

Science & Technology Trends

科学技術動向

5-6
2012
No.129

レポート・トピックス タイトルをクリックすると各項目にジャンプします

レポート

- p2,10** 小水力発電の現状・意義と普及のための制度面での課題
- p3,21** 地震動の周期に依存した建物被害と新たな課題
- p4,36** 宇宙からの災害リスクを低減する宇宙状況認識

トピックス

- p5** iPS細胞を用いた遺伝子疾患治療の仮説実証に成功
- p6** アミロイドを減少させるアルツハイマー病治療薬の可能性
- p7** 自己熱再生加熱の省エネ効果を実証
- p8** Siナノチューブ負極によって大容量蓄電池寿命が大幅に向上
- p9** クラウドコンピューティングによる全世界の雇用創出効果の推計



小水力発電の現状・意義と普及のための 制度面での課題

東日本大震災による東京電力・福島第1原子力発電所の事故以降、再生可能エネルギー電力や分散型電源の普及・促進は、日本にとってこれまで以上に重要な政策課題となった。再生可能エネルギー電力というと、太陽光発電や風力発電に注目が集まりがちだが、小水力発電が果たす役割も決して小さくはない。小水力電力は、太陽光発電や風力発電に比べ開発ポテンシャル（設備容量規模）は小さいが、他の再生可能エネルギー発電と比較して設備利用率が非常に高い、負荷変動や技術的不確実性が小さいといった優位な点も多く、日本でも優先して開発すべき再生可能エネルギー発電と言える。特に中山間地域では、消費地に近い場所で発電を行う分散型電力供給システム構築への第一歩として期待されている。また、地域固有の水資源に依存しており、開発のプロセスで地域の資源を問い直すことが不可欠であり、地域活性化への寄与も期待できる。各地域では様々な取り組みが行われているが、小水力の中でも特に発電ポテンシャルが小規模な地点に関しては十分に把握されていない可能性があり、詳細な調査が必要である。

ただし全般的には、既存の電源に比べ発電コストが高いことが多い再生可能エネルギーの普及・促進には、政策手段による後押しが必要である。2011年8月に、「再生可能エネルギー特別措置法」が成立し、2012年7月には再生可能エネルギー電力の「固定価格買取制度」がスタートする。普及・促進を目的に、電力事業者が長期間にわたり再生可能エネルギーによる電力を、ある程度の高価格で買い取る義務を負うが、買い取り価格等は「調達価格等算定委員会」における議論に基づき経済産業大臣により決定される。2012年4月27日に、小水力発電も含めた各再生可能エネルギー発電の買取価格等に関する同委員会の提案が発表されたところである。

従来、「水利権」等の調整が必要な小水力発電の普及を阻害する一因は、非常に煩雑な手続きであった。近年、徐々に規制緩和や手続きの簡略化がなされつつあり、東日本大震災後はさらに方向性が明確になってきたが、依然として様々な事項が検討段階である。小水力発電は、まだ技術開発やコスト削減の余地はあるものの、画期的な技術革新がなかったとしても、制度面での様々な制約が緩和されれば大幅な普及が期待できる発電技術である。今日の日本の電力をめぐる状況を考慮すれば、より一層の規制緩和と手続きの簡素化が求められる。

地震動の周期に依存した建物被害と新たな課題

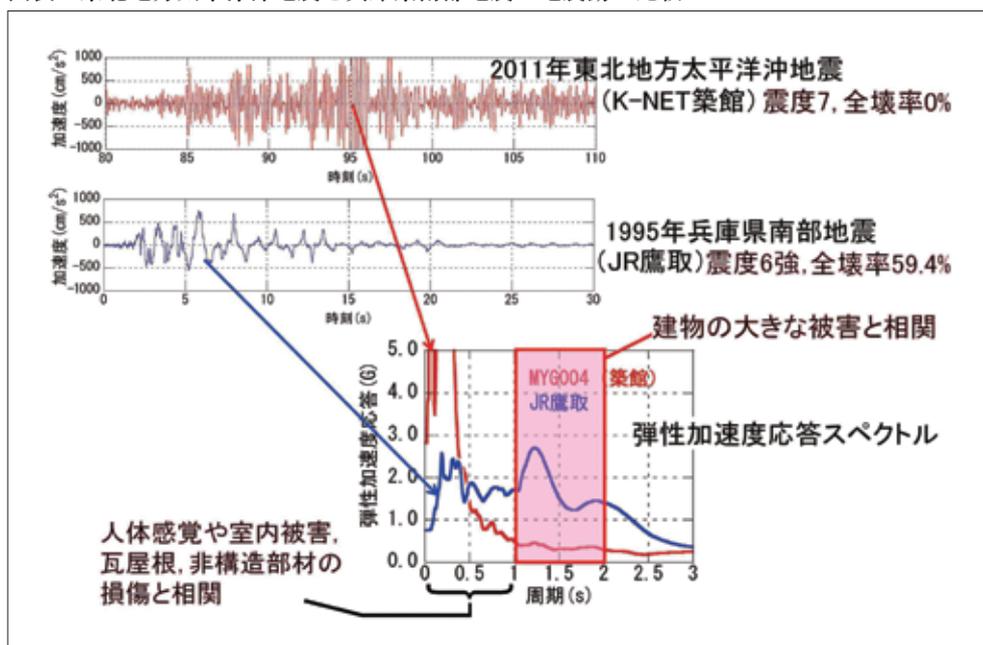
東日本大震災を起こした2011年東北地方太平洋沖地震と阪神・淡路大震災を起こした1995年兵庫県南部地震は、ともに多くの人命を奪い、甚大な被害を及ぼした。しかし、その被害の様相は全く異なる。東北地方太平洋沖地震は、大規模な津波被害を起こしたが、揺れによる建物被害は兵庫県南部地震の時ほど大きくはなかった。これは、東北地方太平洋沖地震が建物への影響が少ない周期1秒以下の地震動が顕著であったためである。一方、兵庫県南部地震は、建物に大きな被害を及ぼす周期1~2秒の地震動が顕著であった(図表参照)。

東北地方太平洋沖地震では、周期2秒以上の長周期地震動が首都圏で観測され、超高層ビルが大きく揺れた。しかし、既にダンパーや積層ゴムなどの制震や免震などの耐震対策がなされており、深刻な被害は報告されなかった。ただし、長周期地震動が長時間続いた場合や繰り返し起きた場合、超高層建物や免震建物が受ける影響については良く分かっておらず、今後の研究が必要である。

周期1~2秒の「やや短周期地震動」および周期2秒を超える「長周期地震動」は、現在使われている気象庁震度階という一指標だけでは表しきれない被害の様相をもたらす可能性がある。また、地震動の周期は、震源だけではなく、地盤構造や地震波の伝搬経路にも大きく影響され、同じ地震でも場所によって異なる。木造家屋や中・低層ビルに大きな影響を及ぼす「やや短周期地震動」に対して、これに特化した評価も重要である。

今後起きうる地震から被害を軽減するためには、地震学・地盤工学・土木建築工学といったそれぞれの学問・技術領域での個別の対応ではなく、領域間の相互連携や知識の共有と融合が必要である。

図表 東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の地震動の比較



提供：境有紀氏

宇宙からの災害リスクを低減する宇宙状況認識

地上に災害をもたらす危険性がある宇宙からの災害リスクには、「宇宙デブリ」、「宇宙天気」および「地球近傍天体」の3つがある。近年の相次ぐ大型衛星の落下、太陽フレアの大規模発生や、地球近傍小惑星と地球のニアミスなど、観測体制が整ってきた現在では宇宙からの災害リスクはもはや想定外とはいええず、人類の生存や社会インフラに重大な脅威となりうることを認識しなければならない。

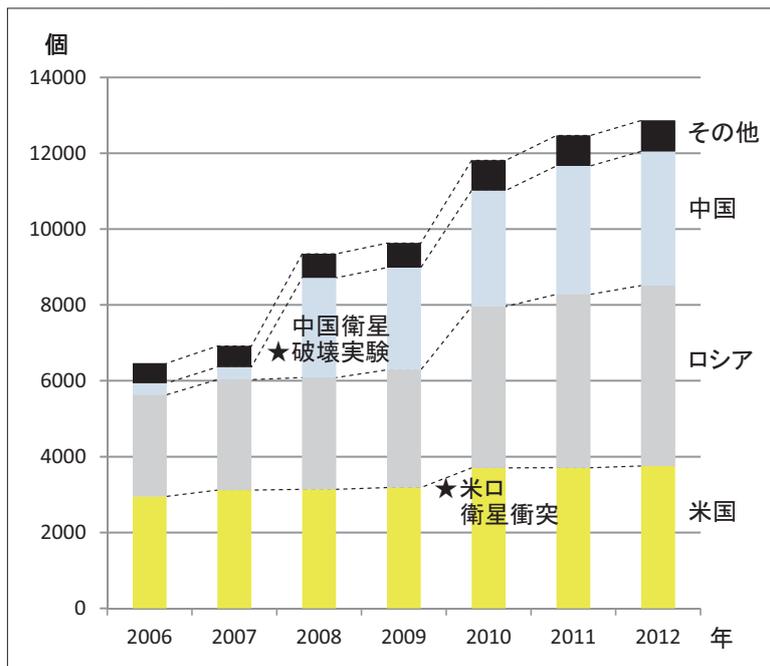
各分野の専門家がそれぞれ宇宙環境を監視するだけでなく、広く一般にも宇宙環境がもたらすリスクの存在や対策などを周知していく活動として「宇宙状況認識」(SSA)が世界的に重視されるようになってきた。欧州・米国・中国などでは「宇宙状況認識」を意識した政策が打ち出されている。しかし、日本では「宇宙状況認識」の概念自体がまだ定着していない。3種類の宇宙環境リスクに対してそれぞれ異なる組織や研究グループが対応しているが、まだ総合化には至っていない。宇宙環境リスクを総合的に把握し、その対策を実施する政策を宇宙基本計画の見直しなどの中で確立することが望まれる。

特に宇宙デブリに関しては、宇宙活動の国際枠組みとなる「行動規範」について、国際的に協調して構築を推進すべきであろう。また、制御不能な大型宇宙デブリを安全な場所で落下させる技術が世界的に開発され始めており、日本も、ランデブー技術やロボット技術を活用した宇宙物体捕獲システムの実用化へ向けた研究開発で先行すべきである。

日々の宇宙天気や将来的に発生恐れがある巨大地球近傍天体に関しては観測の継続が必要である。

これらの施策を実施する上で、宇宙状況認識の重要性を認識し、宇宙状況認識活動の方向性を政策文書において定義することが早急に必要である。同時に、宇宙環境リスク低減の活動を担う人材育成に努めることも必要であると考えられる。

図表 2007年以降急増しリスクが増大している宇宙デブリ



出典：Satellite Situation Report 2006年～2012年の毎年1月のデータから科学技術動向研究センターにて作成

後天的に遺伝子に起こる突然変異は、細胞分裂時にもう1対の正常遺伝子を鋳型として修復される相同組換えの現象は知られているが、iPS細胞の細胞分裂においても異常遺伝子が相同組換えによって正常に修復されることが実証された。京都大学再生医科学研究所の多田高准教授は、1対の片方の遺伝子が先天的に異常な腎疾患モデルマウスのiPS細胞を作製し細胞分裂させ、その中から遺伝子が正常化したiPS細胞を得た。正常化したiPS細胞を用いたキメラマウスは全く腎症状を示さず正常であった¹⁾。この研究成果により、iPS細胞を用いた先天性遺伝子疾患の治療という新たな適応分野が拓けた。

トピックス / iPS細胞を用いた遺伝子疾患治療の仮説実証に成功

生物の体内では、後天的に自然に発生した遺伝子損傷は、体細胞分裂の過程で1対の片方の正常な遺伝子を鋳型にして損傷遺伝子側が修復正常化される機構があり、体細胞分裂相同組換え (spontaneous mitotic recombination) と呼ばれている。通常、このような修復機構は細胞分裂10,000回に1~2回起こると考えられている。

京都大学再生医科学研究所の多田高准教授らのチームは、この体細胞分裂相同組換えがiPS細胞の細胞分裂時にも起こり異常遺伝子が正常に修復されたクローンも得られるという仮説を実証するために、1対の片方の遺伝子が先天的に異常となっている先天性遺伝子疾患 (ヘテロサイゴート) モデルマウスのiPS細胞を作製し、仮説実証に成功した。

多田准教授らは、常染色体優性多発性嚢胞腎症 (ADPKD) と呼ばれる先天性遺伝子疾患を実証例に取り上げた。ADPKD患者の約85%はPolycystic kidney disease1 (Pkd1) 遺伝子の1対の片方の配列異常で起きる先天性遺伝子疾患である。ADPKD患者の腎臓には多くの袋状の空間ができて腎臓機能が低下し、その内数パーセントは悪化して腎臓移植が必要となる。

多田准教授らは、帝京大学の堀江重郎教授から提供されたPkd1遺伝子の1対の片側を損傷させたヘテロノックアウトマウスから、iPS細胞を作製した。iPS細胞では疾患遺伝子も保存されるが、1個のiPS細胞を分裂させてできた1万個以上のクローン1つ1つについて、Pkd1遺伝子の異常部分に体細胞分裂相同組換えが起こったかどうかを遺伝子増幅法により調べた。10,322クローンのうちの1個のクローンで、1対のPkd1遺伝子のいずれ

も正常なものが見出された。

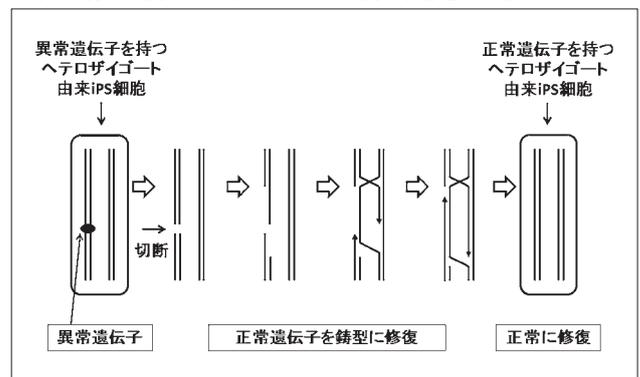
これは、iPS細胞が細胞分裂する過程で、体細胞分裂相同組換えにより損傷遺伝子の修復が行われたことによるものと考えられ、iPS細胞においてもこの修復機構が機能することを、初めて実証できたことになる。

Pkd1遺伝子の1対の片側を損傷させたヘテロノックアウトマウスの腎臓は、多くの袋状の空間ができ、腎臓機能が低下する。これに対し、疾患遺伝子が正常化したiPS細胞を用いたキメラマウスの腎臓は嚢胞腎の症状を全く呈さず、正常に機能していた。

本研究結果により、ヘテロサイゴート自身から作製したiPS細胞をもとにして遺伝子異常部位を修復し、正常組織へ分化させてから戻すという先天性遺伝子疾患に対する根本治療への道を開く基本技術を確認した。

これまではiPS細胞は再生医療への応用が主眼であったが、iPS細胞による先天性遺伝子疾患の治療という新たな適応分野が拓けた。

図表 体細胞相同組換えによる遺伝子修復の過程



科学技術動向研究センターにて作成

参考

- 1) Li-Tao Cheng et al., Cure of ADPKD by Selection for Spontaneous Genetic Repair Events in Pkd1-Mutated iPS Cells, PLoS ONE, 7 (2) : e32018 (2012)

アルツハイマー病は認知機能の低下を主訴とする脳神経変性疾患であり、現状では対症療法薬はあるものの病気そのものを治療することは困難である。発症原因として、アミロイド Aβ 蛋白質 (Aβ) の過剰な産生・凝集および脳への沈着が注目されている。米国 Case Western Reserve 大学の研究チームは、マウスを用いた研究において、抗がん剤として米国で承認されているベキサロテンが Aβ の分解を促進する新たな AD 治療薬になる可能性を示した。主に、アポリポ蛋白質 E (ApoE) の遺伝子発現を亢進させ、生成した ApoE が脂質代謝を通して Aβ の分解を促進させる効果がある。ベキサロテンを投与した AD マウスでは、脳内 Aβ 量の減少とともに記憶・学習障害や嗅覚障害などの改善も確認できた。今後は、ヒトで薬効が認められるか、AD 治療薬として十分な安全域を確保できるかなどの検討が注目される。

トピックス 2 アミロイドを減少させるアルツハイマー病治療薬の可能性

アルツハイマー病 (AD) は認知機能の低下を主訴とする脳神経変性疾患である。世界の AD を含む認知症患者数は 20 年で約 2 倍のペースで増加し、2030 年には 6570 万人、2050 年には 1 億 1540 万人に達すると予測されている。高齢化が顕著な先進諸国だけでなく、今後は新興国や発展途上国においても、AD の克服が重要な社会課題の一つとなると考えられている¹⁾。

AD 患者では神経細胞の脱落による脳の委縮が認められ、発症原因として、アミロイド Aβ 蛋白質 (Aβ) の過剰な産生・凝集および脳への沈着が注目されている。現状では AD の対症療法薬はあるものの病気そのものを治療することは困難であり、Aβ を減少させる方法が見出されれば新たな AD 治療薬ができると期待されている。

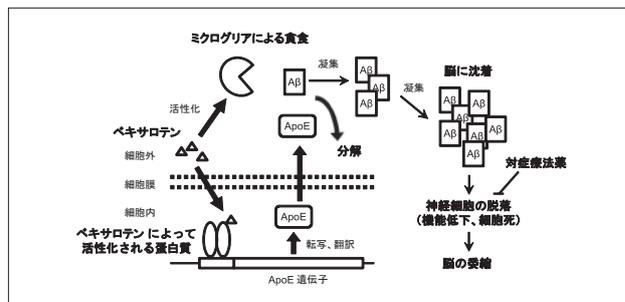
米国 Case Western Reserve 大学の研究チームは、マウスを用いた研究において、ベキサロテンが Aβ の分解を促進する新たな AD 治療薬になる可能性を示し、3 月 29 日号のサイエンス誌に発表した²⁾。ベキサロテンは、アポリポ蛋白質 E (ApoE) の遺伝子発現を亢進させ、生成した ApoE が脂質代謝を通して Aβ の分解を促進させるとともに、ミクログリアという細胞が Aβ を貪食・除去する働きも強めることが明らかになった (図表)。

実験では、発症初期の AD マウスにベキサロテンを経口投与 (100 mg/kg、3 日間) すると、脳間質液中の Aβ は半減期が半分に短くなり、投与開始後 24 時間までに 25% 減少した。また、病態が進んだ AD マウスにベキサロテンを経口投与 (100 mg/kg、14 日間) した結果、脳に沈着する Aβ が約 75% 減少した。この時、Aβ を細胞内に取り込んだミク

グリアが有意に確認された。Aβ 量の減少とともに、マウスの複数の脳機能が改善した。ベキサロテンを経口投与 (100 mg/kg、90 日間) された AD マウスは、不快な電気刺激が来ることを知らせる合図を覚えて事前に回避行動をとるようになり、また避難場所の位置を覚えて水中から早く逃げるようになった。さらに、ベキサロテン投与によりマウスの嗅覚障害も改善することが明らかとなった。嗅覚障害は AD 患者の初期症状の一つである。ベキサロテンは、比較的早い段階から AD 患者の脳機能を改善できる可能性がある。

ベキサロテンは、ApoE の発現亢進とミクログリアの活性化により Aβ を減少させる新たな AD 治療薬として有望である。ベキサロテンは、すでに抗がん剤として米国で承認されており、副作用のプロファイルがよくわかっているという利点もある。したがって、新たな研究開発の時間や費用をあまりかけることなく適応拡大が可能であると考えられる。今後は、ヒトで薬効が認められるか、AD 治療薬として十分な安全域を確保できるかなどの検討が注目される。

図表 ベキサロテンの作用機序



科学技術動向研究センターにて作成

- 参考 1) WHO, Dementia : A Public Health Priority, 11 April 2012
 2) Cramer, P.E. et al., ApoE-Directed Therapeutics Rapidly Clear β-Amyloid and Reverse Defects in AD Mouse Models, Science 335, 1503-1506 (2012)

東京大学と新日鉄エンジニアリング(株)は、熱エネルギーを再生して繰り返し利用する「自己熱再生加熱」の省エネルギー効果を実証した。既設のバイオエタノール蒸留装置を改造して比較することにより、従来の蒸気加熱に比べて、一次エネルギー換算値で約7割減という省エネルギー効果を確認した。この技術は多方面の加熱プロセスに適用可能で、鍵となる圧縮機の製造技術において日本は高い技術を有し、海外への展開も期待できる。

トピックス3 自己熱再生加熱の省エネ効果を実証

エネルギーのうち有効な仕事として取り出せるものをエクセルギーと呼び、その割合をエクセルギー率と定義することがあるが、一般に熱エネルギーはエクセルギー率が低いエネルギー源であり、今後の研究開発の余地が大きい。自己熱再生加熱とは、外部からわずかな圧縮仕事を加えることにより、プロセス排熱を再生して繰り返し利用する加熱方法で、従来より熱エネルギー消費量の大幅削減するための有望な熱エネルギー利用方法である。

東京大学と新日鉄エンジニアリング(株)は、この自己熱再生加熱を適用した実証試験プラントであるエタノール蒸留装置での試験成果を発表した¹⁾。試験結果によれば、従来の蒸気加熱に比べ、同量のエタノールを蒸留するために、一次エネルギー換算値で約7割削減という大幅な省エネルギー効果を確認した。

実証試験は、既設のバイオエタノール蒸留装置(蒸留能力：500 L/日)を一部改造して行われた。改造前の蒸留装置は、蒸留を司る主要設備である蒸留塔内に熱を供給するために、外部から蒸気が供給されており、蒸留後の水やエタノールにある残留熱は使わずに、むしろ冷却水で冷やされていた。これを自己熱再生方式に改造し、残留熱を回収するためのいくつかの蒸気圧縮機と熱交換器が取り付けられた。例えば、蒸留塔のうちの1つは内部の最高温度が約80℃に達するが、ここで必要な熱は、この蒸留塔から出るエタノールと水の混合蒸気(約60℃)をそのまま圧縮して約120℃とすることにより得ている。蒸留塔本体は、全く従来のままであるため、同じ蒸留運転条件のもとでの蒸気加熱と自己熱再生加熱の熱収支が比較可能となる(図表)。

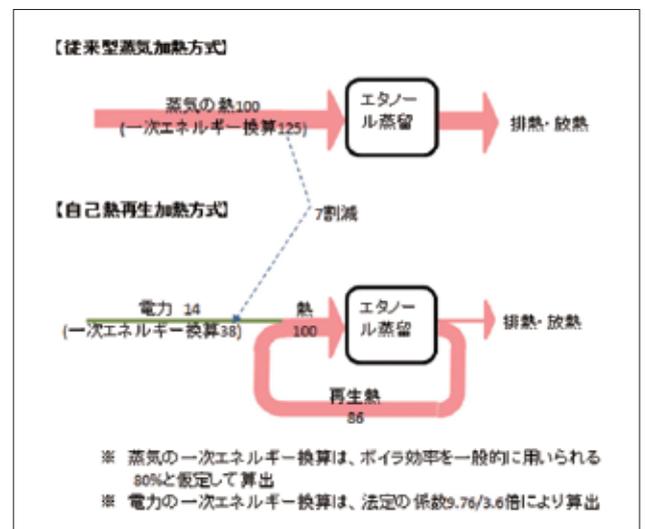
その結果、同じ量のエタノールを蒸留するために蒸留塔で100の熱を必要とする場合、従来の蒸気装置では蒸気の形で投入される熱エネルギーが100となり、蒸気を作るための一次エネルギー(燃料)に換算すると125となる。一方、自己熱再生

