951-1953 (1984)
- 2) Dov Levine and Paul Joseph Steinhardt, "Quasicrystals: A New Class of Ordered Structures", Phys. Rev. Lett. 53, 2477-2480 (1984)
- 3) http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2011/sciback_2011.pdf

地域イノベーションと震災復興に寄与する地熱エネルギーの利用

浦島 邦子

環境・エネルギーユニット

和田 潤

環境・エネルギーユニット

1 はじめに

2011年3月の東日本大震災を契機に、日本では「日本再生のための戦略に向けて」をはじめとするさまざまな検討が進んでいる¹⁾。特に、グリーン・イノベーション戦略の強化と前倒しを軸とした、新たなエネルギーベストミックス実現の戦略が議論されており、これまで以上に再生可能エネルギーの導入が加速されることは必須である。エネルギー・環境会議²⁾と関係省庁・関係機関が協力して、国民的議論も深め、新たなベストミックスをエネルギー基本計画として策定し、これに沿ってエネルギー・環境産業戦略およびこれらを支えるグリーン・イノベーション戦略からなる「革新的エネルギー・環境戦略」も策定される予定が「政策推進指針」(2011年5月17日閣議決定)にて述べられている。これによると、短期的には電

力制約への政策対応や災害に強いエネルギー供給体制の構築等、新たな成長の芽(エコタウンの建設、省エネ・新エネビジネス、分散型エネルギーシステムの展開など)の育成と資金需要拡大の好循環形成、被災地域における先行モデル的な実施に積極的に対応、そして中長期的には安全・安定供給・効率・環境の要請に応える新たなエネルギー・環境構造を検討することになっている³⁾。

再生可能エネルギーは、その自然の補充する力の範囲内で利用しても枯渇せず、また一般に地球温暖化の原因にもならない。国際エネルギー機関(IEA)発行のRenewables Informationは「絶えず補充される自然の過程に由来し、様々な形態のうち太陽から直接供給される光や地球内部で発生する熱、太陽や風や海洋

や水力やバイオマスや地熱資源から発生した熱や電力、そして再生可能資源に由来するバイオ燃料と水素」を再生可能エネルギーの対象としている。このうち、太陽光発電は、我が国ではすでに住宅用のものについては余剰電力の買取制度が導入され、住宅用太陽光パネルの普及が進んでおり、効率向上が課題である⁴⁾。また、風力発電や小規模水力発電⁵⁾、火力発電所でのバイオ燃料の混焼⁶⁾も、導入が比較的容易であることから、近年は産業界で導入が進んでいる。

本稿では、我が国の状況と世界各国での現状を俯瞰し、地熱のエネルギー源としてのポテンシャルおよび、熱利用を通じた地域への貢献ならびに政策的な対応策について述べる。

2 地熱エネルギーに関する現状と課題

2-1

地熱資源

地熱資源とは、地球が元来地中

に持っている熱エネルギーのうち、利用できるものを指す。発電のほか熱源として直接利用可能であり、これを活用することで非再生エネルギー資源の節減と地球温暖化防止が期待できる⁸⁾。

地中の温度は、地下深度に伴って上昇し、この上昇割合を地温勾配と称する。日本の陸地での平均的な地温勾配は30℃/km程度である(世界平均は20℃/km程度)。したがって、深度を問題にしない

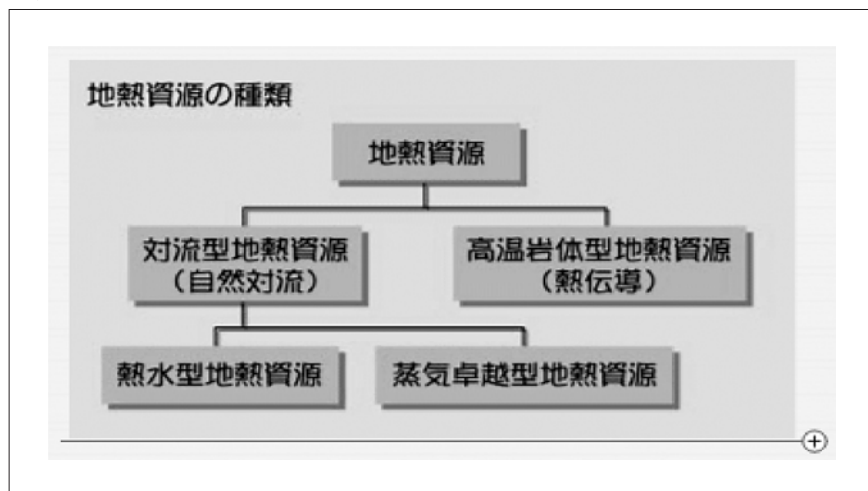
れば、地中の熱源自体はあらゆる土地に存在する。ただし、それを経済的に利用するためには、高温の熱がなるべく浅い場所にあることが望ましい。その熱を適度に取り出す限りは、絶えず新たな熱が地球の深部から補充されるため、持続可能かつ再生可能なエネルギー源といえる。

図1に示すように、地熱資源には熱の補充の形態により、地中奥深い熱が地下水に伝わりその水の移動により上がってくる「対流型地熱資源」と、移動する水がなく岩石の熱伝導により伝わってくる「高温岩体型地熱資源」がある。地熱資源とよばれてきたものは、利用しやすい前者が中心で、熱は熱水または蒸気として得られ、温泉のように自然湧出している場合もある⁹⁾。

図表2に、地熱資源の地下モデルを示す。これまで発電に利用されてきた熱水や蒸気は、水を通さない遮蔽層に行く手を阻まれた圧力の高い地下水の貯留層が地熱で加熱されたもので、深さは1000～2000 m くらいの場合が多い。この熱せられた地下水が、井戸（生産井）を掘ることにより、圧力を持った蒸気または熱水として地上に取り出される。発電に供する熱水にせよ温泉にせよ、その水の根源はほとんど周辺地域に降った雨水であることが近年になって判明してきた。地熱発電に供したあとの冷めた水は、地下の水バランスの保持、あるいは地下由来の不純物による周辺環境影響防止のために、還元井を通じて再び地中に戻す場合が多い¹⁰⁾。

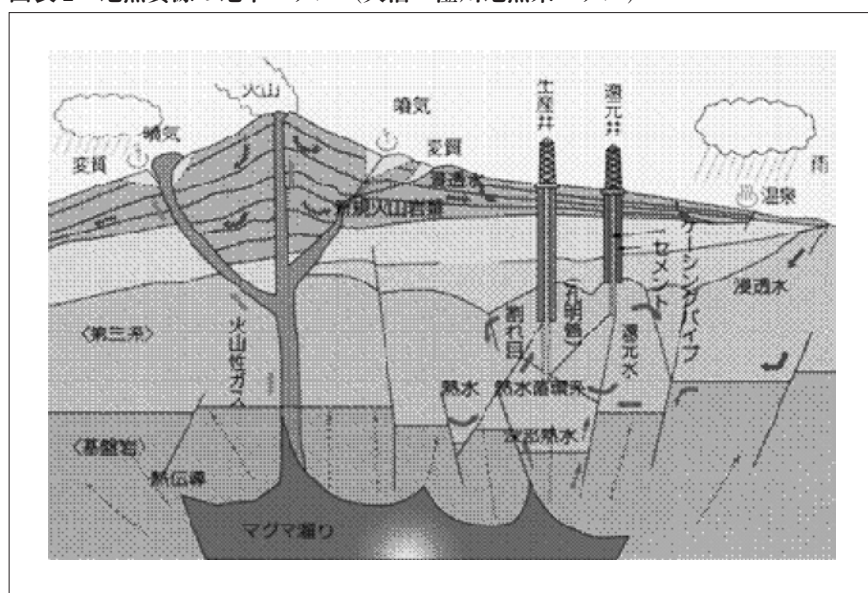
我が国は、世界でも地熱資源の豊かな国である。図表3に世界の地熱発電の資源量と設備容量を示す。我が国の地熱資源量は、150℃以上の熱水資源だけで発電出力に換算して23,470 MW分(30年間持続できる出力)とされ¹¹⁾、米国、インドネシアに次いで世界

図表1 地熱資源の種類



出典：参考文献¹⁰⁾

図表2 地熱資源の地下モデル（大沼・澄川地熱系モデル）



出典：参考文献¹⁰⁾

3位の資源量を有する。我が国にはまだ手つかずの地熱資源が豊富に存在する。

地熱資源は、地熱発電のほか、熱源として直接利用することも可能である。図表4に、地熱エネルギーの利活用のフロー図を示す。地熱資源は通常、熱水や蒸気が自分の圧力で坑井から出てくるため、システム構成にもよるが、基本的に外部電源喪失などの非常時でもエネルギー供給源としての機能を確保しやすいと考えられる。

地中熱利用とは、地下(0～100 m 深程度)の土壌または地下水の熱をヒートポンプの熱源として活用する技術であり、科学技術動向 No.90(2008年9月)でも取り上

げた。地中の温度は年間を通してほぼ一定で、夏は気温より低く冬は高い。そこで、夏は地下に廃熱、冬は地下から抽熱してヒートポンプの熱源として利用すれば、大気を熱源とする場合よりも低動力で冷暖房ができ、融雪や給湯を行うことができる¹²⁾。

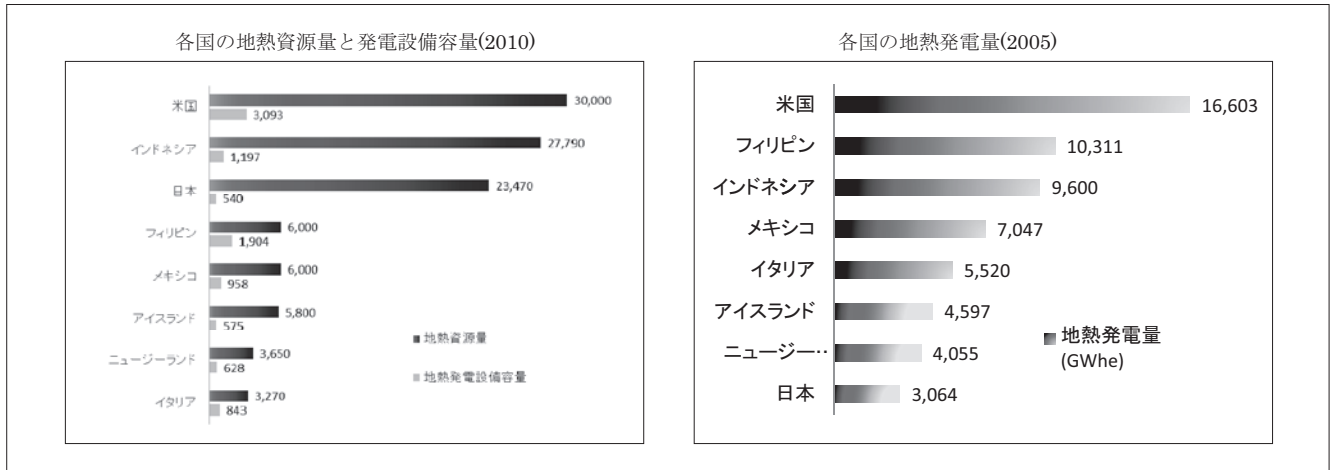
2-2

地熱発電

2-2-1 他の再生可能エネルギーとの比較

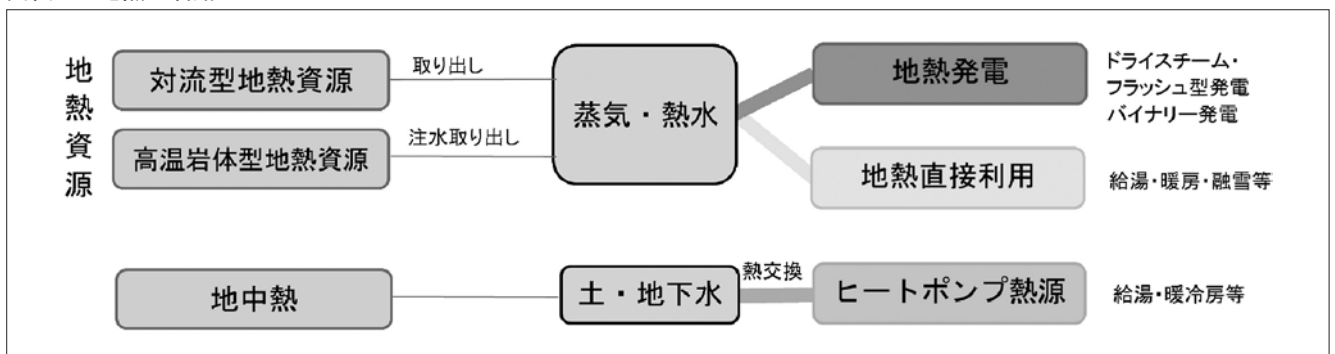
地熱発電の特徴を他の再生可能エネルギーと比較すると、大きな

図表3 各国の地熱資源量と発電設備容量、地熱発電量



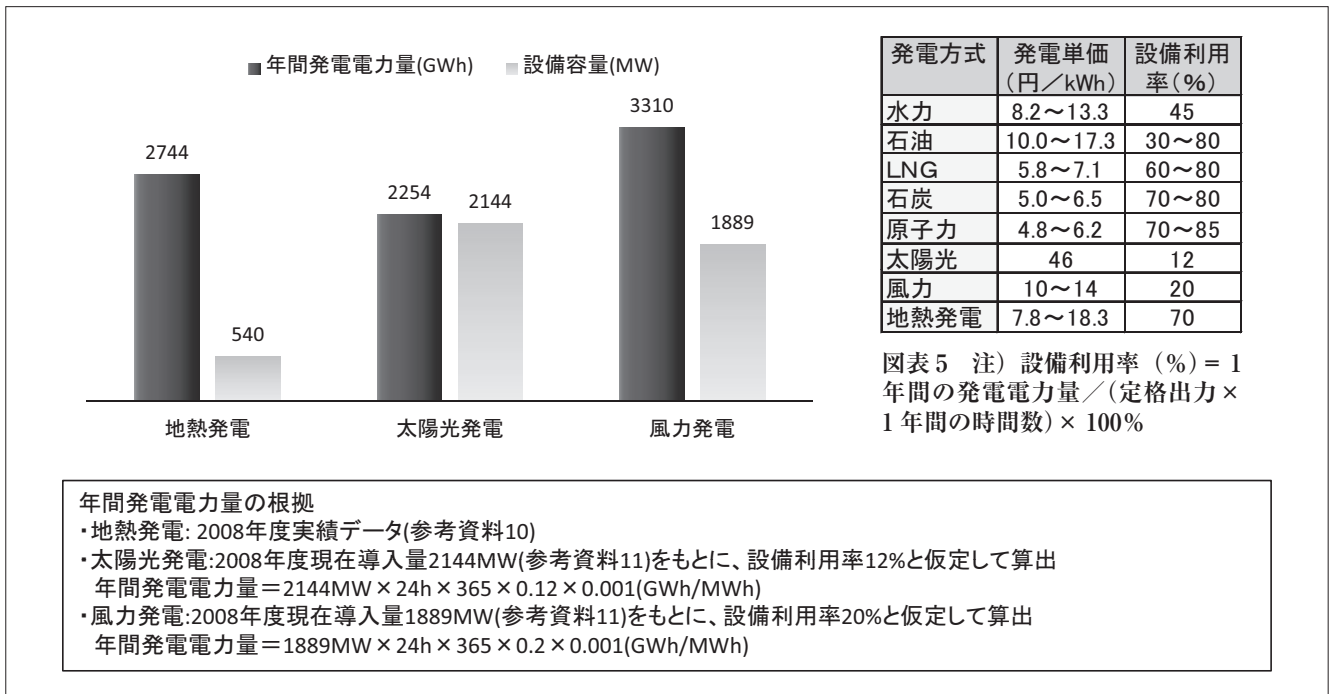
出典：参考文献¹²⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表4 地熱の利用



