

# 地震 ジャーナル

63

2017年 6月

エッセイ 地震予測と防災 ●山岡耕春

会長就任のご挨拶 ●金沢敏彦—— 1

平成 28 年（2016 年）11 月 22 日福島県沖地震

による津波について—その実態と対応 ●今村文彦—— 2

2016 年 10 月 21 日鳥取県中部の地震（M6.6）について ●香川敬生——14

オクラホマ州の誘発地震 ●楠瀬勤一郎——23

1855 年安政江戸地震の川越における被害 ●新井健司——32

2016 年 6 月 16 日南茅部（函館）地震 ●谷岡勇市郎／椎名高裕——40

韓国慶州マグニチュード 5.8 地震 ●石川有三——45

津波碑は犠牲者を減らすことができたのか？ ●佐藤翔輔——48

●書評——53

●新刊紹介——54

「地震ジャーナル」全号電子アーカイブ化に伴う

著作権委譲に関するお願い ●——56

●ADEP 情報——58

困み記事 SAR による地殻変動観測の原理

**地震予知総合研究振興会**

ASSOCIATION FOR THE DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE PREDICTION

# 地震予測と防災

山岡耕春

筆者が座長を務めた内閣府の「南海トラフの大規模地震の予測可能性に関する調査部会」が2013年5月に出した報告では、地震の短期的予測について、①「確度の高い地震の予測は困難」と言いきった。その上で、②不確実であるが地震が起きやすいと判断できる場合があるとも述べている。

これらが防災上で意味するところは何だろうか。上記部会は防災に関する議論をする場ではなかったので、あくまで私見として考えを述べたい。①は言うまでもなく、地震は突発的に発生することを前提として防災対策を図る必要があるということであらためて喚起したものと解釈できる。しかし、静岡県を含めた全国の自治体では、すでに地震が前触れなく発生することを前提とした地震防災対策に全精力が注がれているので、いまさら感はある。その上で、②は、可能な限りの防災対策を尽くした上で、低い確率でしか表現できない地震の予測を災害軽減に活かす知恵をみんなで絞ってほしいという願いと解釈したい。

みんなで知恵を絞るためには、地震発生の予測確率に関する知見を共有する必要がある。2016年に改めて設置された上記の作業部会では、結局のところ、現時点で信頼性を持って地震の短期予測に使える法則は余震の大森法則的（ETASも含む）なもののみであると結論した。つまり、1つの地震の発生によって誘発される地震の統計則のみが定量的な確率評価に使えるものという結論である。具体的な確率は実際に発生した地震を用いて調べる必要がある。地震本部の報告によると、日本の内陸でM5以上の地震に引き続いてさらに大きな地震が発生した割合（前震である割合）は約6%である。最も信頼できる法則によっても地震の予測はこの程度の低確率でしかない。

予知・予測によって地震災害軽減をめざしてきた研究者にとっては、「これだけ？」という印象であろうが、枯れた技術としてはやはり「これだけ」であることを認めざるを得ない。防災上は、この枯れた技術を活かすべく知恵を絞り、津波などで失う命を1つでも減らす努力が必要だと思う。一方、ユニバーサルに適用できる経験則であるものの、大森則の物理的意味にはいまだ諸説がある。大森則を単純化して地震発生率が時間の逆数（ $1/t$ ）に比例するとし、それを積分すると対数（ $\log t$ ）になる。時間の対数といえば、断層のhealingや余効すべりを連想させる。大森則は地殻変動観測でしか捉えられないスロースリップと、地震発生との時間的關係を確率的に記述できる可能性も秘めている。「これだけ」であっても、災害の軽減に知恵を絞るための新たなスタートラインとしては悪くはない。



山岡耕春

[やまおか こうしゅん]

**現職** 名古屋大学大学院環境学研究科教授  
副研究科長

**略歴** 名古屋大学大学院理学研究科博士課程修了、東京大学地震研究所伊豆大島火山観測所助手、名古屋大学理学部助教授、東京大学地震研究所助教授を経て現職、日本地震学会会長、地震予知連絡会副会長

**研究分野** 地震学、火山学、臨床火山防災学  
**著書** 「南海トラフ地震」（岩波新書）、「Q&A 日本は沈む？」（理工図書）など

# 会長就任のご挨拶

## 金沢敏彦

本年の4月1日に公益財団法人地震予知総合研究振興会の会長に選任されて、就任いたしました。

わが国は、太平洋プレートとフィリピン海プレートが年数センチメートルの速さで移動してきて日本列島下に沈み込んでいるという海と陸のプレートが押し合っている変動帯の上であり、つねに大小の地震に見舞われてきました。ひとたび大地震に襲われた場合、国民の生命・財産の損失や社会経済への影響は甚大であり、まさに国の命運を左右することにもなりかねません。少なくとも大地震の発生を予知・予測して、被害を最小限に抑えたいということは、私どもの悲願であります。

財団法人地震予知総合研究振興会は1981年（昭和56年）1月に設立されました。斯界の英知を結集して、地震災害の軽減をはかるための地震予知・予測および防災についての総合的な調査・研究の推進と科学技術の振興をはかり、もって国民の生命・財産の保全に寄与することを目的としています。2012年（平成24年）4月にはより公益性を高めるために公益財団法人に移行しました。

当財団は、これまで30年以上にわたって、大学など関連分野の専門的な学術・技術的知見を活用しつつ、政府や民間の地震調査研究を支えるべく総合的に調査・研究業務を推進して参りました。この間、1995年（平成7年）に兵庫県南部地震の発生、2011年（平成23年）には東北地方太平洋沖地震の発生と、言葉では言い表せないほどの衝撃的な被害をもたらした大震災が相次ぎ、また2016年（平成28年）には熊本地震が発生しました。このような災害が繰り返されないよう、先端的な調査・観測技術を活用しつつ、調査・研究に全力で取り組むことが私どもに課せられた使命であると考えます。

最近では南海トラフ巨大地震や首都直下地震の発生が懸念されています。わが国の地震災害を最小限にするため、阪神・淡路大震災後に整備された陸域の地震観測網に加え、東日本大震災の未曾有の地震・津波災害をうけて、海域においても地震・津波の海底ケーブル式観測網の抜本的拡充・強化が図られています。これらの新たな海と陸の一体的なリアルタイム観測網に関しても、私どもの知識経験を最大限に活用する所存です。

さて、当財団の機関誌である「地震ジャーナル」は、財団設立5周年（1986年）を機に創刊されました。それ以来、年に2回の刊行を続けてきて今号で63号を数えます。岡田義光編集長が現在進めている創刊号から50号までの地震ジャーナルの電子化が完了すれば、創刊号からの記事も改めてお読みいただけるようになります。この地震ジャーナルが今後も多くの方にもますますお役に立つことを願っています。

最後に、今後も地震予知・予測および防災に関する社会的要請に積極的に対応して参りますので、よろしくご指導・ご協力を賜りますようお願い申し上げます。

金沢敏彦

[かなざわ としひこ]

**現職** 公益財団法人地震予知総合研究振興会会長、東京大学名誉教授

**略歴** 東京大学理学部地球物理学科卒業、同大学院理学系研究科地球物理学専門課程博士課程単位取得退学、理学博士（東京大学）、東京大学理学部、東京大学地震研究所、国立研究開発法人防災科学技術研究所を経て現職



# 平成28年(2016年)11月22日福島県沖地震による津波について—その実態と対応

今村文彦

2016年11月22日、福島県沖を震源とするマグニチュードM7.4地震(最大震度5弱)により津波が発生し、青森県から千葉県にかけての太平洋沿岸、さらには千葉県内房、および伊豆諸島にも拡大されて津波注意報・津波警報が発表された。最大で51万人に津波避難指示や勧告が発令されたことになる。2011年東北地方太平洋沖地震の余震とみられる活動で強い揺れと津波が発生したことになり、今後も余震の活動は続くと思われる。この地域での防災や減災の対応(特に津波避難)が重要である。今回、震源とは離れた仙台港で最大津波観測値である1.4m(第二波)が観測され、2011年以降で東北地方沿岸域において最大の津波を観測した地震となった。本文では、津波の発生・伝播、沿岸域への影響、さらには地域での対応の状況と課題などを紹介したい。

## 1. 観測された地震および津波について

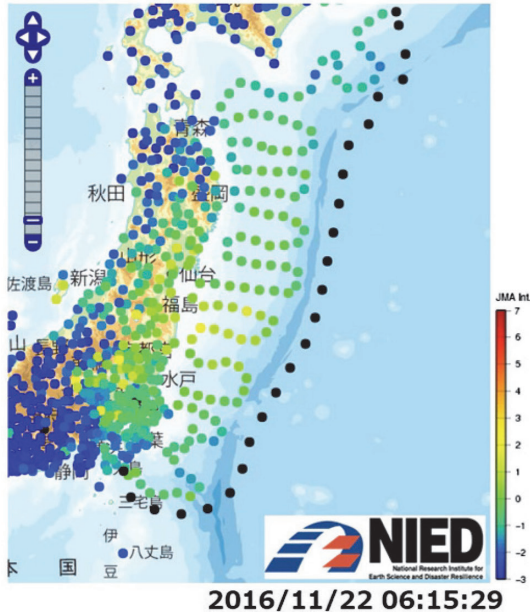
### 1.1 概要

2016年11月22日午前5時59分、福島県沖を震源とするM7.4の地震が発生し、福島県・栃木県・茨城県の16市町村で震度5弱を観測した。震源の深さは25km、発震機構は北西-南東方向に張力軸を持つ正断層型、日本海溝より陸域側のプレート内にて発生した地震である<sup>1)</sup>。今回の地震は2011年東北地方太平洋沖地震の余震と考えられる。この地域には太平洋プレートの沈み込み帯付近があり、2011年3月11日以前はプレート境界での逆断層地震が多かった。それ以降は、逆断層地震に加えて、地殻変動で地盤が東西方向に伸びる形の歪みが生じている影響で「正断層型」の地震も頻発している。

地震に伴い津波が発生し、青森県から千葉県にかけての太平洋沿岸、千葉県内房、および伊豆諸島に津波注意報および津波警報が発表された。午前6時2分に福島県に津波警報、青森県太平洋沿岸から千葉県の太平洋沿岸域まで津波注意報が発表された後、午後12時50分まで継続された。沿岸部では、いわき市小名浜で午前6時29分に第一波の引き波が観測され、その後、仙台港で午前8時3分に津波の最大観測値である1.4m(第二波)が観測された。この観測に伴い、気象庁はそれまで宮城県に発表していた津波注意報を津波警報に切り替えた。沿岸各地の市町村においては、気象庁の津波情報に従って避難指示・避難勧告が発令された。最大で51万人に津波避難指示や勧告が発令された。人的被害はなかったものの、発令基準(の整理や統一)、避難の実態(迅速な避難が実施された一方で、避難に際して渋滞が確認された)に課題を残していた。

今回の地震と津波は防災科学技術研究所<sup>2)</sup>が運用を開始した陸域(K-NET, KiK-net)と海域(S-net)の強震動データ(リアルタイム震度)を統合した揺れの伝播の様子(強震モニタ)と、S-netの水圧データによる津波の伝播(津波モニタ)が観測された。強震モニタではS-netがまず揺れの始まりを捉え、その後に陸域・海域ともに揺れの広がっていく様子が確認できる。さらに、津波モニタでは地震発生の15分後くらいから(図1)、福島県沖より津波による水圧変動が同心円状に伝播していく様子がみられ、沖合での津波の発生から伝播についてリアルタイムで高密度に監視することが可能となった。なお、今回の地震規模では、沖合に伝播する津波は波高が小さくなるために、観測測定誤差もあり確認しづらくなっ

## 強震モニタ



## 津波モニタ

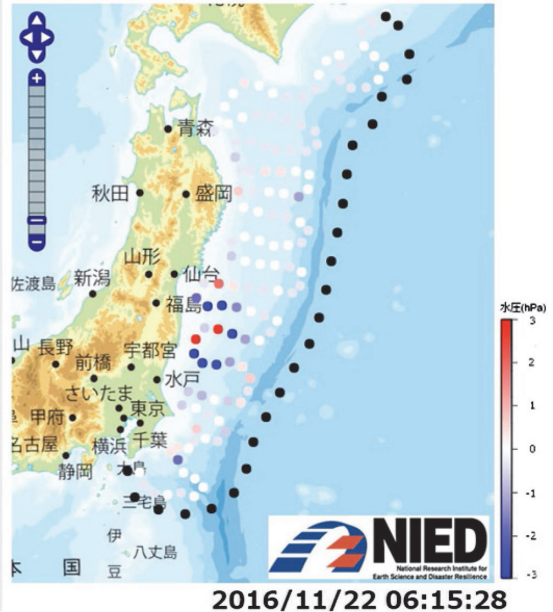


図 1 リアルタイムでとらえた強震 (左) と津波 (右)<sup>2)</sup>

ている。

### 1.2 津波の発生・伝播の特徴

気象庁による当時の暫定解では地震の規模が M7.4 で震源の深さも 25km と浅いために、断層運動に伴い海底の地殻変動が生じることで津波が発生した。余震の分布状況から、その範囲は 40km×20km ほどと推定される。発生した津波は、福島県沿岸を中心に伝播していき、図 2 に示すように 20cm を超える津波の高さは北海道から千葉・伊豆諸島にも及んだ。さらに、津波として観測された範囲は広がり、北海道から和歌山県に至る。

津波の発生した場所が沿岸に近く、その周辺では長く続く海岸線を有する。沿岸には水深が比較的浅い陸棚があり、沖合には日本海溝という水深が深い海域がある。このように岸沖方向に海底地形変化をもつ沿岸に沿って伝播する津波は境界波 (エッジ波) と呼ばれている<sup>3)</sup>。津波は屈折および反射を繰り返しながら陸棚上に沿って伝播していき、遠くまで到達する。途中で津波が増幅されることもある。

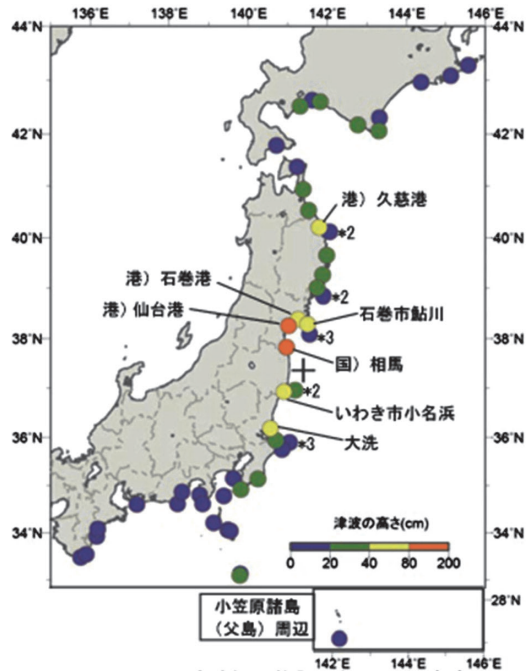


図 2 観測された津波の高さ (+印が震源)<sup>1,4)</sup>

図 3 には、気象庁で整理した験潮記録を示す。震源に近いいわき市や大洗では、津波到達も早く

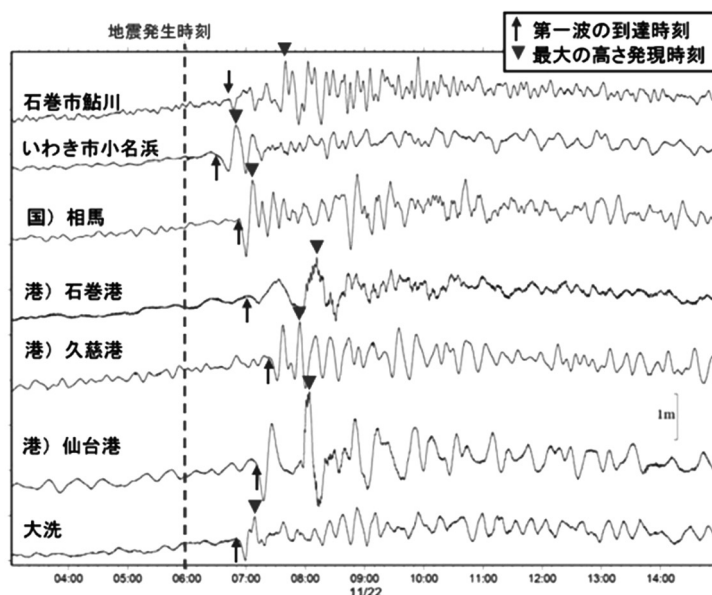


図 3 津波観測状況 (11月22日午前), 各地での津波の挙動がわかる<sup>1,4)</sup>

かつ引き波での初動がみられ, その後の第一波の押し波が最大になっていることがわかる。一方, 震源から離れるにつれ津波の初動は変わらないが, 到達時間は遅れかつ最大波の出現も第二波以降の後続波にみられる。特に, 仙台港と石巻港での記録には, 他にみられない長周期成分が確認された。これは仙台湾での共振現象が発生したものと考える。後ほど, 数値解析結果の説明の際に議論するが, 仙台湾奥で最大波が生じた理由として, 断層の走向や仙台湾での増幅機構が考えられる。

## 2. 気象庁での津波警報等の発表と更新

気象庁は, 発生した地震の位置や規模に応じてあらかじめ準備してある津波予報データベースと照らし合わせて, 沿岸部での津波の高さを予測し, その高さに応じて津波警報・注意報を発表している。今回, 一連の津波警報等の発表と更新について表1にまとめる。午前6時2分に福島県に津波警報, 青森県太平洋沿岸から千葉県太平洋沿岸域まで津波注意報が発表されたのち, 午前7時26分に注意報の範囲が拡大し, 仙台港で午前

8時3分に今次津波の最大の観測値である1.4m(第二波)が観測された。この観測結果に伴い, 午前8時9分に気象庁はそれまで宮城県に発表していた津波注意報を津波警報に切り替えた。午前9時46分には警報は解除され, 注意報の範囲も狭まった(一部解除)。さらに12時50分に, すべての津波注意報は解除された。

現在, 気象庁は以下のプロセスで津波を評価し, 津波警報等の発表と更新を行っている;

- ① 震源決定によるデータベース検索
- ② CMT 解の Mw によるデータベース検索
- ③ 沖合津波観測点 (GPS, S-net, DONET など) の実況
- ④ 沿岸の津波観測点の実況

当初, 宮城県に発表されていたのは「津波注意報」であるが, これは①に示された予測方法により, 沿岸部での津波の高さが0.2m以上, 1m以下と予想されていたことを示す。②, ③の情報(実況)も加わったが, 宮城県で警報に更新する値ではなかった。しかしながら, 仙台港で午前8時3分に津波の最大の観測値である1.4mの押し波が観測されたことを受けて(④), 気象庁は宮城県に発表していた津波注意報を津波警報に切り

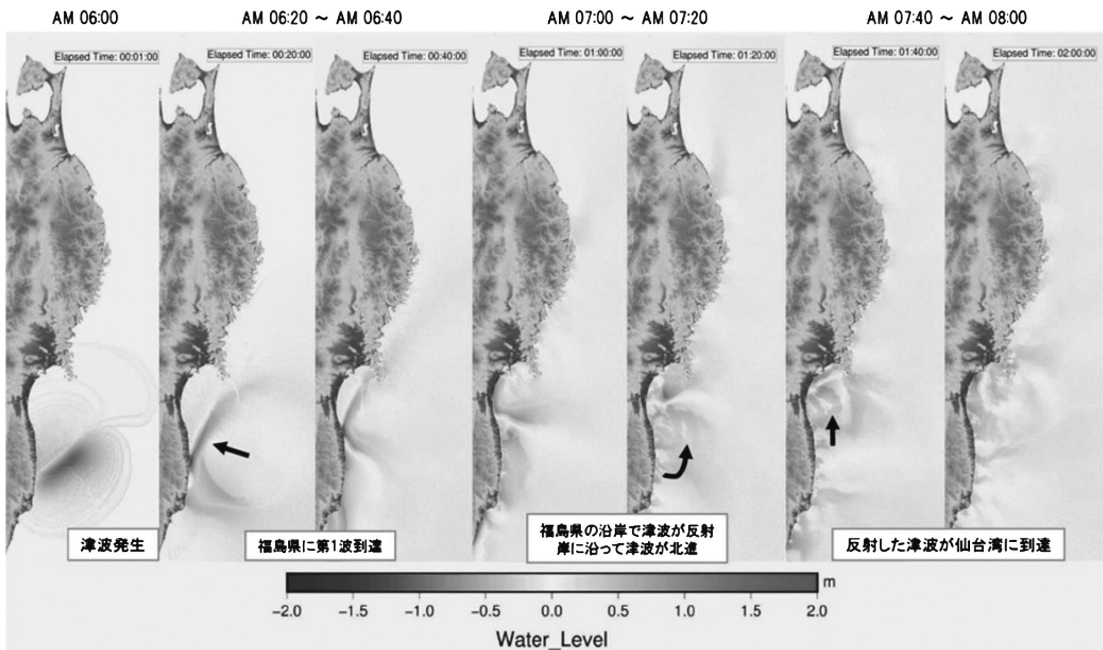


図 4 福島県沖地震による津波の解析<sup>5)</sup>

表 1 気象庁による津波警報・津波注意報の発表<sup>1,4)</sup>

津波予報区	発表時刻 (11月22日)				
	6:02	7:26	8:09	9:46	12:50
青森県太平洋沿岸	津波注意報	津波注意報	津波注意報	若干の海面変動	
岩手県	津波注意報	津波注意報	津波注意報	津波注意報	若干の海面変動
宮城県	津波注意報	津波注意報	津波警報	津波注意報	若干の海面変動
福島県	津波警報	津波警報	津波警報	津波注意報	若干の海面変動
茨城県	津波注意報	津波注意報	津波注意報	津波注意報	若干の海面変動
千葉県九十九里・外房	津波注意報	津波注意報	津波注意報	若干の海面変動	
千葉県内房	若干の海面変動	津波注意報	津波注意報	若干の海面変動	
伊豆諸島	若干の海面変動	津波注意報	津波注意報	若干の海面変動	

替えている。

過去、気象庁が発表していた津波注意報から津波警報へ切り替えることは、東日本大震災のときにも実施している。今後も②から④の検索や実況により更新されることは考えられる。われわれは津波注意報や津波警報において発表される予想津波高さにとらわれず、今回のように局所的に予想よりも高い津波がくることも考えて、避難行動を

実施する必要があると言える。避難した場所においても、ここなら安心であると思わずにより高い場所を目指して避難すること、さらに津波注意報・警報が発表されている間はけっして海岸に近づくことなく、さらに津波注意報・警報が解除されるまでは避難を続けることが重要である。

ただし、今回、宮城県での予測を超える高さの津波が観測された要因の解明は必要であり、今後

のデータベース検索や予報の改善は必要である。  
4.で紹介するが、現時点でも避難行動に及ぼす  
警報と注意報の差は実態としてあり、より正確な  
情報をより早く提供することは不可欠である。

### 3. 仙台港でなぜ後続波が警報基準を 越えたか？—数値解析による考察

震源決定によるデータベース検索では注意報レ  
ベルであったが、第二波で警報レベルまで増幅し  
た原因を解明する必要がある。特に、なぜ仙台港  
で第二波の後続波が増幅したのか？今後のデータ  
ベースや津波解析において課題はあるのか？を検  
証しなければならない。

まず、気象庁の速報と経験則から推定した暫定  
断層パラメータ（長さ40km、幅20km、すべり  
量2m、走向65度）を用いて、津波の発生およ  
び伝播計算を実施した<sup>5,6)</sup>。ここでは、計算格子  
間隔は、広域で405m、沿岸域で45mまで細分  
化している。

図4に津波発生から伝播の様子を示す。まず、  
福島県沖合で発生した津波は、20分後には県内  
の沿岸に到達し、そこで反射波を生じている。震  
源の福島県沖に近い福島県沿岸部より遠地の仙  
台港において最大の津波が観測されたのは、地震  
の断層の向き（走向）が原因と考えられる。40分  
後には、仙台湾に向かう成分が確認できる。さら  
に1時間後には、福島県沿岸で反射した成分の一  
部が、仙台湾に向かって伝播していることが分か  
る。これは、地形の影響を受けて、一部が屈折を

しながら伝播方向を変えて（回り込み）向かった  
ことになる。この際の伝播の方向は、地形形状に  
加えて断層の走向が重要となる。断層の走向は東  
北東-西南西であり、走向の直交方向に向かって  
地盤は大きく変化し津波を発生させる。そのため  
第一波（40分後位）において、津波の主なエネ  
ルギー伝播方向も断層の短軸方向に向かうこと  
（津波の指向性）になるため、この方向に位置し  
ていた仙台湾周辺地域に第一波が到達すること  
になる。これに加えて、1時間後位に福島県沖合  
で発生した津波成分が仙台湾に回り込み、第一波に  
第二波が重なり合うかたちで増幅したものと考  
える。

図5では、仙台港での津波時間波形の比較を  
行っている。黒線は解析結果、点線は観測結果で  
ある。第一波の位相と振幅に若干の違いがみられ  
るものの第二波の出現時間や波高については良好  
に一致しており、図4で示唆された、福島県沖  
で反射されて発生した第二波の到達により、増幅  
されたことが確認された。反射や屈折については  
海底地形の精度と断層の走向が強く関係するた  
め、つぎに、海底地形の精度を高め波動モデルも  
精密なものを使って、走向の影響のみに注目して  
検討してみた。表2には、気象庁データベースの  
諸元と本解析の条件とケース（3つ）について整  
理した。数値解析による結果を図6および図7に  
示す。いずれも仙台湾への第一波の伝播（エネ  
ルギーの指向性による直接波）および福島沿岸で反  
射されて回り込んで仙台湾に向かう第二波（エ  
ッジ波）は確認できるが、Case 3においては、ず

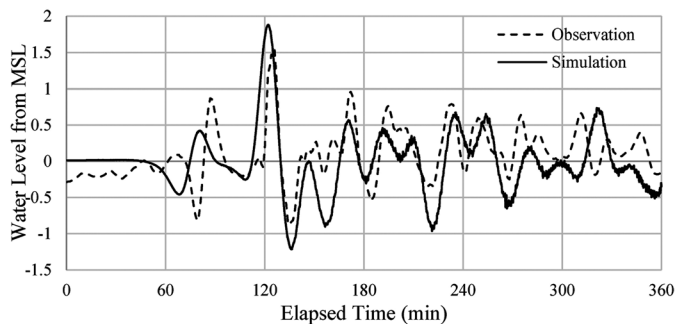


図5 暫定解析による津波の時間波形と観測波形の比較（仙台港）



表 2 初期条件や計算条件の比較

	走向	海底地形データ (格子サイズ)	波動モデル
気象庁データベース	180度(195度)に固定	500m	線形長波理論
本解析	65度や90度を追加 Case 1; 65度 Case 2; 90度 Case 3; 180度	405m から 45m まで 細分化	非線形長波理論 (海底摩擦あり, 遡上なし)

