

提 言

これからの地球惑星科学と社会の関わり方 についてー 東北地方太平洋沖地震・津波・ 放射性物質拡散問題からの教訓



平成26年（2014年）9月30日

日本学術会議

地球惑星科学委員会

この提言は、日本学術会議地球惑星科学委員会の審議結果をとりまとめ公表するものである。

日本学術会議 地球惑星科学委員会

委員長	永原	裕子（第三部会員）	東京大学大学院理学系研究科教授
副委員長	北里	洋（第三部会員）	独立行政法人海洋研究開発機構上席研究員
幹事	中島	映至（第三部会員）	東京大学大気海洋研究所教授、地球表層圏変動研究センター長
幹事	氷見山	幸夫（第三部会員）	北海道教育大学教育学部教授
	碓井	照子（第一部会員）	奈良大学名誉教授
	山川	充夫（第一部会員）	帝京大学経済学部地域経済学科教授
	大久保	修平（第三部会員）	東京大学地震研究所教授、高エネルギー素粒子地球物理学研究センター長
	川口	淳一郎（第三部会員）	独立行政法人宇宙航空研究開発機構シニアフェロー、宇宙科学研究所宇宙飛行工学研究系教授
	安成	哲三（第三部会員）	大学共同利用機関法人人間文化研究機構総合地球環境学研究所所長
	荒井	章司（連携会員）	金沢大学理工研究域特任教授
	荒井	良雄（連携会員）	東京大学総合文化研究科教授
	井田	仁康（連携会員）	筑波大学人間系教育学域教授
	入倉	孝次郎（連携会員）	京都大学名誉教授、愛知工業大学客員教授
	海津	正倫（連携会員）	名古屋大学名誉教授、奈良大学文学部教授
	大久保	泰邦（連携会員）	独立行政法人産業技術総合研究所地質分野研究企画室連携主幹
	大路	樹生（連携会員）	名古屋大学博物館長・教授
	大谷	栄治（連携会員）	東北大学大学院理学研究科教授
	岡部	篤行（連携会員）	青山学院大学総合文化政策学部教授、東京大学名誉教授
	沖	大幹（連携会員）	東京大学生産技術研究所教授
	小口	高（連携会員）	東京大学空間情報科学研究センター長・教授
	奥村	晃史（連携会員）	広島大学大学院文学研究科教授
	蒲生	俊敬（連携会員）	東京大学大気海洋研究所教授
	鬼頭	昭雄（連携会員）	筑波大学生命環境系主幹研究員
	木村	学（連携会員）	東京大学大学院理学系研究科教授
	熊木	洋太（連携会員）	専修大学文学部教授
	河野	長（連携会員）	東京工業大学名誉教授
	小嶋	智（連携会員）	岐阜大学工学部教授

三枝 信子（連携会員）独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター
副研究センター長

齋藤 文紀（連携会員）独立行政法人産業技術総合研究所地質
情報研究部門上席研究員

佐々木 晶（連携会員）大阪大学大学院理学研究科教授

佐竹 健治（連携会員）東京大学地震研究所教授、地震火山
情報センター長

佐藤 薫（連携会員）東京大学大学院理学系研究科教授

柴崎 亮介（連携会員）東京大学空間情報科学研究センター教授

鈴木 康弘（連携会員）名古屋大学減災連携研究センター教授

平 朝彦（連携会員）独立行政法人海洋研究開発機構理事長

高橋 栄一（連携会員）東京工業大学大学院理工学研究科教授

高橋 桂子（連携会員）独立行政法人海洋研究開発機構地球情報基盤
センター長

寶 馨（連携会員）京都大学防災研究所教授

田中 和広（連携会員）山口大学大学院理工学研究科教授・理事・副学長

千木良 雅弘（連携会員）京都大学防災研究所教授

佃 榮吉（連携会員）独立行政法人産業技術総合研究所理事

津田 敏隆（連携会員）京都大学生存圏研究所教授・所長

富樫 茂子（連携会員）独立行政法人産業技術総合研究所
名誉リサーチャー

中田 節也（連携会員）東京大学地震研究所教授

中村 尚（連携会員）東京大学先端科学技術研究センター教授

中村 正人（連携会員）独立行政法人宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所教授

新野 宏（連携会員）東京大学大気海洋研究所教授・所長

西 弘嗣（連携会員）東北大学総合学術博物館教授

西山 忠男（連携会員）熊本大学大学院自然科学研究科教授

花輪 公雄（連携会員）東北大学大学院理学研究科教授・理事

春山 成子（連携会員）三重大学大学院生物資源学研究科教授

平田 直（連携会員）東京大学地震研究所教授、地震予知研究
センター長

福田 洋一（連携会員）京都大学大学院理学研究科教授

日置 幸介（連携会員）北海道大学大学院理学研究院教授

益田 晴恵（連携会員）大阪市立大学大学院理学研究科教授

松井 孝典（連携会員）千葉工業大学惑星探査研究センター所長、
東京大学名誉教授

松本 淳（連携会員）首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授
 松本 良（連携会員）明治大学ガスハイドレート研究所代表・特任教授、
 東京大学名誉教授
 丸山 茂徳（連携会員）東京工業大学大学院理工学研究科教授
 村山 祐司（連携会員）筑波大学生命環境系教授
 森田 喬（連携会員）法政大学デザイン工学部教授
 山形 俊男（連携会員）独立行政法人海洋研究開発機構アプリケーション
 ラボ所長、東京大学名誉教授
 山中 康裕（連携会員）北海道大学大学院地球環境科学研究院教授
 塚本 尚義（連携会員）北海道大学大学院理学研究院教授
 若林 芳樹（連携会員）首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授
 渡邊 眞紀子（連携会員）首都大学東京大学院都市環境科学研究科教授
 渡辺 真人（連携会員）独立行政法人産業技術総合研究所地質情報研究
 部門付

提言の作成にあたり、以下の方々にご協力いただきました。

植松 光夫 東京大学大気海洋研究所教授
 大原 利眞 独立行政法人国立環境研究所フェロー
 恩田 裕一 筑波大学生命環境系教授、
 アイソトープ環境動態研究センター副センター長
 加藤 照之 東京大学地震研究所教授
 田中 淳 東京大学情報学環教授、総合防災情報研究センター長
 田中 泰宙 気象庁気象研究所主任研究官
 津旨 大輔 一般財団法人電力中央研究所環境科学研究所主任研究員
 長谷川 昭 東北大学名誉教授
 升本 順夫 東京大学大学院理学系研究科教授
 横山 広美 東京大学大学院理学系研究科准教授

本件の作成に当たっては、以下の職員が事務を担当した。

盛田 謙二 参事官（審議第二担当）
 齋田 豊 参事官（審議第二担当）付参事官補佐（平成26年8月6日まで）
 沖山 清観 参事官（審議第二担当）付審議専門職（平成26年6月30日まで）
 加藤 美峰 参事官（審議第二担当）付審議専門職付（平成26年5月1日から）

要 旨

1 本提言作成の背景

2011 年 3 月 11 日発生した東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖大地震）と津波、およびそれに付随した福島第一原子力発電所事故（以下、福島原発事故）は、多くの人命と財産を奪う未曾有の大被害をおよぼした。国は、1995 年阪神・淡路大地震以降、将来おこりうる地震について、観測網の整備、調査・研究体制整備、行政の判断システム、国民への情報発信などの体制を整えてきた。また地球惑星科学者も、地震学を中心として、予知から基礎的な地震の物理の理解に至るまで多様な研究を進めてきた。しかし、東北沖におけるマグニチュード 9 の大地震の発生を予測することはできなかった。また、専門家が発した“想定外”の言葉は、科学に対する不信を引き起こしたとされた。福島原発事故による放射性物質の大気拡散については、気象学者によるシミュレーション結果の公表をめぐりさまざまな混乱があった。

2 現状および問題点

東北沖大地震と福島原発事故により浮かび上がった問題として、第一に地震学が東北沖における M9 の地震の予測をできなかったという学問的な問題がある。地震学は過去百数十年の観測結果とアスペリティモデルにもとづき将来の地震発生の位置や時期を確率論的に考えてきた。しかし観測時間が限られていること、及び、モデルや仮説は必ず限界をもっていることなどについての検証が不十分であったことが浮かび上がった。第二に、かなりしっかりした国としての防災体制およびトップダウンおよびボトムアップの地震調査研究体制ができていたにもかかわらず、必ずしも十分な連携ができていなかったという問題が発覚した。第三に緊急時における行政と科学の間の情報交換の仕組みが存在しないことが明らかとなった。第四に、地震研究者による“想定外”の言葉や、気象学会が、学会員が個人的に計算結果を公開することの慎重な取り扱いをよびかけたが、同学会の意図が冷静かつ十分に理解されないまま、大きな社会問題となった。

本提言においては、将来起こりうる大規模災害の際に同じ問題を繰り返さないため、将来の課題、とりわけ、地球惑星科学と行政、社会との関わり方を論ずる。

3 提言の内容

提言 1 国は海域における地震津波調査観測網をいっそう整備すべきである

日本周辺の海底地震津波観測網を整備し、地震時における津波警報発令までの時間を少しでも短縮することがきわめて重要である。観測網の設置および維持更新は、国が責任を

もって行うべきである。

提言 2 国は放射性物質拡散の実態把握および危機管理体制を構築すべきである

放射性物質の大気中と海洋への放出につき、より詳細な事実の把握、および、いまだに埋もれているデータの発掘が必要である。また、緊急状態においても機能する、放射性物質と気象場に関する測定システムの確立、大気・海洋モデリングとデータ同化手法による数値実験の改善が必要であり、それら調査・研究を総合的かつ持続的に実施する体制、その結果を利用する危機管理システムの構築が必要である。

提言 3 国民の安全のために学術と行政の連携の仕組みを強化すべきである

国民の安全に関わる問題に関しては、トップダウンとボトムアップメカニズム双方の推進による総合的な調査・研究の推進を一層はかるべきである。地震以外の分野においては、その仕組みは未整備であり、早急な検討が必要である。また、緊急時に行政が主導し、調査・研究を行うための枠組みの整備をすべきである。

提言 4 学術は危機における適切な情報発信の仕組みを作るべきである

学術は、重大な危機に際して学術的知見の集約、情報発信の仕組みを危機管理システムの一部として構築しなければならない。学術的知見のとりまとめには、学術会議の果たす役割が重要である。将来における重大危機を想定し、行政、報道機関との間において情報発信のルールを確立しておくことが重要である。

提言 5 自然現象の予測は適切に報道されるべきである

地震や津波をはじめ地球に起こる現象は、複雑系の特徴をもち、一意的に決定される予測はありえない。学術は得られている知見とその適用範囲、予測にともなう誤差の意味を丁寧に説明し、報道機関はそれらを正しく理解、報道することに努力し、特に、異なる意図の予測が国民の不安につながらぬよう心がけるべきである。

提言 6 自然現象を深く理解することのできる教育の充実を図るべきである

すべての国民が、地球に生起する自然現象の本質を深く理解し、情報を自ら判断する能力を養うため、初等・中等教育、高等教育、さらに生涯教育において、科学的素養を涵養できる環境を充実させることが必要である。

目 次

1. はじめに	1
2. 地球惑星科学の見地から見た地震・津波の理解と課題	2
(1) 東北地震・津波の全体像	2
(2) 事前の地震発生予測に至らなかった原因と課題	2
3. 地震・津波防災行政と地震学の関わりについての問題と課題	5
(1) 我が国の地震・津波防災体制の概観	5
(2) 地震・津波防災研究の検証	5
(3) 東北大震災以前の地震・津波防災行政の検証	6
(4) 東北大震災以後の地震・津波防災行政の検証	7
(5) 原子力発電所の地震・津波防災の検証	8
4. 福島第一原子力発電所事故による放射性物質の拡散に関する問題と課題	9
(1) 福島第一原子力発電所の事故と放射性物質拡散の経緯	9
(2) 環境中での放射性物質の移行過程の理解に関する課題	10
(3) 観測システム・モデルの改善の必要性	11
(4) トップダウンとボトムアップメカニズムによる緊急対策時の対応強化の必要性 ...	12
(5) 不確実性の認識と誤差情報の発信の必要性	12
5. 社会と地球惑星科学との間の相互理解の問題と課題	13
(1) 自然現象理解の難しさを社会に伝える問題	13
(2) 緊急時における地球惑星科学からの情報発信のありかた	14
(3) 学術会議の果たす役割	15
6. 提言	17
提言 1 国は海域における地震・津波調査観測網をいっそう整備すべきである	17
提言 2 放射性物質拡散の実態把握および緊急時に向けた体制を構築すべきである ...	17
提言 3 国民の安全のために学術と行政の連携の仕組みを強化すべきである	18
提言 4 学術は危機における適切な情報発信の仕組みを作るべきである	18
提言 5 自然現象の予測は適切に報道されるべきである	18
提言 6 自然現象を深く理解することのできる教育の充実を図るべきである	19