科学技術動向研究センターにて作成

図表5 年間発電電力量・設備容量・発電単価・設備利用率の比較 (2008年度)



グラフは科学技術動向研究センターにて作成、発電原価・設備利用率の出典は参考文献¹³⁾
 ※原子力に係る発電原価については、現在内閣府原子力委員会による再評価が行われている。

特長として、次の点が挙げられる。
 ・太陽光発電や風力発電に比べ、供給信頼性が高い。バックアップ電源や蓄電池などを設置する

ことなく、電力の安定供給が可能である。また、太陽光発電や風力発電よりも稼働率が高いので、図表5に示すように、同じ出力で

も年間では数倍の発電電力量が得られる。設備利用率も高く、発電単価も太陽光と比較すると1/5から1/3程度である^{13,14)}。

- ・副生する熱をいろいろな用途に活用可能である。
- ・ライフサイクルとしてのCO₂発生量は、太陽光発電・風力発電の2~4分の1と少ない。(図表6)

2-2-2 日本の地熱資源開発に関する課題

我が国の地熱発電所は、1990~96年にかけて314 MW増加し、この期間の増設分が現在の容量540 MWの過半数を占めている。これは、1974年のサンシャイン計画開始以降、石油開発技術や鉱山技術をもとにゼロから地熱資源の探査技術や熱水・蒸気のハンドリング技術などを開発し、人材を育成してきた成果が具現化してきたことと呼応している。しかし、1999年の八丈島発電所運転開始以降は、後述する小規模なバイナリー発電の増設を除き、新規の導入はなかった。これは、近年、米国、アイスランド、フィリピン、インドネシア、イタリアなどで急

激に導入が進んでいるのとは対照的である。

我が国の地熱発電が他の再生可能エネルギーや海外諸国の地熱発電とは対照的に伸び悩んでいる理由として、下記のような要因が指摘されている。

- ①資源調査に長い年月を要し、また調査結果によっては途中で事業化を断念せねばならなくなるリスクがあること
- ②適地の多くが自然公園内にあり、現行の自然公園法のもとでは開発が困難なこと
- ③温泉事業者から温泉に影響を与える懸念が指摘されること
- ④環境影響評価手続きに最低3年を要すること
- ⑤上記各項の二次的要因として、事業開始から発電開始までのリードタイムが10年以上におよび、資金回収が遅く、ビジネスインセンティブが乏しいこと
- ⑥再生可能エネルギーの中で、政府による初期投資援助が小さい

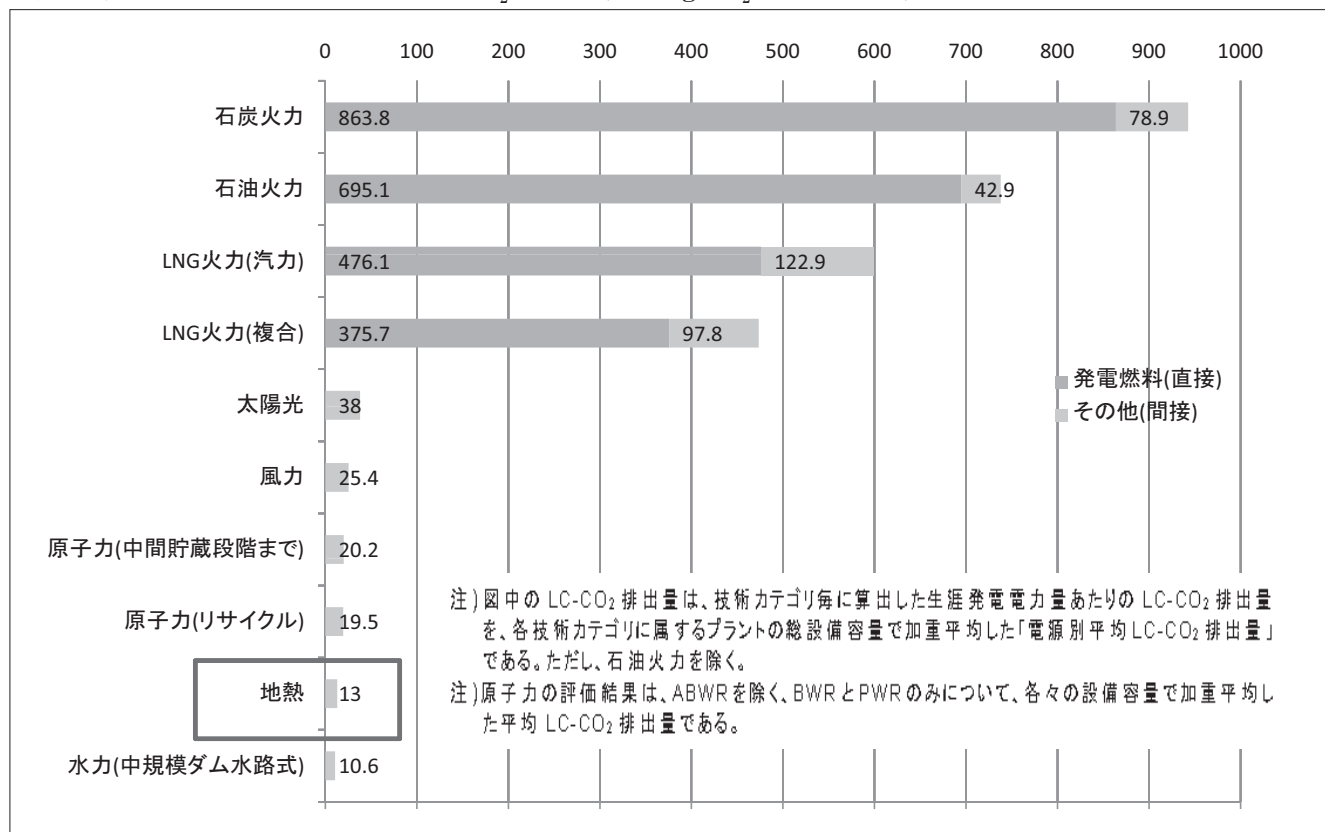
こと

このうち、我が国特有の要因は②~④である。特に、自然公園法は、自然環境や景観保護のため、国立公園などでの発電関連設備の設置を規制している。国立公園や温泉地には地熱発電に使われる熱水資源が豊富にあるが、この規制により開発が進まなかった。

また、民主党政権による事業仕分けにより、「地熱開発促進調査事業」と「地熱発電開発事業」の2事業が廃止や白紙化を前提とした「抜本的改善」の措置を受けることが2010年5月決定された¹⁵⁾。

①に関連して、地熱開発のコストのうち、掘削費用が最も大きな割合を占めていることも無視できない。地熱の商業化のカギは、十分な供給量の熱水を確保できるか否かにかかっているため、事業を安定的に行うに足る熱水脈を発見するまでに掘削ターゲットを誤るリスクが高い。発見までに多くの掘削が必要となれば、地熱事業へ

図表6 各発電方式によるライフサイクルCO₂排出量(単位:g-CO₂/送電端kWh)



出典：(財)電力中央研究所報告書 Y09027「日本の発電技術のライフサイクルCO₂排出量評価—2009年に得られたデータを用いた再推計」今村 栄一ら

の投資は莫大なものとなる。地下2000 m程度まで掘るとすると、井戸1本3億円~4億円のコストがかかることから、民間事業者にとってリスク負担が重い。これも、これまで事業化が進まなかった大きな要因である。

地熱に限らず、いわゆる新エネルギーには政府が初期投資を援助している。しかし、使用する発電源によって差が大きい。平成23年度新エネルギー等導入加速化支援対策事業の結果¹⁶⁾によると、太陽光発電は1/3以内か25万円

/kWのいずれか低い額、風力発電は相当の理由がある場合には個別協議により最大15億円、天然ガスコージェネレーションおよびマイクログリッドについては上限5億と別途上限等が定められている。一方、地熱への補助率は、調査井掘削事業が1/2以内、地熱発電施設設置事業が1/5以内である¹⁷⁾。これは、例えば約10億円かかる深度2000 mの掘削調査に対して、最大5億円しか負担されないことを意味する。後述するバイナリー地熱発電50 kWシステム（送電

端）および系統連系等に必要な電力設備においては、約1.2億円の設置費用¹⁸⁾に対して、補助金は2400万円程度である。⑥に記したように、地熱発電は政府援助の点でも不利であった。

こうした多くの理由により、他の再生可能エネルギーと比較してあまり注目されてこなかった地熱は地熱特有の課題もあるが、解決策がある程度見込まれる課題がほとんどである。

3 我が国の地熱エネルギー利用の現状

3-1

「発電」としての利用

これまでに国内に設置された事業用地熱発電の単機出力、すなわち1台の発電機を構成する一連の設備容量は数MW~112 MWである。一部ホテルなどの自家用には、100 kWの例もある。事業用地熱発電では、発生した電力が遠隔の需要地へ送電されて使用されることから、火力・水力発電所等と同様に集中型電源の性格を有する。大まかにいえば、事業用地熱発電は大型の風力発電機と同規模ないし1桁大きく、中小規模の水力発電所と類似した出力となっている。既存の典型的な地熱発電は、取り出した蒸気または熱水を減圧（フラッシュ）することで一部が蒸発してできた蒸気を蒸気タービンに導いて、タービンを回して発電する。したがって同じ熱水流量でも熱水の温度が高いほど発電出力が大きくなり、ひいては経済性に勝るので、温度の高い熱水が得られる地点に設置することが好ましい。

図表7に全国にある地熱発電の現状を示す¹⁹⁾。現在、全国9都道県で稼働しており、主に火山帯に沿って北海道・東北・九州の特定のエリアに偏在して分布している。発電のみならず、同時に熱供給源としても利用されており、地域の事業などにも貢献している。

3-1-1 ドライスチーム方式 およびフラッシュ型 発電

生産井からの噴出物が熱水を殆ど含まない蒸気であれば、簡単な湿分除去を行うのみで蒸気タービンに送って発電することが可能であり、これをドライスチーム（dry steam）式発電と呼ぶ。我が国最初の地熱発電である松川発電所はこの方式で、1966年以来現在も継続発電している。

一方、生産井からの噴出物が蒸気よりも熱水が主体（熱水卓越型）である場合である場合は、生産井から得られる気液二相流を汽水分離（フラッシュ）して水蒸気を蒸気タービンに導いて発電する（フラッシュ型発電・図表8）。汽水分離器で蒸気を分離した後の熱水の圧力がまだ十分に高い場合に

は、2つ目の汽水分離器を設けて熱水を減圧し、更なる蒸気を発生させて蒸気タービンの中間段に投入することにより、出力の向上および地熱エネルギーの有効利用を図ったダブルフラッシュサイクル方式も一部で行われており、図表7の森および八丁原発所にて採用されている。

ドライスチームおよびフラッシュ発電は、単機出力は最大数万kW（海外では14万kW）で、集中型電源として用いられている発電方式であり、地熱発電の主流となっている。これらの発電方式は、主に熱水温度200℃以上の地点に適している。

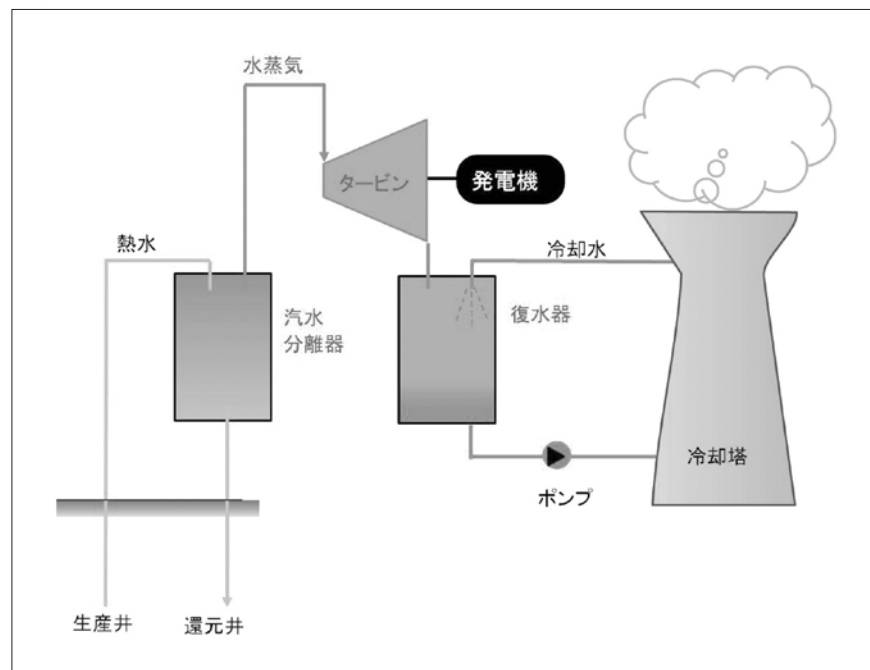
なお、この大型発電に使用される地熱用タービンは、日本のメーカー3社（三菱重工、東芝、富士電機）が世界7割のシェアを占めている。地熱用のタービンや発電機は、地下からの様々な物質がそのままタービンに送られることもあり、通常の火力発電より過酷な環境にさらされる。通常は2年に1度のメンテナンスを必要としていたが、日本製の地熱タービンは静止部や回転部をコーティングすることで耐食性を向上させたり、

図表7 地熱発電の現状 (2010年11月現在)

