

日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

No.20

Oct.2013

特集：過去に学び、未来に備える

(1) 首都直下の大地震を考える



<http://www.jaee.gr.jp/>

公益社団法人 日本地震工学会

Japan Association for Earthquake Engineering

〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館

Tel:03-5730-2831 Fax:03-5730-2830

日本地震工学会誌 (第20号 2013年10月)

Bulletin of JAEE (No.20 October.2013)

INDEX

巻頭言：

特集「過去に学び、未来に備える」の連載と

- (1) 「首都直下の大地震を考える」について／久田 嘉章 1

特集：過去に学び、未来に備える (1) 首都直下の大地震を考える

- 安政江戸地震の被害と震源／中村 操、松浦 律子 2
- 関東大震災90周年にあたって思うこと／武村 雅之 8
- 首都圏の地震の姿／平田 直 12
- 首都直下のプレート構造と想定される地震像／遠田 晋次 18
- 求められる都市・建築の総合的地震対策
～東日本大震災における振動被害の実態と教訓を踏まえて～／源栄 正人 24
- 耐震設計における設計地震動評価の課題／川島 一彦 29

シリーズ：TOHOKUナウ 復興に向けて(2)

- 防潮堤とまちづくり／平野 勝也 35

学会ニュース：

- ジョン・ミルン展での特別イベントの報告／齊藤 大樹 37
- 関東地震90周年記念シンポジウム—過去に学び、未来に備える—／加藤 研一、福喜多 輝 39
- 日本地震工学会刊行物案内 41
- 本学会に関する詳細はWeb上で／会誌への原稿投稿のお願い／問い合わせ先 42

編集後記

特集「過去に学び、未来に備える」の連載と (1)「首都直下の大地震を考える」について

久田 嘉章

●会誌編集委員会 委員長／工学院大学 教授

1. はじめに

2005年1月に創刊した本会誌は、今回で20号を迎えることになりました。今年度から年2号から3号に増刊し、よりタイムリーで話題性ある情報を提供させて頂きたいと考えています。本会誌では創刊から特集を掲載していますが、今回から連載として「過去に学び、未来に備える」を主題とし、第1回の特集は「首都直下の大地震を考える」とさせて頂きました。

2. 特集「過去に学び、未来に備える」

2011年東北地方太平洋沖地震は、事前に想定できなかったM9という超巨大地震であり、理学での地震の長期評価は従来の固有地震モデルから震源域の多様性を考慮する方向に大きく変化しています。多様性ある地震には南海トラフのM9地震や相模トラフのM8.7地震のように前例のない最大級の地震も含まれ、現行の耐震設計の安全限界レベルを凌駕する想定地震動も公開されています¹⁾²⁾。一方、社会が建物や土木施設等に要求する耐震性能レベルは、従来の命さえ守れば良いという最低限度のレベルから、震災後に事業や生活が速やかに再開できるレベルへと高くなっています。工学分野では、この大きな課題への早急な対応が求められているのが現状だと思えます。

一方、今年には1923年関東地震 (M7.9) から90周年になります。さらに、主として津波で3000名を超える犠牲者を出した1933年昭和三陸地震 (M8.1) の80周年、活断層による強い揺れで1000名以上の犠牲者を出した1943年鳥取地震 (M7.2) の70周年、やはり主として津波でそれぞれ100名と200名を超える犠牲者を出した1983年日本海中部地震 (M7.7) の30周年、1993年北海道南西沖地震 (M 7.8) の20周年になります。今後の震災対策を進める上で、最新の研究成果と併せて、これら貴重な過去の教訓から学び、地域特性に応じた適切な準備を行うことが求められています。

以上の背景を鑑み、今回の特集では「過去に学び、未来に備える」を主題として、全国各地での最新の研究成果に加え、重要な過去の震災からの教訓をとりあげます。まず第1回では「首都直下の大地震を考える」としました。2回目以降は適宜、南海トラフの巨大地震、活断層、日本海東縁部・西部の地震、千島・日本

海溝の巨大地震をとりあげ、過去の地震や最前線の対策、最新の研究成果等を紹介したいと考えています。

3. 特集：(1)「首都直下の大地震を考える」

首都直下は中枢機能が集中する最も重要な地域ですが、3つのプレート構造が複雑に重なり、将来の大地震と被害の想定や対策を考える上で最も困難な地域の一つです。今回の特集では、まず過去の重要な震災として、首都直下地震である1855年安政江戸地震 (中村・松浦氏) と、相模トラフの巨大地震である1923年関東大震災 (武村氏) の教訓をとりあげました。次に首都直下の複雑なプレート構造と震源モデルに関する最新の研究成果として、二つの異なるモデルを紹介し、良く知られているモデル (関東平野深くまでフィリピン海プレートが沈み込んでいるモデル、平田氏) に加え、これとは全く異なるモデル (遠田氏) も紹介しています。どちらが正しいかは今後の研究に期待するしかありませんが、単純ではない首都直下の地震像の一端が理解できます。最後に建築・土木分野から、東日本大震災を経て今後の設計用地震動や耐震設計、震災対策を考える上での重要な教訓や課題を紹介して頂きました (源栄氏、川島氏)。

4. おわりに

今後の連載に向け、皆様のご意見や寄稿を期待しています。今後ともご支援をよろしくお願いいたします。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部：南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版)、2013.5
- 2) 防災科学技術研究所：長周期地震動予測地図作成支援事業 (平成24年度 成果報告書)、2013.3



久田 嘉章

1984年早稲田大学卒業後、同大修士・助手、南カルフォルニア大学助手、工学院大学専任講師・助教授を経て、現職。工学博士、専門は地震工学・地震防災

安政江戸地震の被害と震源

中村 操

●株式会社 防災情報サービス 代表取締役

／松浦 律子

●(公財)地震予知総合研究振興会 地震調査研究センター 解析部 部長

1. はじめに

安政江戸地震は、安政二年十月二日夜四ツ時（1855年11月11日午後9時20分頃）発生し、江戸市中（千代田区、中央区）を中心に関東一円に地震被害をもたらした地震である。宇佐美（2003）¹⁾は震央を震度VIの区域の中心とし東京湾北部に、また地震の規模はM7.0～7.1としている。松浦・他(2008)²⁾は震央を東京湾北端から千葉県北西部で、深さは70km程度、規模はM7.0程度と推定している。また、遠田（2012）³⁾も関東直下地震帯の南端（千葉県北西部）のやや深い位置を考えている。一方、古村（2005）⁴⁾は地球シミュレータを用いた震度計算の結果が、震源を東京湾北部の浅い地震とすると、実際の震度分布の減衰の形状とよく合うとしている。

歴史地震学では、被害が出始める震度4.5以上の揺れを解析の対象としており、地震史料から建物の潰れ、地変などを読み取り、震度へと変換する。震度は気象庁の震度階級（気象庁、1978）⁵⁾に沿うように定義され、推定には「地震の震度階級解説表」⁶⁾を基本としている。実際には、史料中に頻繁に現れる表現にも適応できるよう拡張した「震度判定表」⁷⁾を使用している。

歴史地震の震度は、気象庁の計測震度が提案される以前から使用しているので、それまでの成果との連続性を考え、現在もそのまま続けている。また、震度5.0は計測震度の5弱とは少し異なる。震度5.0は5を中心に0.25位の幅を持つと考えており、計測震度の5弱（4.5～5未満）とは同じにはならない。5.5や6.0についても同様である。

震度を推定すると、その位置を探すことになる。それらの位置は、切絵図（尾張屋清七板、近江屋五平板等）を元に『江戸復元図』⁸⁾、『復元江戸情報地図』⁹⁾などを介して現代の区、町に対応づけている。

2. 建物被害と震度

2.1 江戸市中の被害と震度

町方の総倒潰家数は14,346軒、1,727棟、

また土蔵は1,400棟が潰れた。町方番組（町方の行政上の単位）^{付録参照}ごとの倒潰家数は、隅田川より東の墨田区、江東区（本所、深川）に際立って多い。16番組2307軒、17番組4903軒、18番組3415軒である。総家数が知られていないので、倒潰率を示すことができないがかなりの数である。一方、中央区の日本橋より京橋、芝口までの4番組42軒、3棟、5番組66棟、6番組6棟と潰家数が少なく、17番組、18番組とは大きな開きがみられる。潰土蔵についても同様である。総家数が分からないので詳しい議論はできないが、日本橋、京橋の揺れは本所、深川より明らかに小さかったものと考えられる。

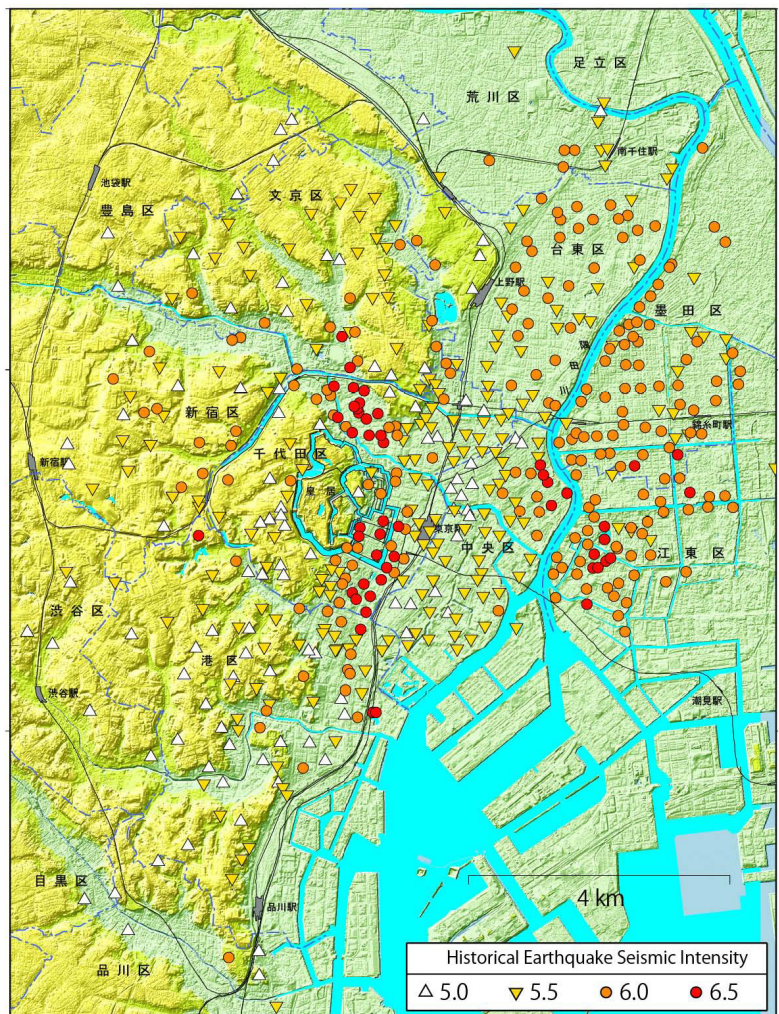


図1 江戸市中の震度分布図。武蔵野台地、谷底低地、埋立地および東京低地で震度が異なる

次に震度推定の重要な材料となった武家史料によって、被害の一部を見てみよう。現在の町名、屋敷名など、「被害記述」、(『出典』)の順で示している。なお、本文と区別が付きやすいよう、オリジナルの史料を太字体で示す。それらをまとめた江戸市中の震度分布図を図1に示す。

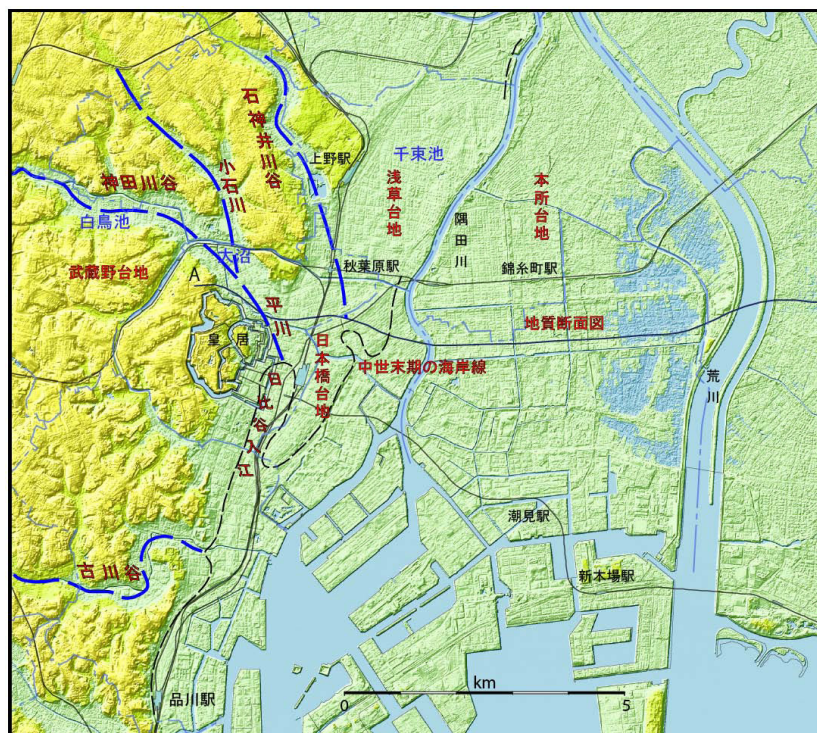


図2 江戸市中と周辺の地形。昔の石神井川、平川、古川と、中世末期の海岸線の位置を太い波線と細い破線で示した。図中の“地質断面図”と表示された部分は図3の断面図の位置を示す。

武蔵野台地上の被害

千代田区永田町一丁目(憲政会館付近)、井伊掃部頭上屋敷(彦根藩)「北御長屋後御高塀七八間・拾間計、御屋敷内二而中道通り御高塀拾間計、交代御長屋前御高塀八間計等相倒レ、御作事方御役所捻レ壁等損し有之」(『江戸詰内目付用状』)とある。井伊家屋敷では、高塀の倒れや作業部屋の壁の落下の被害で済んだ。震度5.0程度であった。

谷底低地上の被害

千代田区三崎町には松平讃岐守中屋敷(高松藩)があった。「中屋敷長屋五棟潰申候、同拾三棟転掛申候、御嫡子様 宮内大輔住居玄関始其余不残大破仕候、建家九棟潰申候」(『御届御差出の写』)。

千代田区神田神保町、榊原式部大輔上屋敷(高田藩)「右は去ル二日夜亥之刻頃大地震ニ而、御上屋敷御書院并御目付部屋辺ヨリ御台所、御広式等皆潰、其外不残大破」(『高田日記』)とある。このように、松平讃岐守中屋敷、榊原家上屋敷などでは書院、住居、長屋

などの全潰やそれに近い状況であった。いずれも震度6.5の強い揺れであったと推定される。

埋立地の被害と震度

日比谷入江の埋立地の被害を次に示す。千代田区丸の内、増山河内守上屋敷(伊勢長島藩)「御玄関御書院并表御座敷向不残潰、御住居向不残潰、東之方表長屋壱棟半潰・大破、其外御長屋向不残潰」(『奉札留』)。

千代田区日比谷公園、朽木近江守上屋敷(福知山藩)「住居向不残潰、表門東之方長屋大破、同西之方長屋不残潰、同長屋二棟大破、其外長屋向不残潰、土蔵六棟之内二棟潰、四棟大破」(『奉札留』)とある。

増山河内守屋敷他では住居、長屋ともに潰れ、大破であった。他の屋敷の被害状況も踏まえると、震度6.5と推定される。

東京低地の被害と震度

東京低地は日本橋台地(埋没)、浅草台地(埋没)そして本所台地(埋没)(図2参照)では被害程度が大きく異なる。日本橋台地(埋没)の被害を次に示す。千代田区司町、斉藤月岑(雉町名主)「おのれが家はさせる痛なし、これは板葺きにて瓦を上げる故、且普請の新しきと地震のよはきなり、揺止て後も行燈の火も消えずしてあり」(『安

政乙卯武江地動之記』)。

浅草台地(埋没)では、台東区東上野、浅草新寺町「東本願寺御堂は破損ながら恙なく、うら門倒地中潰れ寺院多し(中略)新寺丁寺院所々潰れ、誓願寺報恩寺無事也」(『地震並出火細見記』)とある。

本所台地(埋没)の被害を次に示す。墨田区横綱、松平伯耆守下屋敷(丹後宮津藩)「本所石原大川端御下屋敷破損所左之通 御住居向不残半潰、内御台所壱ヶ所潰、御門番所大破、表通御土蔵貳ヶ所潰、内御長屋壱棟半潰、同四棟大破」(『奉札留』)。震度は順に、5.0、6.0そして6.5程度と推定される。

2.2 地方の被害と震度

江戸以外では、埼玉県、千葉県そして神奈川県で潰家などの被害が見られた。茨城県、栃木県、群馬県での被害は局部的であり、大破程度のものが多かった。

埼玉県幸手市では村々で潰家が多くあったことが、『大地震ニ付潰家其外取調書上帳』に詳しく記録され

ている。被害率から推定すると、震度5.0～5.5程度となるが、液状化によって地盤が傾き、家屋が潰れた可能性があるため、震度5.0でよいのかも知れない。

千葉県松戸市松戸・本町、松戸宿「松戸宿 潰家三拾三軒、半潰家四拾八軒、潰寺三ヶ寺、鎮守境内 潰拝殿壹ヶ所 並石垣燈籠石鳥井共、潰堂四ヶ所」(『地震に付潰家其外書上帳』)。松戸宿では潰家が38軒もあり、「潰寺三ヶ寺」とある。震度6.0はあったものと考えられるが、隣の小金井宿は被害なしという。地盤に差があったのであろう。

川崎市川崎区本町、川崎宿「南の方、東海道品川宿 強く、川崎宿ハゆるく、神奈川宿甚強く潰れ家多し、夫より小田原を限る」(『地震並出火細見記』)とある。

また、横浜市神奈川区東神奈川、神奈川宿「合九拾四軒 内皆潰三拾九軒、半潰五拾五軒、前書之通地借・店借・門前地之者共皆潰家・半潰家ニ罷成候間」(『大地震ニ付地借店借門前地小前書上帳、東海道神奈川宿』)とある。江戸市中から遠くない川崎宿の被害が小さく、神奈川宿で皆潰39軒、半潰55軒あった。震度は前者で5.0、後方で6.0と推定できる。

地震の影響は小田原が西端であるようだが、具体的な損傷についての記録は残されていない。

3. 震度と地盤の関係

江戸市中と周辺地盤の概要

被害の大きかった江戸市中とその周辺域の地形を図2に、そして東京低地部分の地質断面を図3に示した。西に武蔵野台地が位置し、その東に東京低地が広がる。

武蔵野台地は8～10万年前に形成され、下部は砂や砂礫などで構成され、N値は20以上と高い。地表には関東ローム層が3～7mの厚さで堆積し、N値は1～4である。

武蔵野台地を開析して延びる谷底低地は、石神井川谷、小石川谷、神田川谷そして古川谷を形成した。中世までの神田川は中流域で白鳥池を作り、小石川と合流し大沼となり、さらに平川と名称を変え日比谷入江に注いでいた。徳川家康江戸入府後、日比谷入江、大沼そして平川は一部を残し埋め立てられた。

東京低地の地表面は平坦であるが、地下の構造は複雑で、それぞれ深度の異なる古東京谷や埋没台地を内包する。日本橋台地、浅草台地、本所台地であり、これら埋没台地上にはN値の小さい粘土やシルトからなる沖積層が存在し、場所によってその厚さが異なる。

本所台地上には30～40mの沖積層が存在するのに対し、日本橋台地や浅草台地は5m前後と薄い。これら埋没台地の生成過程については、貝塚(1979)¹⁰⁾、松田(2009)¹¹⁾を参照されたい。

江戸市中の揺れの強さと地盤の関係を見ることにする。推定した震度(図1)と地形(図2)を比較する。

武蔵野台地の広がる文京区、新宿区、千代田区そして港区では、震度5.0、5.5が広く分布し、一部に震度6.0が見られる。そこは、小規模な谷地形を埋めて住居にした可能性がある。