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、東北沖大地震）と、その津波によって発生した東京電力福島第一原発事故（以下、福島原発事故）は、地球惑星科学と行政・社会の関わり方について再検討すべき重要な課題を提起した。地球惑星科学が対象とする、地球をはじめとする惑星の形成・進化、地球内部と大気・海洋に関わる素過程とダイナミクスは、自然災害の根源的問題であり、その研究成果の社会還元、国民と社会の安全・安心への貢献は地球惑星科学の重要な責務である。

東北沖大地震の特徴は、ひとつのブロックが数十年から 100 年程度で繰り返される海溝型地震が、3つのブロックにおいて連続して発生したために超巨大地震となったことや、プレート深部境界のずれにとどまらず地殻浅部のすべりによると考えられる大きな津波が発生したことなどが挙げられ、その結果巨大な津波高と広範囲の浸水域がもたらされた。地球や惑星はきわめて多くのサブシステムからなる巨大複雑系であり、複雑系の振る舞いは決定論的に論ずることができないという本質的な問題がある。地震に関しても、地球内部のミクロのプロセスが地球全体に及ぶだけでなく、岩石の物性の違いや不均質を始め、一意的に論ずることのできない要素が無数に存在する。岩石の破壊をすべて物理的に扱うことができるようになったとしても、非線形の系においては、わずかなパラメータの違いが、結果にどのような影響を及ぼすかを予想することはきわめて困難であり、仮に震源におけるひずみ量が推定できたとしても、地表のある地点にどのような揺れや破壊を及ぼすかという社会が求める情報までには大きなギャップがある。さらに、現状のように、物理的に取り扱う

ことができず、半経験的に確率を求めている場合は、統計が乏しく、確率にしたがう保証がないなど、予測には大きな不確定性を伴っている。

1995 年兵庫県南部地震以降、地震学におけるトップダウンとボトムアップ双方向の研究・評価が進められてきたが、東北沖大地震に関しては、十分な連携をとりきれてこなかった問題がうかびあがった。ボトムアップの研究は、この地域において巨大地震が occurring 可能性を認識し始めていたが、その知見は防災行政には十分に認識されておらず、防災行政に生かされるに至っていなかった。なぜそのような状況であったかを総括する必要がある。

さらに、科学的知見の集約と予測に関する不確実性の発信の仕組みが大きな課題として浮かび上がってきた。われわれは、2011 年 3 月の放射性物質の環境中の拡散の問題に伴うメカニズムの理解や予測を、社会に対して発信する困難さに直面した。複雑系にともなう予測の困難とその誤差をいかに適切に社会に伝えることができるかは、内容の適切さと同時にその発信の仕組みとともに正しい理解を生み出し、不要な社会的混乱を引き起こさぬためにきわめて重要である。特に重大な危機に際して、科学的知見をどのように集約し、

どのように発信すべきかについて検討し、その仕組みを危機管理システムの一部として構築しなければならない。さらに、行政の持つ情報を科学が検証することのできる枠組みを検討してゆかななくてはならない。

本提言は、東北沖大地震と福島原発事故を経験した地球惑星科学が、今後のわれわれと社会・行政との関わりを真剣に考え、提言を行うものである。

2. 地球惑星科学の見地から見た地震・津波の理解と課題

(1) 東北地震・津波の全体像

地震は、二つの岩盤を固着していた断層面が破壊し、破断面先端が伝搬・進行して、両岩盤の間で急激な相対すべりが生じる現象である。破壊した断層面の広がり及び相対すべり量の大小が地震の規模を規定する。地震学では、マグニチュードが8以上の地震を巨大地震、9以上のものを超巨大地震として区別することが多い。また、地震の中には、強い震動をあまり発生させないにも関わらず大きな津波を生じる地震があり、「津波地震」と呼ばれている。

東北沖大地震は、地震の規模と質の点において、従来の地震学の知見を超えるものであった。東北沖大地震と津波（以下、東北地震・津波）を特徴づける強震動・大津波の範囲、地殻変動の大きさ、強い揺れの継続時間、地殻内応力変化など諸量は、典型的な海溝型巨大地震である2003年十勝沖地震（Mw8.0）のその約5～10倍と桁違いに大きかった（表1）[1-3]。GPS波浪計のデータ、沿岸の潮位記録、及び浸水高・遡上高の調査から、津波発生域は、沖合約70 kmから沖合200 kmの海溝軸に至るプレート境界浅部であることがわかった[4-5]。一方、短周期の強い揺れは陸から約70 km以内のプレート境界深部側で発生した[6]ことから、東北地震・津波の断層面は、強震動生成領域と、大津波の発生領域の2つが接合されていることがわかった（図1）[7-8]。また、断層面の破壊は、大きく3つの領域に分けて推移し、固有地震説で想定されていたように震源域が単独で活動するのではなく、複数の震源域でのすべりが連動したものであった。すなわち、量的にも質的にも特異な地震であった。

プレート沈み込み速度から、海溝軸付近のプレート境界浅部では、600年間以上かけて蓄積した歪（すべり遅れ）が今回の地震で一気に解放されたことが明らかとなった。この浅い領域は、軟弱で非弾性的に変形するために歪が蓄積されないというのが通説であった[9-10]ため、この事実は多くの地震学者にとって大きな驚きであった。

このような超巨大地震の特異な姿が明らかになったのは観測データに基づくものであり、高密度なGPS観測網と、高感度地震観測網・強震観測網、東北沖の海域のさまざまな海底諸観測が重要な役割を果たした。

(2) 事前の地震発生予測に至らなかった原因と課題

上述のような強力な観測網がありながら、我が国の地震学が、東北沖の日本海溝沿いに

超巨大地震・津波が発生する可能性について、深く研究を進めることができなかった原因と今後の課題について論ずる。

地震発生予測を可能にするには、普遍的に成り立つ「地震発生の物理」の構築と、それを定量的に記述する「モデルパラメーターの把握」とが必要となる。前者については、摩擦構成則に基づく断層すべりが最有力なモデルとして提唱され、適切なモデルパラメーターを選ぶことにより、計算機シミュレーションによって、過去に発生した地震のさまざまな側面の統一的説明が可能になりつつある。一方、後者のモデルパラメーターは場所と時間によって変化しうるため、現時点では精度良く決めることはきわめて困難である。その結果、現状は、実際に生じている多様な地震発生様式を科学的に理解できるようになりつつあるものの、地震発生予測を決定論的に行うことが可能か否かについては議論のあるところである。このような状況から、地震発生予測には、過去の地震発生履歴データに基づく経験的・確率的な手法が欠かすことができず、現時点ではこれが実用上の主流となっている。

① 確率的な方法による地震発生の長期予測とその課題

政府の公表する長期的な地震発生確率は、特定の断層はほぼ同じ時間間隔で同程度の規模の地震を引き起こすという固有地震説と、アスペリティ仮説（後述）とを統合したモデルに基づいて算出されている。震災前に出されていた東北地方太平洋沖の海溝型地震に関する長期予測 [11-12]（表 2）は、宮城県はるか沖（三陸沖南部海溝寄り）に東北沖地震の破壊開始点（震源）があるという点において、場所の予測には部分的に成功したといえる。しかし、破壊はその領域だけに止まらず、三陸沖から房総沖の海溝寄りの 3 つの震源域が連動して破壊した。その結果、大きくても M8.2 前後と予測されていた地震の規模は、M9.0 となった。エネルギーでみれば、予測と実際の間には 15 倍もの開きがあり、規模の予測は失敗であった。

地震調査研究推進本部（以下、地震本部）の長期予測手法では、海溝型の大地震発生の確率計算を行うには、可能な限り過去にさかのぼった地震発生履歴データが必要である。しかし、機器による観測記録は最近の百数十年に限られ、古文書記録も良質の史料が多数の場所で見出されるのは江戸時代以降の 400 年に限られており、現行の予測手法が仮に正しいものであったとしても、原理的に 500 年を超えるような、長い地震発生サイクルをもつような海溝型地震の予測は不可能であった。この問題は東北沖大地震発生前から認識されており、地震発生履歴の把握を過去に向かって伸ばすための努力が始まっていた（表 3）。その結果、869 年に仙台平野を襲った貞観津波に次第に注目が集まり、震源断層のモデル化もなされつつあった [13-15、図 1]。また、貞観地震と同様な津波堆積物を残した津波が、およそ 450 年～800 年程度の繰り返し間隔で発生していることが明らかにされていた [16]。しかし残念ながら、これらの研究成果を地震津波防災につなげることは間に合わなかった。

② 調査・観測やシミュレーションに基づくモデリング手法の問題

沈み込み帯で起こる地震の発生機構については、過去約 15 年間に大きく理解が進展した。とりわけ、プレート境界地震については、非地震性滑りの進行により固着領域（アスペリティ）に応力が集中し、やがて地震発生に至るというアスペリティモデルが提唱された。そして、陸上 GPS データの解析から、固着の程度の大きい領域が宮城県沖から福島県沖にかけて広く分布することが、地震発生前にわかり始めていた [17]。

その一方で、日本地震学会モノグラフ「地震学の今を問う」に指摘されているように、「アスペリティ以外では地震性すべりを起こさない」というような、過度に単純化された考え方が支配的になっていったことも一部に指摘されている。このような傾向を避けるには、モデルや仮説の正当性を愚直かつ厳格に検証することが必要で、そのためにはモデルや仮説から予測される結果の再現性の重視とデータの公開とが不可欠とされている [18]。巨大地震の発生事例が世界的に見ても少ないことを考えるなら、主たる観測対象が日本国内に限られていては、モデルや仮説の検証には困難がともなうことは明瞭である。したがって、国外の沈み込み帯の観測もふくめ、モデル・仮説による予測の再現性を確認することが不可欠である。しかしながらこのような世界的視野に立った継続的な調査・観測・モデリングを、日本の地球科学者が主体的に行った事例は多くない。手にしている情報は限定的であり、不十分なものであることを認識していたのだから、現象をモデル化するに当たっては、極度に単純化せずに、多様な考え方に基づいて多くの可能性を考慮して慎重に考察する必要があった。

3. 地震・津波防災行政と地震学の関わりについての問題と課題

(1) 我が国の地震・津波防災体制の概観

我が国の地震津波・防災に関わる主要機関と、その役割を図3に示す。防災面では、国としての防災基本計画を中央防災会議（内閣府）が策定し、それにもとづき地方自治体が地域の実情に合わせた地域防災計画を作成する。研究面では、国策としてのトップダウンの調査研究は地震本部（文部科学省地震調査研究推進本部）により立案され、省庁や研究独立行政法人を中心に、複数の大型事業が行われてきた。他方、ボトムアップの基礎研究は、大学等を中心とした「地震予知のための観測研究」が、その1/100程度の規模で進められてきた。地震調査研究関連の平成26年度当初予算は、総額118億円[19]で、研究機関等が得た調査観測結果や研究成果は、地震予知連絡会で情報交換され、学術的な検討が加えられている。

(2) 地震・津波防災研究の検証

① トップダウン型の研究の検証

地震本部を中心に実施されてきた国策としての地震調査研究の具体的な内容は、平成11年から10年間に渡って実施された地震調査研究「地震に関する基盤的調査観測計画（“総合基本施策”）」に示されている（表4）。この計画により、世界最高水準の地震観測網やGPS観測網が整備され、また全国の主要活断層の位置・長さ・形状・活動履歴等が系統的に調べられた。陸域の地震観測網は、地震情報の早期伝達を可能とし、2006年以降の緊急地震速報の実現につながった。東北沖大地震においても、緊急地震速報が実際の揺れに先だって発出された。その一方で、主破壊が終了した後も、M9という規模を推定するのに相当の時間を要してしまった。また、緊急地震速報には使えないとしても、巨大地震に関する限り、研究では確立されていたW-フェーズ解析（地震波の解析方法の一つで、P波とS波の間に到着する超長周期の実体波を用いて、発震メカニズム、規模、位置を同時に推定する方法）を現業に活用するシステムはできていなかった。

“総合基本施策”の期間中、ケーブル式のリアルタイム海底地震・津波観測はごく一部を除いて予算化されることはなく、津波警報システムの精度向上に向けた開発については、平成21年以降の“新総合基本施策”に持ち越されていた（表4）。もし、リアルタイム海底地震・津波観測網が東北地方にも整備されていたならば、津波警報システムは有効に機能したはずであろうし、緊急地震速報をさらに早期に発することができたはずである。

② ボトムアップ型の地震・津波基礎研究の検証

地震予知のための基礎的（ボトムアップ的）な研究は、1965年以降、ナショナル・

プロジェクトとして進められ（表5）、沈み込み帯で起こる地震の発生機構の理解が進展した。その一方で、成果を社会に還元する努力については課題があることが総括されている[20]。基礎研究から生まれた技術開発の成果は、GPS 波浪計、海底ケーブルを利用した海底地震・津波観測システム、自己浮上式の長期海底地震観測システム、GPS 音響結合方式の海底地殻変動観測などのように官庁や独立行政法人に技術移転され、データはリアルタイムで官庁に配信され、災害軽減に貢献している。それに対し、理学的な成果を災害軽減に結びつける意識は弱かったと指摘された。一部では、深部低周波微動の発生状況の把握が、東海地震の想定発生領域のプレート固着状態の監視に活用されるようになり、理学的成果を災害軽減につなげる試みも実現されている。とはいえ、1995 年兵庫県南部地震以降、大学間の連携が進むとともに、透明性・公平性を担保した基礎研究が進められてきたが、大学を超えた省庁間の基礎研究レベルの連携はそれほど強くなっていなかった。研究者自らが、研究成果を被害軽減につなげることをこれまで以上に強く意識した姿勢で研究を進めることと、大学を超えた省庁間の基礎研究レベルの連携の強化が、改善すべき課題といえる。