所在地	発電名称	所在地	蒸気供給	発電	用途	定格出力	運転開始	地熱直接利用
北海道	森	北海道 亀田郡森町	北海道電力	北海道電力	一般電力	50MW	1982	農業用温室69軒
	澄川	秋田県 鹿角市	三菱 マテリアル	東北電力	一般電力	50MW	1995	
秋田県	大沼	秋田県 鹿角市	三菱 マテリアル	三菱 マテ リアル	一般電力	9.5MW	1974	
	上の岱	秋田県 湯沢市	秋田地熱 エネルギー	東北電力	一般電力	28.8MW	1994	くりこまフーズ(食品工業)、皆瀬温水プール、秋の宮温水プール
	松川	岩手県 八幡平市	東北水力地熱	東北電力	一般電力	23.5MW	1966	八幡平地熱蒸気染色工房、700軒近い宿泊施設、別荘、保養所、商店、温浴施設に暖房・給湯熱供給、農業用温室95軒
岩手県	葛根田1号	岩手県岩手 郡雫石町	東北水力地熱	東北電力	一般電力	50MW	1978	岩手県営屋内温水プール 【愛称: ホットスイム】
	葛根田2号	岩手県岩手 郡雫石町	東北水力地熱	東北電力	一般電力	30MW	1996	
宮城県	鬼首	宮城県 大崎市	電源開発	電源開発	一般電力	15MW	1975	鳴子熱帯植物園
福島県	柳津西山	福島県河沼 郡柳津町	奥会津地熱	東北電力	一般電力	65MW	1995	
東京都	八丈島	東京都 八丈町	東京電力	東京電力	一般電力	3.3MW	1999	農業用温室、混浴施設
	杉乃井 ホテル	大分県 別府市	杉乃井ホテル	杉乃井ホテル	自家用電 力	1.9MW	1981	温泉利用、冷暖房、給湯・調理
	大岳	大分県玖珠 郡九重町	九州電力	九州電力	一般電力	12.5MW	1967	
大分県	八丁原1号	大分県玖珠 郡九重町	九州電力	九州電力	一般電力	55MW	1977	
	八丁原2号	大分県玖珠 郡九重町	九州電力	九州電力	一般電力	55MW	1990	
	八丁原バイ ナリー	大分県玖珠 郡九重町	九州電力	九州電力	一般電力	2MW	2006	
	滝上	大分県玖珠 郡九重町	出光大分地熱	九州電力	一般電力	27.5MW	1996	民家40戸への給湯
	九重	大分県玖珠 郡九重町	九重観光 ホテル	九重観光 ホテル	自家用電 力	0.99MW	1998	温泉利用、暖房、給湯
	大霧	鹿児島県 霧島市	日鉄 鹿児島地熱	九州電力	一般電力	30MW	1996	
鹿児島県	霧島国際ホ テル	鹿児島県 霧島市	大和紡観光霧 島国際ホテル	大和紡観光霧 島国際ホテル	自家用電 力	0.1MW	1984	温泉利用、冷暖房
	山川	鹿児島県 指宿市	九州電力	九州電力	一般電力	30MW	1995	
8都道県	17地点		13社	11社		540.14MW		

参考文献^{14,31)}を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表8 ドライスチーム / フラッシュ型発電



湿分（水滴）を捕獲してタービンの外に排出する装置を適用することなどにより、今では6年間使い続けても問題ないほど安定的に運転できるような高度の品質を具備している。このことが、シェア拡大の要因となっている。

3-1-2 バイナリー発電

蒸気タービンは一般的に水蒸気で回転するが、水蒸気の代わりに水より沸点の低い物質、たとえば炭化水素に熱を与えて蒸発させ、圧力をもった低沸点物質の蒸気で駆動する発電システムをバイナリー（サイクル）発電とよぶ。本方式では、水蒸気駆動では利用できない150～200℃未満の熱源で

も発電が可能である（図表9）。

近年世界では本方式が急増している。この発電方式ではイスラエルのOrmat社が世界のトップシェアである。九州電力(株)八丁原発電所（105 MW）では、出力の衰えた既設生産井を利用して、出力2 MWのOrmat社のバイナリー発電設備を2006年に導入した。タービンを駆動する作動流体にはノルマルペンタン（沸点：36℃）が用いられている。また、水とアンモニアの混合物を作動流体とするカーリーナサイクル発電は、バイナリー発電の一種であり、さらに低温（100℃未満）の熱源でも発電が可能である。

バイナリー発電はRPS法^{注1)}上の新エネルギーの1つとして認定された。フラッシュ発電のような高温熱源を必要としないため、フラッシュタイプと比較すると設置可能な場所が多く、我が国でも今後増加が見込まれる。

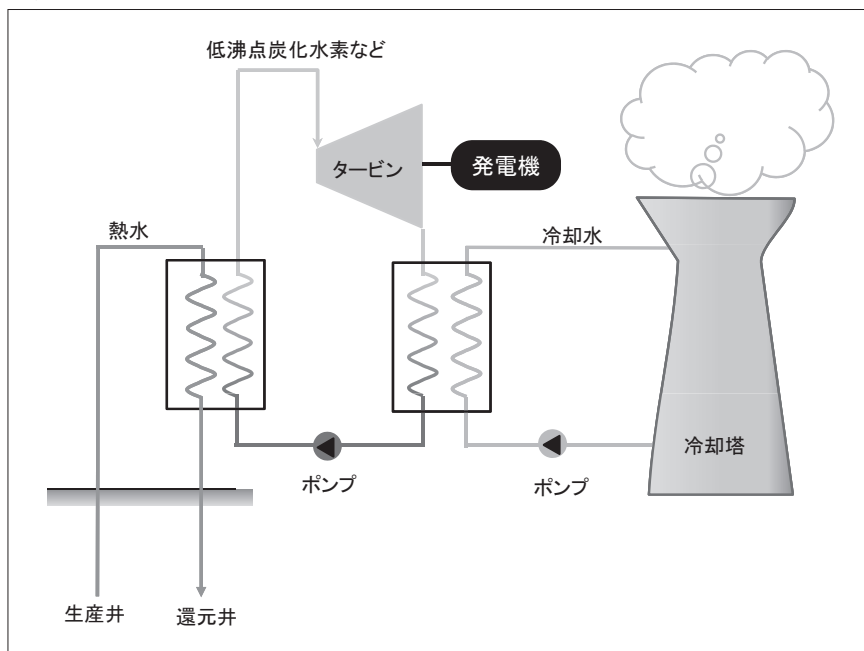
3-1-3 温泉発電

既存の温泉熱を温浴に適する温度にまで下げる際に、これまで利用せずに放熱していた熱を利用してカーリーナサイクル発電すれば、約723 MWの発電が可能との試算がある²⁴⁾。これは前述のバイナリー発電の一種であるが、俗に温泉発電と呼ばれ、新たな井戸を掘ることなく、現有の温泉の熱を利用して容易に新たに発電ができることが特長である。温泉発電は、現有の地熱発電容量に加えた発電ポテンシャルを有すると期待されている。図表10にその概要を示す。

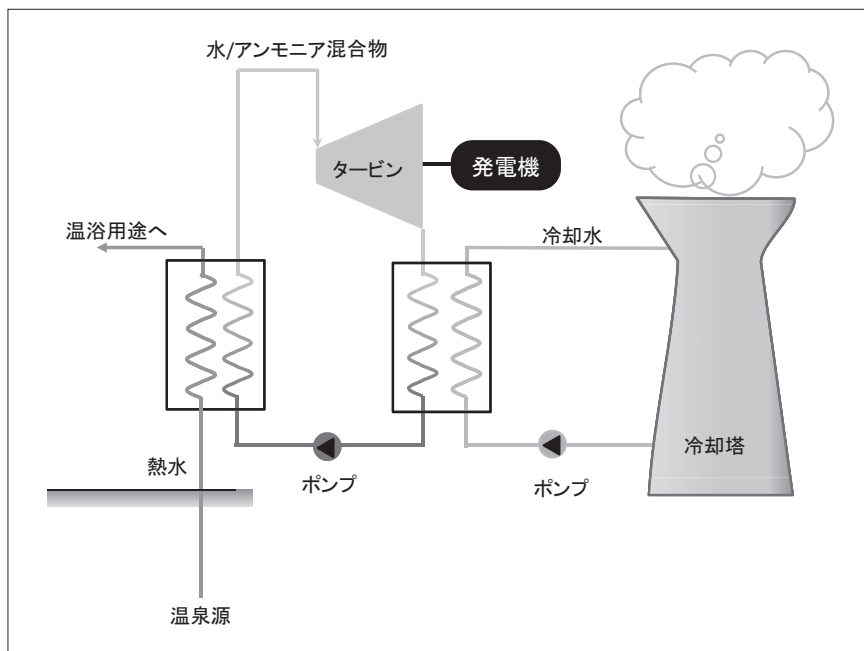
3-1-4 高温岩体発電

高温岩体発電（Enhanced Geothermal System：EGS）とは、図表11に示すように、地下にある高温の岩体に地上から水を投入し

図表9 バイナリー発電



図表10 温泉発電



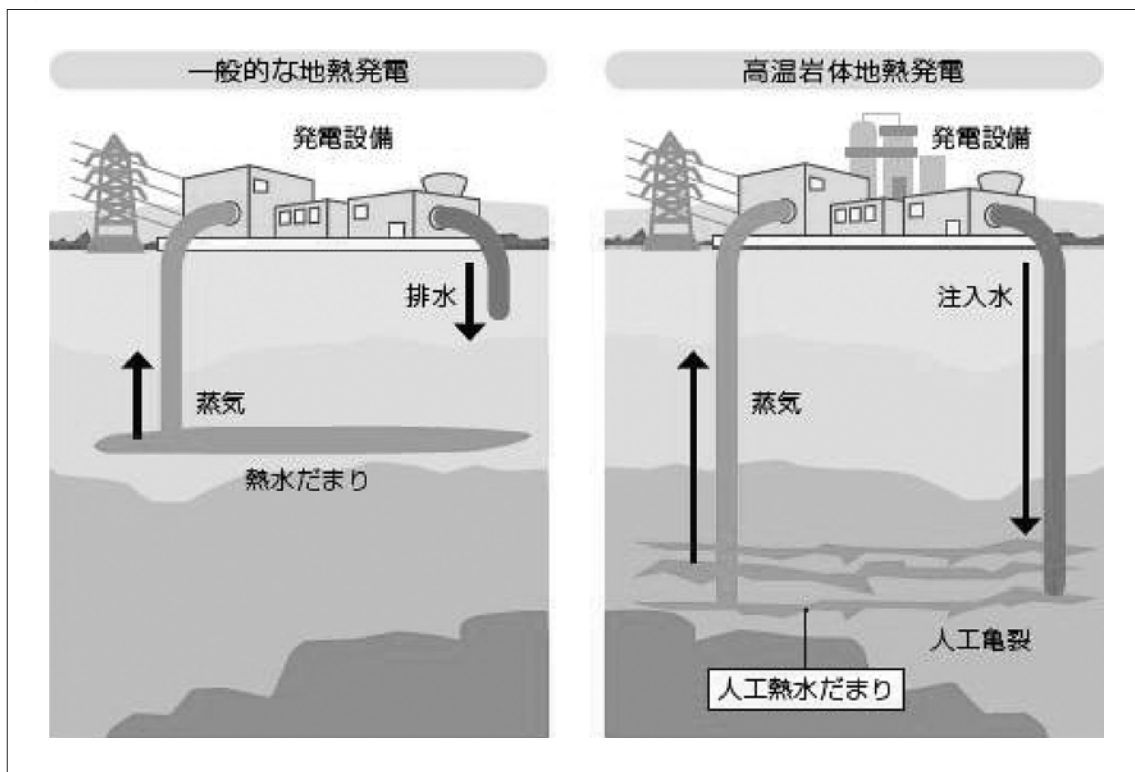
て、人工的に蒸気や熱水を発生させ、これを地上に回収することでタービンを回す発電方式である²⁰⁾。高温岩体発電は天然の蒸気や熱水が得られない場所をターゲットとした次世代技術である。この方式では、地下の高温岩体に水が通るための亀裂を人工的に発生させること、地中に高圧の水を注入し熱水や蒸気を回収することが重要な

技術である。

我が国では、(財)電力中央研究所が秋田県雄勝で、NEDOが山形県肘折で高温岩体熱の回収試験を実施したことがある。後者では約2年間にわたる熱水回収循環試験と約3か月間の50 kWの発電試験が行われた。いずれも2002年度で終了し、その後は継続した試験は行われていない。

注1 Renewables Portfolio Standard。新エネルギー等の普及を目的に、電気事業者に対して毎年その販売電力量に応じた一定割合以上の新エネルギー等から発電される電気の利用を義務付けた制度。

図表 11 高温岩体発電



3-2

「熱」としての利用

我が国では、家庭で使用されるエネルギーの半分以上は、給湯や暖房などの熱を発生させるために使用されている。また、図表 12 に示すように、産業でも広範囲の熱エネルギーの用途がある。

地熱エネルギーがもつ、他の再生可能エネルギーにない特色は、発電以外にも大量の熱エネルギーを地域に供給できることである。つまり、熱エネルギーを活用することでエネルギー資源の節減と地球温暖化防止が期待できることは、大きな特徴である²¹⁾。

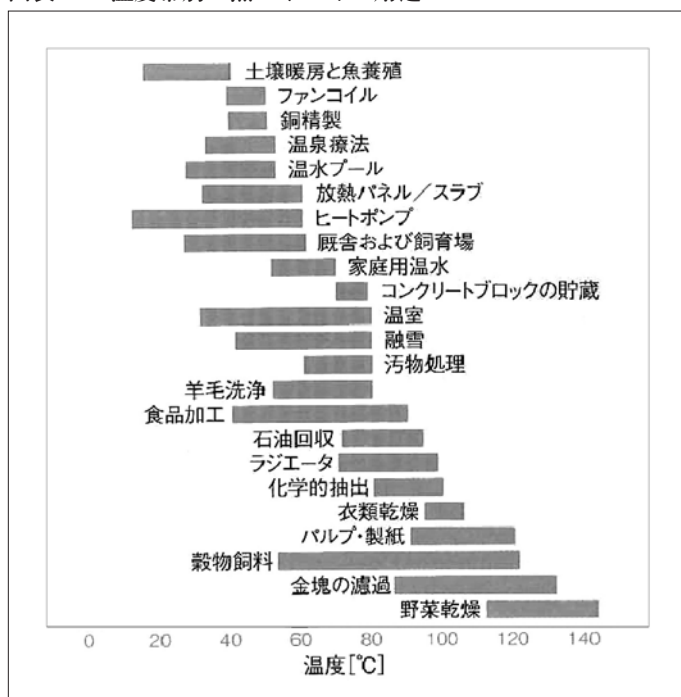
温度の高い地熱資源ほど利用可能な用途が豊富であり、ある用途に用いて温度が下がった熱水を、さらに他の用途に用いることができることから、熱効率のよいカスケード利用が可能となる。その他、フラッシュ発電の汽水分離で生ずる還元井戸に戻す前の熱水も、清潔な水道水と熱交換して温水を製

造する熱源として利用できる。発電のみを考えると、熱力学的な原理から 120℃ 以下の熱水は熱エネルギーの 1 割以下しか電力に変換できないが、熱として利用すれば全エネルギー量を利用することができる。

最近、「地中熱」を利用した冷

暖房の普及が世界各国で急速に進んでおり、我が国でもすでに多くの場所で実用化されている。この場合、熱水を取り出すための井戸を掘るのではなく、例えば熱交換杭を埋め込むなどの簡易な工法だけで熱利用が可能である。例えば、最近では東京スカイツリーを核と

図表 12 温度帯別の熱エネルギー用途



出典：参考文献¹³⁾

する大型商業施設でも地中熱利用システムが採用された。ここでは、年間総合エネルギー効率 (COP) が、国内の地域熱供給 (DHC) 最高レベルの 1.3 以上になると想定されている²²⁾。

地中熱利用は、熱水利用と異なり完全な CO₂ フリーとはいえない

いが、省エネ効果は大きい。日本で普及が進んだ場合のメリットとして、ヒートアイランド現象の緩和や寒冷地での火力暖房の削減による電力消費および CO₂ 排出量の削減、真夏のピーク電力を下げ夜間電力の利用で電力消費の平滑化、などが挙げられる。