谷底低地の一つ、神田川谷の白鳥池では震度6.0、下流の大沼では震度6.5の揺れであった。また、小石川谷の文京区春日一丁目(文京区役所付近)や後楽(後

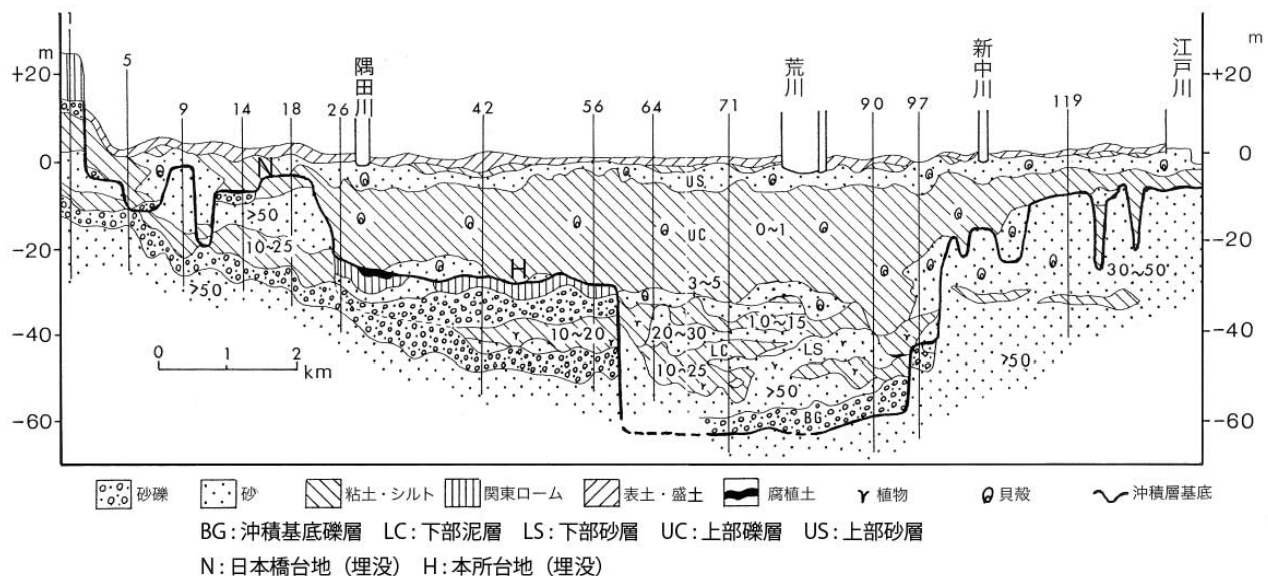


図3 東京低地の沖積層地質断面。[松田(2006)に一部追加]。首都高速七号小松川線と地下鉄都営新宿線の建設の際に行われたボーリング資料を合成して作成された

楽園)でも同様の揺れであった。河川には急傾斜区間と緩傾斜区間があり、白鳥池は前者に、大沼は後者区間に対応し、シルトが厚く堆積したためと考えられる。

日比谷入江の埋立地は丸の内、皇居外苑、日比谷公園そして新橋二丁目に続く一帯で、震度6.5の揺れであった。日比谷入江は新橋二丁目から、浜離宮の西側をとおり、江戸湾へと続いていたと考えられるが、この一帯の震度は5.5～6.0と、大きな揺れとはならなかったようである。その理由については不明である。

日本橋台地(埋没)は江戸の前島と呼ばれ、震度5.0～5.5と東京低地では最も揺れの小さい地域であった。地質断面(図3)のボーリングNo.14、No.18が前島に対応する。浅草台地(埋没)は震度5.5～6.0とわずかではあるが日本橋台地(埋没)より揺れが大きい。中世には千束池などもあり、そこを埋め立てた土地であることがその理由と考えられる。

本所台地(埋没)は隅田川の東に位置する全域で震度6.0以上の揺れがあった。一部に震度6.5の地点もあった。本所台地(埋没)の上にはN値の極めて低いシ

ルト層が20～30m堆積し、さらに上部有楽町層が分布する。この状態が揺れを大きくした原因と考えられる。

4. 地震の規模と震源位置

震度分布を細かく見ると、震度6以上の領域は東京東部にのみ広がり、他は千葉県松戸市と神奈川県横浜市に局地的に存在するだけである。また、震度5.5および5.0の中心が東京湾北部にあることから、震央は荒川河口付近と考えられる。震度5.0の範囲の外縁が藤沢市あるいは取手市藤代であるとする、震央距離は前者で45km、後者で50kmとなる。震度5.0の面積Sと規模Mの関係^{12), 13)}の経験式から規模を推定すると、M 6.9～7.1となる。

地震の体験記に、P波とS波の到着に5～10秒くらいの差があったと推定できるものが多いことから、震源の深さはやや深く、30～50kmと考えられる。この深さはフィリピン海(PHS)プレート内に相当する。

また震源を千葉県北西部の深さ70kmのPHSプレートと太平洋(PAC)プレートの境界とする考えは、東日本太平洋岸に細長く延びる異常震域を示す広域の震度分布(図4)と調和的である。ここを震源とする地震では、神奈川県川崎市、横浜市で強めの震度となる傾向がある(例えば2005年7月23日M6.0)。しかし、江戸地震の強震域に相当する千代田区、文京区、墨田区そして江東区での大きな揺れから震源はPHSプレート内とする考え方も依然としてある。この地震で津波がなかったことは、どちらの震源であっても説明できる。

南関東の大地震による被害は地盤の影響が大きく、震源の特性がぼやけるために安政江戸地震のように史料が多い地震であっても、震源が決まり難い。逆に震源に関わらず取るべき対策には地盤条件を真っ先に考慮すべき地域であると言える。

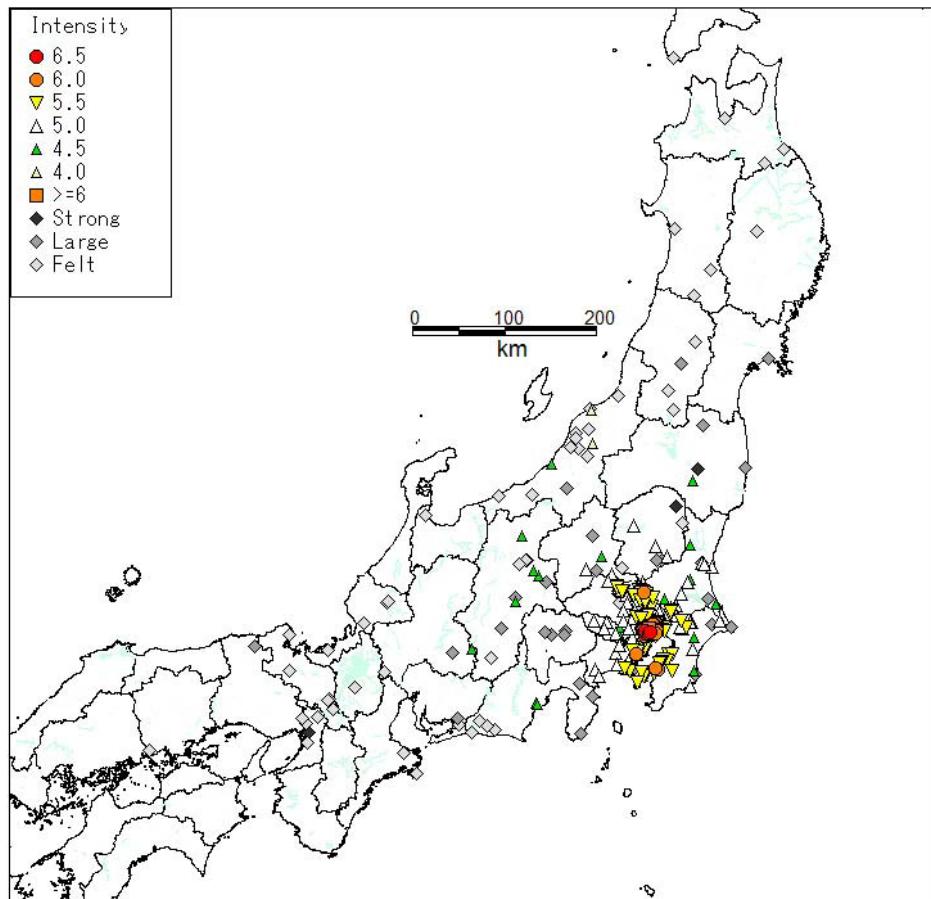


図4 安政江戸地震の各地での推定震度分布図。江戸藩邸等江戸市中の状況などとは別に実際に現地での揺れを推定できる情報だけを用いて各地の震度を推定してある

5. 震度以外の情報

余震

十月二日四ツ時の本震の後、数多くの余震が発生したことを古記録が示している。『十月一ヶ月地震之記』（『別巻 藤岡屋日記』）には地震の発生を図にして示してある。この図は藤岡屋由蔵が観測したものではなく、ある大名家で記録されたものであるという。

図は丸の大きさと揺れの強さを、白黒で昼夜を示し、時も書かれている。二日の本震のあと翌朝までに9個の地震があり、六日と七日にやや大きな地震が発生している。ほぼ連日のように地震が続き、十月だけで昼28、夜52、計80の地震があったと記されている。地方の記録を見ると、十月二日の本震の後、群馬県太田市では「暁まで凡二十度もゆる」（『俊純日記』）とある。江戸市中の当日の騒ぎの中では、全ての余震は記録できなかったのであろう。また、七日夕方の地震について「入夜五半頃之大地震、二日之半分位震此後終日四五度ゆる由」（『俊純日記』）、新宿区神楽坂「七日の昼三四度、夜五ツ頃強き地震にて、二日に残りたる家潰れしもあり」（『安政乙卯地震紀聞』）とあり、大きな余震であったことがわかる。

また、十二日昼の地震を「強き地震あり」（『安政乙卯地震紀聞』）、「八時頃地震少しつよし」（『斎藤月岑日記』）という記録もあり、七日の余震ほどではないがそれに準ずるくらいの揺れがあったことがわかる。

以上のように二日の本震後、二日中に小さいが多くの余震があり、そして七日と十二日の二回の大きな余震があった。なかでも七日は最大余震であったものと考えられる。

火災

地震当日の気象は、午前中は小雨、午後には止んで夜にはわずかに風が吹いていた。旧暦二日の午後9時過ぎであることから、外は暗闇であった。地震直後に火災は30数箇所から発生した、とする記録がある。火災は翌日には消火された。斎藤月岑は独自に調査を行い「焼亡の場所江戸中武家地寺院市中を合て、凡長貳里拾九町の餘、幅平均にして貳町餘りと聞へたり。（中略）町方火元□（ママ）箇所なり。武家を合すれば五十ヶ所六十ヶ所にも餘あるへし」（『安政乙卯武江地動之記』）と記している。焼失面積はそのまま換算すれば2.15km²となる。

一方、町奉行・井戸対馬守の指示で、詳細な調査が十月四日から行われ、『安政地震消失図』として残されている。町奉行所の算出した焼失面積は3.8 km²であった。中村・他（2005）¹⁴は町奉行の行った調査図面の焼失区域を、現代の地形図上に写し取り、その面積

を求めている。消失面積は1.5 km²となり、この広さは東京ドームの32個分に相当する。

最も広く消失した区域は、台東区千束・浅草・花川戸町で、吉原はここに含まれる。千代田区大手町・丸の内地区、神田神保町が続く。江東区永代・門前仲町、森下・千歳、台東区上野なども広く延焼した。

江戸の前島に位置する京橋・銀座の揺れは大きなものでなかったにもかかわらず、広い区域が焼失した。調査図の焼失区域の数から、出火は40～50箇所と考えた方が自然である。

死者数

地震による死者数は、寺社奉行・太田撰津守家の家臣渡辺嘉彰の『公私日記』¹⁵によれば、十月二十九日時点で寺社から幕府に届けられた報告が武家2,193人、寺社25人、町方4,753人そして在方119人で合計7,095人となった。一方、町方の集計（『武江地動之記』）では4,297人とある。これに行方不明456人を加えると、4,753人となり『公私日記』の数字とよく合う。

北原・上田（1986）¹⁶、北原（2004）¹⁷は旗本、御家人合わせて17,400人に、家屋立て直しの救済金として約89,000両が渡されていることを示した。この数字は80%以上の幕臣層にあたる。旗本、御家人には家族や家臣、使用人もおり、それらの人々が居たにも関わらず、武家の死者2,193人は少なすぎると北原らは考えている。

しかし、災害時であっても、遺体の処理は寺社に頼ることになるであろう。寺社は処理した人数を寺社奉行に届けるのが通常であろうし、当然『公私日記』の数字に反映されたものと考えられる。相続などの関係で寺ぐるみ数年間伏せられた可能性が高い武家戸主の死亡者を例え上乘せしたとしても、この地震による死者総計は7,100人以上と考えられるが、確認はできない。

6. 江戸地震の経験が語るもの

安政江戸地震は都心直下の地震としては、最大の被害地震であった。その二人の経験者のエピソードを紹介しよう。まず、水戸藩上屋敷（現後樂園）は激しい揺れに襲われた。そこで、火災の発生を食い止めた女性がいた。女性の名は西宮秀、前藩主・水戸斉昭公の奥方に仕える立場の人物である。彼女は地震のすぐ後、周囲が落ち着くのを見計らい「御殿へ引き返し、お手あぶり、御あたため、火鉢など火の元危なく、そのまま御泉水へ投げ込み、金魚や緋鯉（ひごい）はふびんに思うけど、致し方ない」『落葉の日記』と、とっさの行動に出た。その結果、水戸藩上屋敷から火災は出さずにすんでいる。

町奉行所与力・佐久間長敬は『安政大地震実験談』で次のように当時を回想している。地震の時、自宅（現茅場町一丁目）に居た。地震動で三四尺も投げ上げられたと感じた。雨戸、障子、襖はガラガラと外れ、壁は落ちるが幸い家は潰れないですんだ。庭の土蔵は全ての土が落ち、柱のみで傾いていた。その後、家族の安否を確認し、南町奉行所（現有楽町駅前）に駆けつけた。そこには奉行・池田播磨守をはじめ当番与力、同心が陣取っていた。その後、奉行は評議の結果、次の9項目の対策を決め実行に移していった。

1. 罹災民へ焚出し握り飯を配布する
2. 宿なしになった者の収容に御救小屋を建てる
3. けが人の救療・手当をする
4. 日用品の確保を諸間屋に命ずる
5. 職人仲間惣代に地方から諸職人呼び集めさせる
6. 売り惜しみ、買い占めを禁ずる
7. 諸物価・職人手間の騰貴を禁ずる
8. 与力・同心に町中見廻・救助・取締まりをさせる
9. 町名主中に震災対策の掛りを申し付ける

南町奉行所、北町奉行所も、幸いに江戸の前島と称する日本橋台地上にあり、大被害に至らずにすんだ。このことが迅速な救済対策を実行できた理由であろう。御救小屋は十月四日の町触れをもって、浅草雷門前、幸橋門外そして深川海辺新田の3ヶ所に設置され、さらに2ヶ所が加えられた。

江戸のような過密都市では地震後に火災を出さないことが被害を大きく軽減する。また、救援の拠点となるべき施設は地盤の良い所にあるのが一番である。そして初動救援が順調に行われる時、人心は安定して復旧の速度も増す。我々が歴史地震に学ぶことは多いのである。

参考文献

- 1) 宇佐美龍夫：最新版 日本被害地震総覧 [416]-2001、東京大学出版会、pp171-182、2003.
- 2) 松浦律子、中村操、唐鎌郁夫：江戸時代の歴史地震の震源域・規模の再検討作業-1718年伊那の地震など8地震について、歴史地震、23、pp143、2008.
- 3) 遠田晋次：首都直下で想定される地震像について、第40回地盤震動シンポジウム資料集、pp113-117、2012.
- 4) 古村孝志：安政江戸地震の震源は深いか浅いか-地球シミュレータで再現した安政江戸地震の揺れと震度分布、地震ジャーナル、39、pp9-11、2005.
- 5) 気象庁：震度階級表、地震観測指針（観測編）、1978.
- 6) 東京都：地震の震度階級解説書、東京都総務局災害対策部、1980.
- 7) 中村操・松浦律子：1855年安政江戸地震の被害と詳

細震度分布、歴史地震、26、pp33-64、2011.

- 8) 東京都教育委員会：江戸復元図、1989.
- 9) 朝日新聞社：復元江戸情報地図、1994.
- 10) 貝塚爽平：東京の自然史、紀伊國屋書店、pp148-188、1979.
- 11) 松田磐余：江戸・東京地形学散歩 増補改訂版、災害史と防災の視点から、之潮、pp45-60、2009.
- 12) 村松郁栄：震度分布と地震のマグニチュードとの関係、岐阜大学教育学部研究報告、自然科学、4、pp168-176、1969.
- 13) 野澤 貴、尾崎伸治、神田 順：震度分布に基づく地震動距離減衰の評価、震度分布と地震のマグニチュードとの関係について、日本建築学会大会講演梗概集、pp335-336、1986.
- 14) 中村操、茅野一郎、松浦律子：安政江戸地震（1855）の江戸市中の焼失面積の推定、歴史地震、pp223-232、2005.
- 15) 奈倉有子：幕末掛川藩江戸藩邸日記-渡辺義彰『公私日記』一、清文堂史料叢書、74、pp5-6、1995.
- 16) 北原糸子、上田和枝：安政2年江戸地震における旗本屋敷の被害について、歴史地震、2、pp97-107、1986.
- 17) 北原糸子：1855年安政江戸地震報告書、災害教訓の継承に関する専門委員会、中央防災会議、pp57-59、2004.

付録

「町方番組」

町方の行政上の単位。一番組から二十一番組まであり、他に品川、吉原があった。一つの番組は10数町から150町程で構成され、名主は数人から25人程いた。安政江戸地震の被害数は番組ごとに集計されている。他に火消番組も存在した。



中村 操

1971年東京理科大学理工学部物理学科卒 専門は歴史地震学および地震工学 株式会社 防災情報サービス 代表取締役



松浦 律子

1986年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了 理学博士 天正地震以降現在までの地震活動の定量的解析が専門 歴史地震研究会副会長

関東大震災90周年にあたって思うこと

武村 雅之

●名古屋大学 減災連携研究センター 教授

1. はじめに

震災は地震が引き金となって人間が起こすもの、つまり震災の大きさは、地震側の条件もさることながら、人間側の条件の方がより重要な要素であるように思う。「人の力で地震の発生を抑えることはできないが震災を軽減することはできる」とは今村明恒をはじめとする多くの先人の遺訓である。つまり震災の軽減には地震を知るよりも被災する人間を知る方がより重要なように思えてならない。今年が関東大震災から90周年の節目の年である。関東大震災から見える人間に関する2つの事例についてまずは紹介することにしよう。

2. なぜ東京で？

関東大震災の死者約10万5千人のうち東京市の犠牲者は約6万9千人を数える¹⁾。関東大震災を引き起こした関東地震の震源域は相模トラフ沿いで神奈川県ほぼ全域と千葉県南部が震源断層の直上にあたる。なのに、被害は震源域から離れた東京市で最大であった。このことからして、震災は地震より人間に強く依存していると思わざるを得ないのである。

「なぜ東京で？」この疑問に答えるのに参考になる地震がある。1703(元禄16)年に発生した元禄地震である。この地震も大正の関東地震と同じく相模湾に震源をもつ海溝型地震であり、大正の地震の一つ前の関東地震であると考えられている。表1は元禄地震の被害集計²⁾、表2は関東大震災の被害集計¹⁾である。

まず、元禄地震で被害の大きい小田原藩領に注目すると、小田原が属する神奈川県の関東大震災による全潰数(または焼失数)や死者数は小田原藩領の被害に比べて圧倒的に多いが、これは元禄地震当時、開村だった横浜市の被害が死者数で81%、焼失数で86%、全潰数でも37%を占めているためである。ちなみに横浜の開港は1859(安政6)年で、元禄地震の150年余りも後のことである。そこで、表2では小田原藩領の大半を占めていたと思われる足柄下郡と足柄上郡の被害の合計値を示す。全潰数や死者数が、元禄地震の小田原藩領の被害とほぼ同じオーダーであることが分かる。この他、甲府領と山梨県、駿河・伊豆と静岡県の全潰数と死者数もほぼ同じオーダーであることが分かる。

一方で、被害数が明らかに異なるところもある。一

つは房総半島の被害で、元禄地震の方が関東地震の千葉県の被害に比べてはるかに多い。これは元禄地震の震源断層が外房沖まで伸びていたために、外房の津波が非常に高くなったため、つまり地震側の条件の差で説明がつくと考えられている。これとは逆に江戸の被害は関東大震災の東京市の被害と比べて非常に少ないことが分る。震源断層の形状や地震の規模から考えて、元禄地震における江戸と関東地震における東京とは同じような揺れに見舞われたと考えられ、震度分布もそのことを支持している³⁾。つまり両者で地震像は大変よく似ているのである。

もちろん、元禄地震は関東大震災から220年も前のことであり、史料の欠落によって江戸の被害を過少評価しているという可能性も否定はできないが、直後に火災も発生せず、幕府が江戸市民に救済令を出したという記録もない。また何より周辺部の被害が同等以上であることを考えるとやはりこの差は何か重要なことを意味しているように思われる。

そこで、元禄地震当時の江戸についてもう少し詳しく見てみることにする。まず人口であるが、江戸の人口については、町方人口はある程度分かるが、武家人口がはっきりしない。齊藤⁴⁾は江戸初期(1650年)から中期(1750年)、後期(1850年)の全国の都市人口を推定している。それに基づき1700年頃の人口を求めると約80万人となる。また、江戸の町触を編年集成した「正宝事録」(編者不詳)には注釈として、1693(元禄6)年の町方人口が35万3588人とある。武家人口を同程度とすれば総人口は約70万人となる。関東大震災の頃の東京市の人口は200万人強と言われているので、元禄地震当時すでに相当数の人が江戸で暮らしていたことになる。