（3）東北大震災以前の地震・津波防災行政の検証

① 中央防災会議による被害想定の妥当性の検証

日本海溝・千島海溝周辺は、M7 や M8 クラスの大規模地震が多数発生し、1896 年の明治三陸地震では約 2 万 2 千人の死者が発生するなど、甚大な被害は主に津波によりひきおこされてきた。表 6 には、津波被害想定に関する公的機関の活動状況を示す。岩手県宮古市田老などの三陸沿岸では、今回の津波の浸水域はハザードマップとほぼ同程度であったのに対し、宮城県沿岸では、浸水域はハザードマップの予想浸水域を大きく超えたものであった（図 4）。また、被害状況資料[21]に基づいて、浸水域居住者千人当たりの死者・行方不明者の数（以下、人的被害数という）を市町村別に算出し、それを津波高さの実測値及び事前想定値と比較対照すると、陸前高田以南は波高が低いにもかかわらず被害が大きい（図 5）。人的被害数は、想定された津波波高と実際の津波波高の差と相関がしている。このことから、中央防災会議の地震・津波の想定が適切でなく、十分な防災対策が事前にとられなかったことが、被害の拡大につながった可能性が示唆される。

② 問題点

中央防災会議が津波の高さを過小評価した原因は、中央防災会議の報告に総括されているように、過去数百年間に発生した最大級の津波のうち切迫性が高いと考えられる地震のみを被害想定の対象とし、科学的には発生する可能性が考えられても確度の低い地震や、過去に発生したことがわかっていても頻度の低い地震を対象外としたた

めである [22]。その結果、地震本部地震調査委員会が 2002 年に公表していた長期評価の一部を、中央防災会議は被害想定を検討から外した [23]。また、風水害や土砂災害の様に数年に一度の高い頻度で生じる災害と、数十年から数百年に一度という低頻度で発生する地震・津波災害とでは防災対策の方法が異なることも十分に認識されていなかった。公的な防災機関が防災対策の政策判断するときは、短期的な視点にとらわれず、事象の頻度とその事象が生じたときの被害の大きさや内容の両方を考慮してリスク評価し、最新の科学的知見を尊重して検討すべきであったと結論される。

(4) 東北大震災以後の地震・津波防災行政の検証

① 地震・津波災害に対する備えの見直し

表 7 に、東北地震・津波後に行われた中央防災会議、地震本部、原子力安全委員会の諸計画・施策・指針等を見直しをまとめた。地震本部の新総合基本施策において改訂された事項は、2 章において指摘した問題点を克服しようとする適切なものといえる。中央防災会議が改訂した防災基本計画では、低頻度ながら甚大な災害と、それよりは被害レベルは低いものの頻度の大きな災害とでは、一律な対応をとるべきではないという 2 段階の戦略がとられており、人命・財産・経済基盤の保全の諸観点から適切な方針といえよう。

さらに、日本海溝に関しては十分な海底地震津波観測網が設置され、迅速に津波警報を発することのできる観測態勢がとられるようになった (図 6)。

② 問題点

東北沖大地震後、日本海溝には海底地震津波観測網が整備されたが、日本全体をみるなら、周辺の海底地震津波観測網は、まだきわめて不十分な状況である (図 6)。これまでの災害において多数の死者を出しているのは津波であり、津波警報は、たとえわずかな時間でも早期に発することが多くの命を救うことに直結するため、現在観測網の設置されていないすべての海域にその観測網を設置することがなにより重要である。

異なる問題として、国民に対する情報発信の問題を指摘することができる。次に巨大地震が発生する可能性が高いと考えられている南海トラフについて、中央防災会議は、最大クラスの地震・津波モデルによる被害想定を 2012 年に公表した [24]。南海トラフで発生しうる最大クラス (M9.1) の地震を複数 (11 ケース) 想定し、それぞれの最悪のシナリオによる被害を算定した結果、最大津波高は 34m、最大死者数は 30 万人以上となり、太平洋沿岸の自治体や住民に大きな不安を与えた。いっぽう、2013 年の地震本部による南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版) では、次の巨大地震が今後 30 年以内に発生する確率は 60~70%であるが、その規模は M8~9 クラスという以上には特定することはできないとした。このように、現時点での科学的知見に基づいて

次に発生する地震の規模を想定することは困難であり、最悪の場合を仮定して被害想定がなされたのだが、この点が自治体や国民に正確に伝わっておらず、「最大の地震津波」像が「次に」発生する地震津波と混同されたり、防災対策を考える上での唯一の地震像と受け止められたりした。この問題は、行政、学術、報道機関などから国民に向けた情報発信のしかたにつき、今後払うべき重要な注意事項といえる。

（５）原子力発電所の地震・津波防災の検証

原子力発電所の安全審査を行う際に用いる指針等や、それへの対応等は表８のようにまとめられる。2010年12月、原子力安全委員会（当時）は、「耐震安全性に関する安全審査の手引き」を作成公表したが、手引の発行が遅れ、バックチェックを行う時間的な余裕がなかったことが悔やまれる。

東京電力は、東北地震・津波の前に、福島第一原発で具体的な津波対策を取らなかった理由として、（ア）土木学会が2002年に発表し、電気事業者が標準としてきた「原子力発電所の津波評価技術」[25]では巨大津波をともし地震が扱われていないこと、（イ）福島沖の津波地震は中央防災会議での検討対象になっていなかったこと、（ウ）貞観地震のモデルは確定的なものでなかったことなどをあげている[26]。しかし、土木学会の「原子力発電所の津波評価技術」では、既往津波だけではなく、「プレート境界付近に将来発生することを否定できない地震に伴う津波を評価対象とする」とされている。すなわち、東京電力は、「福島沖の津波地震」を、「将来発生することが否定できる地震」と見なしたといえる。貞観地震のモデルが出されていたことや、東北電力女川原子力発電所ではそれを考慮した立地としていることと考えると、東京電力の基準・指針の理解は最新の科学的知見を正しく認識していなかったか、あるいは意図的に無視したかのいずれかであったと考えられる。

原子力発電事業者には、科学的に新しい知見、仮説、あるいは不確実な成果なども積極的に可能性として検討し、安全対策に取り込む努力が求められる。

4. 福島第一原子力発電所事故による放射性物質の拡散に関する問題と課題

(1) 福島第一原子力発電所の事故と放射性物質拡散の経緯

東北沖大地震に起因して福島原発事故が発生し、一号機と三号機の水素爆発により、大量の放射性物質が大気中に放出された。それ以外にも、圧力容器のベントによる蒸気の放出作業に伴う大気中への放射性物質の放出が巡回監視から示され、また、炉心の冷却水漏れの高濃度の汚染水が直接海に流れ出した。大気中に放出された放射性物質は、観測値からの逆推定によって評価されているが、 ^{137}Cs で 9 ～ 37 ペタ・ベクレル [27, 28] という幅がある。この大きな不確実性は、津波と電力喪失によって放射性物質や気象場等に関するモニタリングポストの多くが失われてデータが得られなかったことと、太平洋側に流出した量の測定が不足していることに起因する。直接、海洋に流出したものに関しても 3.5 ～ 26.9 ペタ・ベクレルと推定に大きな幅がある [29-35]。なお 2014 年 3 月になって、福島県のモニタリングポストの 14 カ所において、事故後数日の 20 秒ごとの詳細な放射線量変化の記録が残されていたことが明らかとなり [36]、水素爆発以前のベントに伴い大量の放射性物質が大気中に放出されていた可能性が高いことなど、新たな事実も明らかになっており、今後の研究により初期放出量とその時間経過がより詳細に解明される可能性もある。

事故当時は例年よりも冬型が強い春季の気象条件であったために [37]、放射性物質の多くは海域に運ばれたが、12% から 37% が国内の陸域に沈着したと様々な評価により推定されている [38]。原発から放出された放射性物質は、日々の気圧配置によって異なる風によって輸送され、また降水によって地表面および海面に沈着して、複雑な分布を形成し (図 6)、 ^{137}Cs 濃度が 1 平方メートル当たり 1,000 キロ・ベクレルを超える地域が 30km 圏内を越えて北西方向に広がった。この分布は、文部科学省緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI) による 3 月から 4 月の積算線量分布 [39] と概ね一致している。しかし、SPEEDI の計算結果が毎日公表されるようになるのは、事故から一ヶ月以上経った 2011 年 4 月 25 日からであった。政府は、3 月 15 日に避難区域 (20km 圏内) と 20～30km の屋内退避区域を設定していたが、4 月 22 日には、北西域の川俣町、飯館村、葛尾村を含む地域を計画的避難区域に指定した。この間、この方面に避難した者も被ばくを受けたと推定されている。

土壌に沈着した放射性物質の 98%以上が表層 5 cm に吸着されるが、森林に降下したものは長く樹冠に留まっている。チェルノブイリ事故の場合にはその量が $1/e$ に減衰する日数 (e は自然対数の底となる数、約 2.72) は 200 日に及んでおり、福島原発事故の場合でも 300 日を超える事例が観測された [40]。これらの放射性物質は除染されない限り、環境中を移行し、その一部は湖水と河川へと流入する。文部科学省の 4 次観測 (2011 年 11 月) 以降 2014 年 3 月までの航空機モニタリングによる空間線量率の変化は、いずれの地域においても継続的な減少を示すとともに、その減少率は物理的な減少率を上回っている [41] (現在の情報管理は原子力規制委員会)。すなわち、放射性元素の物理的な壊変によ

る減少より、降雨や積雪などによる除去が進んでいることを表している。そのことは同時に、放射性物質の環境中の移動を意味している。また、文部科学省の河川浮遊砂調査 [42] によると、平成 25 年初頭でも、キロ・グラム当たり 1 万 5 千ベクレルの ^{137}Cs が浪江町諸戸川において観測されるが、河川水中の ^{137}Cs は、キロ・グラム当たり 1 ベクレル以下で濃度は低かった[42]。

海洋へは、大気へ放出されたものが海洋に落下した成分と、原発からの直接流出した成分のほか、陸域から河川を経由して海洋に放出される成分、さらには 2013 年 8 月に明らかになったように、原子炉建屋で発生した高濃度汚染水がトレンチを通して直接海洋に流出している成分がある。そのため海洋への流出量の推定はきわめて困難であると同時に、海洋中では複数の流入源の存在や時々刻々変動する海流などによって放射性物質は常に移流拡散の影響を受けているため、事故後の時間経過による濃度変化は海域により異なる。文部科学省による海洋モニタリングの結果 [43]によれば、福島沿岸の海水中の放射能濃度は福島第一原子力発電所直近のもっとも濃度の高かった地点でも、事故直後の 10 万分の 1 まで低下し、事故以前と同等レベルあるいはそれ以下となっている。それに対し、沖合では放射性濃度がある程度低下した地点とほとんど変化していない地点が存在している。さらに、放射性物質は海面付近の海流系に乗って太平洋中東部域から北米大陸西岸に達している [44, 45] ほか、事故後数ヶ月間は黒潮を超えてさらに南方へは輸送され難いと考えられていたが、時間とともに南方へも輸送されてきたことが明らかとなっている [46]。注目すべきこととして、海底土の放射能は、継続的な観測がおこなわれているほとんどすべての沿岸の地点において、2012 年 4 月以降ほとんど変化していないのに対し、沖合では時間とともに減少している地点、ほぼ変わらない地点が多いほか、一部にはわずかながら増加している地点もある [43]。海底土に放射性物質が沈着した状態が長期に継続することは、海洋生物への影響を考える上では重要である。

（２）環境中での放射性物質の移行過程の理解に関する課題

原子力発電所から放出された放射性物質の量およびその移行過程は、発生源周辺の詳細な時系列を含めた観測データの不足、海洋への直接流出に関わるデータの不足、推定手法に伴う不確実性などの理由により、その推定には大きなばらつきがある。そのため、国内外の放射線量の時間・空間変化の観測値や、政府および東電発表の数値をもとに初期放出量とその時間変化を推定するという、地球科学において広く用いられる逆解析の手法によって推定されてきた。今後においても継続的、広域にわたる観測と、モデルの精緻化という 2 つのことが事実の理解と将来の予測のために重要である。

地表面に降下した放射性物質の移行拡散についての調査によると、森林に降下したものは、チェルノブイリの場合とくらべて、その植相の違いによって異なった移行の経過を示している。また、大気中では風による再飛散、台風などの風雨による移行、湖沼・河川・海洋では浮遊砂や有機物などに付着して流されることによる移行などのメカニズムにより、様々な場所に移動・拡散することが考えられるため、モニタリングを長期にわたって