このように、地熱はその地域事情に応じた発電源として、また天候や気象条件に左右されない熱供給源としてエネルギーシステムを構築でき、しかもほとんど化石燃料に依存しないという特徴を有する。

4 地熱利用に関する海外の状況

世界全体の地熱発電は、我が国とは対照的に、1995 年から 2005 年までの 10 年間で急速に伸び、約 3 割も増大した。国別では再生エネルギーを連邦政府・州が支援する米国をはじめ、アイスランド、フィリピン、インドネシアの伸びが著しい。

地中熱ヒートポンプの普及は、米国、スウェーデンで進んでおり、最近では中国でも増加している。

4-1

米国

米国ではエネルギー・環境政策の基本理念の一つとして、「クリーンエネルギー産業での将来の雇用に対する投資」が掲げられている。クリーンエネルギー産業を育成し、環境対策事業に対して最大 23 億ドルの税優遇を行うことで、17,000 人分の雇用創出を見込んでいる。エネルギー省 (DOE) を中心として、地熱開発への投資が各方面で盛んである。2009 年の経済再生投資法 (ARR) により、地熱発電の開発実証に 350 百万 US\$, 地中熱ヒートポンプに 50 百万 US\$ の財政を用意した。具体的な施策として、総合データ

ベース (NGDS) を整備して地熱資源データおよび評価、技術情報、研究の成功 / 失敗情報、政策情報等あらゆる情報をまとめることにより、地熱開発事業者の失敗リスクを低減するように努めている。さらに、DOE 内の電力局が協働して地熱発電所へのアクセス送電線の整備が図られている。

2008 年にスタートした産学官協働の地熱技術プログラム (The Geothermal Technologies Program : GTP) は、2020 年ないし 2030 年までの地熱発電の「普及」と「発電コストの低減」をミッションとしている。ここでは、次の 5 項目に焦点を当てたプロジェクトが現在進行中である²³⁾。中でも、National Renewable Energy Lab (NREL) の試算によって全米で発電出力 16,000 GW のポテンシャルがあるとされる、高温岩体発電の開発に特に注力している。

- ・高温岩体発電
- ・熱水型地熱発電
- ・低温地熱資源・戦略的計画策定、システム分析と地熱関連情報
- ・技術評価

一例として、2008 年には、google が EGS 技術に取り組む米 AltaRock Energy (625 万ドル) と米 Potter Drilling (400 万ドル)、そして北米における地熱エネルギー資源の

マッピングなどに取り組むサザン・メソジスト大学の地熱研究所 (48 万 9521 ドル) などのベンチャー企業等に 1000 万ドルを出資しており、現在も研究開発が継続している。

4-2

インドネシア

インドネシアでは日本同様に地熱ポテンシャルが大きいにもかかわらず、地熱発電の利用率は約 4.5%、発電設備容量にして約 1.2 GW に留まっていた。しかし、2003 年、インドネシア政府は地熱法を制定し、地熱発電ロードマップを作成した。それによると、2025 年までに地熱の発電設備容量を現在の約 8 倍の約 1 GW (1 次エネルギーの 5%) に拡大する計画である。この計画達成には民間資金を募る IPP^{注2)} の推進が欠かせないため、年内に円借款 100 億円を含め総額 200 億円規模での地熱の試掘基金を設立する予定とされている。日本の JICA や JBIC、コンサルタント企業、商社などが資金や技術協力して開発を行うことになっている。インドネシアは日本のような自然公園法

注2 Independent Power Producer の略で、独立系発電事業のことで「卸電力事業」とも呼ばれる。1995 年の電気事業法改正で、一般事業者が電力会社へ電力の卸供給を行うことが認められた。

が存在しないことから、地熱開発は日本よりは容易に進むと見込まれている。石油・天然ガス・石炭などの化石資源が豊富な国にも関わらず、地熱開発にも取り組んでいることが興味深い。

4-3

アイスランド

アイスランドは人口約32万人の国である。1930年代、アイスランドの首都レイキャビクでは、石炭発電でスモッグに悩まされて石油へ転換使用していたが、1970年代の石油ショックで政策の見直しを迫られ、地熱の導入が盛んとなった。地熱は地域暖房への使用が先に進展し、現在では人口の9割近くが暖房を地熱に依存している。地熱利用は熱源としての利用が主体で、発電は地熱の余剰利用として位置づけられている。水力や地熱といった再生可能エネルギーに恵まれており、2009年には一次エネルギーの85%が再生可能エネルギーでまかなわれ、また、電力は100%を再生可能エネルギー（約30%地熱、70%水力）で供給している²⁵⁾。注目すべきは、この再生可能エネルギー100%の電力を利用して、元来、漁業以外の産業に乏しかったこの国に、多国籍企業のアルミ精錬工場が進出し、国内電力の7割を消費していることである。この国のクリーンな電力は、アルミニウムという形をとって、アイスランドから海外へ輸出されていることになる。また、スヴァルスエインギ地熱発電所では、発電用に汲み上げた地熱海水を利用して、世界最大の露天温泉ブルーラグーンが運営されており、市民への福祉施設として利用されている。

4-4

ドイツ

再生可能エネルギーの導入に意欲的なドイツは、地熱利用も積極的に推進している。ドイツ連邦政府は、2020年までに現在の40倍となる約280 MWの地熱発電設備の導入を予測している。これは、年間1.8 TWh分の発電量に相当する。熱供給では、2020年までに地熱発電所からの熱併給で3.4 TWh分、発電を行わない熱供給専用の地熱設備の熱で4.8 TWh分、計8.2 TWh分が深層地熱により供給できるようになるとみている。さらに、2030年までに850 MW分の発電設備の導入を予測している²⁶⁾。

現在、深層地熱の取り出し設備は167か所に達する。その例として、ミュンヘンの南ランダウとウンターハーヒングで、熱水を用いたバイナリー発電を行っている。それぞれ深度3.3-3.4 km程度から120℃程度の熱水を回収するというもので、火山性熱水系がなく他国の地熱発電所に比べ条件が悪いにもかかわらず、こうした発電が行われている点に、本腰を入れた開発意欲が感じられる²⁷⁾。ミュンヘンの北のエルディンクでは、1999年に地熱エネルギーの総合利用施設が開設された。本施設では、深さ2300 mの井戸より65℃の温水が80 t/h供給され、そこから熱交換器およびヒートポンプにより約100℃の熱水を得ている。この熱水は地域暖房と工業に利用され、一方、熱交換およびヒートポンプにより冷却された地下水は人工温泉と飲料水に利用されている。このように地下から得られた熱および水資源を全て有効に利用している²⁸⁾。

ドイツは、こうした地熱発電事業を推進するために、地熱プロジェクトの条件を優遇し関連するリスクを削減する施策が取られている。2009年1月に施行された改正再生可能エネルギー法では、地熱発電の買い取り補償価格を引き上げ、さらに特別ボーナスを導入した。このように固定価格買取制度などの施策は、効果を発揮している。例えば、10 MW以下の地熱発電所を2009年に新設した場合、1 kWhあたりの買取価格は法改正前の14ユーロセントから16ユーロセントに引き上げられ、新設ボーナス4ユーロセントが加算される。熱併給を行う場合はさらに3ユーロセントが加算される。一方で買取価格は毎年1ユーロセントずつ減額される。この制度によって、早期の新設設備ほど手厚く事業者資金が還流され、深度3 km以上も掘削しても採算が合う試算になる。また、2009年1月に導入された「再生可能エネルギー熱法」により、新築の建物への再生可能熱の導入が義務化されたことも、地熱利用を促進する要因になっている²⁹⁾。

ドイツ連邦環境省は、地熱プロジェクトに対する融資プログラムとして、深層地熱のボーリングへの融資として6000万ユーロを用意し、特に採掘のリスクを削減している。ドイツ復興金融公庫は、商業銀行を通じて深い地中へのボーリング事業に対して貸付を行っており、貸付額は採掘に必要な費用の最大80%までで熱水脈が採掘できないことが確認されると、投資家はその時点から残りの返済が免除される³⁰⁾。継続して研究開発助成も行われており、技術的にも地学的リスクの低減が図られている。ドイツではこのように、国策としての地熱開発が積極的に進められている。

4-5

オーストラリア

オーストラリアも、再生可能エネルギー普及促進政策を進めている国であり、2020年までに少なくとも360億AUDの新規投資を予定している。電気料金に対する現在の税制補助と連邦政府の

小規模再生可能エネルギー計画(SRES)により、再生可能エネルギーの普及を加速させる見込みである。

2010年には、オーストラリアのジオダイナミクス社が大規模な高温岩体地熱発電プラントの建設を進めている。クーパー盆地では40社を超えるベンチャー企業が地熱発電の開発を進めている。火山国ではないオーストラリアで

は、蒸気や熱水を取り出すために従来の2倍、地下4,000mを超える深さの井戸を掘っている。すでに多くの企業や個人が地熱発電に投資している。エネルギー資源が豊富な国であっても、再生可能エネルギーへの投資が増加していることは、温室効果ガス削減への積極な取り組みによるものと考えられる。

5 我が国の地熱エネルギーの利用拡大に向けて

5-1

我が国における地熱発電のポテンシャル

我が国の地熱発電は、他の再生可能エネルギーに比べても、あるいは海外諸国の地熱発電と比較しても対照的に伸び悩んできた。2章で述べたように、大型地熱発電施設のサイト調査や建設に時間がかかることや国立公園内には着手できないこともその原因である。しかし、その間にバイナリー発電などの小型地熱技術や掘削技術が進歩したことは、我が国固有のこうした問題の解決の一助にはなりうる。NEDOによる地熱資源マップも整備され、以前よりもリスクが低減されている。

また、バイナリー発電技術の進歩と呼応して、従来は対象外と考えられてきた150℃以下の地熱資源を含めた分布調査データが産総研等によって整備されてきている。例えば、環境省がカーリーナサイクル発電に適すると位置付けている53~120℃の地熱資源は、図表13に示すように、自然公園から離れた地域、例えば東京近郊にも存在する。また環境省は、熱水温度53~120℃ではカーリーナサ

イクル発電、120~150℃では他のバイナリー発電が可能とみて発電出力の試算を行い、53℃~150℃の全国の地熱賦存量を合計約9.6GWと見積もった³¹⁾。これは、2章で述べた資源量(発電出力23,470MW分)とは別のものである。

前述のとおり、150℃以上の熱

水資源23,470MW分の大部分は国立公園内のもので、利用が難しかった。しかし、公園の規制区域外から斜めに掘削して、自然公園直下の熱水を取り出す技術(傾斜ボーリング法)が進み、発電設備の大部分を区域外に設置しつつ区域内の地熱資源を利用できる見通しがついてきた。150℃以上の熱

図表13 53~120℃の熱水資源賦存分布

出典：参考文献²⁴⁾

水資源のうち、NEDOがすでに調査実施済みの国立公園外での地熱開発ポテンシャルは1480 MW分あるが、環境省によれば、この国立公園内に向けた傾斜ボーリング法によって、地熱開発ポテンシャルは3倍に増加すると見込んでいる。

5-2

地域イノベーションに寄与するポテンシャル

5-2-1 地元への熱供給による低炭素社会の構築

地熱エネルギーがもつ、他の再生可能エネルギーにない特色は、発電以外に再生可能な大量の熱を地域にもたらすことである。図表12に示したように、主に軽工業や農業等、民生用ではいろいろな温度帯ごとの熱需要があるが、熱を発生させるためにこれまでは主に重油・灯油やガスなどの化石エネルギーを用いてきた。家庭でも消費エネルギーの50%以上が冷暖房や給湯など“熱”を作ることにより費やされている^{32,33)}。持続可能な低炭素社会構築を目指す際には、熱を再生可能エネルギー由来に代替していくことは、電力を再生可能エネルギー由来にすること以上にインパクトが大きい。地熱エネルギーの導入は低炭素社会構築への大きな寄与が見込まれる。地域の特性に合った地熱発電方式を導入し、熱を最大限有効活用することによって、エネルギーの地産地消が図られる。

新成長戦略では、2020年までに再生可能エネルギーの国内一次エネルギー供給に占める比率を10%に引き上げることを目標として掲げているが、もうすでに地域レベルではこの目標を達成している箇所があり、再生可能エネ

ルギーだけでエネルギー自給率100%以上を達成している地域もある(図表14)。ただし、これは電力、熱、動力などのエネルギー需給を一次エネルギー換算した算術上の収支である。地熱資源のある地域は、電力と熱が同時に自前で供給できるので、算術上だけではなく、現実の意味でもエネルギー的に自立できる可能性もある。

5-2-2 地元産業の活性化

国の安全保障やカーボンフットプリントの観点から、エネルギーや食料はできる限り地産地消が望まれる。地熱を利活用することはエネルギーの持続可能なローカルコミュニティを目指すことにつながる。

近年、エコツーリズム³⁵⁾が注目されている。これは、観光客に地域の資源を伝えることによって、地域の住民が自分たちの資源の価値を再認識するというものである。地域の観光のオリジナリティが高まり、地域を経済的に活性化させるだけでなく、一連の取り組みによって地域社会そのものが活気づいていく。つまり、地域固有の魅力を見直すことで、地元で自信と誇りを持つ生き生きとした地域に変化し、より活力ある持続的発展できる地域を目指すことができる。

日本最古の松川地熱発電所では、1966年の運用開始以来、地熱蒸気の一部を地元温泉旅館に暖房用として供給している。1971年には蒸気凝縮水を加温して八幡平温泉開発(株)(現八幡平市産業振興(株))に70℃、60 t/hの温水を有償で供給し、東八幡平温泉郷の別荘・ホテルおよび観光施設への分湯を開始した。そして温泉郷その他における温水需要が大幅に増加する見込みがあるとして、1981年にはさらに200 t/h増湯された。このような経緯を経て、現在は東北水力地熱(株)が70℃、最大260 t/hの温水を有償で提供している。温水の供給先はホテル・旅館・民宿・ペンション合わせて38軒、保養所25軒、別荘613軒、商店15軒、貸別荘施設・病院・老人ホーム・日帰り温泉施設各1ずつ、農業用ハウス95棟(冬季のみ)である(図表6参照)³⁶⁾。

また、北海道の上士幌町では、温泉の熱と氷雪の冷熱の双方を利用して宮崎種のマンゴーを温室栽培し、端境期に収穫している。

このように、日本では余剰の温泉湯を用いた試験的な段階が続いているが、他の地域でも地熱発電とともに大量の熱資源が供給可能になれば、エネルギーの地産地消だけでなく、大規模な新規産業も育成できる可能性がある。

図表14 エネルギー自給率の高い地域(上位10地域)

県	地域名	自給率%	主要電源
福島県	河沼郡柳町	3290	地熱
大分県	玖珠郡九重町	2123	地熱
群馬県	吾妻郡六合村	1333	小水力
青森県	下北郡東通村	1269	風力
熊本県	球磨郡五木村	907	小水力
宮崎県	児湯郡西米良村	774	小水力
長野県	下水内郡栄村	759	小水力
山梨県	南巨摩郡早川町	717	小水力
岩手県	岩手郡雫石町	709	地熱
北海道	苫前郡苫前町	702	風力