加熱による改造装置では、14の圧縮仕事(電気)エネルギーを投入することによりこれまで捨てられていた86の熱を回収することができ、合計で100の熱となって蒸留塔に供給される。ここで14とされる電気エネルギーは、「エネルギーの使用の合理化に関する法律」に定められる係数によって一次エネルギーに換算すると38となる。したがって、蒸気加熱の一次エネルギー125に比べて、約7割削減という比較結果が得られた。

自己熱再生加熱は、ヒートポンプの仕組みと類似しているが、大気や地中熱などを熱源とする一般的なヒートポンプに比べて上昇させる温度幅が小さく、圧縮機動力が大幅に節減できる。また、この実証試験のように、加熱対象物自体(この場合はエタノール水溶液)を熱媒として利用できるため、専用の熱媒を用いるヒートポンプに比べ設備がシンプルになる。

この方法は多方面の加熱プロセスに適用可能で、省エネルギーや温暖化防止に寄与できると考えられる。また、鍵となる圧縮機の製造技術において、日本は高い技術を有し、海外への展開も期待できる。

図表 エタノール蒸留プラントにおける加熱方法による一次エネルギー量の比較



参考資料¹⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

参考 1) 東京大学生産技術研究所、第11回コプロワークショップ資料

電気自動車の動力源である、リチウムイオン電池の大容量化と耐久性向上が課題となっている。2012年3月、米国スタンフォード大学の研究グループは、リチウムイオン電池の負極材料として新開発のシリコンナノチューブを用いることで、従来の炭素負極よりも8倍の容量で従来と同等の耐久性を実現させた。シリコン負極は充電時にSiが膨張するため、充放電の繰り返しによる耐久性が低いという問題があったが、外壁に酸化層を形成させることで膨張を抑制することができた。

トピックス4 Si ナノチューブ負極によって大容量蓄電池寿命が大幅に向上

二酸化炭素の排出量の低減に大きな効果が期待できる電気自動車の動力源として、リチウムイオン電池の開発が活発化している¹⁾。自動車の航続距離を伸ばすには、電池の大容量化が不可欠である。リチウムイオン電池の負極材料に、従来の炭素に代えてシリコン(Si)を用いると、容量密度を10倍以上に向上できることが判明しているが、充電時にSiが膨張するため、充放電の繰り返しによる耐久性が低いという問題があった。

2012年3月、米国スタンフォード大学の研究グループは、リチウムイオン電池の負極材料として新たに開発した外壁に酸化層をもつSiナノチューブを用いることで、現在実用化されている炭素負極に対して8倍の容量密度をもち、かつ、炭素負極と同等の2000回以上の充放電サイクルに対する耐久性を示したと発表した²⁾。

研究グループが新たに開発したSiナノチューブは、紡糸技術を利用して高分子を糸状に成形した後に炭化し、その表面にSiを気相で成長させる。これを酸化雰囲気中で500℃に加熱し、芯となっている内部の炭素を除去することで、Siナノチューブ(直径:数100nm, 壁の厚さ:30nm)を作製する(図表1)。この時に、ナノチューブの外壁にごく薄い酸化シリコン(SiO_x)層が形成される。このSiO_x層が、電池の充電時にSiがリチウムを取り込んだ際、外部への膨張を阻止するために機能している。

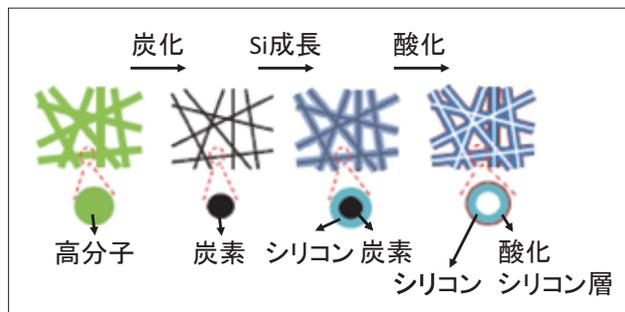
従来のSiナノワイヤーや、外壁にSiO_x層のないSiナノチューブでは、200回程度の充放電サイクル試験で大きな形態変化(膨張)が観測されたが、今回開発のSiナノチューブでは、2000回のサイクル試験後も形態の変化はわずかであった。リチウムイオン電池の充放電時に生成するとされる、高抵抗の固体-電解質界面(SEI)層が成長し

てはいるものの、SiO_x層が大きな膨張が起きることを抑制していると研究グループは考えている(図表2)。

このSiナノチューブを負極に適用したコイン型セルによる試験では、従来の炭素負極によるセルと比較して、最大8倍の容量密度が得られ、6000回の充放電サイクル試験後の容量低下は12%程度であった。これはすでに実用化されている炭素負極によるセルと同等である。

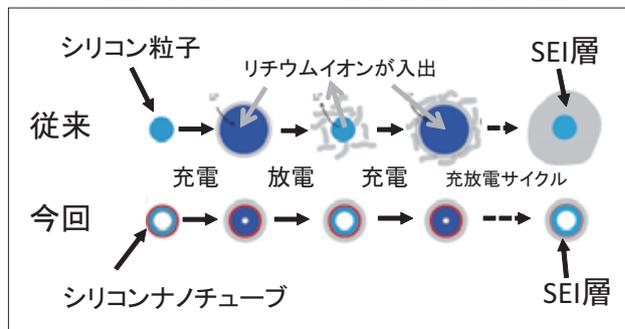
この研究は、米国エネルギー省(DOE)のBatteries for Advanced Transportation Technologies (BATT) Program および Office of Vehicle Technology の助成により行われている。

図表1 外壁に酸化層をもつSiナノチューブの作製方法



参考文献²⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 電池の充放電によるSi負極材料の構造変化



参考文献²⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

参考

- 1) 河本洋、「自動車用高出力・大容量リチウムイオン電池材料の研究開発動向」、科学技術動向、2010年1月号
- 2) H. Wu et al., "Stable cycling of double-walled silicon nanotube battery anodes through solid-electrolyte interphase control", Nature Nanotechnology, DOI: 10.1038 / NNANO.2012.35

IDC社は、2012～2015年にクラウドコンピューティングにより創出される地域別・産業別の新たな雇用を推計した結果を発表した。労働力・失業率・GDP・IT支出額・技術インフラ・規制などを反映した推計によると、クラウドコンピューティングによる全世界の雇用は、2015年に2012年比で倍増する。国別では、米国よりも中国とインドにおける雇用創出効果大きい。産業別に見ると、通信・メディアといった産業で大きな雇用効果が期待される。世界全体では、クラウドコンピューティングにより新たな雇用が創出される一方で、特定の地域・産業・企業では従来の雇用が消失する。

トピックス5 クラウドコンピューティングによる全世界の雇用創出効果の推計

2012年3月、IDC社は、2012～2015年にクラウドコンピューティングにより創出される地域別・産業別の新たな雇用を推計した結果を発表した¹⁾。クラウドコンピューティングにより創出される全世界の雇用は、2012年に673万人が見込まれているが、2015年には1384万人に倍増すると推計されている。

クラウドコンピューティングによる新たな雇用効果の推計方法として、動学的確率的一般均衡(DSGE)モデルを用いた手法が知られている²⁾。クラウドコンピューティングの導入は、企業のIT支出を削減するため、新興企業の市場参入を促進する効果があると考えられている。市場に参入する企業が増えることにより、総生産と消費が拡大し、結果として雇用が増加する。ただし、企業が増えて競争が激化した場合には、利益率が低下し、一部の企業は市場から退場するといった効果も考慮されている。

労働力・失業率・GDP・IT支出額・技術インフラ・規制などを反映したモデルから推計された、クラウドコンピューティングによる新たな雇用創出効果を図表に示す。国別では、米国よりも中国、インドにおける雇用創出効果大きい。米国の場合、すでにクラウドコンピューティングが普及しているため、今後の急激な市場・雇用拡大は期待しにくい。例えば、2015年のインドネシアにおけるクラウドコンピューティングによる雇用規模は米国の水準に近づき、年平均成長率では中国・インド・米国よりも高くなる。

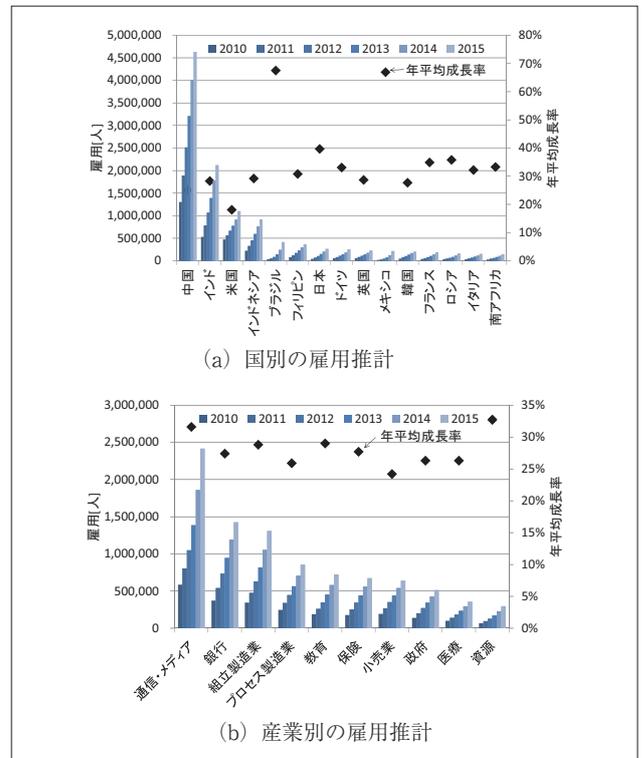
特定の利用者を対象とするプライベートクラウドは、既存ITサービスを代替していく。一方、一般の利用者を対象とするパブリッククラウドは新たなサービスを展開するための基盤を提供する。産業別に見ると、通信・メディアといった産業で、パブリッククラウドを利用したコンテンツ配信など新たなサービスが生まれるため、大きな雇用効

果が見込まれる。組立・プロセス製造業と教育などの産業も、IT支出の削減に効果的なパブリッククラウド導入による雇用創出効果が期待される。

一方、セキュリティや個人情報に関する規制はパブリッククラウド導入の障害である。このため、銀行・保険・医療はプライベートクラウドの利用に留まり、雇用は大きく伸びない。しかし、電子カルテなどの新たな医療サービスが普及すれば、より大きな雇用創出につながる可能性もある。

世界全体では、クラウドコンピューティングにより新たな雇用が創出される一方で、特定の地域・産業・企業では、従来の雇用が消失する。

図表 クラウドコンピューティングによる全世界の雇用創出効果



出典：IDC White Paper, Sponsored by Microsoft, Cloud Computing's Role in Job Creation, March 2012

- 参考 1) Gantz, J. F., Minton, S. and Toncheva, A. Cloud Computing's Role in Job Creation, IDC White Paper, March 2012
 2) Etro, F., (2009) The Economic Impact of Cloud Computing on Business Creation, Employment and Output in Europe, *Review of Business and Economics*, 54 (2) 179-209.

小水力発電の現状・意義と普及のための制度面での課題

伊藤 康
客員研究官

1 はじめに

1990年代以降、直接的にはCO₂を排出しない再生可能エネルギーによる発電は、地球温暖化対策という観点から拡大の必要性が指摘されてきた。しかし、発電コストの高さや発電状況が自然環境に左右されるので安定的な発電が困難であるという多くの再生可能エネルギー固有の性質、そして特に日本では政策による後押しが弱いという事情もあって、普及が遅れていた。しかし、東日本大震災によって引き起こされた東京電力福島第一原子力発電所の事故により、再生可能エネルギーの急速な普及・拡大が日本においても極めて重要な政策課題のひとつとなったことは周知の通りである。

再生可能エネルギーの普及・拡大が必要とされる理由の1つは、その環境負荷の小ささである。しかしそれだけではなく、「分散型」エネルギーシステムに親和的であるということも注目を集める大きな理由となっている。これまでの日本の電力供給システムは、遠隔地に大規模な発電所を設置し、そこから消費地に送電を行う「大規模集中型」が主流であったが、この方式は大規模発電所に事故があ

ると広範囲に重大な影響を及ぼすことが東日本大震災によって再認識された。相対的に小規模の発電設備で消費地に近いところで発電を行う分散型電源にある程度依拠したシステムがあれば、そのような供給リスクを低減させることが可能になる。国家戦略室のエネルギー・環境会議が2012年3月に発表した「エネルギー規制・改革アクションプラン～グリーン成長に向けた重点28項目の実行(案)」においても、電力システム改革の一環として「分散型電源の活用・拡大」があげられている¹⁾。勿論、分散型電源も供給リスクは存在するので、「集中型」と「分散型」とのバランスが求められる。

ところで再生可能エネルギーによる発電というと、従来は太陽光発電、風力発電、バイオマス発電がイメージされることが多かった。その一方、小水力発電は相対的にあまり注目されることはなかったと言ってよいだろう。これは、水力発電は完成された技術であるため技術的には成熟しており、太陽光発電等と比較してフロンティアというイメージが弱いこと、また、大規模ダムによる水力

発電が自然破壊を引き起こしているという批判が行なわれるようになり、さらにそれが「公共事業批判」と結びついたことも影響しているかもしれない。しかし、今日の日本で「再生可能エネルギー発電」と定義される発電の中で最も発電量が大きいのは小水力であり、今後の開発・普及ポテンシャルもまだ十分に存在している。また、太陽光発電や風力発電では大規模化も構想されている一方、小水力発電はその定義上、出力規模はあまり大きくならないので、将来的にも分散型発電システムに親和的である。環境負荷が小さく、かつ分散型システムとの親和性という2つの基準に関しては、再生可能エネルギー発電の中でも小水力発電は非常に適合的といえる。

本稿では、主に日本における小水力発電をとりまく状況、およびそれが普及する意義について概観したうえで、小水力発電をより一層普及・発展させるための課題について、主に制度面から検討を行なう。なお水力発電の技術的な面に関しては、すでに科学技術動向2010年3月号で触れられているので、そちらを参照されたい²⁾。

2 小水力発電に関する現状と開発ポテンシャル

2-1

小水力発電の定義

「小水力」というからには、出力規模が小さい水力発電であることは当然であるが、規模に関して厳密な定義が存在しているわけではない。例えば、ヨーロッパ小水力発電協会（European Small Hydropower Association：ESHA）は、小水力発電とは出力規模が1万kW以下の水力発電であるとしている³⁾。日本では新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が1000kW以上1万kW以下のものを小水力、さらに100-1000kWのものをミニ水力、100kW未満のものをマイクロ水力と分類している⁴⁾。しかし、これらは必ずしも一般的ではない。後で詳述するように、「新エネルギー」促進を目的として2003年から施行された「電気事業者に対する新エネルギー特別措置法」で、出力規模1000kW未満の水力発電が促進の対象となっている一方、2011年8月に制定された「再生可能エネルギー特別措置法」においては促進の対象は3万kW未満のものを指している。資源エネルギー庁は、出力規模3万kW未満のものを「中小水力」と称している。本稿においては、国際的に小水力の基準とされることが多い出力規模1万kW以下を全て小水力と称して論考の対象とする。

水力発電は一般に水の落差を利用するものであるが、その水の利用方法に注目すると、流れ込み式・調整池式・貯水式・揚水式の4種類、発電に利用する落差を確保する方式に注目すると、水路

式・ダム式・ダム水路式の3種類に分類される⁵⁾。小水力発電は、比較的少ない流量と小さな落差を利用するケースが多いので、ダムをもたず河川水を貯留することなくそのまま利用する流れ込み式、あるいは川の上流で堰から水を取り入れ導水路で落差が得られるところまで水を引き発電する水路式が一般的な発電方法となっている⁶⁾。ただし、非常に小規模なものであればダムも利用されることがある。

2-2

小水力発電の実施箇所

小水力発電は、これまでは主に河川もしくは農業用水などの水路で行なわれ、立地地域コミュニティ（農山村地域など）の電力需要を賄い、余裕があれば売電を行うというケースが多い。原理的には落差があれば発電可能なので、上下水道の施設内やビル等の建造物内部で行なわれるケースがある。設置に際し煩雑な手続きがほとんど必要のない上下水道関連施設や一般の建物内部での小水力発電も徐々に増え始めている。

2-3

これまでの小水力発電の現状と今後の開発ポテンシャル

千葉大学公共センターとNPO法人環境エネルギー政策研究所が行なっている「エネルギー永続地帯」の推計によれば、2008年の再生可能エネルギーによる発電量に占める出力規模1万kW以下の

水力の比率は61.05%、1000kW未満に限っても5.04%と、バイオマスによる発電比率4.17%よりも大きかった⁷⁾。ただし、これは最近になって小水力発電の開発が積極的に行われてきた結果ではなく、伸び率をみると、小水力は太陽光や風力と比べるとむしろ小さい。過去に開発された小規模の水力発電が今日においても稼働していることを示している。

小水力発電の今後の開発ポテンシャルについては、いくつかの推計が行われている。図表1は、資源エネルギー庁が実施している「包蔵水力調査」（2004年3月）によって推計された水力発電の開発余地を示したものである。これによると、出力規模1万kW以下のものは総計で600万kW以上の開発余地がある⁸⁾。その一方、1000kW以下のものについての開発余地はわずかとされている。他の出力区分については、出力規模が小さくなるにつれて未開発の地点数が増加しているにもかかわらず、1000kW未満だけ未開発地点数が非常に小さく見積もられている。一般に、出力規模が小さくなるほど設置は容易になり、対象地点は増加するはずである。上記「包蔵水力調査」による推計においては、経済性が低いと考えられている溪流や小河川は最初から検討対象とされていないことから⁹⁾、小規模地点に関するポテンシャルとしては、図表1は過少推計になっている可能性が高いと考えられる。

環境省も2011年3月に公表した「再生可能エネルギー導入ポテンシャル調査」の中で、小水力発電のポテンシャルを推計している。図表2はそれをまとめたものであるが、出力規模1万kW以

図表1 資源エネルギー庁による出力別包蔵水力の試算

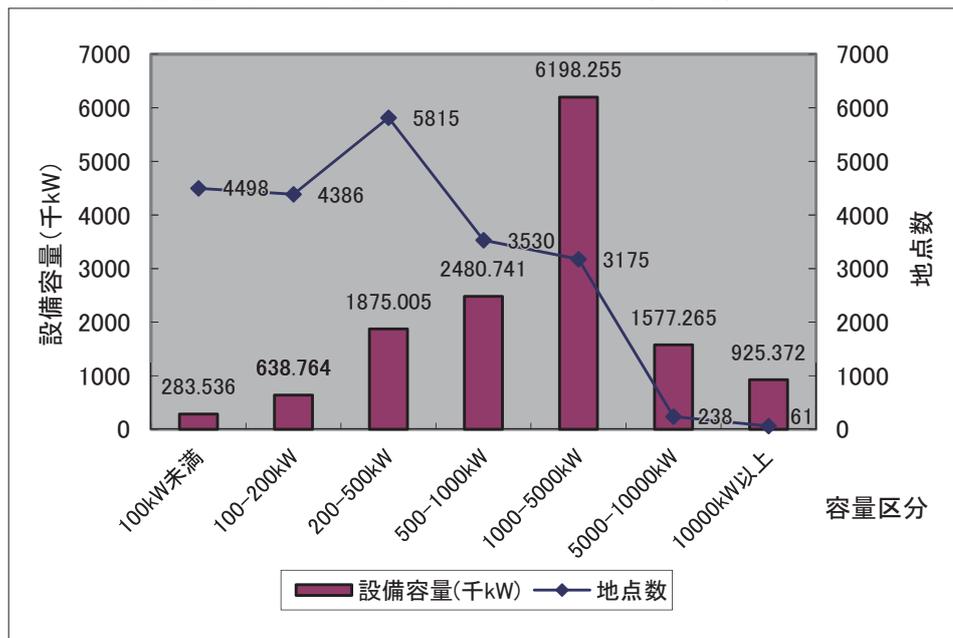
出力区分 (kW)	既 開 発			工 事 中			未 開 発		
	地点	出力 (kW)	電力量 (MWh)	地点	出力 (kW)	電力量 (MWh)	地点	出力 (kW)	電力量 (MWh)
1,000未満	474	203,462	1,268,665	8	1,297	29,578	371	242,190	1,218,611
1,000～ 3,000	417	744,930	4,181,420	9	17,570	95,715	1,232	2,262,500	9,193,048
3,000～ 5,000	166	625,415	3,312,857	2	6,700	30,846	523	1,961,900	7,887,463
5,000～ 10,000	287	1,941,550	10,028,377	4	29,500	147,897	340	2,287,800	9,174,150
10,000～ 30,000	363	6,036,800	27,939,264	6	90,500	367,799	209	3,313,000	12,331,126
30,000～ 50,000	91	3,466,800	15,238,149				21	801,900	2,610,500
50,000～ 100,000	64	4,189,990	16,398,316	1	61,800	521,726	14	879,100	2,353,400
100,000以 上	26	4,643,300	13,628,309	2	543,000	850,077	3	378,000	1,109,000
計	1,888	21,852,247	91,995,357	32	750,367	2,043,638	2,713	12,128,390	45,877,298
平均		11,574	48,726		23,449	63,864		4,470	16,910

出典：資源エネルギー庁ホームページ (<http://www.enecho.meti.go.jp/hydraulic/index.html>)
を基に科学技術動向研究センターにて作成

下の導入ポテンシャル（河川部）は、約1300万kWとされている¹⁰⁾。ここでの導入ポテンシャルとは、種々の制約条件を考慮せずに理論的に推計した賦存量から、自然的・社会的制約条件から利用不可能な地点を差し引いたものである。一方、既開発分は差し引かれていない。図表1の「包蔵水力調査」によれば、出力規模1万kW未満のものは既に約350万kW開発されているので、単純計算では約950万kW（＝1300万－350万）の開発余地が存在することになる。両調査は推計方法が異なるので、単純に差引することは厳密には適切ではないが、大まかな傾向を把握することはできる。

環境省の推計では、特に1000kW未満のポテンシャルが約530万Kw、地点数で1万8229箇所となっており、図表1の包蔵水力調査と比べて大きい。それでも過少推計ではないかという指摘もある¹¹⁾。環境省の推計では、農業用水路における小水力発電の適地

図表2 環境省調査による小水力発電の導入ポテンシャル（河川部）



出典：参考文献¹⁰⁾を基に科学技術動向研究センターにて作成

は593箇所、出力規模で約25万8000kWである。小林[2011]は、小水力発電設備を既に導入している扇状地上の農業用水を対象に、延長約18kmの幹線水路と延長12kmの支線水路について開発余地の試算を行った。一定以上の落差がある部分を小水力発電適地と考えると、合計約30kmの農業用水路区間に適地は100箇所あった。日本の農業用水は幹線水路だ

けで4万kmと言われている。たとえ平坦な土地を流れ適地を見つけない農業用水路が少なかったとしても、4万kmの中で593箇所だけとは少なすぎると小林[2011]は指摘している。特に1000kW未満のポテンシャルについて、より詳細な調査が必要であろう。

3 小水力発電促進の意義と問題点

3-1

小水力発電のメリット¹²⁾

他の再生可能エネルギー発電と比較したときの小水力発電のメリットとしては、

- (1) 設備利用率が60-70%程度であり他の再生可能エネルギーによる発電方法と比較して非常に高い
- (2) 出力変動が比較的小さいので、系統を不安定にさせにくい
- (3) 事前調査や工事が相対的に簡単
- (4) 水力発電の基本的技術は既に成熟しているので、技術自体の不確実性は低い