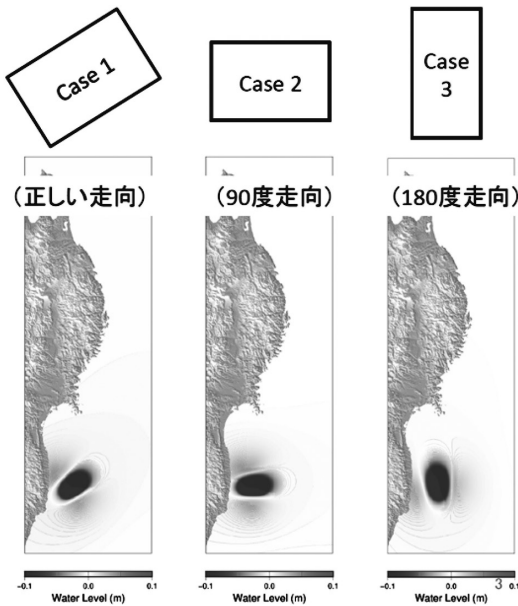


図 6 3つのケースでの津波初期波形

れも振幅が小さく、仙台湾奥での増幅は小さい。最終的に、仙台湾での時間波形の比較を図8に示すが、Case 3では3割程度他のケースより低く、しかも波高が1mに達していない。以上から、図7にも示したように今回の仙台湾(仙台湾)での津波増幅は、第一波の直接波と第二波のエッジ波の重畳により生じており、ここでは断層の走向が重要であることが示された。今後、気象庁のデータベースなどにおいても、走向を変えた事例を追加することが必要である。

#### 4. 津波の河川遡上など

津波は、沿岸域に到達後に陸域や河川を遡上し

ていく。特に、河川は河口を通じて海域と接続されているために、津波は容易に浸入していく。今回も、宮城県多賀城市の砂押川、七北田川などで津波の遡上が観測・報告されている。特に、砂押川の河口は砂州などが発達していないために、津波が浸入しやすい。河川を遡上するなかで、津波は波高を増加させながら、波を分裂させていく。今回も津波の先端付近でいくつもの短周期に分かれて上流側に遡上していく津波が目撃された。分裂した1つ1つの波の高さは大きくなる傾向にあり、さらには河川の流路形状に応じてさらに高さを増す場合が考えられる。一般的に通常の河川構造物は流水が上流から下流方向に作用する場合を考慮して設計されているため、津波にさらされると設計時には考慮していない流体力等を受けることになり、内陸への越水や堤防の決壊により被害を受ける場合が考えられる。

さらに、津波が河川を遡上するところを橋梁上や河川堤防から撮影している様子が散見されるが、上記のとおり予想外に波が高くなることや堤防を越流することが考えられるため、沿岸部から離れた内陸部であっても、津波注意報・警報が発表されているときには河川や橋梁に近づくことはたいへん危険であり、速やかに避難するべきである<sup>7)</sup>。

### 5. 地震・津波における社会の対応

#### 5.1 マスメディアなどを通じた情報伝達—東日本大震災の教訓は活かされたか？

気象庁による津波警報・注意報の発表直後、テレビやラジオ等の放送メディアにより津波への警

## Case 1(正しい走向)

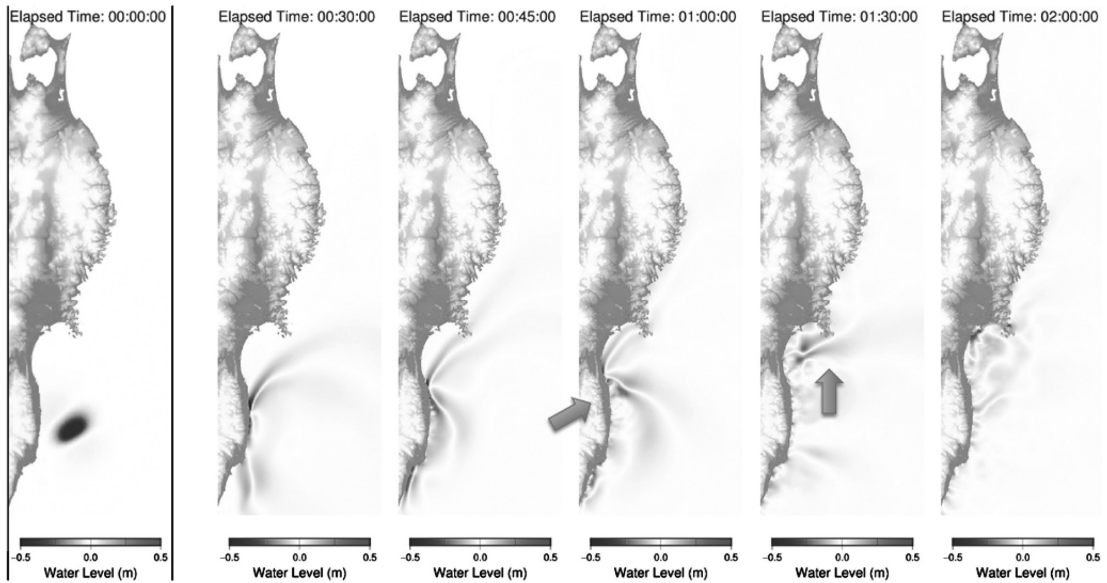


図 7 (1) Case 1 での伝播の様子

## Case 2(90度走向)

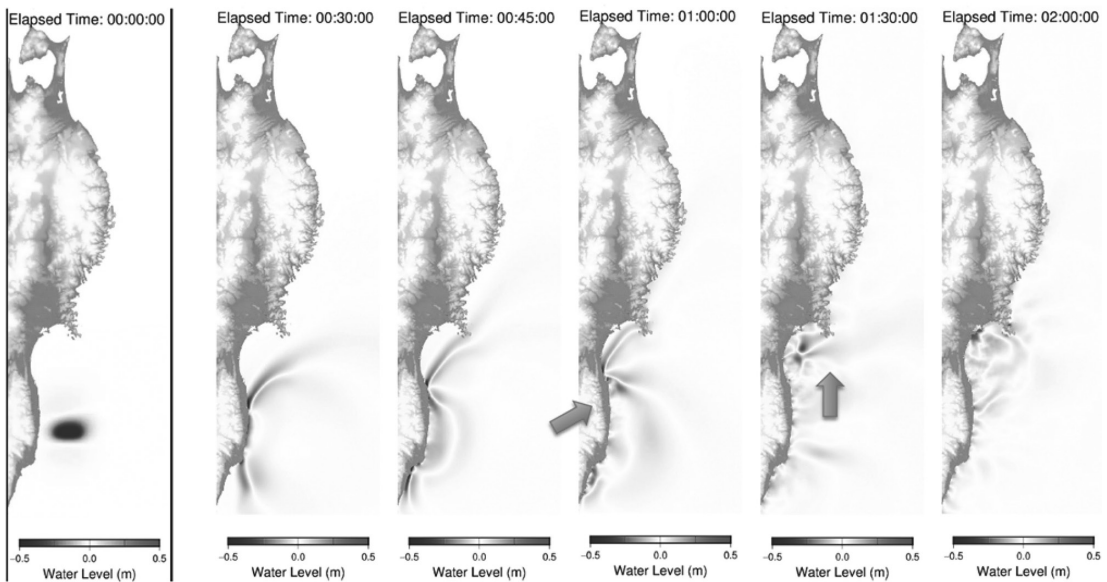


図 7 (2) Case 2 での伝播の様子

戒や避難の呼びかけが繰り返された。たとえば、NHK では地震発生直後の午前 6 時からのニュースで福島県沖を震源とする地震の発生を伝え、津

波警報発表後には「今すぐ逃げてください」、「東日本大震災を思い出してください」など強い口調で繰り返して避難や注意を呼びかけた。さらに、

### Case 3(180度走向)

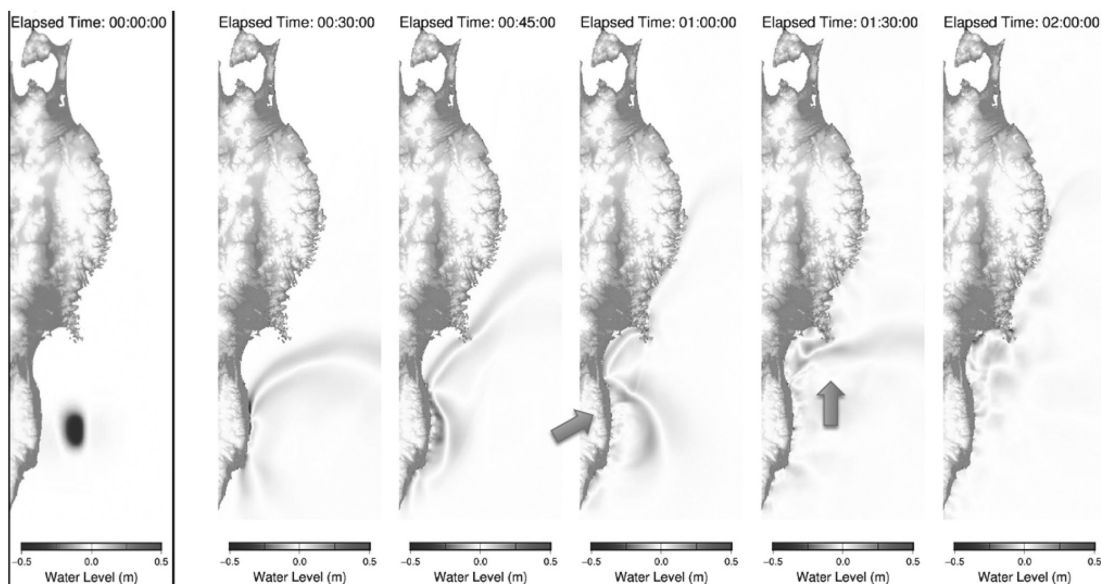


図 7 (3) Case 3 での伝播の様子

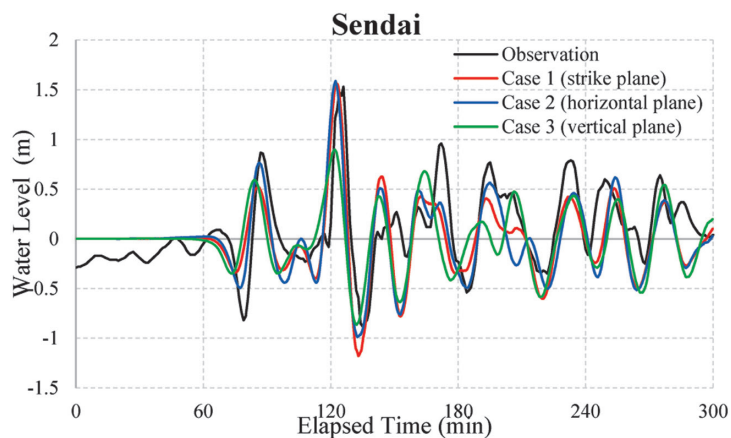


図 8 3 ケース津波時間波形と観測波形の比較 (仙台港)

テレビ画面には「津波！避難！」「すぐにげて！」など強く喚起する赤地に白文字のテロップが表示され続け、写真1のように英語表記でも示され、「TSUNAMI Subchannel or Radio 2」と英語の放送も案内された。東日本大震災を契機に、NHKなどでは津波災害の危機感をより強く伝え避難を促すために、切迫感のある強い口調や命令調、断定調の避難を呼びかける表現を用いている<sup>8)</sup>。

この他にも、津波警報の発表はさまざまなメディアで伝達された。気象庁は携帯電話の緊急速報メールを活用し、津波警報の発表を福島県、宮城県内の利用者へ直接伝達した。SNSにおいても津波警報や津波の到達、津波の危険性を伝える情報が多数伝えられた。このように津波警報・注意報を伝えるために、さまざまな情報手段がとられていた。



写真 1 NHK テレビで放送された津波避難の呼びかけ

さらに次の段階として、マスメディアからの情報により住民（個人）がどのような意識を持ち、反応・行動（避難も含めて）ができたのかは、重要な確認項目になる。ここでは、東日本放送（宮城県）が報告した、地震発生後にインターネットを通じて検索された語句についての分析結果を紹介したい<sup>9)</sup>。インターネット検索大手ヤフーが分析したところ、津波注意報と津波警報とで検索内容に大きな違いが出ていたことが報告された。図9はその事例を示し、「津波」という単語の検索数は地震発生直後に大きく、だんだんと低下していったが、午前8時9分の津波警報を機に7倍以上に跳ね上がっていた。さらに、別の分析では、「警報前」と「警報後」で検索する単語にも変化がみられ、警報後には「避難」そして「エリア」が上位に入ってきた。この二つの単語と一緒に検索されることも多く、どこに避難するのか、人々が具体的な行動を意識し始めた様子が推定される。このような分析は、今後、災害時での警報や注意報の発信後の市民の意識変化やさらに対応行動へ結びつけるプロセスを知るうえで重要になる。

## 5.2 地域での対応—津波避難指示や勧告など

公共交通機関では、東日本大震災でも大きな被害を受けた仙台空港が利用客や職員を建物の2階以上に避難させ、当日午前中の出発便が欠航したほか、東北・関東の太平洋岸を走る鉄道は津波注意報の解除まで運休が相次いだ。

今回の地震・津波では、直後から津波警報が発

表された福島県沿岸をはじめとして、住民が早朝から避難する様子のほか、高台や避難所となった施設に集まる住民の様子が報じられた。一部の地域では、高台へ向かう道路に避難する車の長い列が生じ、渋滞するなか途中で車を乗り捨てて高台へ避難したケースもあった。

避難に関する情報は、当初から津波警報が発表された福島県において沿岸の3市4町で避難指示が発令された。津波注意報が発表され、観測された津波により後に津波警報に切り替えられた宮城県内（15市町）では、避難指示と避難勧告の発令は市町ごとに対応が分かれた。津波注意報の際には、避難指示（2）、避難勧告（6）だったが、午前8時9分の津波警報への切り換えを契機に避難指示（9）や避難勧告（6）に変わった。国のガイドラインでは、津波に巻き込まれると生命に危険があることから避難指示による立ち退き避難が求められているが、宮城県内では対応が分かれる結果となり、隣接する市町の間でも避難勧告と避難指示に分かれるケースがみられた。復旧・復興事業により、居住地区が高台に移転したり、また、防潮堤などの施設が整備中であったり、地域の現状により発令基準が異なっていることが現状である。

## 5.3 石巻市での実態調査—津波避難状況の事例

今回の地震および津波に対する避難行動の状況を把握するために、石巻市危機対策課・東北大学災害科学国際研究所・株式会社サーベイリサーチセンターの3者が共同調査研究<sup>10)</sup>を実施したので、その結果の一部を紹介したい。

この調査で判明したことの1つが、警報が避難行動開始の大きな契機になっていたということである。図10にその結果を示す。津波注意報の段階での避難者は地域全体の11%（避難した方の26%）に留まっていたが、その後、警報に切り替わった段階で新たに避難した人は地域全体の24%（避難した方の58%）に上昇した。それに伴って同発表時刻に避難行動を開始した住民が集中し、市内複数箇所ですら車による渋滞が発生した。

石巻市では、毎年10～11月に市総合防災訓練において「原則徒歩」の津波避難訓練を実施して

おり、多くの参加者が徒歩によって避難訓練をしているにもかかわらず、実践となった同地震津波では避難の手段が車だった住民が54.6%と最も多い(図11)。これにより、市内の複数箇所ですべて深刻な渋滞が発生した。これらは、海から内陸に向かう主要な避難道路が狭隘であったり、目的地に向けて1本路となっていたり、橋梁などでルートが限定される場所であるという傾向がある。

避難先への移動手段では、「車」が54.6%、「徒歩」が32.0%となっている。車避難の主理由は、「安全な場所が遠い」、「車が大切な財産」がともに4割以上と多い。また、「カーラジオ、テレビから情報を得る」「家族等を避難させる」「寒さをしのぐ」「普段車を使って行動するから」等の理由もそれぞれ3割以上と多い(図12)。なお、渋滞に遭遇したとの回答は17%であり、8割以上は渋滞に遭わなかったと回答している。

#### 5.4 津波からの避難行動における車の使用について

わが国では、洪水や津波発生時の避難の手段として、車による避難は原則禁止として、徒歩による避難を原則としてきた。内閣府の防災基本計画<sup>11,12)</sup>においても、住民の避難誘導體制について以下のように記載されている。

- 地震・津波発生時には、家屋の倒壊、落下物、道路の損傷、渋滞・交通事故等が発生するおそれがあることから、津波発生時の避難につ

いては、徒歩によることを原則とする。このため、市町村(都道府県)は、車の運転者等に対する継続的な啓発を行うなど、徒歩避難の原則の周知に努めるものとする。

- ただし、各地域において、津波到達時間、指定緊急避難場所までの距離、要配慮者の存在、避難路の状況等を踏まえて、やむを得ず車により避難せざるを得ない場合は、市町村は、避難者が車で安全かつ確実に避難できる方策をあらかじめ検討するものとする。検討に当たっては、都道府県警察と十分調整しつつ、車での避難に伴う危険性の軽減方策とともに、車による避難には限界量があることを認識し、限界量以下に抑制するよう各地域で合意形成を図るものとする。

しかしながら、津波発生時の実態として、車で

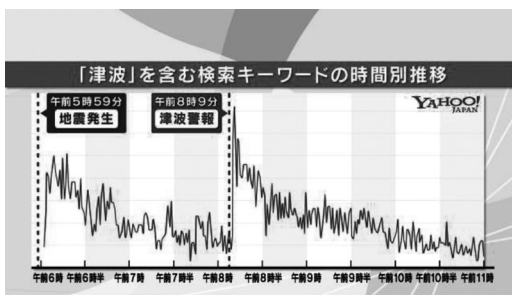


図9 YAHOO! JAPANで検索された津波のキーワード<sup>9)</sup>

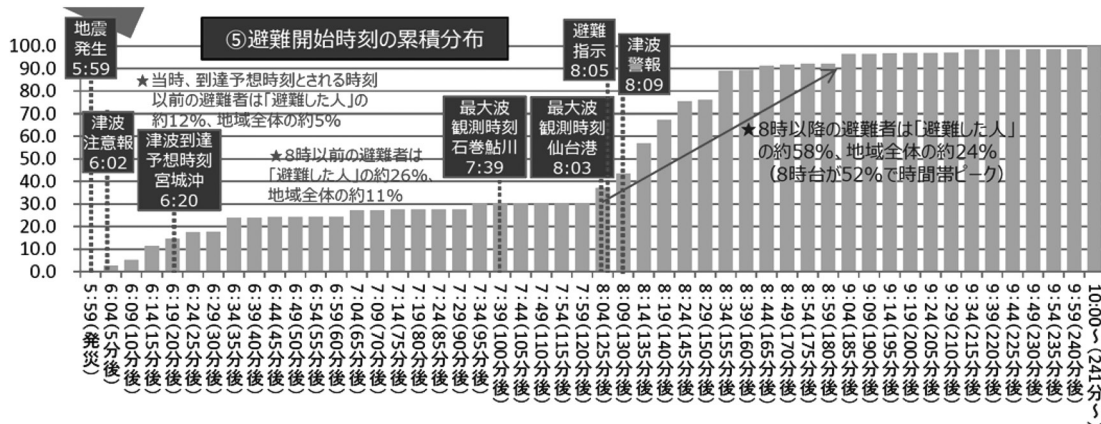


図10 石巻市での調査によって示された津波避難状況<sup>10)</sup>

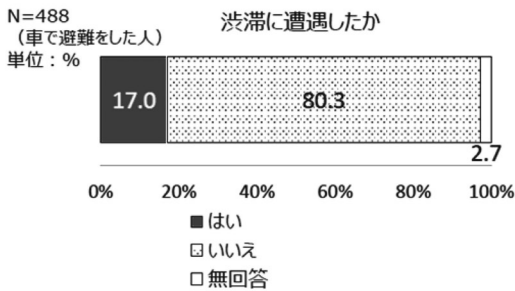
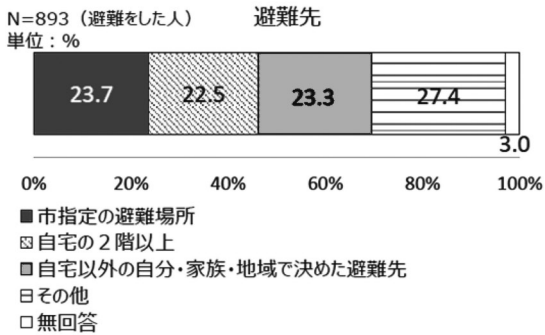
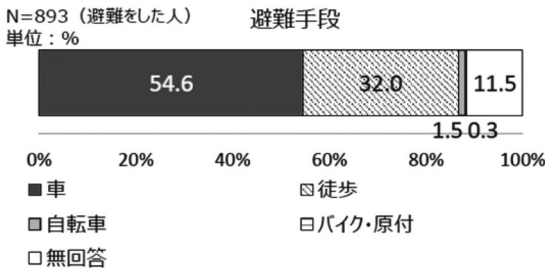


図 11 避難手段、避難先、渋滞状況について<sup>10)</sup>

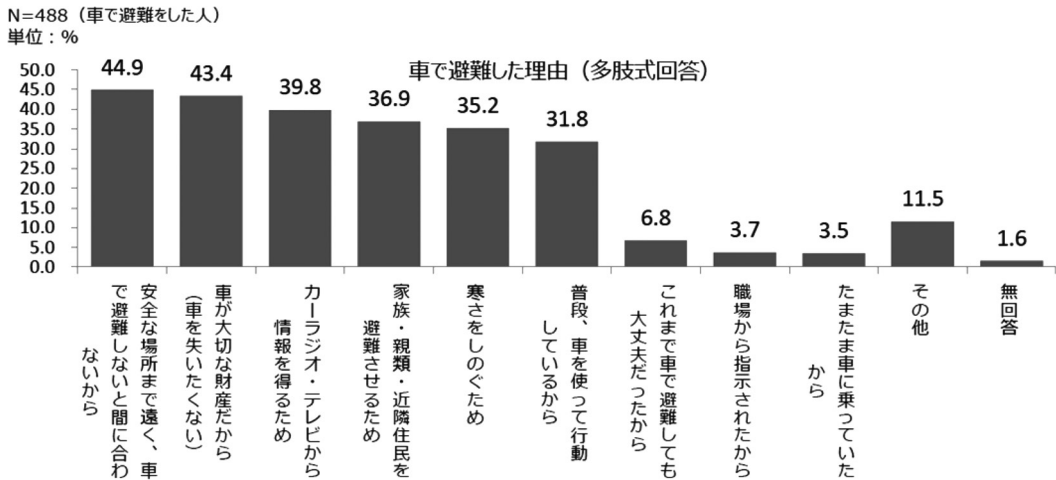


図 12 車で避難した理由<sup>10)</sup>

の避難による交通集中に伴う渋滞の発生が確認されている。また、今回の地震は早朝に発生し、宮城県では午前8時9分に津波警報に切り替えられたこともあり、津波からの避難により発生した交通量に、通勤による交通量が加わったことで渋滞が発生したと思われる事例も確認されている。一方で、車は一度に複数の人員および荷物を輸送できること、避難先においてプライバシーを確保できるといった理由で、必要以上の車で避難が行われてしまう可能性がこれまでに指摘されている。今回の津波において、津波からの避難に際して渋滞が発生した地域においては、改めて自治体や住民、地域社会での話し合いのもと、津波からの避難の手段に関する合意形成を図る必要があるといえる。

## 6. おわりに

福島県沖を震源とする地震による津波について、気象庁や防災科学技術研究所の観測データや数値解析結果を参考に、その発生や伝播の特徴を考察した。東日本太平洋沖に伝播していった津波はエッジ波としての挙動があり、広範囲で観測された。特に、仙台湾においては第二波以降の後続波が最大値を示しており、波源からの直接波と福島県沖で反射した成分が仙台湾に屈折しながら回

り込み、そこで増幅したと考えられる。湾内での波形には比較的長周期成分も確認でき、湾内振動としての特性もみられた。

地震発生から3分後には、気象庁から津波警報や注意報が発表され、沿岸各地では避難指示や勧告の発令などの対応がとられた。津波などの災害情報に対する地域住民の対応はさまざまであり、インターネット検索や自治体等によるアンケート調査により、その実態の一部を確認することができる。今回は、人的被害はなかったものの、情報の内容やタイミング、避難手段やその経路（途中での渋滞）については課題が残ったと言える。今後は、地域での避難計画の見直しや新たな検討を実施する際に、今回得られた調査結果などを役立てていただきたい。

## 参考文献

- 1) 気象庁. 2016. 発表した津波警報・注意報の検証, 2016/11/22 福島県沖の地震, 平成 28 年 11 月 22 日の福島県沖の地震で発表した津波警報・注意報について. <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunamihyoka/20161122fukushimaken-oki/index.html>
- 2) 防災科学技術研究所. 2016. Hi-net 高感度地震観測網, 2016 年 11 月 22 日福島沖の地震, S-net による観測・解析結果. <http://www.hinet.bosai.go.jp/topics/off-fukushimal61122/>
- 3) 越村俊一・今村文彦・首藤伸夫. 1997. 海嶺により励起される境界波に関する研究. 海岸工学論文集, **44**, 306-310.
- 4) 気象庁. 2017. 第 14 回津波予測技術に関する勉強会, 資料 2-2: 平成 28 年 11 月 22 日福島県沖の地震による津波. <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tsunami/benkyokail4/shiryu2-2.pdf>
- 5) Suppasri, A., Leelawata, N., Latcharotea, P., Roebera, V., Yamashita, K., Hayashia, A., Ohirab, H., Fukuic, K., Hisamatsub, A., Nguyenb, D., Imamura, F. 2017. The 2016 Fukushima earthquake and tsunami: Local tsunami behavior and recommendations for tsunami disaster risk reduction. *Int. J. Disast. Risk Reduct.* DOI: 10.1016/j.ijdr.2016.12.016
- 6) 東北大学災害科学国際研究所 災害リスク研究部門 津波工学研究分野. 2016 年 11 月 22 日, 福島県沖で発生した地震に伴う津波速報. [http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/20161122\\_fukushima/20161122\\_fukushima2.html](http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/20161122_fukushima/20161122_fukushima2.html)
- 7) 東京海上日動リスクコンサルティング. 2016. リスクマネジメント最前線「平成 28 年（2016 年）福島県沖を震源とする地震および津波について」. [http://www.tokiorisk.co.jp/risk\\_info/up\\_file/201612021.pdf](http://www.tokiorisk.co.jp/risk_info/up_file/201612021.pdf)
- 8) NHK 放送文化研究所 放送研究と調査. 2013 年 2 月. 津波警報・NHK が強い口調で避難呼びかけ.
- 9) 佐藤岳史（東日本放送）. 津波「その時」何を検索？ 福島沖地震のデータで見えた“心理”, with-news. <http://withnews.jp/article/f0161230005qq000000000000W05r10701qq000014517A>
- 10) 石巻市危機対策課・東北大学災害科学国際研究所・サーベイリサーチセンター. 2017. 2016 年 11 月 22 日福島県沖地震津波避難行動に関するアンケートを実施し、石巻市民の避難実態を明らかにしました. <http://www.tohoku.ac.jp/japanese/2017/03/press20170306-01.html>
- 11) 内閣府. 2016. 防災基本計画（平成 28 年 5 月）. [http://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon\\_basic\\_plan160216.pdf](http://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon_basic_plan160216.pdf)
- 12) 内閣府. 2015. 避難勧告等の判断・伝達マニュアル作成ガイドライン（平成 27 年 8 月）. [http://www.bousai.go.jp/oukyu/hinankankoku/guideline/pdf/150819\\_honbun.pdf](http://www.bousai.go.jp/oukyu/hinankankoku/guideline/pdf/150819_honbun.pdf)