出典：参考文献²⁷⁾

算出方法について

自給率 = その区域での再生可能エネルギー供給量 / その区域の民生・農水用エネルギー需要量

新規の地熱発電所の導入が停滞している中で、事業者の掘削リスクを低減するような資源調査データの整備や小出力地熱発電の実証事業などが継続して行われてきたことには意味がある。しかし今後は、このようなボトムアップ型の施策に加え、地域イノベーションを奨励するトップダウン型施策として地熱発電を活用することが有効であろう。地域が競って地熱発電を核とした持続的な地域総合イノベーション計画全体を策定し、他の模範となるような好事例をモデル地点として、重点的に財政支援や規制緩和特区認定を行うというような形が望ましい³⁷⁾。

地熱発電は運転開始後も随時適切な維持管理が必要であり、定常

的な雇用が必要となる。定期点検や機器の修繕・更新工事、新たな井戸の掘削工事等が行われる際には、より多くの動員がある。こうしたことを人材の雇用機会とみなせば、地元の雇用対策にも寄与できる。これに加えて、新規産業の育成を加えれば、さらに雇用創出の規模は大きくなる。

5-3

ライフ・イノベーションのポテンシャル

地熱資源が存在する場所には、温泉も存在することが多いことから、地球温暖化について考えるだ

けではなく、健康を意識した取り組みもセットで考えることができる。こうした取り組みをすることによって、ビジネス客や観光客などの交流人口が生ずる。たとえば、九州で地熱発電設備をもつホテルでは、その見学のために訪れる宿泊客が増大したとの報告がある³⁸⁾。

また、2010年から開業した鹿児島県指宿市にあるがん治療の医療センター³⁹⁾では、重粒子線治療に使用する約1.5 MWの電力をバイナリー発電によって賄っている。発電の仕組みや井戸の調査結果を地元で公開して、温泉への影響がないことを科学的に調査して、温泉と地熱の共存共栄を模索している。

6 まとめと提言

再生可能エネルギーの一つである地熱は、発電に換算した資源量は約23 GW分(30年間持続できる出力)で、現在の日本国内一般電気事業者の電源容量の約1割と見積もられており、世界第3位を誇り、数少ない我が国固有の資源である。しかし、現役最古でもある1966年の松川発電所運転開始以来、40年余りの間に、導入された総発電出力は540 MWで、資源量の0.3%未満にとどまっている⁴⁰⁾。これは、近年、米国、アイスランド、フィリピン、インドネシア、イタリアなどで急激に導入が進んでいるのとは対照的である。日本での地熱発電の普及が進まなかった要因には、数年前までは原油価格が安かったことや、景気の低迷などがある。しかし、主な要因は適地の多くが自然公園内にあり、行政・温泉事業者・地権者などとの調整が多大なこと、環境影響評価等その他の手続きが多いこと等にあった。さらにそれら

の問題が複合して事業開始から収益が得られ始めるまでのリードタイムが一般に10年といわれるように非常に長く試算されていたことから、企業は投資に踏み切れない結果となっている。しかし、太陽光や風力を利用した発電とは違い、地熱は天候の影響を受けず、安定供給が見込まれる。特に国土の7割が山地であり、火山国である我が国では、全国どこでも発電が可能要素が十分にある。

地熱エネルギーは、他の再生可能エネルギー以上に、発電と発電以外の複数の便益で幅広く地域貢献できるポテンシャルがある。地熱は再生可能なエネルギー源となるだけでなく、熱供給源として、また工事受注、観光客や保養者の増加、特産品の生産、固定資産税など、直接・間接の要因を通じて地域住民の新たな雇用機会をもたらす、交流人口を増大させ、その結果経済効果に大きく寄与することが期待できる。つまり、地域イ

ノベーションを活性化するプラットフォームの1つとして、地熱は大きいポテンシャルを有する。これは、新成長戦略の中に掲げられた観光立国・地域活性化に通ずるものである。

大規模集中型の地熱発電ももちろん重要であるが、建設に長い年月を要する。特にこれを震災復興に生かすという点では、バイナリー発電や温泉発電など、比較的短時間で実施できるものを手始めに地熱を利用することが望まれる。

それには、以下のような施策や改善が望まれる。

(1) 関係法律の改定

環境省は、自然公園法と温泉法のあり方について検討する専門家組織「地熱発電事業に係る自然環境検討会」と「地熱発電事業に係る温泉・地下水への影響検討会」を設置し、温泉法の運用基準を見直し、規制の再検討を開始した。国内で地熱開発によって温泉資源

が枯渇した事例はない。温泉に影響を与える懸念については、科学的根拠に基づいた地域への理解促進が必要となる。

(2) 環境アセスメントの短期化

発電出力 10 MW 以上の地熱発電所を新規に設置するには環境アセスメントが必要となるが、現状では少なくとも 3 年以上を要しており、地熱発電が実施されるまで 10 年以上もの時間がかかる。海外の事例を参考に、短期間で評価が完了するような仕組みに改善することが望まれる。

(3) 技術開発支援

地熱開発には・地質・地球化学・環境アセスメント・シミュレーションなどの知識と技術が必要である。中でも、地熱発電には、地熱貯留層の存在を探索する技術の進展が不可欠である。地震観測技術を応用した地熱資源をより確実に掘り当てる技術が開発されてきている。我が国では地震に関する研究開発が盛んであるが、こうした知見は地熱開発拡大にも利用できる可能性がある。2-2-2 で述べたとおり、地熱開発では掘削に係る費用とリスクが大きい。これ

らの技術開発は、結果的に民間事業者のリスク負担の低減に寄与することにつながるため、政策的な支援を進めることが望まれる。また、地下構造を事前に少しでも詳細に知り、掘削のリスクを下げるための地下探査を国が主導して行うことも有効と考えられる。

(4) 地熱開発に対する補助

地熱開発では掘削に係る費用とリスクが大きいことが、民間事業者が参入意欲を低下させる要因の 1 つになっていることから、前項の技術開発支援と並行して、個別の事業に対して適切なリスク軽減を図ることが必要である。この場合、4-4 で述べたドイツの事例のように、多額の資金の必要な掘削段階で融資したり、掘削が失敗した場合の損害を補てんするような方策も参考になるのではないかと考えられる。

また、5-2-2 で述べたように、地熱開発を単独でとらえるのではなく、地熱発電を核としたコミュニティを構築し、持続的な地域総合イノベーション計画全体を、国が支援するようなモデル開発ができないか検討すべきである。地熱発電所から周辺地域への熱の融通は、前述したような形ですでに多

くの地点で行われている。しかし、それは発電所受入の条件として地域が事業者から得た利益のようなもので、新設の温室農業や温浴施設などに利用されているものの、地域社会全体のエネルギー構造を持続可能なものに変革するほどには至っていない。例えば電力を域外へ供給しているものの、一方では灯油を焚いて暖をとるようなことが行われている。今後の持続可能な社会づくりのためには、地熱開発を産業や生活と合わせて総合的にマネジメントすることが重要であると考えられ、それを奨励、推進する意味で、財政支援は強力なインセンティブとなりうる^{41,42)}。

太陽光発電は、2009 年に補助金制度が復活したことで急伸した。地熱開発にも補助金は有効であると考えられる。

(5) その他の課題

上記のような施策は早急な地熱開発の促進に向けて必要なものである。その他、長期的な視点で必要と思われる課題は、バイナリー発電機の開発と改良、高温岩体技術の実用化などである。

7 おわりに

東北・関東大震災を契機に、再生可能エネルギーが注目される中で、地熱発電への関心も高まっている。2011 年 7 月には、複数の民間会社が、2017 年を目標に、東北地方で大型地熱発電所の建設計画を表明した。この度の大地震からの復興を目指す東北地方は、折しも地熱資源に恵まれたエリアであり、また比較的寒冷な気候であるために、持続可能な熱の供給は温暖な地域よりも恩恵が大きい。震災が起きた日は東北地方

では雪がちらつく寒い日であったことから、暖をとることにエネルギーが必要であった。発電だけではなく、熱を直接供給できる地熱を活用することは、被災地を含めて地球温暖化対策と人々の暮らしに大きく貢献するに違いない。

謝辞

本稿を執筆するに際して多くの情報提供とディスカッションをしてくださった、九州大学工学研究院 地球資源システム工学部門部

糸井龍一教授ならびに藤井光准教授、(独)産業総合研究所地熱資源研究グループ安川香澄博士、弘前大学北日本新エネルギー研究所所長神本正行教授ならびに村岡洋文教授、地熱エンジニアリング(株)梶原竜哉博士、湯沢地熱(株)社長中西繁隆氏、三菱重工(株)エネルギー・環境事業統括戦力室秋葉俊哉氏、アイスランド大使館長谷川氏に深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 「日本再生のめに向けて」：http://www.npu.go.jp/policy/policy04/pdf/20110805/20110805_2.pdf
- 2) エネルギー・環境会議：http://www.npu.go.jp/policy/policy09/archive01_01.html
- 3) 革新的エネルギー・環境戦略：<http://www.npu.go.jp/policy/policy04/pdf/20110607/siryou1.pdf>
- 4) 科学技術動向 2010 年 3 月号：<http://www.nistep.go.jp/achiev/results02.html>
- 5) 井上素行、白石 栄一「再生可能エネルギーとしての新たな時代の水力」、科学技術動向 2010 年 3 月号：
<http://www.nistep.go.jp/achiev/results02.html>
- 6) 「石炭火力発電での木質バイオマス混焼を加速展開」、p7、科学技術動向 2010 年 5 月号：
<http://www.nistep.go.jp/achiev/results02.html>
- 8) 江原、「地熱発電とは何か」、p.27、OHM2011・JUL
- 9) 地熱エンジニアリング(株)ホームページ：<http://www.geothermal.co.jp/index.htm>
- 10) 三菱マテリアル(株)ホームページ
- 11) 村岡洋文「再評価されつつある地熱開発ニーズに応じて」、AIST ホームページ：
aist.go.jp/georesenv/result/green-report/report08/p13.pdf
- 12) 浦島邦子、戸潤敏孔「温室効果ガス削減に貢献する電力技術」、科学技術動向 2008 年 9 月号：
<http://www.nistep.go.jp/achiev/results02.html>
- 13) 経済産業省、エネルギー白書 2008 年版 (2008)
- 14) NEDO 再生エネルギー白書
- 15) 評価者のコメント、中小水力・地熱発電開発費等補助金：
<http://www.meti.go.jp/committee/notice/2010a/20100514002com10.pdf>
- 16) 平成 23 年度新エネルギー等導入加速化支援対策事業：http://www.nepc.or.jp/topics/pdf/110810/110810_2.pdf
- 17) 平成 23 年度中小水力・地熱発電開発費補助金（地熱発電開発事業）に係る交付先決定について：
http://www.nepc.or.jp/topics/2011/0726_1.html
- 18) 地熱発電の経済性の検討：http://www.pref.niigata.lg.jp/HTML_Article/189/640/8,0.pdf
- 19) 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門ホームページ：<http://unit.aist.go.jp/georesenv/geotherm/resourceJ.html>
- 20) ECO Japan、日経エコロジー：<http://eco.nikkeibp.co.jp/article/special/20100721/104312/>
- 21) 江原、「地熱発電とは何か」、p.27、OHM2011・JUL
- 22) 東武鉄道ニュースリリース：<http://www.tokyo-skytreetown.jp/news/pdf/090217.pdf>
- 23) Geothermal technologies program：<http://www1.eere.energy.gov/geothermal/index.html>
- 25) Geothermal development and research in iceland, Orkustofnun アイスランド大使館提供資料
- 26) “Bericht der Bundesregierung über ein Konzept zur Förderung, Entwickliug und Markteinführung von geothermischer Stromerzeugung und Wäremnetzung”、ドイツ環境省
- 27) ドイツ地熱協会ホームページ：<http://www.geothermie.de/>
- 28) 企画調査研究、地球環境適応型地熱開発戦略：<http://niweb.kankyo.tohoku.ac.jp/pdf/gravure.pdf>
- 29) 報告書「地熱発電・熱利用の助成、開発、市場促進に関する連邦政府コンセプト」ドイツ政府：
http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/43494.php
- 30) EIC ネット：<http://www.eic.or.jp/news/?act=view&serial=20165&oversea=1>
- 31) 平成 22 年度 再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査報告書、環境省：
<http://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/chpt6.pdf>
- 32) 藤本博也、「住宅の省エネルギー化に貢献する高断熱技術」、科学技術動向、No.93、2008
- 33) でんきの情報広場：<http://www.fepec.or.jp/present/jigyuu/japan/index.html>
- 35) エコツーリズム、環境省ホームページ：<http://www.env.go.jp/nature/ecotourism/try-ecotourism/about/index.html>
- 36) 地熱発電と温泉利用の共生を目指して（報告書）、2010.5、日本地熱学会
- 37) 展望地熱発電 2030 年、日本地熱開発企業協議会、2005.11
- 38) 地熱発電と温泉利用の共生を目指して（報告書）、2010.5、日本地熱学会
- 39) メディポリス指宿：<http://www.medipolis.org/m-rijicho.html>
- 40) 地熱開発研究会報告書、地熱開発研究会、2008.6

- 41) 新妻弘明、地球環境適応型地熱開発戦略、地熱エネルギー、2002.10
42) 地熱発電に関する研究会中間報告について、資源エネルギー庁電力基盤整備課、2009.8.5 :
http://staff.aist.go.jp/toshi-tosha/geothermal/gate_day/presentation/METI1-Ito.pdf

執筆者プロフィール



浦島 邦子

環境・エネルギーユニット
科学技術動向研究センター
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

工学博士。日本の電機メーカー、カナダ、アメリカ、フランスの大学、国立研究所、企業にてプラズマ技術を用いた環境汚染物質の処理ならびに除去技術の開発に従事後、2003年より現職。世界の環境とエネルギー全般に関する科学技術動向について主に調査中。



和田 潤

環境・エネルギーユニット
科学技術動向研究センター 特別研究員
<http://www.nistep.go.jp/>

石炭の高度利用技術（クリーンコールテクノロジー）の開発に長年携わる。2010年7月より現職。グリーンイノベーション全般に関する科学技術や政策に関する調査研究を行っている。

ふたつの大震災から見た 我が国の地震研究の動向と課題

松村 正三
客員研究官

1 はじめに

標題に掲げたふたつの大震災とは、1995年阪神・淡路大震災（M7.3、死者・行方不明者6437人）と今春の東日本大震災（M9.0、死者・行方不明者約2万人）である。これらを含め過去の震災を振り返ってみると、20世紀の100年間で我が国に10人以上の死者・行方不明者をもたらした震災の回数は31回を数え、その平均発生間隔は3.2年であった。続く21世紀の11年間では、2004年中越地震、2007年中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震、そして2011年東日本大震災と4回を数え、震災発生のペースは全く減少していない。つまり、3年に1回程度の割合で日本のどこかにこのくらいの震災が発生すると警

告していたならば、今回もその予測は当たったことになる。今後もこの予測は有効かもしれない。そうだとすると、一方で場所を特定した地震の発生予測がなかなか当たらないことに比べ、これは、きわめて皮肉な結果であると言わざるを得ない。地震の発生を制御することはできないが、震災を抑制することならば可能なはずだからである。