次に、江戸の範囲であるが、江戸では1818(文政元)年に地図上に朱線を引いて御府内(朱引内)を定義し、同時にほぼそのすぐ内側に黒線(墨引)を引いて町奉行所が支配する範囲が定められた⁵⁾。その墨引の地域がのちの東京市15区にあたり関東地震当時の東京市の範囲となる。では元禄地震のころはといえば、1689年(元禄2年)に出された「江戸図鑑綱目」を見ると、その範囲はそれほど大きく変わっていないようであるが、隅田川の東の本所方面では黒釘(黒く塗られた状況)が目立ち未だに町名が刻まれていないところが多

表1 元禄地震による被害²⁾

地域	被害家軒数			死者数
	全潰	半潰	流家	
甲府藩	345	281		83
小田原藩	8007			2291
房総藩	9610		5295	6534
江戸府内	22			340
駿河・伊豆	3666	550	有	397
諸国	774	160	668	722
合計	22424	991	5963(+490)	10367

表2 関東大震災による被害¹⁾

府 県	被害世帯数			死者数				
	全潰数	焼失数	流失埋没	総数	全潰	火災	流失埋没	工場等の被害
山梨県	294	0	0	22	20	0	0	2
神奈川県	76209	72696	497	32838	5795	25201	836	1006
千葉県	13432	425	71	1346	1255	59	0	32
東京府	47623	311238	2	70387	3546	66521	6	314
静岡県	2205	3	601	444	150	0	171	123
埼玉県	3806	0	0	343	315	0	0	28
茨城県	16	0	0	5	5	0	0	0
合計	143293	384362	1171	105363	11066	91781	1013	1503
(うち)								
東京市	35350	300924	0	68660	2758	65902	0	0
横浜市	28169	62608	0	26623	1977	24646	0	0
横須賀市	7227	4700	0	665	495	170	0	0
足柄上・下郡	9280	3867	181	1624	800	157	532	135

い⁶⁾。隅田川に架かる橋も両国橋しかなく橋の周辺部だけがわずかに開けていたようである。本所が町奉行所の管轄支配下に入るのは1690(元禄3)年のことであり⁶⁾、深川はさらにそのあとであろう。地震までもう一本、新大橋が架けられるが、それにしても隅田川の東側にはほとんど人が住んでいなかったようである。

このように江戸の街が本所・深川まで広がっていなかった影響が、元禄地震による江戸の被害にどの程度の影響を及ぼしているかを見るために、次に関東大震災の東京市15区の被害に対して本所区と深川区の被害が占める割合を調べてみる。

表3は区毎の被害数を世帯数単位でまとめたものである¹⁾。集計は2つに分けて行い、隅田川の東側の本所区と深川区を除いた13区の集計を合計Aとし、深川区と本所区の集計を合計Bとした。人口は合計Aが166万人、合計Bが42万人である。一方、全潰率を見ると合計Aが4.9%であるのに対して合計Bは18.4%に達し、本所・深川地区では地盤が軟弱で強い揺れが生じ、多くの家屋が全潰したことが分かる。

仮に、元禄地震の頃と同じように本所、深川にほとんど人が住んでいなかったとすれば、関東大震災による死者数はほぼ合計Aの10,023人となり、また住家の全潰によって延焼火災が多数発生した本所区と深川区の火災が発生せず、飛び火などによって他地域に延焼拡大しなかったとすれば、結果として元禄地震の時のように目立った火災が無い状況になっていたかもしれない。そう考えると死者数は合計Aの圧死者1,489名のみとなる。さらに、関東地震当時の人口(合計A)が166万人で、元禄地震当時が70万人程度であり、その分死者が減少するとすれば、実に関東大震災の死者は628人になる。つまり、元禄地震の死者は判明している約300人からそれほど増えなくともおかしくないという結果になる。

元禄地震以降都市は膨張を続け、葦の生い茂る湿地帯も開拓され、科学技術の進歩によって、大規模な埋

め立て工事や堤防工事も可能になって、多くの人々が隅田川の東岸地域に住むようになった。それから220年が経過した時に、関東地震が起こり、耐震対策を施していない木造家屋を軟弱地盤で増幅された強い揺れが襲い、多くが全潰さらには延焼火災の発生を招いて6万9,000人もの人々が命を落とすという最悪の結果となった。これがすなわち東京の関東大震災なのである。

その兆候はすでに70年前の安政江戸地震の時に見えていたにも関わらず⁷⁾、その後も十分な都市改造がなされないままに人口集中を続け、その日を待つに至った。科学技術は我々の選択肢の幅を広げるが、何をどのように選択するかによって、我々は危険にもなるのである。

科学技術の進展で人間の生活範囲がどんどん拡大する現在、我々が見落としがちな落とし穴を、関東大震災の東京の被害から読み解くことができるようである。

3. 一向賢明になれない我々

もう一つ、関東大震災で忘れてはならない被害がある。両国の被服廠跡で約38,000人が命を落としたという事実である。被服廠跡は両国駅から横網町公園までの2万坪に及ぶ広大な敷地で、現在、江戸東京博物館や国技館などの敷地が含まれる。この場所で実に東京市での死者の半数以上が亡くなったのである⁸⁾。

震災予防調査会の委員として、東京での大火災の調査にあたった東大の物理学教授であった中村清二は報告書の最後に以下のような言葉を残している⁹⁾。

「同じ失敗を何度となく経験しても吾々は一向賢明にならなかったのである。大八車が自動車にかかわることはあろうけれども。」

中村は、一瞬にして4万人もの人々が命を落とした被服廠跡の大惨事の最大の原因は、火災旋風の脅威もさることながら、2万坪の敷地に人々が持ち込んだ家財道具の山であったと結論した⁹⁾。その上で、家財道具が火災の延焼を促進し多くの人々の命を奪う原因に

表3 関東大震災による東京市における被害¹⁾

市区町村	人口	世帯数	被害世帯数		全潰率 (%)	焼失率 (%)	死者数			死亡率 (%)
			全潰	焼失			総数	圧死	焼死	
東京市	2,079,094	452,404	35,350	300,924	7.8	66.5	68,660	2,758	65,902	3.3
麹町区	56,117	11,275	937	6,484	8.3	57.5	137	76	61	0.2
神田区	143,757	28,503	3,612	27,601	12.7	96.8	1,519	298	1,221	1.1
日本橋区	123,961	20,981	174	21,616	0.8	100	1,189	17	1,172	1.0
京橋区	137,668	29,271	220	29,290	0.8	100	919	17	902	0.7
芝区	171,854	36,464	1,242	16,769	3.4	46.0	494	96	398	0.3
麻布区	86,083	18,746	721	185	3.8	1.0	185	54	131	0.2
赤坂区	55,258	11,387	819	1,863	7.2	16.4	142	65	77	0.3
四谷区	68,197	15,383	127	642	0.8	4.2	103	9	94	0.2
牛込区	118,642	25,525	515	0	2.0	0	203	203	0	0.2
小石川区	140,471	31,477	465	1,201	1.5	3.8	254	34	220	0.2
本郷区	123,055	26,656	383	7,106	1.4	26.7	320	29	291	0.3
下谷区	180,510	42,147	2,126	33,451	5.0	79.4	891	149	742	0.5
浅草区	251,469	57,971	6,229	59,192	10.7	100	3,667	442	3,225	1.5
(合計A)	1,657,042	355,786	17,570	205,400	4.9	57.7	10,023	1,489	8,534	0.6
本所区	248,452	56,768	12,282	54,781	21.6	96.5	54,498	878	53,620	21.9
深川区	173,600	39,850	5,498	40,743	13.8	100	4,139	391	3,748	2.4
(合計B)	422,052	96,618	17,780	95,524	18.4	98.9	58,637	1,269	57,368	13.9

なるということは江戸時代から広く知られ、江戸市中では火災の際の大八車の使用を固く禁じていたというを紹介している。それが明治・大正と時が経つにつれて、人々はその教訓をすっかり忘れてしまっていたと指摘、冒頭の言葉へと繋がるのである。

私の調査でも⁸⁾、被服廠跡と条件がよく似ていた横浜市の横浜公園では、火災旋風が発生したにも係らず、46万人の避難者のうち、約50名が死亡しただけにとどまった。被服廠跡との違いは、家財道具が運びこまなかったことで、そのことは震災当時20歳でその場にいた日高ていさん（現在109歳）の証言からも明らかである⁸⁾。

横浜公園周辺の関内地域は当時としては珍しく勤め人が多かったこともあるが、皮肉なことに、震源により近い横浜での揺れは東京に比べてはるかに強く、建物がほぼ全て全潰し、延焼火災の密度も2倍以上で、とても家財道具などを運び出す余裕がなかったというのが本当のところらしい。

ここでもう一度、中村の言葉に戻ると、最後の「大八車が自動車にかわることはあろうけれども。」というフレーズが気にかかる。この予言ともいべき言葉は、まさに2011年3月11日の東日本大震災の東京での中した。ところがそのことに気づいている人はどれほどいるだろうか？道路という道路を、帰宅を急ぐ車が埋め尽くし史上最悪の渋滞が発生した。「もし仮に周辺で火災が発生したり交通事故で火災が発生したりして渋滞の車の列に引火でもしていたら・・・」考えただけでも背筋が寒くなるのを覚える。被服廠跡の大惨事

を知るものにとって、その恐ろしさは想像に難くないのである。中村の言葉を借りれば、やっぱり我々は一向賢明になれていないのである。

4. 本気で過去の災害に学ぶべき

津波についても考えさせられることがある。関東大震災の時も津波の被害は相当なもので、東伊豆を中心に200-300名の死者を出した。震源が相模湾にあって近かったために、揺れを感じてから津波の襲来までに5分とかからなかったところも多かった。関東大震災より220年余り前の旧暦11月22日の深夜に発生した元禄地震でも同じようなことがあった。現在は伊東市の一部となっている当時の宇佐美村では、元禄地震で380余名もの死者を出した。この苦い経験が語り継がれ関東大震災の時には、地震の強い揺れと同時に人々は一早く避難して一人の犠牲者を出すこともなかった。元禄地震の教訓を後世に伝えるべく建てられていた行蓮寺の万霊塔も役割を果たすことができたようである¹⁰⁾。

ところが、最近では行蓮寺の万霊塔のことも地元の限られた人しか知らないという。供養塔を建てたからといって、被災した人々の思いが後世に伝わるかというところも簡単なものでもないらしい。宇佐美村の隣の伊東町では、元禄地震の教訓を伝える供養塔があったにも関わらず、関東大震災でも多くの犠牲者を出した。近年伊東市は、関東大震災の津波浸水点の標識を市内各地に設置して人々の津波に関する注意喚起を行っている¹⁰⁾。大変結構なことだと思う。ところが一方で伊東市役所の防災担当者は2010年に筆者が確認したとこ

るでは、市役所の隣にある仏現寺に元禄地震や関東大震災の供養塔があることすら知らなかった。次々に新しい試みをして、その都度忘れて行く様では意味がない。

国においても同じようなことが言える。全国の歴史的な自然災害について分野を超えた専門家を集めて調査し、国民に知らせる活動をしてきた内閣府の「災害教訓の継承に関する専門調査会」が、一昨年度半ばで廃止された。理由は同じ名目の予算で10年以上活動を継続することができないというものであった。翌年から関係者の努力によってやり残した災害の調査が細々と続けられてはいるが、3.11後の大掛かりな地震想定の見直しに比べれば、無いにも等しい規模である。

今回の東日本大震災で明らかとなったのは、現在の科学では、地震が起こったあとに、震源で何が起こったかはすぐに分かるが、事前に物理モデルに基づいて地震の発生や揺れや津波の予測を正確にすることは難しいということではなかったのか。

私も首都圏の被害想定委員会に委員として参加しているので、その場で強く主張したことは、架空の巨大地震で一喜一憂する前に、もう一度、関東大震災と同じ地震が今の首都圏を襲ったときに、どのような被害になるかを真剣に検討すべきであるということであった。過去のことに無頓着なのだろうか。そんなことに対する答えすら国は持っていないのである。

このように国中で過去の災害を真摯に知ろうとする意識が希薄なのは、地震の専門家にも大きな責任があるように思う。日本地震学会では、東日本大震災後、地震学者がいかに社会に役立つべきかの議論が続いている。我々の大先輩である地震学者の宇佐美龍夫は著書「日本被害地震総覧」の冒頭で以下のように述べている²⁾。「故今村明恒の言葉のように「地震を恐れず、侮らず、地震に対処する」ことが大切であり、そのためには「地震についての正しい知識を身につける」ことが必要であろう。(中略)地震の理学的側面を普及することが重要なのではなく、蓄積した事実のうちから、災害の軽減に直接あるいは間接に結びつく事柄を、平易に、しかも正確に普及することがわれわれ専門家の担うべき重要な任務と考えられる。」宇佐美の言を実践しようとする地震学者が一人でも多く現れることを期待したい。

寺田寅彦の言葉として“天災は忘れたころにやってくる”というのがよく引用される。この言葉の元となった随筆を読むと“だから忘れないよう個々人がしっかりと努力しなさい。震災を防ぐ手立てはそれしかない。”という趣旨のことが書かれている¹⁾。決

して忘れて当たり前だと言っているわけではない。関東大震災から90周年を迎える今、我々がなすべきことは、過去の災害教訓に学ぶことではないか。真摯に災害教訓と向き合うことこそが、地震防災の出発点にならないといけない。この間に震災で犠牲になられた幾萬の方々のご冥福をお祈りするとともに、地震学者として防災への決意を新たにするものである。

本報告の内容は、関東大震災90周年を記念して日本地震学会・日本地震工学会・歴史地震研究会主催で2013年8月27日に江戸東京博物館ホールで行われたシンポジウムと旧被服廠跡にある都立横綱町公園・東京都慰霊堂で行われた「首都防災ウィーク」の研究発表会(東京都慰霊協会主催)の初日、9月3日のオープニング講演において、筆者が話したことをまとめたものである。

参考文献

- 1) 諸井孝文・武村雅之：関東地震(1923年9月1日)による被害要因別死者数の推定、日本地震工学会論文集、4(第4号)、21-45、2004。
- 2) 宇佐美龍夫：最新版日本被害地震総覧 [416] -2001、東大出版会、605pp、2003。
- 3) 国立歴史民俗博物館編：ドキュメント災害史1703-2003、pp167、2003。
- 4) 斉藤誠治：江戸時代の都市人口、地域開発 (9月号)、48-63、1984。
- 5) 鈴木理生編著：東京の地理がわかる事典、日本実業出版社、pp.271、1999。
- 6) 北原糸子：江戸の災害、東京の地震、HUMAN、03、36-51、2012。
- 7) 北原糸子：安政大地震と民衆、三一書房、pp.264、1983。
- 8) 武村雅之：未曾有の大災害と地震学-関東大震災、古今書院、pp.209、2009。
- 9) 中村清二：大地震による東京火災調査報告、震災予防調査会報告、100戊、81-134、1925。
- 10) 武村雅之：静岡県熱海市・伊東市での関東大震災の跡、元禄地震の教訓は生きたか、歴史地震(投稿中)、2013。
- 11) 千葉俊二・細川光洋編：地震雑感/津浪と人間(寺田寅彦随筆選集)、中公文庫、pp.195、2012。



武村 雅之

1981年東北大学大学院理学研究科博士課程修了(理学博士)、鹿島建設(株)技術研究所研究員、同 小堀研究室プリンシパルリサーチャー、(株)小堀鐸二研究所副所長を経て、現職、名古屋大学減災連携研究センター寄附部門教授、専門分野：地震学

首都圏の地震の姿

平田 直

●東京大学 地震研究所 教授

1. はじめに

我が国の首都の位置する南関東はたびたび大震災に見舞われてきた。大正の関東大震災を引き起こした巨大地震(1923年、マグニチュード(M)7.9)は、相模湾の海底の溝(相模トラフ)から沈み込んでいるフィリピン海プレートと陸側のプレートの境界面で発生し、約10万5,000人が犠牲となった¹⁾。その9割は火災によるものであった。1703年元禄関東地震(M8.1)もフィリピン海プレートと陸側のプレート境界で発生した。この地震では、1万人以上が犠牲になったとされている²⁾が、歴史資料の中には、犠牲者は江戸で3万人を超え、総数は20万人を上回ると記載されているものもある³⁾。さらに、江戸時代、関東に影響を与えた地震としては、1855年安政江戸地震(M6.9)や1677年延宝地震(M8.0)などが知られている。安政江戸地震では江戸を中心に7,000人の犠牲者がでた。延宝地震は房総半島の太平洋沖で発生し、現在の福島県から房総半島・外房沿岸、八丈島など伊豆諸島を津波が襲い、死者500人を超えるなど、関東各地に被害をもたらされた。これらの地震が、プレート境界で発生したか、プレート内で発生したかは、よく分かっていない。

相模トラフ沿いのプレート境界で発生した1703年と1923年のふたつの地震から、このプレート境界でM8クラスの巨大地震が発生する間隔を仮に約200年とした場合、1923年関東地震は今から90年前であるので、次の関東地震はまだ100年くらい先のことであると考えられる⁴⁾。

しかし、それより小さいM7クラスの地震の発生頻度はずっと高い。計器で観測できた最も古いM7クラスの地震は1894年明治東京地震(M7.0)である。この地震以降現在までの120年間に5回のM7クラスの地震が南関東で発生している。簡単なモデルを用いて30年以内に発生する確率を求めると約70%となる⁵⁾。これは、大変高い発生頻度と言える。ただし、確率を計算するのに用いられたこれらの地震がプレートのどこ(境界部か、内部か)で発生したのかは、必ずしも良く分かっていなかった。

仮に東京23区の下でM7クラスの地震が発生すれば、1995年阪神淡路大震災と同様の大震災が発生する。そこで、内閣府は2005年に、首都圏で発生するいろいろ

な地震の被害想定を行って首都圏への影響を評価した⁶⁾。被害想定では、18の地震を想定した。この中で首都機能にもっとも影響のある地震が「東京湾北部地震」である。もしM7.3の地震が東京湾北部のフィリピン海プレートの上面で発生すれば、人的被害11,000人、経済損失112兆円という膨大な被害をもたらされる。フィリピン海プレートの形状・位置については当時の最新のモデル⁷⁾が用いられた。

しかし、当時の最新モデルでもフィリピン海プレートの形状と位置が、首都圏の下でどうなっているのかは、必ずしも良く分かっていなかった。首都圏での地震観測が難しいため、十分なデータがなかったからである。そこで、2009年から5カ年計画で、首都圏で地震観測を行うプロジェクト(首都直下地震防災・減災特別プロジェクト:サブプロジェクト① 首都圏周辺でのプレート構造調査, 震源断層モデル等の構築等)が実施された⁸⁾。小論では、首都圏の地震災害予測の概要とこのプロジェクトの成果を紹介する。

2. 首都圏地震観測網(MeSO-net)

都市部での地震観測

首都圏に被害をもたらす地震の姿を明らかにするには、都市部での地震観測が必要である。風雨のような気象現象などの地震以外の自然現象による振動の他に、都市では産業・社会活動によって振動が発生し、地震を観測するときのノイズ源となっている。

首都圏は、日本で最大の平野である関東平野に位置している。ここには、厚さ5kmにもおよぶ堆積層があり、地下深部からの地震波を観測する妨げになっている。例えば、関東平野では周期数秒の振動が卓越する。これは、太平洋沿岸域で発生した波浪による振動が原因であり、脈動として観測され、地震観測のノイズとなっている。

これらのノイズを少なくして微弱な地震波を観測するには特別な工夫が必要である。ノイズ源は地表付近にあり、地震は地下深部で発生するので、地下深くにセンサーを置けば信号対雑音比は上がる。防災科学技術研究所が首都圏に展開している高感度地震観測網の内、4カ所では3000m級の深井戸の深層地震観測点となっている。このような深層観測を行えば、都市部で

も高精度な観測が可能である。しかし、深層観測を行うには経費も時間も多くかかる。

災害に強い地震観測網

現代の地震観測は高度な情報通信網に依存しているので、ひとたび通信網が途絶すると、データが失われる。首都圏で観測を行う上でも、震災などにより電力や通信回線に障害が発生する可能性を考慮する必要がある。震災時でなくとも、落雷や保守工事などによって電力や通信回線が途絶したり不安定になったりすることもある。専用の回線と電力を確保できればこの問題はある程度回避できるが経費が高くなり現実的でない。たとえ専用回線を用いてもデータが途絶える可能性がある。合理的な経費で観測を行い、データを途切れなくようにする仕組みを予め構築することが重要である。