今村文彦

[いまむら ふみひこ]

**現職** 東北大学災害科学国際研究所所長・津波工学研究分野教授

**略歴** 東北大学大学院博士後期課程修了。東北大学工学部土木工学科助手、同大学院工学研究科附属災害制御研究センター助教授、教授を経て、現在同災害科学国際研究所教授（所長）

**研究分野** 主な専門分野は津波工学（津波防災・減災技術開発）、自然災害科学。東日本大震災復興構想会議検討部会、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などのメンバー



# 2016年10月21日鳥取県中部の地震(M6.6)について

香川敬生

## 1. はじめに

2016年10月21日14時7分、鳥取県中部においてマグニチュード6.6の地震（以後、本震と称する）が発生し、倉吉市、湯梨浜町龍島、北栄町土下（はした）の3観測点で最大震度6弱（いずれも計測震度5.8）を観測した。本震の北東10kmほどの地域では、2015年10月、12月にもそれぞれマグニチュード4.3、4.2を最大とし、最大震度4を観測する群発地震活動が断続的に発生していた。2016年9月末には群発地震活動（最大マグニチュード3.9）が本震の震源域近傍に移動し、本震当日の12時12分には本震震源域でマグニチュード4.2の地震を観測した。図1にこれらの震央分布（政府地震調査研究推進本部、2016a）、図2に時間経緯を示す。

鳥取県と周辺地域では、1943年鳥取地震（マグニチュード7.2）、2000年鳥取県西部地震（マグニチュード7.3）とM7クラス、1983年10月には2015年10月、12月の群発地震域でマグニチュード6.2の地震が発生したほか、M5クラスを最大とする群発地震活動が各地で頻発している。このため、鳥取県地震防災調査研究委員会（2015）の地震被害想定では県中部でM7クラスの地震を対象としていた。また、政府地震調査研究推進本部（2016b）では、2016年7月に中国地域の活断層の長期評価を実施し、鳥取県を含む中国地域北部で今後30年以内にM6.8以上の地震が発生する確率を40%と評価していた。このような状況にあって、本震当日まで筆者ら鳥取県防災顧問は県危機管理局との連携を密にして対応していた。しかし、M6.6の地震が近日中に発生することを的確に評価するには至らなかった。

## 2. 本震の震源破壊過程

国内に展開された観測網で、本震による地震動、地殻変動が観測されている。国土地理院（2016）は、図3に示すようにGEONET（GNSS観測網）観測点の地殻変動を満足するような、長さ約18km、幅約13kmの断層面に約0.3mのすべりを与える震源断層すべりモデルを本震発生後速やかに想定している。その後、だいち2号による干渉SAR 3次元解析結果を加えた断層モデルを設定している。このモデルでは、断層長さ約8km、幅約7km、すべり量約1.3mが推定されているが、後述する強震動に基づくモデルの強震動生成域にはほぼ対応したものになっているようである。

防災科学技術研究所（2016）による、強震観測データ（K-NET、KiK-net）に基づく震源破壊モデルを図4に示す。断層面は、図3の国土地理院モデルと余震分布から設定され、長さ20km、幅16kmが設定されているが、すべりの大きい領域は国土地理院（2016）の初期モデル（図3）にはほぼ対応しているようである。破壊開始点（震源）から浅部に向けて大きなすべりがあり、ここが強振動生成域となって、断層中央付近にあたる倉吉市から北部の湯梨浜町、北栄町に向けて強震動が放射されたことが想定される。

## 3. 本震による強震動の特徴

本震では、倉吉市役所（K-NET TTR005）において約1.4Gの最大加速度（EW成分）を記録し、震度6弱と評価された。図5左にEW成分の観測加速度および積分した速度、変位波形を示す。同様に、右には減衰5%の擬似速度応答スペ



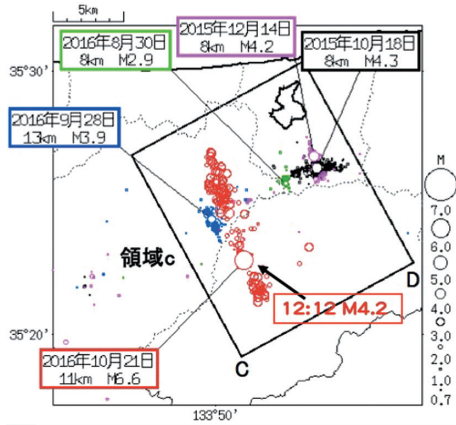


図 1 対象地震の震央分布（地震調査研究推進本部（2016a）に加筆）

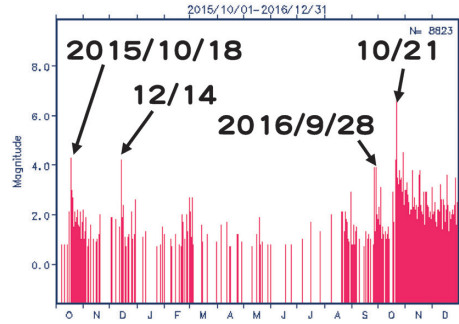


図 2 本震に至るまでの地震活動（鶴岡（1998）のシステムを利用）

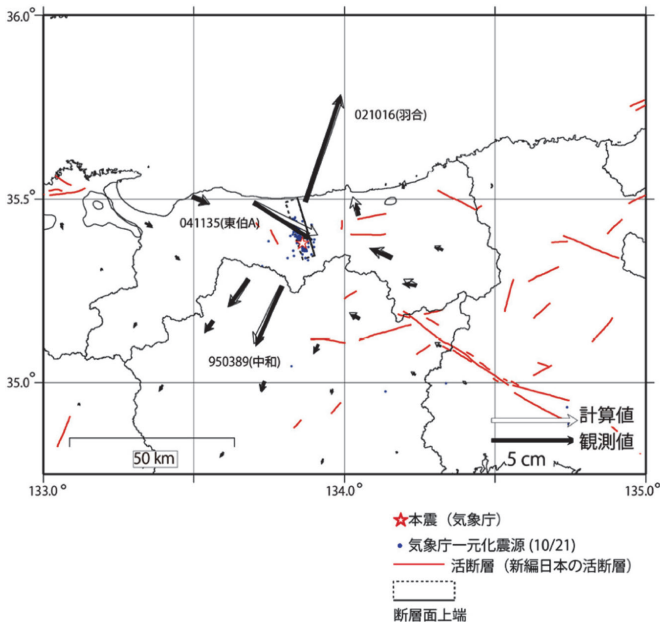


図 3 国土地理院（2016）によるGNSS観測を満足する断層すべりモデル

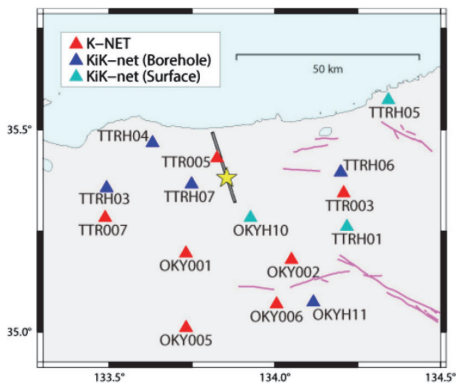
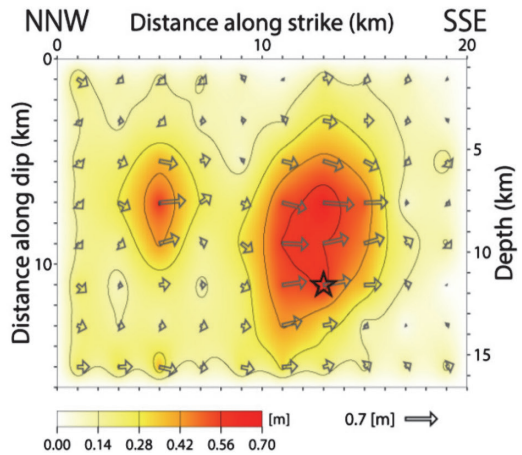


図 4 防災科学技術研究所（2016）による強震観測記録を満足する断層破壊モデル



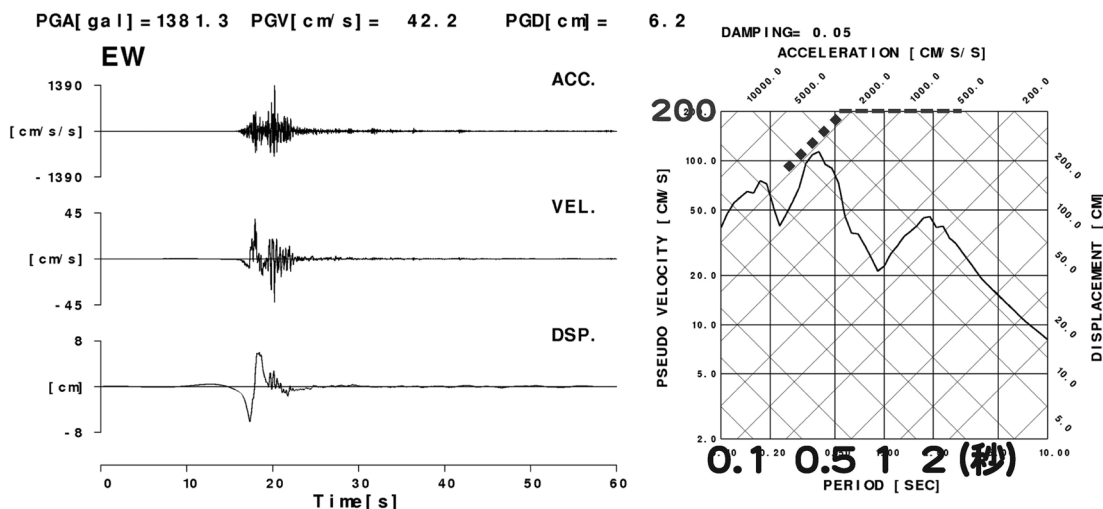


図 5 本震による倉吉市役所 (K-NET TTR005) の強震動 (EW 成分)



写真 1 倉吉市街における墓石の倒壊と後方に屋根瓦の落下被害

クトルを、応答加速度・応答変位軸とともに表示している。応答スペクトル中の破線は、1995年兵庫県南部地震のJR鷹取駅や2016年熊本地震の益城町 (KiK-NET KMMH16) など、震度7相当かつ周辺に大被害を生じた記録のレベルを示している (以下の図も同様)。一般的な木造家屋であれば、固有周期は0.3から0.5秒程度であり、この周期帯の地震動に共振して初期的な被害を受ける。それによって構造が弱くなるため固有周期が長周期化し、周期0.5秒から3秒帯域の地震動によって倒壊に至ると考えられている。

倉吉市の地震動は大加速度が目され、たしかに0.4秒程度以下の短周期のレベルは大被害を生じた地震動に匹敵している。このため、棟瓦の落下や壁の亀裂・崩壊、墓石の倒壊などを広範囲に生じたと考えられる (写真1)。しかし、倒壊に至った構造物はほとんどみられなかった。それは、図5に示すように、周期0.5秒以上の地震動が小さく、上述のように被災によって建物固有周期が長周期化した際に共振する地震動のレベルが小さく、それ以上破壊が進行することがなかったためと考えられる。

同じく震度6弱を観測した湯梨浜町龍島のNS成分を図6に、北栄町土下のNS成分 (いずれも水平成分のうち大きい方) を図7に示す。倉吉を含めいずれの計測震度も5.8と同じであるが、図6の湯梨浜町龍島は周期0.5から1.5秒程度が大きく、破線で示した被害地震のスペクトルと共通の形状を呈している。しかし、レベルがやや小さく、周辺に顕著な建物被害はみられない。しかし、加速度波形に強い非線形応答を示すパルス状の片振れ (Iai *et al.* (1995) など) がみられている。実際、震度計設置点周辺では地盤の沈下が観察された (写真2)。これについては後述する。

次に図7の北栄町土下であるが、震度6弱を観測した中では最大加速度が最も小さく、最大速度

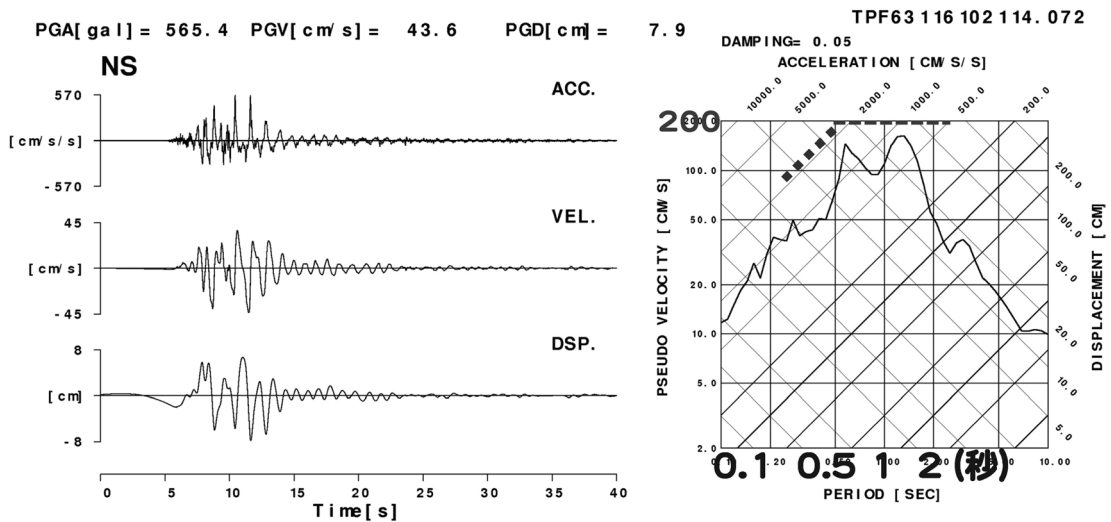


図 6 本震による湯梨浜町龍島（東郷支所）の強震動（NS成分）

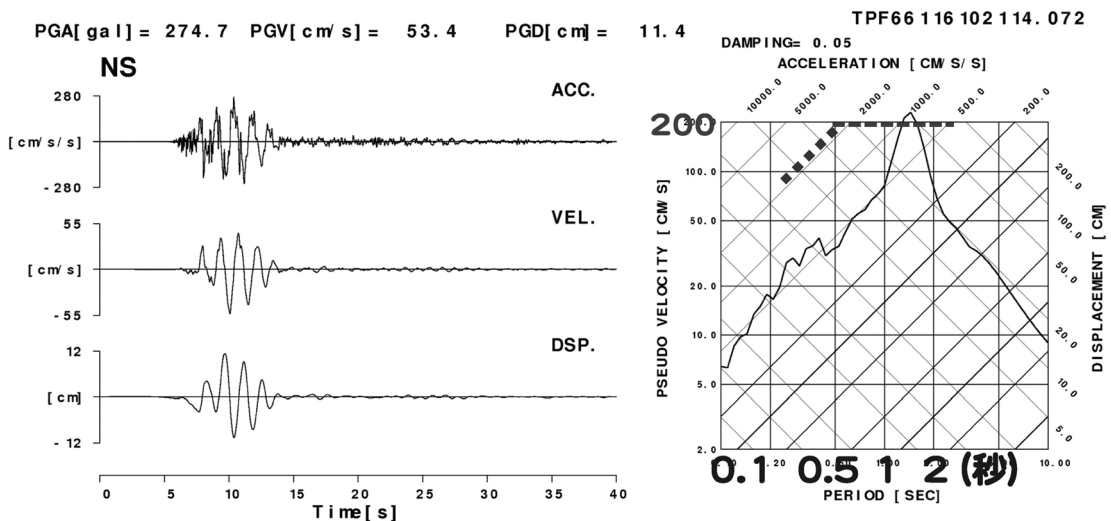


図 7 本震による北栄町土下（北条支所）の強震動（NS成分）

が大きい。応答スペクトルでは、周期約 1.5 秒で破線の被害地震レベルに届いている。しかし、一般的な木造家屋の固有周期に相当する 0.3 から 0.5 秒の帯域が小さい。このため健全な木造家屋が共振することはなく、周辺に被害は生じていない。一方で、北栄町の一部では老朽化した木造建物の倒壊や大破がみられた（写真 3）。これらは概して柱が少なく開口部の大きい作業小屋など、非住家で十分にメンテナンスが施されていない建

物であったようで、すでに固有周期が長周期化していたことが示唆される。

このように、同じ計測震度 5.8（震度 6 弱）であっても地震動の周期特性は大きく異なり、それに見合った被害が周辺にみられた。計測震度など地震動特性値のみでなく、観測波形に基づく地震動の周期特性を初動段階で把握しておくことの重要性が示唆される。

このような地震動の周期特性は、観測点の地盤



写真2 湯梨浜町龍島（東郷支所）震度計周辺の様子



写真3 北栄町内における木造建屋の倒壊

震動特性に大きく影響されている。図8に、野口・香川（2014）による常時微動観測から推定した該当地域の地盤卓越周期分布を示す。倉吉周辺では0.4秒付近が卓越し、日本海沿岸の北栄町では周期1秒以上が卓越する地域が分布している。日本海沿岸では観測点（図中の黒丸）の密度が十分ではなく、分解能には難があるものの、先に述べた老朽建物の倒壊被害が集中している場所は、概して周期1秒程度が卓越する地域に相当しているように思われる。

これら観測された強震動の特性と図4に示した震源破壊モデルから、本震で生じた強震動のイメージをまとめたものを図9に示す。破壊開始点から強震動生成域に広がった断層破壊によって、破壊の進行方向にあたる倉吉市域から日本海沿岸の北栄町、湯梨浜町に向けて強震動が放射された。これに堆積地盤の卓越周期が作用し、地域固有の地震動を生成したと考えられる。

#### 4. 臨時余震観測などから見えたこと

鳥取大学工学部附属地域安全工学センターでは、本震直後からのべ12点において余震観測を実施した。その1例として、倉吉市街の事例を図10に示す。図5に示した倉吉市役所は流紋岩よりなる打吹山の麓にあり（図8の山地境界付近）、市街よりも高台に位置する。一方、白壁土蔵群など軽微な建物被害を生じたエリアは北部の小鴨川

に向かう平地に立地する。そのため、倉吉市役所から平地に降りた倉吉市北庁舎、白壁土蔵群に近い大岳院、小鴨川堤防脇の倉吉東中学校に臨時余震観測点を設置した。図10に示した倉吉市役所を含む4点における10月24日20時5分の地震（M3.8）の同時観測記録からは、倉吉市役所のみが他の3地点とは異なる地震動を記録していることが分かる。倉吉市役所では、図中に丸印で示したように周期0.1秒付近の短周期が他の3点よりも大きく、そのため最大加速度が他の2倍ほど大きくなっている。一方、市街域の3点では共通して周期約0.4秒が大きく、図8に示した微動卓越周期分布とも対応している。このことから、倉吉市街で棟瓦の落下や土壁の剥落を生じた地震動は、倉吉市役所で観測された本震記録（図5）とは異なる特性を持っていたことが示唆される。

老朽化した木造家屋の倒壊が集中したエリアがある北栄町西園地区（図8）でも余震観測を実施した。ただし、観測点を設置した多目的集会場周辺には大きな被害はみられなかった。余震観測点と建物倒壊地域との地盤震動特性の違いをみるには図8の微動観測点密度が十分ではないと思われたため、図11に示すように高密度微動観測を追加実施した。

微動卓越周期に関しては、余震観測点が周期約1秒から短周期までやや広い周期帯が卓越するフラットな山を持つものに対して、倒壊建物が分布するエリアでは約1秒に鋭いピークを有しているこ

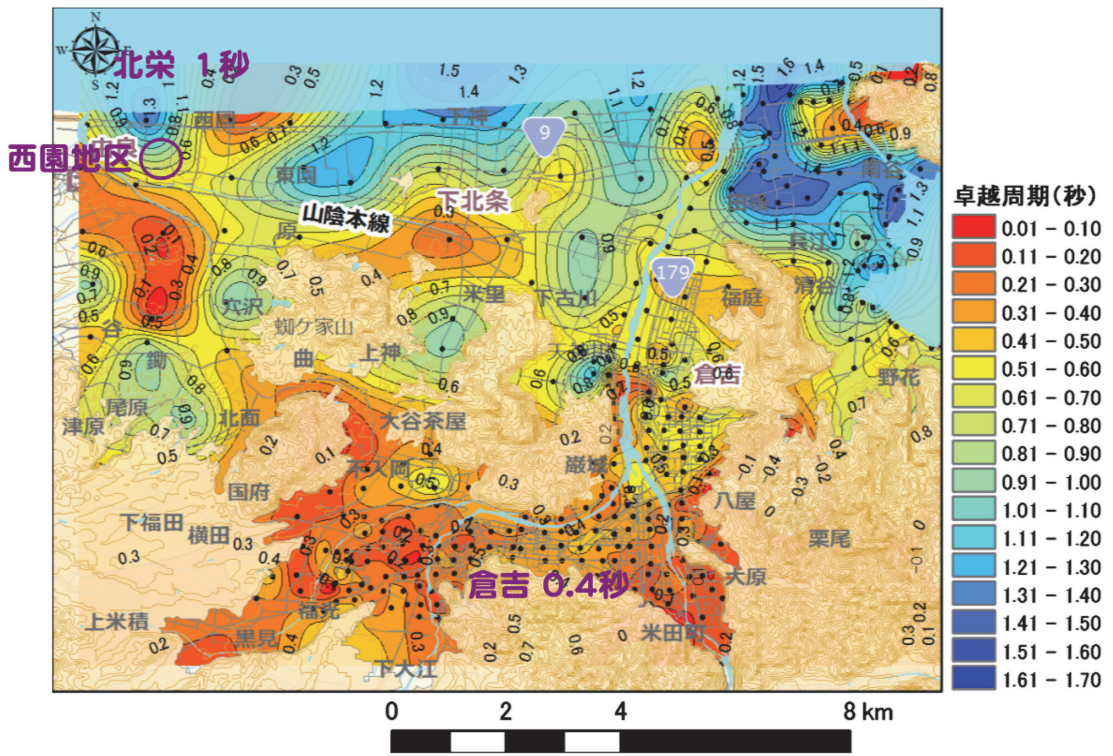


図 8 野口・香川 (2014) による倉吉市街から日本海沿岸の北栄町(西)から湯梨浜町(東)の微動卓越周期分布

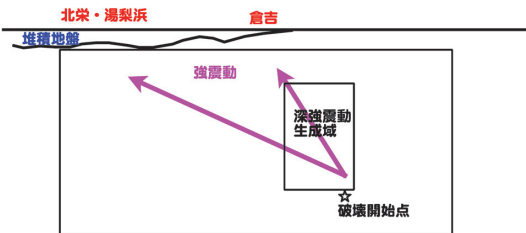


図 9 平成 28 年鳥取県中部の地震で生じた強震動のイメージ

とが特徴的である。このピークが老朽化した建物を共振させた可能性が示唆される。

次に、図 6 にみられた湯梨浜町龍島における非線形応答を示す波形について、詳しい検討を行った結果を述べる。図 12 では、同地点における前震 (10 月 21 日 12 時 12 分, M4.2), 本震 (14 時 7 分, M6.6), 直後の余震 (14 時 30 分, M4.4) の 3 成分加速度波形と、H/V スペクトル比 (水平動を NS, 平均, EW とした 3 本の線) を示している。Kawase *et al.* (2011), Sánchez-Sesma *et al.* (2008) による拡散波動場理論では、地震動の

H/V スペクトルは対象地点を水平成層構造でモデル化した平面波入射のグリーン関数に対応するとされ、図 12 にみられる卓越周期は地盤応答を反映したものと考えることができる。図中に破線で示したように、弱震 (前震, 余震) の卓越周期に対して本震のそれは長周期側に移動している。より深い地盤に対応する長周期のピークが弱震時の約 0.5 秒から強震時には約 0.8 秒に 1.6 倍ほど伸びている。これを S 波速度に換算すると約 1/1.6 だけ遅くなっており、剛性低下に換算すると約 0.4 になる。一般的な砂地盤を想定すると  $10^{-3}$  程度のひずみに相当すると思われる、液状化には至らないものの十分に大きな非線形応答を示唆すると考えられる。図 6 にみられた片振れパルス状の波形や周辺の沈下は、本震時のこのような震動特性を反映したものであると思われる。一方で図 12 からは、本震でみられた非線形応答が、約 23 分後の余震では十分に回復しているように思われることが興味深い。

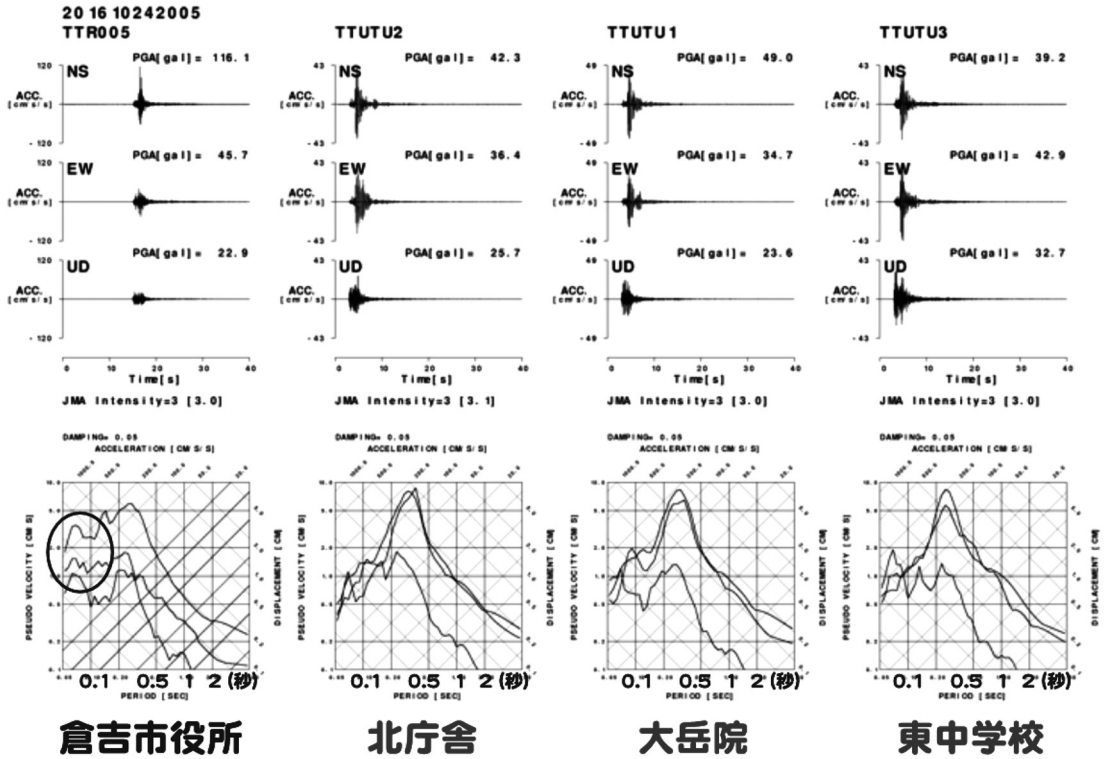


図 10 倉吉市街の余震観測例 (10月24日20時5分, M3.8)