といったことがあげられる。

一方、小水力発電を進める際の問題点としては、

- (1) 水の使用について利害関係がつかまとい、新たに発電を行う場合の法的手続きが煩雑となる
- (2) 一般に発電コストを下げるためには、同種の機器を多く生産することが求められるが、立地毎に条件（落差・流量）が大きく異なることから、それに合わせた仕様にせざるを得ないため、他の発電機器と比較すると機器の量産効果は期待できない、といったことがあげられる。

3-2

小水力発電を促進する意義とは何か？

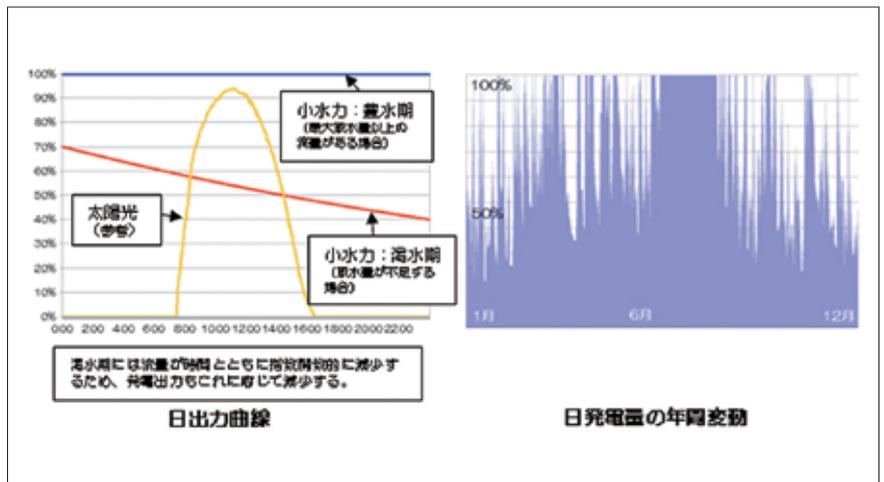
太陽光や風力といった他の再生可能エネルギー発電と比較したと

図表3 主な再生可能エネルギー発電の特徴

発電の種類	小水力発電	太陽光発電	風力発電
設備利用率	70%程度	12%程度	20%程度
発電原価	8~25円/kWh	37~46円/kWh (住宅用)	10~14円/kWh (陸域4.5MW以上)
特徴など	発電量の時間変動は小さい	昼間のみ発電 日射量により発電量は変動	風況により発電量は変動

出典：環境省ホームページ(<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/shg/page02.html>)を基に科学技術動向研究センターにて作成

図表4 小水力発電の最大出力に対する出力比率の変化（イメージ）



出典：環境省ホームページ(<http://www.env.go.jp/earth/ondanka/shg/page02.html>)より引用

きに、導入ポテンシャルが小さいという点は、小水力発電の開発を促進する意義自体を問うものといえるかもしれない。

まず、小水力発電を日本の主たる電源とすることは、そのポテンシャルからみて不可能である。しかし東日本大震災による福島第一原発事故以後、原子力発電に対する依存度は下げざるを得ず、同時に地球温暖化防止のため二酸化炭素排出削減も求められている。このような状況下では、少しでも再生可能エネルギーによる電力を増加させることは、莫大なコストがかからない限り意義があると言える。その中で例えば、出力規模1万kW以下の小水力発電の導入ポテンシャル約1050万kWという環境省による推計が正しいとし

た場合、これが全て開発されれば、2009年における一般電気事業者の全発電設備容量2億3,715万kWの約4%に相当する¹³⁾。最大限の節電が求められている今日、この数字は小さくはない。そもそも、小水力発電の導入ポテンシャルが相対的に小さいと言われるのは、流量や落差等の賦存量が、太陽光や風力と比較すれば、ある程度正確に見積もることが可能であることの裏返しという面もある。すなわち、小水力は技術的・経済的な面で相対的に低いリスクで開発できる再生可能エネルギー発電であり、優先して開発すべき再生可能エネルギー電源であると言える。

しかも、小水力発電開発を促進する意義は、全体的な再生可能エ

エネルギーによる電力供給の増加にだけあるわけではない。上述の「エネルギー永続地帯」による再生可能エネルギー電力の推計では、各市町村の民生および農水部門における電力需要を当該地域の再生可能エネルギー電力供給でどの程度賅われているかを示す「自然エネルギー電力自給率」を推計しているが、2008年時点で30以上の市町村では小水力発電だけで「電力自給率」が100%を超えており、50%を超えている市町村は67にのぼる。

これらの市町村のほとんどは、小水力発電の適地である中山間地域に位置した小さなコミュニティである。今日の段階でも、小水力発電はこうした市町村（近隣地域を含む）の電力需要のかなりの部分を賅うことができる。未開発の小水力発電が開発されれば、このような潜在的に「エネルギー（電力）自給率」が高いコミュニティは大幅に増える。

東日本大震災による電力需給のひっ迫は、ある程度分散型電源に依拠したシステムを取り入れる重

要性を再認識させた。しかし、電力供給システムを分散型に移行させるには、十分な準備と時間が必要である。設備利用効率が高く、再生可能エネルギー発電の中では相対的に負荷変動が小さい小水力発電の普及は、特に小水力に適した中山間地域およびその周辺地域において、消費地に近い場所で発電を行う分散型電源に依拠したシステムを実証していく第一歩にもなり得る。

図表5 「小水力自給率」が50%以上の市町村（2008年）

都道府県	市町村	自給率(%)	都道府県	市町村	自給率(%)	都道府県	市町村	自給率(%)
北海道	壮瞥町	181.68	新潟	糸魚川市	72.95	京都	南山城村	97.01
	二セコ町	177.27		津浪町	65.26		笠置町	62.88
	蘭越町	141.31		妙高市	58.03	奈良	上北山村	249.93
	愛別町	119.46		阿賀町	57.28		吉野町	60.17
青森	深浦町	99.61	富山	朝日町	95.76	鳥取	若桜町	98.1
岩手	川井村	96.89		立山町	77.54		伯町	82.03
	岩泉町	74.28		魚津市	53.5		江府町	51.88
宮城	七ヶ宿町	131.22		上市町	52.13		八頭町	50.08
秋田	鹿角市	55.77	山梨	早川町	347.18	島根	津和野町	53.45
	東成瀬村	50.25	長野	大鹿村	788.81	岡山	鏡野町	103.02
山形	西川町	174.13		平谷村	542.93	徳島	三好市	68.54
	大蔵村	68.65		栄村	604.87	愛媛	久方高原	126.06
	朝日町	66.25		小海町	191.91	高知	仁淀川町	157.18
福島	下郷町	169.29		泰阜村	138.16		大豊町	137.83
	古殿町	152.19		阿南町	137.28	熊本	五木村	1594.61
	川内村	75.43		南木曾町	130.79		水上村	844.32
群馬	六合村	608.88		阿智村	129.18		相良村	142.21
	片品村	298.21		小谷村	109.71		小国町	114.34
	嬬恋村	87.03		上松町	97.64	山都町	107.42	
	長野原町	58.64	芝川町	106.72	宮崎	西米良村	528.08	
神奈川	山北町	199.55	小山町	83.2		日之影町	99.78	
			大台町	77.36		五ヶ瀬町	74.67	
			三重			鹿児島	南大隅町	64.18

出典：千葉大学・環境エネルギー政策研究所『エネルギー永続地帯（2008）』を基に科学技術動向研究センターにて作成

4 地域開発モデルとしての小水力発電の開発

小水力発電は、発電能力が地点ごとの流量・落差といった個別の自然条件および後述するような水利権等の社会的制約を受ける。小水力発電を行なうためには、地域の水資源に目を向け、地域で利

害調整や十分な議論をすることが求められるが、これは地域活性化のためには不可欠なプロセスでもある。実際、小水力発電の導入・実施を契機にして、持続可能な地域づくりを行なおうという試みが

各地で実践されている。言わば、農山村地域における「地域開発モデル」としての小水力開発である¹⁴⁾。以下、いくつかの事例を見てみよう。

長野県大町市（人口約3万人）では、地元のNPO法人が、市内

に張り巡らされた農業用水路を利用して小水力発電を行なうことで、地元で利用する一部のエネルギーを引き出しながら、地場産品作りや観光施設の低環境負荷化、あるいは環境学習の場としても活用し、地域興しにつなげようと試みた¹⁵⁾。小水力発電施設を具体化する上で、後述する水利権という制度的な障壁と、実際に農業用水路で発電が可能かという技術的な課題があった。実験地を3ヶ所確保し、それぞれの土地改良区からの同意書を添付して、河川法に基づき水利申請を行なった。そして、小水力発電の性能試験を立ち上げながら、同時に自然エネルギーや郷土の歴史に関するシンポ

ジウム・ミニ発電に関する学習会等を行なったのである。その後、稼働後も水力発電所（最大出力800 W、300 W、700 Wの3か所）を中心としたエコツアーを実施したり、環境学習の場として発電所を利用している。

岐阜県群上市の石徹白（いとしろ）地区（人口約300人）においても、地元のNPOが小水力発電事業に取り組んでいる¹⁶⁾。人口減少に歯止めがかからない中で、地域振興を目指していたが、昭和30年代までは同地区に小水力発電所が存在していたことから「温故知新」という形で小水力発電への取り組みが始まり、2007年から事業をスタートさせた。小水力

発電開発の動きと並行して地域づくりの活動も活発化し、地域外からの定住促進の取り組みも始まった。中には、小水力発電の見学に来たことがきっかけとなって移住を決めた人もいるとのことである。最近では2011年6月、農業用水路に最大出力2.2 kWの小水力発電施設が稼働し、発電した電力は隣接する農産物加工所に送られる計画である。

勿論、将来的には地域振興のシンボリック存在の小水力発電から、ある程度の地域の電力需要をまかなうレベルの事業として成り立つ必要がある。

5 小水力発電をより促進するための政策手段

再生可能エネルギー発電は、一部例外はあるものの、現段階では一般に発電コストが高いため、他国においても日本においても何らかの政策による後押しがないと普及は困難である。以下、日本において小水力発電を対象とした普及促進のための政策手段を概観する。

5-1

電気事業者に対する 新エネルギー特別措置法 (Renewable Portfolio Standard : RPS 法)

2003年4月に施行されたRPS法は、電気事業者に対して新エネルギー等から発電される電気を一定割合以上利用することを義務付けたものである。水力発電に関しては、当初1000 kW未満の水路式のものに限定されていたが、2007年4月の同法施行令改正の際に、出力規模1000 kW未

満の水力発電所と改められ、規模が小さければダム式も対象となった。各電気事業者の毎年度の利用義務量は、経済産業大臣が4年ごとに8年先まで定める「電気事業者による新エネルギー等電気の利用目標」をベースに決定され、2010年度の利用義務量の合計は122億kWh（全国の販売電力量の1.35%）とされた。

RPS法の最大の特徴は、電気と「新エネルギー等電気相当量」を分離して販売することを可能にしたことにある。そして、電気事業者の義務の履行は、新エネルギー等電気相当量をもって行うので、例えば小水力発電の適地がほとんどない電力事業者は、義務を満たすために莫大なコストをかけて小水力発電を行う必要はなく、小水力発電の適地に設置された発電事業者から新エネ相当量を分離して購入することで相対的に安く義務を満たすことが可能である。

5-2

再生可能エネルギー 特別措置法 (固定価格買取法)

RPS法は、確実に義務量を達成することが期待できる政策手段ではあるが、電力事業者には義務量以上に再生可能エネルギー電力を供給するインセンティブは働かないので、義務量が小さければ、むしろ再生可能エネルギー普及の「天井」になってしまう恐れがある。また、一口に再生可能エネルギーと言っても、各技術の発展段階等には大きな違いがあり、当然発電コストも異なる。もし、再生可能エネルギー発電全体で決められた義務量を満たせばよいということになると、その時点で相対的に安い発電方法に集中してしまい、幅広い発電方式の普及を促すという効果は期待できなくなる。実際、国レベルのパネルデータを

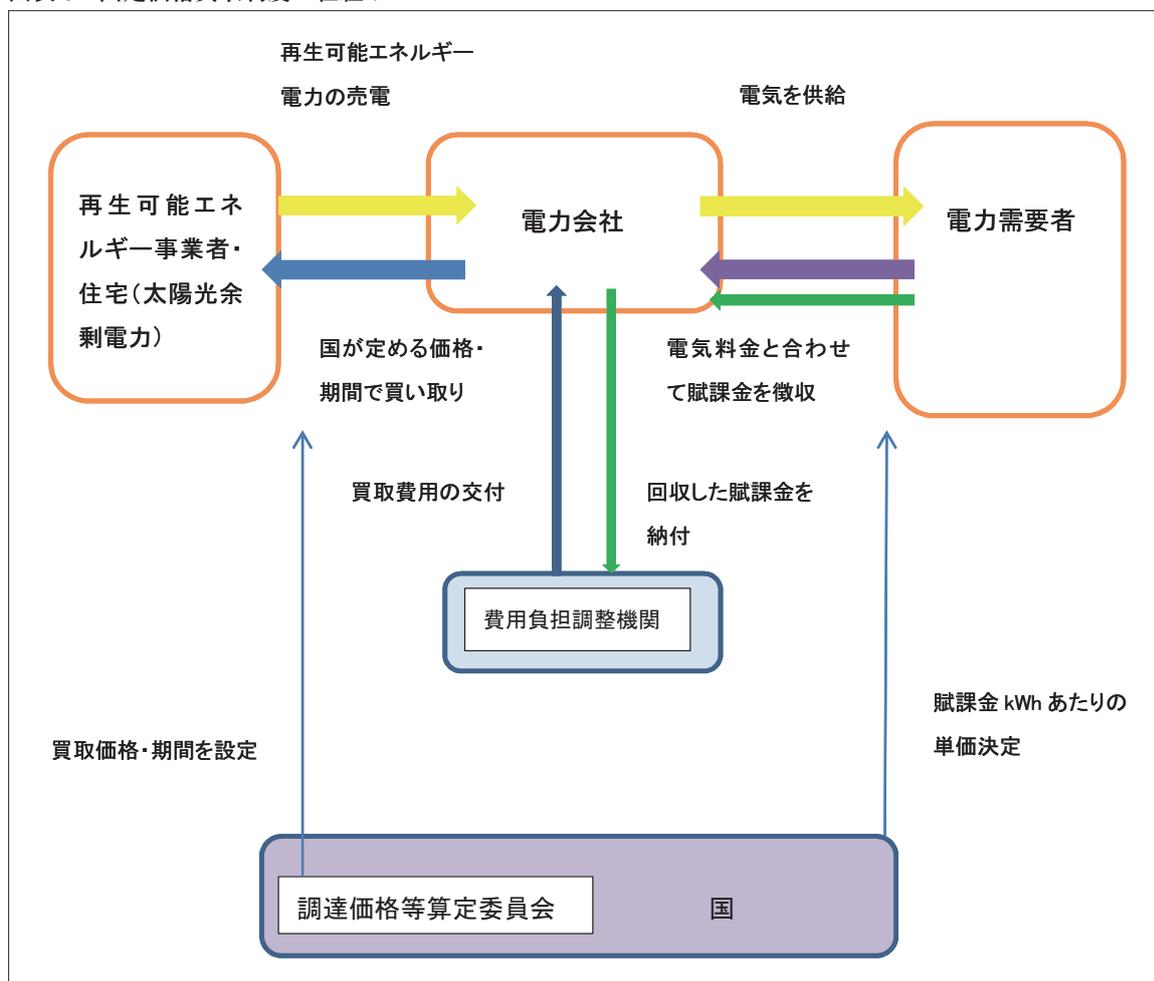
用いて、再生可能エネルギー関連技術に関する特許出願数に対する政策手段等の影響を定量的に分析した研究によると、RPSは現時点におけるコスト面で（再生可能エネルギーの中では）相対的に有利な風力発電関連技術の特許出願数を有意に増加させるが、太陽光発電等のコスト面で劣っている分野に関しては特許出願を有意に増加させるという結果は得られていない¹⁷⁾。

再生可能エネルギーが普及している欧州諸国では、再生可能エネルギーによる電力を長期間にわたって費用回収が可能になる程度の高値で電気事業者が買い取るとを義務付ける「固定価格買取制度」の導入を契機に普及が促進されたこともあり、同様の制度の導入を求める声が日本でも高まった。固定価格買取制は、再生可能

エネルギーによる電力をコスト回収が可能になる価格で長期間買取を保証することによって、再生可能エネルギー事業者に予測可能性を高めることで、再生可能エネルギー発電の促進を図る制度である。日本における固定価格買取制度は、まず2009年11月に太陽光発電の余剰電力に限定された形で導入された。当初の買取価格は住宅用48円/kWh、非住宅用は24円/kWhで、買取期間は10年間である。その後、対象を全ての再生可能エネルギーに拡大した「再生可能エネルギー特別措置法」が2011年8月26日に成立し、2012年7月1日より施行されることとなった。具体的には、太陽光、風力、水力（出力規模3万kW未満の中小水力）、地熱、バイオマスによって発電された電力に関して、電気事業者は全量買い取り義務を負い

（住宅用太陽光については余剰電力のみ）、その費用は原則として使用電力に比例した賦課金として回収する、すなわち電力料金に上乗せするという形で電力消費者が負担することになる。買取価格が高いほど、電力消費者が負担する額は大きくなる。ただし、電力購入にかかった費用が売上高に占める比率が一定水準以上の事業者に対しては、賦課金の減免が行なわれる。また、再生可能エネルギーの普及速度は地域間でばらつきがある可能性があるため、その負担の大きさを調整するための機関を設置することとされている。電力会社が徴収した賦課金は、費用負担調整機関がいったん回収し、その上で実際の買取費用に応じて費用負担調整機関から交付金という形で各電力会社に渡す仕組みとなっている（図表6）。なお、固

図表6 固定価格買取制度の仕組み



出典：資源エネルギー庁資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

定価格買取制度の施行とともに、RPS法は廃止される。

買取価格やその期間をどの程度にするかによって、再生可能エネルギーによる電力の普及度は決定的に左右されるが、それらについては再生可能エネルギーの種類、設置形態、規模等に応じて、中立的な第三者委員会である「調達価格等算定委員会」（5名の委員は国会の同意人事）の意見を尊重しながら、経済産業大臣が決定することとされた。同委員会は、2012年3月6日に第1回会議が開催されて以降、様々な再生可能エネルギー関連事業者からのヒアリングなどを行いつつ議論を重ね、4月27日に買取価格や買取期間に関する委員会提案を発表した（図表7）。小水力発電に関しては、200kW未満、200kW以上1000kW未満、1000kW以上30000Kw未満と設備規模毎に3つに区分され、買取価格は消費税込みでそれぞれ35.70円、30.45円、25.20円、買取期間は3区分とも共通で20年間である。

法の施行から3年間は、集中的な再生可能エネルギー電力の利用拡大を図るため、買取価格の決定に際し、再生可能エネルギーによる発電事業者の利潤に特に配慮することとされており、今回の委員会提案はその点に留意したもので

図表7 調達価格等検討委員会による提案（2012年4月27日現在）

電源	調達区分	調達価格(円)		買取期間(年)	
		税込み	税抜き		
太陽光	10kW以上	42.00	40	20	
	10kW未満(余剰買取)	42.00	42	10	
風力	20kW以上	23.10	22	20	
	20kW未満	57.75	55	20	
地熱	1.5万kW以上	27.30	26	15	
	1.5万kW未満	42.00	40	15	
中小水力	1000kW以上-30000kW未満	25.20	24	20	
	200kW以上-1000kW未満	30.45	29	20	
	200kW未満	35.70	34	20	
バイオマス	ガス化	40.95	39	20	
	固形燃料 燃焼	未利用木材	33.60	32	20
		一般木材	25.20	24	20
		一般廃棄物・下水汚泥	17.85	17	20
		リサイクル木材	13.65	13	20

出典：調達価格等検討委員会資料を基に科学技術動向研究センターにて作成

ある。買取価格・買取期間は、それぞれの発電コストの状況等を勘案して年度ごとに見直される。

5-3

設備投資に対する補助金

再生可能エネルギー設備設置に対する補助金は、比較的早い時期から行われてきた助成政策である。水力発電所の開発には、建設費用等に対して、経済産業省、農林水産省等が補助制度を設けている。

現在、経済産業省は中小水力発電所建設（新技術導入以外）に対して、出力規模が1000kW以上5000kW以下の発電所には20%、

5000kW以上3万kW以下の発電所であれば10%の助成、1000kW以上3万kW以下で新技術導入を伴う場合は50%の助成を行っている。平成23年度には、14の中小水力開発事業に補助金が交付された。補助金額は、地熱発電事業と合わせて約20億円である。

農林水産省の助成制度は、かんがい排水事業等の土地改良事業や、農村振興総合整備事業等の一環として実施されている。かつては、発電施設のための単独整備は対象ではなかったが、2009年度より一部の事業で発電設備単独で新設・更新が可能になった。農林水産省の助成制度は補助率が50%のものが多く、経済産業省のものとは比べて高めである。

6 「水利権」問題

小水力発電を行なう際に特に大きな障害となり得るのが、「水利権」の問題である。河川の水を利用して水力発電を行う際には、規模に関わらず原則として河川法による「水利使用の許可」を受けなければならない。農業用水や工業用水等、既に許可を得ている水を利用して水力発電を行う場合であっても、利用目的が異なるた

め、新たな許可が必要となる。また、小規模の水力発電であっても、原則として大規模なダムによる水力発電と同様の手続きを経なければならない。上述の町市の事例では、発電を行う団体（この場合は地元のNPO）が農業用水利用の許可を得ている団体（土地改良区）ではなく、水利申請には土地改良区の同意も必要であった。水

利申請は、事前協議を含め正式な許可を得るまでに1年半の時間がかかっている。加えて、当初計画していた1ヶ所の小水力発電施設は、当初協議していたものを越える規模の施設を整備したことによって地元の土地改良区の反発を招き、最終的には水車の撤去を余儀なくされたと報告されている¹⁸⁾。このように、出力規模1kW未

満の規模の発電を行う場合でも、様々な水利権に関わる調整が必要とされる。

しかし、RPS法により小水力発電も普及促進の対象となったことで、小水力発電に関する許可水利権は必要となる手続きが緩和された¹⁹⁾。2005年には、他の水利使用に従属する水利使用に係る添付書類の省略が認められた。これは例えば、農業用水として既に水利権を取得している場合、田に水を引いてくる途中で小水力発電（従属発電）を行うのであれば許可の手続きを簡便にするというものである。翌2006年には、許可を受けた他の目的を完全に果たしたあとの水を小水力発電に使用する場合には、許可も必要ないことが周知された。例えば、排水路としてのみ使われている水路において小水力発電を行う場合には、新たな許可は不要ということである。

このように、農業用水等で既に水利権が設定されている状況では、膨大な手続きのうちの一部は簡略化されてきたが、未だ問題はある。通常、農業用の水利用に関しては、水田耕作を行なう期間は河川から農業用水に水を引き込むことができるが、農業を行なわない冬場は限定的にしか水を引くことができない。従って、農業用水

に従属する発電は、冬は発電できないことになる²⁰⁾。発電を行なうという理由で冬も水量を確保しようとする、発電用水利権ということになり、別途新たな許可を得ることが必要になってしまう。

河川から直接取水して発電を行うとする場合には、発電用の水利権を改めて取得しなければならない。また、取水により影響を受ける人や団体の同意も必要になるため、手続きは非常に煩雑である。