続けなければならない。また、原子力発電所から直接、または大気を経由して海洋に沈着したものは、一部が海洋底に沈着したが、多くはまだ海洋中を移動中である。福島県沖合は、親潮と黒潮の混合域であり、その移行は沿岸流、中規模渦、海流の影響によって複雑であり、海面のみならず、海洋の亜表層まで含めて全球規模の観測が重要な役割を果たす。

複数の数値モデルを用いた放射性物質の輸送シミュレーションが行われているが、モデル間の不確実性は大きい。数値モデルの精緻化、観測データのモデルへの同化方法の検討など、詳細な観測結果と整合的なモデルの精密化を高める研究が必要である。これらの観測・研究とも、地域性の強い検討と、全球規模の研究の両者が必要である。

放射性物質の移行過程についての詳細の理解のためには、地球科学のみならず、原発関係者、放射性物質に関わる専門家、医学、農学、生物学を始めとする多くの学問を連結しなければならない。そのような協力が有効に機能するためには、福島県をはじめとした大学、研究機関を結ぶ長期的な研究機構の確立が必要であり、省庁の壁を越えた協力体制の確立が必要である。

(3) 観測システム・モデルの改善の必要性

今回の事故では、電力喪失により、各種の放射線モニタリングシステム、AMeDAS 気象網が機能しなかった。また、爆発噴煙の高度等の情報を測定する装置が無いことが、その後の放射性物質の輸送シミュレーションを困難にした。これらを改善し、より安定な測定システムの確立が必要である。特に、地上および衛星からのリモートセンシングのモニタリング手法の導入が必要である。

文部科学省緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム（SPEEDI）は、初期条件が不明な場合は信頼度の高い予測ができないという制約があるが、事故直後の積算された放射性物質分布のうち高濃度域の分布をほぼ再現していた。特に、浪江町、飯館村を含む原子力発電所の北部から東北部にかけた顕著な放射性物質の分布構造は、航空機観測や地上観測によって得られているものに近かった。計算結果には誤差はあるものの、その情報無しに避難域を判断するよりも有効な判断ができたことは明らかである。激烈な爆発を想定すれば、事故直後の同心円状の避難域の設定は妥当であるかもしれないが、風によって長距離輸送される放射性物質が作るホットスポットは 30km 同心円よりもずっと広い範囲に及んでおり、避難経路の検討には数値シミュレーションの結果は不可欠である。

将来に起こりえる事故に備え、放射性物質の拡散予測、避難経路の策定にモデルシミュレーション結果を十分に利用する危機管理システムを構築すべきである。また、将来に起こりうる事故において、海域の観測をどの地点においておこなうべきかは、今後詳細に検討する必要がある。このような基盤整備は、省庁、地方自治体、民間が独自に行うのではなく、関連機関の連携のもとに効率的で持続的なシステムを構築すべきである。それにあたり、気象庁や環境省が管轄する観測と、文部科学省および経済産業省のもつモデリングのシステムを最大限に活用し、国民に対し、最大限の情報を提供すべきである。特に、観測グループとモデルシミュレーショングループとの間の情報の共有が重要であり、その

ためには省庁を超えた情報共有システムの構築が必要である。また、事故時には、気象や大気拡散の専門家などを集めた緊急対策室等による汚染プルームの流れの予想と避難経路の検討を行うべきである。

(4) トップダウンとボトムアップメカニズムによる緊急対策時の対応強化の必要性

今回の事故においては、政府による土壌調査は6月まで開始されず、半減期の短いヨウ素のデータをとるための初動に決定的な遅れが出た。この間、大学研究者による「環境放射線核物理・地球科学合同会議」が自主的に構成され、政府調査に先立ち5月に、緊急土壌調査が実施された。また、合同会議は、平成23年度科学技術戦略推進費「放射性物質による環境影響への対策基盤の確立」『放射性物質の分布状況等に関する調査研究』においても、大きな役割を果たした。なお福島大学の放射線計測チームによる詳細な土壌調査は、すでに3月に実施された。

政府の緊急対策に組み込まれなかった研究者による重要な調査も相次いで提案・実施された[47]。このことは、ボトムアップ研究の知見を収集する経路の確保が、緊急対策においていかに重要かを物語っている。東海村JCO臨界事故の場合には、原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査委員会のほかに、科研費によって組織された多くの研究者が活動し、自由な論文発表が行われた。しかし、今回の事故の場合、科学者によって緊急の科学研究費提案がされたが、実施枠がなく、1年後にやっと新学術領域研究「福島原発事故により放出された放射性核種の環境動態に関する学際的研究」として研究組織ができた。その間、緊急的予算公募は、唯一、科学技術振興機構による「国際緊急共同研究・調査支援プログラム(J-RAPID)」が行われていただけであった。一方米国では国立科学財団(NSF)による民間寄付を含めた研究予算が立てられ、緊急の船舶観測などが実現された。将来に起こりうる緊急事態において、国が主導して調査・研究を組織し、進める仕組みを、総合科学技術イノベーション会議、科学技術振興機構、日本学術振興会、日本学術会議などの組織を活用して設置すべきである。

(5) 不確実性の認識と誤差情報の発信の必要性

天気予報を考えると明らかなように、物質の移動・拡散の予測可能性は時空間スケールに依存する。数値天気予報は、大気(気温・湿度・風)の3次元振る舞いを、観測に基づくある初期値から、その時間発展を物理法則に基づいて数値積分し、将来予測結果を得、それに基づいて出されている。大気は初期値のごくわずかな違いに対して鋭敏な依存性を持つ(カオス)。初期値は観測に基づいて求めるが、観測データは限定的であるとともに、観測誤差を伴う。そのため、誤差は時間と共に拡大し、予測の不確実性を生み出す。

不確実性の時間発展が予測対象の時空間スケールに依存するということは、予測対象に応じてそれぞれの予測可能性があるということでもある。日本が位置する中高緯度においては、空間スケールが数千キロメートル以上の現象(移動性高低気圧など)については、2〜3日先までは予測できるが、1週間先になると位置・強さの誤差が大きくなり、予測

の意味を持たなくなる（週間予報の限界）。誤差の成長は一樣ではなく、大気循環場の状態によって異なることが分かっており、週間予報では予報の信頼度を付けている。

いつどこで雨が降るかを都道府県スケール以下で予測できる期間はさらに短く、今日・明日・明後日の短期予報までに限られている。より局地的な予測はさらに困難である。前線性あるいは移動性低気圧による降水の短期予報での予測可能性は高いが、集中豪雨や局地的大雨などを伴う降水は、小さい空間スケールの現象であり、数値モデルの初期値解析（不均質に分布する観測点のデータから、一樣な格子点における初期条件を与えること）では正しく捉えられず、警報をだしてから事象が発生するまでの時間を含めた（リードタイムをもった）定量的予測は現状では行えず、それはまだ研究途上にある。

不確実性の起源は初期値（観測値）およびモデルの双方にある。初期値についての不確実性に対処するためには、初期値（観測値）の誤差の範囲で複数の初期値により予測をおこない、それらの結果から誤差の影響を統計的に評価するアンサンブル計算が必要である。これにより予測の信頼度を数値的に述べることができる。また、モデルはいくら精緻になろうとも、完全ではありえず、ひとつひとつのモデルの誤差は無くし得ないが、それらの誤差がランダムに分布している場合には、多くのモデル結果の平均がもっともらしい結果を出すことが知られているので、複数のモデルで予測計算を行うことが有効であるということである。緊急時にこのような評価を実現するためには、出来るだけ多くの観測データの集約、モデル化をおこなう省庁や研究者へのその配布、結果の集約とその評価をおこなう組織が必要である。その組織はさらに、結果を行政・報道機関・国民などに伝えるところまで責任を負うことが必要である。

5. 社会と地球惑星科学との間の相互理解の問題と課題

（1）自然現象理解の難しさを社会に伝える問題

東北沖大地震後、国民の科学および科学者への信頼感が損なわれたことが科学技術白書等で指摘された[48]。信頼感が損なわれた原因は複数存在しているが、「想定外」の言葉のひきおこした効果を見無視することはできない。自然災害等を通じて社会との接点が多い地球惑星科学は、国民の信頼を損ねたその理由を分析し、社会とのコミュニケーションを通じて、将来において同じような問題をひきおこさぬため、特別の努力を払わなくてはならないであろう。そのためには、問題を十分に整理し、適切な対応ができるように、それぞれの立場で日頃から準備を整えておかなくてはならない。

① 研究者の発言の問題

「想定外」という言葉は、当初は地震本部の責任者が、東北沖の3ブロックの連動に対して用いたのだが、瞬く間に、東北沖における巨大地震発生の可能性に対する認識そのものについて置き換わってしまったように見受けられる。多くの国民が、「地

震の専門家であるのに大地震発生の可能性すら想定できなかった」と受け止めた可能性が高い。さらに、研究者の多くは、事実に対し自分自身の理解を正直に述べるのが誠実なことであるとも考えることも多く、東北沖大地震についても、そのような対応をした可能性が高い。真摯な対応は場合によっては好ましく受け止められることもありえるが、ときには誤解を生じる可能性もある。地震・津波に限らず、自然災害のほとんどすべてが研究対象である地球惑星科学にとって、社会に対して発する言葉は研究者間で交わされる言葉とは異なる意味を持つことを自覚する必要がある。

地球惑星科学分野として、社会に発信する言葉がどのように受け止められるのか、また、どのような影響を及ぼすのかを日常的に議論し、コミュニティとしての教育・研修をおこなう仕組みを作る必要がある。

② 社会の側のリテラシーの問題

研究者の情報発信と社会との関係において発生する問題は、双方の視点から検討する必要がある。「想定外」の言葉が衝撃的にとらえられた背景には、地震発生の物理をはじめ、地球上でおこるさまざまな自然現象の複雑さとそれを予測することの問題がどれだけ深く理解されているかという問題も存在すると考えられる。沈み込み帯に位置する日本に生きる人々にとって、地球に起きる自然現象を的確に理解することは命に直結するきわめて大切な問題である。そのためには、初等中等教育や大学教養課程教育、社会人教育を充実させ、一人一人の教育・教養のレベルを高めることが重要である。自然現象は、物理現象、化学現象、生命活動などの複合的過程であり、その本質的な理解のためには、多様な教養を身につけることが大切である。また、それを保証するための教員養成・教員再教育の機会の充実、大学・大学院での社会人教育制度の充実等、あらゆる階層を対象とする教育の機会・内容をこれまで以上に充実させることが大切である。

報道機関は自然科学と技術における「想定外」の差異について適切に報道することが大切である。自然現象に対する人類の科学的理解は極めて限られている。自然科学的に解明が進んだ現象に関しても、将来予測には大きな不確実性を伴わざるを得ず、現実的には確率論的にしか論じることができない。まして、未曾有の現象や、実際には過去に生起していても記録がなく未だに知られていない現象に関しては、事前に科学的に論じることが極めて難しい。そうした現象が生じ得ると演繹的に推察されても、相応の確証がない限りは自然科学的にその現象があり得るとは断定されないため、生じた際には自然科学にとっての想定外となる。報道機関は情報発信に際しては、その確度と誤差を含めて国民に適切な情報を提供することが大切である。

(2) 緊急時における地球惑星科学からの情報発信のありかた

東北沖大地震・福島原発事故のもう一つの重大な教訓は、緊急時における学術からの情

報発信の問題である。放射性物質の大気拡散予測に関する SPEEDI の情報がなかなか発表されない中、研究者の中には独自に放射性物質の拡散予測を計算し、その結果を社会に公表しようという動きがあった。それに対し気象学会が、学会員が個人的に計算結果を公開することの慎重な取り扱いをよびかけたが、同学会の意図が冷静かつ十分に理解されないまま、大きな社会問題となった。批判の多くは、学問の自由の抹殺であり学問の自殺行為であるという論調であった。そのような批判には、国民自身が多くの情報の中から正しいと思うものを選択するべきであるという議論につながっていたものが多かった。国民、とりわけ東北・関東地域に居住する国民は、放射性物質拡散の情報を求めているが、SPEEDI の結果が公開されない一方で、諸外国からの拡散予測の情報がインターネット上で公開されるという事態に直面した。国民や報道機関が、国内研究者による予測の結果を期待したのは当然であろう。

しかしながら、もし個人のレベルで放射性物質拡散予測が公開されたとしたら、そしてその内容に大きなばらつきがあった場合、あの緊急時に本当に国民は適切に判断をすることができたであろうか。モデルの詳細が説明されるわけではなく、また大気物理シミュレーションの知識や経験が無い多くの国民は何を持ってその是非を判断することができるであろうか。複雑系の大気の運動に関する数値積分がもつ誤差や、初期条件が不確実な条件でおこなわれるシミュレーションの特性を適切に判断できる国民が何パーセントいるであろうか。さらに、複数のシミュレーションが異なる結果を与えた場合、なにを根拠にそれらを比較すべきであろうか。

これらのことを考えると、緊急時における情報発信はまったくの個人的な形でなされるべきではなく、一定の社会的責任ある組織が、複数の情報を適切な解説とともに発するのが望ましいといえよう。発信すべき情報は、放射性物質の拡散予測というような特定の事項に限られるのではなく、多種の情報がその対象となるはずである。そのためには、学術全体として情報を収集し、丁寧な誤差の説明や科学的に存在する可能性の幅の提示などを情報発信する仕組みが必要であろう。