首都圏地震観測網 (MeSO-net) の整備

以上のような観点を考慮して、首都直下地震防災・減災特別プロジェクトでは、次のような首都圏地震観測網 (Metropolitan Seismic Observation network: MeSO-net) を構築した⁹⁾。MeSO-netでは、首都圏に約300カ所の観測点を設けて、高密度に設置した地震計のデータを用いて観測網全体として信号対雑音比を上げる (図1)。従来の観測網の観測点間隔は約20kmであったが、MeSO-netでは5km程度とした。さらに、5本の観測線上では2から3km間隔として、観測点間で地震波形の相関がとれる程度に高密度にした。これらの観測点密度によって、地震波トモグラフィー法によって求められる地下構造の空間分解能が従来の倍以上になった。

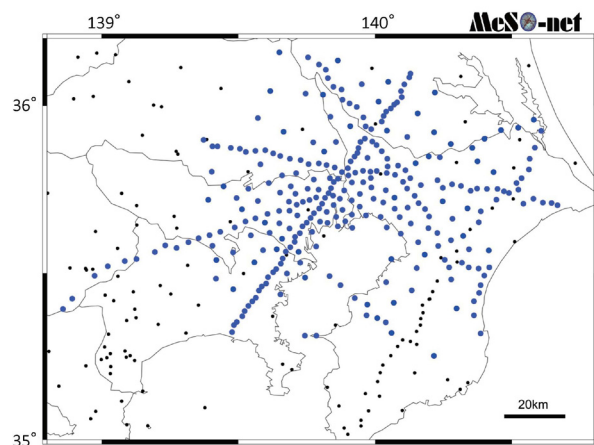


図1 首都圏地震観測網 (Metropolitan Seismic Observation network: MeSO-net)。大きい丸が MeSO-netの観測点。小さい丸は既存観測点。MeSO-net観測点は296箇所に設置された

多数の観測点を短期間に首都圏に設置するためには適切な設置場所を選ぶ必要がある。我々は、多くの観測点を小中学校の校庭に設けた。校庭に20mの浅層観測井戸を掘り、その孔底に加速度型の地震計を設置した。地下20mでも、地表設置の地震計に比べて高周波数のノイズを低減できることが確かめられた。地震計センサーは加速度計を用い、孔底でアナログ・デジタル変換をして、デジタルデータを地上のデータ変換装置に転送している。地上部の装置と孔底装置とは Control Area Network(CAN)バスによって接続され、孔底装置は地上部の基準信号と同期している。地上装置は、測定データをデータセンターに送る機能、GPSによる時刻校正機能、電源の供給・制御機能、センサー部装置の動作監視、環境測定を行う機能を持っている¹⁰⁾。

約300点の観測点からは上下動、東西動、南北動の3成分の加速度データ (200Hz/チャンネル) が連続記録としてインターネット回線を用いて東京大学地震研究所のデータセンターに送信されている。データの送信を確実にするために新しいデータ送信手順 (自立協調型データ送信手順: Autonomous Cooperative Transfer (ACT) Protocol) を開発した¹¹⁾。このシステムでは、通信網が一時的に途絶えても観測点にデータを蓄えて、通信網が回復したときに観測点から自動的にデータをセンターに送ることができる。大規模な停電や通信網の途絶の他にも、小規模な通信回線の不良は日常的に発生している。ACTプロトコルの採用により、欠測データは数時間後には自動的にデータセンターに送信されている。観測点には数日間のデータを保持できる電池と記憶装置を設置してある。2011年東北地方太平洋沖地震の際の大規模停電でも、データを蓄積して本震、前震、余震の記録を欠落なくデータセンターに転送できた。

MeSO-netの維持ではできるだけ人手がかからなくするために、ACTプロトコルの他にも、Simple Network Management Protocol (SNMP) を採用して、観測点のデータ変換部・転送部の状態をデータセンターから監視している。データセンターでは、常時専任のオペレータ1人が観測網の管理を行っている。

MeSO-netデータによる成果

現在のところ、地震波の到着時刻を用いた地震波トモグラフィー解析と、地震波のフーリエ振幅スペクトルを用いたQ構造の解析が進んだ。これらは、多数の観測点と多数の地震を用いて、地下の岩石の地震波の伝播の速さや、非弾性のパラメータ (Q) の3次元的な分布を推定する解析である。

地震波トモグラフィー法では、地震波の到着時刻から地下の3次元的地震波の速度分布が得られる。地震波の伝播の速さは、岩石の種類と状態に依存するので、岩石学的な考察を行うと速さ分布から岩石の種類を推定することができる。地震波トモグラフィー法解析の結果、海底直下にあった岩石が、地下数十kmの深さに沈み込んでいることを示す画像が得られた。この研究では、P波の到着時刻とS波の到着時刻を用いて、二重走時差トモグラフィー法¹²⁾を用いた解析を行い、P波・S波の伝播の速さ分布を3次元的に求めた¹³⁾。Q構造の研究は進行中であるが、プレートからの脱水を示唆する低Q領域が東京湾の下のフィリピン海プレート

の内部で見出されている。

この研究によって、南関東直下でフィリピン海プレートが南方から、太平洋プレートが東方から沈み、深さ50kmあたりで両者が接合している様子が鮮明にイメージされた(図2)。沈み込むプレートの地震波速度は、大局的には周辺のマントルより速いが、詳しくみるとプレートの上面付近の地殻ではむしろ遅くなっている。海底にある地殻の厚さは5~10kmなので、空間分解能の低い従来の研究では、フィリピン海プレート上面付近の低速度領域は検出されないことが多かった。MeSO-netデータの高分解能解析によると、厚さが数kmから10km程度の低速度領域が相模湾から北に向かって深くなっている様子がイメージできる。

この解析によって、南関東でのフィリピン海プレートの形状を詳しく調べることができた。フィリピン海プレートの上面の深度分布が、東京湾北部では従来考えられていたより約10km浅いことが分かった(図3)。もちろん、20年間にフィリピン海プレートが浅くなったわけではなく、従来の研究に用いたデータより空間分解能の高いデータで解析したことによって、プレート形状が明確になったのである。

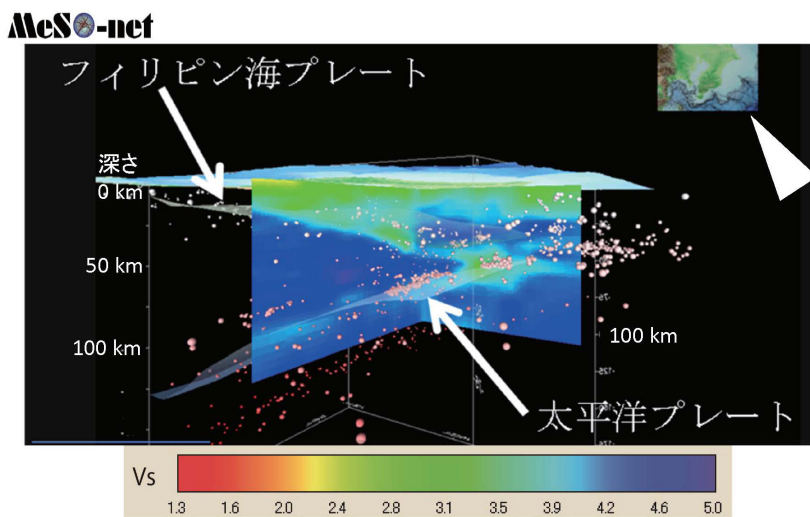


図2 南東から見た関東の下の地震の分布とプレート境界の位置。断面図の色はS波の伝播速度(Vs)を表す。白い小さな丸は中小の地震の位置(震源)。細い三角形(Δ)は、断面を見ている方向(およそ南東から北西)

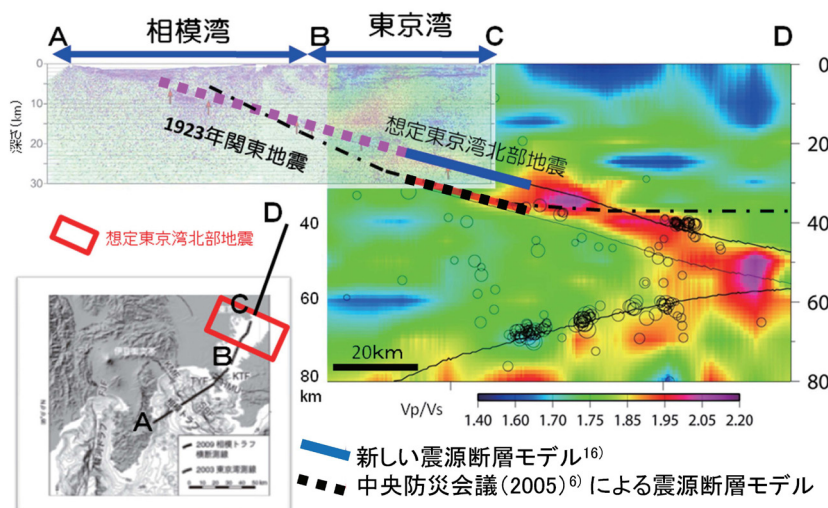


図3 従来の想定地震震源断層(中央防災会議、2005)(破線)と、本研究による新しい震源断層モデル(太い実線)。本研究の結果は、これまでの結果より約10km浅くなった

3. 首都圏の地震災害リスク 災害素因と災害誘因

自然災害が発生する仕組みを理解することは、災害を未然に防いだり、被害を少なくしたりするために重要である。社会に災害をもたらす外的な原因を「災害誘因」といい、自然災害の誘因として地震、火山噴火や台風などが挙げられる。英語ではhazardで、日本語でもハザードと言われることも多い。これに対して、災害が発生する社会それ自体の特性は「災害素因」(vulnerability)である。人口・資産が密集し、経済活動が集中するほど、発生する被害・損失は大きくなる。建物や土木構造物の耐震性が弱い、つまり脆(ぜい)弱な都市は被害が大きくなる。被害・損失が発生してもそれを減らす能力、回

復力がある社会では被害を軽減できる。これらの要素が社会の災害素因である。

日本の首都圏で地震災害の可能性(地震災害リスク)が高いのは、地震発生頻度が高いという災害誘因が大きいこと以外に、災害素因が大きいからである。東京都だけでも1千3百万人の人口を持つ人口稠密地帯であり(素因)、そこで強い揺れをもたらす大地震が頻発する(誘因)からである。東京都の人口は、2001年に1千2百万人を超え、この10年で約百万人増えている。これらは重要な災害素因である。さらに、東京都の昼間人口は約1千5百万人で夜間より2百万人多い。例えば千代田区の昼間人口(約82万人)は、夜間人口の実に17倍である¹⁴⁾。都外からの流入者が多く、昼間人口が多いという人口構成は、災害素因として十分考慮する必要がある。

さらに、都内には約200万棟の木造建物があり、そのうち約半数が1981年のいわゆる新耐震基準制定以前に建てられた建物である。これら耐震化・不燃化されていない建物が密集している地域が首都圏には多く存在する。これは重要な地震災害素因となっている。

地域の防災力の担い手として期待される自主防災組織は都内に約6,700組織あり、全世帯の77%をカバーしている。しかし、平均年齢が60歳以上の組織が全体の半分を占めて高齢化が進み、防災訓練など地域の防災活動に参加しない都民は6割、防災訓練を行わない町会は4割に上る¹⁵⁾。これらは地震災害に対する社会の防災力の観点から災害素因となっている。

2012年東京都地震被害想定

東京都は、2012年に東日本大震災を受け、地震被害想定の見直しを行った。その際、「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト：サブプロジェクト① 首都圏周辺でのプレート構造調査、震源断層モデル等の構築等」の成果¹⁶⁾を取り入れて、新しいフィリピン海プレートの形状モデルを採用した¹⁷⁾。

2012年の東京都の被害想定では、中央防災会議・首都直下地震対策専門調査会(2005)で想定された18の地震の内、4つの地震を検討した。すなわち、東京湾北部地震(M7.3)、多摩直下地震(M7.3)、元禄型関東地震(M8.2)、立川断層帯地震(M7.4)である。これらのうち、最初の二つはフィリピン海プレートの上面に震源断層を想定している。2012年の東京都の想定では、新しくなったフィリピン海プレートを用いているため、この二つの地震は、中央防災会議の想定より浅くなる(図3)。東京湾の北部では、従来のモデルより約10km浅い。新旧のプレートモデルの差は、東京都の

西側の方が大きいため多摩の下では約15km浅くなっている。

これらの震源モデルを使って地表の揺れが計算された。東京都は2006年に、中央防災会議・首都直下地震対策専門調査会(2005)⁶⁾の震源モデルを用いて被害想定を行っている。以下、両者を比較する。被害が最大になる東京湾北部地震(M7.3)では、2006年の想定では最大震度6強、2012年では最大震度7となっている。これは、フィリピン海プレートが東京湾北部で約10km浅くなったことに対応している。しかし、震度7の領域はわずか(東京都の面積の0.1%未満)であり、重要なことは震度6強以上の領域が、2006年の想定では約305km²であったのが、2012年の想定では約444km²に増えたことである。23区に限れば、面積の約5割が震度6強以上であったのが約7割に増えた(図4)¹⁷⁾。新しいフィリピン海プレートのモデルが、東京都の西部では東部よりもより浅くなったことに対応している。これらは、地震災害の誘因(地震ハザード)の評価である。

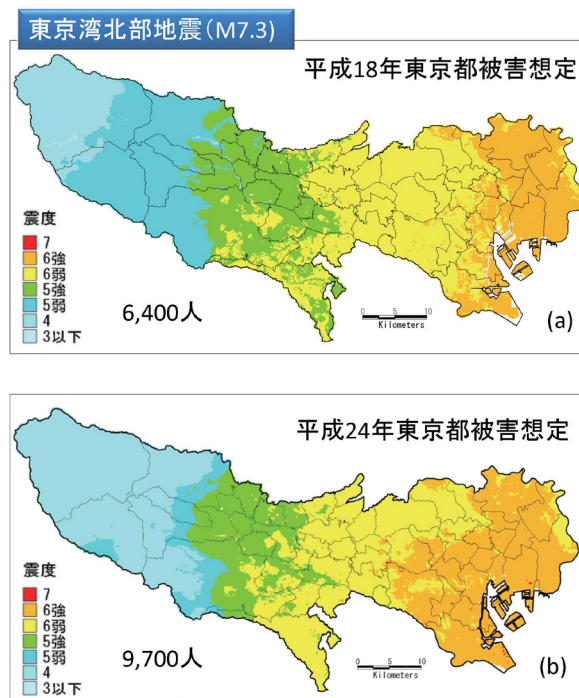


図4 平成18年度と平成24年度の東京都地震被害想定震度分布。(a)東京湾北部地震(M7.3)に対する2006年度の想定。(b)東京湾北部地震(M7.3)に対する2012年度の想定。図中の数字は想定死者数

一方、地震災害の素因もこの6年で変化した。東京都の建物被害は、東京湾北部地震、多摩直下地震ともに23区の木造住宅密集地域で多発する。2006年~2012年の間に都内の古い木造家屋(1981年以前に建築)は、

約132万棟から97万棟に減っている。このため、東京湾北部地震 (M7.3) に対する建物被害数は、2006年の想定 (揺れによる全壊12.7万棟、焼失約31～41万棟) より2012年の想定 (揺れによる全壊11.6万棟、焼失19万棟) では少なくなっている。それでも、発災時に建物内に滞留する人の数が増えているため、全体としての死者数の推定が、東京湾北部地震 (M7.3) では、約6,400人から約9,700人へと約1.5倍に増えた。

東京都は、この地震被害想定に基づいて、木造住宅密集地域での不燃化10年計画を進め、整備計画地域の不燃化率を70%にすることを目指している。さらに、消防団の体制強化や防災隣組などの共助、公共建築物やマンションなどの耐震化を促進して、死者を6,000人減少させ、建築物の全壊・焼失棟数を約20万棟減少させることを目標として掲げている。高齢化した地域防災組織の活性化など解決すべき問題は多いが、適切な備えを行えばたとえ首都の直下でM7.3の地震が発生しても、犠牲者数を現在の想定から半減させることができることを示している。

4. 2011年東北地方太平洋沖地震の首都圏への影響

2011年東北地方太平洋沖地震は極めて大きな地震であったために、日本列島全体に大きな影響を与えた。一般にどんな大地震も余震を伴うが、この地震は本震の規模がM9.0であったため、余震の規模も大きい。現時点での最大余震は、本震後約30分後に茨城県沖で発生したM7.6の余震である。M7以上の余震は、2013年8月現在で7回、M6以上は約100回、M5以上は約700回を数えた。

さらに、2011年3月11日の地震発生直後から、余震域の外でも、日本列島の多くの地域で一斉に地震活動が活発化した。その一つに関東がある。北関東では、茨城・福島県境で顕著な地震活動が続いている。また、南関東でも、茨城県つくば市や千葉県銚子市、東京湾北部で地震発生数が増加した。2012年3月14日に千葉県東方沖の深さ15kmで起こったM6.1の地震 (最大震度5強) では、死者1人、負傷者1人の被害が生じた。これらは、浅い地殻内の地震の他、フィリピン海プレートや太平洋プレートの上面付近に集中している。南関東で2011年3月11日以降に発生した最大の地震はM6クラスである

が、M7程度の地震が発生することも不思議はない。

南関東全体で見れば、中小地震の発生数は、時間とともに減少し、その減り方は余震の減衰の仕方 (大森-宇津式) に従っている。大森-宇津式とは、

$$\lambda = K(c+t)^p$$

ここで、 t は本震からの経過時間、 λ は時刻 t に単位時間に発生する地震数、 K, c, p は定数である。もし、 $p=1$ なら、この式は大森公式になる。通常余震では、 $p=1$ になり、2011年東北地方太平洋沖地震の余震でもほぼ1である。一方、南関東で発生した誘発地震では、 p は0.5程度になる (図5)。つまり、減り方が通常余震に比べてゆっくりしている。南関東の地震発生数の減少が緩やかであることは、2011年東北地方太平洋沖地震の余効滑りが今でも継続していることと関係があるかもしれない。

発生直後には、30年以内にM7程度の地震が発生する確率は、明治以降の平均的な発生確率 (約70%) に比較して有意に高かった。しかし、現在では地震活動が次第に不活発になってきたので、30年以内に発生する確率にすると、長期の平均的な発生確率と統計的に有意な差はない¹⁸⁾。しかし、それでも今後数年の間は、通常時に比べて確率が高く、防災的な観点からは地震発生を予想して、これに備えるべきである。

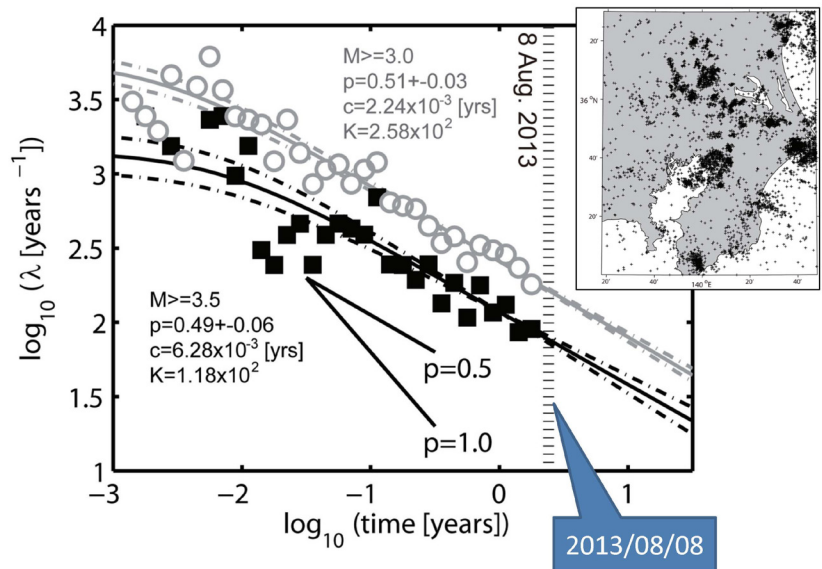


図5 南関東の地震発生率の時間変化。1年あたりの地震数を示す。○はM \geq 3, ■はM \geq 3.5の地震数。これらのデータを当てはめた理論曲線 (実線) と、 p の推定値の標準偏差を考慮した時の理論曲線 (一点鎖線) をM \geq 3と、M \geq 3.5の地震について示した。 $p=0.5$, $p=1.0$ の時の理論曲線の傾きを参考に実線で示した。2013年8月8日までの右上の地図に示した範囲のデータを用いて予測している。横軸は、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の発生時刻からの経過時間。

5. おわりに

首都圏は地震災害が発生する誘因も素因も多い。

過去の平均的な地震活動から考えて、首都圏は地震発生頻度が高い。さらに、2011年東北地方太平洋沖地震の発生以降、その頻度はより高い状態となった。過去の巨大地震の例に鑑みると、通常の活動レベルに戻るまで10年以上かかると思われる。

現在も将来も地震災害の誘因である強い揺れや津波の高さを減じることはできない。そこで、災害素因である人口の過度の集中、建物などの脆弱性を軽減することが重要である。とりわけ、首都圏の木造住宅密集地帯の解消が急務である。同時に、地震災害が発生した時の社会や地域の回復力（防災力）を高めていかなければならない。個人、地域社会、地方行政・国家行政の役割を分担して、地震に対する防災力を向上する必要がある。被害を最小限にするためには、できることから早急に対策を進めなければならない。

参考文献

- 1) 諸井孝文・武村雅之：1923年関東地震による被害要因別の死者発生数－Mortality estimation by causes of death due to the 1923 Kanto Earthquake－, 第11回日本地震工学論文集, 416, 2253-2258, 2002.
- 2) 宇佐美龍夫：『最新版 日本被害地震総覧 [416]-2001』, 東京大学出版会, 605pp, 2003.
- 3) 矢田俊文：「幕府・藩等の日記からみた慶安武蔵地震・元禄地震・宝永地震」、「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト：首都圏での中小地震と大地震の発生過程の關係の解明」2013年第4回検討会、東京大学地震研究所、2013.
- 4) 地震調査研究推進本部・調査委員会：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（平成25年7月19日現在）、2013.
- 5) 地震調査研究推進本部・地震調査委員会：相模トラフ沿いの地震活動の長期評価（平成16年8月23日）、2004.
- 6) 中央防災会議・首都直下地震対策専門調査会：首都直下地震対策専門調査会報告（平成17年7月）、2005.
- 7) Ishida, M.: Geometry and Relative Motion of the Philippine Sea Plate and Pacific Plate Beneath the Kanto-Tokai District, Japan, J. Geophys. Res., 97, 489-513, 1992.
- 8) 平田直・酒井慎一・佐藤比呂志・佐竹健治・瀧川一一起：「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」サブプロジェクト①「首都圏周辺でのプレート構造調

査、震源断層モデル等の構築等」の概要、東京大学地震研彙報、84, 41-56, 2009.