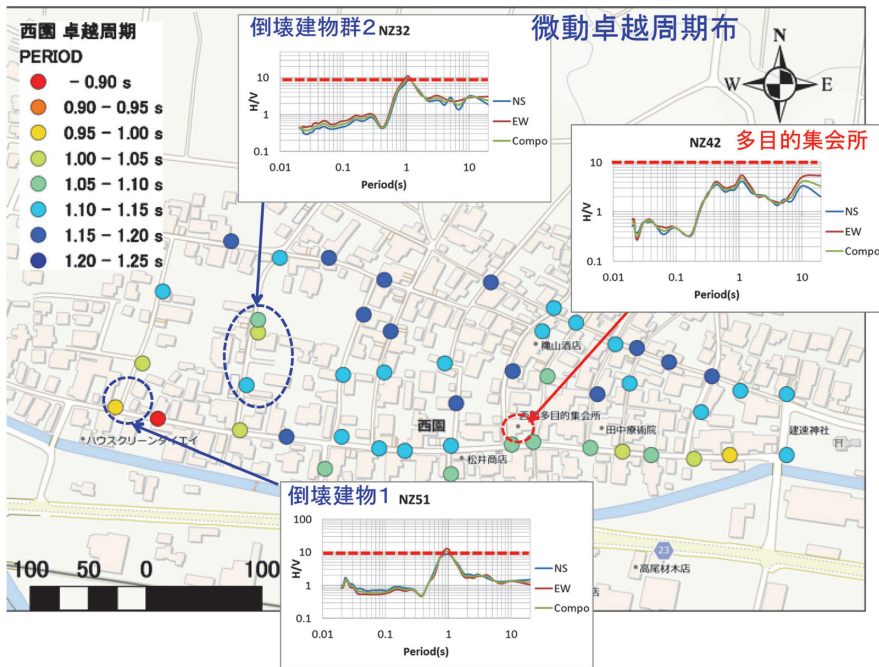


図 11 北栄町西園における臨時微動観測結果

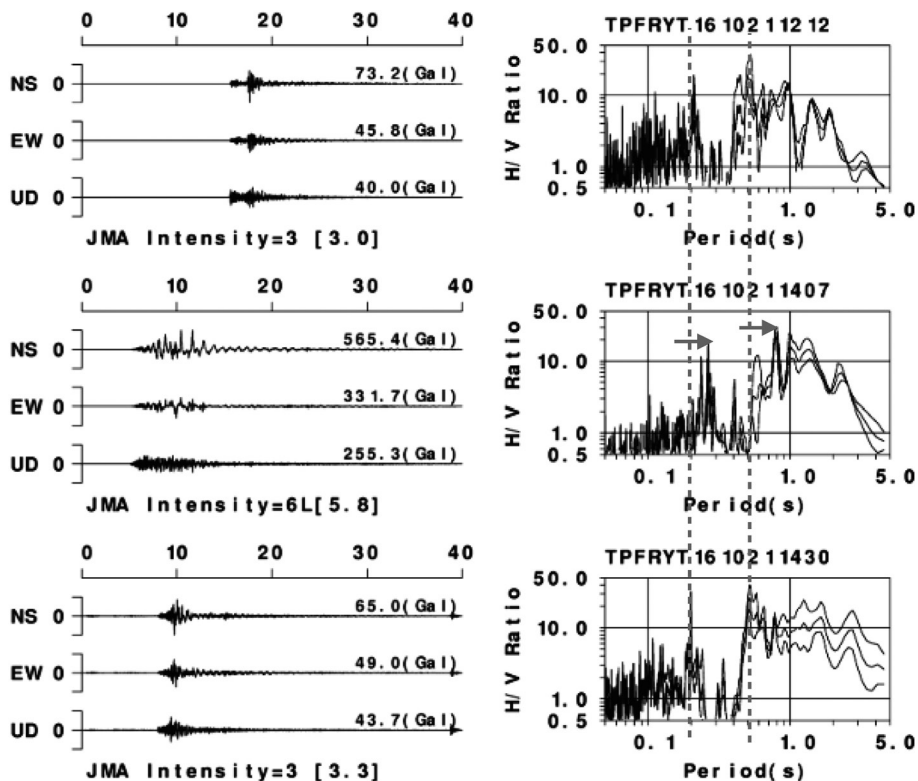


図 12 湯梨浜町龍島における前震、本震、余震の H/V スペクトル

## 5. おわりに

本論では、2016年10月21日に鳥取県中部において発生した地震と地震動の特徴、および発生に至る地震活動について概観した。その結果判明したことを以下にまとめる。

- 1) 中国地域北部（山陰）では、M6.8以上の地震の30年発生確率は40%と大きく、実際にM7以上の地震がここ100年で2回発生している。
- 2) 鳥取県中部域では、過去にM6級の地震が発生し、2015年10月より群発地震が頻発している。
- 3) 鳥取県では、これらをふまえて地震被害想定を実施している。
- 4) 2016年10月21日に発生した地震では、破壊開始点から倉吉市街および日本海沿岸に向けて強い地震動が放射された。

5) 倉吉地域は短周期が卓越した地震動が観測された。初期の損傷は懸念されるがそれ以上の破壊には至らなかったものと考えられる。実際、固定してない瓦の落下、土壁の剥離やひび割れなどが発生したが、倒壊家屋はほとんどみられない。

6) 日本海沿岸の北栄町などには地盤の卓越周期が長い地区があり、被害を大きくしたことが懸念される。

特に、地盤の卓越周期が観測地震動や地震被害に及ぼす影響が大きいことが再確認された。地震被害想定的高度化には、地盤の震動特性の把握が重要であることが改めて強調されよう。

## 謝辞

鳥取県および防災科学技術研究所の観測記録を利用しました。また、余震および微動観測には、災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画による経費の一部および微動・強震観測装置を

利用させていただきました。余震観測点の設置には現地の皆様にご協力いただきました。記して関係各位に感謝いたします。

## 参考文献

- 防災科学技術研究所. 2016. 近地強震記録を用いた2016年10月21日鳥取県中部で発生した地震の震源インバージョン解析, [http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/Tottori\\_20161021/inversion/inv\\_index.html](http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/Tottori_20161021/inversion/inv_index.html) (2017年3月24日閲覧)
- Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y. and Abiko, K. 1995. Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro-Oki earthquake. *Soils and Foundations*, **35**, 115-131.
- Kawase, H., Sánchez-Sesma, F.J. and Matsushima, S. 2011. The optimal use of horizontal- to-vertical (H/V) spectral ratios of earthquake motions for velocity structure inversions based on diffuse-field theory for plane waves. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **101**, 2001-2014.
- 国土地理院. 2016. 平成28年(2016年)10月21日鳥取県中部の地震の震源断層モデル. <http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/dansoumoderu.html> (2017年3月24日閲覧)
- 野口竜也・香川敬生. 2014. 微動および重力探査による倉吉平野臨海部の地盤構造推定. 土木学会論文集A1(構造・地震工学), **70**(4)(地震工学論文集33), 888-896.
- Sánchez-Sesma, F.J., Pérez-Ruiz, J.A., Luzón, F., Campillo, M. and Rodríguez-Castellanos, A. 2008. Diffuse fields in dynamic elasticity. *Wave Motion*, **45**, 641-654.
- 政府地震調査研究推進本部. 2016a. 2016年10月21日鳥取県中部の地震の評価. [http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/20161021\\_tottori.pdf](http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/20161021_tottori.pdf) (2017年3月24日閲覧)
- 政府地震調査研究推進本部. 2016b. 中国地域の活断層の地域評価. [http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16jul\\_chi\\_chugoku/chu\\_honbun.pdf](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16jul_chi_chugoku/chu_honbun.pdf) (2017年3月24日閲覧)
- 鳥取県地震防災調査研究委員会(被害想定部会). 2015. 第2回被害想定部会, 資料1地震動予測結果(修正案). [http://www.pref.tottori.lg.jp/secure/988166/150630\\_1\\_1\\_1.pdf](http://www.pref.tottori.lg.jp/secure/988166/150630_1_1_1.pdf) (2017年3月24日閲覧)
- 鶴岡 弘. 1998. WWWを用いた地震情報検索・解析システムの開発, 情報処理学会研究報告; データベースシステム **115-9**, 情報学基礎 **49-9**, 65-70.

香川敬生

[かがわ たかお]



**略歴** 京都大学大学院理学研究科修士課程地球物理学専攻修了, (財)大阪土質試験所, (財)地域地盤研究所(改称), 鳥取大学大学院工学研究科教授, 鳥取大学工学部附属地域安全工学センター長(兼務)

**研究分野** 強震動地震学, 地震工学

**著書** 地震の揺れを科学する—みえてきた強震動の姿—(共著, 東京大学出版会), 実務の先輩達書いた土木構造物の耐震設計入門(共著, 土木学会), 地震荷重—性能設計への展望(共著, 日本建築学会), 地盤の動的解析—基礎理論から応用まで—(共著, 地盤工学会) 他



# オクラホマ州の誘発地震

## 楠瀬勤一郎

### 1. はじめに

オクラホマ州では、20世紀初頭より石油・天然ガスの開発が始まり、現在も石油・天然ガス生産が州の最大の産業である。石油・天然ガスは白亜紀からカンブリア紀の広い年代の地層に存在する。しかし、20世紀末には、在来の方法で生産可能な貯留層はほぼ開発されつくされた(Boyd, 2002)。ところが2008年の石油価格高騰により、貯留層に水平な井戸を掘り、井戸の側面から水圧破砕法で地層中に亀裂を発達させて石油・天然ガスを生産する新しい技術(以下フラッキングと呼ぶ)の導入が経済的に成り立つようになったので、透水性が乏しいため開発が見送られてきた貯留層に対して、新たな開発がはじまった。

オクラホマカンサス州など、アメリカ中央部の地震活動度は、以前はたいへん低かったが、2009年を境に、急激に高くなっている(図1)。地震活動度が急激に高くなった時期が、新たな技術による石油開発が活発になった時期に重なることから、石油の増産や新しい生産技術の導入が引き金になって地震が誘発された可能性が高いことが指摘されている。

### 2. 地震活動

図2は2009年1月から2016年12月の間のオクラホマ州のMw3.0以上の地震の震央分布で、オクラホマ州の北部から、カンサス州南部にかけて、地震活動が盛んであることが見てとれる。図中の星印は、Mw5クラスの地震の震央を示しており、それぞれAが2011年11月にプラーク(Prague)北西近傍で発生したMw5.7(深さ5.2km)の地震、Bが2014年11月にカンサス州

Milanで発生したMw4.9(深さ4.0km)の地震、Cが2016年2月にフェアビュー(Fairview)北西32kmで発生したMw5.1(深さ8.3km)の地震、Dが2016年9月にパウニー(Pawnee)北西15kmで発生したMw5.8(深さ5.6km)の地震、Eが2016年11月にクッシング(Cushing)西方2kmで発生したMw5.0(深さ4.4km)の地震である。

これらの地震には、①数年前から周辺の地震活動が活発化し、1年から数カ月前に前震活動が始まり、本震が発生している。②震源の深さは約5kmと、通常の内陸地震に比べ浅く、余震域の長さは長めである。③発震機構解は、北東-南西走向の断層に沿ったstrike-slipを示しており、現在の地殻応力の方向と整合する。④震央の近くに油田があり、フラッキングによる石油生産が行われている、という共通点がある。

### 3. フラッキングに伴う廃水処理

地震活動が活発化している地域は、オクラホマ州西部からカンサス州北西部に発達するAnadarko盆地の東-北縁部にあたる(図3)。Anadarko盆地は石炭紀後期にできた構造性の盆地で、先カンブリア紀の結晶質岩の基盤の上に、主に炭酸塩岩を主体とするカンブリア紀から古生代の堆積岩が載る構造となっている。盆地の東縁は北北東-南南西走向を持つ断層によって区切られており、これらの断層は、盆地中の石油・天然ガス貯留層のトラップ構造となっている。基盤直上のArbuckle層群(カンブリア紀~オルドビス紀)の最下部は、カンブリア紀の透水性の高い砂岩で、基盤に不整合で接している。

石油生産の際には、石油に伴って貯留層内の地下水も地上に汲み上げられる。地下水は濃い塩水

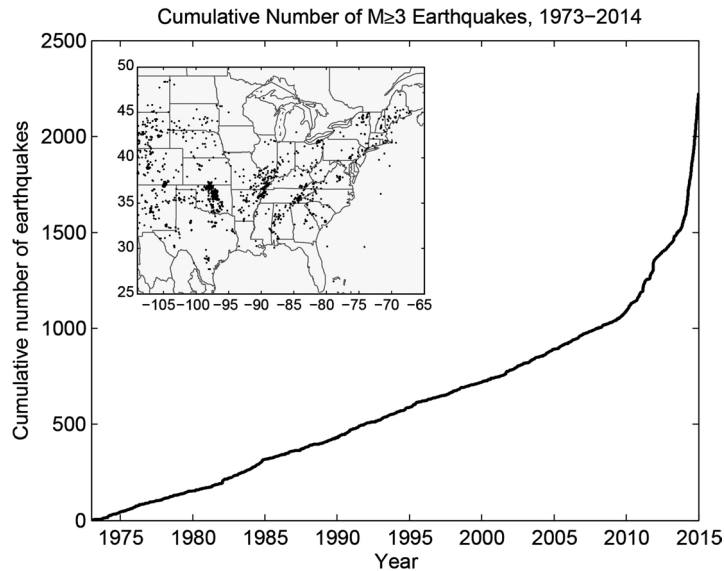


図 1 アメリカ中・東部に発生した M3.0 以上の地震の累積発生数 (U.S. Geological Survey のホームページから). 2009 年を境にして地震の発生数が急増している

であるため、利用されずに地下に再び廃棄される。枯渇した油田では、石油生産を断念した時点での貯留層内の空隙圧は静水圧以下になるため、石油生産に伴った地下水は圧力をかけずに枯渇油層に廃棄することができる。従来の石油生産手法では、もともと地下にあった地下水を枯渇した油層に廃棄するので、地下で空隙圧が高くなるということは特に問題とされなかった。

2009 年頃からブームとなったフラギングによる石油開発の主要なターゲットは、Arbuckle 層群に存在する孤立した空隙に胚胎する石油である (Franseen *et al.*, 2004, Fritz *et al.*, 1991)。フラギングでは、水圧破碎で開口した亀裂が閉じないように、砂と薬品を混ぜた水を圧入する (1 回当たりのフラギングで 700~1,100 万 L の水を使用する (小川, 2013))。石油の生産に伴い、圧入された水の 30~70% は、石油や地層水とともに地表に汲み上げられ、石油と分離される。フラギングで開発された油田は、開発当初は多量の石油を生産することができるが、時間とともに急激に生産量が減少するため、新たな水平井を掘削し続けて生産を維持する必要がある。このため、従来手法に比べ多量の廃水を処理する必要がある。廃水の

一部は再利用されるが、大部分は地下深部の透水性の高い層に圧入処理される。オクラホマ州やカンサス州では、主に、空隙率も透水性も高い Arbuckle 層群最下部の砂岩層に廃水を圧入している。地下深部へ圧入された廃水の量は 2009 年以降急激に増加しており、オクラホマ州では、2015 年は 2009 年の 3 倍の廃水が地下に圧入され、2009 年からの 7 年間に地下に圧入された廃水は 7 億トンとされている。

#### 4. 誘発地震への対応

Keranen *et al.* (2013) は 2011 年 11 月にプラーグ (Prague) 北西近傍で発生した地震の誘発メカニズムを議論するのにあたり、油田から生じた廃水の地下圧入の推移や前震活動について詳細な報告をしている。この地震の余震域の北東端には Wilzetta 北油田の 2 つの廃水用の井戸があり、これらの井戸は、地震を起こしたとされる Wilzetta 断層に近接している。彼らが求めた震源分布では、11 月 5 日の前震から本震までに生じた地震の震源は廃水用の井戸まで伸びており、震源は本震後の地震に比べ浅く、震源分布は、破壊域が本

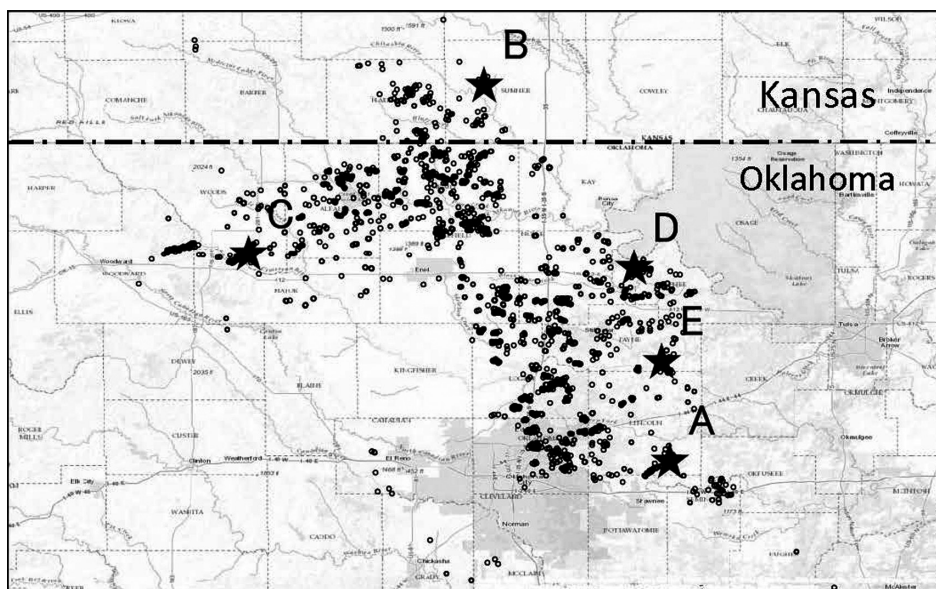


図 2 2009年1月1日～2016年12月1日にオクラホマ州～カンサス州に発生した、深さ10km以浅、Mw3.0以上の地震の震央分布。図中Aは2011年11月6日にプラグ（Prague）北西近傍に発生したMw5.7（深さ5.2km）の地震、Bは2014年11月2日カンサス州Milanに発生したMw4.9（深さ4.0km）の地震、Cは2016年2月13日にフェアビュー（Fairview）の北西32kmで発生したMw5.1（深さ8.3km）の地震、Dは2016年9月3日にパウニー（Pawnee）の北西15kmで発生したMw5.8（深さ5.6km）の地震、Eは2016年11月7日にクッシング（Cushing）西方2kmで発生したMw5.0（深さ4.4km）の地震である

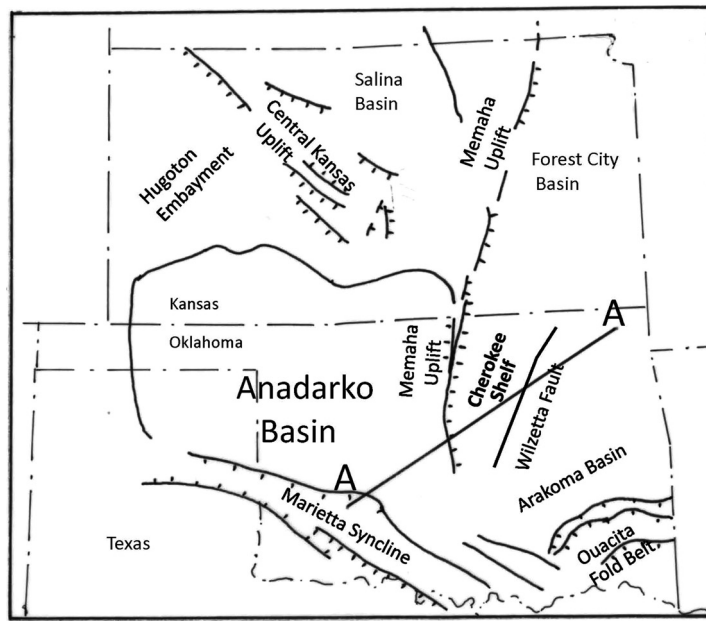
震の震源に向けて徐々に深くなっていったように見える。

オクラホマ州の地震活動が急激に高くなった原因については、① 本震の震央の近くでフラギングでの石油生産が行われており、多量の廃水が地下に圧入されている、② 震源が浅い、③ 本震の前に地震活動が活発化しているという共通の特徴から、Arbuckle層群最下部の砂岩層に圧入された石油生産に伴う多量の廃水が基盤中の亀裂に浸透し、有効応力を上昇させ、地震を起こしたと考えられている。

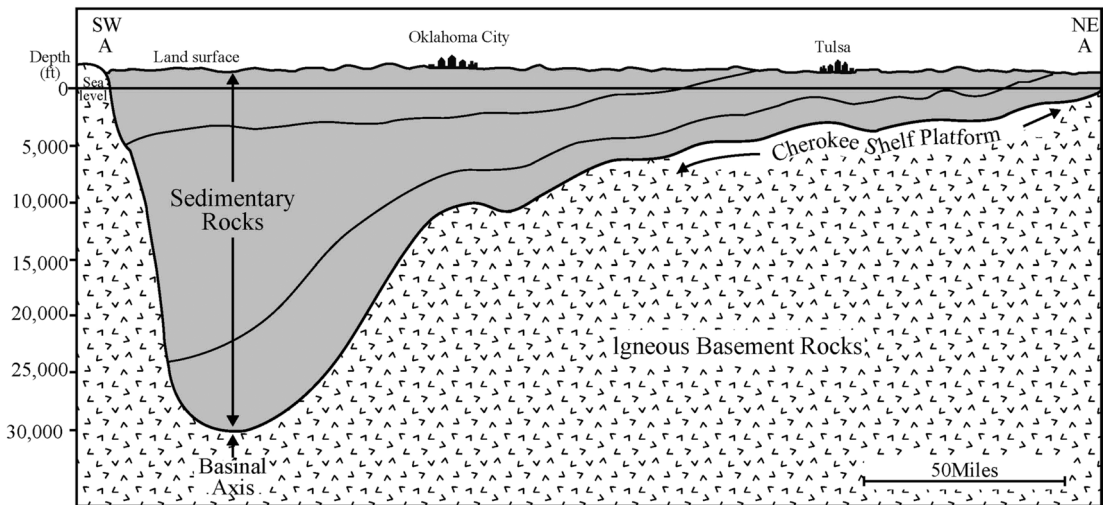
2013年9月からカンサス州-オクラホマ州境地方で地震活動が活発化したのに対応するため、カンサス州知事が2014年2月にカンサス州地質調査所、廃水井を管轄するカンサス州保健環境省、カンサス州自治体委員会の三者を招集し対策会議を発足させた。2015年、対策会議がまとめた提案書をもとに、州は地震対策計画（State of Kansas Seismic Action Plan, 2014）を作成し、州内に高

感度の地震観測網を設置するとともに、誘発地震が発生しているカンサス州南部に臨時観測網を設置し、誘発地震の研究を進めるよう州地質調査所に命じた。また、有感地震が発生した際に、行政が適切な対応をとるための助けとして、地震の数と大きさ、震源と構造物や町との距離を勘案して地震動の影響を定量的に評価する手法の開発と導入を行った。さらに、活発な地震活動が観測されていたHarper, Sumner両郡にある廃水井のうち、Arbuckle層へ廃水を圧入している井戸については、1日当たりの廃水最大量を規制し、規制当局への排水量のモニタリング結果の報告を義務付け、Arbuckle層底部の砂岩層まで到達している廃水井については、井戸底部の埋め戻しを命じた。この結果、誘発地震活動が60%低下したと報告されている（Kansas Corporation Commission, 2016）。

オクラホマ州は、カンサス州の経験に基づき、2016年3月、地震活動が活発なオクラホマ北西



(a)



(b)

図3 オクラホマ州の地質構造。(a) オクラホマ州中・西部～カンサス州南部に広がる Anadarko 盆地中の Arbuckle 層群最下部の砂岩層に石油生産に伴う多量の廃水が圧入されている (Caldwell, 1991 の図に加筆)。図中の A-A に沿った断面を (b) に示す。構造盆地を古生代～カンブリア紀の堆積岩が埋めており、堆積層の最下部が Arbuckle 層群 (Boyd, 2002)

部、中央部の地下への廃水量の規制を始めた。9月にパウニーで Mw5.8 の地震が発生したため、規制をさらに強め、震央の周囲 1,100 平方マイルにある Arbuckle 層群へ圧入している 67 の廃水井のうちの 37 の井戸に操業禁止を命じ、12,000

m<sup>3</sup>/日であった総廃水量を 5,600 m<sup>3</sup>/日に引き下げた (Oklahoma Corporation Commission, 2016a, b)。Langenbruch and Zoback (2016) は、これらの廃水量の規制により、2016 年中には地震活動が明らかに低下すると予想した。