阪神・淡路大震災を契機にして、我が国の地震研究の方向付けと体制は大きな変革を遂げたと言われている。それにもかかわらず相変わらず震災が繰り返されてきたこの間の経緯に、地震研究はどう関わってきたのだろうか。

折りしも、第4期科学技術基本

計画が策定されたばかりである（平成23年8月19日閣議決定¹⁾）。そこでは、今回の震災と原発事故を踏まえ、我が国のリスクマネジメントに不備があったことを認め、科学技術への国民の理解と信頼をいかにして取り戻すかを今後の課題として投げかけている。また、人々の生活の安全性を守るため、自然災害に対する対応能力の強化に向けた研究開発等の取り組みを促進することを要請している。

本論では、今回の東日本大震災の地震学的な意味合いを振り返るとともに、日本の地震研究が今どういった状況にあるかを、学会発表の件数と傾向を基にして米国の地震研究と対比しながら考察する。

2 東日本大震災

2-1

地震の概要

2011年3月11日14時46分、東北から関東にかけての太平洋沖

合いにM9.0の超巨大地震が発生した（気象庁による地震名称は、「平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震」）。我が国の歴史上最大規模の地震である。地震動とこれに引き続いた津波によって死者・行方不明者の数は約2万人に

およんだ。

この地震は、日本海溝から沈み込む太平洋プレートと東北地方を載せた大陸プレートとの境界面を滑らせたものである。図表1は、陸上のGPS観測網（GEONET）データに基づいて国土地理院が後

日解析した断層面上の滑り分布を表す²⁾。分布の中心となる震源は、宮城県沖合いであるが、主な滑り領域は、岩手県三陸沖から宮城県、福島県、茨城県の沖合いにあって、震源域のサイズは500 km×200 kmを囲み、最大滑り量は24 mを超えている。

阪神・淡路大震災が都市直下型の活断層地震であったのに対し、今回はプレート境界の海溝型地震であり、ふたつの異なるタイプの大震災が16年のあいだに起きてしまったわけである。

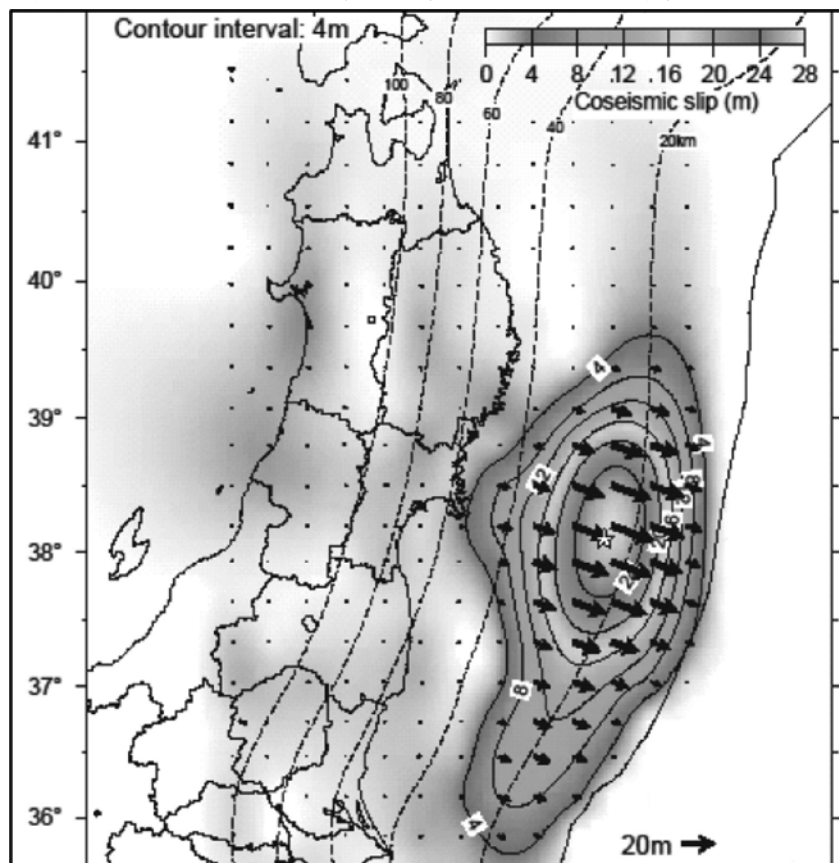
2-2

事前予測

阪神・淡路大震災の後に政府が設置した地震調査研究推進本部(以下、地震本部と略す)は、東日本太平洋沖合いでの地震発生の事前評価を行っていた³⁾。2000年11月に公表された宮城県沖地震に対する評価報告を皮切りに、全体を8つの地区(図表2、A:三陸沖北部、B:三陸沖中部、C:宮城県沖、D:福島県沖、E:茨城県沖、F:房総沖、G:三陸沖南部海溝寄り、H:三陸沖北部から房総沖の海溝寄り)に分割し、BとFを除く各地区ごとに予測される地震(震源域が特定できる場合は固有地震と呼ぶ)のマグニチュードと今後30年間での発生確率を公表した。発生確率は年々更新され、図表2は2011年1月1日時点での30年確率である。

図表1と図表2を見比べると、今回の地震は、8地区の内の6地区(図表2の楕円内、B、C、D、E、G、H)が一気に滑ったものであることが分かる。これらの地区における津波と地震の連係という見方で歴史を遡ってみると、過去にも類似例が見当たる。1896年6月の明治三陸津波地震

図表1 プレート境界面上の滑り分布 (2011年4月21日発表)



出典: 国土地理院²⁾

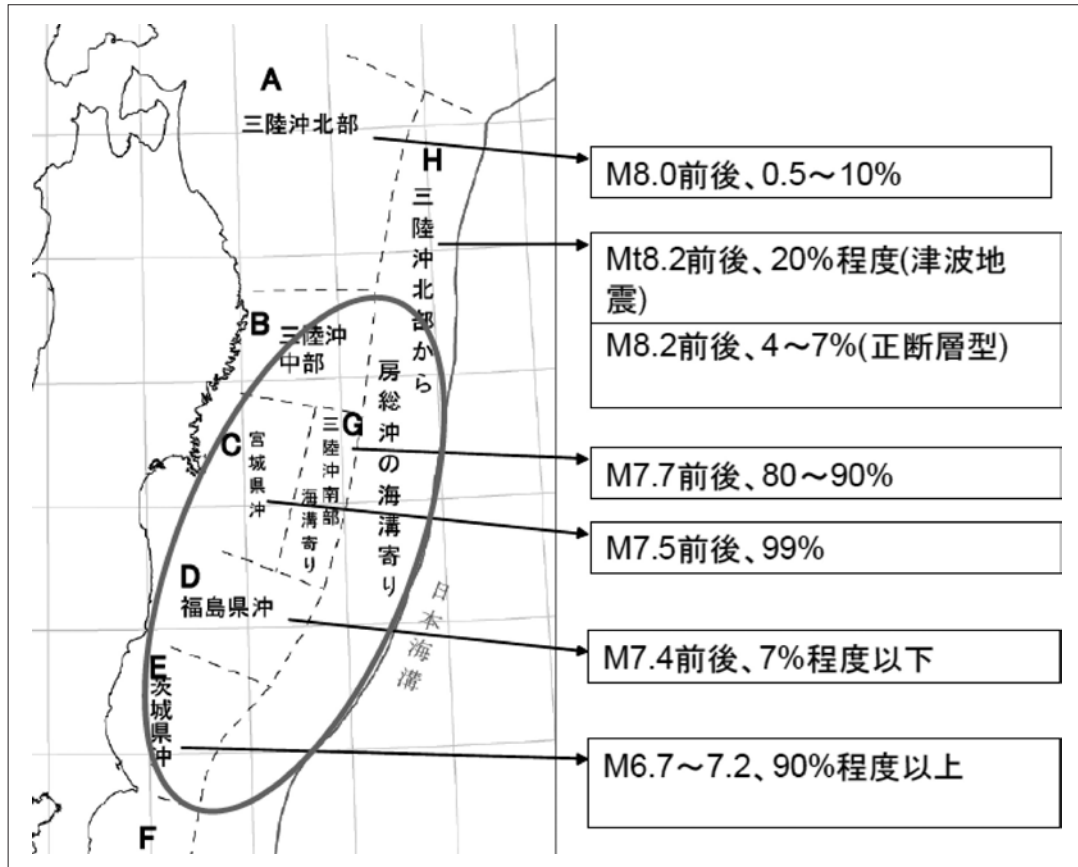
(M8.2)の震源域は、岩手・宮城県の沖合い、日本海溝近くであり、前記エリア分けのHに属する。この地震による津波の遡上高は最高値で38.2 mと推測され、死者は2万2千人に達した。地震の規模としては今回のM9.0に及ばないが、津波マグニチュード(Mt)という評価では最大9.0と今回にはほぼ匹敵する⁴⁾。さらにこの地震の前後、1896年から翌1897年にかけての1年半の間に、E→H→C→G、と4個の地区でM7~8級の地震が相次いで発生し、太平洋プレート境界面上の震源域の多くが比較的短期間の内に滑ってしまったのである。

では、今回の地震は120年前の現象の再来と言ってよいだろうか。実は、120年前のように各地区の震源域が逐次滑ったか、今回のように全てが数分の内に一気に滑ったかで、地震学的観点からの意味合いは全く異なる。例えば、個々の固有地震等のモーメント・

マグニチュード(Mw)からそれらのエネルギーを単純に算術和してもその合計はせいぜいMw8.4にしかならず、今回のM9.0と比較したエネルギーには約10倍の差がある。また、太平洋プレートの沈み込み速度は約8 cm/年とされており、120年で24 mを超える滑りを溜め込むことはできない。従って、今回の地震を図表2の各地震が連なっただけの「連動地震」と見ることは正しい認識とは言えず、結果的に、この地域の地震の起き方そのものを考え直す必要に迫られることとなった。

事前予測では、近い将来、宮城県沖にM7~8クラスの地震が発生するという想定がなされていた。しかしながら、この地域にM9クラスの地震が発生し得るという認識までは持てていなかった。その根拠となった考え方のひとつとして、島崎(2011)⁵⁾は、「比較沈み込み学」による推察を取り上げている。Ruff & Kanamori

図表2 地震調査研究推進本部が2011年1月11日に公表した地震地域区分と予測地震の発生確率
(表は、推定マグニチュードと2011年1月1日から数えて30年以内の発生確率)



地震本部資料³⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

(1983)⁶⁾は、各沈み込み帯における地震の規模が、沈み込み速度、および、プレート年齢の2個のパラメーターによって規定されているとした。この説に従って三陸沖に起きる地震の代表マグニチュードを推定すると、M8.1前後となった。スマトラもまた同様であった。しかし、現実には双方ともにM9クラスの地震が起きたわけだから、今となればこの仮説自体に問題があったと言うべきだろう。

どのような説であれ、それが仮説である以上、事実によって検証が進み、いつか別の説に取って代わられることがあっても不思議ではない。環太平洋では、ここ半世紀の間に5個のM9地震が起きていた。冷静に考えれば、日本の沖合でM9地震が起きることも想定外とは言えなかったはずである。今回の問題は、ある意味で、有力な仮説ゆえに想定が自由さが

妨げられてしまったことにあるとも言える。科学の進展につれ、いくつもの仮説が淘汰されていくのは、科学の常道である。しかしながら、地震学では、科学的真偽とは別の次元で、仮説そのものが国民の実生活と直接的な関わりをもってしまう、という厄介な問題が存在する。拙速な結論は避けるべきであるが、少なくとも、研究者の研究活動が国民にとってつねにプラスに作用するとは限らないという事実を認識あるいは覚悟しておく必要がある。

2-3

宮城県沖地震の調査研究

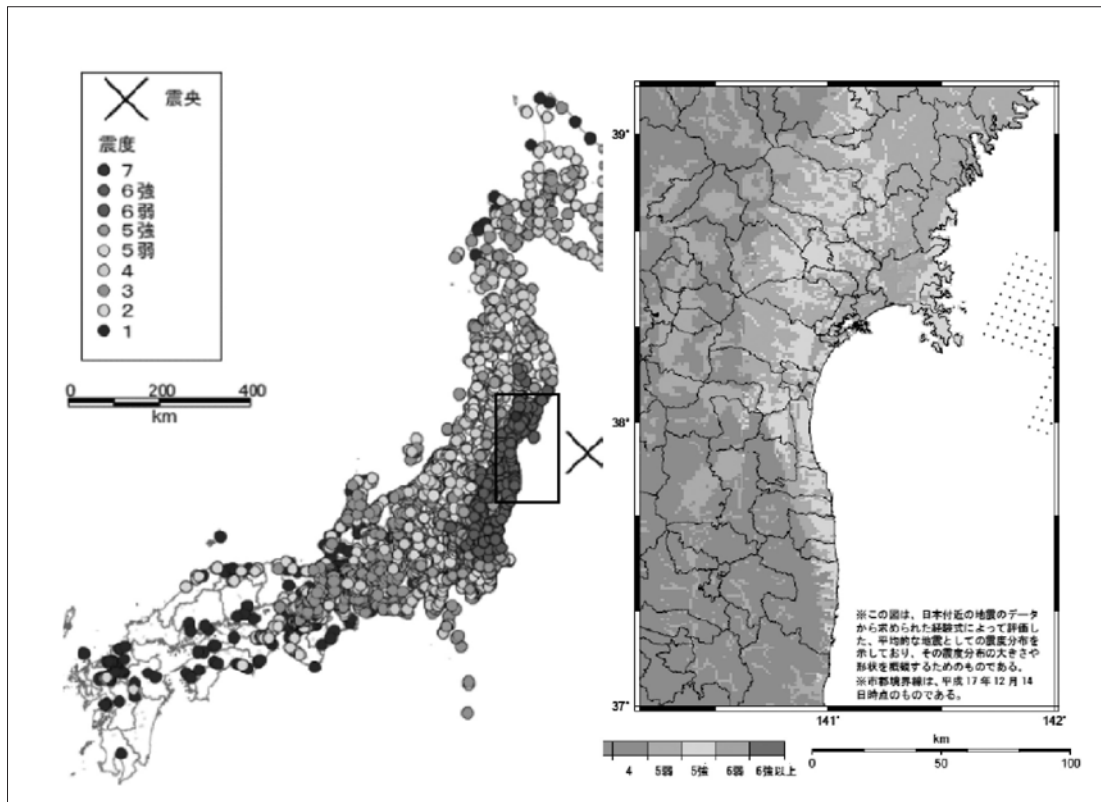
図表3は、地震本部⁷⁾による宮城県沖の地震(図表2のC+G)に対しての予測震度分布(右図)と、実際に起きた地震の観測震度

分布(左図:(財)地震予知総合研究振興会より)を対比したものである。左図では宮城県を中心とした広い範囲が震度6弱以上となっているが、右図の予測図に塗られた震度6弱以上のエリアは、仙台湾岸と北上川流域の一部に限定されており、前節で紹介した想定と実態との間の大きな懸隔を表している。

しかし、これは、地震本部の想定が無意味なものであったということでは決してない。少なくとも宮城県沖に大地震が差し迫っているという危機意識を喚起させていたことは事実である。この想定によって実際の震災がどれだけ軽減されたかを検証することは簡単でないが、こうした想定があったからこそ、仙台市を中心に耐震対策が進められており、それが効を奏したであろうことは想像に難くない。