(3) 学術会議の果たす役割

学術の情報のとりまとめには、学術会議の果たす役割が重要である。学術会議はボトムアップ組織でありながら、内閣府の組織であり、集約された情報を行政に最も短時間に伝えることのできる能力をもつ。また、行政に対しデータの提供を要求することのできる組織でもある。学術会議が学術と行政や社会との接点の役割を果たしてゆくことが、危機において社会に必要以上の混乱を与えず、科学の知を行政に反映することのできる方法である。地震、津波、火山噴火等については、行政の一部として、あるいは行政に直結する科学の統一的な組織が存在するが、たとえば、原発から放出された放射性物質拡散に関しては、そのような仕組みは存在しない。さらに、関連するあらゆる分野の知を統合する必要がある場合、それを保証するのは、学術会議をおいてほかにはない。日本学術会議は今回の地震・原発災害においてはただちに復興支援委員会を立ち上げ、学術からみた問題の指摘、

提案・提言等を多く発してきた。さらに 2014 年 3 月 6 日付け会長談話において、緊急時における学術会議の活動指針の策定の必要性を指摘しているほか、緊急時に対応すべき組織についての議論がおこなわれ、提言のとりまとめが進んでいる。これらの活動をさらに行政や社会との契約にまで進めることが重要である。

6. 提言

地震・津波により大きな被害を受ける可能性が高いプレート境界に位置し、なおかつ、原子力発電所をもつ日本において、地震・津波に対する研究をより一層前進させ、その成果が国民に還元され、安全・安心な社会の建設に役立つため、および、緊急時に科学的成果を国民に適切に情報発信してゆくためには、国や自治体、国民、報道機関、地球惑星科学研究者それぞれが、この災害により明らかになった問題点を認識し、将来に向けその問題点を改善する方策を検討し、行動に移す必要がある。本章においては、そのための提言をおこなう。

提言 1 国は海域における地震・津波調査観測網をいっそう整備すべきである

東北沖大地震後、日本海溝沿い、および東南海地域は観測網が整備されたが、その他の地域はまだほとんど手つかずの状態にある。日本周辺の海底地震津波観測網を整備し、地震時における津波警報発令までの時間を少しでも短縮することがきわめて重要である。1983 年日本海中部地震や 1993 年北海道南西沖地震による奥尻島津波における犠牲者のほとんどが津波によるものであったことを考えるなら、日本海などの海底津波計観測網の空白域をなくすことは、人的被害の軽減につながる。これらの観測網の設置ならびに適正な維持更新は、国が責任をもって行うべきである。特に海域の場合は、その維持に陸域以上の経費がかかり、定期的な補修もきわめて重要である。

提言 2 放射性物質拡散の実態把握および緊急時に向けた体制を構築すべきである

放射性物質の大気中と海洋への放出につき、事実のより詳細な把握、いまだに埋もれているデータの発掘が必要である。大気への排出量の時間変化と海洋への直接漏洩分のより詳細な把握が必要である。陸域の移行過程については、現状に関する詳細な観測的調査、長期的な移行過程についての観測体制の整備が必要である。海洋の移行過程は、非常に広範囲に長い時間スケールで起こっており、船舶観測による調査を続ける必要がある。衛星データを利用した同化システムの適用も強化すべきである。同時に、大気モデリングとデータ同化手法による数値実験の改善が必要である。

緊急状態においても機能する、放射性物質と気象場に関する安定かつ持続的な測定システムの確立、大気・海洋モデリングとデータ同化手法による数値実験の改善が必要であり、それら調査・研究を総合的かつ持続的に実施する体制、その結果を利用する危機管理システムの構築が必要である。そのため、日本学術会議東日本大震災復興支援委員会放射能対策分科会の提言「放射能対策の新たな一步を踏み出すために一事実の科学的探索に基づく行動を一(2012 年 4 月 9 日)」を踏まえて、省庁、地方自治体、民間を含めた総合的な設計が必要である。特に、気象庁や環境省が管轄する観測データと文科省や経産省モデリングの情報共有と連携をスムーズにおこなう仕組みを作ることが重要である。

提言 3 国民の安全のために学術と行政の連携の仕組みを強化すべきである

地震・津波対策、放射性物質拡散など、国民の安全に関わる問題に関しては、トップダウンとボトムアップメカニズム双方の推進による総合的な調査・研究の推進を一層はかるべきである。地震以外の分野においてはその体制は未構築であり、日本学術会議東日本大震災復興支援委員会災害に強いまちづくり分科会の提言「二度と津波犠牲者をださないまちづくりー東北の自然を生かした復興を世界に発信ー(2012年4月9日)」を踏まえて、早急な検討が必要である。

公的な防災機関が防災対策の政策判断するときは、短期的な視点にとらわれず、事象の頻度とその事象が生じた場合の被害の大きさや内容を総合的に考慮してリスク評価し、最新の科学的知見を尊重して検討すべきである。また、学術は最新の研究成果を積極的に行政に情報提供する取り組みが必要である。このことは、2013年1月25日付け日本学術会議声明科学者の行動規範にも指摘されている点であり、日本の科学と行政の間のきわめて重要な問題である。

さらに、緊急時に行政と学術が連携して調査・研究を行うための枠組みの整備をすべきである。国が主導して調査・研究を組織し、進める仕組みを、総合科学技術イノベーション会議、科学技術振興機構、日本学術振興会、日本学術会議などの組織を活用して設置すべきである。

提言 4 学術は危機における適切な情報発信の仕組みを作るべきである

学術は、重大な危機における学術的知見の集約、発信の方法について検討し、その仕組みを危機管理システムの一部として構築しなければならない。危機にあつては、社会は情報を求める一方、研究者が安易に情報を発信することは社会の混乱を招く危険もはらんでいる。また、科学がもつ知識や予測には不確実性と誤差が含まれている。その知は、行政や報道機関に的確に伝えられなくてはならない。行政は科学の知識、予測、それにとともなう誤差等をもとに判断をおこなう必要がある。この仕組みは、「緊急事態における日本学術会議の活動に関する指針」(日本学術会議第188回幹事会決定、2014年2月28日)を踏まえて、学術会議が主導的に構築すべきである。例えば、火山学の有識者や関連観測機関で構成する火山噴火予知連絡会が提供する知識をもとに、気象庁が火山噴火活動に対して行政的に対応していることなどは参考になるであろう。

提言 5 自然現象の予測は適切に報道されるべきである

地震や津波をはじめ地球に起こる現象は、複雑系の特徴をもち、一意的に決定される予測はありえない。学術は得られている知見とその適用範囲、予測にとともなう誤差の意味を丁寧に説明し、報道機関はそれらを正しく理解、報道することに努力し、特に、異なる意図の予測が国民の不安につながらぬよう心がけるべきである。

提言6 自然現象を深く理解することのできる教育の充実を図るべきである

すべての国民が、地球に生起する自然現象の本質を深く理解し、情報を自ら判断する能力を養うため、初等・中等教育、高等教育、さらに生涯教育において、科学的素養を涵養できる環境を整備することが重要である。複雑系の現象である自然現象の理解、多くの情報を国民一人一人が適切に判断・選択するためには、数学（算数）、国語などと同等に理科、社会科のあらゆる科目を着実に教育すること、それを可能とする教員養成・教員再教育の機会を整備すること、大学や大学院での社会人教育の制度を一層充実させること等、あらゆる場面における教育の機会とその内容の向上を目指す必要がある。また、地球惑星科学は、その成果をより一層広く国民に還元し、予測精度・誤差などを丁寧に説明すべきである。

< 図 表 >

表 1. 2011 東北沖大地震と 2003 十勝沖地震の震源域で起きたことの比較

項目 1)–3) は量的な違い、項目 4) は質的な違い。

項目	2011 年東北地震・津波 (Mw9.0)	2003 年十勝沖地震 (Mw8.0)	意味・解説 (比較)
1) 断層面の広がり	500 km×200 km	90 km×70 km	1) 強震動・大津波の範囲を規定。 (岩手県～茨城県の 500 km) 【5-10 倍の分布範囲】 2) 地殻内応力の変動範囲を規定。 (被害地震の誘発・火山活動の活発化: 1 日後の長野県北部の地震 (M6.7)、4 日後の静岡県東部の地震 (M6.4)、富士山や伊豆大島など多くの火山で、火山性地震が多発)
2) 断層すべり (最大値/平均値)	50～70 m/8 m	5.8 m/2.6 m	地殻変動、津波高を規定。 (陸上で水平 5m・上下 1m、海底で水平 24m・上下 3m の地殻変動) (沖合で 5m、海岸の最大波高 40m の津波) 【5-10 倍の地殻変動・津波高】
3) 断層面の破壊完了に要する時間	180 秒	45 秒	各地の揺れの継続時間を規定。 (震度 4 以上の揺れが、神奈川～青森県までの広範囲で 2 分～3 分継続)
4) プレート境界浅部 (海溝軸付近) の断層すべり	50～70 m	0 m	二段階の特異な巨大津波発生に関与: 典型的な海溝逆断層型地震による津波と、海溝浅部の津波地震の連動。 海岸から約 70 km 沖合の海底水圧計 (TM1) では約 6 分間かけて海面が約 2 m 上昇し、その数分後からは、2 分間のうちにさらに 3 m という急激な勢いで上昇するという 2 段階の特異な津波を、地震発生直後に記録 (図 2)。 これらの海底水圧計データ、沖合の GPS 波浪計、沿岸の潮位記録、及び浸水高・遡上高の高密度調査から、津波発生域は、沖合約 70 km から沖合 200 km の海溝軸に至るプレート境界浅部であることが判明 [5]。

参考文献[49-51]に基づいて作成

表 2. 震災以前に出されていた、東北沖の大地震発生に関する地震本部
の長期予測

震源域	2011 年以降の 30 年間の発生確率と規模
三陸沖北部	M8.0 程度、0.5-10%
宮城県沖	M7.5 程度、99%
宮城県はるか沖（三陸沖南部海溝寄り）	M7.7 程度、80-90%、
宮城県沖と宮城県はるか沖の 2 つの想定震源域の連動	M8.0 程度
福島県沖	M7.4 程度、7%程度以下、
茨城県沖	M6.7-M7.2 程度、90%程度以上
三陸沖から房総沖の海溝寄りの津波地震	M8.2 程度、20%程度

参考文献[11][12]に基づいて作成

表 3. 東北地震・津波以前の、宮城県付近の地震・津波に関する調査研究

研究領域	研究対象	内容と課題
地球物理学・測地学	地震計記録、検潮記録、測量による地殻変動	・揺れ自体はそれほど強くなくても、大津波を起こす地震（津波地震）の同定。 ・明治・昭和の三陸地震津波の解析。 ・信頼性は最も高いものの、記録が百数十年以上遡れない。そのため、平均繰り返し間隔が 100 年程度の巨大地震では、2 回以上の記録が残っている例はほとんどない。
歴史学 (古地震学)	揺れの強さ、津波高、被害等に関する歴史史料や資料	・「日本三大実録」の記載「貞観十一年五月二十六日（869 年 7 月 9 日）陸奥国で大地震。家屋倒壊や地割れの発生。津波が多賀城城下（仙台市の北）まで到達。平野が海のように冠水、千人が溺死。」 ・江戸時代より前の史資料の欠落の可能性。均一性を確保するために、江戸時代以降の史料が、地震本部の長期評価に用いられていた。
地形・地質学	津波堆積物（津波によって運ばれた砂層）や、地震によって生じた地形変化	・貞観地震と同様な津波堆積物を残した津波が、およそ 450 年～800 年程度の繰り返し間隔で発生 ・堆積物や地震で生じた地形変化等が時代とともに失われることがあり、その場合過小評価につながる可能性

参考文献[11][13-16]に基づいて作成

表 4. 地震調査研究推進本部の施策の経緯（東北地震津波以前）

時期	内容	達成状況
1997 年 8 月	地震に関する基盤的調査観測計画 1) 陸域の地震観測網整備 2) 地殻変動観測網整備 3) 陸域・沿岸域の活断層調査 4) ケーブル式海底地震・津波観測 5) 海域の地形・活断層調査 6) 地殻構造調査	1) 高感度地震観測網 1 0 0 0 点、基盤強震観測網 7 0 0 点、広帯域地震計 8 0 点 2) GPS 観測網 1 4 0 0 点（国土地理院電子基準点等） 3) 全国 1 1 0 の主要活断層について、位置・長さ・形状・活動履歴等を系統的に調査 4)-6) 一部を除いて予算化されず
1999 年 4 月～ 2009 年 3 月	地震に関する総合基本施策 1) 活断層調査、地震の発生可能性の長期評価、強震動予測等を統合した地震動予測地図の作成 2) リアルタイム地震情報伝達の推進 3) 地震防災対策強化地域の観測の充実 4) 地震予知のための観測研究の推進	1) 地震の発生場所、規模、将来的な発生確率（長期評価）を順次公表（宮城県沖地震について、3 0 年以内に 9 9 % の発生確率など）。全国を概観した地震動予測地図の作成・公表・更新 2) 緊急地震速報の開始、地震情報の早期伝達 3) 東海地震予知のための監視システムの構築と常時観測体制の維持 4) 基礎研究の推進による知見の獲得（低周波微動・スロースリップの発見、アスペリティモデル構築）
2009 年 4 月～	地震に関する新総合基本施策 1) 海溝型地震の発生予測、地震動・津波予測の高精度化 2) 活断層情報の体系的収集・整備及び評価の高度化 3) 防災・減災に向けた工学及び社会科学研究を促進するための橋渡し機能の強化	1) 東海・東南海・南海地震の連動発生可能性評価、海域地震観測網の強化、強震動シミュレーションの高度化、津波データの即時利用による津波予測〔実施中の内容〕 2) 沿岸海域及びびずみ集中帯等の未調査活断層や、短い活断層や地表に現れていない断層の評価、「活断層基本図」の作成〔実施中の内容〕