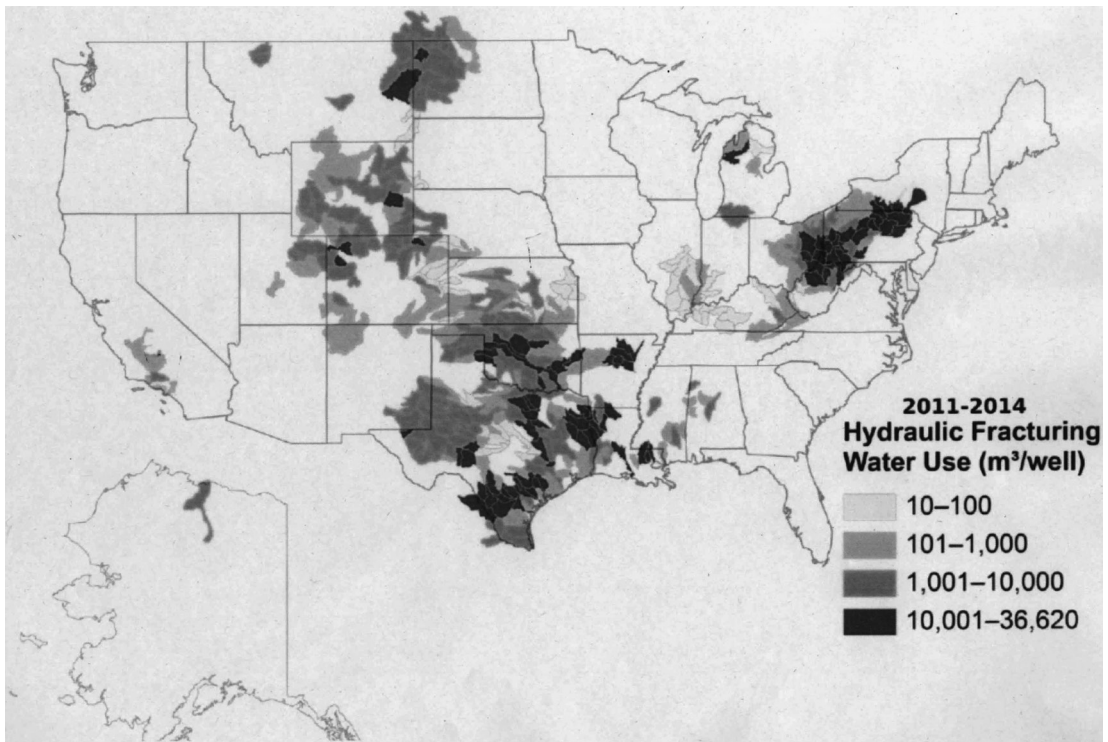


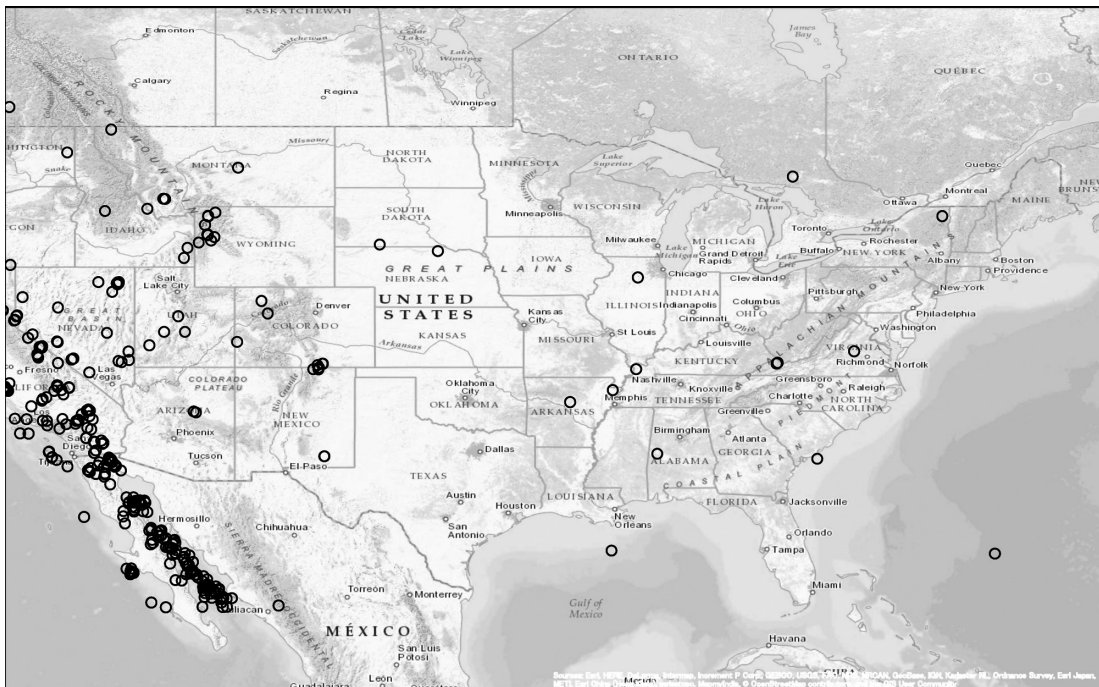
図 4 廃水井の分布 (Walton, 2015 から)。規模の大きな廃水井はオクラホマ州の他テキサス州、アラバマ地方に分布する

カンサス州の地震では、一部の建造物で外壁が剥がれ落ちたり、石造りの煙突が倒れる被害はあったが、死者はでていない。しかし、地震の経験が少なかった市民からは早急に対策を求める意見がでる一方で、石油生産が州の主要産業であるため、石油生産に影響が及ぶ、地下への廃水規制のような対策に抵抗する市民も多数存在した。このため、対策会議は市民との合意に大きな努力を割いた。特に、行政と市民との間に率直で友好的な関係を築き上げるため有効であったのは、地震活動の影響を受けている地域でコミュニティーレベルの小さな会合を定期的に数多く持ったこと、正確な情報が発信されるようマスメディアへの対応を十分にとったこと、地震活動の影響地域から選出されている州議会議員とのコミュニケーションを通じ、議員から率直な意見が述べられると同時に、対策の内容についての理解を深めてもらい、地域で正確な発言をしてもらったことであった (Buchanan, 2015)。

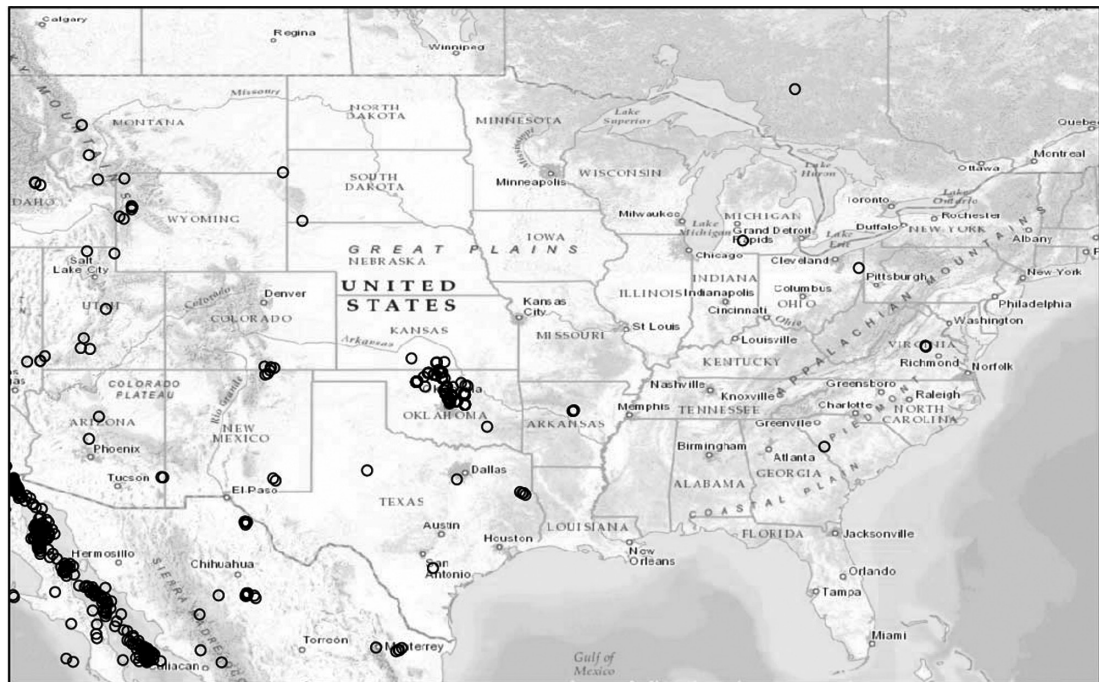
近年、地球力学モデリングの手法を用いて、地熱発電や地下への大量の流体圧入による地震発生の可能性を予測する研究が進んでいる。カンサス州では、今回、地震対策計画の実施によって地震観測網が整備されたため、地震の震源が精度よく求まるようになり、地震の破壊過程についての理解は深まった。しかし、地下構造のモデルを作成するために必要な 3D 地震探査データの利用が限られ、また、流体シミュレーションに必要な廃水量の記録 (年単位のもの) は報告されていないため、地震誘発のメカニズムの解明やリアルタイムで地震活動の推移を予測することは困難であった。

## 5. おわりに

図 4 は廃水用井の規模別空間分布 (Walton, 2015)、また図 5 はフラッキングによる石油生産が急増する 2009 年の前後各 8 年間に発生した



(a)



(b)

図 5 2001年1月1日～2008年12月31日 (a), 2009年1月1日～2016年12月31日 (b) に深さ10 km 以浅に発生した Mw4.0 以上の地震の震央分布。テキサス州、アパラチア地方ではフラギングによって地下への廃水量が急増しても地震活動は変化していない

Mw4.0以上の地震の震央分布を示す。規模の大きな廃水井は、アパラチア地方、オクラホマ州、テキサス州に多く分布している。アパラチア地方もテキサス州もオクラホマ地方と同様にフラギングによる石油・天然ガスの生産が2009年頃から盛んになり、地下への廃水量もほぼ同じ時期から急増している。オクラホマ州では、これまでみてきたようにフラギング技術の導入で地下への廃水が急増した2009年以降、地震活動が活発化しており、地下への廃水が地震を誘発しているように見える。一方、アパラチア地方やテキサス州では大規模な廃水井の密度が高いにもかかわらず、2009年前後で地震活動の大きな変化はない。アパラチア地方は、古生代の造山運動で褶曲した地層から、また、テキサス州では、岩塩ドームによって地層が下から押し上げられて背斜構造になった地層から石油が生産されており、オクラホマ州とは地質構造が異なっている。オクラホマ州で地震が急増し、アパラチア地方やテキサス州で地震活動の変化がない理由について、廃水を圧入している地層とその上下の地層の水理地質学的な性質（特に、廃水を圧入している地層と基盤との間に不透水の地層が存在するか）や断層の強度、空間分布、応力状態など、地球力学的な構造の違いによる影響をもう少し検討してみたい。

## 参考文献

- Boyd, D.T. 2002. Oklahoma oil : past, present, and future. *Oklahoma Geology Notes*, **62** : 97-106.
- Buchanan, R. 2015. Increased seismicity in Kansas. *The Leading Edge*, **34** : 614-617.
- Caldwell, C.D. 1991. Cyclic deposition of the Lower Permian, Wolfcampian, Chase Group, western Guymon-Hugoton field, Texas County, Oklahoma, Kansas Geological Survey, Open-file Report 91-52, p. 57-79.
- Franseen, E.K., Bymes, A.P., Cansler, J.R. Steinhaufl, D.M. and Carr, T.R. 2004. The Geology of Kansas Arbuckle Group, The Geology of Kansas. *Curr. Res. Earth Sci. Bull.*, **250** (Part2) : 1-43.
- Fritz, R.D., Medlock, P.L., Kuykendall, M.D. and Allen, M.W. 1991. Characterization of the Arbuckle Group in core from the midcontinent in assessing potential for horizontal drilling. Kansas Geological Survey Open-file Report 91-52, 98-107.
- Kansas Corporation Commission. 2016. Induced seismicity. [http://kcc.ks.gov/induced\\_seismicity/](http://kcc.ks.gov/induced_seismicity/)
- Keranen, K.M., Savage, H.M., Abers, G.A. and Cochran, E.S. 2013. Potentially induced earthquakes in Oklahoma, USA : Links between wastewater injection and the 2011 Mw5.7 earthquake sequence. *Geology*, **41**, 699-702.
- Langenbruch, C. and Zoback, M.D. 2016. How will induced seismicity in Oklahoma respond to decreased saltwater injection rates ?. *Sci. Adv.*, **2**. <http://advances.sciencemag.org/content/2/11/e1601542.full>
- 小川順子. 2013. シェールガス環境影響シリーズその1: シェールガス開発に伴う環境影響を鳥瞰する. 日本エネルギー経済研究所HP. <http://eneken.ieej.or.jp/data/4940.pdf>
- Oklahoma Corporation Commission. 2016a. Earthquake Response Summary. <http://www.occeweb.com/News/2016/SUMMARY.pdf>
- Oklahoma Corporation Commission. 2016b. News from the Oklahoma Corporation Commission, Media Advisory Latest Action regarding Pawnee Area. [http://www.eenews.net/assets/2016/09/13/document\\_ew\\_04.pdf](http://www.eenews.net/assets/2016/09/13/document_ew_04.pdf)
- State of Kansas Seismic Action Plan. 2014. [www.kansas.com/news/state/article1491084.ace/binary/PDF- State of Kansas Seismic Action Plan.pdf](http://www.kansas.com/news/state/article1491084.ace/binary/PDF-State%20of%20Kansas%20Seismic%20Action%20Plan.pdf)
- Walton, B. 2015. Study : Fracking water use varies in U.S. oil and gas development, North America. *Water & Energy, Water News*. <http://www.circleofblue.org/2015/world/study-fracking-water-use-varies-in-u-s-oil-and-gas-development/>

楠瀬勤一郎

[くすのせ きんいちろう]

**略歴** 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程修了, 地質調査所環境地質部地震物性課課長, 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門主幹研究員を歴任, 現在, 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門招聘研究員

**研究分野** 地震学, 岩石力学



## SARによる地殻変動観測の原理

合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar ; SAR) による地球の観測は1978年に始まったが、地殻変動の研究に初めて使われたのは1993年のことであった。1992年ランダース地震 (アメリカ合衆国) に伴う地殻変動を鮮やかな色彩で表現した画像は、その色彩の美しさもさることながら、観測者は地上で何もせず大地震に伴う地殻変動を地上観測では不可能な空間分解能で観測することができるということを如実に示しているという点で、世界の地殻変動研究者に衝撃を与えるのに十分なものであった。本稿では、SAR画像から地殻変動を抽出する手法の中で最も一般的なSAR干渉解析 (SAR interferometry ; InSAR) の原理について述べる。近年は、InSARでは計測することのできない大変形を計測するための手法や、変位の衛星軌道方向の成分を抽出する手法など、より先進的な手法で地殻変動場を抽出する研究も盛んに行われてきているが、紙面の都合でここでは省略する。

そもそもSAR衛星は何を計測しているのだろうか？ Synthetic Aperture RadarのRadarというのはradio detection and rangingを略した造語で、電波で距離を測る技術のことをいう。つまり、SAR衛星は、衛星と地表との距離を計測しているのである。SARで用いる周波数帯域 (波長25~300mm) の電波は雲や雨滴を透過するので、天気にかかわらず、また昼

夜無関係に観測を行えるという大きな利点がある。InSARでは、2枚の画像を干渉解析することにより、2枚の画像が撮影される間の地表変形を抽出する。

SAR衛星は高度600~800kmの極軌道上を周回し、マイクロ波を鉛直から20~50度の方向で衛星軌道に垂直な方向 (レンジ方向) に照射し、地上からの反射波や後方散乱波を受信する (図1a)。マイクロ波を鉛直下向きに照射すると、衛星からアンテナの両側の等距離の異なる点を識別できないため、マイクロ波は斜めに照射しなくてはならない。また、平らな海面や飛行場滑走路に入射した電波は、ほとんど前方に反射するために受信強度は非常に弱く、したがってそのような場所で地殻変動を計測するのは困難である。

SARの最大の特徴は、センサーが動きながらターゲットを観測することである。電波伝搬理論によると、ターゲット識別の衛星飛行方向 (アジマス方向) の空間分解能はアンテナの長さに反比例するが、センサーが動くことにより、あたかも巨大なアンテナで観測を行っているかのような信号を取得することができ、空間分解能を高めることを可能にしている (図1a)。

InSARの本質は、光の波動性を示すヤングの実験を考えると理解しやすい (図1b)。2つの穴S1とS2を通った光は点Pを含む壁にぶつかり、経路差に応じて同位相の場所で強め合い、

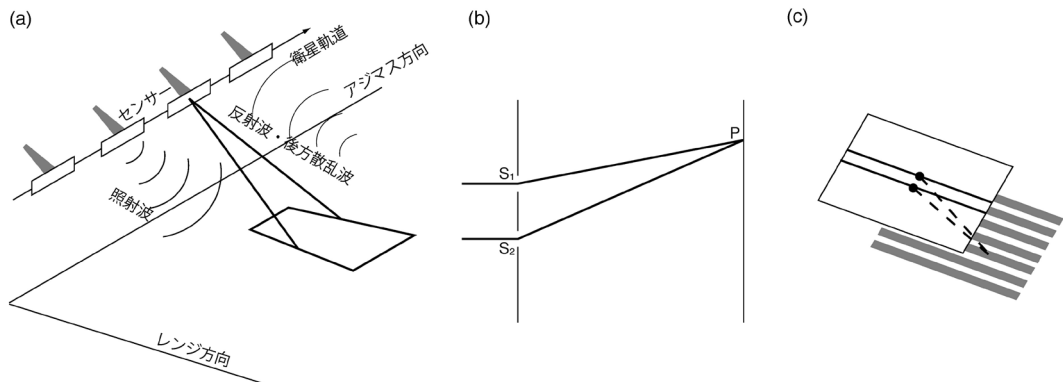


図1 (a) SAR衛星による観測のイメージ。ターゲットはレーダーの視界内にあるときだけ観測される。(b) ヤングの実験の模式図。(c) (b)の3次元への拡張。2つの時刻の衛星軌道を黒線および黒点で示す。



逆位相の場所で弱め合い、その結果縞模様ができる(図1b)。InSARをこの実験の文脈で理解するためには、図1cのように3次元化するとわかりやすい。図1cで黒線と黒点で表したのが2つの時刻の衛星軌道である。軌道制御の都合から、異なる時刻の衛星軌道は必ずしも一致しない。このような状況では、壁に図1cに示すような縞模様ができる。電波の波長が短く軌道間距離が長いほど縞模様の間隔は短くなる。

もし地表が完全な平面であれば、干渉画像は図1cのような直線的な縞模様になる。しかし、実際の地球には地形があるので、干渉画像は地形に応じた歪んだ縞模様になる。さらに、2つの時刻の間に地殻変動が発生していたら、それに対応する縞模様が生成される。つまり、干渉画像は軌道・地形・地殻変動の3つの影響の重ね合わせとなる。地殻変動を抽出するためには、得られた干渉画像から軌道と地形の影響を除去しなくてはならない。軌道の影響は規則的な縞模様としてあらわれること、地形は多くの場合既知であることから両者の影響を除去することができる。

2枚のSAR画像を干渉させて得られるデータは実際の位相差を $2\pi$ で割った余りであり、視線距離にそのまま直すことはできない。この状態をラップされた状態というが、これを視線距離の変化に直すためには、それぞれのピクセルについて $2\pi$ の不確定性を取り除かなくてはならない。この作業を位相アンラッピングという。位相アンラッピングは位相が空間的に連続であるという仮定を用いて行うことが多く、これまでさまざまな手法が提唱されてきたが、確立した手法はない。

これまで述べたように、SAR観測からは空間的に密な地殻変動を求めることができるが、以下に述べるように、万能の観測手法ではなく限界もある。InSARで求められる変位は各ピクセルについて衛星からの視線距離の変化1成分であり、GNSS観測のように3成分の変位場を求めることはできない。SAR衛星の軌道は極軌道であるため、視線方向がおおむね西から東、もしくは東から西であることを考えると、InSARによって求められる視線距離変化は変位の南北成分に対する感度が低い。

SAR衛星は第一宇宙速度に近い速度で航行しているため、約100分で地球を一周する。し

かし、同一軌道を通り干渉可能なペアを作るためには数日から数10日かかる。GNSSなどの地上観測が1日より短い時間分解能を持つことを考えると、SAR観測の時間分解能は劣る。

GNSS観測と同様に、SAR観測においても水蒸気の影響は誤差の原因となる。衛星から照射された電波が水蒸気の影響により屈折されるためである。水蒸気の影響がもたらす誤差はGNSS観測よりもSAR観測においてのほうがより深刻である。GNSS観測の場合は、複数の衛星からの電波を受信する上に、1日につき1つの座標を求める静止測量であれば電波を受信する時間が長いために、大気中の水蒸気量を求めるためのデータが多いのに対し、SAR観測の場合は衛星が1つしかない上に照射時間もきわめて短いからである。さらに、SAR観測は空間分解能が高いため、求められるInSAR画像は空間分解能の高い水蒸気分布を反映したもになっている。

さらに、GNSS観測と同様に、SAR観測においても電離層擾乱はSAR観測の誤差要因となる。GNSS観測は、電波の電離層の存在に対する応答の周波数依存性を利用し、2種類の周波数の電波を用いることにより電離層擾乱による影響を除去しているのに対し、SAR観測は1種類の周波数の電波しか用いていないので同様のアプローチをとることができず、電離層による擾乱の影響はGNSS観測よりも深刻である。とりわけ、ALOSやALOS-2に用いられているLバンドの電波は他の周波数の電波よりも電離層の擾乱を受けやすい。

このように、SAR観測は万能の観測技術ではないものの、空間分解能のよさは圧倒的であり、地震や火山噴火に伴う地殻変動を詳細に観測することを通して、地下での断層運動やマグマ輸送を詳細に明らかにすることができる。また、観測を重ねることにより、時系列解析を通して、数日以上時間スケールを持つ地殻変動の時間変化を求めることもできる。さらに、地震や火山噴火に伴う地すべりの検出、地下水の汲み上げなどに伴う地盤沈下の検出、などにもSARを用いることができる。このような点で、SAR観測は将来にわたり地殻変動観測の中心を担う観測項目であり続けるだろう。

(青木陽介：東京大学地震研究所)

# 1855年安政江戸地震の川越における被害

新井健司

## 1. はじめに

安政江戸地震は、安政二年十月二日（1855年11月11日）の夜四ツ時（午後9時半頃）に発生し、江戸を中心とする関東の広域に甚大な被害をもたらした。この地震の規模はおよそM7.0と推定され、震源は千葉県北西部の深さ70km程度の位置にあったと考えられている（松浦ら、2008）〔宇佐美ら（2013）はM7.0～7.1と推定〕。

被害の実態が明らかにされているのは、多くの記録が残されている江戸市中が大半で、これまでに詳細な研究が行われている（北原、1985；中村ら、2002；中村・松浦、2011など）。

一方、江戸市中以外の地域の被害記録も宇佐美（1976、1995）および宇佐美ら（2013）により収集され、各地の震度が推定されている。

筆者は、安政江戸地震の際に現在の埼玉県入間郡毛呂山町大八木において、山崩れと地盤沈下が発生したことについて報告した（新井、2007）。埼玉県中・南部には台地や丘陵が多く、この地震での被害記録は稀であるが、地盤条件によっては他にも同様の被害が生じた可能性があると考えた。

そこで、毛呂山町の調査以降も武蔵野台地とその周辺地域で調査を継続したところ、このたび川越市において、既知の安政江戸地震被害記録とは別に、新たに金石文と古文書が存在することを知った。これらの史料は、管見の限りでは地震研究の分野において新出と思しきものである。

川越の市街地が載る武蔵野台地の一部（以下、呼称に「川越台」を使用）は、関東平野の洪積台地として、地震動には比較的強い地盤とみなされている。しかし、安政江戸地震の際には、かなりの被害が発生していたことが、これらの史料からわかる。また、川越台を囲む荒川低地においても、

軟弱地盤に起因する被害が各地で発生していたことも明らかになった。

本報告では、安政江戸地震による川越における被害の特徴について、新旧の史料を合わせて整理し、地盤条件との関係を考察した。調査地域は、川越市街地がある川越台北部（図1）と周辺の低地（荒川低地の一部）である。

## 2. 川越城下の被害

### 2.1 川越城の被害

松平藩史料記録〔前橋市立図書館蔵『前橋藩松平家記録』〕の中の川越藩関係部分〔川越市立中央図書館蔵『松平大和守家記録』および、『新収日本地震史料、第5巻、別巻2ノ1』（Ⅲ諸藩被害）収録〕（東京大学地震研究所（編）、1985a）に川越藩の被害が記録されている。

この史料は、宇佐美（1995）による川越の震度判定（震度V（5.0））に使用された2点の史料の1つで、主に川越城（図1中の（A））の被害が記されている。

震度判定史料の他の1点は三木文庫（徳島県板野郡松茂町）所蔵の『江戸大地震大火災に伴う災害状況報告』、『新収日本地震史料、第5巻、別巻2ノ2』（Ⅳその他）収録（東京大学地震研究所（編）、1985b）である。こちらの史料には、浦賀・青梅・川越の3カ所が記され、相互に遠隔でありながらまとめて表されており、加えて文中の「半割」の語意が不明であるため、本報告での検討は控えた。

川越城内各所の被害は以下のとおりである。

- 1) 土塀には大きく崩れた所はないが、所々痛んでいる。
- 2) 瓦が落ちたり、壁などが落ちて、曲がって



図1 川越台北部の地形と安政江戸地震被災地 (A)～(D)は安政江戸地震の被害発生地を示す (他に低地でも被害発生)。

しまった所もある。

3) 「田曲輪門」\*の脇にある蔵のうち、「鉄炮蔵」が大きく損壊した。

4) 「富士見櫓」の「出し小櫓」が震動で落下し、「廻り土塀」も震動で倒れてしまった。

5) 御殿では、壁が少々上下にずれるなどの被害程度であった\*\*。

\*『新取日本地震史料，第5巻，別巻2ノ1』では、「田曲輪門」と表記されているが，これは「田曲輪門」の誤読によるものである。

\*\* 亀裂が入ってずれたか，変形したかは不明。

現在の川越城では，本丸御殿の一部と堀・土塁の一部を残すのみであるため，藩政時代から明治初期にかけて作成された城絵図をもとに，被害箇所的位置の特定を試みた。

川越城の城絵図は数10点現存し，城の変遷について研究されている(川越市立博物館，2011)。

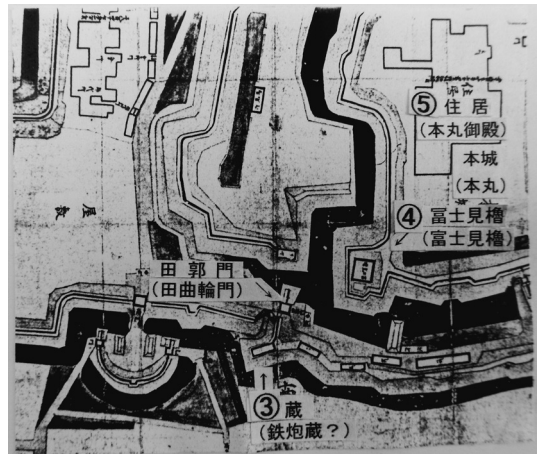


図2 川越城〔図1の(A)〕の被害  
本文中の被害，3)～5)の位置を③～⑤で示す〔「川越城図」(1867頃作成，部分)に加筆〕。

幕末の城の状況が詳細に描かれた絵図，『川越城図』〔川越市立中央図書館蔵，慶応三年(1867年)頃作成〕を用いて被害箇所を示す(図2)。

絵図によると，田曲輪門の南に東西方向に続く土塁(城の最も外側の土塁)があり，その上に3棟の蔵が並んでいる。3)の大きく損壊した「鉄炮蔵」がどの蔵かは確定できないが，田曲輪門の脇ということから，南門前の馬出し方向に突き出した土塁上の蔵(最も西にある蔵)の可能性が高い。

3棟の蔵は元禄七年(1694年)作成の城絵図にも描かれており，早くから存在する建物であるが，現在一帯は宅地化され，当時の面影はみられない。

4)の被害があった富士見櫓は，かつて本丸の南西端に突き出した櫓台(標高約20m)の上にあった。富士見櫓の構造は，その詳細がわかる資料がなく，被害記録の中の「出し小櫓」と読める部分もどのようなものか不明である。

近年，前橋市で川越城の富士見櫓と思われる図面2枚が発見されたが，これには出し小櫓と呼べるものはみられない。被災当時はこれとは異なる形の建物であった可能性もある。

富士見櫓の櫓台は現存し，途中に段のある方形の盛土である。現在，2重の土塀が櫓を囲むイメージの復元計画が進行中である。転倒した「廻り土

塀」は、このような塀であったと考えてよいであろう。

5) の被害があった「御殿」とは、本丸御殿のことである。本丸御殿は、弘化三年(1846年)に当時二ノ丸にあった御殿が失火で焼失したために、嘉永元年(1848年)に広い本丸に敷地を移して再建された。現在は玄関・大広間・詰所などの一部を残すのみであるが、かつては背後に16棟もの建物が軒を連ねる壮大なものであった。

川越城には天守がなく、中心的な建物は本丸御殿であったが、地震では壁が少々上下にずれた程度で、存外被害は少なかったようである。

## 2.2 喜多院の被害

川越城の南約700mにある喜多院は、天海僧正により再興された徳川家ゆかりの古刹である(図1中の(B))。喜多院では、次のような被害が記録されている(『喜多院日鑑』第14巻、読み下し)(塩入, 2005)。これは地震研究では新出史料と思われる〔( )内は筆者による補足〕。