- 9) 酒井慎一・平田直：首都圏地震観測網の設置計画、東京大学地震研究所彙報、84, 127-139, 2009.
- 10) 笠原敬司、酒井慎一、森田裕一、平田直、鶴岡弘、中川茂樹、楠城一嘉、小原一成：首都圏地震観測網 (MeSO-net) の展開、地震研究所彙報、84, 71-88, 2009.
- 11) 森田裕一・酒井慎一・中川茂樹・笠原敬司・平田直・鏡弘道・加藤拓弥・佐藤峰司：首都圏地震観測網 (Meso-net) のデータ伝送方式について－自律協調型データ送信手順 (ACT protocol) の開発－, 東京大学地震研究所彙報、84, 89-105, 2009.
- 12) Zhang, H., and C. H. Thurber: Double-difference tomography: the method and its application to the Hayward fault, California, Bull. Seismol. Soc. Am., 93, 1875-1889, 2003.
- 13) Nakagawa, S., S. Sakai, A. Kato, K. Kasahara, K. Obara, E. Kurashimo, R. Honda, T. Aketagawa, H. Kimura, T. Takeda, H. Sato, and N. Hirata: Velocity Structure beneath Tokyo Metropolitan Area, SCEC-ERI Joint Workshop, 2011.
- 14) 千代田区: ホームページ
<http://www.city.chiyoda.lg.jp/koho/kuse/gaiyo/yokoso/ichi.html>, 2013.
- 15) 東京消防庁・火災予防審議会：火災予防審議会地震対策部会答申書（第18期）：地震時における地域消防活動と災害情報収集伝達体制のあり方について、2009.
- 16) 平田直：I 首都圏周辺でのプレート構造調査、首都直下地震防災・減災特別プロジェクト総括成果報告書、7-14, 2012.
- 17) 東京都防災会議：首都直下地震等による東京の被害想定報告書（平成24年4月18日公表）、2012.
- 18) Nanjo, K. Z., S. Sakai, A. Kato, H. Tsuruoka, N. Hirata: Time-dependent earthquake probability calculations for southern Kanto after the 2011 M9.0 Tohoku earthquake, Geophys. J. Int., 193(2), 914-919, 2013.



平田直

1982年東京大学大学院理学系研究科退学、東京大学地震研究所・地震予知研究センター長・教授、千葉大学助教授、地震研究所助教授等を経て現職、元地震研究所長、理学博士、専門分野：観測地震学、地震発生予測

首都直下のプレート構造と想定される地震像

遠田 晋次

●東北大学 災害科学国際研究所 教授

1. はじめに

首都東京（江戸）は、1703年元禄地震、1855年安政江戸地震、1923年大正関東地震など、度重なる大地震を経験してきた。また、関東地方全体として常時地震活動が高いため、普段から頻繁に有感地震が発生している。政府の地震調査研究推進本部地震調査委員会は、今後30年間に発生するマグニチュード（以下、M）6.7～7.2の地震の確率を約70%と公表した（図1）¹⁾。

なぜこれほど関東地方では地震活動が活発なのか。

関東地方では、南からは伊豆小笠原諸島をのせたフィリッピン海プレートが、東からは太平洋プレートが、関東平野をのせたユーラシアプレートの下に沈み込んでいる。これらが地表で接する「三重会合点」（図2）が東京の南東約300kmに位置する²⁾。地震の多くはプレートどうしが擦れあう部分で発生するため、3枚のプレートが重なり合う関東では他の地域よりも地震活動が活発になる。このことが首都圏で地震活動が高い理由とされる。

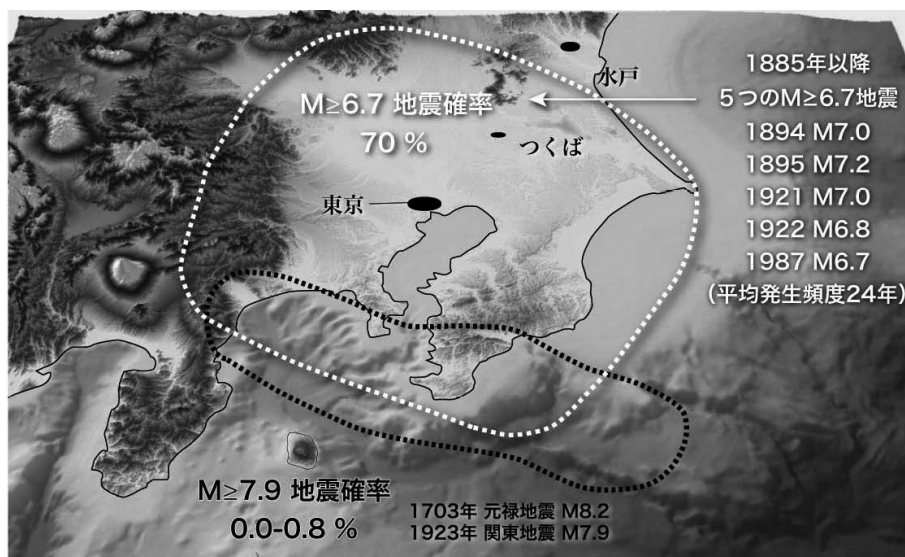


図1 地震調査委員会による地震発生確率

しかしながら、首都圏直下で予想される具体的な大地震像は、相模トラフ沿い巨大地震を除いて未解明である。上記の70%の地震発生確率は、過去119年間に発生した5個のM \geq 6.7地震の頻度（平均発生間隔23.8年）から算定されたものである（図1）¹⁾。すなわち過去の統計によるもので、発生メカニズムや特定の断層運動の繰り返しを考慮したものではない。宮城県沖地震の発生確率とは本質的に意味が異なることに注意が必要である。ただし、この確率算定過程を国民の多くが理解していない。

大地震の震源像が把握されていない理由は、3枚のプレートが重なり合う深さが関東平野直下数10kmであり、観測精度の限界とその解釈が難しいためである。これまで多様なプレートモデルが提出されが、中央防災会議なども含め、大地震の震源想定に利用されているのは、1992年に発表された石田モデル（図3）³⁾である。しかし、このモデルでは多様な地震発生場や火山活動・地形地質発達などを網羅的かつ合理的に説明できていない。

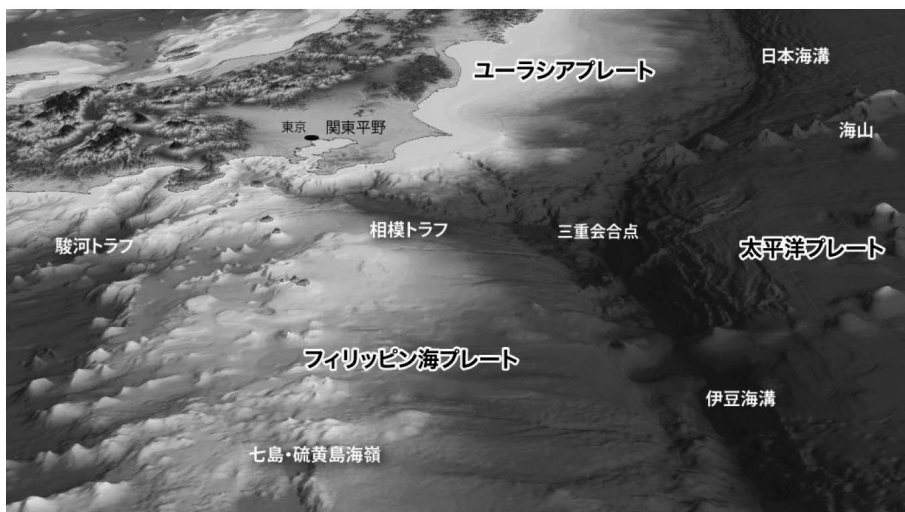


図2 関東地方とその周辺の陸海地形陰影図

その後、野口(1998)⁴⁾、Sato et al.(2005)⁵⁾、Uchida et al.(2010)⁶⁾などが示されているが、基本的に石田モデルを踏襲している。本質的な相違はそれほどない。本報告では、その関東直下のプレート構造を再検討するため、我々の研究グループ⁷⁾が提案するプレートモデルを紹介し、首都直下で予想される多様な地震像を提示する。さらに、東北地方太平洋沖地震によって活発化した地震活動について触れ、我々のモデルとの関連を示したい。

クラスター周辺の応力場の解析を実施した。さらに、1997年以降の気象庁の6200個のM_≥2地震の波線(P波420,000,S波280,000)を利用して、地震波トモグラフィ⁸⁾による速度構造のイメージングを実施した。

これらの地震解析とともに、関東地方の既存の地質データや地史に関する文献調査を同時に行い、プレート運動の変遷を検討した(詳細については、Toda et al.(2008)⁷⁾を参照)。

3. 関東フラグメント仮説

上記解析の結果、関東平野直下の深さ30-100kmの範囲に横たわる厚さ25km、幅100kmの独立したマイクロプレートを突き止めた(図3下段、図4)。この部分は従来南から沈み込んだフィリピン海プレートの先端と解釈されてきた(図3上段)³⁾。しかし、地震波伝播速度が速いことや微小地震分布、地震の発震機構、応力場の解析などから、太平洋プレートと同じ性質を持つことがわかった。ただし、太平洋プレートからは完全に分離されている。我々はこれを太平洋プレートの破片と解釈し、関東平野直下に横たわっていることから、「関東フラグメント(Kanto fragment)」と名付けた⁷⁾。

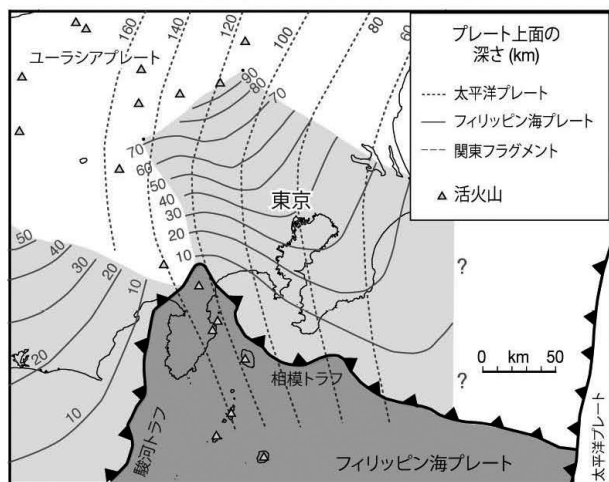
プレートの位置を過去にさかのぼって復元した結果、約200～300万年前に2つの海底山脈が銚子沖で同時に沈み込もうとしたため、抵抗が大きくなり太平洋プレートの上部が破断され取り残されたものと推定している。現在、関東フラグメントはフィリピン海プレートと太平洋プレートに挟み込まれるように分布している(図3、図5)。

関東フラグメントは首都圏直下の地震発生に大きく関与している。関東平野での有感地震の大半は特定の地震群(地震クラスター)から生じている。特に筑波山直下から千葉市にかけて、深さ30～80kmに南北にクラスターが連なる地震発生集中域が存在する(図4上段、関東直下地震帯)。2005年7月23日に東京都足立区で震度5強の揺れをもたらしたM6の地震もその1つである。江戸直下で発生した1855年安政江戸地震(M7.0-7.3)も関東直下地震帯の南端で発生したと考えられる⁸⁾。

プレート境界型地震は「海溝型地震」の1つであり、通常は海域で発生する。しかし、このように関東では陸域直下で発生する。また、3枚のプレートに加え、関東フラグメントを1枚余計に挟むことによりプレート境界面が増え、他の海溝沿いよりも地震が多く発生すると考えている(図5)。

なお、関東最大級の地震は相模トラフ沿いで発生

これまでの代表的なモデル(Ishida, 1992)



著者らのモデル(Toda et al., 2008)

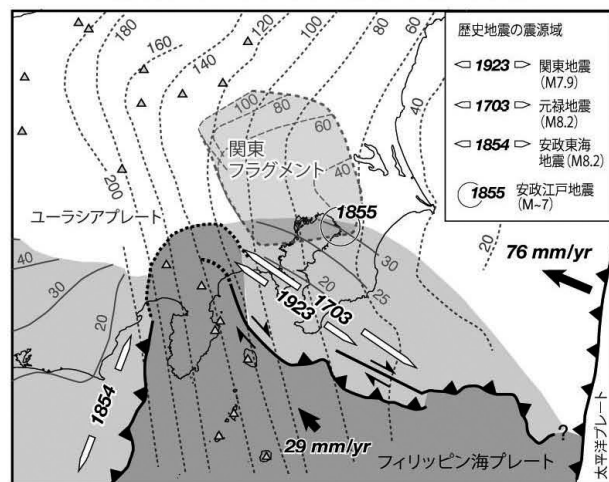


図3 関東地方のプレート構造モデル

2. 解析方法・データ

1979年～2004年2月までの防災科学技術研究所の震源データ、約30万個の震源分布を地理情報システムに読み込み、三次元的に可視化した。それに基づき、地震クラスターの位置や規模を把握した。また、メカニズム解を用いて応力テンソルインバージョンを行い、

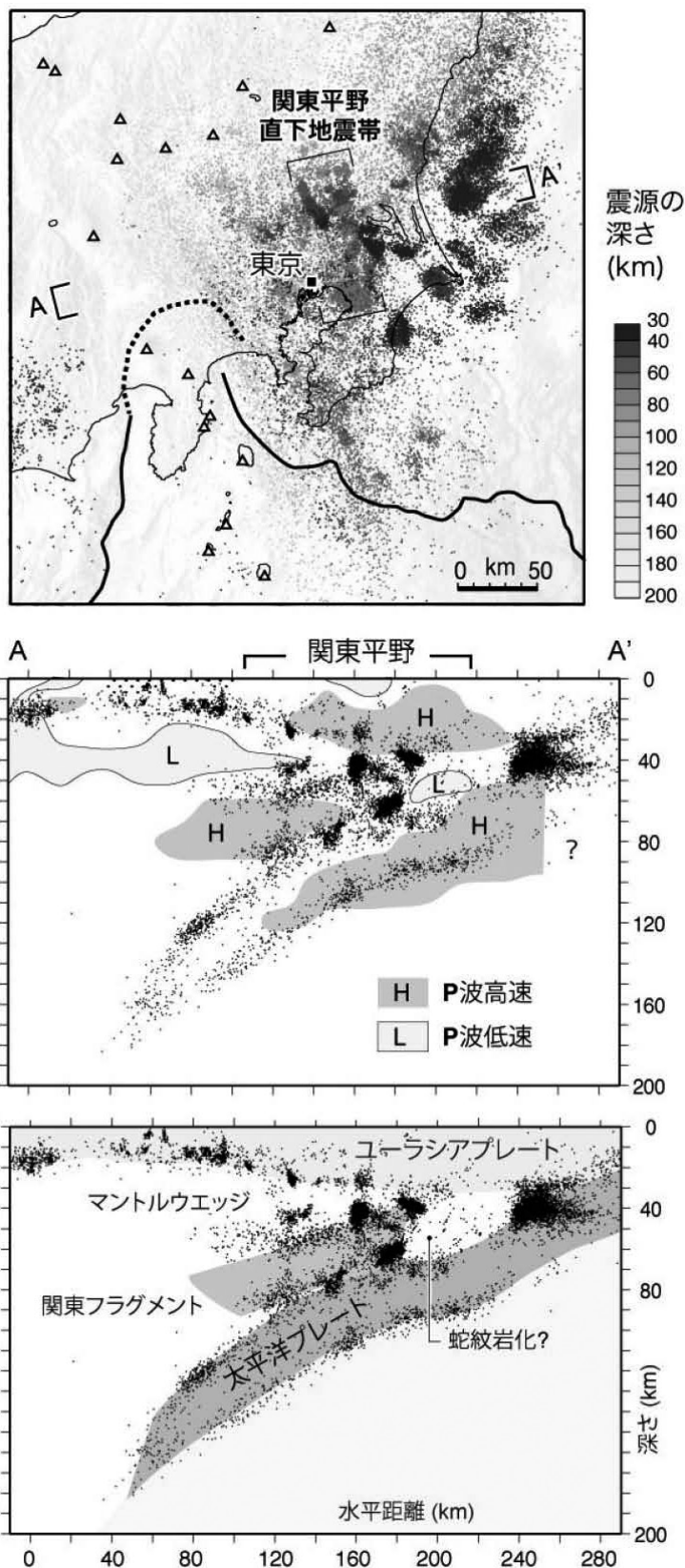


図4 関東地方の微小地震分布 (上段) と地震波速度構造 (中段)、プレート構造の解釈

した1703年の元禄地震 (M8.2) である。一方で、関東平野直下では安政江戸地震を超えると考えられる歴史地震はみあたらない。仮に、関東フラグメントと太平洋プレート (深さ40 km~100 km) の境界面全域が固着していた場合、面積は約6500 km²となり、断層面積と地震モーメントの関係⁹⁾、およびモーメントと気象庁マグニチュードの関係¹⁰⁾を用いるとMj=8.5となる。全域固着は極端なので、固着域を関東地震帯部分の半分にすると、Mj=8.1と推定される。震源は深いものの、M8程度の首都直下地震の可能性も今後検討する必要がある。

4. 他の地学現象との関係

新しいプレートモデルでは比較的深い地震の発生場だけではなく、火山や活断層の分布も比較的合理的に説明できる。関東北西部では、東北奥羽山脈から南下する火山列 (以下、火山フロントという) は関東平野を取り巻くように、赤城山・榛名山・浅間山をとおり八ヶ岳・富士山へと「く」の字を描いて分布している。従来の代表的なプレートモデル³⁾では、この曲がった火山フロントを説明するために、複雑なマグマ発生過程や (太平洋プレート深部から浮上してくるマグマの通路を確保するため) フィリピン海プレートの断裂を強いていた (図3上)。新しいモデルでは太平洋プレート上面約120-140kmの深さから部分熔融したマグマがそのまま上昇すれば良い (図3下)。

本州北部の活断層については、陸側プレート内でも地殻が幾分薄く強度の弱い地域に分布する傾向がある⁷⁾。すなわち火山周辺数10km以内では地下が暖められており、脆性破壊を起こす深さが浅く活断層がしやすい。逆に火山からきわめて遠く海洋型の2枚のプレート (関東フラグメントと太平洋プレート) が二重に沈み込んできた関東東部ではこの地震発生層が厚いため、地殻強度が高く活断層が生じにくい。千葉県や茨城県内に大きな活断層が見つかっていない事実と整合する。

関東フラグメントの地表への投影位置は関東平野の形ときわめて似ている。関東フラグメントの発生過程と、その密度や温度構造が大局的な地形発達にも影響を与えてきた可能性も指摘できよう。