参考文献[52-54]に基づいて作成

表 5. ボトムアップ型の地震予知に関する基礎研究

年月	事項	内容	体制
1965 年 ～1998 年	地震予知計画（第 1 次～ 第 7 次）	前兆現象の発見に主眼を置 いた地震予知	一部の国立大学中心
1999 年～ 2008 年	地震予知のための新たな 観測研究計画（第 1 次、 2 次）	・観測や実験による地震現象 の科学的な解明 ・地震発生モデルの構築 ・予測シミュレーションの実 現を目指した研究	・全国の 14 の大学（私立大学 2 を含む）が 連携した、組織的研究（地震予知研究協議 会）。 ・年度毎の計画と成果の公開、 ・評価に基づく予算配分、 ・一般研究者向けの公募研究枠の確保
2009 年～	地震及び火山噴火予知の ための観測研究計画	地震と火山噴火の予知研究 の統合	・地震火山噴火予知研究協議会 ・共同利用・共同研究拠点が研究経費を一括 管理。 ・重点的な経費配分によって、単独の大学・ 機関では困難であった大型の観測研究を 実施

参考文献[55-57] に基づいて作成

表 6. 東北地方の地震・津波防災に関する、国及び地方自治体の活動
（東北地震津波以前）

年月	中央防災会議	地震調査研究推進本部	地方自治体等 (県、市町村)
2002 年 7 月		長期評価において、日本海溝付 近で、今後 30 年間に 20%の確率 で、津波マグニチュード 8.2 程 度の地震発生を予測 [11]	
2006 年 1 月	「北海道・東北地方の震度及び海 岸での津波高の想定とりまとめ」 (専門調査会) [58] ※宮城県沖以南の日本海溝付近の 津波地震についての地震本部地震 調査委員会の長期評価は、取込ま れず。		
2006 年 以降			中央防災会議の津波高の想定にも とづき、津波ハザードマップ作成、 公表、家庭への配布。

参考文献[11][58] に基づいて作成

表 7. 東北地震津波後の、政府の施策・指針等の見直し

年月	見直し対象	内容等
2011 年 9 月	「新たな地震調査研究の推進について―地震に関する観測、測量、調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策―」 (地震調査研究推進本部)	・超巨大地震・大津波の発生モデルの構築、 ・地震発生履歴データの充実、 ・海底地殻変動観測の整備、 ・超巨大地震に対応した緊急地震速報の構築、 ・津波即時予測技術の高度化 (海域の津波観測網や G N S S 観測網の充実)
2011 年 12 月	「防災基本計画」 (中央防災会議)	・最大クラスの地震・津波を検討対象 ・津波対策の構築に、二つのレベルの津波を想定（低頻度・甚大被害の最大級の津波と、それよりも津波高は低いものの発生頻度は高く、大きな被害をもたらす津波）。 ・前者は人命保護を最優先した対策、後者は人命保護に加え、財産・経済活動の保全の対策
2012 年 8 月	南海トラフの地震・津波被害想定 (中央防災会議) [24]	東海、東南海、南海地震、日向灘地域、さらに海溝寄りの地域に津波地震が同時発生を考慮。Mw 9.1 の超巨大地震について 11 ケースの断層モデルを想定し、計算された中で最大のものを公表[24]。震度 7 の揺れが静岡県から宮崎県までの 10 県、20 m 以上の大津波に襲われる地域が 8 都府県。冬の深夜に発生した場合の死者は 32 万 3 千人（津波で約 23 万人、建物倒壊で 8 万 2 千人、火災などで 1 万 1 千人）、家屋の全壊および火災による消失棟数は 120 万棟
2012 年 3 月	「発電用原子炉に関する安全設計指針(案)」、「耐震設計指針(案)」(原子力安全委員会 地震・津波小委員会)	・津波に対する安全設計事項を明確に規定 ・基準津波の策定方針 「国内外の大規模な津波事例を踏まえ、津波の発生機構やテクトニクスの背景の類似性を考慮した上での検討、 ・津波に関しても「残余のリスクを合理的に実行可能な限り小さくするための努力」の規定（「策定された津波を超える津波が施設に襲った場合においても、周辺公衆に対して放射線被ばくにより災害を及ぼすことのリスクを抑えるよう措置」)

参考文献[24] [59-61] に基づいて作成

表 8. 原子力発電所の安全審査指針・手引き等と、電力事業者の対応

年月	指針等の策定・改訂・対応	主な内容
1978 年 9 月	発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針策定（原子力委員会）	・活断層調査を電気事業者に義務化。津波対策は明記されず。 ・活断層調査に基づく地震規模の評価と応答スペクトルの経験的關係式を用いた、設計用の基準地震動の策定。 ・活断層がない場合にも、直下で M6.5 の地震発生を想定した基準地震動の策定。
2002 年 2 月	「原子力発電所の津波評価技術」[25]（土木学会原子力土木委員会津波評価部会） ※規制当局による公的なものではない。	・過去に発生した最も大きな津波（既往津波）を想定した、評価手法の提案（設計津波水位を設定する標準的な方法の提案） ・「各領域で想定される最大級の地震津波をすでに経験しているとも考えられるが、念のため、プレート境界付近に将来発生することを否定できない地震に伴う津波を評価対象とする」
2006 年 9 月	発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針の改訂（原子力安全委員会）	・地震随伴現象としての津波に対する安全評価を要求
2008 年 8 月頃～ 2009 年 8 月頃	既往施設の安全性を再評価する「バックチェック」（東京電力）	・福島県沖で津波地震が発生した場合や 869 年貞観地震のモデル[5]を用いた場合について、福島第一原発における津波高さを試算（8.9m～15.7 m） ・1938 年福島県沖地震（M 7.5）と同程度の地震を想定。5.4 から 6.1m という津波高を試算し、原子力安全保安院に報告
2010 年 12 月	「発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査の手引き」（原子力安全委員会）	超巨大地震の震源モデルの設定について、「プレート間地震の起こり方については、・・・（中略）隣接する震源領域が連動して破壊が広範囲に及ぶ場合があるため、敷地に大きな影響を与える歴史記録にない巨大地震発生の可能性を検討する観点から、敷地周辺における海成段丘面の高度分布や津波堆積物等に関する調査・研究結果を慎重に検討すること」と記述

参考文献[25][62-65]に基づいて作成

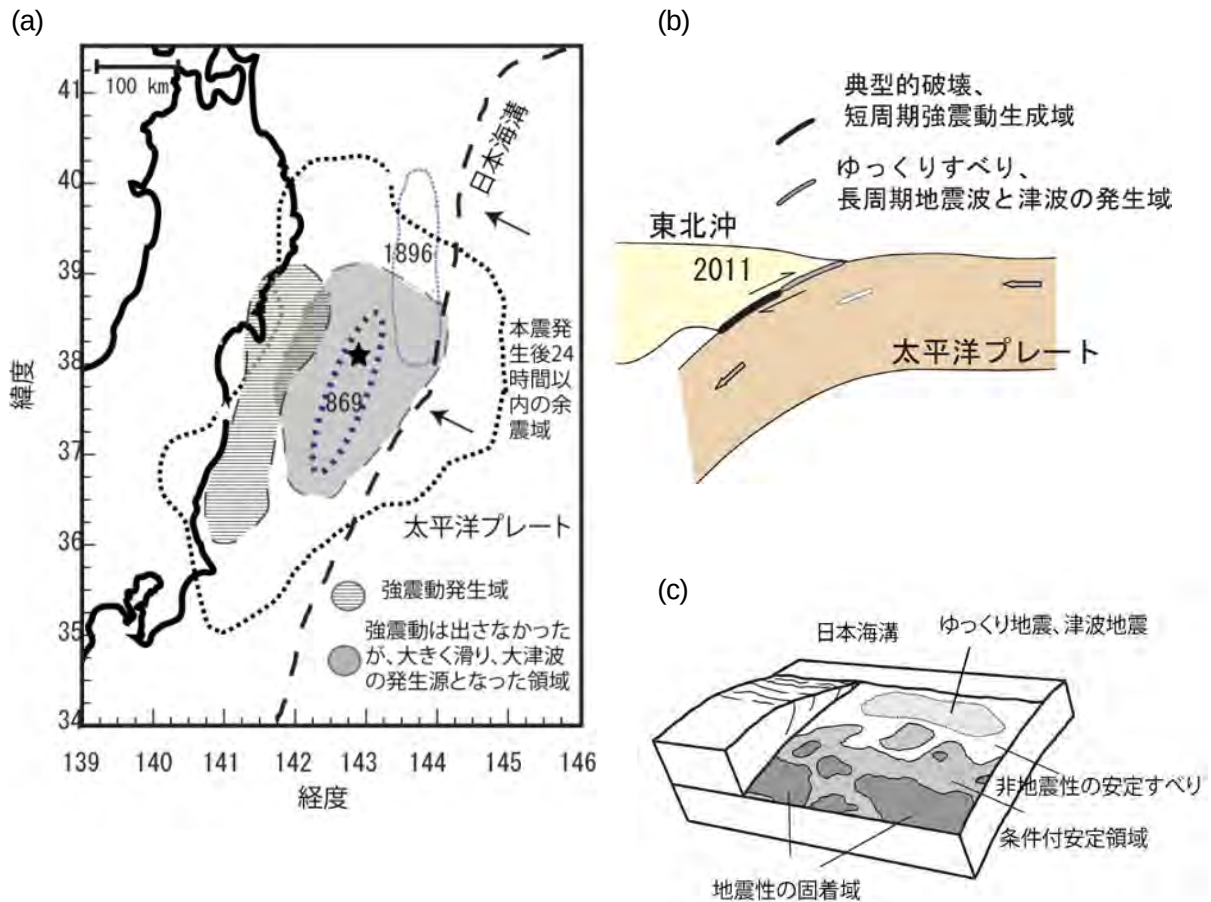


図1 東北地方太平洋沖地震の震源域

- a) ★は本震の破壊開始点（震源）を示す。震源域の主要部は、沖合の津波発生域と陸側の強震動生成域に分かれている。1896と869は、それぞれ、明治三陸地震（1896年）と貞観地震（869年）の震源域を表す。これらの過去のM8クラスの巨大地震と比べると、M9の2011年東北地方太平洋沖地震の巨大さが理解できる。
- (b) 震源域の鉛直断面を、南側からみたときの概念図。(a)の津波発生域は浅部（灰色）に、また、強震動生成域は深部（黒）に分布する。
- (c) 震源域を南西側上空から見たときの鳥瞰図。