- 1) 御宮(仙波東照宮)に石灯笼のうち、2本が完全に転倒し、他の灯笼の半数以上が損壊した。
- 2) 仙波東照宮の本社(本殿)には別状がなかったが、弊殿・拝殿・唐門・籬・扉・赤柵・石階(石段)などが損壊した。
- 3) 五百羅漢が損壊した。

この他に、前述の『松平大和守家記録』の中で、喜多院境内の松平大和守家廟所(仙波廟所)で発生した次の被害が記録されている。

- 4) 仙波廟所では、石碑・玉垣・門・外囲いの塀などに別状はなかったが、石灯笼は3本を残して、他はすべて倒れてしまった。

『喜多院日鑑』第14巻、読み下し』の中で「御宮」と呼ばれる社は、寛永十年(1633年)に喜多院境内に造営された、徳川家康を祀る「仙波東照宮」のことである。

境内内部に5間(約9m)の築山(標高約24m)を設け、その上に仙波東照宮の社殿が建立された。寛永十五年(1638年)の川越大火で焼失し、

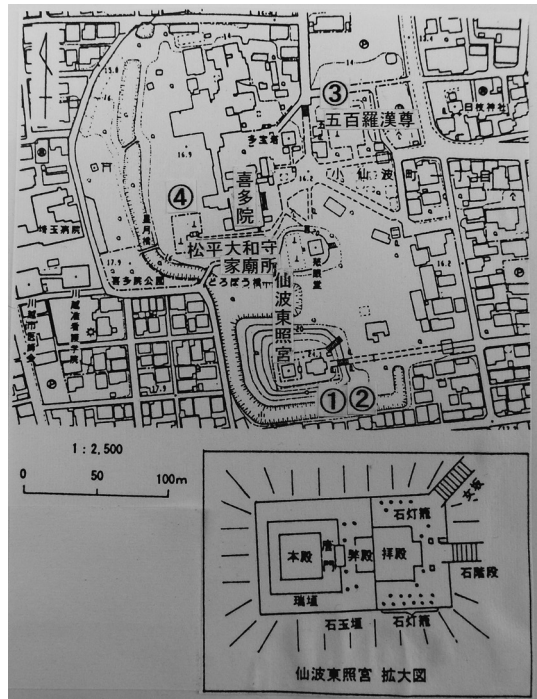


図3 喜多院〔図1の(B)〕の境内  
本文中の被害1)~4)の位置を①~④で示す。

寛永十七年(1640年)に再建されたものが現在の仙波東照宮である。したがって、安政江戸地震当時は、すでに現在と同じ状態であった。

1), 2) は、いずれも仙波東照宮で発生した被害である。歴代川越藩主が寄進した石灯笼26基の高さは7~9尺(約2.1~2.7m)で、2本が完全に倒れ、半数以上が損壊している(灯笼の一部が転落・損壊か)。その他、本殿を除く社殿や付属建造物の破損があった(図3)。

3) の被害は、境内北東端の平地にある石像群、「五百羅漢」の被害である。538体に及ぶ五百羅漢像はいずれも1m以下ではあるが、損壊・転倒したようである(ただし、その割合等の記録はない)。

4) の仙波廟所は、境内西部の平地にある川越藩主の墓所で、松平大和守家の藩主7人のうち5人の墓がここにある。墓石等には別状がなかったが、廟所内に多数ある石灯笼(高さ2m以下)が3本を残してすべて転倒したと記されている。



図 4 川越台東端の古墳上に建つ愛宕神社



図 5 愛宕神社本殿基壇の切石の1つ  
安政江戸地震の被災について刻字されている。

### 2.3 養寿院の被害

養寿院は川越城の約1km西にある寺院で、徳川家康がたびたび訪れ、幕府の保護を受けていた(図1中の(C))。川越藩も安政江戸地震の際には、川越城内や仙波東照宮とともに、養寿院の‘廟所’も検分している。この廟所とは、河越荘に館を構え、鎌倉幕府の有力御家人となった河越氏の祖、河越太郎重頼の墓所のことである。

石灯籠が倒れたが、石碑には別状がなかったと記録されている(松平大和守家記録)。河越太郎重頼の墓と伝えられるところは、平坦な境内の奥にあり、墓石の基部やその周囲は、後年の整地により地震当時とはかなり変容している。倒れたという石灯籠の位置や数も不明で、被害の詳細はわ



図 6 愛宕神社〔図1の(A)〕とその周辺

からない。

### 2.4 愛宕神社の被害

愛宕神社は、喜多院の南約1.4km(国道16号沿い)にある小社で(図1中の(D)、図4)、その本殿基壇をつくる切石積みの石の1つに、安政江戸地震の際の被害を伝える刻字がある(図5)。

刻字については、元毛呂山町歴史民俗資料館町史編さん専門調査員の内野勝裕氏に情報を提供していただいた。地震研究では新出の金石文史料で、これには次のように記されている。

「安政二乙卯年十月二日大地震就破崩同三丙辰年信心輩勸□而再建立之」(□は摩滅のため不明。)

愛宕神社は、台地(川越台)東縁にある小丘(比高約7m)に載る。台地の標高は約20mで、小丘のすぐ東側が約10mの急崖となって「仙波河岸史跡公園」のある低地(荒川低地)に臨む。この小丘は、『新編武蔵風土記稿』(蘆田編集校訂, 1996)や『校注武蔵三芳野名勝図会』(山野校注, 1994)によると、かつてこの辺りに多く存在した塚すなわち古墳の1つであるという(図6)。

安政江戸地震による被害記録のある切石とともに、大正十二年九月一日の大地震(大正関東地震)でも社殿が倒壊したことを刻字した切石もあり、この神社が2度の大地震で被災したことがわかる。安政江戸地震で社殿がどの程度の被害を受け

たかは正確には不明であるが、「破崩」という表現は、全壊に近い被害を意味するものであろう。

### 3. 川越領近郷の被害

#### —鷹狩り中止歎願書に見られる家屋被害—

川越城下が載る台地（川越台）を囲む低地（荒川低地）には、当時多くの村が存在した。

低地では、安政江戸地震の際に軟弱地盤特有の被害が広く発生したことが考えられる。その様子は、川越町村々惣代の名主他8村の名主が川越藩に出した、鷹狩り中止の歎願書〔「乍恐以書付奉歎願候」、大野（1971）の『芳野村郷土誌稿』に収録〕に見ることができる（図7）。

当史料も地震研究では新出と思われるもので、その一部を現代語にすると、次のようになる。

〔（前略）今般の大地震で領内の村々の家屋が三分七分潰れたり、破損したりしてしまつたため、鷹狩りの方々をお泊めする宿の用意ができなくなり、当惑しております。それぞれの家を修復して使えるようにしたいと思つていますが、先に申し上げましたとおり、いろいろ物入りが多く、宿の仕事に差し支えが生じることは必至です。村々は多額

の上金を免じていただきながら、十分な家の修復ができず、非常に困窮しております。どうか家々が修復できるまで、5、6年ほど宿の仕事を御赦免下さいますようお願い申し上げます。〕

この文面からは、各村で相当の家屋被害が発生していることが読み取れる。被害程度の割合らしき下りの「三分七分」は、後の「潰れ」および「破損」と対応させるなら、約3割が潰家、約7割が破損ということであろう。

この歎願書では、幕末の外国船渡来への対応で領民への負担が増していることにもふれているが、追い討ちをかけられるように受けた震災で、村民がいかに困窮したかがわかる内容である。具体的な被災地の特定はできないが、川越近郷一帯にも深刻な被害が広がった事実を知ることができる。

### 4. 川越の地盤と被害の関係

安政江戸地震の際に、江戸では台地・低地・その他の地形や地質の違いに応じて、被害程度に差が出ている（松田、2006）。この点について、川越の場合で検討した結果を以下に述べる。

#### 4.1 川越の地形・地質

川越の地形は、市街地のある台地（武蔵野台地の一部である川越台）と低地（荒川低地の一部）に大別できる（図8）。

台地は「古多摩川」の扇状地堆積物である武蔵野礫層により主要部分が構成され、同礫層の上面は武蔵野ローム層に覆われている。台地の表面は、最終間氷期（約12万年前）以降の海面低下の過程で形成された段丘面の1つである。武蔵野面と呼ばれるこの段丘面はさらに3面に細分され、川越台は約6万年前に形成されたM<sub>2</sub>面に相当する。

台地の表面はほぼ平坦であるが、東西方向で高度を比較すると、全体的に西部が高く、東方へ緩く傾斜する。たとえば、西武線本川越駅付近での標高は約20mであるが、ここから約1.3km離れた台地東縁の標高は15m前後になる。

台地上の降水は、西から東へ流れる傾向があ

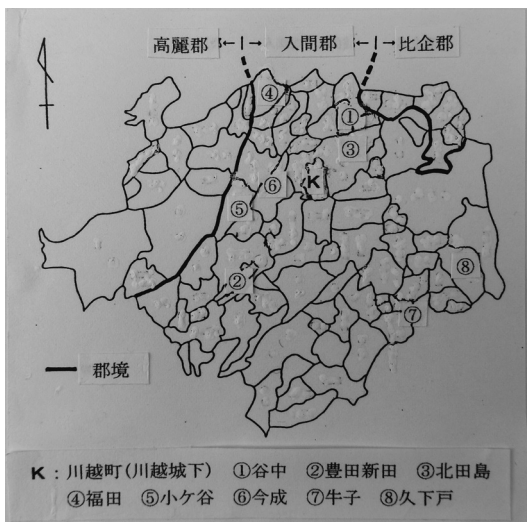


図7 鷹狩り中止歎願書に署名した名主が所属する村境界は当時の町村界（現在の川越市内のみ）〔川越市庶務課市史編纂室（1983）を改変〕。

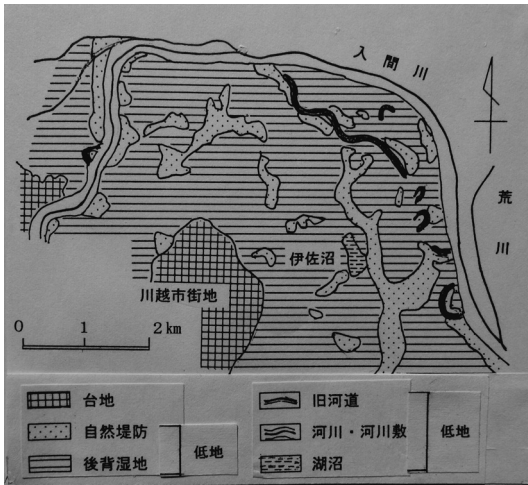


図 8 川越市北部の地形概略

り、かつては東流する小河川が発達していた。現在、これらの小河川は台地の東端に見られる河川地形によりその存在が確認できるが、市街化が進んだ中・上流部では、地表のわずかな高低差で旧流路が判別できる程度になっている。

川越市の低地は、荒川とこれに合流する入間川に沿う地帯である。これまでに両河川が頻繁に流路を移動させ、台地を浸食しながら広げた低地を沖積層が埋めている。低地内には、蛇行した河川の跡(旧河道)に沿う自然堤防が各所に分布し、集落の発達がみられる。自然堤防に挟まれる後背湿地の多くは、水田に利用されている。

#### 4.2 台地の小丘状人工地形に発生した顕著な被害

台地の被害にはいくつかの要因が考えられるが、地形的には周囲より高い小丘状の人工地形に著しいという共通点がみられる。具体的には、川越城富士見櫓の櫓台・鉄炮蔵の土塁、喜多院仙波東照宮の築山、愛宕神社の古墳である。

前述のとおり、川越城本丸御殿や喜多院の寺院建築物など、同じ台地上でも平坦な土地の建物被害についての記録では、簡単な記述のみ、もしくは記述がない。武家屋敷や町屋などの記録が確認できないが、大きな被害は少なかったように思われる。

台地上の突出した地形では地震動が増幅されやすく、さらに粒子が固結していない盛り土による

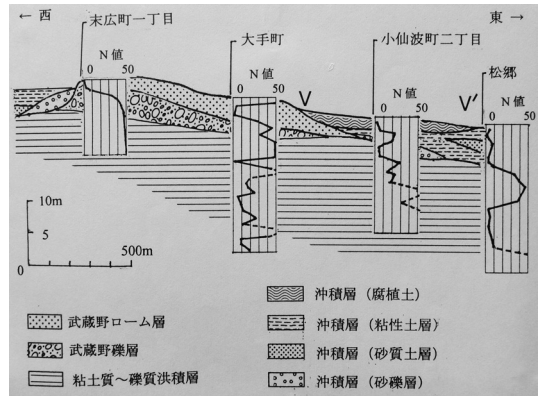


図 9 川越市北部の地質断面〔川越市下水道部(1990)をもとに作成〕

地盤条件が被害を大きくしたと考えられる。ちなみに、愛宕神社の近くにある富士浅間神社(図6)も古墳上にあるが、愛宕神社と同様に1923年関東地震で倒壊している(本殿裏石碑の刻字より)。そして、両社は2011年東北地方太平洋沖地震でも本殿その他が損壊している。

台地の地質を東西方向の断面でみると、以下の特徴があることがわかる(図9)。

地下約4mまでのローム層(武蔵野ローム層)のN値は5以下で、ローム層の下の礫層(武蔵野礫層)のN値は30以上ある。地震動に対する強度は礫層ではかなり大きく、ローム層もN値は小さいが、自然状態では比較的強度があるので、人工地形以外の地表は全般的に安定していると言える。

#### 4.3 低地で多く発生した家屋被害

低地の被害を記録した史料は、前出の鷹狩り中止歎願書のみであるが、多くの村で家屋被害が発生したことがわかる。

当時から集落の発達がみられた自然堤防は、砂層の多い微高地で、低地内では比較的安定している(N値10~20)。しかし、この地震ではかなりの震動が襲ったとみられ、潰家を含む家屋被害が各所に発生した模様である。

後背湿地や旧河道では粘土層が多く、軟弱な地盤(N値5以下)である。具体的な被害状況の記録はないが、液状化による噴砂や地盤沈下などが

原因の被害が広範囲に発生したと考えられる。

## 5. 地震に弱いその他の地形

川越における安政江戸地震では、台地の小丘状人工地形と低地に顕著な被害がでたが、他にも地震に弱い地形が存在する。今後の地震への備えとして、以下にあげる地形にも注意が必要である。

### 5.1 埋没谷

川越市街には、長禄元年（1457年）扇谷上杉氏の家宰、太田道真・道灌父子による川越城築城以降、城下の整備が進められてきた長い歴史がある。

段丘面である台地の表面は比較的平坦ではあるが、街の発展とともにより平坦化され、目的に応じて掘削や土盛りなども行われてきた。その結果、今日では台地の原地形はほとんど失われている。

図1に示したとおり、浮島公園付近および長徳寺の北には、現在も谷地形の一部が残っているが、開析谷の大半の部分は地下に埋没している。そのような地域では、軟弱な埋積層が震動を受けた際に、地割れや地盤沈下が発生する可能性がある。

また、図9のV-V'区間には、図1に示した浮島公園付近の谷底低地の縦断面が現れている。かつてこの地域には「よな川」と呼ばれる小河川が流れ、川越城もこの川の谷を「天然の外堀」として利用したと思われる。谷底には厚さ2~3mの腐植土層が堆積しており、脆弱な地盤である。

よな川の上流部では市街化が進み、すでに谷地形は判然とせず、久保町・三久保町などの字名に谷（窪地）の名残を留めるにすぎない。また、よな川には、かつて上流部が喜多院の堀の原形になったと考えられる支流が合流していた（図1）。

その他の小河川は、いずれも全長が1km以下と短く、全体的に埋積層も浅い。しかし、下流の谷の埋め立て地では、よな川下流部と同様に埋没した谷底が深いため、地震への注意が必要である。

### 5.2 崖・急斜面

台地と低地との境は、崖や急斜面が続く仙波

町・岸町において明瞭である（比高約10m、図1）。

仙波四丁目の仙波河岸史跡公園脇の崖や岸町二丁目の烏頭坂脇の崖は、特に傾斜が大きい。烏頭坂脇やその付近の崖、および仙波町四丁目の水川神社北の崖下には人家があり、土砂災害特別警戒区域に指定されている（川越市、2015a, b）。

過去の大地震で、このような崖や急斜面の崩落が発生した可能性もあり、警戒が必要である。

## 6. おわりに

松代藩家老河原綱徳が著した『むし倉後記続篇』の中の『江戸大地震雑記』に、御側役頭取の山寺源太夫という人物が、安政江戸地震発生後の十月五日に江戸へ向かう道中の被害状況を知らせてきた手紙が掲載されている（武者、1995）に掲載）。

その中に、熊谷から吹上にかけての建造物の被害や液状化の状況報告があり、次の一文が続く。

「忍は少強き様子川越ハ左迄に無之由」

「忍」とは行田の忍のことである。中山道の宿場や行田などでは、潰家も多く発生した模様で、「忍はやや被害が大きい、川越はそれほどでもないらしい。」と言うのは、川越方面から来た人が伝えた率直な感想によるものではないだろうか。

安政江戸地震での川越と行田の推定震度は、ともに5.0であるが（中村・松浦、2011）、忍城下を含む全域が加須低地にある行田の地盤条件を考えると、被害は行田のほうが大きかったかもしれない。

江戸時代も幕末に入ると、文書は数多く残るようになる。事実、安政江戸地震の被害記録もそれ以前の地震に比べて多いが、やはり得られる情報は限定的である。

本報告は現在入手し得る史料をもとに調査した結果によるが、武家屋敷や町屋の被害記録を欠くため、城下全体の被害の詳細が把握できなかった。今後、新たな史料が発見されることに期待したい。



## 謝 辞

本報告の調査にあたり、次の方々および関係機関のお世話になった。

元毛呂山町歴史民俗資料館町史編さん専門調査員の内野勝裕氏には、愛宕神社の金石文史料の情報を寄せていただいた。川越市立博物館からは、川越城史の研究資料のご提供を受け、川越市総務部防災危機管理課からは、同市の防災関係資料の閲覧をさせていただいた。現地調査の際には、住民の方々からも参考になるお話をうかがうことができた。

以上の関係者・諸機関に深く感謝申し上げる。

## 参考文献

- 新井健司. 2007. 安政江戸地震の際の武蔵国入間郡の災害. 地震ジャーナル, **43**, 45-59.
- 蘆田伊人 (編集校訂). 1996. 大日本地誌体系⑭ 新編武蔵風土記稿, 雄山閣, **8**.
- 川越市下水道部. 1990. 地下を探る 川越地盤図, 川越市, 449 pp.
- 川越市立博物館. 2011. 川越城本丸御殿竣工記念第35回企画展 川越城一描かれた城絵図の世界一, 川越市立博物館, 79 pp.
- 川越市庶務課市史編纂室 (編). 1983. 川越市史, 3 近世編, 川越市, 587 pp.
- 川越市総務部防災危機管理課. 2015a. 川越市岸町2丁目地区土砂災害ハザードマップ.
- 川越市総務部防災危機管理課. 2015b. 川越市仙波町4丁目地区土砂災害ハザードマップ.
- 北原糸子. 1985. 安政江戸地震における武家屋敷の被害について. 歴史地震, **1**, 135-145.
- 松田磐余. 2006. 江戸の地盤と安政江戸地震. 京都歴史災害研究, **5**, 1-9.
- 松浦律子・中村 操・唐鎌郁夫. 2008. 江戸時代の歴史地震の震源域・規模の再検討作業. 歴史地震, **23**, 143.
- 武者金吉. 1995. 日本地震史料. 明石書店, 1146 pp.
- 中村 操・茅野一郎・唐鎌郁夫・松浦律子. 2002. 安政江戸地震 (1855/11/11) の江戸市中の被害. 歴史地震, **18**, 77-96.
- 中村 操・松浦律子. 2011. 1855年安政江戸地震の被害と詳細震度分布. 歴史地震, **26**, 33-64.
- 大野 貞. 1971. 芳野村郷土誌稿, 309 pp.
- 塩入亮善 (発行). 2005. 喜多院日鑑, 14 読み下し. 川越喜多院, 377 pp.
- 東京大学地震研究所 (編). 1985a. 新収日本地震史料, **5**, 別巻2ノ1.
- 東京大学地震研究所 (編). 1985b. 新収日本地震史料, **5**, 別巻2ノ2.
- 宇佐美龍夫. 1976. 新史料による安政江戸地震の調査. 地震研究所彙報, **51**, 209-230.
- 宇佐美龍夫. 1995. 安政江戸地震の精密震度分布図, 宇佐美龍夫 (出版), 185 pp.
- 宇佐美龍夫・石井 寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子. 2013. 日本被害地震総覧 599-2012, 東京大学出版会, 724 pp.
- 山野清二郎 (校注); 川越市立図書館 (編). 1994. 校注武蔵三芳野名勝図絵 (中島孝昌著), 川越市立図書館, 185 pp.

新井健司

[あらい けんじ]

**現職** 上武大学ビジネス情報学部教授

**略歴** 北海道大学大学院環境科学研究科博士後期課程単位取得後退学, 上武大学講師・同助教授を経て現職

**研究分野** 地形学, 地質学

**著書** 日高町史自然史編 (埼玉県入間郡日高町, 共著) 他



# 2016年6月16日南茅部（函館）地震

谷岡勇市郎・椎名高裕

## 1. はじめに

2016年6月16日函館市南茅部海岸線近傍（または多少内浦湾側）直下でM5.3の地震が発生し（図1）、最大震度6弱（函館市川汲町）を観測した。震央の深さは11km（気象庁，2016）または5km（防災科学技術研究所，F-net MT解）と推定されており，地殻内浅部で発生した直下型地震と考えられる。そのため，断層直上で震度6弱もの強震動が観測されたと思われる。メカニズムは横ずれ成分を若干含む逆断層型地震であった（図1）。地震が発生した地域は活火山として知られる恵山と北海道駒ヶ岳の中間にあたり，従来から微小地震活動が活発な地域であった。この地震による余震域はこれまでの微小地震活動域と重なる。

さらに今回の地震や過去の微小地震活動域の直下（15～30km）では，これまで非火山性低周波地震が多く発生していたことが知られている。

最近の研究により，内陸大地震の発生には地殻流体が大きくかかわっているとされてきた（たとえば加藤（2012））。Kato *et al.*（2009）は，2004年中越地震（M6.8）や2007年中越沖地震（M6.8）の震源域の直下に局在化した低速度体が存在するとし，電磁気学的探査により推定された低比抵抗体（Uyeshima *et al.*, 2005）とも一致することから，震源直下に地殻流体が存在するとした。このように震源断層直下に地殻流体が存在すると，変形強度が低下するため周囲より変形が局在化する（加藤，2012）。この直下での局在化した変形によ

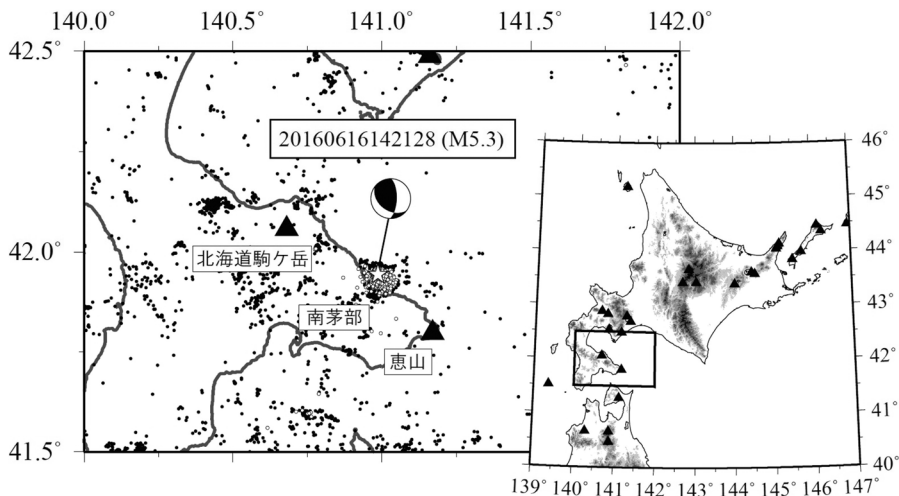


図1 南茅部周辺の浅部地震活動（深さ20km以浅）。本震（2016年6月16日，M5.3）をF-netのメカニズム解とともに白抜き星印で示す。黒丸は地殻内の背景地震活動（2003年3月から2016年6月15日），白抜き丸は本震発生後から1週間以内に発生した地震を示す。黒三角は活火山（北海道駒ヶ岳，恵山）

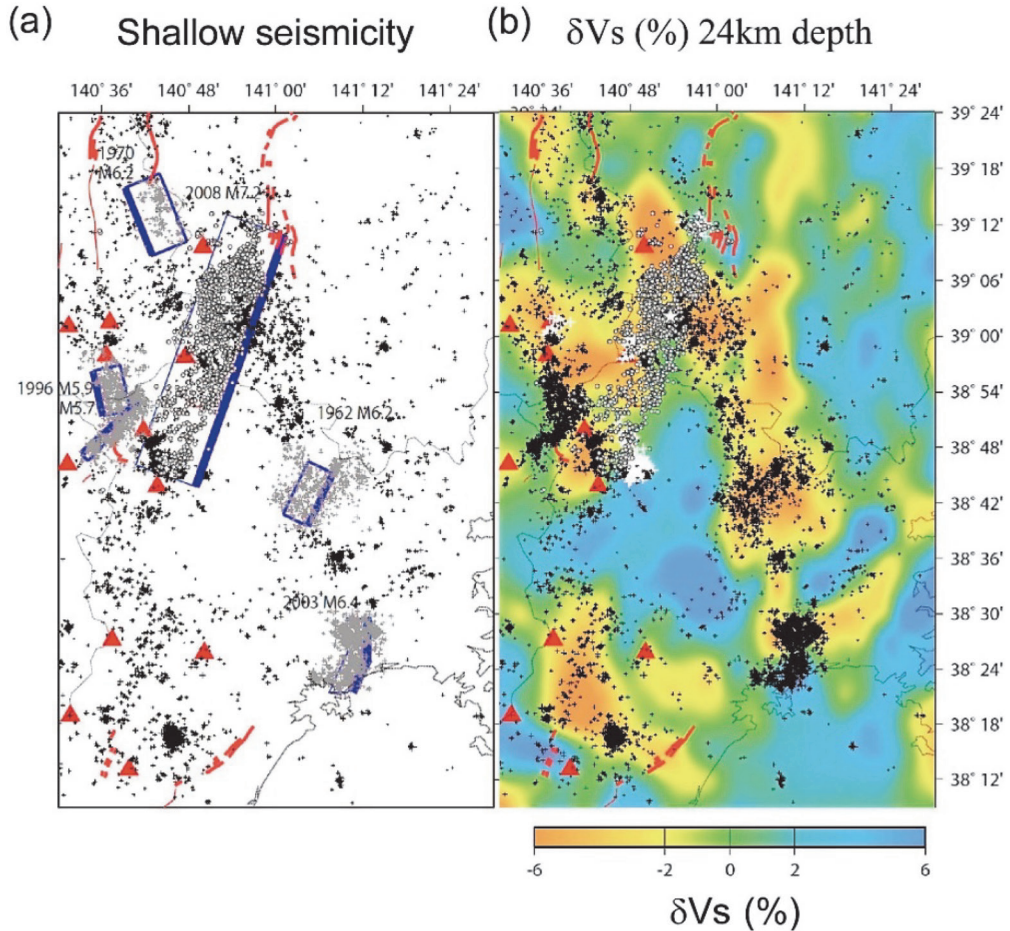


図 2 2008 年岩手宮城内陸地震の震源域近傍での浅部地震活動分布と地殻構造の比較 (Okada *et al.*, 2010). (a) 浅部地震活動 (深さ < 45 km) の震源は+, 青色の長方形は M5.5 以上の震源モデルの水平方向への投影 (太線は断層の最浅端), これらの地震の余震 (Umino *et al.*, 2000) は小さな灰色の+で示す. 赤三角は第四期火山, 太い赤の線は活断層を示す. 白抜き星印は 2008 年地震の震源を, 白抜きの小さな丸はその余震を示す. (b) 深さ 24 km での  $V_s$  の速度偏差を示す. 白の+は低周波地震を示す.