発電のための水利使用の許可を得た後も、その運用は厳格なものである。水利使用許可により、発電事業に対しては秒当たり取水量の最大値が定められ、発電事業者の取水はつねにこの値を超えてはならないとされている。ただし、東日本大震災後の電力需給逼迫期には、2011年4月30日までの暫定的な措置であるが、一時的に秒当たりの取水量が最大値を超えても、24時間の平均取水量が許可取水量を超えなければ良いとされた。この措置により、夜間に河川からの取水量を減らせば、昼間のピーク時にあわせて取水量＝発電量を増加させることが可能になった²¹⁾。秒単位で取水量をつねに遵守しなければならない場合、つねに変化する自然の水量を相手に秒単位で管理することは極めて困難

であるから、一時的な攪乱により許可取水量を超えないようにするために、通常は許可量の95%くらいに抑えて取水することが一般的である。しかし、1日平均で守ればよいのであれば、若干多く取水することがあったとしても、1日の時間の中で調整すれば良いので、ほぼ100%近い取水が可能になり、発電量を5%程度増加させられる²²⁾。暫定的措置の期限以降もこの措置を継続する声が強かったが継続は認められず、1時間当たりの取水量が許可水量を越えなければよいという多少の緩和にとどまった²³⁾。

小水力発電の普及の障害となっていた水利権取得に係る煩雑な手続きやその他の規制は、徐々にではあるが緩和され、改善の方向にある。例えば、従属発電に関する手続きの簡素化および標準処理期間の短縮が、2011年に成立した「総合特別区域法」および「東日本大震災復興特別区法」において決定された²⁴⁾。また、2012年3月には、一定の小水力発電に係る河川環境調査等の不要であることが通知された。発電水利権の手続きに関する相談窓口が設置されている。しかし、手続きの簡素化に関しては、多数の事項が依然として検討途上の段階である²⁵⁾。

7 まとめ—小水力発電の意義と課題

小水力発電は、太陽光発電や風力発電と比較すると、設備容量規模という意味での開発ポテンシャルは大きいとは言えない。しかし、設備利用効率の高さや負荷変動の小ささ、技術的不確実性の小ささといった、他の再生可能エネルギー発電と比較しても優れた性質を持ち、消費地の近くで発電を行う「分散型」の電力供給システムとも親和的であるというメリッ

トを有する。また、地域の水資源に依存していることから、その開発のプロセスで地域の資源・環境を問い直すことが不可欠であるがゆえに、それを通じて地域活性化に寄与することも期待でき、実際に各地域で様々な取り組みが行われている。再生可能エネルギーの中で太陽光発電や風力発電と比較すると注目度は低いが、小水力発電を促進する意義は小さくない。

小水力発電促進の前提となる量的な導入ポテンシャルの推計に関しては、特に1000kW未満の小規模地点に関しては十分に把握されていない可能性があり、今後詳細な調査を行う必要がある。小水力発電は、依然としてコスト削減の技術開発の余地はあるものの、画期的な技術革新がなくても、制度面での様々な制約が緩和されれば大幅な普及が期待できる発電技術

である。普及の阻害要因となってきた水利権等に関する手続きの煩雑さは徐々にではあるが緩和されてきたが、小水力発電を十分に促進するには至っていない。水利権に係る手続きが厳格であるのには歴史的経緯があり、また緩和した場合の影響は十分に検証される必

要があることは言うまでもない。しかし、今日の日本の電力をめぐる状況を考慮すれば、小水力発電普及の具体的な便益と費用などの問題点を早急に検討し、これまで行われてきた水利利用手続き等の緩和の影響など、様々な規制に関して改めて見直すことが求められ

ている。

謝辞

全国小水力利用推進協議会の松尾壽裕氏からは有益なご教示を賜りました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) エネルギー・環境会議 [2012]「エネルギー規制・改革アクションプラン〜グリーン成長に向けた重点 28 項目の実行(案)」:
<http://www.npu.go.jp/policy/policy09/pdf/20120329/shiryo1.pdf>
- 2) 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:
http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt108j/1003_03_featurearticles/1003fa02/201003_fa02.html
- 3) The European Small Hydro Association : <http://www.eshab.be/about/about-small-hydropower/in-the-world.html>
- 4) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) [2010]『NEDO 再生可能エネルギー技術白書』
- 5) 前掲井上・白石 [2010]
- 6) 小水力利用推進協議会 [2006]『小水力エネルギー読本』オーム社
- 7) 千葉大学公共研究センター・NPO 法人環境エネルギー政策研究所『エネルギー永続地帯 2008 年版報告書』
- 8) 資源エネルギー庁「出力別包蔵水力」:
<http://www.enecho.meti.go.jp/hydraulic/index.html>
- 9) 前掲井上・白石 [2010]
- 10) 環境省 [2011]「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」:
<http://www.env.go.jp/earth/report/h23-03/index.html>
- 11) 小林久 [2011]「農山村の再生と小水力から見る小規模分散型エネルギーの未来像」『季刊地域』7号, 2011.
- 12) 小林久・戸川裕昭・堀尾正和 [2010]『小水力発電を地域の力で』公人の友社
- 13) 日本エネルギー経済研究所『エネルギー・経済統計要覧 2011 年版』
- 14) 中島大 [2011]「小水力発電」『河川』2011.5
- 15) 傘木宏夫 [2007]「持続可能な地域づくりに向けた市民実験活動」『資源環境対策』43 巻 5 号, 2007.
- 16) 平野彰秀 [2011]「小さな水車で発電 加工所を生かして仕事づくりを」『季刊地域』7号, 2011.
- 17) Johnstone, J., I. Hascic and D. Popp [2010], Renewable energy policies and technological innovation: Evidence based on patent counts, *Environmental and Resource Economics*, Vol.45, 2010, 133-155.
- 18) 前掲笠木 [2007]
- 19) 永見靖 [2007]「小水力発電の普及に向けた施策の現状と展望」『資源環境対策』第 43 巻 5 号, 2007. 宮崎淳 [2011]「体系的に見た水利権」『水の文化』39, 2011.11
- 20) 中島大 [2006]「40 万 km の農業用水路網をエネルギー生産に活かすために」『太陽エネルギー』32 巻 5 号
- 21) 国土交通省 [2011]「東北地方太平洋沖地震への緊急対応—水力発電の水利利用に係る取水量管理の弾力化について」:
<http://www.mlit.go.jp/common/000138097.pdf>
- 22) 小林久 [2011]「小水力の未来とは」[2011]『水の文化』39, 2011.11
- 23) 内閣府行政刷新会議 [2011]「電力需給対策に関連する規制・制度の見直しについて」2011.6.7.
- 24) 前掲エネルギー・環境会議 [2012]
- 25) 内閣府行政刷新会議 [2012]「規制・制度改革に関する分科会報告書 (エネルギー)」:
<http://www.cac.go.jp/kisei-seido/publication/240326/item240326.pdf>.

執筆者プロフィール



伊藤 康

科学技術動向研究センター 客員研究官

千葉商科大学商経学部 教授

<http://www.cuc.ac.jp/index.html>

専門は環境経済学・地域経済学。高度成長期の日本の公害対策・環境政策の掘り起こしが研究の出発点。環境・エネルギー政策が技術開発・普及に与える影響を中心に研究を行ってきた。最近は、震災復旧・復興に関する研究にも力を入れている。

地震動の周期に依存した 建物被害と新たな課題

市口 恒雄
安全・システムユニット

松村 正三
客員研究官

1 はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震は、約2万人の死者・行方不明者を出す東日本大震災を引き起こし、1923年の関東大震災以降最大の自然災害となった。ただし、ほとんどが津波による犠牲者であったため、地震動による被害はあまり注視されていない。現実には、地震動による被害も多様であった。地震災害の研究は、実際に起きた事跡を検証することが全てであり、私たちは、未曾有の大震災で明らかとなった事実に向け、それらから得られる教訓を謙虚に学ぶ必要がある。

科学技術政策研究所では、地震動による直接の建物被害に注目して、2012年2月7日に「東日本大震災の被害と防災の在り方」と題する講演会を行った。講演者および講演題目は以下の通りである。

- ①「揺れによる建物被害と防災システムの問題」 境有紀(筑波大学)
- ②「事業活動への影響と免震・制震の効果」 境茂樹 ((株)間組)

本報告では、両氏の講演内容に沿って東北地方太平洋沖地震による建物被害の特徴を紹介する。阪神・淡路大震災を引き起こした1995年兵庫県南部地震に比べて、東北地方太平洋沖地震では、一般住宅の全壊や大破といった構造部の損傷は少なく、被害は瓦屋根や壁などの非構造部分に集中しているという特徴が見られた。甚大な津波被害を出しかつ地震の震度も大きかった東日本大震災で、何故揺れによる建物崩壊が少なかったのかを明らかにし、今後の被害軽減に役立てたいということがこの講演会の主なテーマであった。

東北地方太平洋沖地震は、震源

近くの東北地方では主に短周期の地震動であったが、首都圏では長周期成分も見られ、超高層ビルが長時間にわたって大きく揺れた最初の事例ともなった。ここ数年の間に高い確率で起きるとされる首都圏直下型地震では、最大震度7の可能性も想定されており、兵庫県南部地震を上回る大きな建物被害も予想される。超高層建築を含め、首都圏の建物は本当に大丈夫なのか。もし、可能な対策があるとしたら、どのような対策があるのか。そういった問題も含め、少しでもその被害を少なくする方法を探ってみたい。

以上のように、両氏の講演内容の一部を紹介するとともに、将来の大震災に備えて、揺れによる建物被害についての教訓を汲み取ることが本稿の目的である。

2 地震動による建物被害の調査方法と調査結果

被害を受けた建物は、事後の安全性を確保するためにも、精密な調査が望まれる。しかし、被害を受けた建物を全て調査しても、被害総数は算出されるが、被害率と

いった数字は出てこない。被害率あるいは全壊率という数字は、被害の有無に拘わらず、地域全体を万遍なく調査して初めて得られるものである。現実には、広範囲の

全ての建物を調査することは不可能であり、むやみに調査しても震度や揺れ方との関係は明らかにできない。この関係を明らかにするためには、信頼できる地震計が設

置されている場所を選び、その地点を中心に半径何百メートルといったエリアを調査することが有効である。このように、建物被害の調査方法には、被害建物だけを調査して被害総数を算出する方法と、特定エリアの全棟調査により被害率を算出する方法がある。

日本には、(独)防災科学技術研究所が全国に約20kmの間隔で設置しているK-NETおよびKiK-netと呼ばれる強震観測施設が1,381箇所ある(図表1参照)。そのほかに、気象庁と自治体の強震観測設備がそれぞれ608箇所と2,839箇所存在する。それらの観測施設には、強い揺れでも針が振り切れない強震計やデータの送信装置などが装備され、地上に置かれた丈夫なケースに収納されている(図表1の写真参照)。

KiK-netは地中に設けた地震計と地表の強震計とがセットになったものである。K-NETおよびKiK-netで得られた地震波形などの記録は、インターネットで公開・配信されている²⁾。東北地方太平洋沖地震では、震度6弱以上を記録した強震観測点は200地点以上であった。

境有紀氏らの研究グループは、2011年3月16日から4月10日までの期間に、周辺の建物が多い箇所などを考慮して、200地点の中から35地点を選んで調査を行った(図表2参照)。宮城県16地点、福島県7地点、栃木県6地点、茨城県6地点である。震度でいえば、震度7が2地点、震度6強が26地点、震度6弱が7地点となった。

現地調査の方法は、強震計が設置された観測点を中心に半径200m以内の建物全棟の被害チェックである。ただし、倉庫や車庫、および地滑りなどによる建物被害は対象外としている。半径200m以内と限定する理由は、この範囲内であれば、地震動が観測

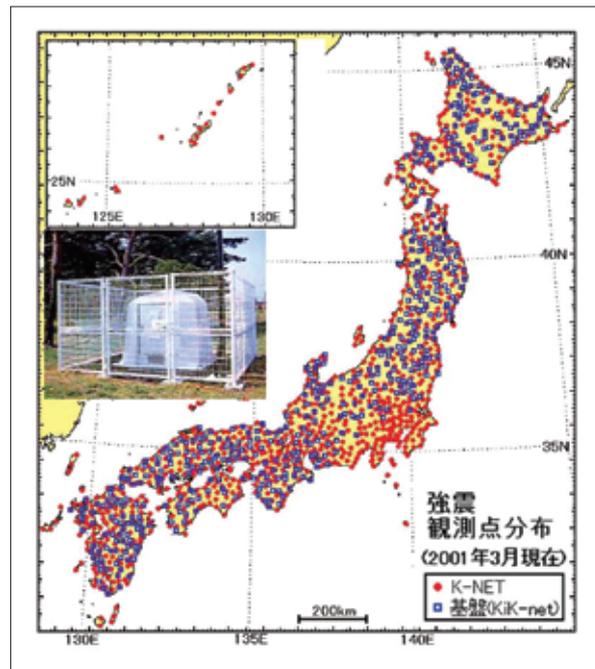
点とほぼ同じと見なせるからである。ただし、宅地の造成方法などによっては、家屋に伝わる地震動が大きく異なる場合もある。

現地では、建物の外観から全壊や大破を判定し、屋根瓦被害の有無を含めて、木造、RC造(鉄筋コンクリート構造)、鉄骨造など構造種別や階数などを区別して、地図上にプロットする。図表3の左側はK-NET塩竈の観測点(★印)を、右側は宮城県涌谷町にある気象庁の観測点(★印)を中心に半径200mの範囲内の建物を全棟調査した例である。これらの例では、建物の全壊・大破はなく、若干の瓦被害で済んでいた。ほかの地域の調査結果でも、被害状況は概ね同様であった。

研究グループによる建物被害調査の全体結果を図表4に示す。震度6弱の地点を一部含むが、概ね震度6強以上の地点での調査建物数の合計は2,954棟で、全壊・大破率は0.47%であった。

日本では、これまで全壊率30%以上の発生状況を以て、揺れの大きさを震度7と定義してきた。1996年以降の計測震度への改訂後も、

図表1 K-NETおよびKiK-netの強震観測地点と観測設備の写真



出典：参考文献1

図表2 東日本大震災による建物被害の調査地点



提供：境有紀氏

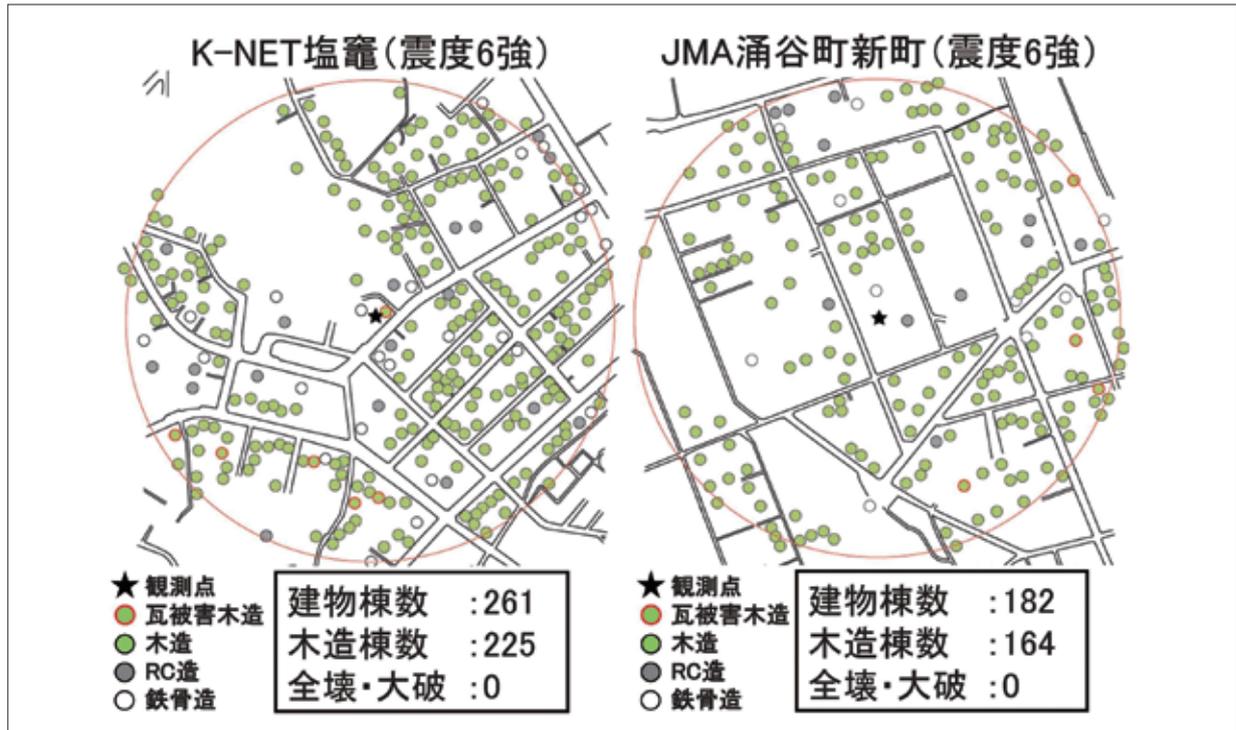
震度6強での全壊率は8~30%、震度7での全壊率は30%以上と評価されてきた。しかし、東北地方太平洋沖地震では、ほぼ震度6強以上での全壊・大破率が0.47%という極めて低い数値になっている。

強震観測点を中心に半径200mの範囲で全棟調査する方法は、全

壊・大破率などの被害率を算出でき、それを地震動と比較できる。ただし、恣意的に調査範囲を拡げることは統計学的信頼性を失わせるので、範囲外に全壊した建物があっても、その建物は調査対象にはならない。これと平行して、被害が大きかった建物を重点的に調

査し、どの部分がどういう風に壊れたかを調べる従来の方法による調査も、ほかのグループによって実施された。国土交通省国土技術政策総合研究所と(独)建築研究所の合同グループは、福島県内(三春町・二本松市・郡山市・福島市)や福島県・宮城県内(白河

図表3 東日本大震災による建物被害の調査例



提供：境有紀氏

図表4 東北地方太平洋沖地震による建物被害の調査結果

被害調査結果									
観測点名	計測震度	棟数	全壊・大破数	全壊・大破率(%)	観測点名	計測震度	棟数	全壊・大破数	全壊・大破率(%)
JMA大崎市古川三日町	6.21	257	7	2.72	K-NET古川	6.16	285	0	0.00
JMA筑西市舟生	6.06	27	0	0.00	K-NET銚田	6.41	17	0	0.00
JMA涌谷町新町	6.02	182	0	0.00	K-NET土浦	5.63	161	0	0.00
KiK-net岩瀬	6.24	17	0	0.00	k-NET日立	6.46	108	0	0.00
KiK-net西郷	6.00	8	0	0.00	鏡石町不時沼震度計	6強	169	0	0.00
KiK-net馬頭	6.14	14	0	0.00	須賀川市八幡町震度計	6強	229	5	2.18
KiK-net芳賀	6.50	59	0	0.00	宇都宮市白沢町震度計	6強	116	0	0.00
K-NET小川	5.97	146	1	0.68	笠間市中央震度計	6強	101	0	0.00
K-NET会津若松	5.86	199	0	0.00	高根澤町石末震度計	6強	155	1	0.65
K-NET岩沼	5.99	87	0	0.00	山本町浅生原震度計	6強	108	0	0.00
K-NET角田	5.83	159	0	0.00	真岡市石島震度計	6強	76	0	0.00
K-NET塩竈	6.02	261	0	0.00	大崎市鹿島台震度計	6強	123	0	0.00
K-NET白河	6.11	85	0	0.00	登米市南方町震度計	6強	3	0	0.00
K-NET須賀川	6.00	75	0	0.00	登米市米山町震度計	6強	18	0	0.00
K-NET仙台	6.38	21	0	0.00	東松島市矢本震度計	6強	200	0	0.00
K-NET相馬	5.85	159	0	0.00	名取市増田震度計	6強	181	1	0.55
K-NET築館	6.67	59	0	0.00	K-NET石巻	5.93	-	-	-
震度6強以上の合計							2954	14	0.47

提供：境有紀氏

市・須賀川市・仙台市)などの鉄筋コンクリート造や鉄骨造の建物の被害調査を行った^{3,4)}。この調査結果でも、重大な被害は確認されたものの限定的であること、観測された震度の割には建物被害は大きくなく、外装材の被害はあっても構造的な被害は顕著でないこと、などが報告されている。また、大きな被害を受けた建物に

は、1978年の宮城県沖地震以前に建てられたものが多いことも報告されている。さらには、以前は水田であった地域での被害が大きいといった地盤条件の影響も指摘している。

このように、2つの独立した調査により、東北地方太平洋沖地震では、震度の割には揺れによる建物被害は大きくなかったことが明

らかになった。これは、建物の耐震性が向上している効果なのだろうか。あるいは、東北地方太平洋沖地震の揺れに何か特徴があったのだろうか。それを解き明かすために、次章では、建物被害の著しかった兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)の地震動との比較を試みる。

3 兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震との比較

3-1

揺れの特徴の比較

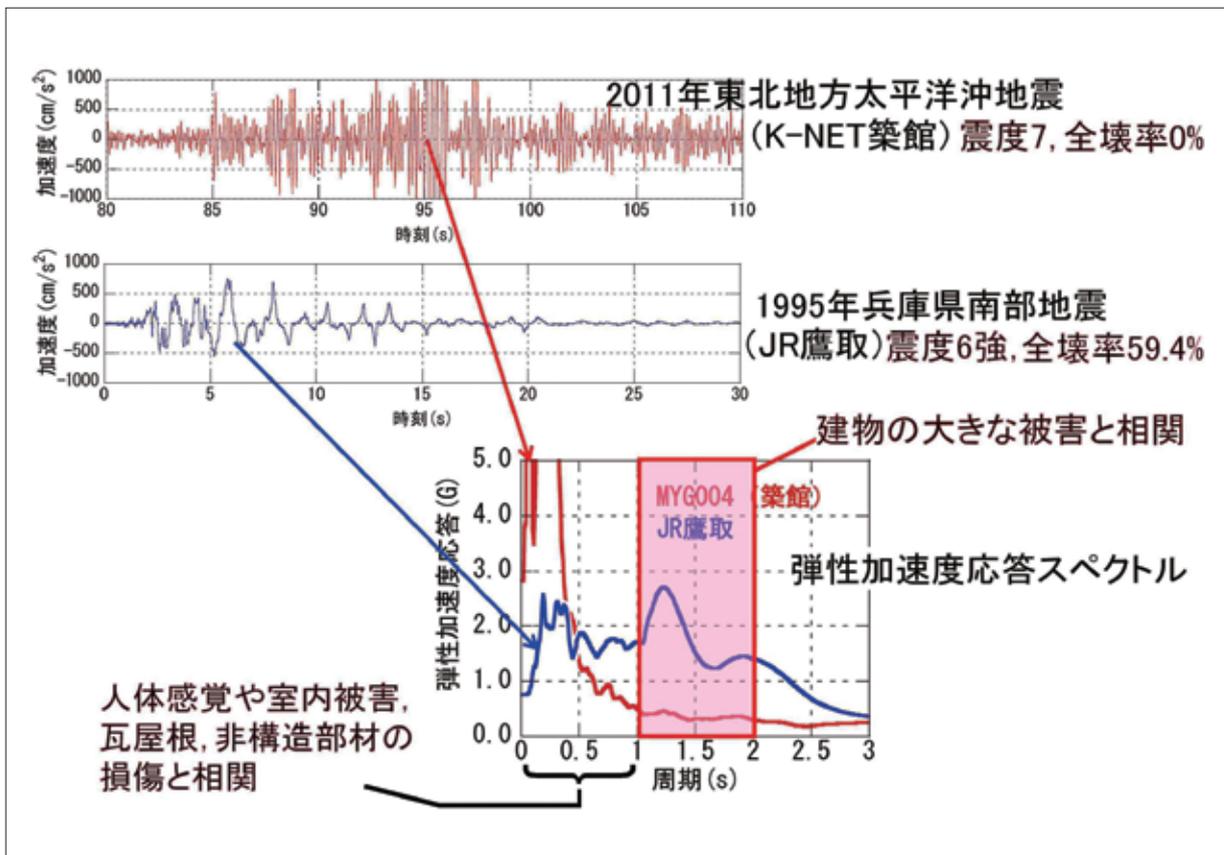
図表5は、東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の地震動の比較例である。それぞれの測定地点は、宮城県のK-NET 築館とJR西日本の鷹取駅構内である。築館