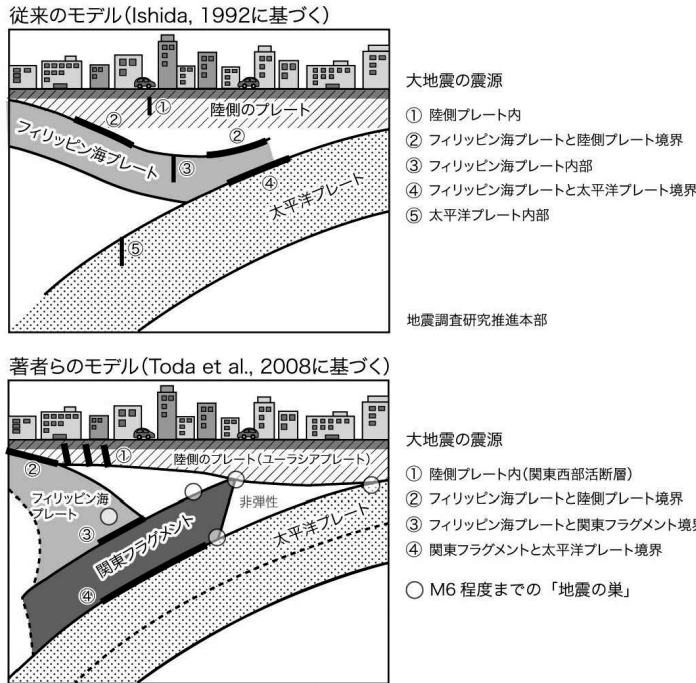


図5 関東地方での大地震の推定震源模式図

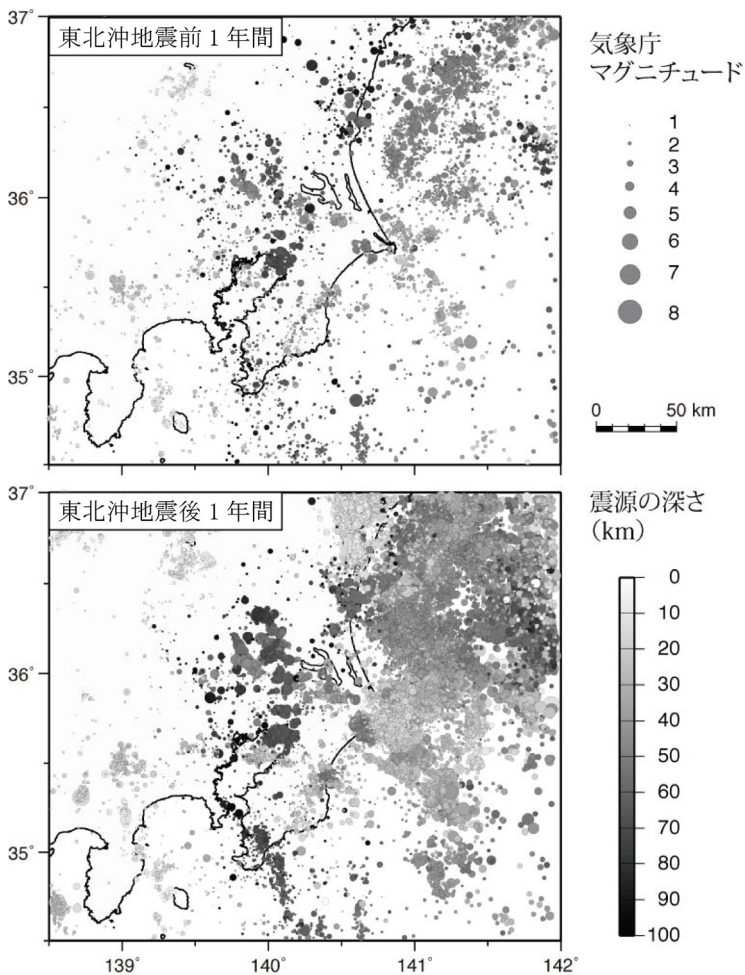


図6 東北地方太平洋沖地震前後の地震活動の比較

5. 東北地方太平洋沖地震による影響

東北地方太平洋沖地震によって東日本全体の地震活動が変化した¹¹⁾。特に、震源に近い関東地方では、その変化が著しい。図6は本震前後、それぞれ1年間の地震の分布を示す。最も顕著な活発化域は福島県沖、茨城県沖である。これらは狭義の余震活動(震源断層沿いの余震)や、本震約30分後に起こったM7.6の最大余震の余震活動による。銚子付近・銚子沖、福島・茨城県境付近の浅い地震活動は、ともに東西伸張にともなう正断層型の誘発地震である¹²⁾¹³⁾。前述の関東平野直下地震帯でも顕著に地震数が増えた。M5以上の中規模地震も複数発生している。

図7は関東平野直下地震帯での地震活動の時系列を示す。縦軸は東北沖地震2年前(2009年3月11日)からの累積地震数である。本震直後は関東地方でも地震検知能力が一時的に低下した可能性があるため、ここではM3以上を対象とした。本震前2年間は、多少の揺らぎはあるものの一定レートの常時地震活動が認められる(平均0.15個/日)。ところが、東北沖地震直後にレートの急上昇が起こり、直後1ヶ月間は平均2.3個/日に達した。その後は余震の大森-宇津公式に沿って減衰したが、本震半年後から高止まり傾向を示し2013年8月でも本震前の2倍以上を保持している(0.3個/日)。この高止まり傾向は、余効変動による影響と指摘されている¹⁴⁾。

このような東北地方太平洋沖地震に伴う関東平野直下地震帯の活動活発化は、静的クーロン応力変化(static Coulomb stress change)¹⁵⁾で説明可能である。図8には本震前13年間に発生していた地震のメカニズムと本震によって変化した応力変化量を示した。ここではメカニズム解の両節面が地下に潜む中小の断層を代表していると仮定している。実に約8割の断層面に正のクーロン応力、すなわち誘発を促進する応力変化があった。平均でも1 bar (10kPa)の増加に達し、既存の研究例からみても地震活動を誘発するのに十分な量である。また、東北地方太平洋沖地震後に発生した地震のメカニズムに対して同様の計算をしたところ、93%の節面で応力増加となった(図9)。

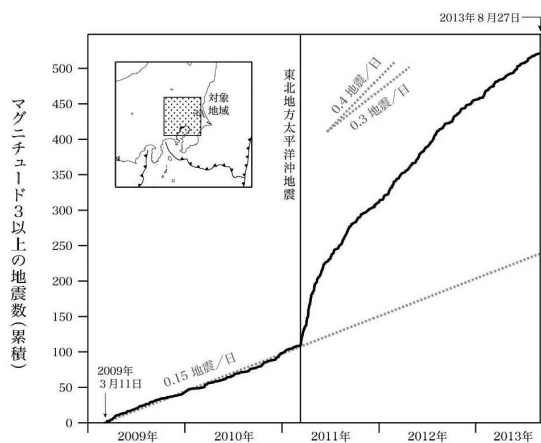


図7 2009年3月11以降の首都直下M \geq 3地震の累積

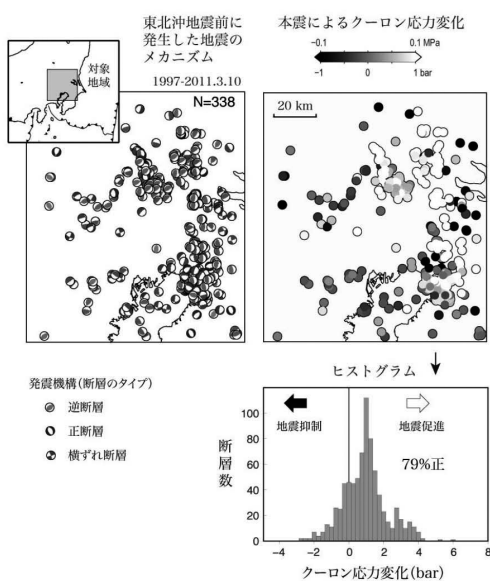


図8 本震前の節面への静的応力変化

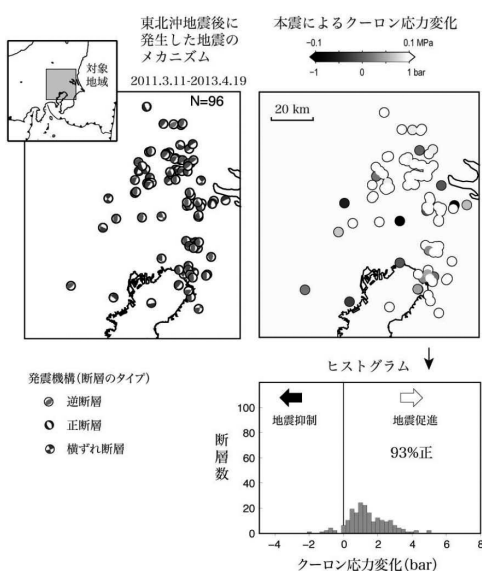


図9 本震後の節面への静的応力変化

上述のように1855年安政江戸地震の震源域は関東平野直下地震帯に位置していた可能性が高い。東北地方太平洋沖地震以降、同地震帯の活動が活発化している状況が危惧される。

6. おわりに

2011年東北地方太平洋沖地震により、日本海溝沿いの太平洋プレート沈み込みに伴う巨大地震像が一変した。首都圏周辺では、南からさらにフィリピン海プレートが沈み込み複雑さを増している。首都圏は、人口過密域直下に沈み込み境界が存在するという世界でも特異な環境下にある。過去の歴史地震の再解析でも、地震発生はプレート境界に限らず、多数の複雑な断層が潜在していることが指摘されている^{16, 17)}。防災・減災計画においても多様な震源を想定した対策が必要と思われる。

今回新たに提唱したプレートモデルと震源像もまだ仮説に過ぎない。複雑系を扱う地球科学ではモデルの検証はきわめて難しい。しかしながら、このモデルでは、従来複雑な説明を要した現象が比較的容易に説明できる。また、首都圏直下の地震発生の仕組みも従来のモデルよりは理解しやすい。

一方、関東地方は東北地方太平洋沖地震の影響を受けて地震活動が活発化しており、余効変動も続いている。今後の短中期的な地震予測のためにも、首都直下の大地震発生メカニズムの解明と適確な規模・頻度予測が急務である。

謝辞

ここで記した内容はToda et al. (2008)⁷⁾に基づくものである。アメリカ合衆国地質調査所 (USGS) のRoss Stein博士、Steve Kirby博士、Serkan Bozkurt氏には同論文執筆にあたって解析や議論を共同で実施した。地震波トモグラフィーに関しては、東北大学地震・噴火予知観測研究センターの長谷川昭名誉教授、中島淳一准教授にお世話になった。震源プロットやメカニズム解を用いた応力解析には、防災科学技術研究所および気象庁一元化データを用いた。各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：「全国を概観した地震動予測地図」報告書、121p、2005.
- 2) 岡田義光：南関東地域のサイスマテクトニクス、地震、43、pp.153-175、1990.
- 3) Ishida, M.: Geometry and relative motion of the Philippine Sea plate and Pacific plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, *J. Geophys. Res.*, 97, B1, doi:10.1029/91JB02567, 1992.
- 4) 野口伸一：関東地域の地震活動・発震機構・火山フロントとフィリピン海および太平洋プレートの沈み込み、地震研究所彙報、73、pp.73-103、1998.
- 5) Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Iwata, T. Kawanaka, K. Kasahara, and S. Harder: Earthquake source fault beneath Tokyo, *Science*, 309, pp. 462-464, doi:10.1126/science.1110489, 2005.
- 6) Uchida, N., T. Matsuzawa, J. Nakajima, and A. Hasegawa: Subduction of a wedge-shaped Philippine Sea plate beneath Kanto, central Japan, estimated from converted waves and small repeating earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 115, B07309, doi:10.1029/2009JB006962, 2010.
- 7) Toda, S., et al., A slab fragment wedged under Tokyo and its tectonic and seismic implications, *Nature Geoscience*, 1, pp. 771-776, 2008.
- 8) Bakun, W. H.: Magnitude and location of historical earthquakes in Japan and implications for the 1855 Ansei Edo earthquake, *J. Geophys. Res.*, 110, doi:10.1029/2004JB003329, 2005.
- 9) Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Swada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, 70, pp.59-80, 1999.
- 10) 武村雅之：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係、地震2、43、pp.257-265、1990.
- 11) Toda, S., R. S. Stein, and J. Lin, Widespread seismicity excitation throughout central Japan following the 2011 M=9.0 Tohoku earthquake and its interpretation by Coulomb stress transfer, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G03, doi:10.1029/2011GL047834, 2011.
- 12) Kato, A., S. Sakai, and K. Obara: A normal-faulting seismic sequence triggered by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake: Wholesale stress regime changes in the upper plate, *Earth Planets Space*, 63, pp. 745-748, 2011.
- 13) Imanishi, K., R. Ando, and Y. Kuwahara: Unusual shallow normal-faulting earthquake sequence in compressional northeast Japan activated after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L09306, doi:10.1029/2012GL051491, 2012.
- 14) Toda, S., and R. Stein: The 2011 M=9.0 Tohoku oki earthquake more than doubled the probability of large shocks beneath Tokyo, *Geophys. Res. Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50524, 2013.
- 15) King, G. C. P., R. Stein, J. Lin: Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 84, pp. 935-953, 1994.
- 16) 石辺岳男、西山昭仁、佐竹健治、島崎邦彦：南関東で発生したM7級地震に対する既往研究とデータの収集 -1894年明治東京地震と1895年茨城県南部の地震-、東京大学地震研究所彙報、84、pp. 149-182、2009.
- 17) 石辺岳男、西山昭仁、佐竹健治、島崎邦彦：南関東で発生したM7級地震に対する既往研究とデータの収集 -1921年茨城県南部の地震、1922年浦賀水道付近の地震および1987年千葉県東方沖地震-、東京大学地震研究所彙報、84、pp. 183-212、2009.



遠田 晋次

1989年鹿児島大学理学部卒業、1991年東北大学大学院理学研究科前期博士課程卒業(修士)、(財)電力中央研究所、東京大学地震研究所助手、(独)産業技術総合研究所活断層研究センター研究員、京都大学防災研究所准教授を経て2012年10月より現職、博士(理学)、専門分野は地震地質学。

求められる都市・建築の総合的地震対策 ～東日本大震災における振動被害の実態と教訓を踏まえて～

源栄 正人

●東北大学 災害科学国際研究所 教授

1. はじめに

1923年の関東大震災から90年になる。科学も進歩すれば、社会の進化により地震防災を考える上での学問的技術的背景や社会的背景が90年前とはかなり変遷している。関東大震災の発生日である9月1日にあわせた地震に関する科学の進歩や地震対策状況などがメディアで企画報道されている。

相模トラフの地震や東京湾北部地震による首都圏を襲う最大級の地震による被害を想定した地震対策が求められている。さらには、東海・東南海地震により懸念されていた長周期地震動が長周期構造物へ与えるインパクトは、東日本大震災で現実的に問題となった。大振幅地震動と耐震設計の諸問題については、先日、日本建築学会から発刊された刊行物¹⁾に多くの地震工学・耐震工学の専門家の研究成果がまとめられているので参考になる。

津波被害を中心に大被害をもたらした東日本大震災ではあるが、ここでは振動被害の実態と教訓を改めて振り返ることにより、首都圏で想定される最大級地震動に対する都市・建築の地震対策にも通じるのではないかと思ふ執筆する次第である。

2011年3月11日、仙台市青葉区青葉山キャンパスの研究室で大きな揺れに襲われた。大震災をこの身で体験した。震災の翌日から災害調査に関わり、地震動と被害に関する情報発信²⁾、日本建築学会を中心とした災害調査報告書^{3),4)}のまとめに携わるとともに、地震防災の学識経験者として地元市町村の復旧・復興活動も行ってきた。振動被害の実態と教訓は日本建築学会の座談会⁵⁾、また、最近の防災技術としての早期地震警報システムの活用関連では、「教室の窓」の座談会⁶⁾で報告し、学校への導入を進言した。また、東日本大震災における緊急地震速報の活用の実態と早期地震警報の現状と課題に関する報告を行っている⁷⁾。これらの体験に基づき大震災の実態と教訓を先達の教えを交え国内外で講演する機会を得ている。東日本大震災から2年半になるが、あつという間であった。

ここでは、東日本大震災における振動被害の実態と教訓を改めて振り返るとともに、首都圏で想定される最大級地震動に対して都市・建築に求められる工学的地震対策の諸課題について示す。さらに、これまでの

地震・耐震工学の先達の教えと、最近の社会的環境を鑑みた筆者の地震防災対策に対する日頃の思いを述べる。

2. 東日本大震災における地震動と被害

(1) 強震動から観た巨大地震の特徴

2011年東北地方太平洋沖地震は、わが国で初めてのM9クラスの地震($M_w=9.0$)で、多くの地震観測記録が得られた初めての巨大地震である。この巨大地震、観測地震動の大きさで決められるいろいろなマグニチュードは、表面波マグニチュード $M_s=8.1$ 、実体波マグニチュード $m_b=7.3$ 、ローカルマグニチュード $M_L=6.8$ であり、地震動の大きさには限界があることを示しているが、M9地震による強震動は、M7-8クラスの地震動の重ね合わせであることに留意する必要がある。筆者は巨大地震による地震動を受ける建物の被害の解説に「波状攻撃」という言葉を用いた。建物は最初の攻撃で傷んだところに次の攻撃を受けるのである。

(2) 観測された大加速度記録と建物被害

地震動と被害の関係を論じる場合、地震動のどのような性質が建物や地盤のどのような被害に結びついているのかを分析する必要がある。東日本大震災で観測された多くの地震観測記録と被害の関係をこの視点から視る必要があり、既存指標の独り歩きは極めて危険であると言わざるを得ない。少なくとも「加速度による被害」と「変形による被害」の区別をする必要がある。

K-NET築館で観測された最大加速度2,700ガルを超える地震動、地元メディアにより「震度7、犠牲者ゼロ」と報道された。この地震記録に対する調査検討として、アンケートによる揺れの実態調査も行っている⁸⁾。この調査によるアンケート震度は、計測震度より1小さいことがわかった。また、地震計設置の問題によると思われる挙動を示していることを指摘してきている⁹⁾。ともあれ、過日、NHKのMEGAQUAKE IIIの取材の関係で、この揺れによる3次元振動台に置かれた実大の室内模型の加振に立ち会った。マネキン人形の首は「ぶるるん、ぶるるん」と揺れるが、留めてない本棚を倒せないのである。震度7の揺れは、本棚の本は落とすことはできても固定していない本棚を倒すことができ

なかったのである。地震動の指標の問題は指摘せざるを得ない。

(3) 長い継続時間の地震動と構造物の累積応答

巨大地震がもたらす地震動の長い継続時間と繰り返し回数は構造物の累積応答に影響を及ぼす。累積応答変位や累積エネルギーと累積損傷の関係を把握することの重要性が指摘される。

また、巨大地震が多くの余震を伴うことは、被害評価における残存耐震性能の観点からも大切であり、耐震診断においても要配慮である。

免震構造でも鉛ダンパー装置の被害例が報告されている。宮城県大崎市の免震建物が代表的であり、大崎平野の堆積盆地の影響を受けた長い継続時間の地震動が被害に結びついている。3月11日の本震の長い揺ればかりでなく、4月7日の余震の影響、また、2008年6月14日の岩手・宮城内陸地震の際の揺れも蓄積されているのは事実であろう。

(4) 地盤によって異なる地震時の揺れ

地震基盤から工学的基盤までの深部地盤構造、工学的基盤から表層地質構造、これらの地盤構造は大きな構造体である。

サイスミック・マイクロゾーニングの必要性と地盤増幅特性に関する法的規制を強化する必要がある。特に、地盤との共振による建物の損傷を考慮した耐震設計の推進が求められる。ピーク振動数を考慮した設計である。東日本大震災では、特定の周期帯ではあるが告示スペクトル(安全限界)の3～4倍の地震動が観測データとして得られており、被害に結びついている。ただしこの場合、地震動の非定常性と揺れの繰り返しによる建物の劣化に伴う非定常性を考慮することが望まれ、これまで、「進行性破壊」とか英語で「Moving Resonance」とよばれている現象の解明が必要である。

筆者らは、仙台市内の地震観測記録を用い構造物の非線形性を考慮した必要耐力の地盤による差の比較検討を行い、6～10階程度の建物で2～3倍、15～20階の高層ビルでも2倍程度の差があることを確認している¹⁰⁾。

関東平野は大きな堆積盆地をなしており、これによる地震動の増幅は考慮しなければならない。振幅の増大ばかりでなく、継続時間の面からの考慮も必要である。東日本大震災では、10分以上にわたり超高層建築を揺すった長周期地震動、関東平野の深部地盤構造に基づく表面波の伝播速度分布を配慮しながらK-NETの観測点の地震動の違いを比較検討した結果を論文で発表している¹¹⁾。

相模トラフの地震や東海・東南海地震では関東盆地の外から表面波が入った場合などには関東盆地の底にあたる千葉付近を中心に東京湾沿岸部で地震動の増幅が予測される。長周期地震動の伝播は、単なる距離減衰ではなく、地震の道「地震道」があり、盆地の底に向かって伝播する。かつてGaussin Beam法により関東平野の表面波の伝播解析¹²⁾を行ったときのことを思い出す。いくつか存在する「地震の道」の途中に観測点を置きその情報から後方の点の揺れをリアルタイムに予測することが将来可能になるのではないかと思う。江戸時代の善光寺の土石流災害の教訓のように、上流の流れの情報を下流に流し、確実な情報として伝えることにより被害低減を行うことを考える必要があるように思う。