り, 上部の震源断層に応力集中を生じさせ, 中越地震や中越沖地震が発生したと考えられている. 2007 年能登半島地震 (M6.9) についても震源直下に低速度かつ低比抵抗の領域が存在し, 地殻流体の存在が示唆されている (Kato *et al.*, 2008; Yoshimura *et al.*, 2008). 2008 年岩手宮城内陸地震 (M7.2) についても震源域直下の深さ 20~30 km に低速度体が存在すると指摘されている (Okada *et al.*, 2010). それだけでなく, 下部地殻

内の上記低速度体と過去の地震活動域は空間的によく一致していることが示された (図 2). 一方, この地域では非火山性低周波地震も観測されており, それらは低速度体の周囲 (高速度域との境界) に位置しているようにみえる. これら低速度体は, 沈み込む太平洋スラブから上昇した地殻流体と考えられている (Hasegawa *et al.*, 2009). このような地殻流体は東北地方の活火山に主に供給されるだけでなく, 内陸地震の発生する地域にも供

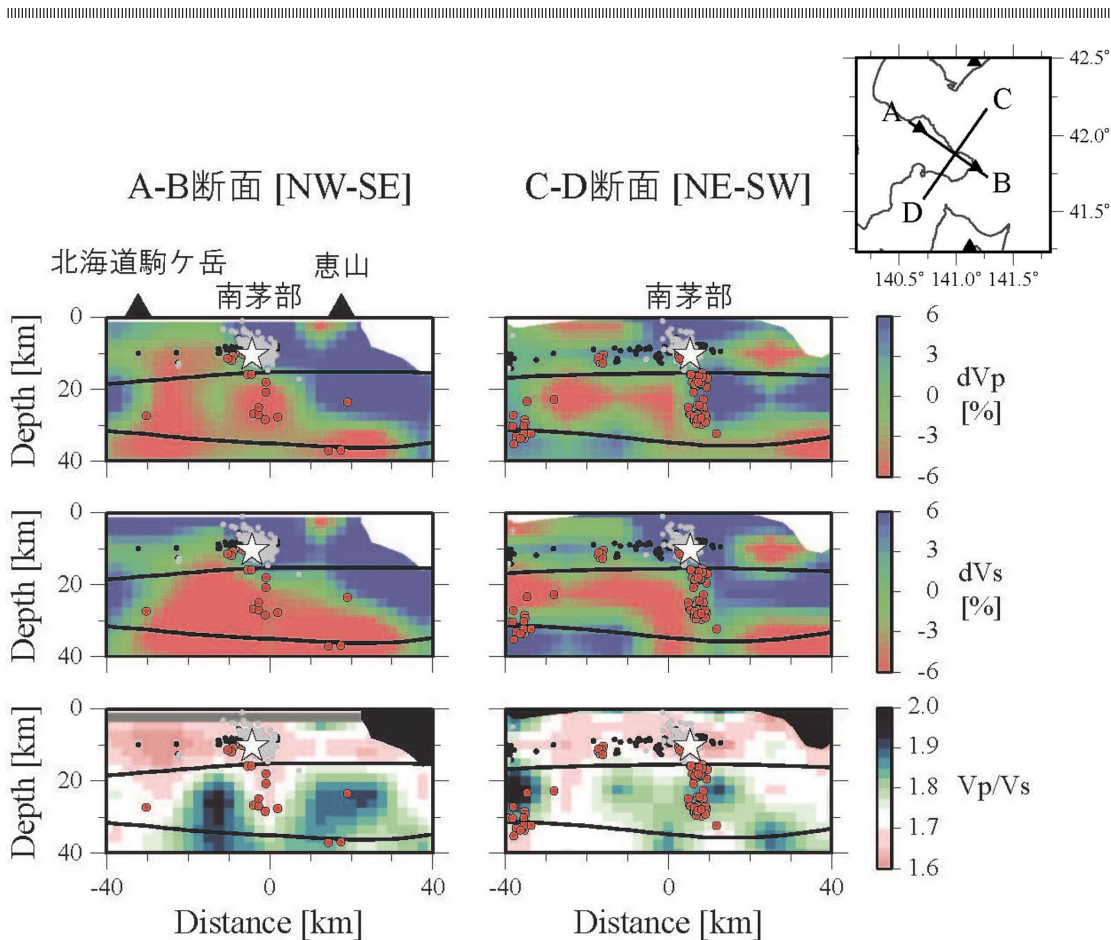


図 3 南茅部周辺の地震波速度構造 (上段:  $dV_p$ , 中段:  $dV_s$ , 下段:  $V_p/V_s$ ). 解析に使用した地震 (再決定) を黒丸で示す. 本震 (M5.3) を白抜き星印で示し, その後1週間以内に発生した余震を白抜き丸 (図中: 灰丸) でそれぞれ示す. 赤丸は深部低周波地震である. なお, 本震, 余震, 深部低周波地震は気象庁一元化震源カタログの震源である. 太線はコンラッド面, およびモホ面を表す (Katsumata, 2010). 黒三角は活火山 (北海道駒ヶ岳, 恵山)

給されていると考えられている. このように内陸大地震の発生は地殻流体と深く関わっていることが示唆される.

本研究では, 2016年6月に発生した南茅部 (函館) 地震 (M5.3) の震源域周辺の速度構造を double difference (DD) トモグラフィー法により明らかにし, 地殻流体との関係を議論する.

## 2. データと手法

地震データは気象庁一元化カタログ (2003~

2016年6月15日) の M1.0 以上の震源 (震源数 3,923 個) を用いた. 観測点は震源域近傍の 66 観測点とし, P 波到達時刻データは 71,480 個, S 波到達時刻データは 58,851 個であった. 震源距離 10 km 以内の DD データは P 波で 53,737 個, S 波で 50,263 個であった. 解析手法は DD トモグラフィー (Zhang and Thurber, 2006) とした. 水平方向の解析グリッド間隔は 12.5~25.0 km, 鉛直方向のグリッド間隔は浅部 (50 km 以浅) で 12.5 km, 深部 (50 km 以深) で 20 km とした.

### 3. 震源域近傍の速度構造

図3にDDトモグラフィーによって得られた速度偏差 ( $dV_p$ ,  $dV_s$ ) と  $V_p/V_s$  の構造とを示す。A-B断面は活火山である恵山と北海道駒ヶ岳をとおりかつ南茅部(函館)地震の震源域を横切る断面である。C-D断面は震源域をとおりA-B断面と直交する断面である。震源域の直下にS波に顕著な低速度体、かつ非常に顕著な高  $V_p/V_s$  体が推定されているのが分かる。さらに、震源域直下の非火山性低周波地震は顕著な高  $V_p/V_s$  体の境界に分布していることが分かる。これらの構造は、2004年中越地震・2007年中越沖地震・2007年能登半島地震・2008年岩手宮城内陸地震と同じように、震源域の直下に地殻流体の存在を示唆する構造であると考えられる。

### 4. 結 論

2016年6月南茅部(函館)地震の震源域の直下には地殻流体が存在し、その流体がもたらす下部地殻の弱化により、上部地殻に局所的な応力集中を発生させ、微小地震活動や本地震のような中規模内陸地震を発生させていると考えられる。中規模地震(M5.3)であっても、M7クラスの内陸大地震と同様に、震源域直下の地殻流体と震源断層との関係が示されたことは今後の内陸地震発生過程を研究する上で重要である。

### 謝 辞

本研究では気象庁および東北大学地震・噴火予知研究観測センターでの読み取り記録を使用させていただきました。図1と図3の作成にはGMT(Wessel and Smith, 1998)を使用しました。記して感謝いたします。

### 参 考 文 献

Hasegawa, A., Nakajima, J., Uchida, N., Okada, T., Zhao, D., Matsuzawa, T. and Umino, N. 2009. Plate subduction, and generation of earthquakes and magmas in Japan as inferred from seismic observations: an

overview. *Gondwana Res.*, **16**, 370–400.

加藤愛太郎. 2012. 稠密地震波観測に基づく地震発生と地殻流体. *地球化学*, **46**, 191–203.

Kato, A., Sakai, S., Iidaka, T., Iwasaki, T., Kurashimo, E., Igarashi, T., Hirata, N., Kanagawa, T. and Group for the aftershock observation of the 2007 Noto Hanto Earthquake. 2008. Three-dimensional velocity structure in the source region of the Noto Hanto Earthquake in 2007 imaged by a dense seismic observation. *Earth Planets Space*, **60**, 105–110.

Kato, A., Kurashimo, T., Igarashi, S., Sakai, T., Iidaka, M., Shinohara, T., Kanagawa, T., Yamada, N., Hirata, N. and Iwasaki, T. 2009. Reactivation of ancient rift systems triggers devastating intraplate earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L05201. doi:10.1029/2008GL036450

Katsumata, A. 2010. Depth of the Moho discontinuity beneath the Japan islands estimated by traveltimes analysis. *J. Geophys. Res.*, **115**, B04303. doi:10.29/2008JB005864

気象庁. 2016. 平成28年6月16日14時21分頃の内浦湾の地震について. <http://www.jma.go.jp/jma/press/1606/16b/201606161545.html>

Okada, T., Umino, H. and Hasegawa, A. 2010. Deep structure of the Ou mountain range strain concentration zone and the focal area of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake, NE Japan—Seismogenesis related with magma and crust fluid. *Earth Planets Space*, **62**, 347–352.

Umino, N., Nida, K., Hasegawa, A. and Sato, H. 2000. Microearthquake activity in the focal areas of large earthquakes that occurred in the last ~100 years in northeastern Japan. [http://www.soc.nii.ac.jp/jepsjmo/cd-rom/2000cd-rom/pdf/se/se-018\\_e.pdf](http://www.soc.nii.ac.jp/jepsjmo/cd-rom/2000cd-rom/pdf/se/se-018_e.pdf) (Abstract for the 2000 Joint Meeting for Earth and Planetary Science, Japan, Se-018)

Uyeshima, M., Ogawa, Y., Honkura, Y., Koyama, S., Ujihara, N., Mogi, T., Yamaya, Y., Harada, M., Yamaguchi, S., Shiozaki, I., Noguchi, T., Kuwaba, Y., Tanaka, Y., Mochido, Y., Manabe, N., Nishihara, M., Saka, M. and Serizawa, M. 2005. Resistivity imaging across the source region of the 2004 mid-Niigata Prefecture earthquake (6.8), central Japan. *Earth Planets Space*, **57**, 441–446.

Wessel, P. and Smith, W.H.F. 1998. New, improved version of generic mapping tools released. *Eos Trans., AGU*, **79**, 579. doi:10.1029/98EO00426

Yoshimura, R., Oshiman, N., Uyeshima, M., Ogawa, Y., Mishina, M., Toh, H., Sakanaka, S., Ichihara, H., Shiozaki, I., Ogawa, T., Miura, T., Koyama, S., Fujita, Y., Nishimura, K., Takagi, Y., Imai, M., Honda, R., Yabe, S., Nagaoka, S., Tada, M. and Mogi, T. 2008. Magnetotelluric observations around the focal region of the 2007 Noto Hanto Earthquake ( $M_f$  6.9), Central Japan. *Earth Planets Space*, **60**, 117-122.

Zhang, H. and Thurber, C. 2006. Development and applications of double-difference seismic tomography. *Pure Appl. Geophys.*, **163**, 373-403. doi:10.1007/s00024-005-0021-y

谷岡勇市郎

[たにおか ゆういちろう]

**現職** 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター教授

**略歴** ミシガン大学(米国)でPhD取得後、気象庁気象研究所研究官、北海道大学理学研究院准教授などを経て現職

**研究分野** 地震学、津波データを利用した巨大地震の破壊様式の解明や新しい津波即時予測手法を開発する研究を実施している

**著書** 地球ダイナミクス(朝倉書店、共著)



椎名高裕

[しいな たかひろ]

**現職** 北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター研究員

**略歴** 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻博士課程修了(2016年)。2016年より現職

**研究分野** 地震学



# 韓国慶州マグニチュード 5.8 地震

石川有三

## 1. 二連発地震

2016年9月12日の19時44分に韓国南東部の慶州市でマグニチュード（以下、Mと略す）5.1の地震が起き、つづいて20時32分にM5.8（モーメントマグニチュード Mw5.5）の地震が起きた。どちらも震源が地殻内の直下型地震であったが、震源の深さがM5.1の場合が15.0kmでM5.8が14.1kmとやや深かった（韓国資源研究院による）ためか、幸い犠牲者はでなかった。ただ、負傷者は22名で、韓国気象庁が1978年に地震観測を始めて以来、最大の地震となった。1978年以降これまでに韓国および周辺で起きた最大の地震は、2004年に韓国東海岸沖で起きたM5.2の地震であった（北朝鮮では1980年にM5.6の地震が中国国境付近で起きている）。

韓国では、これまで地震活動が非常に低調で、韓国気象庁が報告する地震の震源数が年間に約50個程度である。これに比べ日本では、主要四島と付近のM2以上の浅い震源ですら年間約2万個も起きている。そのため、韓国では地震に関する関心も低く、これまで活断層の調査があまり行われてこなかった。今回の地震は、そのなかでも活断層として知られていた梁山（ヤンサン）断層に沿って起きた。図1の左に韓国気象庁が地震観測報告を発表し始めて以来、昨年末までに決められた震源分布を示した。これをみると主な震源の分布は、黄海と朝鮮半島東岸沖の日本海のほか、陸域では韓国南部と北朝鮮の平壤の南の黄海道地域で多いことが分かる。

慶州地震の最大震度は、韓国で使われている改正メリカリ震度階の震度6で、日本の気象庁震度階に換算すると震度4相当と思われる。同じ規模

の日本の地震と比較すると2004年新潟県中越地震（M6.8）の余震ではM5.5が2回起きている。そのときの最大震度はどちらも5強であった。この震度の違いは、震源の深さの違いによるもので、中越地震の2個の余震の場合は、それぞれ深さ7.5kmと0kmと推定されており、慶州地震の場合よりかなり浅い。そのため地表では大きな震度になっていた。慶州地震では、幸いにも震源の深さがやや深かったため、震度5を超えるような震動は観測されなかった。ただ、震央から南西に約10km離れた観測点で観測された最大加速度は、水平577gal、鉛直205galであった。慶州市にある月城原子力発電所は運転を中止し、韓国高速鉄道KTXも運行を中止した。余震も数百回起きており、現在もなお継続して起きている。地震に慣れていない住民は不安だったと思われる。

地震のメカニズムは、図2に示したようにT軸が北北西-南南東方向を示す横ズレ型であった。このような特徴の応力は、華北から朝鮮半島にかけて起きる地震に共通でみられる。

慶州地震は、同年4月に日本で起きた熊本地震との関連性も考えられる。7月5日には釜山の北北東沖でM5.0の地震が起きるなど、2016年3月頃から韓国とその周辺での地震活動はやや高くなっていった。

## 2. 過去の地震活動と今後

先にも紹介したが、韓国内の地震活動はかなり低い。しかし、今回の震源の近くで過去に起きた地震がなかったわけではない。過去の資料を調べてみると1921年3月21日M4.0の地震がある。この地震による有感範囲を図3に示した。地震の

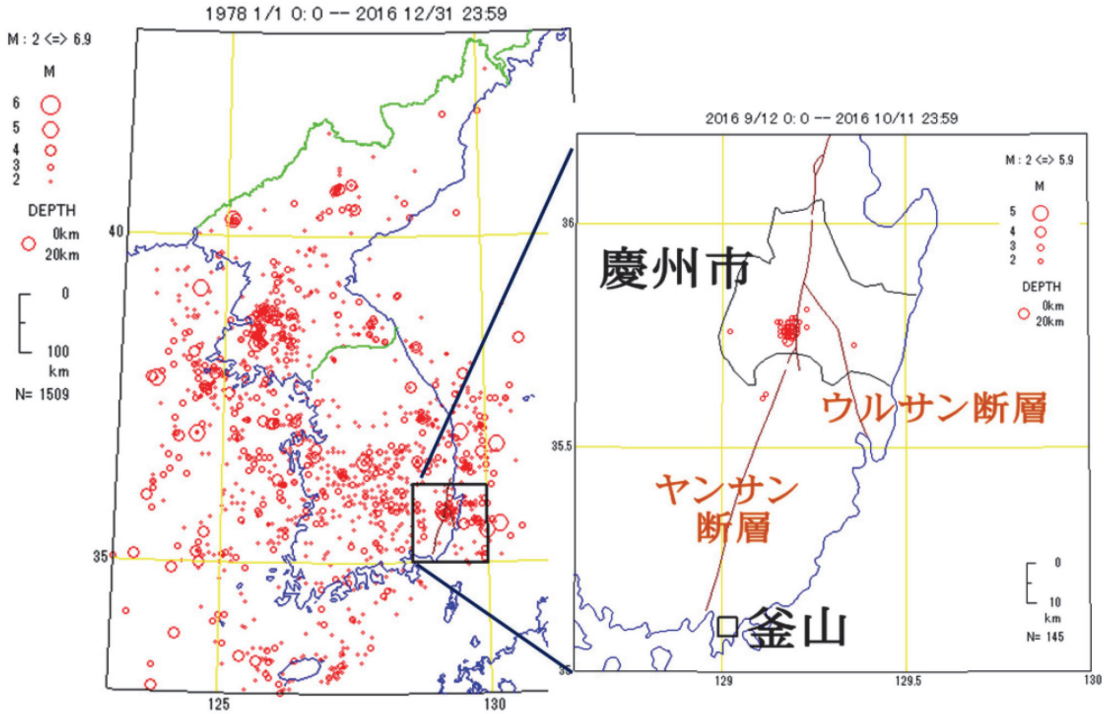


図 1 朝鮮半島の地震活動（左図）と 2016 年 9 月慶州の地震の本震・余震の震央分布図（右図）。右図の茶色線は、地表活断層線で黒線は慶州市の範囲を示す。慶州地震は、本震・余震とも慶州市内で起きており、活断層として知られているヤンサン断層（岡田ら，1988）に沿って起きたと思われる。四角マークは釜山市の位置を示す

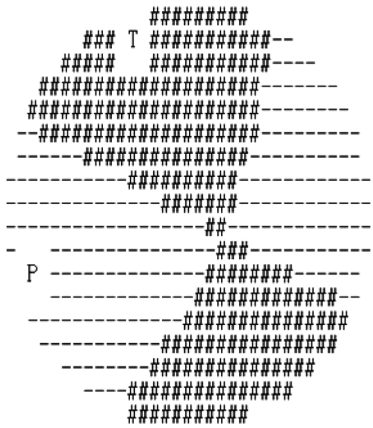


図 2 慶州地震の本震のメカニズム解（グローバル CMT グループによる）。圧縮軸（P）、張力軸（T）ともに水平に近い横ズレ型地震である。北北東-南南西の面が震源断層面と思われる、右横ずれである

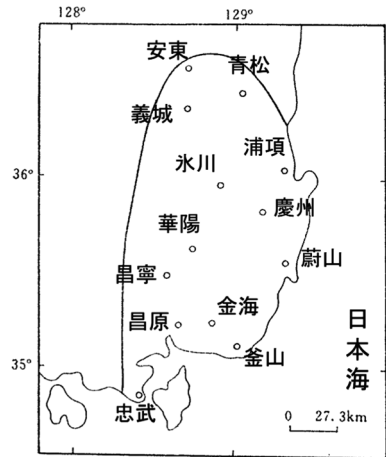


図 3 1921 年 3 月 21 日 M4.0 の地震による有感範囲（朝鮮総督府観測所，1936）





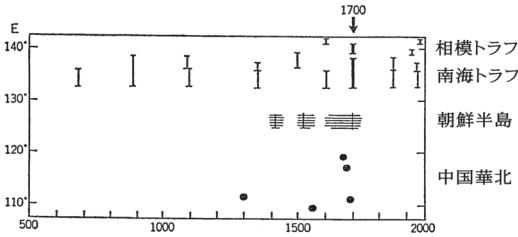


図 4 茂木 (1976) は、東アジアの地震活動の同期的高揚が 1700 年前後にあったことを指摘した。横軸は西暦で、縦軸は経度

規模は大きくはないが、これから推定される震源は、慶州地震の震央に近い場所と思われる、やはりヤンサン断層に関連した活動であったと思われる。

もっと過去に遡って調べると朝鮮半島でも地震活動が活発な時期もあったことが知られている(李, 2001)。特に茂木 (1976) は、中国華北地区から朝鮮半島の地震活動と西南日本の南に位置する南海トラフの巨大地震の関連を調べ、なかでも 1700 年前後にこれらの地域では地震活動が特に高かったと指摘している。南海トラフでは、日本付近での過去最大の地震と考えられている M9 クラスの宝永地震が 1707 年に起きている。この頃には、華北地域でも M8 の地震が起きており、朝鮮半島でも地震活動が高かった。これは、それほど遠くない将来に南海トラフの巨大地震が起きると言われている現状を考えると、朝鮮半島でも地震活動が活発になってもおかしくないと推定され、今後さらに注意しておく必要がある。これは韓国内だけでなく、地震活動が最近やや活発化し

ている平壤周辺でも同じことが言える。

## 謝 辞

韓国資源研究院 (KIGAM) の Jeon Jeong Soo 博士と韓国気象庁 (KMA) の Park Suncheon 博士には、慶州地震の資料などを見せて頂き感謝します。

## 参考文献

- 朝鮮総督府観測所. 1936. 朝鮮気象三十年報, 274+7 pp.
- 茂木清夫. 1976. 北東アジアの地震活動期. 日本地震学会予稿集, 1, 140.
- 李 編 訳. 2001. 朝鮮・韓国地震目録. 地震出版社, 98 pp.
- 岡田篤正ら. 1998. 蔚山断層系 (韓国東南部) 中央部の活断層地形と断層露頭. 地学雑誌, 107, 644-658. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography1889/107/5/107\\_5\\_644/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography1889/107/5/107_5_644/_pdf) [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography1889/107/5/107\\_5\\_Plate3/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgeography1889/107/5/107_5_Plate3/_pdf)

石川有三

[いしかわ ゆうぞう]

**現職** 産業技術総合研究所活断層・火山研究部門招聘研究員. 静岡大学防災総合センター客員教授

**略歴** 京都大学大学院理学研究科博士課程中退, 気象庁気象研究所研究室長, 松代地震観測所長, 地磁気観測所長



# 津波碑は犠牲者を減らすことができたのか？

佐藤翔輔

## 1. はじめに

「災害が起きた事実を後世に伝える」ことが大切であることは誰も疑わない。特にそれが「津波（津波災害）」である場合には、「同じ場所で、〇年間後に、再び起こる」という特徴があることから、ことさらその役目は大きい。それを受けてか、津波が起こったことを伝えるものとして、津波碑、口碑、地名、津波石、遺構、朗読、歌、絵画、儀礼などが日本には数多く存在する。筆者は、これらを「津波伝承知メディア」と称し、津波被災の経験を伝承する有形・無形の媒体、と定義している<sup>1)</sup>。

筆者は、東北地方に着任して、改めてその存在の多さに衝撃を受けた。東北地方は、1896年明治三陸地震津波、1933年昭和三陸地震津波、1960年チリ地震津波など、近地・遠地問わず多くの津波災害の被害を繰返し受けている。時代をさかのぼれば、1611年慶長奥州地震津波<sup>2)</sup>、869年貞観地震津波<sup>3)</sup>までである。数多くの津波伝承知メディアを目にして、耳にして、「津波災害があったことを後世に伝えよう」という東北の先人達の気概を感じたのである。

一方で、大きな疑問をもつようにもなった。これら「津波伝承知メディア」は、「伝える」という手段の先に、「津波からの被害を減らす」ことが本質的に求められている機能である。「津波伝承知メディアは、被害を減らすことができたのか」という議論は、実はこれまで定量的に、体系的に検証されてはおらず、「先人達の気概」が実災害の場面で活きたのかそうでなかったのかは、科学的には明らかにされてこなかった。

本稿では、筆者が東日本大震災の発生から6年

間の中で、以上の疑問について、特に「津波碑」を対象にして、問うてきたいいくつかの試みを紹介するものである。

## 2. 「数」で全体像をみる

単純に傾向を把握するために、東日本大震災における岩手県と宮城県の「津波碑の数と被害」の対応関係を調べてみた（図1、佐藤ら、2014）。図1の横軸は、地域ごとの津波碑の数であり、縦軸は死者・行方不明者の割合である。前者は東日本大震災の前に建立されていたもので、後者は東日本大震災の際に実際に出た被害である。ここで期待したのは「津波碑が多いほど、死者・行方不明者率は低くなる」という傾向で、言い換えれば、「右下がりの分布」、相関係数で言えば、「-1.00に近い値」であったが、そのようにはならなかった。結果は「無相関」であり、ましてや符号は「正」を示しており、有意な結果でないものの「津波碑が多いほど、犠牲者が多い」という結果になった。

この図が示す意味については、次の2つの見解がある。

1つ目は、「津波碑がある」ということは、それだけ津波が何度もくる、かつ大きな津波がくる（ハザードが大きい）場所である、ということである。実データの掲載は別稿にゆずるが、東日本大震災で特に津波が高く観測された場所は、宮城県平野部よりも、それ以北の岩手県や宮城県のリアス部である。これらの地域は、明治三陸地震津波、昭和三陸地震津波でも大きな被害を受けており、その事実を伝える津波碑が多い。すなわち、東日本大震災の場合、「津波碑が多いところに、