さらに、地震本部では、宮城県沖地震の再評価に向け、重点調査

図表3 東日本大震災による実際の震度分布（左図）と2005年12月14日に公表された宮城県沖地震による予測震度分布（右図）



出典：地震調査研究推進本部⁷⁾、(財)地震予知総合研究振興会

観測プロジェクト「宮城県沖地震における重点的な調査観測」を立ち上げ、2005年～2009年の5カ年をかけて総合調査と分析を進めてきた。関わった研究者数は延べ59名、最終報告書は411ページの大部である。この中で特筆すべきは、三陸地方を襲った過去の津波調査報告であり、大津波の発生として、869年貞観津波、1611年慶長津波、1793年寛政津波を

挙げ、こうした巨大津波がおおよそ450～800年の再来間隔をもって繰り返してきたと報告していた。今回の震災の犠牲者、また原発事故に関わる問題の大半が津波に起因するものであることを鑑みたとき、このタイミングで震災が起き、プロジェクトで得られた知見が十分に活かされなかったのはまことに残念なことである。

不幸なタイミングで大震災が起

きてしまったとはいえ、阪神・淡路大震災によって立ち上げられた政府組織である地震本部が進める施策・調査研究プロジェクトは、基本的には明確な目標を掲げた“ミッション指向”研究である。では、個々の研究者の研究指向は、阪神・淡路大震災後どのような道筋を辿ったのだろうか。

3 日米の地震学会の動向

この章では、日米の地震学会を取り上げ、個々の研究者の研究指向を比較する。まず、(社)日本地震学会における研究発表に注目して地震研究の動向を探ることにする。学界全体を見渡すに十分というわけではないが、この学会には日本の地震研究者のほぼ全てが参加しており、少なくとも日本の理学的地震研究に関する最も包括的

な場と見ることは妥当である。

重要なポイントは、学会はひとつの組織でありながら、その構成員に対して実質的な拘束力を持たないということである。つまり、学会での発表は研究者個人の意思に基づいたものであって、その方向性に学会としての特別な意向が反映されるわけではない。しかしそれゆえに、その時期の学界全体

の研究動向を客観的に指し示すものと言うことができる。

(社)日本地震学会での発表機会は、通常、春と秋の2回であるが、1990年以来、春の大会は地球電磁気学会や火山学会ほかの地球物理学関連学会との合同開催となってきた。そこで、以下の調査対象を単独開催の秋季大会のみとした。

3-1

阪神・淡路大震災の前後で比較した日本の地震研究

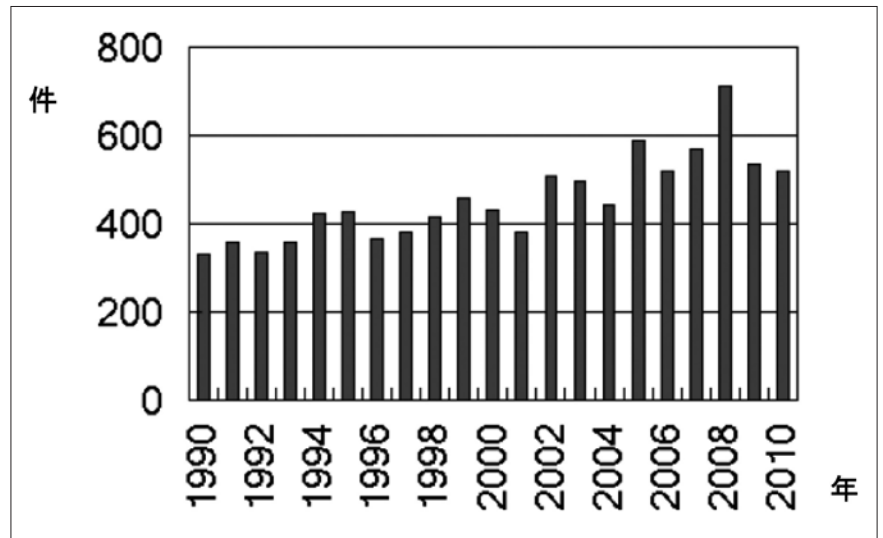
1995年の阪神・淡路大震災で6400名を超える死者が出たことは、当時の地震関連学界全体に強い衝撃をもたらした。それまで科学技術庁にあった地震予知研究推進本部は、地震調査研究推進本部（後に文部科学省に移管）に改組され、全国の地震動予測地図の編纂が始められたことは前報⁸⁾に書いたとおりである。地震学会は、それまでの地震予知研究偏重を改め、地震発生機構を物理学的に解明する基礎的研究重視へと舵を切った。

図表4は、最近20年間の秋季大会における発表件数の推移である。1回の大会での各人毎の発表件数が制限されているため、発表

総数は、ほぼ研究者の数に比例すると考えてよい。阪神・淡路大震災を契機に急増したと言えるほどではないが、大学院生を含めて地震研究者の数は着実に増加してきたと推察される。なお、2008年が突出しているのは、国際学会と共催されたためである。

問題は発表件数などではなく、発表の内容とその傾向であろう。筆者は、発表タイトルから、その時々の研究の指向性を窺い知ることができるのではないかと考え、その分類を試みた。図表5は、阪神・淡路大震災直前(1994年秋⁹⁾)と16年後の2010年秋¹⁰⁾の大会

図表4 (社)日本地震学会秋季大会における発表件数の推移



科学技術動向研究センターにて作成

図表5 (社)日本地震学会秋季大会のセッション名と発表件数 (1994年および2010年の比較)

1994年(福岡市)		2010年(広島市)	
地殻構造・地盤構造	23	地殻構造	37
地殻変動	17	地殻変動・GPS・重力	44
地震活動・地震一般	44	地震活動	35
発震機構	34	地震一般・その他	13
地震波動・理論	16	地震の理論・解析法	21
地盤震動・地震災害	25	地盤構造・地盤震動	32
歴史地震	7	地球熱学	1
テクニクス・サイモテクニクス	30	テクニクス	8
地震予知	11	地震予知	17
地球化学・地下水	5	地球化学・地下水	2
活断層・重力・惑星	18	活断層・歴史地震	15
岩石破壊・応力	8	岩石実験・地殻応力	9
地球内部構造・物性・熱学	24	地球及び惑星の深部構造と物性	16
津波・マグニチュード	12	津波	17
計測・処理システム	19	地震計測・処理システム	12
数値波動・強震動	46	強震動・地震災害	48
内陸地震	33	地震に伴う諸現象	4
火山性微動	25	新・地震波形解剖学	49
雲仙火山	13	地震発生の物理	54
ホリア深発地震	14	変動地形学の挑戦:活断層から地震動へ	13
		地震活動評価に基づく地震発生予測システムの構築に向けて	21
		フィリピン海プレートと日本列島一地震・火山から地形形成論まで	40
		記念講演	3
		地震教育・地震学史	7
計	424	計	518

科学技術動向研究センターにて作成

の比較である。表には、それぞれの大会のセッション名とその発表件数を掲げている。両年度を見比べると、下段に並べた特別セッションを別にして、多くのセッション名が全く変わっていないことに気づく。もちろん、それぞれの研究内容は、年とともに進展しており、中にはそのスタイルが大きく様変わりしたセッションもあるだろう。ただし、ここで注視している点は、科学としての地震学がいかに発展してきたかということではなく、阪神・淡路大震災後、個々の研究者の研究指向にミッション性が取り込まれたのかどうか、また、その意味で学会全体の動向がどう方向転換したのかということである。それらを論ずるために、やや恣意的ではあるが、個々の発表タイトルから窺える研究テーマを4つに分類してみた(1:地殻構造、地震発生機構の解明など、学術的・理学的研究、2:地震予知・予測、3:地震動評

価・災害予測、4:その他)。ここでの分類は、あくまでも相対的なものであり、発表タイトルの調子から受けた筆者の印象に基づいている。また、次節で示す米国地震学会との比較を意識した分類とも言える。

結果は、図表6に示したとおりであり、阪神・淡路大震災の前後で、双方の円グラフにはほとんど差異が見られなかった。震災後に学界が強調した研究の方向性が、「地震の発生機構を物理的に解明する」という基礎研究推進であったことが反映された結果とも言えよう。

3-2

日・米地震学会の比較

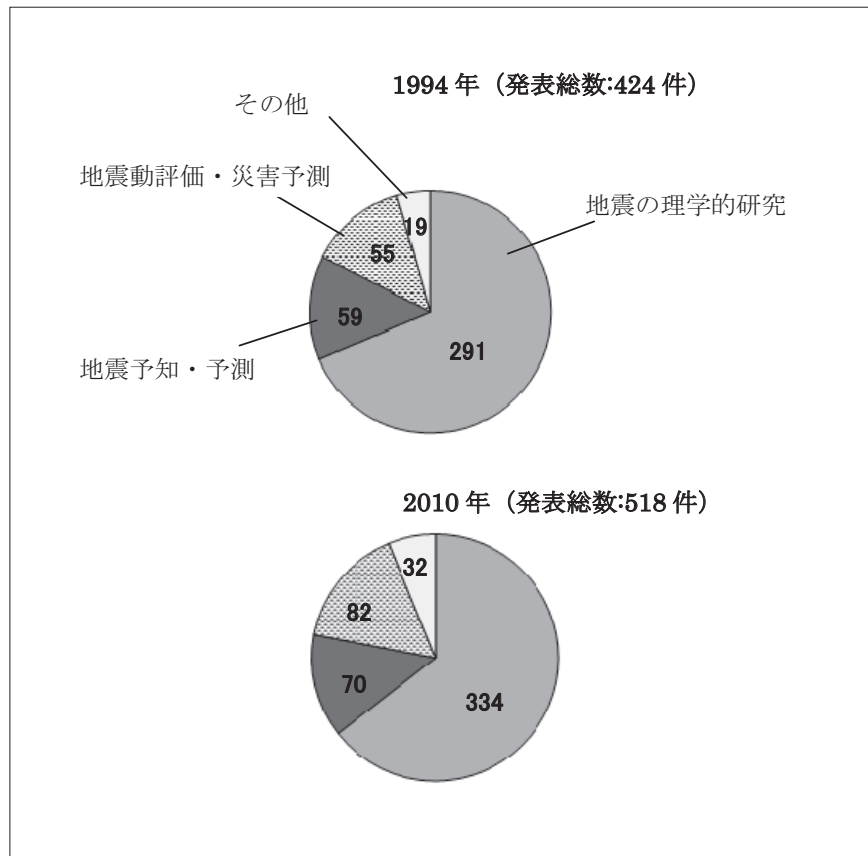
同じ分類比較を、米国地震学会(Seismological Society of America)に対しても行なってみた。米国西

海岸では、約20年前、1989年ロマ・プリータ地震(M6.9、死者63名)、1992年ランダース地震(M7.3、負傷者400名)、1994年ノースリッジ地震(M6.7、死者57名)と中規模の震災が相次いだ。ここでは、その後の2000年¹¹⁾および2010年¹²⁾の定期大会における発表を調べた。発表件数は、それぞれ301件、543件、と件数の伸びが大きく、近年では日本の学会での発表件数とほぼ拮抗している。また、2000年と2010年のセッション名を図表7と図表8に掲載した。日本語タイトルは筆者が直訳したものである。米国地震学会では、個々のセッション名が長く、また、同じセッション名が繰り返されていない。これから受ける印象として、米国の場合、セッション名そのものに、研究の目標や意味合いを明確化しようという“ミッション指向”の意思が感じられる。

セッション名や発表タイトルだけから研究の中味までがミッション指向なものであるかどうかまでを明確に判定することには無理があり、むしろ、本質的な研究の仕方には、国による違いなど存在しないというのが常識的な解釈かもしれない。しかし表面的とはいえ、研究の指向性や姿勢に違いがあるという印象が拭えない。

発表タイトルから仕分けた分野別の2000年と2010年の比較結果が図表9である。単純で主観的な分類とはいえ、図表6と見比べて日米の差は明白である。米国では、第2と第3分野を合わせた発表件数が全体の50%前後を占める。図表10は、両国の地震学会ホームページに掲載されたそれぞれの学会の目的あるいは設立趣意を抜粋したものである。本節での分析結果を脳裡においてこれらを読むと、米国学会の趣意は社会との関わりをより強く意識した表現となっていることに気付かされる。

図表6 日本地震学会の発表タイトルから見たテーマの分類。数字は発表件数



科学技術動向研究センターにて作成

図表7 米国地震学会のセッション名と発表件数 (2000年)

2000 SSA(カリフォルニア州サンディエゴ)	
最近話題となった地震	25
工学者と地震学者の境界域	14
地震一般	11
CTBT監視と全地球地震観測網	40
地殻の3次元撮像	20
確率論的地震災害分析におけるサイト効果の勘定	36
近地表地球物理学的撮像	14
教育における地震学	13
地震学とNSFによる地球展望の先鞭	14
テラスケール計算機技術と地震科学	10
地震学と他の地球物理学的薫陶との干涉	9
地震データと測地データとの組み合わせ利用	19
将来のゼロメンテナンス観測点による地震アレイ/新技術及び沖合い海岸間のテレメトリ	16
年代を経た地震事象	26
地震学と火山	6
地震構造、大小	11
強震動と確率論的地震災害	17
計	301

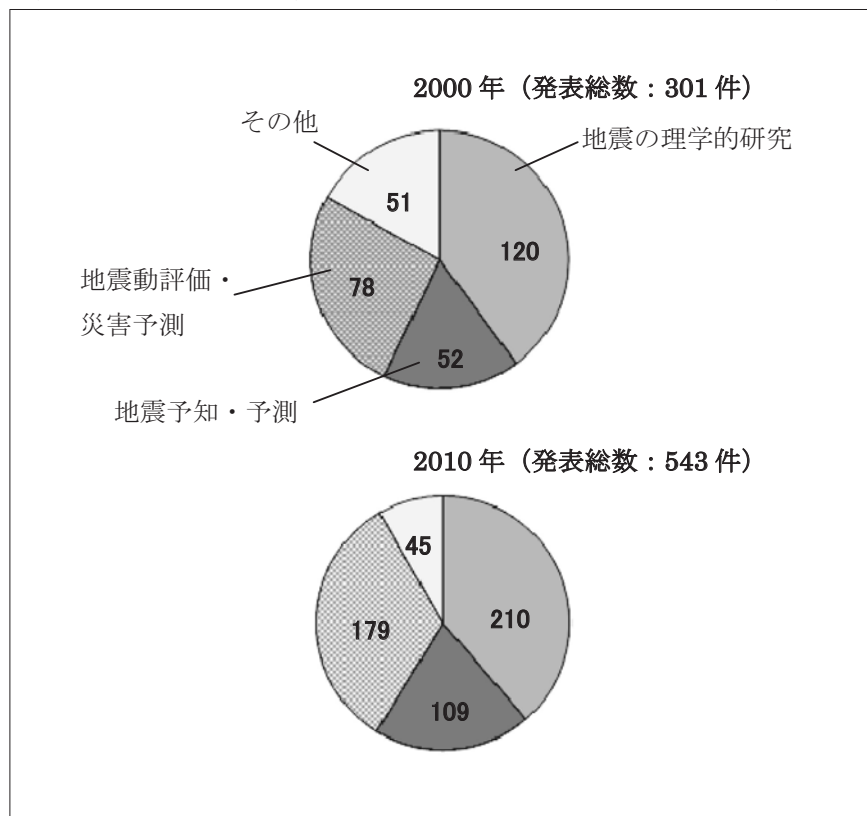
科学技術動向研究センターにて作成

図表8 米国地震学会のセッション名と発表件数 (2010年)