(5) 衝撃的な「学び舎」の被害¹³⁾

東北大学工学部の人間・環境系研究棟(SRC造9階建)は、4隅の柱がセットバックした3階中脚部で大破し、解体された。1969年竣工の建物で土木・建築の卒業生の学び舎でもある。青葉山キャンパスでは、丘陵地の地盤構造により周期1秒付近の成分が仙台駅前に対して2倍に増幅し、応答スペクトル(減衰5%)で180cm/sに達する地動で、8階建、9階建の研究棟が大きな被害を受けた。すべて耐震補強してあった建物である。隣接する宮城教育大学では被害がほとんどなかったのに東北大学の理工系の建物、しかも建築構造の専門家が深く関わっている建物の大破は大学関係者ばかりでなくショックであった。1978年の宮城県沖地震で損傷を受けながらも何とか耐えることができ、恩師の志賀敏男先生が「よく耐えてくれたとなでてやりたいくらい嬉しかった」と仰った経緯がある。建物内の地震観測記録と仙台市内の地震観測記録の分析により、被害の要因を科学的に分析し説明してきたことは意義があると思っている。関係者として教訓は、1) 1978年の地震で変動軸力に対し、主筋が破断しているという隠れた損傷を検知できなかったこと、2) 損傷している部位に力がかかるような耐震改修を行ったこと、3) 打ちかえた耐震壁と既存フレームとの連結が弱く、3階から上が低層部に置いてあったような状況で浮き上がり振動を起こしてしまったこと、などである。またこの建物の竣工以来、解体までの振動計測による長期モニタリングのデータは自己宣伝ではあるが、耐震工学上極めて貴重なものとなる。

青葉山では周期1秒の成分が2倍に増幅するのは、1978年宮城県沖地震でも分かっていたが、2倍の差を考慮するだけの社会的受け入れができていなかったの

は事実であろう。

ところで、東北大学の学内施設の耐震化率は東日本大震災地震時点では88.5%であった。人的被害をもたらさなかったのはこの高い耐震化率に起因していることもあるが、地震の揺れの性質として最初に宮城県域を襲った揺れをもたらした震源の滑り方に起因して揺れがだんだん大きくなったことが、人的被害が比較的小さくて済んだことに大きな影響を与えていることを指摘する必要がある。2つ目の揺れをもたらした地震波が最初に襲来したなら大きな人的被害をもたらしていたと思う。もちろん人的被害の低減には早期地震警報の効果もあった。

(6) 上部構造と基礎構造のバランスの必要性

明暗を分けた1978年宮城県沖地震における杭基礎被害建物は印象深い。仙台市宮城野区のSマンションと仙台市太白区長町の郡山市営住宅の被害状況の差である¹⁴⁾。前者は1978年宮城県沖地震で杭基礎の被害を受け補修しただけであったが、後者は、杭の損傷により傾斜してしまった。今回の東日本大震災では、78年宮城県沖地震を上回る揺れであり、前者が杭の損傷(推定)により傾斜し解体されたが、後者の市営住宅は、周期1秒付近の大きな揺れ(5%の速度応答スペクトルで300cm/s)であったにも関わらず、無被害で済んだ。これは、1978年宮城県沖地震の直後に行った基礎の補強工事の効果によるものであったと判断できよう。分譲マンションのような集合住宅では、合意形成の問題は復旧復興上の問題でもあり、市営住宅の場合と明暗を分けた。

また、杭基礎建物に関しては、耐震基準の変遷を考慮し、旧基準による杭基礎建物、特に搭状比の大きな建物は要検討である。

東日本大震災では、上部構造に被害がなくても杭の損傷により解体せざるを得なくなった建物(仙台市若林区卸町Kビル)や耐震改修を行った校舎の杭基礎被害(大崎市F高等学校)を指摘せざるを得ない。隣接する耐震改修前の杭基礎建物(大崎市F中学校)と比較しながら耐震改修の課題を考えさせられる。上部構造と基礎構造の耐震クライテリアは地震リスク(リスク低減ばかりでなく保険によるリスク転嫁)を考える上で重要な課題の一つである。

液状化した地盤における杭基礎建物の被害に対する対策も首都圏で想定される大地震対策を考える上で大きな課題であろう。

(7) 躯体ばかりでなく非構造・設備とのバランス

東日本大震災の被害として、天井材の落下や建物の外壁の落下が目についた。特に、天井材の落下被害では、東京九段会館での2名の犠牲者が出るなど初めて犠牲者を出し責任が問われるとともに対策が求められている。国土交通省の調査ではこれまで指摘した「振れ止め」の設置では問題が解決しないことを指摘せざるを得ない。天井落下は多目的ホールや行政庁舎の議会ホールなどで目立った。使用していなかったために大事に至らなかったケースが多々あったことを忘れてはならない。

重要な非構造材・設備の設計では、床応答スペクトル法の導入により、地盤の共振や構造躯体の共振を考慮した設計体系が必要のように思う。天井材の設計では、屋根から天井材に伝達される振動エネルギーが水平方向に伝播し、天井材が波打つ状態¹⁵⁾になると支配面積当たりの地震荷重で済まなくなる。このような状態にならないようにする必要がある。設備に対しては局部震度法の規制強化も必要であろう。

前述のように東日本大震災では、東北大学では青葉山キャンパスを中心に大きな被害を受けたが、被害は構造躯体ばかりでなく、高価な実験装置など室内備品にも巨額な被害をもたらした。被害要因として、転倒防止対策を行っていても固定治具が壁から抜け出してしまった事例があり、継続時間の長い揺れに対する固定治具の健全性の検証として画枠問題が浮き上がった。高価な実験装置の転倒対策が十分でなかったこと、高価な備品ほど固定し難いのが現状である。

また、青葉山キャンパスで大破し解体された電子応用物理研究棟1号館(SRC造8階建)では建物躯体の被害ばかりでなく、ペントハウス部の被害に伴い、エレベータが落下していることを指摘しておきたい。たまたま、落下したエレベータの中には誰も乗っていないために責任問題となっていないが、想定される首都圏での大地震で予測される被害として対策を講じる必要がある。地震警報の有効活用により、閉じ込めも含めた人的被害の低減も望まれる。

(8) 宅地被害

東日本大震災では、仙台市内を中心に甚大な宅地被害が生じた。仙台市内では、9つの造成団地で約5,000箇所の被害報告があり、仙台市太白区の団地(緑ヶ丘4丁目)は移転を余儀なくされている。

被害を受けた宅地の共通点として、1)谷埋め、2)高い地下水位があげられ、これに長い継続時間の地震動が作用し、繰り返して揺すられたことが宅地被害につながっていると説明されている。筆者も仙台市宅地

審議会の委員として、宅地の耐震性能とその上に建つ住宅の耐震性能の問題や、災害復旧・復興過程における建築と土木の連携の必要性を指摘している。

3. 地震対策—先達の教え

昨年、還暦を迎えたこともあり、一区切りとして研究室のスタッフと卒業生を対象に「先達に学び伝える防災哲学・耐震哲学」というタイトルで地震防災に対する日頃の思いを語った。東日本大震災を一言で語るのには難しいが、敢えて簡潔に表現するならば、「細分化社会を襲った巨大地震」と表現できるのではないだろうか。学問の細分化、縦割り行政、進化した社会の弱点であるのは事実であろう。明治期に英国に留学し、進化に伴う社会の細分化によってやたら職業が増えているとして危惧したのは夏目漱石であり、「針で井戸は掘れない」（道楽と職業）と表現している。「防災の父」といわれる寺田寅彦は、文学上の師である漱石の影響を受けており、「人間社会の進化が分化につながり、一小部分の破壊が全体の破壊に成りかねないことを常に認識する必要がある。この点、再生能力がある下等動物に学ぶものもあろう」（天災と国防）と指摘している。寅彦は「災害の原因を科学的に解明するだけでなく、後難をなくすための策を考える必要がある」（災難雑考）とも言っている。恩師・志賀敏男先生も、常々「防災対策の要点は弱点の把握とその解消である」と言われ、「災害調査で大切なのは、壊れたものと壊れなかったものの際（キワ）を論じることであり」とも示された。

都市・建築の地震対策に関わる学問分野は、建築構造学の分野だけでも、RC造、S造、木造、地面から下は基礎構造と学問も細分化している。細分化を反映するかのよう基礎構造と上部構造のバランスの悪さ、構造躯体と非構造・設備のバランスの悪さも東日本大震災で浮き彫りになった。

4. 実験・観測と理論・解析の対応の必要性

東日本大震災は、多くの観測記録が得られた初めての巨大地震である。観測データが示す実大実験と理論解析の対応を検証することの重要性を改めて痛感している。1978年宮城県沖地震の直後に、恩師の志賀先生と酒を飲みながらの「地震工学の梯子」の話¹⁰⁾を思い出す。地震は断層破壊に始まって、地震波が基盤に到達し、堆積層により増幅して地表に達する。建物と地盤の相互作用を介して建物に力が入り、建物の応答、機器・配管系の応答、これが地震波の流れである。この流れに沿って実験・観測と理論・解析を各段階で突き合わ

せる。地震波は地盤を介して建物に入ってくる。雨のように空から降ってくるのではない。東日本大震災の観測データは敷地の地盤構造の影響を受けることを示している。筆者らが仙台市内に面的に展開した地震観測網は、耐震対策・地震対策にマイクロゾーニングの必要性を示している。

筆者は、震源から構造物まで、それも建物の躯体ばかりでなく非構造・設備の応答まで、実験観測と理論解析を研究と実務で経験している。学問が細分化した現在、横断的な経験を積むことができたのは、今は亡き武藤清先生・小堀鐸二先生、恩師の志賀敏男先生をはじめ多くの先輩方のお陰である。

また、実験・観測と解析・理論の対応で重要なのはモデル化論である。日本建築学会出版(1986年)の「建築構造力学の最近の発展」の第一章¹⁷⁾は印象的である。執筆されたのは日置興一郎先生である。先生がまとめられた図は今でも忘れられない。モデル化により拾われる現象、捨て去られる現象の把握、およびモデルで表現できる上限と下限を念頭に置く必要がある。

筆者らは、これまで、構造ヘルスマニタリング機能を有するリアルタイム地震観測システムの開発¹⁸⁾とその地域展開やモンゴル国への海外展開を行ってきている¹⁹⁾。観測情報のリアルタイム化による防災対策への直接利用や観測データを活用したシステム同定によるモデル化の精度の向上が学問の進歩をもたらし、社会貢献につながることを目指した活動の展開を行っている。

5. おわりに

東日本大震災という巨大地震を経験して改めて思うのは、分化する社会においてホーリスティックな地震対策が求められることである。総合的な地震対策の必要性を痛感している。そのためには、学問領域を超えた連携による「融合」の必要性であり、異なる要素技術の組み合わせにより新しいものを作り上げる「イノベーション」が求められている。弱点を補う自治体連携、国際連携による活動など、「連携」と「協働」が求められる。

また、サイエンスとエンジニアリングの関係やアートとデザインの間を考えるのも大切である。デザインがアーティスティックなセンスにより相手の要求に答えるのと同様に、エンジニアリングはサイエンスに基づき社会の要求に答える必要がある。何のために活動しているのかを考える必要がある。また、新しいアイデアは「科学と芸術の融合」にあり、レオナルド・ダ・ビンチ、寺田寅彦に憧れるのは当然かもしれない。

最後に、関係者の連携と協働により2020年の開催が決定した東京オリンピック、開催時に大地震が発生しないこと、想定される大地震に対する首都圏の地震対策が連携と協働によりなされることを望む。

参考文献

- 1)日本建築学会：大振幅地震動と建築物の耐震性評価—巨大海溝型地震・内陸地震に備えて—、2013.
- 2) Motosaka, M. : LESSONS OF THE 2011 GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE FOCUSED ON CHARACTERISTICS OF GROUND MOTIONS AND BUILDING DAMAGE, Proc. International Symposium on the 2011 Great East Japan Earthquake, pp.166-185, 2012.
- 3)日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、2011.
- 4)日本建築学会東北支部：東北地方太平洋沖地震災害調査報告、2013.
- 5)塩原等、西山功、目黒公郎、源栄正人：巨大地震に耐震は機能したか、日本建築学会・建築雑誌、vol.127(No.1637)、10-13、2012.
- 6)戸田芳雄、相澤一博、佐藤浩樹、源栄正人：震災から1年—改めて災害と学校について考える—、東京書籍・教室の窓、vol.36、4-11、2012.
- 7)源栄正人、柴山明寛：2011年東北地方太平洋沖地震の経験を踏まえて—早期地震警報システムの現状と課題—、第30回日本自然災害学会学術講演集、2011.
- 8)坂本拓也、磯部亮太、源栄正人、柴山明寛：宮城県大崎市と宮城県栗原市を対象としたアンケート調査に基づく東北地方太平洋沖地震と4月7日の余震(M7.2)の揺れの調査、JAEE日本地震工学会論文集、Vol.12(2012)No.5,133-142、2012.
- 9) Masato, M., and T. Tsamba : Investigation of High Acceleration Records at K-NET Tsukidate Station During the 2011 off the Pacific Coast Tohoku Earthquake, 2011-JAEE Annual Meeting, 24-25,2011.
- 10)田附遼太、源栄正人：2011年東北地方太平洋沖地震の観測データに基づく地盤特性の違いと建築構造物の非線形応答、AIJ大会学術講演梗概集、2013.

- 11)石井弘太郎、源栄正人：2011年東北地方太平洋沖地震で観測された長周期地震動の堆積盆地における累積応答量の比較、AIJ大会学術講演梗概集、2013.
- 12) Motosaka, M., M. Kamata, O. Sugawara and M. Niwa: Surface wave propagation analysis in the Kanto basin, Proc. of the 10th World Conference on the Earthquake Engineering, 2, 1105-1110, 1992.
- 13)源栄正人、ツェンバ ツォグゲレル、吉田和史、三辻和弥：東北地方太平洋沖地震における被災建物の振幅依存特性の長期モニタリング、JAEE日本地震工学会論文集、Vol.12(2012)No.5,117-132、2012.
- 14) Motosaka, M., and K. Mitsuji: Building damage during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Soils and Foundations, 52(5), 929-944, 2012.
- 15)源栄正人：天井落下被害を受けた屋内プール施設の屋根とつり天井の動的挙動に関する基礎的検討、第25回日本自然災害学会学術講演集、2006.
- 16)源栄正人：東日本大震災を体験して思う地盤震動研究の重要性、第39回地盤震動シンポジウム、特別講演、2011.
- 17)日本建築学会：建築構造力学の最近の発展(第1章執筆担当：日置興一郎)、1986.
- 18)源栄正人、本間 誠、セルダル・クユク、フランシスコ・アレシス：構造ヘルスマニタリングと緊急地震速報の連動による早期地震情報統合システムの開発、日本建築学会技術報告集 第14巻 第28号、669-674、2008.
- 19)源栄正人：構造ヘルスマニタリング機能を有する次世代早期地震警報システムの開発、東北大学災害科学国際研究所特定研究プロジェクト研究成果報告会資料、2013.



源栄 正人

1975年東北大学卒、鹿島建設株式会社での研究職、東北大学助教授・教授を経て現職、工学博士
専門分野：地震工学・耐震工学、地震防災。構造物と地盤の振動／波動問題に関する研究をベースに、地盤環境調和型地震対策や早期地震警報システムの研究に取り組んでいる。

耐震設計における設計地震動評価の課題

川島 一彦

●東京工業大学 名誉教授

1. はじめに

設計地震力の設定、構造物の地震応答の解析、構造部材の動的耐力・変形性能の評価の3点は耐震設計の基本である。構造物の地震応答の解析には、目的に応じて静的/動的の線形/非線形解析法が使用される。レベル2地震動を用いた静的非線形耐震解析には荷重ベース設計法、変位ベース設計法等、いろいろな方法が開発されてきている。近年、非線形動的解析もルーチンベースで設計に使用されるようになってきており、部材や材料の非線形性を正しくモデル化できれば、かなりのレベルで構造物の地震応答を解析することができる。

また、構造物の動的耐力・変形性能の把握は、構造部材に対する膨大な載荷実験や解析に基づいて、大枠の姿を描くことが可能となってきている。ただし、構造系システムとしての崩壊過程を含む強非線形応答解析のためには、今後、さらに研究を必要としている。

これに対して、強震動の評価には依然として大きな未知の事項と不確定性を残している。ここでは、現状の構造物の設計地震動評価の問題点とこれに対する工学的対応について橋梁を例に考えてみたい。

2. 耐震設計から見た地震動評価の問題点

過去の甚大な地震被害の多くは、設計地震力の過小評価もしくは構造部材設計の不備によって生じている。このため、耐震設計においては過小とはならない設計地震動の評価が重要である。しかし、地震動評価の精度は構造解析や構造部材設計の精度に比較して1桁以上低いのが現状であり、これが耐震設計全体の信頼性を支配している。

現在の耐震設計では、実測された断層近傍地震動や距離減衰式に基づいて設計地震動が定められている。一方、近年、地震学を中心として、震源断層を特定した地震動の推定法や確率論的地震動評価に関する研究が進展し、新たな知見が得られるようになってきている。これらの研究の進展は、従来知られていなかった地震動に関する各種の新たな知見を提供しつつある。

しかし、これらの新技術にはまだ研究途上の点が多く、耐震設計に使用するためにはいろいろな問題を抱えている。最大の問題は、耐震設計に必要とする精度

で設計地震動を定めるために必要な情報を提供するには至っていないことであり、このため、現状では、参考程度の情報に留まっている場合が多い。今後の地震動研究の進展を期待する立場から、新しい地震動評価法を構造物の耐震設計に利用しようとする際の問題点を示すと以下ようになる。

3. 震源断層を特定した地震動の推定

1) 設計地震力を求める上での問題点

震源断層を特定して地震動を推定するために、経験的手法、半経験的手法、理論的手法、ハイブリッド法等が利用可能となっている。

このうち、経験的グリーン関数法による半経験的手法では、耐震設計に重要な大規模地震の震源近傍での地震動の観測機会が低いため、適用性に問題が残る。半経験的手法では、一般に小地震による地震動として余震記録が用いられるが、耐震設計では大地震が発生する前に設計地震動を定めなければならない。しかし、想定する大地震と同様の発震機構をもつ理想的な小地震による記録が建設地点に存在することは稀である。また、建設地点が震源近傍である場合に、伝播経路が同一と見なせるためには想定地震の断層面上に震源を持つ複数の小地震が必要となるが、このような条件を満たすことは一般に困難である。

一方、理論的手法では、水平成層地盤近似を行うことができればモデル化に要する作業量が大幅に減るが、水平成層地盤近似による精度の低下が許容可能であるかを確認しておかなければならない。不整形性を考慮して地盤構造をモデル化しようとする、モデル作成の作業量が膨大となる。膨大な作業をすると、これに見合う精度があるかのように錯覚しがちであるが、実際には微細な地盤構造を見落とししたりして、短周期地震動になるほど推定精度が低下しやすい。

理論的手法は短周期地震動の推定精度が低いため、およそ1~2秒より長い周期帯に適用される。これに対して、統計的グリーン関数法は一般に表面波が考慮されないため、実体波が卓越する1~2秒よりも短周期帯に適用される。そこで、1~2秒を境に2つの手法による解析結果を合成するのがハイブリッド法である。しかしながら、1~2秒という周期帯域はまさに大部分の構

造物の応答や破壊に影響する周期領域である。ハイブリッド法では、この領域において精度の低下が生じ得ることを理解しておかなければならない。

2) 特性化震源モデルの問題点

地震調査研究推進本部地震調査委員会の震源断層を特定した強震動予測手法(レシピ)では、標準的な震源モデルの設定手法が示されている¹⁾。この手法では、震源内をアスペリティーとそれ以外の領域に分け、それぞれの領域内ではすべり、応力降下量、破壊伝播速度が一定であるとした均質な破壊が仮定されている。

これ自体が大きな仮定であるが、耐震設計に重要な巨大地震による地震動を推定しようとする、アスペリティーが大きくなり、アスペリティーから生じるパルス地震動の周期が長くなる。このため、特性化震源モデルでは、造物の応答や破壊に影響の大きい周期1~2秒の地震動が過小評価されることがある。

3) 震源を予め特定できない地震の存在

2000年鳥取県西部地震(M_j7.3)、2004年新潟県中越地震(M_j6.8)、2008年岩手・宮城内陸地震(M_j7.2)等、陸域で生じた最近の地震では、いずれも事前に地震の位置や規模が知られていなかった。また、沿岸海域の活断層によって生じた2005年福岡県西方沖地震(M_j7.0)、2007年能登半島地震(M_j6.9)、2007年新潟県中越沖地震(M_j6.8)といった地震も、発生前には全く警戒されていなかった。

このように、周辺で活断層と認定されていない地点に起こる震源が予め特定できない地震の存在が耐震設計では重要である。全国地震動予測地図では、震源が予め特定できない地震の最大マグニチュードはすべての地域で6.8以上とされている。さらに、活断層との対応が取れないM6.8を超える地震が発生した地域では、過去に起こった最大の地震マグニチュードを震源を予め特定できない地震の最大マグニチュードとされている²⁾。