では震度7で全壊率0%であるのに対して、鷹取では震度6強に対して全壊率59.4%であり、両者には極めて大きな違いがある。

両者の揺れの特徴を見ると、大きな違いがあることがわかる。東北地方太平洋沖地震では短い周期の強い揺れが長時間続いたのに対して、兵庫県南部地震では比較的周期の長い揺れが観測されて

いた。地震動の縦軸の単位 cm/s^2 は加速度を示しており、通常は「ガル」と呼ばれる単位である。980 cm/s^2 を1G(重力加速度)として、Gで表すこともある。東北地方太平洋沖地震のグラフでは最大値が1,000ガルを超えていたが、1,000ガル以上の部分を省略して図示している。この地震動のグラフから、振動強度(弾性加速度応

図表5 東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の地震動の比較



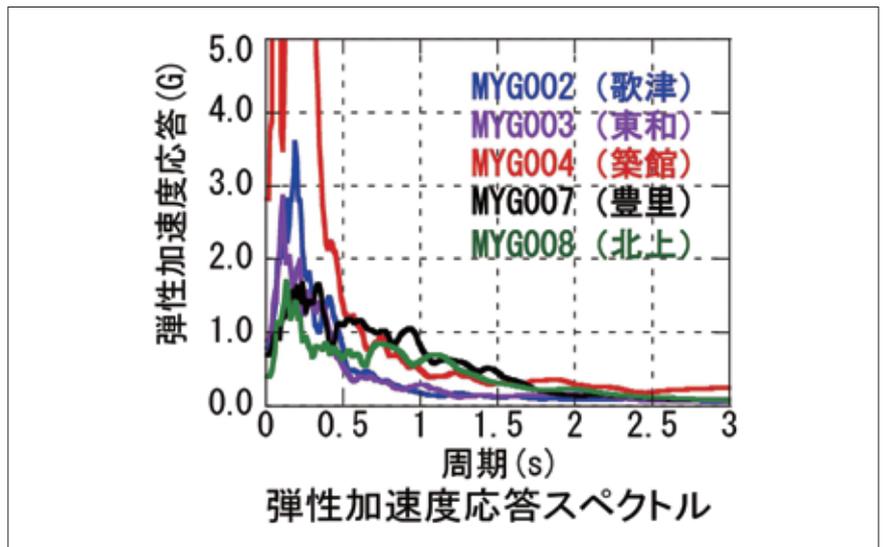
提供：境有紀氏

答) と周期との関係を表すグラフを描けば、2つの地震動の特徴の違いは一目瞭然である。東北地方太平洋沖地震では周期が0.5秒以下の振動強度が大きい、周期が1~2秒の領域では、兵庫県南部地震の方が振動強度は大きい。建物被害に関しては、周期が1~2秒の地震動の影響が大きく、被害率との相関も指摘されている。一方、周期が1秒以下の振動は、人体感覚と合致しており、瓦屋根や壁などの非構造部材や室内被害との相関が見られる。

東北地方のほかの測定地点でも、弾性加速度応答は、0.5秒以下の周期で大きく、建物被害に結びつく1~2秒周期では小さかった(図表6参照)。東日本大震災では、建物に影響する地震動が大きくなかったから、建物被害がさほど生じなかったのである。建物の耐震性が兵庫県南部地震以来向上したというわけではない。従って、東北地方太平洋沖地震という超巨大地震でも大丈夫だったからといって、今後の大地震で建物は大丈夫だろうと即断するわけにはいかない。

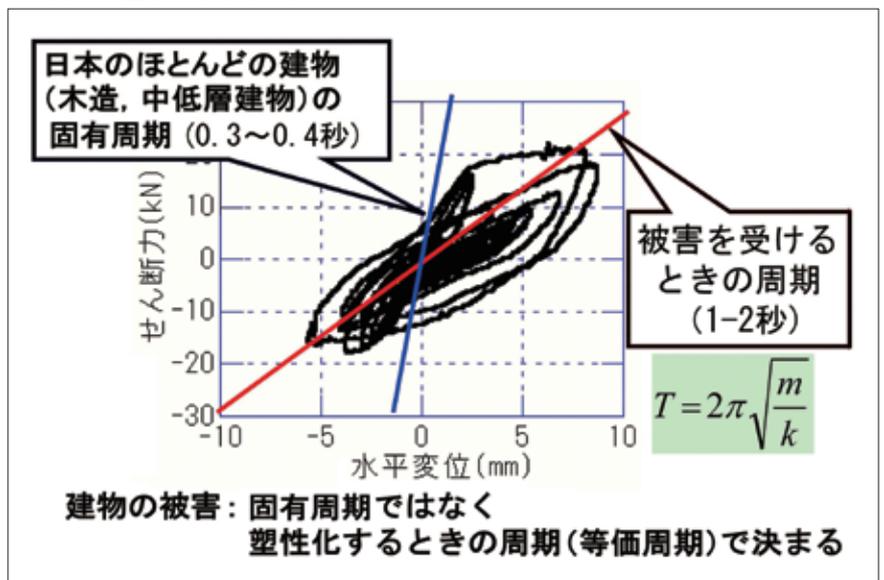
ただし、ほとんどの木造家屋や中低層建物は0.3~0.4秒の固有周期を持つことがわかっており、それよりも長い周期1~2秒の地震動で大きな建物被害が起きるといのは、奇妙な現象に思える。この固有周期0.3~0.4秒というのは弾性限界内での周期であり、弾性限界を超えて塑性変形が起き始めると共振する振動の周期は長くなると考えられる。建物の被害は、塑性化するときの等価周期で決まり、非線形モデルによるシミュレーションや模型実験の結果(図表7参照)によっても確かめられている。周期が1~2秒の地震動は、たとえ一回の振動であっても、建物の塑性化を引き起こして大きな被害を与えることがある。従って、周期が1~2秒の地震動は、「キラー・パルス」という呼称

図表6 複数の測定地点での地震動のスペクトル



提供：境有紀氏

図表7 模型実験による結果



提供：境有紀氏

で報道されることもある。

3-2

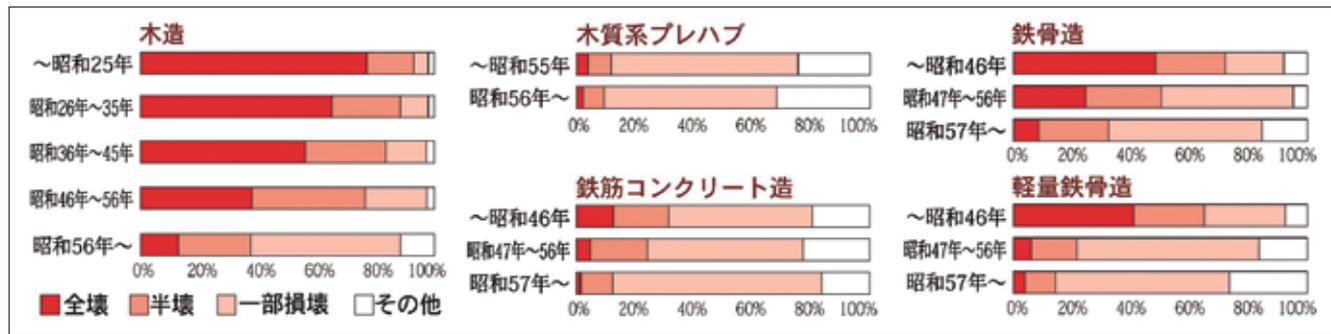
建物被害の比較

兵庫県南部地震は、全半壊の住宅が合わせて約25万棟という大きな建物被害を起こした。死者6,432名のうちの約80%が住宅倒壊による圧死と言われている。木造住宅の場合、1階の柱が折れて2階部分が下に落ちることにより、1階で就寝中の人々が圧死するケースが多く見られた。

芦屋市(人口約9万人)では、建物の全棟調査により、「芦屋市/建築物の被害と復旧」⁵⁾として詳細な記録を残している。芦屋市域全建築物15,421棟のうち、全壊は4,722棟、半壊は4,062棟となり、全・半壊率は57%に達した。建物数としては、木造住宅が圧倒的に多く、10,514棟のうち約70%が全壊または半壊の被害にあった。木造住宅に次いで多い鉄筋コンクリート造の建物も2,577棟のうち20%強が全・半壊している。

地震被害を受けた建物は、建築基準法が改正された1981年(昭

図表8 芦屋市における建築物の築年代別の被害状況



出典：参考文献6

和56年)6月以前に建てられた住宅が多く、しかも築年数が古いものほど全・半壊が多くなっている(図表8参照)。市域のほぼ中央を東西に縦断した震度7の帯上に位置する地域では、全・半壊率が90%を超えた地域も存在する。この地域では、人的被害も多く発生した。

柱が折れて上層階が落下する現象は、「層崩壊」と呼ばれる。層崩壊は、木造住宅だけではなく、鉄骨造や鉄筋コンクリートのビルでも起きた(図表9参照)。兵庫県南部地震の発生時刻が午前5時46分と早朝であったため、ビルの層崩壊による死傷者は少なかったと考えられる。もし、地震が昼に発生し、百貨店などの人の集まる商業ビルで層崩壊が起きれば、多数の死傷者が出たことは想像に難くない。

境有紀氏たちの調査によれば、東北地方太平洋沖地震の揺れによる建物の全壊・大破率はわずか0.47%である。しかし、国土交通省国土技術政策総合研究所と(独)建築研究所の合同チームの報告^{3,4)}によれば、層崩壊した建物も存在し、建物によっては大きな被害を受けた。図表10(a)および(b)は、交差点に面した鉄筋コンクリート造の建物である。いずれも1階部分は店舗であり、耐力壁の少ない「ピロティ」構造となっていた。両者とも交差点に面した隅柱のせん断破壊が原因で1階部分が層崩壊を起こした。ただし、

1階が柱だけのピロティ住宅は、地震に耐えさえすれば流水圧を受けにくく、津波の被害からはのがれた例も報告されている。図表10(c)は大学の校舎で、以前から耐震強度の不足が指摘されており、補強を計画している段階での被災となった。敷地内のすぐ隣の建物では、外見上の被害は全く観測されなかった。図表10(d)は、一部損壊として最も多く観測された壁被害の例である。

前述のように、東北地方太平洋沖地震では0.5秒以下の周期の地震動が顕著であり、壁などの非構造部材や室内被害が多く発生した。また、天井材や照明器具の落下、立体駐車場のスロープの落下などで、首都圏でも死傷者が出た。住宅では瓦がずれるなどの被害が発生し、地盤の液状化による被害も発生した。

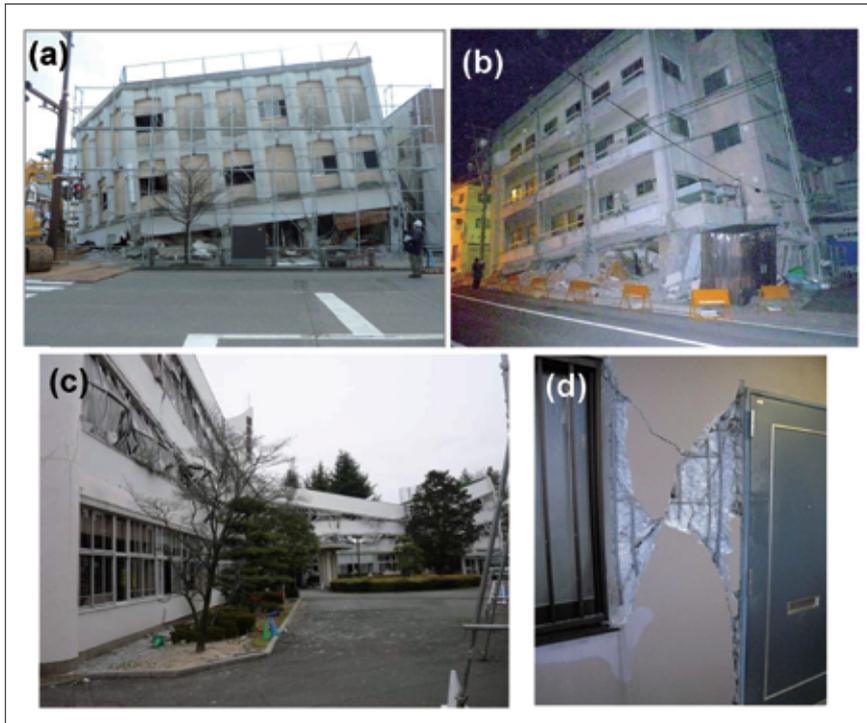
工場でも、天井材の脱落や内装材などの被害が生じた。電子部品工場のクリ**気密性**な影響を与えた。例えば、ルネサスエレクトロニクス(株)の半導体工場の操業停止は、世界の自動車生産に大きな影響を与えた。こうした経済的な意味の被害まで防ぐためには、産業界としては、災害発生時にも事業活動を低下さ

図表9 兵庫県南部地震によるビルの層崩壊



提供：境有紀氏

図表 10 東北地方太平洋沖地震による建物被害



出典：参考文献3および4

せないハード面の「災害抵抗力」と、事業活動を継続しつつ復旧を早めるソフト面の「災害対応力」を兼ね備えることが重要である。事業者は、この2点を意識した「事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）」を予め作り、実地訓練することが必要である。

4 過去の地震における建物被害

周期1秒以下の振動が顕著な地震動は「短周期地震動」と呼ばれ、周期1~2秒の振動が顕著な地震動は「やや短周期地震動」と呼ばれる。関東平野・濃尾平野・大阪平野などの厚い堆積層地盤では、周期が2秒以上の「長周期地震動」が観測される場合もある。長周期地震動に関しては、周期が2~5秒の場合を「やや長周期地震動」、周期が5秒以上の場合を「長周期地震動」として区別することもある。

図表11は、過去の震度6弱以上の地震による被害状況を文献7より抜粋し、周期が1~2秒の地震動が多く観測された地震を☆印で、一部の地域で観測された地震を○印で記してある。(2003年の宮城県北部を震源とした地震では、消失した波形もあり、周期が1~2秒の地震動があったかどうかは不明)。図表11の☆印と○印は建物の被害数と強い相関があることがわかる。東北地方太

平洋沖地震では膨大な建物被害を出したが、そのほとんどは津波によるもので、地震動によるものは少ない。また、東北地方太平洋沖地震の翌朝に発生した長野県・新潟県県境付近を震源とする地震では、長野県栄村や新潟県十日町市を中心に住宅に被害を及ぼした。

図表11では、周期が1~2秒の地震動が観測された地震に印を付けたが、地震動の周期は、地震の震源過程だけで決まらず、観測点での地盤の状況や地震波の伝搬経路に大きく左右される。図表12は、新潟県中越沖地震の時に、長岡市小国町と柏崎市で観測された弾性加速度応答である。小国町では周期が1秒以下の地震動が顕著であるが、柏崎市では周期2秒あるいはそれ以上の周期の地震動が顕著になっている。この様に、同じ地震であっても、場所によって地震動は異なる。従って、地震による建物被害の軽減研究において

は、単に地震の研究だけではなく、地震・地下構造・地盤・建築物を含む総合的な研究が必要である。

2008年岩手・宮城内陸地震や2009年の駿河湾を震源とする地震では、観測地点のほとんどでは短周期地震動であったが、K-NET古川やK-NET鳴子などの特定の観測地点では周期が1~2秒の「やや短期地震動」や周期2秒以上の「長期地震動」が観測されている(図表13)。この2つの地震による建物被害調査の結果をまとめたのが図表14である。いずれの地震でも、瓦屋根の被害を除き、調査域内では全壊や大破といった大きな建物被害はなかった。ただし、岩手・宮城内陸地震は、全体として176棟の全・半壊被害と23名の死者・行方不明者を出し、一関西観測点(岩手県一関市巖美町)では、4,022ガルというそれまでの観測史上最大の地震加速度が記録された。

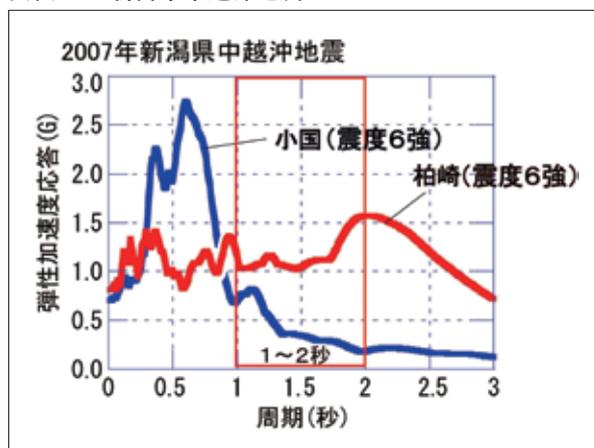
図表 11 過去の震度6弱以上の地震による被害状況。

☆印および○印は、それぞれ周期1～2秒の地震動が顕著に観測された地震と一部の地域で観測された地震。

発生年	地震名または震央地名	M	最大震度	津波 (メートル)	死者・不明者数	建物被害		振動周期
						全壊(棟)	半壊(棟)	
1995年	兵庫県南部地震	7.3	7	有	6,437	104,906	144,274	☆
1997年	鹿児島県薩摩地方	6.4	6弱	無	0	4	31	
1998年	岩手県内陸北部	6.2	6弱	無	0	0	0	
2000年	新島・神津島近海など3回	6.5	6弱	0.14	1	15	20	
2000年	鳥取県西部地震	7.3	6強	無	0	435	3,101	○
2001年	芸予地震	6.7	6弱	無	2	70	774	
2003年	宮城県沖	7.1	6弱	無	0	2	21	
2003年	宮城県北部	6.4	6強	無	0	1,276	3,809	不明
2003年	十勝沖地震	8.0	6弱	2.55	2	116	368	
2004年	新潟県中越地震	6.8	7	無	68	3,175	13,810	○
2005年	福岡県西方沖	7.0	6弱	無	1	144	353	
2005年	宮城県沖	7.2	6弱	0.12	0	1	0	
2007年	能登半島地震	6.9	6強	0.22	1	686	1,740	○
2007年	新潟県中越沖地震	6.8	6強	0.32	15	1,331	5,709	○
2008年	岩手・宮城内陸地震	7.2	6強	無	23	30	146	
2008年	岩手県沿岸北部	6.8	6弱	無	1	1	0	
2009年	駿河湾	6.5	6弱	0.36	1	0	6	
2011年	東北地方太平洋沖地震	9.0	7	9.3以上	19,263	128,582	244,031	
2011年	長野県・新潟県県境付近	6.7	6強	無	3	73	426	
2011年	静岡県東部	6.4	6強	無	0	0	103	

出典：参考文献7,8および境有紀氏講演

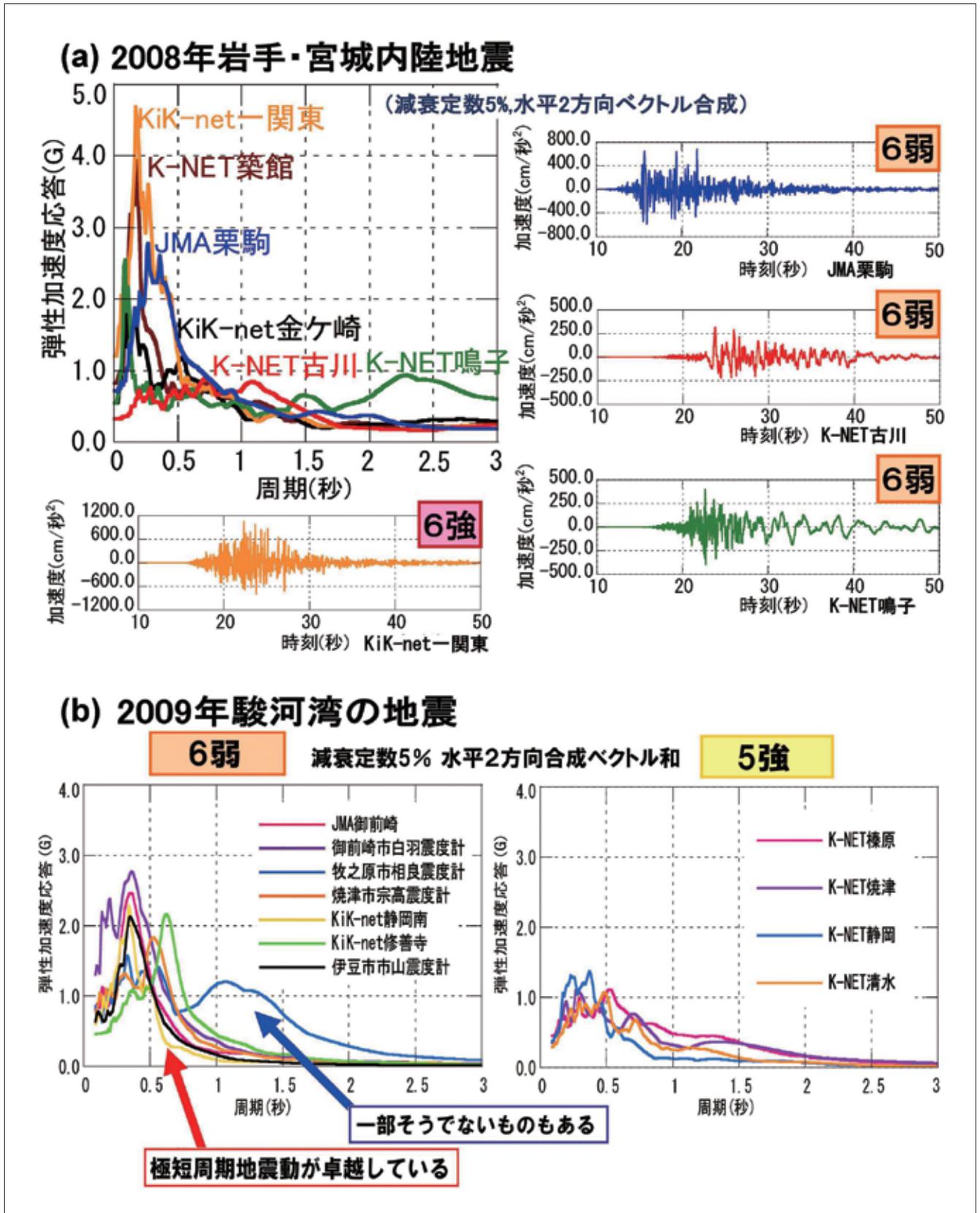
図表 12 新潟県中越沖地震のスペクトル



提供：境有紀氏

建物に全壊や半壊の被害を与えるとされてきた最大震度6弱以上の地震は、年に1.3回程度の頻度で起きている。しかし、被害率という観点から見れば、ほとんどの地震では、明らかに想定より被害は小さい。むしろ、兵庫県南部地震は、例外的な存在と言えよう。このことは、震度という単一の指標では、地震による建物被害を語れないことを如実に物語っているものと思える。