2010 SSA(オレゴン州ポートランド)	
地震ハザードデータを用いた建築基準コード	10
核実験監視	34
次期カスケディア地震と津波の性質	17
マグニチュードスケーリングと地震動の地域変動	24
地震ハザードマッピングの進歩	23
スロースリップと微動の時空間発展	21
地震イメージング: 最近の進歩と将来の方向	19
地震学における生徒と教師: ションテール記念	11
地質構造のための多様な地球物理学データのジョイントインバージョン	6
地震動: 観測と理論	4
地震学的手法: 技術と理論	8
地震動の数値予測	37
地震音響波形: 地震とインフラサウンドの融合	21
機能的地震予測	18
活断層に伴う近地地表変形	27
地震ハザードとリスクにおける不確かさと相関の定量化の扱い	15
地震の議論	12
溶岩高地および北西太平洋域の地震構造と地殻動力学	16
地学的手法と構造工学を結ぶ橋としてのASCE7-10の基での決定論的モデル化地震動記録	12
震源パラメータとマグニチュード評価における最近の進展	24
2010年1月12日ハイチ地震(Mw7.0)の現地観測	1
2010年1月、2月のハイチ、北カリフォルニア、およびチリの地震: 起源、影響、教訓	38
火山の配管システム: 結果、解釈、および監視のための意味づけ	19
工学スケールでの近郊地震ハザードの地下イメージング	23
プレート内部の応力状態	19
地震統計	15
大気、海洋、および寒冷圏の地震学	12
北西太平洋における地震化学と地震工学のインターフェイス	9
地震活動および地震テクトニクス	18
地球物理学における時間の遡上	11
地震ハザード軽減政策の発達と実装	7
地震観測網、解析手法、および装備	12
計	543

科学技術動向研究センターにて作成

図表9 米国地震学会の発表タイトルから見たテーマの分類。数字は発表件数



科学技術動向研究センターにて作成

きたい、という著者の強い意思が伝わってくる。日本人の研究発表に Implication という用語が少ないとするならば、それは、単に言葉の使い方だけの問題なのだろうか。一般化することの危険を承知のうえであえて言うならば、日本人の研究発表には、テーマの選択もさることながら、何が目的であるのか、何を主張したいのか、という研究の位置づけをアピールすることへの強い意思的姿勢が不足しているように筆者には感じられる。

東日本大震災後の朝日新聞¹⁵⁾に、「(日本の)地震学者は、震源を調べることばかりに力を注いでいる」との批判が掲載された。乱暴な総括と言って片付けることもできるが、実は、筆者も同様の思いをもつ。震源特性を分析することは、地震調査の基本であって、確かにそれは、それに続く地震防災研究への導入口であることには違いない。しかしその一方で、「なるほど今回の震源の特性はよく分かった。…では、それでもって次に対して何を言えるのか?」と、問い詰めた気持ちになることもたびたびである。発表者には、研究の目的など言うまでもないことという思いがあるのかもしれないが、受け手側にとってそれは決して自明なことではないのである。

3-3

“Implication” に表される意味

日米の地震学会でのセッション名と発表タイトルを比較した結果、日本人の研究にはミッション性が希薄であるという印象を抱かされた。実は、筆者がそういった

印象を抱いた理由はもうひとつある。外国人の論文には、タイトルや前書きに “Implication” という用語が頻繁に使われているのである。この言葉の意味を辞書であたってみると「含意」と訳されており、日本人にはやや使い辛い言葉である。しかし、この言葉からは、単に研究の内容と結果を正確に伝えるだけではなく、その「意味するところ」をアピールしてお

図表10 日米の地震学会が定款等に掲げた目的

<p>日本地震学会の目的: この法人は、地震学に関する学理およびその応用についての研究発表、知識の交換、および内外の関連学会との連携を行うことにより、地震学の進歩・普及を図り、もってわが国の学術の発展に寄与することを目的とする。(公益社団法人日本地震学会の定款より¹³⁾)</p>
<p>米国地震学会の目的: The Seismological Society of America (SSA) is an international scientific society devoted to the advancement of seismology and its applications in understanding and mitigating earthquake hazards and in imaging the structure of the earth. (米国地震学会は、地震災害の理解と軽減における、並びに、地球構造の描出における地震学とその応用の進歩に寄与するための国際科学学会である) (学会ホームページより¹⁴⁾)</p>

出典：参考文献^{13,14)}

4 考察

生活者としての国民の立場からすれば、地震研究は地球科学の一分野である以上に、生活を脅かす自然の脅威に立ち向かう手段のひとつと見えているはずである。その意味で地震研究の目標は、「地震の発生予測と地震災害の予測」、すなわち前章分類の第2、第3分野に据えられるべきであろう。もともと、第1分野の学術的・理学的研究も本来は、「地震の発生予測」をその最終目標として見据えたものであった。阪神・淡路大震災以前に盛んであった現象論的地震予知研究への偏重を改め、地震発生メカニズムの物理学的解明という基本に立ち戻ろうとした姿勢自体が間違っていたわけではなく、その考え方は今もなお有効であろう。しかし、メカニズムの解明がいかに追求され、地震の物理学がいかに進歩しようとも、それだけで現実の地震防災が自動的に達成されるわけではない。さらに言うならば、自然に対する理学的研究は、ともするとそれ自体が自己目的化しかねない性向を持つ。現状を見る限り、大震災が地震研究の動向に与えた影響は、結果的に、国民の期待を担う方向へ向かわせるものであったと言え難い。

阪神・淡路大震災以来、日本では、地震と地殻変動を対象とした全国ベースの基盤観測網が構築さ

れ、数々の特別研究プロジェクトが立ち上げられた。その結果、地震研究の多くが、基盤観測網からのデータに基づいたプロジェクト研究参加型のものとなった。こうした研究は本来的にミッション性を帯びるべき位置付けにあったはずである。それにもかかわらず、大震災の後も学会の動向にさしたる変化が見られなかったという結果が事実であるとするならば、そうなった要因は何なのだろうか。

筆者は、日米間での研究者の資質や研究への意欲に本質的な差異があるとは考えていない。また、研究者がもつ研究へのモチベーションは、基本的には自然現象に対する強い好奇心であり、同時にその成果を生活の場に役立てたいという使命感に裏打ちされているだろうことを疑うものでもない。しかし同時に筆者は、プロフェッショナルな研究者にとって、研究は生活の場であり、自身のアイデンティティを確立する場であることを重く受け留めている。研究者は、自分の研究がどう評価され、その評価が自分の将来にどう関わるかに無関心でいられるわけがない。結局のところ、使命感を差し置いてでも個々の研究者の指向性を左右する最大の要因は、当の研究者への評価の有り様ではないかと考える。例えば、地震の研究は、

大きくは空間構造の分析と時間変動の分析とに分けられるが、後者は地道で長いスパンのデータの積み重ねを必要とするため、短期間では成果が挙がり難い。そのため、時間変動の研究から若い研究者が遠ざかる結果となっているとも考えられる。

今回の大震災の教訓を踏まえ、地震本部を中心として大学や独立行政法人では新たなミッション指向の調査研究プロジェクトが立ち上がることになるだろう。当然ながら、そうした新プロジェクトへの予算措置には、明確なミッション性を担保することが求められる。しかし、プロジェクトの看板だけにミッション性をアピールしたとしても、それに携わる個々の研究者の意識までが自動的にミッション性を帯びることにはならない。今のままでは、10年後の学会発表に対して現在との比較を行なうとすると、再び今回の調査と同じ結論となってしまうことが危惧される。研究に真にミッション性を求めようとするならば、当のプロジェクトに対する研究評価は無論のこと、研究者個人を評価する方法の有り方を省みる必要がある。それは、とりもなおさず、研究管理の立場に立つ者の手腕に関わる問題であり、真のリーダーシップが問われる課題でもある。

5 おわりに

阪神・淡路大震災後、日本の地震研究は、物理学に基づいた地震発生機構の解明に目標を定めた。これは、ある意味で妥当な目標設定であったと言える。しかし、その結果としての現状を見る限り、

地震研究に対する国民の期待と研究の方向性との乖離は開く一方のように思える。

本論では、日米の地震学会での発表様式の違いから日本の地震研究の動向に関する推察を試みた。

多分に恣意的かつ主観的な印象に依拠した調査ではあるが、両国の研究者の姿勢や指向性になんらかの差異が存在するように見え、筆者はそれをミッション性の濃淡であると結論付けた。平常時ならば

筆者も、それが単に研究風土の違いであるとみなし、したがって、日本の地震研究が米国風のミッション指向なものになるべきだとの主張はもたなかっただろう。しかしながら東日本大震災は、地震学全体にとっても、あまりにも深刻な異常事態であった。地震研究の目標とその有り方を、研究者間の閉じた世界の中だけにとどめることは、もはや許されない状況であると考ええる。

2009年にイタリアでラクイラ地震 (M6.3) が起きたとき、現

地の地震学者が適切な予測情報を出さなかったとして、当局に起訴されるという事件が報道されている。研究へのモチベーションや意図がどのようなものであれ、地震研究は実生活との直接的な関わりをまぬかれないということを示す象徴的な事件であった¹⁶⁾。この報道は日本の地震学界をも震撼させ、(社)日本地震学会として当局への抗議声明を出すべきでは、という騒ぎが巻き起こった。日本のお国柄を考えたとき、そもそもこういう事件の成り立ち自体が想

像し辛いものであったからである。しかしながら、地震の調査研究のため毎年百数十億円¹⁷⁾の国費を費やしながらい国民にとって実益のある結果を出せないでいることに対し、日本の国民がいつまでも寛容でいるだろうかという懸念を、筆者は拭い去ることができない。地震研究に携わる全ての研究者が、今一度、自らの研究の「意味合い」を省みることが求められるのではないだろうか。

参考文献

- 1) 第4期科学技術基本計画：<http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/4honbun.pdf>
- 2) 国土地理院ホームページ：<http://www.gsi.go.jp/common/000060400.pdf>
- 3) 地震調査研究推進本部ホームページ、海溝型地震の長期評価：http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_kaiko.html、活断層および海溝型地震の長期評価結果一覧 (2011年1月1日での算定)：http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran_past/ichiran20110111.pdf
- 4) 阿部勝征、月刊地球、Vol.25、No.5、337-342、2003.
- 5) 島崎邦彦、科学、2011年5月号.
- 6) Ruff, L. and H. Kanamori, Tectonophysics, 99, 99-117, 1983.
- 7) 地震調査研究推進本部ホームページ：<http://www.jishin.go.jp/main/oshirase/201103111446sanriku-oki.gif>
<http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/pdf/20051214miyagi.pdf>
- 8) 科学技術動向 2008年10月号、No.91、25-39：
http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt091j/0810_03_featurearticles/0810fa02/200810_fa02.html
- 9) 日本地震学会 1994年度秋季大会講演予稿集.
- 10) 日本地震学会 2010年度秋季大会講演予稿集.
- 11) Program for 2000 SSA Annual Meeting：http://www.seismosoc.org/meetings/ssa2000_program.html
- 12) Program for 2010 SSA Annual Meeting：<http://www.seismosoc.org/meetings/2010/SSA2010ProgramSchedule.pdf>
- 13) (社)日本地震学会定款：http://www.zisin.jp/modules/pico/index.php?content_id=104
- 14) Seismological Society of America ホームページ：<http://www.seismosoc.org/>
- 15) 朝日新聞 2011年6月2日朝刊.
- 16) 山岡耕春、日本地震学会ニューズレター、Vol.23、No.3、26-29、2011.
- 17) 地震本部ニュース 2011年2月号：<http://www.jishin.go.jp/main/herpnews/2011/feb/herpnews2011feb.pdf>

執筆者プロフィール



松村 正三

科学技術動向研究センター 客員研究官
(独)防災科学技術研究所 客員研究官
<http://www.bosai.go.jp/>

専門は地震学。微小地震観測を通じて大地震の前兆現象検知を目指している。特に東海地震を対象にして、地震活動パターンの変化からスロースリップや準静的滑りにともなう応力再配分の状況を把握したいと考えている。地震調査研究推進本部専門委員。理学博士。

科学技術動向研究センターとは

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

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

センターの具体的な活動は以下の3つです。

1 「科学技術専門家ネットワーク」による科学技術動向分析

我が国の産学官の研究者を「専門調査員」に委嘱し、インターネットを利用して科学技術動向に関する幅広い情報を収集・分析する「科学技術専門家ネットワーク」を運営しています。このネットワークを通じ、専門調査員より注目すべき動向や今後の科学技術の方向性等に関する意見等を伺っています。

これらを、毎月1回、「科学技術動向」としてまとめ、総合科学技術会議、文部科学省を始めとした科学技術関係機関等に配布しています。なお、この資料は <http://www.nistep.go.jp> においても公開しています。



2 重要な科学技術課題の動向調査研究

今後、国として取り組むべき重点事項、具体的な研究開発課題、社会への波及効果等を明確にすることを目的とし、調査・分析を行います。

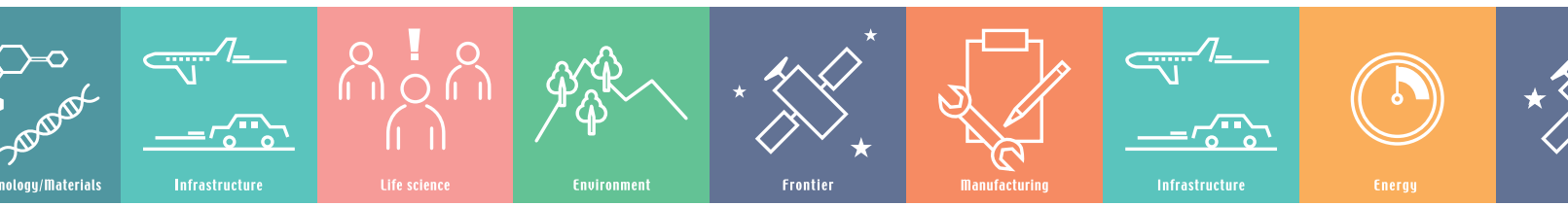
さらに、重要な科学技術分野・領域ごとの科学技術水準を諸外国と比較し、我が国の科学技術がどのような位置にあるのかについての検討も行います。

3 科学技術予測に関する調査研究

科学技術の長期的将来動向を総合的に把握するため、科学技術予測調査をほぼ5年ごとに実施しています。2010年には、課題解決への科学技術の寄与を主題とした「将来社会を支える科学技術の予測調査」を報告しました。



(「将来社会を支える科学技術の予測調査」より、2025年の2025の生活シーン)



Science & Technology Trends

科学技術動向 11・12/2011

科学技術動向 No.126 2011.11-12



文部科学省 科学技術政策研究所
科学技術動向研究センター

2011年11・12月号 第11巻第11・12号/隔月発行 通巻126号 ISSN 1349-3663