参考文献[8]の原図に加筆

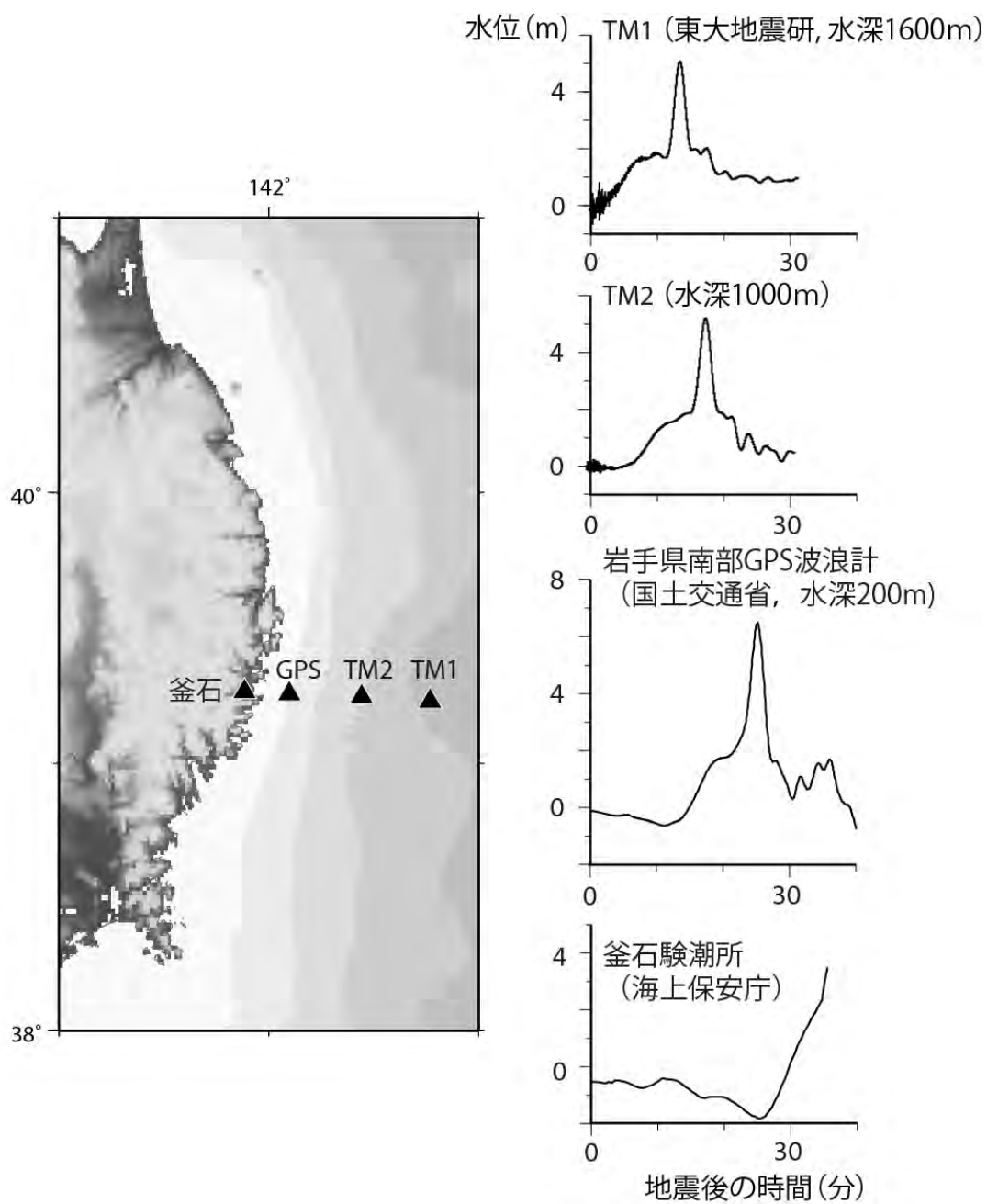


図2 沖合の津波計と沿岸の潮位計で記録された東北地方太平洋沖地震の津波
参考文献[66]より

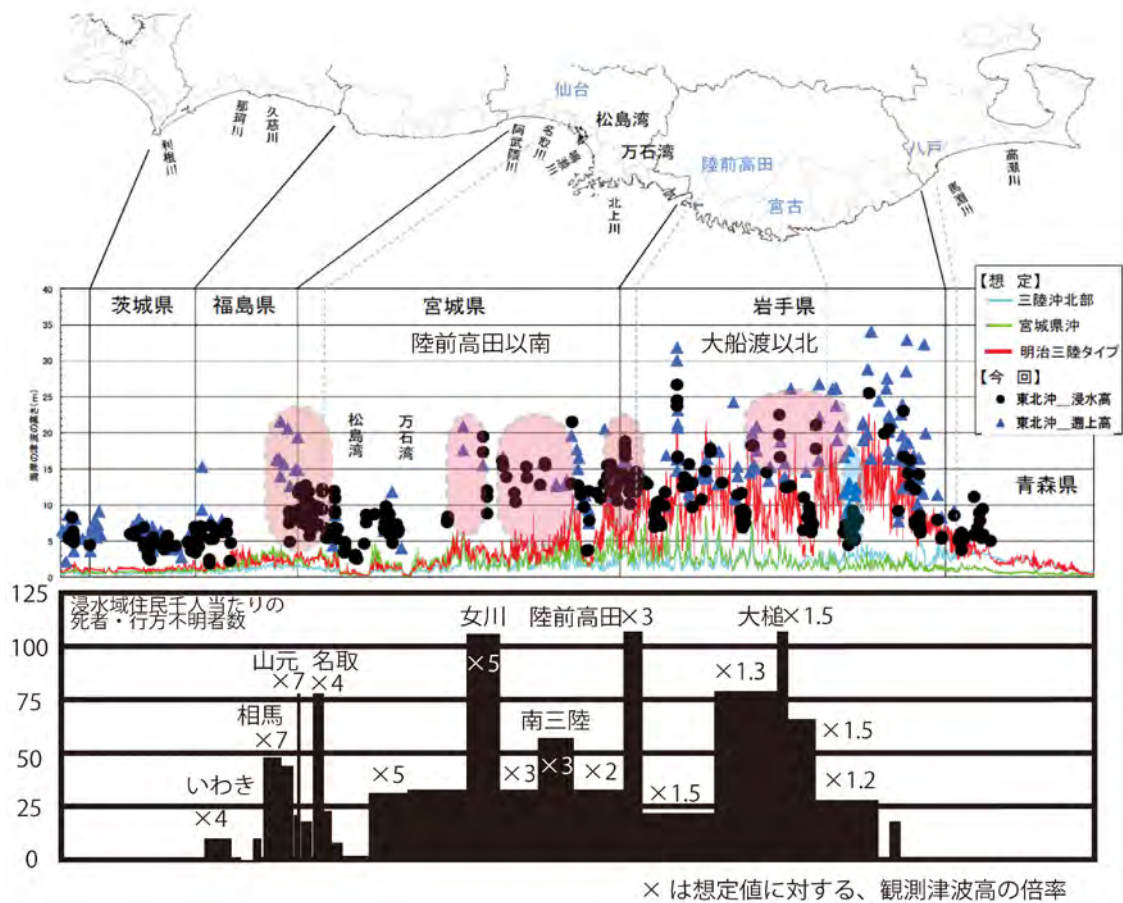


図5. 津波高の想定値に対する実際の観測高の比率と、浸水域住民の人的被害の関係

上段は津波調査対象の太平洋沿岸地図。中段は、東北地方太平洋地震による浸水高●と遡上高▲と、想定されていた津波高（赤線、緑線、青線）の比較。5つの楕円領域は、実際の津波が想定と著しく乖離している箇所。下段は、浸水域内に居住していた者の犠牲率（千人当たりの死者・行方不明者の合計人数）。

参考文献[69]をもとに作成

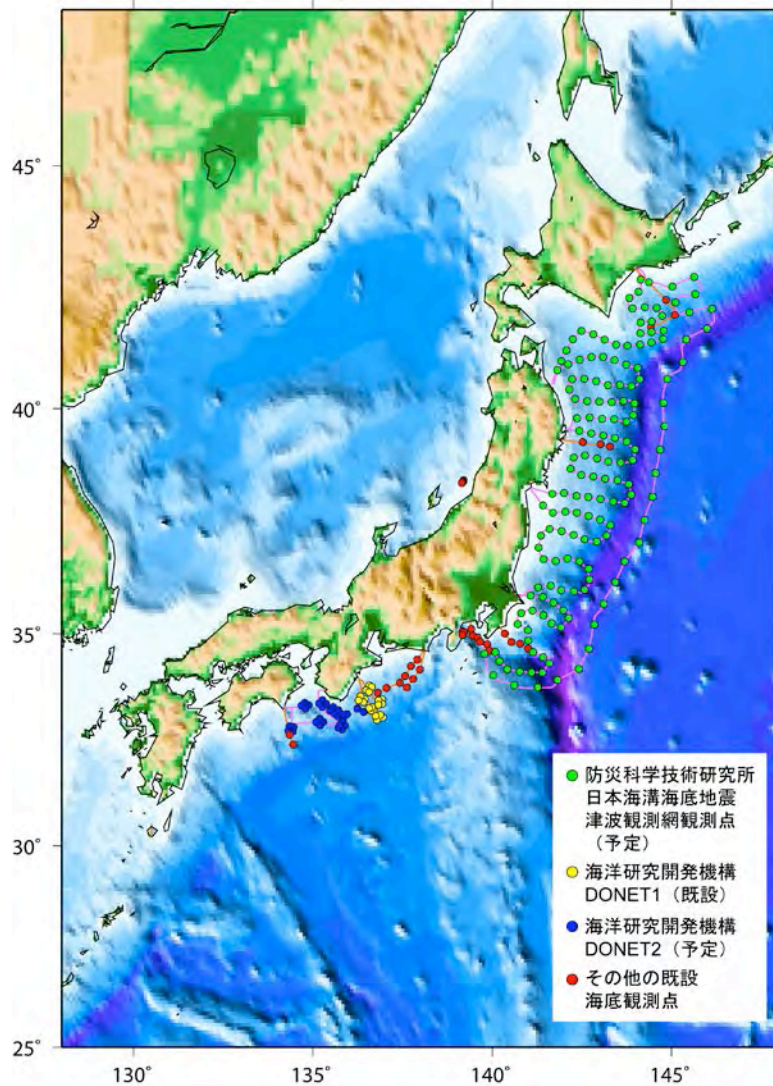


図 6. 日本周辺の海底地震
津波観測網の設置状況
および設置計画
(平成 26 年 7 月現在)

参考文献[70-71]をもとに作成



図 7. 航空機モニタリングによる
 ^{137}Cs の沈着量と、輸送モデルに
よって推定された放射性プルームの主な
経路

参考文献[33]より

<参考文献>

- [1] Sato, M. et al., Displacement above the hypocenter of the 2011 Tohoku-Oki earthquake, *Science*, 332, 1395, 2011.
- [2] Fujiwara, T. et al., The 2011 Tohoku-Oki earthquake: Displacement reaching the trench axis, *Science*, 334, 1240, 2011.
- [3] Ozawa S. et al., Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake, *Nature*, 475, (7356), 373-376, 2011.
- [4] 佐竹健治ほか, 東北地方太平洋沖地震の津波波源, *科学*, 81(5), 407-410, 2011.
- [5] Fujii, Y. et al., Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 815-820, 2011.
- [6] Kurahashi, S., K. Irikura, Source model for generating strong ground motions during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 571-576, 2011.
- [7] Koper, K.D. et al., Frequency-dependent rupture process of the 2011 Mw 9.0 Tohoku Earthquake: Comparison of short-period P wave back projection images and broadband seismic rupture models, *Earth Planets Space*, 63, 599-602, 2011.
- [8] Lay, T., and H. Kanamori, Insights from the great 2011 Japan earthquake, *Physics Today*, 64, 33-39, 2011.
- [9] Yamanaka, Y., and M. Kikuchi, Asperity map along the subduction zones in northeastern Japan inferred from regional seismic data, *J. Geophys. Res.*, 109, B07307, doi:10.1029/2003JB002683, 2004.
- [10] Matsuzawa, T., T. Igarashi, and A. Hasegawa, Characteristic small-earthquake sequence off Sanriku, northeastern Honshu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2001GL014632, 2002.
- [11] 地震調査研究推進本部, 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価について, 2002. (http://www.jishin.go.jp/main/chousa/02jul_sanriku/)
- [12] 地震調査研究推進本部, 今までに公表した活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧, 2011. (http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/ichiran_past/ichiran20110111.pdf)
- [13] 澤井祐紀ほか, ハンディジオスライサーを用いた宮城県仙台平野（仙台市・名取市・岩沼市・亘理町・山元町）における古津波痕跡調査, 活断層・古地震研究報告, 7, 47-80, 2007.
- [14] 穴倉正展ほか, 石巻平野における津波堆積物の分布と年代, 活断層・古地震研究報告, 7, 31-46, 2007.
- [15] 佐竹健治, 行谷佑一, 山木滋, 石巻・仙台平野における 869 年貞観津波の数値シミュレーション, 活断層・古地震研究報告, 8, 71-89, 2008.
- [16] 地震調査研究推進本部, 宮城県沖地震における重点的な調査観測 総括成果報告書, 2010. (http://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/miyagi_juten/h17_21/index.htm)
- [17] Suwa, Y. et al., Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three dimensional

- displacement fields, *J. Geophys. Res.*, 111, B04402, doi:10.1029/2004JB003203, 2006.
- [18] Gilovich, T., *How we know what isn't so: The fallibility of human reason in everyday life*, Free Press, New York, pp. 216, 1991.
- [19] 平成 26 年度地震調査研究関係政府予算
 (<http://www.jishin.go.jp/main/yosan/h26/yosan26b.pdf>) によれば、地震調査推進本部関係が約 15 億円、地震防災研究戦略プロジェクトが約 16 億円、独立行政法人防災科学技術研究所における研究開発が約 48 億円、国土地理院における調査観測等が約 14 億円、気象庁における調査観測等が約 18 億円等の内訳である。また、復興特別会計約 15 億円と地震調査研究推進本部の経費約 3 億円により、日本海溝海底地震津波観測網が整備されることになった。
- [20] 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画に関する外部評価委員会, 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画に関する外部評価報告書, 2012.
 (<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/YOTIKYO/OpenReport/review121026.pdf>)
- [21] 中央防災会議, 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 第 1 回会合資料 3-2, 2011. (<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinihon/1/3-2.pdf>)
- [22] 中央防災会議, 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告, pp. 44, 2011.
 (<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/pdf/houkoku.pdf>)
- [23] 島崎邦彦, 予測されたにもかかわらず, 被害想定から外された巨大津波, *科学*, 81, 1002-1006, 2011.
- [24] 中央防災会議, 南海トラフの巨大地震による震度分布, 津波高について (第 1 次報告, pp. 44, 2012. (http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/1st_report.pdf)
- [25] 土木学会原子力土木委員会, 原子力発電所の津波評価技術, 2002.
 (<http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/system/files/TA-MENU-J-01.pdf>)
- [26] 東京電力, 福島原子力事故調査報告書, 2012.
 (<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/interim/index-j.html>)
- [27] Terada, H., G. Katata, M. Chino, and H. Nagai, Atmospheric discharge and dispersion of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Part II: Verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion, *J. Environ. Radioactivity*, 112, 141–154, doi:10.1016/j.jenvrad.2012.05.023, 2012.
- [28] Stohl, A., P. Seibert, G. Wotawa, et al., Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: Determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 2313-2343, doi:10.5194/acp-12-2313-2012, 2012.
- [29] Kawamura, H., T. Kobayashi, A. Furuno, T. In, Y. Iishikawa, T. Nakayama, S. Shima, and T. Awaji, Preliminary Numerical Experiments on Oceanic Dispersion of ¹³¹I and ¹³⁷Cs Discharged into the Ocean because of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster, *J. Nucl. Sci. Tech.*, 48, 1349-1356, doi:10.1080/18811248.2011.9711826, 2011.