図表 13 岩手・宮城内陸地震と駿河湾を震源とする地震のスペクトル



提供: 境有紀氏

図表 14 2つの地震での建物被害の調査結果

(a) 2008年岩手・宮城内陸地震の建物被害の調査結果

	強震観測点	計測震度	震度計から半径200mの範囲内での被害状況	建物棟数			
				全体	木造	非木造	全壊・大破
6強	栗原市一迫震度計	6.2	外装材の剥落, ブロック塀の倒壊, 屋根瓦の損傷など	22	17	5	0
	奥州市衣川区震度計	6.1	RC造建物外壁のひび割れ, 屋根瓦の損傷, 地盤被害など	38	31	7	0
	KiK-net一関東	6.0	公民館および体育館の外装材の損傷	4	4	0	0
	JMA栗原市栗駒	5.9	外装材の剥落など軽微な建物被害	14	13	1	0
6弱	栗原市鶯沢震度計	5.8	老朽化した倉庫の倒壊, 軽微な建物被害	40	32	8	0
	K-NET築館	5.7	特に被害なし	53	47	6	0
	JMA大崎市古川三日町	5.6	外装材の剥落など軽微な建物被害	284	261	23	0
	栗原市金成震度計	5.6	傾いた倉庫, 外装材の剥落, 地盤被害など	26	14	12	0
	K-NET古川	5.5	外装材の剥落, 窓ガラスの破損などの軽微な建物被害	281	255	26	0
	K-NET鳴子	5.5	特に被害なし	15	14	1	0
	KiK-net金ヶ崎	5.5	ブロック塀の被害, 地盤被害	12	11	1	0
	大崎市田尻震度計	5.5	外装材の剥落, RC造建物基礎部のひび割れなど	110	99	11	0
	栗原市高清水震度計	5.5	外装材の剥落など軽微な建物被害	111	101	10	0
	栗原市花山震度計	5.5	外装材の損傷, ブロック塀の被害など	38	30	8	0
5強	栗原市志波姫震度計	5.5	RC造建物外壁のひび割れ, 外装材の剥落など	57	43	6	0
	奥州市胆沢区震度計	5.5	特に被害なし	19	14	5	0
	K-NET一関	5.0	特に被害なし	164	131	33	0

(b) 2009年駿河湾を震源とする地震の建物被害の調査結果

6弱	観測点名	計測震度	観測点から半径200mの範囲内での被害状況	建物棟数					瓦被害率 (%)	全壊率 (%)
				木造	非木造	全壊	半壊	瓦被害		
	JMA御前崎市御前崎	5.7	屋根瓦被害あり	131	7	0	0	6	4.35	0
	御前崎市白羽震度計	5.9	屋根瓦被害多数, 外壁被害あり	95	8	0	1	18	17.48	0
	牧之原市相良震度計	5.9	屋根瓦被害多数	83	28	0	0	19	17.12	0
	牧之原市静波震度計	5.5	屋根瓦被害多数	154	33	0	0	17	9.09	0
	焼津市宗高震度計	5.6	屋根瓦破損多数	45	11	0	0	9	16.07	(0)
	KiK-net静岡南	5.6	屋根瓦被害あり, 公営プールの内装被害	14	8	0	0	1	4.55	(0)
	KiK-net修善寺	5.7	被害なし	1	0	0	0	0	0.00	(0)
	伊豆市市山震度計	5.5	屋根瓦被害あり	65	19	0	0	2	2.38	(0)
	K-NET榛原	5.4	屋根瓦被害多数	87	27	0	0	8	7.02	0
	K-NET焼津	5.4	屋根瓦被害あり	229	42	0	0	5	1.85	0
	K-NET静岡	5.1	屋根瓦被害あり	334	214	0	0	1	0.18	0
	K-NET清水	5.2	被害なし	35	29	0	0	0	0.00	(0)

提供：境有紀氏

5 震度と建物被害との関係

現行の日本の気象庁震度階は、0から4までと、5弱、5強、6弱、6強、そして震度7と合計10段階で与えられる。1996年までは0から7までの8段階であったが、兵庫県南部地震の時に、震度5および震度6の地域での被害状況の幅が広がったことから、その後、それぞれに強弱の震度階が新たに設けられた。震度とは、加速度や

振幅といった明確な物理量ではなく、揺れの振幅や周期あるいは継続時間といった要素が複雑に絡み合う量であり、1995年以前は、被害状況や体感によって決められていた。近年になって地震計の記録波形に数値処理を施すことによって、自動的に機械判定することが可能となり、1996年以降は、この計測震度が用いられている。

例えば、震度4とは計測震度が3.5以上4.5未満、震度5弱とは計測震度が4.5以上5.0未満、震度5強とは計測震度が5.0以上5.5未満を意味している。

計測震度によって震度が自動判定できるようになり、現在では、地震発生から1~2分程度で各地の震度がテレビやラジオで報道されるようになった。現時点では日

本だけが持つ画期的な速報システムである。その一方で、人体感覚に依拠してきた旧震度と現行の計測震度との間の連続性に対する疑問も出ている。気象庁資料によると、1988～1994年に起きた実際の地震に対して旧震度と計測震度とが少なくとも旧震度6の範囲までよく一致することが示されている。しかし、1995年以降については、震度6強を超える強震動の範囲で旧震度と計測震度との一致は保証されておらず、その不一致がその後の震度と建物被害率との乖離の1つの原因となっている可能性がある。

気象庁が計測震度を取り入れた1996年以降、計測震度6弱以上の出現頻度が、旧震度6以上に比べて飛躍的に増加した^{9,10)}。図表15から、地震の発生頻度自体は大きく変化していないが、震度6弱以上を記録した地震の回数が1996年頃を境に、発生率にしておよそ15倍と大きく増加している様子がわかる。この理由は、旧震度評価が行なわれていた観測拠点数に比べて計測震度計の設置点数がはるかに増加し、それによって最大震度の観測漏れがほぼ無くなったせいであろうと説明されてきた。これは一見、合理的な解釈にも思えるが、15倍にも及ぶ発

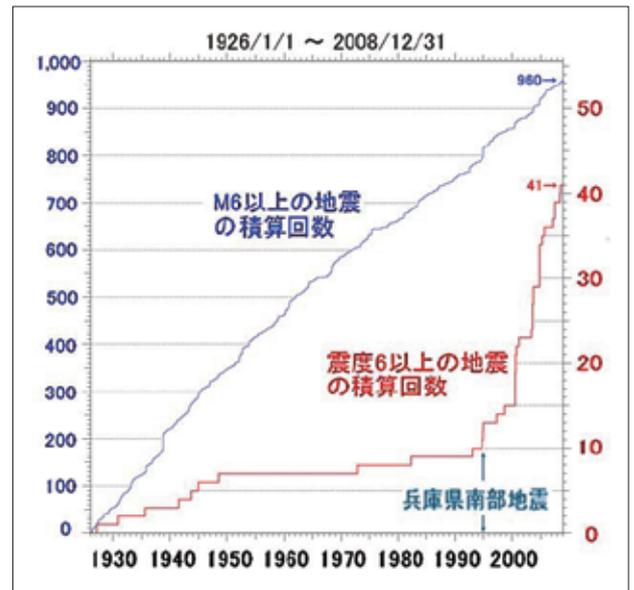
生率の違いを説明しきれないかどうかは不確かである。この発生率の違いの一部は、計測震度と旧震度との間に生じたずれに起因している可能性は否定できない。

境有紀氏は、計測震度とは別に、震度に応じてフィルターの周波数帯域を変えた別の指標を提案している¹¹⁾。震度6弱以上の地震に関して、被害

率との乖離が度々生じるとなれば、指標としての震度の意義が問われかねない。現行の計測震度を変えることに慎重であるべきとするならば、建物の構造体被害に焦点をあてた別指標を用意することも考慮すべき案と言えよう。

地震動の多くは、周期が1秒以下の短周期であり、1～2秒の周期が観測される「やや短周期地震動」は必ずしも多く発生するわけではない。しかも、地震動の周期は、地盤構造や伝搬経路に依存する。今回の東北地方太平洋沖地震で震度6強や震度7となったにも拘わらずほとんどの住宅が倒壊し

図表15 震度6以上の地震の積算回数



出典：参考文献10

なかったという経験により、多くの人が、その程度の地震では自宅は倒壊しないと思込むかも知れない。しかし、それは誤りであり、そういった思い込みは危険である。震度が大きくかつ周期1～2秒の地震動を伴う地震の場合には、阪神・淡路大震災の時のような大きい建物被害が発生する可能性があることを忘れてはならない。特に住宅などの中・低層建物に対しては、周期1～2秒の地震動を想定した耐震対策が重要であることを指摘したい。

6 超高層建物と免震・制震方法

東北地方太平洋沖地震では、震源から遠い東京でも震度5弱を観測し、都心の超高層ビルも長時間にわたって大きく揺れた。建築基準法には「超高層建物」という言葉はないが、同法第20条第1号に規定する60mを超える建物のことを「超高層建物」と呼ぶことが多い。高さ60mを超える建物については、決められた地震波形を用いて動的に解析（時刻歴応答

解析）し、耐震基準を満たすことが義務づけられている。

建物の耐震構造は、大きく分けて次の3種類が存在する。

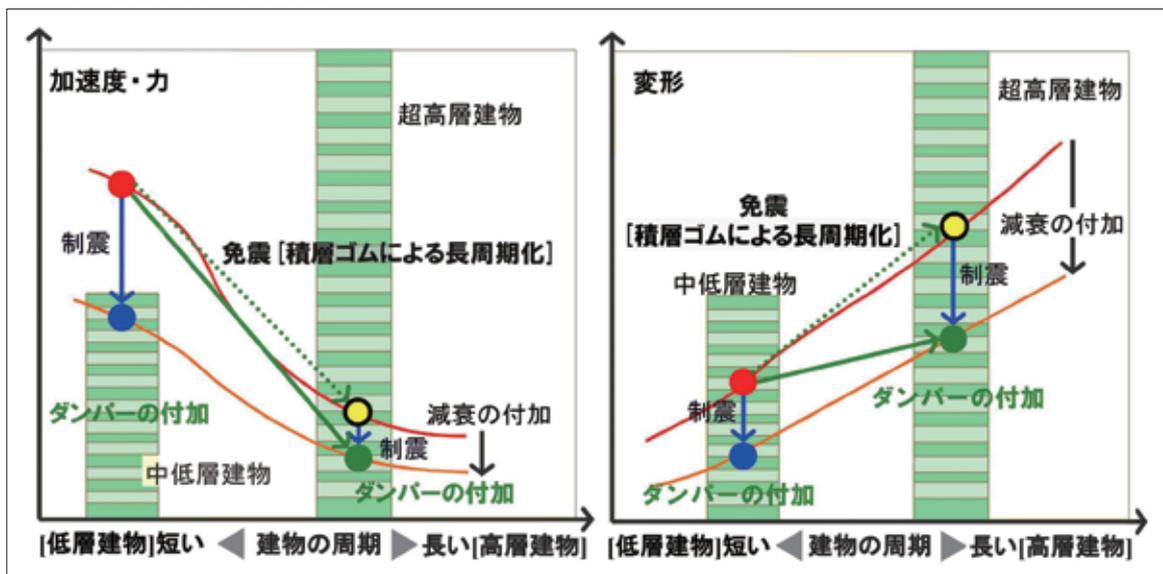
- 構造体の強度を増して地震に耐える力を与える狭義の耐震構造
- エネルギーの吸収機構によって振動を抑制する制震構造
- 積層ゴムやすべり支承などを用いて上階への地震力を受

けにくくする免震構造

一般家屋では、構造壁や筋交いなどを用いて耐震性能を高めることが多いが、超高層建物では変形を抑制または制御する制震構造や免震構造が用いられる。

低層建物の固有周期は0.5秒以下だが、高層建物の固有周期は1～2秒、超高層建物になると固有周期は2～6秒程度となる。一般的には、高層であればあるほど建

図表 16 建物に加わる力と変形



提供：境茂樹氏

物の固有周期は長くなって、地震動の卓越周期との差が大きくなり、その結果、建物に伝わる力や加速度は小さくなる（図表 16 左図）。ところが、建物の揺れの振幅、即ち変形は、超高層建物になれば逆に大きくなる（図表 16 右図）。制震構造では、地震のエネルギーをダンパーに吸収させることによって、建物に加わる力を小さくして、同時に建物の変形を抑えることができる。一方、免震構造では、積層ゴムなどを用いて等価的に建物の共振周期を長くすることによって、建物に伝わる力を小さくすることができる。

制震構造にはいくつかの種類があり、典型的には次の3種類に分類される。

- (a) 層間ダンパー型制震構造：建物の上層の床と下層の天井（または床）とをダンパーを用いて連結し、ダンパーにエネルギーを吸収させて建物の損傷を防ぐ。ダンパーには、図表 17 に示したオイルダンパーや金属の塑性化を利用した低降伏点鋼ダンパーなどがある。
- (b) マスダンパー型制震構造：建物の最上部に「おもり」を設置し、建物の上層部を揺

れにくくする。この場合も、おもりと建物とをダンパーで連結し、エネルギーを吸収させる。場合により、アクチュエータなどで連結し、建物が揺れる方向と逆方向に力を加えてアクティブ制御することもある。

- (c) 連結型制震構造：建物の構造を複数に分割した上で、ダンパーで連結して揺れを抑える。連結制震ブリッジで複数の棟をつなぐ晴海アイランド・トリトンスクエアや、中心部に心柱構造を設けて本体とダンパーでつなぐ東京スカイツリーがある。一方、免震構造は、建物の基礎の部分に

図表 17 層間ダンパーの種類



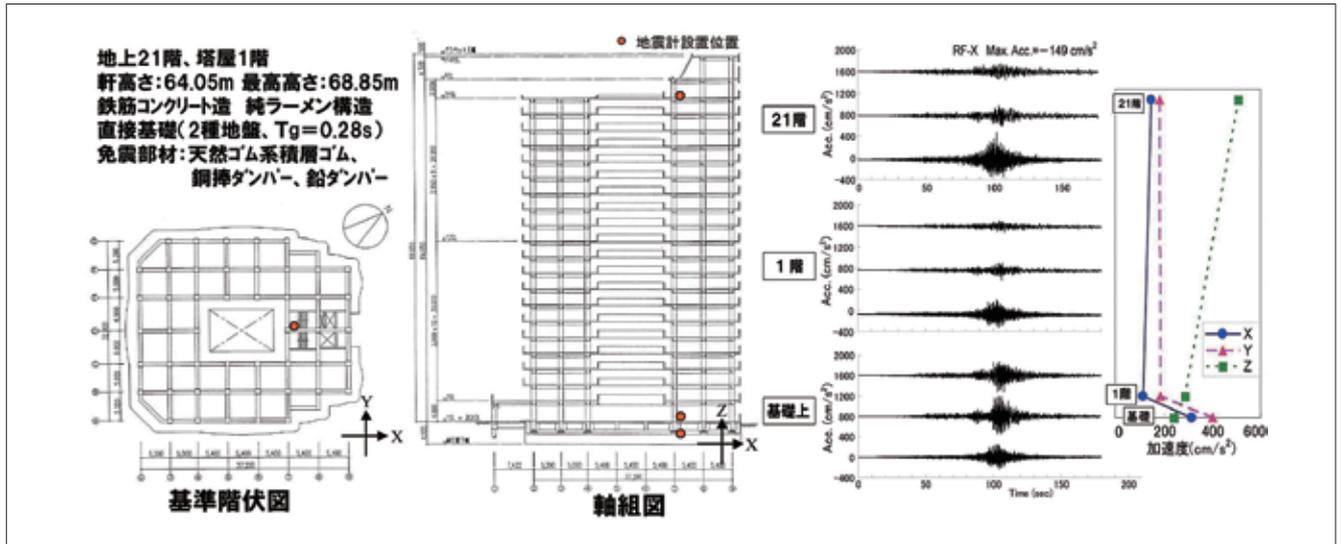
提供：境茂樹氏

図表 18 免震建物用の構造部材



提供：境茂樹氏

図表 19 免震構造の超高層建物で観測された東日本太平洋沖地震の地震動



提供：境茂樹氏

図表 18 のような積層ゴムや鋼材ダンパーを入れて、地震動が建物に直接伝わらないようにした構造である。免震構造部分を含む建物の固有周期を長くすることによって地震動は建物に入り難くなる（図表 16 参照）。固有周期が長くなると、建物内部に掛かる力は小さくなるが、逆に変形は大きくなる。この変形を積層ゴムや鋼材ダンパーなどに集中させて、建物上部に被害が出ないようにしている。ただ、風圧の影響が大きい超高層建物では、風による建物の揺れが大きくなる可能性があるため、免震機構の設置には十分な注意が必要である。また、床や建物が地面と異なる動きをするので、出入り口や建物周囲で地面とのジョイント部に十分配慮を払う必要がある。

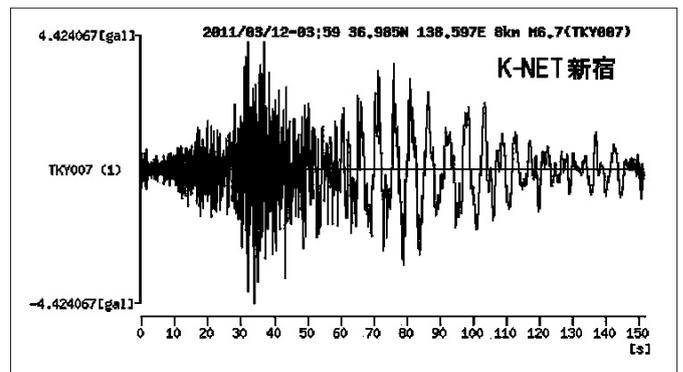
図表 19 は、免震構造の超高層建物で観測された東北地方太平洋沖地震の地震動を示している。基礎上・1階・21階の3箇所で観測しており、それぞれ3種類の波形は、上2つが水平方向、下1つが垂直方向の地震動である。基礎上と1階の水平方向の地震動には大きな違いが見られる。1階で観測された加速度は、基礎上で観測された加速度の約1/3になっており、免震機構が有効に働

ていることがわかる。しかし、垂直の地震動は減衰しておらず、一般的な免震構造には働かない。免震機構が無い場合のこの建物の揺れは測定

できないのでシミュレーションに頼るしかないが、下層階の揺れは約 320 cm/s^2 から約 100 cm/s^2 に、上層階の揺れは約 280 cm/s^2 から約 160 cm/s^2 に低減されているという結果が得られた。また、層間変形角（各層での変形を柱の長さで割った値）は、免震構造でない場合には中層階では1/200近くに達するが、免震構造の場合にはどの階でも1/1000以下に抑えられていることもわかった。層間変形角が1/200以上になると、壁に亀裂が生じ始めると言われており、免震構造では層間変形角を抑える効果ははっきりと確認された。実際にこの建物では、壁や柱面のひびなどの被害や家具の転倒などの被害も報告されていない。

制震建物や免震建物は、どちらの場合もダンパーや積層ゴムに地

図表 20 東北地方太平洋沖地震余震の新宿における地震動



出典：参考文献 2

震力や変形を集中させて、建物全体を守っている。従って、ダンパーや積層ゴムの強度や繰り返し耐力が問題となる。東北地方太平洋沖地震後には、残留変位が生じている鋼材系ダンパーや亀裂の入った鉛ダンパー、そしてボルトの緩みなどが確認できた。このような状況では、制震や免震の効果は以前より低下している恐れがあり、早急な修理や交換が必要な場合もある。特に、強い余震を伴う地震の場合には致命的ともなりかねないことから、地震直後の応急点検は重要である。現時点では、繰り返し振動による健全性評価や地震後の残余耐力の評価基準や評価方法が明確になっておらず、今後の重要な課題である。

また、東北地方太平洋沖地震は、首都圏の超高層ビルが長時間

にわたって大きく揺れた初めての事例となった。新宿の超高層ビル群は、約13分間にわたり、最大で108cmの振幅で揺れた。この様子は、ビデオに撮影され動画投稿サイトで見ることができる。首都圏では、「長周期地震動」を伴う余震も観測され、図表20は、3月12日の午前3時59分に起きた余震の新宿における地震動である。この余震では、地震動加速度自体はあまり大きくはなかったが、図表20の65秒から110秒までの時間で、約5.6秒周期の「長周期地震動」が明確に観測されている。

日本で、「長周期地震動」が注

目されるようになったきっかけは、2003年十勝沖地震の時に、苫小牧市のコンビナートでスロッシング（タンク内で石油が共振する現象）で溢れた石油による火災であった。2004年新潟県中越地震や2007年新潟県中越沖地震では、首都圏での「長周期地震動」によって、超高層ビルのエレベーターの損傷やトラブルが発生した。また、1964年の新潟地震の時の新潟市での石油タンク火災も、当初は地盤の液化化によるスロッシングが原因と考えられていたが、現在では、「長周期地震動」が原因と考えられている。

1967年完成の霞ヶ関ビルを嚆矢とした日本の超高層建物は、今回の大地震に遭遇するまで大きな震災に見舞われる経験を持っていなかった。しかもこうした超高層建物は、東京（首都圏）・大阪・名古屋に多く存在し、長周期地震動が起きやすい堆積層地盤上にある。長周期地震動と超高層建物の組み合わせは、地震災害研究にとっても未知の領域と言えよう。今回の経験を踏まえた上で将来の被災軽減を図ることは、今後の研究課題の中でも重要な位置づけにある。

7 まとめ

本稿では、東日本大震災（東北地方太平洋沖地震）の被害の様相を、阪神・淡路大震災（兵庫県南部地震）と比較し、その違いを明らかにすることにより、今後の地震防災への教訓を読み取る事を目的とした。

東北地方太平洋沖地震は、マグニチュードも大きく、震度6弱以上の地域も広範囲に及ぶ巨大地震であったが、それにも拘わらず、兵庫県南部地震に比べて、揺れによる建物の被害率は小さかった。この理由は、地震動の振動周期の違いによって説明できる。東北地方太平洋沖地震では、周期1秒以下の「短周期地震動」が顕著であり、周期1~2秒の「やや短周期地震動」の割合が低かった。「短

周期地震動」は、人体には大きく感じられ、建物の壁材や天井材などに被害をもたらすものの、建物の全壊や半壊といった構造被害への影響は少ない。一方、兵庫県南部地震では、「やや短周期地震動」が卓越し、多くの建物倒壊の原因となった。

また、東北地方太平洋沖地震およびその余震では、首都圏で「長周期地震動」が観測され、超高層ビルが大きく揺れた。今回の地震では、免震・制震装置に一定の効果は見られたが、長周期地震動に対する安全性は未知の領域であり、今後検討すべき課題は多い。

周期1~2秒の「やや短周期地震動」、そして、周期2秒を超える「長周期地震動」、これらも

たらず被害の対象や様相は、それぞれに全く異なる。こうした周波数帯に依存する影響の相違は、被害の様相をますます多様化させることになる。東日本大震災で地震動による建物被害が小さかったことは、ある意味の僥倖であり、将来、同程度の震度に見舞われた時、必ずしも今回と同様の被害様相となるわけではないことを考慮すべきである。予測震度に基づく地震防災計画は、あくまでもひとつの目安であり、気象庁震度階という一指標だけでは全ての被災状況が把握しきれない場面をも想定しなければならない。

最後に、講演や資料提供をして頂いた境有紀氏と境茂樹氏に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) (独)防災科学技術研究所ホームページ：http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec9.5.html
- 2) (独)防災科学技術研究所 K-NET：<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/gk/overview.html>
- 3) 平成23年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第一次調査（速報）：二本松市、郡山市、福島市におけるRC造、鉄骨造及び非構造部材を中心とした被害：<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/110314kentiku.pdf>

- 4) 平成 23 年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第一次調査：白河市、須賀川市、仙台市における RC 造、S 造、非構造部材を中心とした建築物被害調査（速報）：<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/110324kentiku3.pdf>
- 5) 芦屋市／建築物の被害と復旧（芦屋市ホームページ）：<http://www.city.ashiya.lg.jp/bousai/shinsai/bunseki.html>
- 6) 阪神・淡路大震災 芦屋市の記録 '95～'96（芦屋市発行）
- 7) 日本付近で発生した主な被害地震（平成 8 年～平成 23 年 12 月）、気象庁ホームページ：
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/higai/higai1996-new.html>
- 8) 阪神・淡路大震災について（確定報）、平成 18 年 5 月 19 日、消防庁：
<http://www.fdma.go.jp/data/010604191452374961.pdf>
- 9) 岡田義光、震度 6 が一日に 3 回をめぐって、地震ジャーナル、36、2003.
- 10) 震度で見た地震回数と M で見た地震回数（独）防災科学技術研究所ホームページ：
http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec1.3.html
- 11) 境有紀、地震動の性質と建物被害の関係、日本地震工学誌、2009 年 9 号、p12-19.