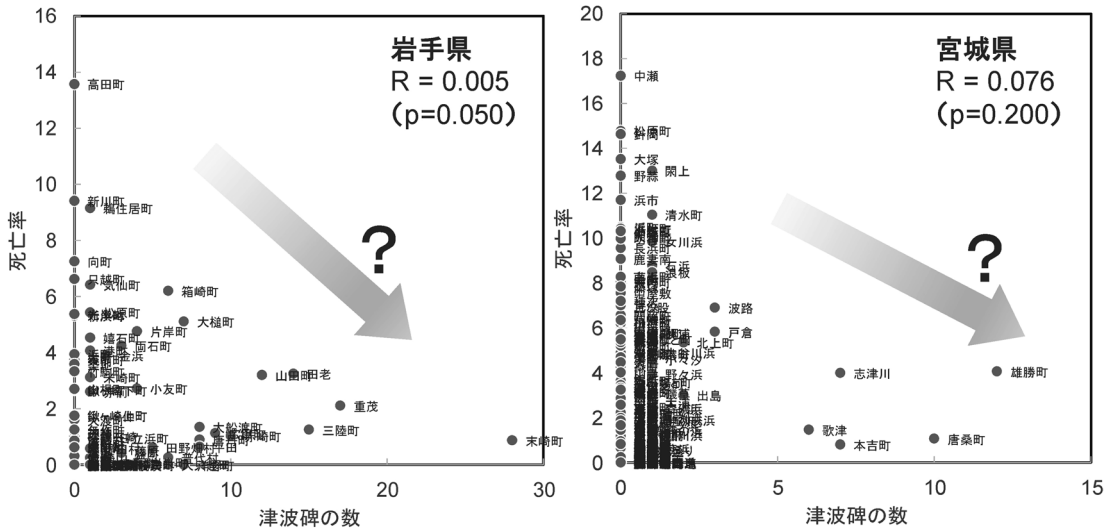


図 1 津波碑の数と東日本大震災における死亡率の関係（岩手県，宮城県）

表 1 死亡率を目的変数にした一般化線形モデル

説明変数	係数	係数の 符号	標準誤差	z 値	Pr ( z )	残差逸脱度	実績値と再現値の 相関係数
(切片)	-5.847	-	0.067	-87.57	0.000		
対数化した最大浸水深	0.822	+	0.023	35.37	0.000		
津波碑の有無	-0.197	-	0.032	-6.230	0.000		
津波由来地名の有無か否か	0.139	+	0.022	6.346	0.000		
曝露人口	-3.34E-05	-	4.39E-06	-7.603	0.000	8,556	0.256
高齢化率	0.042	+	0.002	23.83	0.000		
平均標高	-0.023	-	0.003	-7.046	0.000		
平均起伏量	0.010	+	0.001	8.238	0.000		
海岸線からの距離	-1.28E-04	-	2.29E-05	-5.604	0.000		

大きな津波が来た」となり，そのような地域（ハザードが強い地域）に犠牲者が多く発生したことは大きな疑問にならない。

もう1つは，図1を「曲がった目」で見ると浮かび上がってくる。「津波碑の数が特に多い場所」は，図全体の中で右下に位置しており，図左上から右下に「直線的な包絡線」のようなものが見えなくもない。重茂（岩手県宮古市重茂（おもえ）姉吉）は，津波碑に「此処より下に家を建てるな」と記されており，過去に集団移転がなされ，実際に東日本大震災で家屋被害が発生しなかった地域

である。また，三陸町（大船渡市三陸町吉浜）も，津波碑に津波の予兆や周期性の記述があり，明治三陸津波を受けて集団移転がなされ，東日本大震災では家屋被害が少なかった地域である。

これらのことから，津波碑と被害の対応関係を見るだけでは，津波碑の「真の効用」は見えてこないことが分かる。そこで，津波によって犠牲者が発生する要因について多角的にみていくことを考えた。表1は，各地域の死亡率と，津波碑の有無，その地域が津波に由来する地名であるか否か，といった津波伝承知メディアのほか，既往研



写真 1 普代村太田名部地区における慰霊祭（筆者撮影，2016年3月3日）

究で明らかにされている津波による犠牲者の発生に影響する要因を含めて，それらの対応関係を分析した結果である<sup>4)</sup>。ここで「地名」をもってきたのには理由がある。津波に由来する地名も，過去に津波があったことを伝える津波伝承知メディアに位置付けられる。津波碑と同じ視点で分析することで，両者が影響した度合いを相対的に比較できると考えたのである。

着目すべきは「符号」の欄（列）である。これは係数として出力された値の正負を示しており，「+」であれば死亡率を増やした要因として，「-」であれば死亡率を減らした要因として影響したことを示している。津波碑の有無は「-」の値を示し，津波碑の存在は犠牲者の発生をやや軽減した可能性が示された結果となった。一方で，地名は「+」の値を示し，その逆の結果となった。ここで両者が異なる傾向を示した意味は大きい。同じ（同じでないかもしれないが），津波伝承知メディアであっても，犠牲者の軽減に影響をもたらすものと，そうでないものがある，ということになる。

「津波伝承知メディアは，被害を減らすことができたのか」という問いに対して，津波碑は「（一部）できているようである」という解を量的アプローチから得られた。

### 3. 「現場」で個別事例をみる

もともと抱いていた疑問は「量的にはどうなのか？」であったが，こうなってくると「質的な部分」がとても気になってくる。それは，「数（量）」としては，津波碑は効果があったことが分かった。では，実際の現場はどうだったのか？という新しい疑問・関心である。当初の疑問と矛盾しているようにも捉えられるが，個別事例を考察することで，前章の結果の妥当性を検証することもできる。

ここでは，3つの例について現地踏査から得られた知見を紹介したい。

#### 3.1 岩手県普代村太田名部と洋野町八木地区の津波碑：供養祭とともにある津波碑<sup>5)</sup>

普代村太田名部では，毎年，1933年昭和三陸地震津波が発生した3月3日の朝に（写真1），また洋野町八木地区では同日の周辺の日曜の朝に，津波碑の前で供養祭が行われている。普代村太田名部では，昭和三陸津波だけでなく，1896年明治三陸津波の浸水高さよりもやや高い場所に津波碑が設置されており，津波避難の目安になっていたようである。実際，当日は津波碑の周辺やそれよりも上の場所に避難して，海のほうを眺めていたという。洋野町では，参加者を多く募るために3月3日ではなく，その周辺の日曜の朝に開



写真 2 陸前高田市広田における津波標柱の周辺（筆者撮影，2016年4月9日）

催し，多くの地域住民が参加している。いずれも，東日本大震災の犠牲者はゼロの町である。

### 3.2 岩手県宮古市重茂姉吉地区と陸前高田市広田の津波碑：居住場所を規定する津波碑

宮古市重茂姉吉地区にある津波碑には、「此処より下に家を建てるな」と彫られており，この教訓を実践した家屋は，東日本大震災で被害を免れている。陸前高田市広田にある津波碑（正確には，津波標柱）の現在の姿は非常に特徴的である。この津波碑は直方体の標柱であるため，側面が4つあり，それぞれに異なるメッセージが刻まれている。その海側の面には「低いところに住家を建てるな」と記されている。写真2は，東日本大震災が発生した後の同地区の様子である。「低いところに住家を建てるな」面側には，津波が到達しており，家々はなくなっている。

### 3.3 宮城県名取市関上地区の津波碑：存在するだけでは伝えられない

津波碑が存在するすべての地域で，被害が軽減されたわけではない。名取市関上地区は，2つの津波碑がある。いずれも「地震があつたら津波の用心」と記されている。しかし，東日本大震災の発生直前の頃は，津波碑が存在していることはあまり知られていなかったという。「関上には，津波は来ない」という伝承もあったほどである。「建立すればいい・大丈夫」というものではないこと

を物語っている。

## 4. おわりに

ここで紹介した，疑問を解明する試みは，まだ途上であるため，その答え・解は今後変わり得るものであることに留意されたい。しかも，「津波碑があったから，被害が軽減されたのか？」，それとも「被害を軽減する様々な取り組みを行っていた地域には，津波碑が建立されるのか？」というまったく逆の現象なのかは，解明できていない。

今後も，この疑問にチャレンジしていくとともに，津波碑をはじめとする津波伝承メディアの「あり方」について明らかにすることで，「津波碑は犠牲者を減らすことができる」と言える地域社会づくりに貢献できればと思う。

## 参考文献

- 1) 佐藤翔輔・平川雄太・鹿島七洋・奥村 誠・今村文彦. 2015. 津波伝承メディアが人的被害の軽減に及ぼす影響に関する一次的分析—津波碑と津波由来地名に着目した東日本大震災の事例検討一. 第34回日本自然災害学会年次学術講演会講演概要集, pp. 125-126.
- 2) 蝦名裕一. 2014. 慶長奥州地震津波と復興—四〇〇年前にも大地震と大津波があった，蕃山房, 69 pp.

- 
- 3) 菅原大助・今村文彦・松本秀明・後藤和久・箕浦幸治. 2011. 地質学的データを用いた西暦 869 年貞観地震津波の復元について. 自然災害科学, **29**, 501-516.
- 4) 佐藤翔輔・平川雄太・奥村 誠・今村文彦. (投稿中). 津波伝承知メディアによる人的被害低減効果の統計的分析—東日本大震災で被災した岩手県・宮城県における津波碑と津波由来地名に着目して—.
- 5) 平川雄太・佐藤翔輔・川島秀一・今村文彦. 2016. 津波碑前で行われる慰霊祭の実態調査とその効果に関する研究. 地域安全学会梗概集, **39**, 125-128.

佐藤翔輔

[さとう しょうすけ]

**現職** 東北大学災害科学国際研究所情報管理・社会連携研究部門災害アーカイブ研究分野 助教

**略歴** 京都大学大学院情報学研究科博士後期課程修了, 日本学術振興会特別研究員 DC2 (京都大学防災研究所付), 東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センターを経て, 現職. 博士 (情報学)



# ■ 書 評 ■

## ● 熊本地震から見た日本列島の将来像は

佐藤比呂志 著

### 巨大地震はなぜ連鎖するのか—活断層と日本列島

評者 横山裕道

2016年4月の熊本地震は、震度7の地震が立て続けに起きたことで被害が大きくなった。しかも最初にM6.5の地震が起き、約28時間後にはるかに規模の大きいM7.3の本震が発生するという予想外の展開だった。一般の人はもとより気象庁や地震学者も大いに戸惑った。

この地震がきっかけとなって構造地質学が専門の筆者が、「日本列島に生きるということは、地震や活断層と共存するということだ」との観点から本書をまとめた。

本書の流れは、各章のタイトル「熊本地震はなぜ起きたのか」「日本列島はプレートの交差点にある」「こうして日本列島が誕生した」「活断層と震源断層」「南海トラフ巨大地震に挑む」を見るだけで容易につかめる。

なかでも、地震の際にずれ動いて地震波を発生させ、地殻変動を引き起こす「震源断層」は、地質時代のダイナミックな日本列島の形成過程で生まれたものだという指摘は、地震国日本の由来を示したものとして興味深い。こうした震源断層は条件が整えば、地表にも痕跡を残し活断層として認識されるようになるという。

あの1995年の阪神大震災を引き起こした兵庫県南部地震をきっかけに観測網が整備され、また今まで見えなかった地下の構造が超音波診断のような反射法地震探査によって次々に明らかになっていった。これは地震学や地質学の向上に大きく貢献し、断層がどう動いて地震が発生するのかも浮かび上がってくるという。阪神大震災以降の知られざる一面と言っていられる。

ちょっと大胆な予測も示された。たとえば「現在では、東北地方で大地震が発生する可能性は、しばらくは心配しなくてもよさそうだ」という指摘だ。2011年の東北地方太平洋沖地震によって、プレート同士が押し合うことで生まれていたはずみが解放されたためという。

一方で南海トラフ巨大地震の前兆として西南日本全体が地震の活動期に入り、この巨大地震が発生するまで地

震が起きやすい状況が継続するため熊本地震に匹敵するような地震の発生は避けられない、と述べている。内陸地震との関連を含め広い視野から、プレート全体の動きの中で南海トラフを捉えることの必要性も訴える。

「西南日本で内陸地震が連鎖するリスクに警鐘を鳴らすことは、研究者としての責任である」という筆者の思いがひしひしと伝わってくる好著だ。だが、評者にとって本のタイトルが「巨大地震はなぜ連鎖するのか」であることへの疑問は最後まで解けなかった。

一般的に大地震はM7以上を言い、M8以上を巨大地震と呼んでいる。熊本地震の1回目の震度7をもたらしただ地震はM7にも満たず、中地震にすぎない。2回目は大地震だ。それなのになぜ熊本地震では巨大地震が連発したという印象を与えようとしたのだろうか。被害が大きいとM7程度でも巨大地震と呼ぶマスメディアもあるようだが、専門家の書としては違和感が残った。

<NHK出版新書、2016年7月、新書判、195ページ、740円+税>

[よこやま ひろみち 淑徳大学教授]

## ● 地学の先生がまとめた日本列島の歴史

山賀 進 著

### 科学の目で見る日本列島の地震・津波・噴火の歴史

評者 中川和之

私立の中高一貫校で長く地学教師を務めた筆者が、理科年表に掲載されている地震や津波、噴火について、地震調査研究推進本部や内閣府、気象庁などのデータなども使って、歴史を追って分かりやすくまとめた本である。

0章が基礎知識、1章が江戸時代の前まで、2章が主に江戸時代、3章が明治から戦争直後、4章が戦後から20世紀、5章が21世紀で、3章以降の近現代が半分以上という構成になっている。写真や絵図、地図、イラストなども使い、歴史を追って順に紹介するだけでなく、その後の調査研究にとってエポックメイキングだった事象についても触れている。少なからず、科学的に未解明が多いことを詳しく紹介しているのも特徴だ。

章別に見ると、「地震と火山が多い日本の基礎知識」

と題した0章は、プレートテクトニクスから、地震や津波、火山の特徴とともに、破局噴火にも触れている。そのうえで、温泉や地形景観だけでなく、豊かな農地や熱水鉱床なども地震や火山の恩恵として、日本列島そのものが「プレートの沈み込みの賜物、すなわち地震や火山の賜物」とした。

1章では、貞観の富士山噴火や貞観地震、南海トラフの地震を取り上げたほか、天正地震について複数説を紹介している。慶長豊後地震で消滅したとされる瓜生島伝説については7ページにわたって解説している。慶長伊予地震、慶長伏見地震も併せて3つの地震が起きたことについて、「詳しいことは分からない」と書いている。

2章では、1605年慶長地震について、南海トラフ説、海底地すべり説を取り上げ、慶長三陸地震も複数説を紹介している。1677年の三陸や房総沖の地震についても、推進本部のプレート境界型地震の説も取り上げながら、他の解釈も加えている。

明治以降の3章では、お雇い外人が驚いて世界初の地震学会が作られるきっかけになった1880年の横浜地震や、1891年の濃尾地震に多くの研究者が集結したことも紹介している。気象庁の地震観測の経緯や、震災予防調査会の設立から解散までも触れている。大森房吉と今村明恒についても、関東地震だけでなく、津波の起き方の解釈の違いも触れている。4象限型のP波初動分布が観測され、地震のメカニズム解明につながるきっかけとなった1917年静岡県西部地震(M6.3)も紹介している。戦前戦後の南海トラフの地震や三河地震を取り上げる中で、琉球海溝までを含めて震源が1,000kmに及ぶ可能性を指摘した学説も書いている。

戦後は、新潟地震での液状化、日本海中部地震や北海道南西沖地震の日本海での津波、兵庫県南部地震の震災の帯を紹介している。5章は、東北地方太平洋沖地震に14ページ、熊本地震に8ページを割いて詳述している。最後に、参考となる主なサイト一覧も掲載している。

<ベレ出版、2016年7月、A5判、303ページ、1,700円+税>

[なかがわ かずゆき 時事通信社解説委員]

## ●新刊紹介

國生剛治・大塚康範・堀 宗朗 監修；地盤工学会・日本応用地質学会・日本地震工学会 編

### 活断層が分かる本

技報堂出版、2016年9月、B6判、164頁、1,512円

河野太郎 著

### 地震・台風・土砂災害・洪水から家族を自分で守る防災完全マニュアル

講談社、2016年9月、B40判、207頁、842円

秦 吉弥・野津 厚 著

### 被害地震の揺れに迫る

大阪大学出版会、2016年9月、A5判、93頁、3,132円

日本地質学会「海洋底科学の基礎」編集委員会 編

### 海洋底科学の基礎

共立出版、2016年9月、B5判、398頁、6,804円

東日本大震災合同調査報告書編集委員会

### 東日本大震災合同調査報告<土木編1> 土木建造物の地震被害と復旧

土木学会、2016年9月、B5判、257頁、6,480円

井芹昌信 著

### 熊本地震体験記 震度7とはどういう地震なのか? 震災ドキュメント

インプレス R&D、2016年10月、A5判、116頁、864円

熊本日日新聞社

### 熊本地震連鎖の衝撃—2016・4・14 4・16(2版)

熊本日日新聞社、2016年11月、A5判、215頁、1,500円

NHK スペシャル取材班 著

### 震度7何が生死を分けたのか一埋もれたデータ21年目の真実

ベストセラーズ、2016年11月、B6判、212頁、1,544円

岩崎義郎 編著

### 安政地震と幕末の世相 抜き読み真覚寺日記

リーブル出版、2016年11月、A5判、338頁、1,500円

ワン・ステップ 編；海洋研究開発機構 協力

### 深海のふしぎ—海深くから地球のなぞにせまる 楽しい調べ学習シリーズ

PHP 研究所、2016年11月、A4判、47頁、3,240円



仲西宏之・佐藤和彦 著

**震度7の生存確率**

幻冬舎, 2016年12月, B6判, 293頁, 1,500円

遠田晋次 著

**活断層はどこまで予測できるか—日本列島で今起きていること**

講談社, 2016年12月, 新書判, 262頁, 1,036円

日経サイエンス編集部

**大地震と大噴火—日本列島の地下を探る 別冊 日経サイエンス**

日経サイエンス社, 2016年12月, A5変判, 127頁, 2,160円

日本建築学会 編

**東日本大震災合同調査報告総集編**

日本建築学会, 2016年12月, B5判, 489頁, 10,800円

日本建築学会 編

**2015年ネパール・ゴルカ地震災害調査報告書**

日本建築学会, 2016年12月, A4判, 381頁, 9,000円

堀江 博 著

**地下ガスによる液状化現象と地震火災**

高文研, 2017年1月, A5判, 255頁, 2,484円

井出 哲 著

**絵でわかる地震の科学 絵でわかるシリーズ**

講談社, 2017年2月, A5判, 192頁, 2,376円

松田准一 著

**地震・火山や生物でわかる地球の科学 阪大リーブル59**

大阪大学出版会, 2017年2月, B6判, 244頁, 1,728円

末広 潔 著

**海洋地震学**

東京大学出版会, 2017年2月, A5判, 252頁, 5,184円

畑中章宏 著

**天災と日本人—地震・洪水・噴火の民俗学 ちくま新書**

筑摩書房, 2017年2月, 新書判, 251頁, 885円

鎌田浩毅 著

**地学ノススメ 日本列島のいまを知るために**

講談社, 2017年2月, 新書判, 288頁, 1,058円

岡村健太郎 著

**「三陸津波」と集落再編—ポスト近代復興に向けて**

鹿島出版会, 2017年2月, A5判, 345頁, 4,644円

帝国書院編集部 編

**わかる! 取り組む! 災害と防災<1>—地震**

帝国書院, 2017年2月, A4変判, 63頁, 3,240円

帝国書院編集部 編

**わかる! 取り組む! 災害と防災<2>—津波**

帝国書院, 2017年2月, A4変判, 55頁, 3,240円

レスキューナウ 編 目黒公郎 監修

**震災から身を守る52の方法 (改訂版)**

**大地震・火災・津波に備える**

アスコム, 2017年3月, A5判, 156頁, 864円

金田義行 著

**地球と生きる—災害と向き合う知恵**

富山房インターナショナル, 2017年3月, B5判, 64頁, 1,944円

☆「地震ジャーナル」にご寄稿いただいた方々へ☆

## 「地震ジャーナル」全号電子アーカイブ化に伴う 著作権委譲に関するお願い

「地震ジャーナル」編集委員会委員長 岡田義光

公益財団法人地震予知総合研究振興会は、1986年の創刊以来、機関誌「地震ジャーナル」の刊行を31年の長きにわたり続けて参りました。これも、ひとえに読者各位ならびにご寄稿をいただいた多くの方々のご支援、ご協力の賜物と深く感謝いたしております。

当振興会の公益法人への移行に伴って、本誌は51号より購読料を無償化するとともに、誌面を電子データ化し、インターネットへの公開を開始いたしました。なお、それ以前の1号～50号については、現在、目次のみをウェブ公開しておりますが、このたびこれらについても誌面の電子データ化を行い、準備ができれば公開することにいたしました。

この電子アーカイブ化にあたっては、著作権法により、掲載された論文などの著者からその著作権（複製権、公衆送信権を含む）行使の許諾または譲渡が必要となります。

これまで、本誌の寄稿規定は、掲載論文などに関する著作権の問題が明確にされていない状態となっておりました。このため編集委員会では、このたび同規定を改訂し、ご寄稿いただいた論文などの著作権は当振興会に帰属することを定めると同時に、著作権規定（次頁）も新たに整備いたしました。

これらの事情から、本電子アーカイブ化を進めるにあたり、今回の寄稿規定改訂および著作権規定制定以前の著作についても、著作権を当振興会に委譲していただくことといたしたく、お願い申し上げます。

万一、この件に関しましてご了承いただけない場合、あるいはご不審の点がある場合は、2017年9月30日までに下記事務局あて文書または電子メールにてお申し出ください。このお知らせは著者の皆さまの目に触れることを前提としておりますが、何らかの事情でこの件をお知りになる機会がなかった場合には、期限を過ぎましても、あらためて個別にご相談させていただきたく所存です。

なお、お申し出のない場合にはご了承いただけたものとし、電子アーカイブとして公開する時期がまいました段階で論文などを掲載させていただきたいと存じます。

「地震ジャーナル」事務局 連絡先

〒101-0064 東京都千代田区猿樂町1-5-18 公益財団法人地震予知総合研究振興会

「地震ジャーナル」事務局

E-mail okada@8f.ade.or.jp

TEL 03-3295-1966 FAX 03-3295-3136

## 「地震ジャーナル」著作権規定

- 第 1 条 この規定は、公益財団法人地震予知総合研究振興会（以下「振興会」という）が発行する「地震ジャーナル」に掲載された論文、記事等の著作物（以下「著作物」という）の著作権について規定するものである。
- 第 2 条 「地震ジャーナル」に掲載された著作物の著作権（著作財産権、copyright）は、特別の断りがない限り、振興会に帰属する。
- 第 3 条 2017 年 4 月 1 日よりも前の期間に発行された「地震ジャーナル」に掲載された著作物の著作権は著者に帰属するが、著者は次の 3 項について振興会に承認を与えるものとする。
- (1) 学術目的のため、該当する著作物の全部または一部を複製し、公衆送信すること。
  - (2) 学術目的のため、第三者に著作物の全部または一部の引用・複製を許諾すること。
  - (3) 上記の行為により収入がある場合は、この収入を振興会の運営費用に充てること。
- ただし、上記について承認しない旨申し出があった著作物については、これを適用しない。
- 第 4 条 著作物の一部あるいは全部を複写、引用、転載する場合は、第 5 条及び第 6 条に定める場合を除いて、事前に振興会の許可を得るものとする。
- 第 5 条 著作物の一部あるいは全部を研究、教育、普及等の非営利目的のために複写、引用、転載する場合には、振興会の許可を必要としない。ただし、その場合には、当該著作物の出典を明示しなければならない。
- 第 6 条 著者が、研究、教育、普及等の非営利目的で著作物の一部あるいは全部を複写、引用、転載する場合には、これを妨げない。
- 第 7 条 著作権の行使にあたっては、振興会は、著作者人格権に十分留意するものとする。
- 第 8 条 この規定を改廃する場合は、地震ジャーナル編集委員会の承認を得て行うものとする。

「地震ジャーナル」編集委員会

# ADEP情報

公益財団法人 地震予知総合研究振興会 (ADEP) の人事異動について

## 会長の就任

平成 29 年 3 月 27 日に開催された臨時理事会において、平成 29 年 4 月 1 日付けで金沢理事が会長に選定されました。

会長 (代表理事) 金沢 敏彦 東京大学 名誉教授 29. 4. 1

## 顧問の委嘱

顧問 長谷川 昭 東北大学 名誉教授 29. 4. 1

## 採用

Panayotopoulos Yannis 本部 地震防災調査研究部 副主任研究員 29. 4. 1

関根 正夫 本部 事務局 参事 29. 4. 1

## 退職

平田 文利 本部 事務局 参事 29. 3. 31

柳沢 里子 本部 地震防災調査研究部 課長代理 29. 3. 31

本多 亮 東濃地震科学研究所 副主任研究員 29. 3. 31

檜森 茂 つくば観測技術センター 主任研究員 29. 3. 31

岡上 幸嗣 つくば観測技術センター 主任研究員 29. 3. 31

## 配置換等

古村美津子 地震調査研究センター 解析部長代理 (昇任) 29. 4. 1

## 編集後記

今号では、最近発生した顕著な地震や、珍しい地震活動に焦点をあてている。

2016 年にはわが国で震度 6 弱以上を記録する地震が 10 回の多きに達した。そのうち 7 回は熊本地方で 4 月 14 日から 16 日にかけて発生したもののだが、残る 3 つは 6 月 16 日北海道内浦湾の地震、10 月 21 日鳥取県中部の地震、そして 12 月 28 日茨城県北部の地震である。

このうち、内浦湾の地震は、熊本周辺で活発な地震活動が尾を引いているなか、やや意表を突く形で北海道南部を襲った。また、茨城の地震は 2011 年東北地方太平洋沖地震の余震活動の一環とされている。

一方、2016 年に日本周辺で発生した M7 級の地震は、4 月 16 日熊本地震 (M7.3) と 11 月 22 日福島県沖の地震 (M7.4) の 2 つであった。後者は、東北地方太平洋沖地震以降で最大となる 1.4m の津波を仙台湾にもたらしたが、津波避難に関するいくつかの新たな課題もわれわれに投げかけた。

次に国外に目を向けると、2016 年 9 月 3 日に米国オクラホマ州で M5.6 の地震が発生し、オイルシェール採掘との関連が疑われた。また 9 月 12 日には韓国慶州で M5.8 の地震が発生し、韓国の観測史上最大の地震となった。

本号では、以上の内浦湾の地震、鳥取県中部の地震、福島県沖の地震、オクラホマの地震、韓国慶州の地震について、それぞれの事情に詳しい先生方に解説記事をお願いした。

このほかには、1855 年安政江戸地震時の川越における被害について、上武大学の新井先生よりご寄稿をいただいた。江戸地震とはいっても、被害は当然周辺地域にまで広がっており、このように地道な調査は貴重である。

さて、別掲記事でお知らせしているとおり、当振興会では「地震ジャーナル」全号のウェブ公開を行う準備を現在進めており、その一環として、過去のジャーナルに寄稿していただいた方々に著作権委譲のお願いをさせていただいている。

1 号～62 号の記事に関係された執

筆者数は約 440 名にのぼり、そのうち 60 名を超える方々がすでに故人とされている。また、約 20 名については消息がとだえ、連絡がとれない。あらためて本誌の歴史の長さを感じさせられた。(Y.O.)

## 地震ジャーナル 第 63 号

平成 29 年 6 月 20 日 発行

発行所 ☎101-0064  
東京都千代田区猿樂町 1-5-18  
☎ 03-3295-1966  
公益財団法人

### 地震予知総合研究振興会

発行人 金沢敏彦

編集人 岡田義光

本誌に掲載の論説・記事の一部を引用される場合には、必ず出典を明記して下さい。また、長文にわたり引用される場合は、事前に当編集部へご連絡下さい。

●製作/一般財団法人学会誌刊行センター