- [30] Tsumune, D., T. Tsubono, M. Aoyama and K. Hirose, Distribution of oceanic ^{137}Cs from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant simulated numerically by a regional ocean model, *J. of Environ. Radioactivity*, doi:10.1016/j.jenvrad.2011.10.007, 2012.
- [31] Estournel, C., E. Bosc, M. Bocquet, et al., Assessment of the amount of Cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters, *J. Geophys. Res.*, 117, C11014, doi:10.1029/2012JC007933, 2012.
- [32] Miyazawa, Y., Y. Masumoto, S. M. Varlamov, T. Miyama, M. Takigawa, Honda, M. and Saino, T. Inverse estimation of source parameters of oceanic radioactivity dispersion models associated with the Fukushima accident, *Biogeosciences Discuss.*, 9, 13783-13816, doi:10.5194/bgd-9-13783-2012, 2012.
- [33] 日本原子力研究開発機構, 公開ワークショップ「福島第一原子力発電所事故による環境放出と拡散プロセスの再構築」資料, 東京, 2012 年 3 月 6 日.
(<http://nsed.jaea.go.jp/ers/environment/envs/FukushimaWS/index.htm>)
- [34] Bailly du Bois, P., P. Laguionie, D. Boust, I. Korsakissok, D. Didier and B. Fiévet, Estimation of marine source-term following Fukushima Dai-ichi accident, *J. Environ. Radioactivity*, 114, 2-9, doi:10.1016/j.jenvrad.2011.11.015, 2012.
- [35] Rypina, I. I., S. R. Jayne, S. Yoshida, A. M. Macdonald, E. Douglass, and K. Buesseler, Short-term dispersal of Fukushima-derived radionuclides off Japan: Modeling efforts and model-data intercomparison, *Biogeosciences Discuss.*, 10, 4973-4990, doi:10.5194/bgd-10-4973-2013, 2013.
- [36] NHK NEWSweb, 2014 年 7 月 26 日
(<http://www3.nhk.or.jp/news/genpatsu-fukushima/20140311/index.html>)
- [37] Takemura, T., H. Nakamura, M. Takigawa, H. Kondo, T. Satomura, T. Miyasaka, and T. Nakajima, A numerical simulation of global transport of atmospheric particles emitted from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, *SOLA*, 7, 101-104, doi:10.2151/sola.2011-026, 2011.
- [38] 日本学術会議, 総合工学委員会原子力事故対応分科会報告, 東京電力福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質の輸送沈着過程に関するモデル計算結果の比較, 付録表 3.2 および 6.1, 平成 26 年 (2014 年) 9 月 2 日.
(<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-h140902-j1.pdf>)
- [39] 文部科学省, 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI) を活用した試算結果, 3 月 12 日午前 6 時から 4 月 24 日午前 0 時までの積算線量, 2011.
(http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/mext_speedi/0312-0424_in.pdf)
- [40] Kato, H., Y. Onda, and T. Gomi, Interception of the Fukushima reactor accident-derived ^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{131}I by coniferous forest canopies, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L20403, doi:10.1029/2012GL052928, 2012.
- [41] 原子力規制委員会, 放射線モニタリング情報, 第 6 次航空機モニタリング (2013 年 3 月)・第 7 次航空機モニタリング (2013 年 12 月)・福島県及びその近隣県における航空機モニタリング (2014 年 3 月) .

- (<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/362/list-1.html>)
- [42] 原子力規制委員会, 放射線モニタリング情報, 測定結果の CSV 及び KMZ ファイル, 福島県下の河川の調査結果, 浮遊砂の調査結果 (fuyuu_sand.csv) 及び 河川水の調査結果(kasen_sui.csv).
(<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/338/list-1.html>)
- [43] 原子力規制委員会, 放射線モニタリング情報, 海洋モニタリング結果 (2014 年 3 月) .
(<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/500/list-1.html>)
- [44] Rossi, V., E. Van Sebille, A. Sen Gupta, V. Garçon, and M. H. England, Multi-decadal projections of surface and interior pathways of the Fukushima Cesium-137 radioactive plume, *Deep-Sea Res. I*, 80, 37–46, doi:10.1016/j.dsr.2013.05.015, 2013.
- [45] Masumoto, Y., Y. Miyazawa, D. Tsumune, T. Tsubono, T. Kobayashi, H. Kawamura, C. Estournel, P. Marsaleix, L. Lanerolle, A. Mehra, and Z. D. Garraffo, Oceanic Dispersion Simulations of ¹³⁷Cs Released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, doi:10.2113/gselements.8.3.207, *ELEMENTS*, 8, 207–212, 2012.
- [46] Kumamoto, Y., M. Aoyama, Y. Hamashima, T. Aono, S. Koketsu, M. Murata and K. Kono, Southward spreading of the Fukushima-derived radiocesium across the Kuroshio Extension in the North Pacific, *Nature Scientific Reports*, 4, 4276, doi:10.1038/srep04276, 2014.
- [47] 中島映至, 渡邊明, 鶴田治雄, 恩田裕一, 中村尚, 宮坂貴文, 近藤裕昭, 滝川雅之, 竹村俊彦, 植松光夫, 原発事故:危機における連携と科学者の役割, *科学*, 81, 934-943, 2011, 岩波書店.
- [48] 文部科学省, 平成 24 年版科学技術白書, 第 1 章第 2 節, 科学技術に問われているもの, 2012.
- [49] 長谷川昭, 東北沖地震はなぜ予測できなかったか? *地震ジャーナル*, 53, 1-9, 2012.
- [50] Yoshida, K., K. Miyakoshi, and K. Irikura, Source process of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake inferred from waveform inversion with long-period strong-motion records, *Earth Planets Space*, 63, 577-582, 2011.
- [51] Yamanaka, Y. and M. Kikuchi, Source process of the recurrent Tokachi-oki earthquake on September 26, 2003, inferred from teleseismic body waves, *Earth Planets Space*, 55, e21-e24, 2003.
- [52] 地震調査研究推進本部, 地震に関する基盤的調査観測計画, 平成 9 年 8 月 29 日, 1997. (<http://www.jishin.go.jp/main/seisaku/hokoku97/s8kei.htm>)
- [53] 地震調査研究推進本部, 地震調査研究の推進について:地震に関する観測, 測量, 調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策, 平成 11 年 4 月 23 日, 1999. (<http://www.jishin.go.jp/main/suihon/honbu99a/h9s3b.htm>)
- [54] 地震調査研究推進本部, 新たな地震調査研究の推進について:地震に関する観測, 測量, 調査及び研究の推進についての総合的かつ基本的な施策, 平成 21 年 4 月 21 日, 2009. (<http://www.jishin.go.jp/main/suihon/honbu09b/suishin090421.pdf>)
- [55] 測地学審議会, 地震予知計画の実施状況等のレビューについて: 報告, pp. 137, 1997.
- [56] 地震及び火山噴火予知研究計画に関する外部評価委員会, 地震及び火山噴火予知研究

- 計画に関する外部評価報告書，平成 19 年 6 月 28 日，2007.
(http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/icsFiles/afildfile/2012/06/13/1218058_1_1.pdf)
- [57] 地震及び火山噴火予知のための観測研究計画に関する外部評価委員会，地震及び火山噴火予知のための観測研究計画に関する外部評価報告書，平成 24 年 10 月 26 日，2012.
(http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu6/toushin/icsFiles/afildfile/2012/11/01/1327595_01.pdf)
- [58] 中央防災会議日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会，日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震の被害想定について 巻末資料 1，2006.
(http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/nihonkaiko_chisimajishin/pdf/kanmatsu1.pdf)
- [59] 地震調査研究推進本部，「新たな地震調査研究の推進について」の見直し内容について(1)，2012. (http://www.jishin.go.jp/main/suison/honbu12c/suishin120907_minaoshi.pdf)
- [60] 中央防災会議，第 29 回議事録，2011.
(<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/29/index.html>)
- [61] 原子力規制委員会，実用発電用原子炉及び核燃料施設等に係る新規制基準について，2014. (<http://www.nsr.go.jp/activity/data/20140214.pdf>)
- [62] 原子力委員会，発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針について，1978.
(<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/about/ugoki/geppou/V23/N09/197807V23N09.html>)
- [63] 原子力安全委員会，「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」等の耐震安全性に係る安全審査指針類の改訂等について，別添 1 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針，2006. (<http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/sonota/kettei/20060919-31.pdf>)
- [64] 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会，最終報告書，2012.
- [65] 原子力安全委員会，発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査の手引き，2010.
(www.nsr.go.jp/archive/nsc/shinsashishin/pdf/1/101220_1.pdf)
- [66] 佐竹健治・堀宗朗(編)，東日本大震災の科学，第 2 章，東京大学出版会，pp. 1-272，2012.
- [67] 地震調査推進本部ホームページ.
(http://www.jishin.go.jp/main/p_shokai01.htm#， http://www.jishin.go.jp/main/p_shokai01_info.htm)
- [68] 中央防災会議ホームページ.
(<http://www.bousai.go.jp/taisaku/soshiki1/soshiki1.html>)
- [69] 中央防災会議，東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告，参考図表集.
(<http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chousakai/tohokukyokun/pdf/sankou.pdf>)
- [70] 防災科学技術研究所，日本海溝海底地震津波観測網全体計画.
(<http://www.bosai.go.jp/inline/seibi/seibi01.html>)
- [71] 海洋研究開発機構，地震・津波観測監視システム.
(<https://www.jamstec.go.jp/donet/j/donet/>)

＜参考資料 1＞ 地球惑星科学委員会審議経過

平成 24 年 (2012 年)

6 月 16 日 委員会 (第 3 回)

地球惑星科学連合大会報告、地球惑星科学委員会表出の提言の作成にとりかかることを了承、他

12 月 27 日 委員会 (第 4 回)

各分科会活動報告、大型研究問題、提言の素案について議論、他

平成 25 年 (2013 年)

6 月 15 日 分科会 (第 5 回)

地球惑星科学連合報告、提言の素案を了解、他

12 月 26 日 委員会 (第 6 回)

大型研究計画、夢ロードマップ、提言の内容を検討

平成 26 年 (2014 年)

7 月 5 日 委員会 (第 7 回)

各分科会活動報告、地球惑星科学委員会表出の提言の内容を検討・承認

8 月 28 日 日本学術会議 (第 199 回)

地球惑星科学委員会 提言

「これからの地球惑星科学と社会の関わり方について－

東北地方太平洋沖地震・津波・放射性物質拡散問題からの教訓」
について承認

地球惑星科学企画分科会審議経過

平成 24 年 (2012 年)

6 月 16 日 分科会 (第 4 回)

大学教育問題について、地球惑星科学委員会表出提言の作成について議論、他

9 月 18 日 分科会 (第 5 回)

長谷川昭東北大名誉教授・佐竹健治連携会員講演、提言の内容について議論、他

10 月 29 日 分科会 (第 6 回)

入倉孝次郎・鬼頭昭連携会員講演、提言の内容について議論、他

11 月 16 日 分科会 (第 7 回)

横山広美東京大学准教授講演、提言の内容について議論、他

12 月 27 日 分科会 (第 8 回)

大型研究問題、提言について議論、他

平成 25 年 (2013 年)

2 月 14 日 分科会 (第 9 回)

地球惑星科学連合報告、提言の素案について議論、他

5 月 7 日 分科会 (第 10 回)

大型研究とりまとめ、提言の内容について議論、他

9 月 17 日 分科会 (第 12 回)

地球惑星科学連合報告、提言の内容について議論、他

12 月 26 日 分科会 (第 13 回)

地球惑星科学連合ユニオンセッション、提言の内容について議論、他

平成 26 年 (2014 年)

4 月 4 日 分科会 (第 14 回)

各分科会・小委員会報告、提言の内容について議論、他

7 月 5 日 分科会 (第 15 回)

大型研究マスタープランについて、地球惑星科学委員会表出の
提言の検討・承認、他