執筆者プロフィール



市口 恒雄

安全・システムユニット リーダー
 科学技術動向研究センター 客員研究官
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

理学博士。専門は半導体、超伝導、磁性体の物理。サブミリ波やマイクロ波を用いた物性測定を中心に、米国の大学や日本の電機メーカーで研究に従事。現在は、当研究センター常勤として、科学技術予測や科学技術動向研究に従事。



松村 正三

科学技術動向研究センター 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、地震活動バタンの変化からスロースリップや準静的滑りにもとむる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。

宇宙からの災害リスクを 低減する宇宙状況認識

辻野 照久
客員研究官

1 はじめに

近年、宇宙環境に起因する災害リスクへの関心が高まっている。

各分野の専門家がそれぞれ宇宙環境を監視するだけでなく、広く一般にも宇宙環境がもたらす災害リスクの発生確率や防護対策などを周知していく活動が世界的に重視されるようになってきた。このような活動を「宇宙状況認識」(SSA=Space Situational Awareness)という。SSAは「宇宙環境監視」と訳されることがあるが、「宇宙状況認識」には監視した結

果を一般向けに周知する活動という意味があり、本稿では「宇宙状況認識」を用いる。

地上に災害をもたらす危険性がある宇宙からの災害リスク(以下「宇宙環境リスク」という。)は3種類に大別できる。①「宇宙デブリ」(地球を高速で周回する人工衛星やその残骸の衝突・落下による実用衛星や地上への悪影響)、②「宇宙天気」(太陽活動に起因する磁気嵐や太陽風などが軌道上の衛星や地上インフラに対して及

ぼす悪影響)、③「地球近傍天体」(地球軌道と交差する楕円形の太陽公転軌道を周回する小惑星や彗星などが地球と衝突する危険性)の3つである。

本稿では「宇宙状況認識」活動の主な対象となる「宇宙デブリ」、「宇宙天気」および「地球近傍天体」について、想定されるリスクと対応方策の研究動向について述べる。

2 宇宙環境リスクとは

宇宙環境および変動監視については、本誌2004年10月号において、太陽活動に伴う地球近傍の宇宙天気の悪化による衛星への悪影響や宇宙デブリの危険性および観測・防御・低減などの対策、さらに地球近傍小惑星の衝突の可能性などの概要を示した¹⁾。以下は主にその後の状況変化を踏まえ、地上に災害をもたらす危険性がある宇宙環境リスクのそれぞれの状況と危険性について述べる。

2-1

宇宙デブリのリスク

(1) 宇宙デブリの状況

2012年1月9日付の「Satellite Situation Report」²⁾によれば、2011年末現在の軌道上物体の登録数は38,044個で、そのうち21,723個は既に消失している。特に数の多いロシア・米国・欧州宇宙機関・フランス・日本・中国・イン

ドの物体数を図表1に示す。このようにカタログ化されている宇宙飛行物体は概ね10cm以上の大きさである。それ以下の大きさの微小な宇宙デブリの数は数十万個にも及ぶと見られ、秒速8km近い高速で地球を周回しているため1cm程度の物体であっても衝突すれば大きな衝撃を与える危険性がある。

NASAが2010年に行った調査によれば、宇宙開発が開始されてから実施された4700件以上の

宇宙ミッションのうち、10件のミッションで発生した宇宙デブリが、カタログ化された全デブリ数の1/3を占めているという。デブリを最も多く発生させたミッションは、中国の気象衛星「風雲1C (FY-1C)」(国際標識番号1999-025A)で、2007年1月11日の衛星破壊実験により2011年6月までに3,217個のデブリが発生し、2012年1月時点でそのうち3,078個が軌道上に留まっている。これは、軌道上にあるペイロード以外の飛行物体のうち約24%を占める。過去に打ち上げた衛星数が非常に多いロシアと米国の方が中国よりデブリ数が多いことは当然であるが、中国はたった1機の衛星を破壊することでこれほどのデブリ増加をもたらしたことは異例の事態であると言える。

軌道上のロケット機体の数をR、衛星由来のデブリ(運用終了したペイロードも宇宙デブリと呼ばれる場合があるがここでは除く。)の数をD、軌道上物体の合計をSとしたとき、 $(R+D)/S$ が軌道上物体に占めるペイロード以外の物体の割合を示す。中国は衛星破壊実験で生じたデブリが非常に多いためにこの割合が約97%であり、極めて高い。これに対し、欧州宇宙機関(ESA)や日本のデブリの割合は世界平均より相当低い。米国・ロシア・フランス・インドなどは世界平均程度である。なお、ロケット機体は衛星打ち上げに伴って必ず発生するものであり、ペイロードの増加に伴って増加することは現時点ではやむをえない。ロケット機体の処置も含め、宇宙デブリの発生を抑制し、安全に消滅させることは宇宙活動を行う各国に共通する今後の課題である。

(2) 危険性の高い宇宙デブリの事例

a) 衛星破壊実験による大量の宇宙デブリ発生

2007年1月11日に中国はミサイルにより気象衛星「風雲1C」(運用終了)の破壊実験を行った。ミサイル発射を行った人民解放軍(PLA)は、衛星が跡形もなく消滅すると考えて爆破を試みたと思われる。しかし、実際には軌道上の飛行物体数を激増させただけで、消滅した破片はほとんどなかった。高度800km近辺の極軌道には各国の地球観測衛星が多数周回しており、この衛星から生じた宇宙デブリと衝突する危険性が高まったことから、他国の宇宙機関から非難されている。

b) 原子炉衛星の落下と残存状況

1978年1月24日、旧ソ連の海洋監視用レーダ衛星「コスモス954」がカナダ北西部の雪原に落下した。人的被害はなかったが、搭載されていた電源用原子炉の放射性物質が付着した部品が多数飛散し、カナダ政府は回収および除染に当時で約5億円の費用を要した。そのような被害に対し旧ソ連はカナダに約1億円を賠償した。同型の原子炉搭載衛星はソ連崩壊

直前の1988年までに合計37機打ち上げられており、消失した衛星は5機しかなく、32機が依然として周回を続けている。米国もプルトニウムを燃料とする原子力電池を搭載した衛星を多数打ち上げており、一部は惑星探査機で地球と遠く離れているが、現在も地球を周回しているものが多数ある。いずれも当分落下することはないと言われているが、監視し続ける必要はある。

c) 運用終了した大型衛星の落下

原子炉を搭載していない場合でも制御不能な大型衛星の落下は大きな災害につながる危険性がある。図表2に示すように2011年9月以降、使命を終えた大型衛星の落下が相次ぎ、宇宙から大きな部品が高速で地上に落ちてくるという危険な状況が相次いだ³⁾。特に宇宙デブリ対策が十分でなかった1990年代以前に打ち上げられた大型衛星は落下時のリスクが高く、今後は米国のX線天文衛星「RXTE」の落下が2014年以降と予想されている。図表2に最近の大型衛星の落下例と今後の予想を示す。

このような宇宙からの落下物による災害リスクは、宇宙活動活発

図表1 2011年末の軌道上物体登録数

国・組織	軌道上物体					消滅物体				合計
	ペイロード	ロケット機体 R	衛星由来デブリ D	小計 S	(R+D)/S*	ペイロード	ロケット機体	衛星由来デブリ	小計	
米国	1112	653	3111	4876	77.2%	794	612	4052	5458	10334
ロシア	1457	985	3674	6116	76.2%	2468	2729	8958	14155	20271
ESA ^注	48	6	38	92	47.8%	9	7	15	31	123
フランス ^注	55	129	308	492	88.8%	8	62	607	677	1169
日本	128	43	35	206	37.9%	28	57	140	225	431
中国	120	66	3430	3616	96.7%	57	90	556	703	4319
インド	50	15	114	179	72.0%	9	10	267	286	465
その他	630	31	83	744	16.0%	61	11	116	188	932
計	3600	1928	10793	16321	78.0%	3434	3578	14711	21723	38044

出典：参考資料²⁾を元に科学技術動向研究センターにて作成
* (R+D)/Sは軌道上物体に占めるペイロード以外の物体の割合を表す。

注 欧州のロケットはESAが開発してフランス企業が打ち上げているため、ESAの衛星に限りESAのロケットとみなし、ESAが関係しない衛星はフランスのロケットとみなしている。

化の負の側面であり、宇宙活動を行う国の責任として、安全性に対する取組みを真摯に行うことが国際的に求められている。特に、衛星の落下により他国に災害を及ぼした国は、宇宙条約により賠償責任を負うことを忘れてはならない。

d) 宇宙空間での衛星衝突

衛星や宇宙デブリの数が増えていくと、宇宙飛行物体同士の衝突の可能性も高まる。なかでも運用中の衛星が衝突により破壊されれば、地上での活動にも重大な支障を及ぼす。運用中の衛星同士の衝突事故はこれまでに発生していないが、一方が運用中の衛星であったケースとして、2009年2月10日に米イリジウム・サテライト社の通信衛星「イリジウム33」とロシアの運用終了した軍事衛星「コスモス2251」がシベリア上空で側面衝突した事故がある。

衛星同士の衝突を事前に予測することは困難で、完全に防護しようとするには膨大な時間と費用がかかる。イリジウム社の場合は、代替衛星を打ち上げた方が費用的に安くなると割り切って、衝突予測を行っていなかった。また、同社の通信衛星は66機以上で運用されているため、1機を喪失しても予備機の利用などにより通信サービスへの影響は少なかったとみられる。

(3) 宇宙デブリが増え続けた場合のリスク

近年の宇宙デブリの増加傾向を図表3に示す。このグラフはSatellite Situation Report 2006年～2012年の毎年1月の米国・ロシア・中国・その他の国のそれぞれの宇宙デブリ数を積み上げたものである。2007年の衛星破壊実験による中国の宇宙デブリ数の急増、2009年の衛星衝突による米ロの宇宙デブリ数の急増がはっきりとわかる。これまでのような

ペースで宇宙デブリが増え続ければ、いずれ宇宙デブリ同士の衝突によってさらに宇宙デブリが増加するという時期を迎える。

全米科学アカデミー（NAS）の全米研究会議（NRC）は、NASAに対し、宇宙デブリに対する戦略計画を立てデブリ除去や危険性軽減のための対策を講じるべきであると提言した報告書を、2011年9月に発表した。NRCは、NASAが取るべき具体的な対策案として、宇宙機の不具合情報の記録・分析・報告・共有を提案するとともに、宇宙デブリに関する一般公開議論も行い、長期的な社会問題とみなして取り組むべきであるとしている。

2-2

宇宙天気のリスク

(1) 宇宙天気と宇宙天気予報

地球の周囲は静穏な環境ではなく、粒子や放射線が飛び交い、電磁気が作用し、激しく変化する空間である。地上では大気に守られてこのような危険が大幅に緩和されているものの、人類の生活に全く影響がないとは言えない。このようにさまざまに変化する地球周辺の状況を「宇宙天気」と呼んでいる。

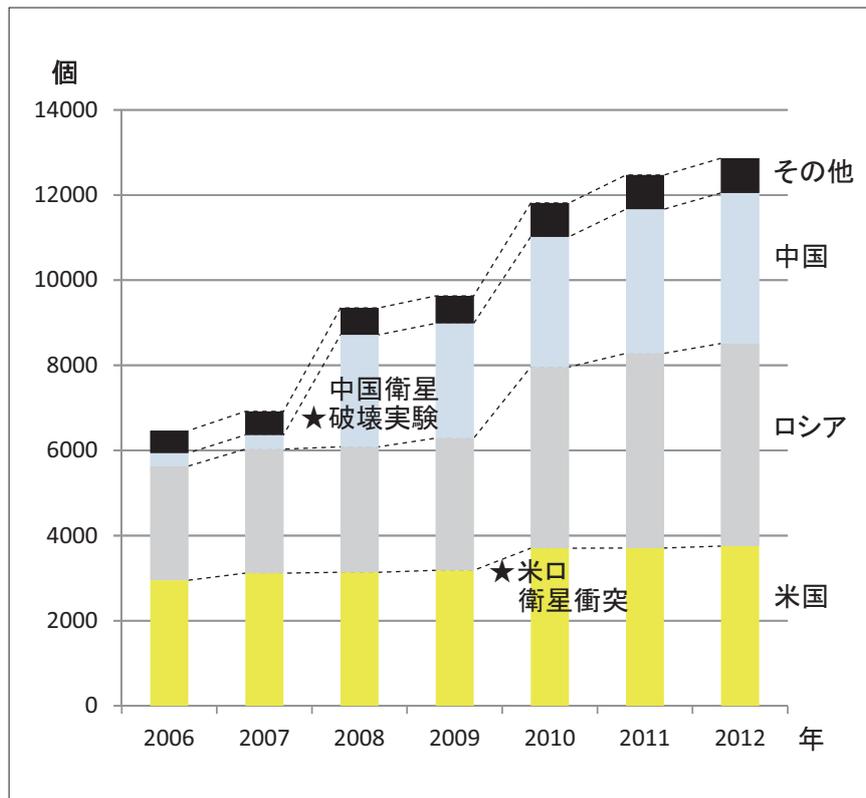
宇宙天気の指標となるものは、主に太陽風の速度やプラズマの量

図表2 最近の大型衛星の落下と今後の落下可能性

衛星保有国	衛星名	打上げ年	落下日	落下場所
米国	UARS	1991年	2011年9月24日	南太平洋
ドイツ	ROSAT	1990年	2011年10月23日	ベンガル湾
ロシア	Fobos-Grunt	2011年	2012年1月15日	太平洋チリ沖
米国	RXTE	1995年	2014～2023年	—

出典：各種資料を元に科学技術動向研究センターにて作成

図表3 衛星破壊や衝突で急増する宇宙デブリの状況



出典：Satellite Situation Report 2006年～2012年の毎年1月のデータから科学技術動向研究センターにて作成

である。太陽風に含まれるプラズマ電荷が地球磁気圏と反応して極域にオーロラが発生したり、電位差が生じたりする。以前は地上でモニタリング可能な地磁気や電離層の状況の観測を行うことが中心であった¹⁾が、近年、宇宙科学衛星による太陽観測が可能になり、数時間後から数日後まで先の太陽活動を予測できるようになってきた。

宇宙天気予報とは、このような太陽の活動や宇宙環境の変動を観測して、宇宙天気を予測し、研究機関から一般に向けて通報する活動を言う。

(2) 宇宙天気の変動による地上への悪影響

宇宙天気を大きく左右する太陽の活動は2013年に極大期を迎えると予測されてきたが、既に2012年早々から大規模な太陽フレアの警報が出されるなど注意が必要な時期に入っている。宇宙天気が最も悪い時には、宇宙空間で運用中の人工衛星の太陽電池パネルを損傷させたり、衛星内部の電子回路に障害を及ぼす恐れが高くなる。また、送電線など地上の施設への電磁的な影響が出ることもある。

太陽フレア（太陽表面の爆発現象）による衛星への影響としては、2006年に欧州宇宙機関の多

数の衛星において観測機器が電源オフになったという事例がある。通信放送衛星・地球観測衛星・航行測位衛星などの実用衛星の場合は、衛星の機能停止が地上の社会インフラへの影響に直結する。

2012年3月6日に最近5年間で最大規模の太陽フレアが発生し、米海洋大気庁（NOAA）は衛星や電波通信などに影響を与える可能性があるとの予報を出した。

2-3

地球近傍天体のリスク

(1) 地球近傍天体の状況

地球近傍天体（NEO=Near Earth Objects）とは、主に地球の公転軌道と交差するような楕円軌道を飛行する地球近傍小惑星（NEA=Near Earth Asteroid）、彗星（Comet）、他の惑星から飛来する隕石（Meteoroid）などの総称である。火星と木星の間に多数存在する小惑星の中で、地球軌道に接近することがあるNEAは数万個あるとされている。地球との衝突には至らないが、月程度の距離で地球付近を通過する可能性がある小惑星の把握に関しては各国でそれぞれ行っている。

2011年11月に月までの距離の

5分の4に相当する地球上空を直径400mのNEAが通過した。この規模の小惑星接近は30年前にもあり、次に予想される同規模のNEA通過はNASAによれば2028年頃であると予測されている。

地球の大気圏に突入して燃え尽きるような、より小型のNEAは非常に多く存在する。最近では小惑星「2012 BX34」が2012年1月27日に地球から約59,000kmの距離を通過したことが観測されている。これは地球へのニアミスの一例である。

さらに小型の隕石はしばしば地球に落下している。2012年1月にはモロッコに火星の一部と見られる隕石が落下し、アリゾナ大学などが高額で買い取ったという。

(2) NEO 衝突の危険性

比較的大型のNEOが万一地球と衝突すれば、地球環境に大きな変化をもたらす。恐竜の絶滅は大型のNEAが地球に衝突したためという説が有力である。このような衝突の発生頻度は非常に低いが、地球の生物への被害は甚大である。衝突のリスクをいち早く知るためには、NEOを観測し軌道データを蓄積していく必要がある。NEO衝突の恐れがある場合はその天体の軌道を変える対策も検討されている。

3 宇宙状況認識に関する各国の政策

宇宙環境リスクを低減するため、主要な宇宙開発国は宇宙状況認識（SSA）に関して政策を打ち出しはじめている。欧米の宇宙関係者の間でSSAに対する関心が高まったきっかけは、2007年に中国が行ったミサイルによる衛星破壊実験である。

人工的な宇宙環境リスクの低減については、欧州が提唱する「行

動規範」（CoC=Code of Conduct）が国際協力枠組みとなるものであり、その枠組みの下で宇宙状況認識の活動を米国・欧州・ロシア・日本・中国・インドなどの宇宙先進国が協調して推進することによって現状からの改善が図られる。宇宙天気や地球近傍天体など自然由来の宇宙環境リスクに関しては国際的に共同観測や情報共有

を行っていくことで対処能力が高まる。

米国と日本は前記の3種類のリスクについて、異なる組織に分かれて観測や検討がなされているが、現在のところ政策的にはSSAの対象は宇宙デブリだけである。欧州は宇宙デブリと宇宙天気を合わせてSSAプログラムを予算化しており、地球近傍天体に

についてはまだSSA政策に統合化されていない。中国は2011年宇宙白書⁴⁾で初めて3種類の宇宙環境リスクに取り組むことについて言及した。いずれの主要国も今後は3種類のリスクへの対処方を総合的に構築し、国際的な協調を行っていくべきであろう。以下に各国・地域のSSA取組み状況をそれぞれ示す。

3-1

欧州におけるSSA政策

(1) 欧州宇宙機関のSSAプログラム

欧州では、欧州19カ国(2012年にルーマニアが19番目に加盟)と準加盟国カナダが参加する欧州宇宙機関(ESA)が、ロケット・衛星の開発や有人宇宙飛行といった主要な宇宙活動に横並びするプログラムとして、「宇宙状況認識(SSA)」を2009年から予算項目に掲げて宇宙デブリ対策と宇宙天気予報を推進している。予算規模としては、準備期間に当たる3年間で2009年の900万ユーロからスタートし、2010年は約1,000万ユーロ、2011年は約1,600万ユーロと着実に増加させてきた。しかし2012年予算⁵⁾では1,540万ユーロに減少し、準備プログラム後の本格的な活動開始の初年度としては控え目な額となっている。

現在までに、静止軌道の宇宙デブリ観測用の望遠鏡をスペインに設置し、また宇宙天気観測の欧州ネットワークを立ち上げており、将来のSSA活動に活用されるものとみられる。

ESAでは地球近傍天体に関しては今のところSSAとは別のものとして扱っているが、地上ベースの施設やデータ配信などをSSAと連携させていくことが提案されている⁶⁾。

(2) EUの取組み

欧州連合(EU)とESAは定期的に宇宙理事会(合同閣僚級理事会)を開催しており、2010年11月の第7回宇宙理事会では、欧州の宇宙資産保護のため、SSAに関する対応能力を確立する必要性があるとの認識が示された。

2011年3月、欧州委員会(EC)はEUの宇宙プログラム全体に対する欧州域内の認知度を調べるアンケートを行い、この中でSSAについては18項目の質問を設定した。27カ国608人から回答があった。まず、太陽フレアや宇宙デブリによる衛星障害について認識がある人は約97%にもなった。そのような現象が影響を受ける分野について5段階評価(最も影響が大きいという評価を5点とする)で4点以上とする回答者の割合が多かったのは、航空機・自動車用航行測位システム(73%)や天気予報や地球観測衛星(69%)などであった。また57%の回答者が、EU自身でSSAの対策機能を保有すべきであると回答した。

一方EUは、世界各国の宇宙活動の秩序を保つため、多国間の協力枠組みである「宇宙活動の国際行動規範」(CoC=Code of Conduct)を提唱し、宇宙の安全に係わる諸問題について米国・ロシア・日本など欧州外の主要宇宙開発国の支持を取り付け、この行動規範を世界の共通認識としようとしている。米国とオーストラリアは既にこのような取組への参加を表明しており、日本も2012年1月25日に玄葉光一郎外相がEU主導の行動規範の策定作業に参加する方針を表明した。宇宙開発利用の国際ルールを策定し各国が協調して実施することは、人工物由来の宇宙環境リスクの低減に寄与するものと考えられる。

(3) 欧州各国の取組み

欧州の宇宙活動の特徴は、1つ

の国ではできないような大型プロジェクトを複数の加盟国の資金拠出によってESAが実施する一方で、加盟各国は自国の宇宙機関が独自の国内宇宙プログラムを実施するという重層構造になっていることである。加盟各国は従来からSSAに関連する取組みを独自に行ってきたが、各国間の協力を行うことはなかった。

各国独自の取組みの例としては、宇宙飛行物体を追跡するため、フランスの宇宙機関であるフランス国立宇宙研究センター(CNES)が運営するROSACE(静止軌道観測用光学望遠鏡)およびTAROT(高速追尾型望遠鏡)、ドイツのTIRA(FGANレーダ)、ノルウェーのGlobus(宇宙監視レーダ)、スウェーデンのEISCAT(宇宙監視レーダ)などの設備が設置され、宇宙デブリの観測が行われている。またフランス国立航空宇宙研究所(ONERA)が開発したレーダネットワークを仏空軍が宇宙デブリ観測用として運用している。

今後各国は自国の設備の維持とESAへの拠出を二重に負担するのではなく、ESAに拠出した資金によって全体的にバランスのとれた欧州全体のSSA関連施設を整えるという方向に進むであろう。各国の設備については、主センターとしての運用継続、ネットワーク化による役割分担、廃止による経費節減などの仕分けが行われることになる予想される。

3-2

米国の新宇宙政策の中でのSSA政策

米国では宇宙デブリの観測を国防総省(DoD)が実施し、宇宙天気の観測を商務省(DOC)管轄の海洋大気庁(NOAA)が実施し、地球近傍天体の観測を米国航空宇

宙局（NASA）や大学などがそれぞれ実施している。

2010年に発表されたオバマ大統領の新宇宙政策⁷⁾の中では、世界中の国々による宇宙の平和利用を可能にするため、米国が宇宙におけるリーダーシップを発揮し、多くの人々が宇宙から恩恵を受けられるよう、宇宙の安定した環境を維持することを宇宙活動の方向性とする述べた。また、宇宙での無責任な行動が世界の人々に影響を与えることを警告し、すべての国々に対し、次世代の宇宙利用・探査の機会を引き継ぐために責任ある行動をとることを求めている。米国も自ら宇宙での責任ある行動をとることを約束している。SSAに関しては、人為的な活動の結果である宇宙デブリに焦点を当て、米国の能力を強化し、他国および産業界と協力して共通認識として高めていく。

2012年1月17日、米国政府は宇宙デブリ対策を中心に安全な宇宙開発・利用の多国間の枠組み作りのため、EUと連携し、「宇宙活動の国際行動規範」の策定作業を進めるとの声明を発表した。

3-3

日本の宇宙基本計画における宇宙デブリ政策

日本ではまだSSAの概念が宇宙基本計画⁸⁾の中で定着していない。宇宙デブリの観測や低減対策などを担っている組織は(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)、宇宙天気を観測し予報を行っている組織は(独)情報通信研究機構(NICT)、地球近傍天体を研究する組織は(大)自然科学研究機構国立天文台(NAO)やNPO法人などに分かれていて、総合的な取り組みは行われていない。今後の宇

宙基本計画見直しにおいて、SSAの対象を総合化して宇宙環境リスクに対処できるようになることが望ましいと考えられる。

宇宙デブリに関してのみは、2009年に策定された宇宙基本計画において、「宇宙環境の保全」として今後の課題が以下のように3つ示されている。

(a) デブリの分布状況把握

デブリの分布状況は、現在JAXA等が保有している宇宙観測機能によりデブリの監視を実施しているが、例えば周回軌道上のデブリについてはメートル級の大きさのデブリを識別できる程度であり、衝突により人工衛星の破壊を招く恐れのあるサブメートル級のデブリを詳細かつ高精度に把握する能力を有していない。今後、諸外国の観測データとの連携も図り、周回軌道上でサブメートル級のデブリの詳細な軌道位置等を把握することを目指す。

(b) デブリ発生極小化

デブリ発生極小化のため、運用中の人工衛星からの部品類飛散の抑止や、運用終了後の人工衛星の爆発抑止などが有効である。日本は、JAXAが独自にデブリを低減するためのガイドラインを作成して遵守している。日本は、デブリ発生を低減するための国際的な枠組み作りに積極的に参加するなど国際的な連携を確保することにより、宇宙の環境の保全を推進する。さらに、人工衛星のデブリ防護策や、運用終了した後に大気圏で燃え尽き地上への被害を局限するような衛星等についても研究を推進する。

(c) デブリの除去措置

デブリの増加に伴うデブリ同士

の衝突機会の増大によりデブリが自然発生的に増加する可能性が国際機関間宇宙デブリ調整委員会(IADC)等で指摘されている。日本では、デブリの捕獲や軌道から除去する技術(捕獲用ロボット技術等)は未だ研究段階にある。今後、国際的な連携を図りつつ、デブリの捕獲や軌道から除去する技術を小型衛星等を用いて宇宙で実証することを目指した研究を推進する。

3-4

中国宇宙白書におけるSSA政策

中国は2011年に米国を上回る19回のロケット打上げを行い、ロシアに次ぐ世界第2位の打上げ国となった。米国や欧州は中国の宇宙開発活動の急速な活発化に対し、SSAの観点から警戒感を示している。中国は第12次5カ年計画(2011年~2015年)の開始に当たり2011年12月に2011年版宇宙白書「2011中国的航天」を発表し、この中で有人宇宙飛行や月探査などの主要プロジェクトと並んで、宇宙デブリ・宇宙天気・地球近傍天体に関する取組みについて言及している。特に宇宙デブリに関しては具体的な対策の計画を示している。欧米がSSAへの関心を高めたきっかけが中国のミサイルによる自国衛星破壊実験であったことを想起すると、中国が宇宙デブリに関して前向きな取組みを行おうとすることは欧米の反応への配慮とも受け取れる。これが、衛星破壊実験による大量の宇宙デブリ発生のような行為を再発しないという意思表示であるとするれば、国際協調への足がかりとして歓迎すべき姿勢であると言える。

4 宇宙環境リスクへの対策

今後、宇宙環境リスクの存在をより多くの国が認識し、的確な政策に基づいてリスクへの対処を実施することが望ましい。3種類のリスク対応に関して共通的に言えることは、まず対象の観測態勢を整備し、各リスクに対処する技術能力を開発していくことが必要であるということことである。

4-1

宇宙デブリの対策

宇宙デブリに対しては、現時点では多くの国々で観測や防御・低減の対策がある程度講じられていると言える。特に危険な大型デブリの除去についてはまだほとんど対策がない状態である。

(1) 宇宙デブリの観測

米国は一定以上の大きさ以上の宇宙デブリを常時観測している。米戦略司令軍 (US STRATCOM) は常時 800 機の運用中の衛星と、2 万個以上の宇宙デブリの追跡を行い、可能な限り世界各国にも追跡情報を公開している。それでも追跡対象外の宇宙デブリははるかに数が多く、衛星に影響を与えうる宇宙飛行物体の追跡を行うためには人員が大幅に不足している状況である。しかも米国以外で現在の米国以上の衛星追跡を実施できる国は皆無である。

日本でも比較的早い時期から独自の観測施設を設置し運用してきた。JAXA は(財)日本宇宙フォーラム (JSF) が保有する岡山県の宇宙デブリ観測施設を利用して、光学による静止軌道の宇宙デブリの日々の状況や、レーダによる低軌道周回衛星の軌道決定などを

行っている。しかし、JSF の施設は既に完成以来 6 年～8 年程度経過しており、性能面でも不十分である。観測施設の増設や性能向上を国際的な連携によってどのように補っていくかが今後の検討課題である。

ただし、欧州・ロシア・中国などでも宇宙飛行物体の光学観測やレーダ観測を行っており、地理的特性によってその国独自の観測データが取得できる。米国の観測能力の限界を補うためにも国際的な観測協力が活発に行われるようになることが望ましい。

(2) 宇宙ステーションや衛星の宇宙デブリ防御対策

NASA は宇宙ステーションや実用衛星を宇宙デブリから防御する対策を検討するプログラムを実施している。中心的な事務所はテキサス州にあるジョンソン宇宙センター (JSC) 内にある⁹⁾。宇宙デブリ防御に関して現在の NASA の最大の関心事は常時 3 名から 6 名の宇宙飛行士が滞在する国際宇宙ステーション (ISS) の安全な運行を脅かされないことである。ISS ではごく小さい宇宙デブリの衝突に対してはバンパーで構造的に防御しているが、中型・大型の宇宙デブリを回避するために軌道上昇・下降などの制御を日常的に行っている。ロシアや欧州の物資補給船が ISS ドッキング中に軌道高度変更の推進力として利用されている。

(3) 宇宙デブリの低減対策

宇宙デブリの数を減らす対策としては、2007 年 2 月の国際連合総会において、国際機関間宇宙デブリ調整委員会 (IADC) が勧告した「宇宙デブリ低減ガイドライ

ン」が決議された。衛星を打ち上げる各国は、このガイドラインに基づいて低減に必要な措置を実施している。日本ももちろん、このガイドラインを踏まえて衛星開発を行っており、宇宙デブリ対策を実行している。

米ロと並ぶ主要宇宙国になりつつある中国も IADC に参加しており、2011 年中国宇宙白書では衛星やロケットにより生じる宇宙デブリを減少させる対策を掲げている。中国が積極的に宇宙デブリ低減対策を実施しようとしていることを示す事例としては、2011 年 9 月に打ち上げた宇宙ステーション実験機「天宮 1 号」の運用計画があげられる。「天宮 1 号」は 2 年間のミッション期間中に 3 機の神舟宇宙船とドッキングし、ミッション終了後には機体を安全な場所に落下させる計画である。

(4) 衛星落下リスクを避けるための宇宙デブリ除去技術の開発

衛星落下のリスクに関しては、危険な衛星を自然落下以前に除去することが最も安全な対策である。除去の方法については吸引による捕獲やレーザ利用による軌道変更などさまざまなアイデアが考えられている。強制的に落下させる方法として、地上から制御可能なチェイサー衛星(捕捉する側)をターゲット衛星(捕捉される側)と同じ軌道に打ち上げてドッキングさせ、地上から制御可能なチェイサー衛星の推進力でターゲット衛星と一緒に再突入軌道に軌道変更することにより、安全な場所に計画的に落下させることが可能になる。

2012 年 2 月にスイスの大学が、打上げ済みの 1 kg 級の超小型衛星を捕獲し大気圏で燃え尽きさせ

る実験を行うための、同サイズの捕獲衛星を開発する構想を発表した。規模は非常に小さいものの、具体的な宇宙デブリ除去対策の一例を示したものとしてメディアの注目を集めた。日本ではJAXAの研究開発本部未踏技術研究センターが、宇宙デブリを捕獲し軌道上から除去するシステム技術の研究開発を行っている。このようなアイデアは、日本で毎年行われている「衛星設計コンテスト」において、タコの足の機構を真似た吸着型の腕でターゲット衛星を捕捉するチェイサー衛星の概念が1990年代に提案されて以来、連続と続いている。日本が得意とするランデブー技術やロボット技術を活用して宇宙デブリ除去をより安全に行うことができるようになれば、世界の宇宙開発に対する大きな貢献となるだろう。

4-2

宇宙天気変動の観測と対策

地上の地磁気観測や電離層の状況などから宇宙天気を間接的に知る活動は、古くから行われてきた。以前は無線通信の雑音対策などが中心であったが、最近では人工衛星・航空機・送電線・パイプラインなど地上の活動に必須のインフラへの影響が顕著になったため、宇宙環境リスクとして衛星搭載の太陽電池パネルや電子機器の障害発生を防ぐ対策が必要になってき

ている。

(1) 太陽観測衛星による観測

太陽活動の変化を早期に察知する上で、衛星による太陽観測の機能が充実してきた。近年、ラグランジュ点に配置した太陽観測衛星などにより直接太陽活動を観測し、宇宙天気変動の予測に利用することが主流になってきている。

図表4に米国・欧州・日本の太陽観測衛星の観測対象を示す。太陽活動の観測において、特に重力的に安定したラグランジュ点(L1、L4およびL5)に配置された米国や欧州の衛星の観測データが有効に利用されている。「STEREO」衛星は太陽の左右の側面を観測できるため、太陽の自転に伴って活発な活動を行っている場所が地球方向に向かう時期を予測できる。日本の太陽観測衛星「ひので」による観測データも世界各国の宇宙天気観測に貢献している。

(2) 各国の宇宙天気予報サイト

現在、主要宇宙開発国13カ国から、一般向けに最新の宇宙天気予報を提供するサイトが開設されている。これらはすべてユネスコの下部組織である国際宇宙環境情報サービス (ISES = International Space Environment Service) に参加し、連携して活動している。

a) 米国

米国では、NOAAの宇宙天気予報センター (SWPC = Space Weather Prediction Center) が静止気象衛星 GOES のデータなどを用い

て宇宙天気予報の情報を作成し、ホームページで日々の観測状況および今後の予測を公開している¹⁰⁾。

トップページには太陽の最新画像とともに、主要な予報として磁気嵐、太陽風、通信障害の程度を示している。磁気嵐は地磁気擾乱の振幅に応じて、静穏な場合は「None」、振幅が大きくなるに従って「Minor」(小)、「Moderate」(中)、「Strong」(大)、「Severe」(より大)、「Extreme」(極大) という6段階の予測指標が表示される。同様に太陽風であれば10 MeV以上の粒子・イオンの密度、通信障害であれば太陽X線の最大輝度に応じてそれぞれ6段階の予測指標で表示される。

b) 欧州

ESAは「ESA SPACE WEATHER WEB SERVER」でESA/NASA共同開発の太陽観測衛星「SOHO」の太陽観測画像を中心に公開している¹¹⁾。ただし、他の国の宇宙天気予報サイトに比べ、専門家向けの構成となっている。NOAAのようなわかりやすい指標は示されていない。

c) 日本

(独)情報通信研究機構 (NICT) が宇宙天気予報のホームページ「宇宙天気情報センター」(SWC)で米国衛星や日本の太陽観測衛星「ひので」などによる観測状況を毎日公開している¹²⁾。トップページには観測情報がグラフィカルな様式で要約されている。

また、一般向けによりわかりやすく解説するため、「宇宙天気ニュース」のページでは地上の天気予報とよく似た表現で、毎日の宇宙天気予報を伝えている¹³⁾。

d) 中国

国家気象局衛星気象センターに属する国家空間天気監視予警センターが、今後3日間の宇宙天気予

図表4 主な太陽活動観測衛星

衛星名	保有国/運用機関	軌道	ミッション	打上げ年	観測対象
GOES	米国/NOAA	静止軌道	気象観測	1994年以降	太陽X線画像、X線、陽子(水素イオン)、電子
SOHO	ESA/NASA	L1	太陽観測	1995年	コロナ質量放出(CME)
STEREO	米国/NOAA	L4およびL5	太陽観測	2006年	太陽の側面の活動
ひので	日本/JAXA	極軌道	太陽観測	2006年	太陽表面のコロナホール

出典：各種資料を元に科学技術動向研究センターで作成

報などの情報をホームページで公開している¹⁴⁾。

e) ロシア

ロシアではロシア科学アカデミー (РАН) に属する宇宙研究所 (IKI) が宇宙天気予報のサービスを行っている。IKI は 1965 年に設立され、火星探査機や金星探査機のプロジェクトに参加していたが、現在は地球観測や生態系などに影響しうる地球近傍の宇宙科学研究を行い、その一環として宇宙天気予報の研究と情報発信を行っている。内容としては磁気嵐のデータなどをホームページで公開している¹⁵⁾。

(3) 宇宙天気予報を利用した衛星運用者等の対策

通信放送衛星・気象衛星・航行測位衛星などの日常重要な情報を提供する衛星を運用する機関や企業は、各国の宇宙天気予報のデータを参考にして、磁気嵐などから衛星を防護するための管制を行っている。

それらを基に、太陽電池パネル表面が磁気嵐の方向に向かないように衛星の姿勢を変えることや、衛星全体を省電力のセーフモードにして最小限の機能で衛星を維持することなどの対策を行っている。

国際宇宙ステーションに滞在している宇宙飛行士に対しても、健康上の影響を受けるおそれがある場合はより安全な場所へ避難するなどの対策を行っている。

宇宙天気の影響は、宇宙空間だけでなく地上にも及ぶ。例えば電力会社では、磁気嵐のもたらす電磁誘導により、送電線に異常な電流が流れる危険を回避するよう注意している。

この他、天文観測やアマチュア無線などでも、宇宙天気の変化には注意が払われている。

4-3

地球近傍天体 (NEO) の観測と安全対策

(1) 各国の NEO 観測状況

NEO の観測も各国の天文台や衛星により活発に行われている。NEODyS (Near Earth Objects-Dynamic Site)¹⁶⁾ というホームページには、小惑星や彗星の観測を過去に行ったことがあるか現在も行っている世界各国の天文台や望遠鏡がリスト化されており、前日観測された地球近傍小惑星 (NEA) のデータを閲覧することができる。しかし、NEA を効率よく発見できる望遠鏡はあまり多くない。米国および日本の主要な施設での NEA の観測状況を図表 5 に示す。

NEODyS リストに掲載されている日本の天文台や個人の望遠鏡は 109 にも及び、全国 30 都道府県に分布している。最も活発に観測を行っているのは、岡山県の美星スペースガードセンターである。静止軌道付近の宇宙デブリの観測を行うために口径 1 m の望遠鏡に設置された CCD カメラのデータを用いて、NEA の検出を行うことができる。ただし、日本の NEO の観測は現在のところ NPO 法人や個人の自発的な活動が中心であり、本格的に実施するには公的な観測体制を整備することが必要であろう。

(2) 地球に衝突する恐れのある NEO への対策

仮にすべての NEA や彗星の軌道が観測でき、地球に衝突する恐れのある NEO の存在や衝突時期がすべて判明したとしても、現時点では具体的な対策はほとんど実施できない。しかし、衝突回避に向けた検討を既に行っている例もある。

2009 年 12 月、ロシア宇宙庁 (FSA) は 2036 年にも地球に衝突する可能性がある小惑星「Apophis」の衝突回避対策を検討する委員会を設置する計画を公表した。Apophis は直径 350 m の小惑星で、もし地球に衝突すると 50 万平方 km 程度の砂漠が生じる懸念がある¹⁷⁾。衝突回避のためには何らかの方法で軌道を変えることが必要で、その目的に特化した装置の開発も必要となるため、これは国際プロジェクトとなる可能性もあると示唆されている。

NASA は、以前のデータでは Apophis が「2036 年 4 月 13 日に地球に衝突する確率が 4 万 5000 分の 1」と発表していたが、最新のデータを使って Apophis の軌道を再計算したところ、「衝突の確率は 25 万分の 1 にまで低下した」と改めている。

前述の宇宙デブリを捕獲し安全に落下させる技術は、将来的にこのような危険な小惑星対策として必要とされる軌道変換技術に発展する可能性もある。

図表 5 主な NEA 観測施設

施設名	運用機関	国名	主鏡口径	小惑星観測数
NEAT	NASA	米国	1m	11,000 以上
Spacewatch	アリゾナ大学	米国	1.8m	20,000 以上
美星スペースガードセンター	日本宇宙フォーラム	日本	1m	約 5500

小惑星観測数は 2012 年 2 月現在

5 我が国が今後実施すべき活動

今後日本でも「宇宙状況認識」という活動を通じて宇宙環境リスクを低減する努力を払っていく必要がある。観測態勢が整ってきた現在においては、これらのリスクはもはや想定外とはいえ、人類の生存や社会インフラに重大な脅威となりうることを認識しなければならない。

しかし、欧州・米国・中国などで「宇宙状況認識」を意識した政策が打ち出されているのに対し、日本では「宇宙状況認識」の概念自体がまだ定着していない。3種類の宇宙環境リスクに対してそれぞれ異なる組織や研究グループが対応しているが、3つのリスクは互いに排他的なものではなく、たとえば宇宙デブリも太陽活動も地球近傍天体も観測できるような宇宙環境監視衛星を開発し、複数のグループが観測データを共同利用するといった連携がなされれば、相乗効果が期待できるだろう。そのため、宇宙環境リスクを総合的に把握し、その対策を実施する政策を宇宙基本計画の見直しなどの中で確立することが望まれる。特に宇宙デブリに関しては、宇宙活動の国際枠組みとなる「行動規範」について、米国・欧州・ロシア・中国などと協調して構築を推進すべきであろう。

3種類の宇宙環境リスクに対しては、それぞれ以下のような具体的

な活動を継続していく必要がある。

- (1) 増大し続ける宇宙デブリの追跡に関しては、現在主導的地位にある米国の対応能力にも限界があり、各国がそれぞれの地理的特性や技術力を活用した対策を担うことが望ましい。日本も宇宙デブリ低減ガイドラインを遵守した衛星開発を行うことはもちろんであるが、観測施設の整備やデブリ低減技術の開発などで積極的に世界をリードしていくべきである。技術的には、特に光学観測・レーザ観測ともに現状より性能を向上させることが望まれる。
- (2) 制御不能な大型宇宙デブリを捕獲し、安全な場所で落下させる技術に対しては、世界的にも研究開発の機運が出始めている。日本が既に先行しているランデブー技術やロボット技術を活用して、宇宙物体捕獲システムの実用化へ向けての研究開発を行うべきである。
- (3) 宇宙天気予報は既に社会インフラに組み込まれている実用衛星の防護や地上施設への影響を予防するための必須の情報となっており、公的に行われている定常運用を継続する必要がある。

- (4) 地球近傍天体観測は光学望遠鏡やCCDカメラなど観測機器の性能向上によりこれまで以上に効率的に実施できるようになってきているが、観測に従事する人材の育成など観測体制を整備し定常的に運用を継続していく必要がある。また、将来的に発生のある恐れがある巨大な地球近傍天体への対策は今後国際協調で検討が行われると予想され、日本も高い技術力を身につけて国際連携に積極的に参加すべきである。

以上のような施策を実施する上で、まず宇宙状況認識の世界的動向や日本にとっての必要性を理解し、宇宙状況認識活動の方向性を政策文書において定義することが早急に必要である。それとともに、宇宙環境リスク低減の活動を実際に担う人材育成に努めることも必要であると考えられる。

謝辞

本稿を執筆するに当たり、宇宙デブリに関しては(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)、宇宙天気に関しては(独)情報通信研究機構、地球近傍天体に関しては(財)日本宇宙フォーラム(JSF)の関係者より資料提供・討議をいただいたことを感謝します。

参考文献

- 1) 「宇宙環境観測・変動監視の研究動向」, 科学技術動向, 2004年10月号レポート
- 2) Satellite Situation Report, NASA ゴダード宇宙飛行センター発行
- 3) 「使命を終えた大型人工衛星の部品落下」 科学技術動向 2011年11・12月号トピックス
- 4) 2011 中国的航天: <http://tech.sina.com.cn/d/2011-12-29/10366579924.shtml>
- 5) ESA Space for Europe—Funding 2012年1月10日: http://www.esa.int/esaMI/About_ESA/SEMNQ4FVL2F_0.html

- 6) Space Situational Awareness and Near Earth Object (NEO), Detlef Koschny (ESA), 2008年7月：
http://www.cdti.es/recursos/doc/Programas/Aeronautica_espacio_retornos_industriales/Agencia_Espacial_Europea/44046_3073072008122021.pdf
- 7) 米国新宇宙政策 Statement by the President on the New National Space Policy：
<http://www.whitehouse.gov/the-press-office/statement-president-new-national-space-policy>
- 8) 宇宙基本計画 2009年6月2日 宇宙開発戦略本部
- 9) NASA/JSC Orbital Debris Program Office のホームページ：<http://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/index.html>
- 10) 米国海洋大気庁の宇宙天気予報サイト：<http://www.swpc.noaa.gov/>
- 11) 欧州宇宙機関の宇宙天気予報サイト「ESA SPACE WEATHER WEB SERVER」：<http://www.esa-spaceweather.net/>
- 12) 情報通信研究機構の宇宙天気予報サイト：<http://swc.nict.go.jp/contents/index.php>
- 13) 「宇宙天気ニュース」のページ：<http://swnews.jp/>
- 14) 中国気象局の宇宙天気予報サイト：<http://www.nsmc.cma.gov.cn/NewSite/NSMC/Channels/100009.html>
- 15) ロシアの科学アカデミー宇宙研究所の宇宙天気予報サイト：
<http://spaceweather.ru/content/extended-geomagnetic-storm-forecast>
- 16) NEODyS のページ：<http://newton.dm.unipi.it/neodyS/>
- 17) ロシア通信 (RIA Novosti) の記事による

執筆者プロフィール



辻野 照久

安全・システムユニット
科学技術動向研究センター 客員研究官
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

専門は電気工学。旧国鉄で新幹線の運転管理、旧宇宙開発事業団で世界の宇宙開発動向調査などに従事。現在は宇宙航空研究開発機構国際部特任担当役、科学技術振興機構研究開発戦略センター特任フェローも兼ねる。中国語の科学技術文献読解を得意とする。