このため、中国地方では2000年鳥取県西部地震によるM_j7.3が、また、北海道南西部と東北地方の日本海側では2008年岩手・宮城内陸地震によるM_j7.2が、それぞれ震源を予め特定できない地震の最大マグニチュードとされている。この状態は今後も継続され、活断層との対応が取れない最大マグニチュードを超える地震が発生するたびに、その地域の最大マグニチュードは引き上げられていくと考えられる。

ここで重要なことは、M_j7.2~M_j7.3の地震とは1995年兵庫県南部地震(M_j7.3)と同規模の地震だということ

ある。1995年兵庫県南部地震は、その強烈な地震動により多数の激しい被害をもたらした³⁾。このことからみると、現状の地震学のレベルを考えれば、耐震設計上、1995年兵庫県南部地震と同レベルの地震動が多く地域で起こると覚悟しておかなければならないという点が重要である。

4) 表層地盤の非線形性

地震調査研究推進本部の強震動予測では、広域の気象庁震度分布の算出が主目的となっていることから、表層地盤の影響は経験式や等価線形解析によって考慮されているだけである。造物の耐震設計に重要なレベル2地震が起こった際には、地震動強度が大きいため、表層地盤は大きく塑性化するはずである。工学では当然の地盤のせん断剛性や減衰定数のせん断ひずみ依存性を考慮した非線形解析が地震調査研究推進本部の地震動には取り入れられていない。沖積堆積層の厚い地域では、大きな誤差を生じていると考えられる。

5) 解析手法の精度が検証されていない

レシピによる地震動の推定精度は、過去に起こった地震による地震動と照合し、妥当性が検証されていると言われている。しかし、レシピによって推定された地震動が造物の耐震設計に必要なレベルの精度を持つかという視点から見ると、これには大きな問題がある。

耐震設計で地震動が実測値とよく一致すると見なすためには、(1)1箇所だけでなく、耐震設計に影響を与えるレベル以上の強度を持つ複数の観測点で、(2)推定された地震動と実測地震動間で、波形特性とその強度レベルがよく一致し、(3)線形及び非線形応答スペクトルもよく一致していることが求められる。耐震設計では、推定された地震動と実測された地震動がほぼ同程度の非線形応答を与えるかが重要であり、このためには、上記の3条件を同時に満足することが絶対条件である。

しかし、著者は現在までに上記の3条件を満足する実証例を見たことがない。たまたま波形の特徴が合っている例もあるが、一部だけの地点であったり、ほとんど波形としての特徴を捉えていない箇所があったりする。ほとんどの例は、気象庁震度階と比較すると整合しているとか、スペクトル軸と周期軸を両対数グラフで表わした速度応答スペクトルが合っているように見える箇所があるといったレベルである。両対数グラフで解析精度を説明しようとする自体が、耐震設計に用いるために必要な精度から1オーダー以上低いレベルでしかないことを如実に示している。

地震動の推定結果が実測記録とよく一致した場合には、その結果は論文や報告書として公表され、人の目に触れやすい。しかし、この背後には、一致度が低い解析結果が多数存在することは想像するに難くない。残念ながら、現状では、レシピによる地震動評価は耐震設計に使えるレベルではなく、参考にするというレベルにあると考えられる。新しい研究として期待して見る目と、実用的なレベルにあるかを評価する目は異なるのである。

4. 確率論的な地震動評価

(1) 地震パラメータの推定精度

確率論的地震動評価では、どの程度の精度で地震規模や平均再現期間、最終発生年を知ることができるかが重要である。当然、これらの推定には大きなばらつきがある。

例えば、陸域の地震では、過去の地震発生年の他、断層トレンチ調査から過去の活動履歴を知り、再現期間が推定される。活動期間が数百年～数千年以上と海域の地震よりもはるかに長い地震が多く、再現期間の推定には大きな幅が生じる。わが国で最も発生確率が高いと評価されている神縄・国府津-松田断層帯を例にとると、今後30年間の発生確率は0.2~16%、今後100年以内では1~50%と、非常に大きな幅をもっている。また、推定されたマグニチュードの幅も大きい。これは、確率論的地震動評価を活用しようという観点からは、大きなバリアーとなっている。

また、断層がつながっている場合には、どの範囲の断層が一度に破壊するかの判断や、周辺に複数の断層が存在する場合に、これらが単独の断層か、地下深部では同一の断層かの見極めが困難である。したがって、地震規模や再現期間の推定には地震学や地質学の専門家もなかなか決め手を欠き、推定できたとしても大きな幅でしか評価できない場合が多い。

以上から見ると、確率論的な地震動評価を耐震設計に使用する際には、地震学や地質学的な精度と耐震設計で求めている地震動強度の精度には大きな違いがあることをよく認識しなければならない。地震学や地質学で対象としている何千年、何万年の時間スケールは構造物の耐用年数とは全く比較にならないからである。

(2) その他の問題点

距離減衰式のばらつきの大きさは言わずもがなであろう。多数の強震記録が得られ、多数の距離減衰式が提案されてきたが、ばらつきの大きさはほとんど減少していない。距離減衰式による推定値には簡単に2倍

程度の差が生じることを覚悟しなければならない。また、断層の上盤と下盤における距離減衰特性や応力降下量の違い、地域的な距離減衰特性の違い等も考慮されていない距離減衰式が多い。

また、確率モデルの限界の問題もある。例えば、近畿地方では南海地震の発生が近づくにつれて内陸地震も活動的になり、南海地震の発生後は静穏期となることが指摘されているが、こうした点は現在の確率モデルでは考慮されていない。

(3) 確率論的な地震動評価をどのように活用すべきか

以上のような問題と同時に、確率論的地震動マップの最大の問題点は、全国的に同じ発生確率を持つように求めた確率論的地震動を構造物の耐震設計における設計地震動として使用してよいのかという点である。

確率論であるため、発生確率の高い地震による地震動は強調されるが、発生頻度の低い地震による地震動は強調されず、解析結果に大きな影響を与えない。このため、確率論的地震動評価では、建設地点近くに大きい地震を発生する断層があっても、この地震の再現期間が長ければ確率論的地震動は小さな値としてしか評価されない。もちろん、構造物の耐震性に大きな影響を与える地震が過去にいつ発生し、次の地震の発生までにどの程度の期間があるかを評価することも可能であるが、前述したように、地震の最終発生年や平均発生間隔の推定はなかなか困難であり、このような点を考慮に入れた設計地震動の評価は一筋縄にはできない。

たとえば、地震調査研究推進本部地震調査委員会による全国を概観した地震動予測地図によると、日本海側や北海道、九州等では、確率論的な地震動は小さいレベルでしかない。したがって、事実上、これらの地域では構造物の耐震設計をしなくてもよいと言っているも同然である。もし、確率論的地震動評価に基づいて構造物を耐震設計したとした場合に、運悪く低頻度の大地震が起こると、これらの地域では耐震性を確保できない可能性がある。

確率論に基づいて、全国一律に同じ確率となるように地震動強度を定めておけば、仮に、低頻度の大地震が起こり、設計地震動が過小で構造物が倒壊しても、これをやむを得ないと受け止める国民的コンセンサスがあればよいが、筆者にはそのようには思われない。わが国は地震国であり、たとえ発生頻度が低くても、地震の影響を事実上考慮せずに構造物を建設してよい地域は存在しないという認識が国民には根強く存在すると考えられる。

確率論的地震動マップをどのように利用するかに関

しては、現状では固まった考え方はない。確率論的地震動マップをそのまま使用している国もある。たとえば、米国ではUSGSが定めた確率論的地震動マップをそのまま用いて地震動の最大加速度を求め、これに加速度応答スペクトルの形状関数を乗じて設計加速度応答スペクトルを求めている。ただし、カリフォルニア州交通局では、このほかにM8クラスまでマグニチュードごとの加速度応答スペクトルを与えており、これも併用している。

ヨーロッパのEC8においては、地震を想定して地震動を評価する方式と確率論的に地震動を評価する方式が用いられている。実際には、後者の方が広く利用されているようである。確率論的に地震動を評価する方式は、米国やヨーロッパのように、地域的な地震活動がほとんどゼロの地域から高い地域まで変化している国で用いられている。

一方、わが国では、確率論的地震動マップをそのまま設計地震力の算定に使用するのではなく、地域ごとの地震動強度を評価する際の地域マップとして利用されてきている。建築物や土木構造物の多くでは、1978年建設省新耐震設計法で開発された地域マップをもとに、安全側に全国を3地域に区分し、地域別補正係数を基本設計震度に乗じることにより設計地震力を求めるという方式が採用されてきた。

地域別補正係数は、地震活動が高い地域での値を1.0とし、地震活動が低い地域での値を建築物では0.8、土木構造物の多くでは0.7とされている。これは、確率論的地震動マップから求められる地域差よりも大幅に小さい値である。前述した震源を予め特定できない地震の規模がM_j7.2とか7.3になる地域が存在するという事実は、構造物に影響のある地震の発生確率が低くても、構造物には最低限の耐震性を付与できるように設計地震力に下限値を設けておく必要性のあることを如実に示している。

構造物の耐震性を確保するためには、どの地方であろうと、その地方に生じる最大地震動を用いるべきだとの意見がある。一方、再現期間に係わらずその地方に生じる最大地震動を構造物の耐震設計に使用することは過大であるとの意見もある。そこで、地震の発生確率を評価して、これにより設計地震力を増減すると同時に、構造物が倒壊に至ることのない最小レベルの地震動は確保しようという工学的判断が、現在までの耐震設計の智恵として、地域区分及び地域別補正係数という形で耐震設計に反映されている。この判断は、間違いなく、現在までのわが国の構造物の耐震性を確保するために有効に機能してきたと考えられる。

5. 設計地震動設定に使用すべきでない気象庁震度

気象庁震度階は、地震の揺れの強さを表わす指標として、全国に速報できる体制が整っている唯一の指標であり、国民にもよく知られている。しかしながら、これを構造物の設計地震動の設定に用いることは適切ではない。気象庁震度階の問題は、これがいろいろな使われ方をしているためである。例えば、「この地震によるある地点の震度は5であった」という場合には、気象庁震度は地震動強度を表わしている。一方、「ある地点では、震度6相当よりも被害が小さかった」という場合には、気象庁震度は被害の度合いを表わしている。

このようになったのは、気象庁震度階が体感やものの壊れ具合を目安に定められてきた指標であるためである。1996年以前は震度IVまでは体感をもとに震度が決められ、震度V以上は構造物の損傷度合いを基本に定められていた。1996年以降は計測震度をもとに震度が決められるようになり、ある震度が観測された場合、その周辺で実際にどのような現象や被害が生じるかを「解説」として示している。

たとえば、震度6強の際の木造建物は、耐震性が高い住宅には壁などにひび割れ、キレツがみられることがあり、耐震性が低い住宅では傾くものや倒れるものが多くなると解説されている。しかし、実際の構造物の被害はこの通りとはならない。2008年岩手・宮城内陸地震では気象庁震度は6強であったが木造家屋の倒壊率はゼロであった。また、2011年東北地方太平洋沖地震では気象庁震度が7であった築館ではわずかな被害しか生じていない。

これは、工学的に考えれば当然のことである。すべての構造物が同じ揺れ方をし、耐力や変形性能が同じであれば、地震動強度に応じて構造物の被害度は一義的にきまる。しかし、構造物の応答と耐力・変形性能はいろいろ異なり、木造建物一つをとってみても建設年代や構造、形式によって大きな違いがある。この結果、耐震性が異なるのはあたりまえのことである。

構造物の被害は気象庁震度の単なる目安なのであるが、これが工学的に問題となるのは、「気象庁震度が6強であるのに、このような被害が出るのはおかしい」といった指摘が出されたときである。筆者は、1995年兵庫県南部地震の際、このような指摘を受け、気象庁震度につくづく閉口したことがある。気象庁震度はあるフィルターを介して地震動強度を指標化したものであり、気象庁震度を地震動強度を表わす指標の一つと見なすことには問題はない。しかし、地震動強度だけでなく、構造物の応答や耐力・変形性能の関数である

構造物の被害にまで気象庁震度を適用すると、致命的な誤解を与えるということである。

このため、ある構造物が気象庁震度6強に耐えるとか、震度7に対しても倒壊しないといった使い方は工学的には厳に慎まなければならない。特に、上限のない震度7に対して構造物が安全であるとは誰にも言えない。構造物の耐震性は、線形や非線形応答スペクトル等で表わした構造物の応答に係わる物理量に基づいて評価すべきであり、安易に気象庁震度を使用することは避けなければならない。

著者は、気象庁震度階を否定するものではないが、気象庁震度しかマスコミ等で報道されないという状況には危惧を抱いている。気象庁震度階が存在するからこそ、いつまでも耐震設計の目的や設計で考慮されている地震動強度に対する国民の理解を深められてこなかったことに問題があると考えている。社会に対して気象庁震度しか通用しないから、気象庁震度をベースに設計地震動や構造物の耐震設計の理念を説明するという方向に追い込まれずに、応答スペクトル等の工学的な物理量を基本に構造物の耐震性に関する社会の共通認識を作って行かなければならない。

6. 設計地震動の設定と工学的対応

今後の構造物の耐震設計は、震源断層を特定して推定した地震動や確率論的な地震動評価等、最新の知見を参考にしつつ、近年急速に蓄積されてきた信頼できる強震記録を活用して静的及び動的な非線形解析の方向に向かうべきだと考えられる。この際、設計地震動の設定に精密な方法を採用したからといって、これが構造物の耐震性の向上に直結する訳ではないことを理解しておく必要がある。

耐震設計に有益なレベルの地震動を解析するためには多くのパラメータが必要であり、専門家の参画が不可欠である。これが可能なのは特に重要な構造物であり、一般の構造物では、耐震設計の全体像をよくとらえて、入力地震動の設定だけにとらわれることなく、構造設計にバランスの取れた配慮を加え、対象構造物をいかに耐震的にするか、予期しない強い地震動が生じた場合に備えてどのような構造的配慮をすべきかをよく検討しておくことが、トータルとして耐震性の高い構造物を建設するために重要である。

このための智恵としては、キャパシティーデザインに代表されるように、設計地震動を上回る地震動が作用しても、構造物の耐震性が大きく損なわれないように工夫することが有効である。キャパシティーデザインとは、階層化されコントロールされた

各レベルの損傷の積み重ねにより、予め想定した以外のモードで破壊が生じることを防止し、構造物の崩壊を防ぐという考え方である。

近年建設された構造物では、1995年兵庫県南部地震の際に構造部材の変形性能やせん断耐力不足のために大被害を受けたような構造物はなくなってきたと考えられる。その上で、キャパシティーデザインに基づき、予期しない破壊モードが生じないように、塑性ヒンジの位置と変形性能を適切に評価することが重要と考えられる。

また、免制震構造の採用によるエネルギー吸収性能の向上も、構造物の耐震性を大きく向上させる。

設計地震動を上回る地震動に対する構造的な余力を正しく知るためには、破壊に至るまでの非線形領域の応答を推定できる技術が重要である。今後とも、実験、解析を含めて、構造系システムの耐震性向上技術の向上を目指していくことが重要である。

7. 道路橋の耐震設計に用いられる設計地震力

最後に、現在の道路橋の耐震設計に用いられている設計地震動を示しておきたい。道路橋の耐震設計では、1990年から従来の線形解析用のレベル1地震動に加えて非線形解析用のレベル2地震動が取り入れられてきた⁴⁾。これは1923年関東地震の際の東京で生じたであろう地震動を海洋性の大規模地震による地震動と見なして定められたものである。これに地域別補正係数を乗じて全国に適用されてきた。現在のレベル2タイプI地震動の原形である。地域別補正係数としては全国を3地域に区分し、補正係数の値はA地域では1.0、B地域では0.85、C地域では0.7と、地域的に大きな差を設けないという方針で定められている。

さらに、1995年には兵庫県南部地震による神戸での地震動をもとに低頻度のM_J7クラスの直下型地震動としてレベル2タイプII地震動が定められた⁴⁾。この地震動もレベル2タイプI地震動と同様に、地域別補正係数を乗じて全国に適用されてきた。

また、2012年には新しい距離減衰式⁵⁾を用いて従来のレベル2タイプI地震動の見直しが行われた⁷⁾。これにより、現在使用されているレベル2タイプI及びタイプII地震動の標準値を示すと、それぞれ、図1、図2の通りである。

ただし、距離減衰式による地震動の推定結果によれば、東海地震、東南海地震、南海地震等の大規模な地震の影響を強く受ける可能性がある地域では、これよりも強い地震動となる可能性がある。このため、レベル2タイプII地震動に対しては、従来の地域区分を見

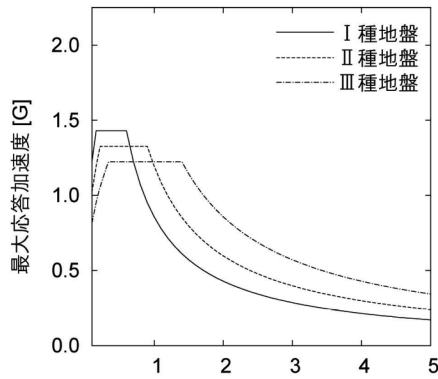


図1 レベル2タイプI地震動の標準加速度応答スペクトル⁷⁾

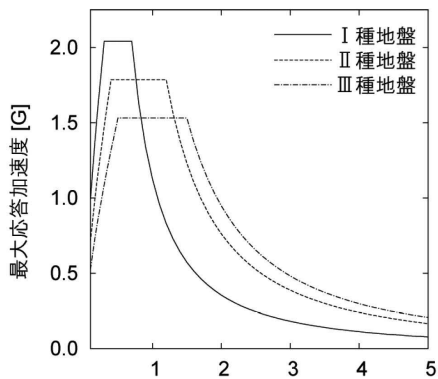


図2 レベル2タイプII地震動の標準加速度応答スペクトル⁷⁾

直し、A地域をA1、A2に、また、B地域をB1、B2に、それぞれ2区分した上で、地域別補正係数をA1及びB1地域では1.2、A2及びB2地域では1.0、C地域では0.8としている。なお、レベル1地震動及びレベル2タイプII地震動に対する地域区分と地域別補正係数の値は従来通りである。以上による地域区分を図3に示す。

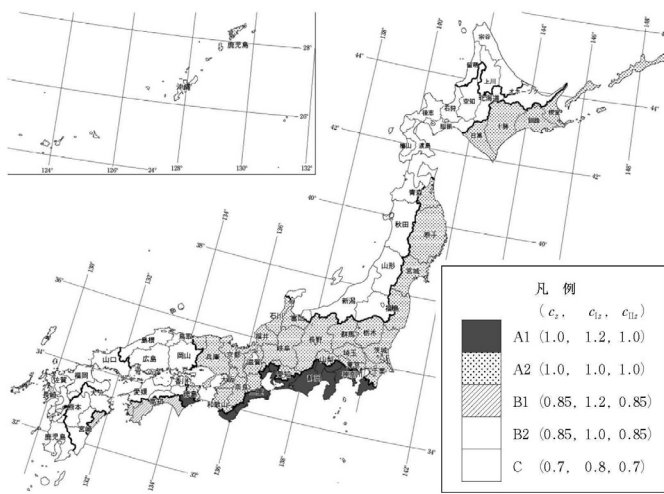


図3 地域区分と地域別補正係数⁷⁾

8. まとめ

大規模地震による地震動や断層近傍地震動については、まだ未知の事項がいろいろ残されている可能性があり、今後とも将来の地震を経験するにつれて構造物の耐震設計に考慮すべき設計地震動も変更されていくと考えられる。耐震設計に際しては新しい研究成果を取り入れていくことが重要であるが、一方、研究途上で信頼性が十分検証されていない知見を現実の耐震設計に取り入れることには問題がある。

本文は実務設計に使用できるかという観点から、新しい地震動研究に対する見方を示したものであるが、決して新しい地震動研究を否定するものではなく、将来の研究に対する期待を示したものと受け取って頂きたい。

なお、本文の多くは参考文献⁸⁾に基づいている。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図、2009。
- 2) 防災科学技術研究所：全国地震動予測地図作成手法の検討、防災科学技術研究所研究資料、2009。
- 3) Kawashima, K. and Unjoh, S.: Damage of highway bridges in the 1995 Hyogo-ken-nanbu earthquake and its impact of Japanese seismic design, Journal of Earthquake Engineering, 505-541, 1(3), 1997。
- 4) Kawashima, K.: Seismic design of bridges after 1995 Kobe earthquake, Journal of Disaster Research, 1(2), 262-271, 2007。
- 5) 片岡正次郎、佐藤智美、松本俊輔、日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式、土木学会論文集A、62(4)、740-757、2006。
- 6) 片岡正次郎、松本俊輔、日下部毅明、遠山信彦：やや長周期地震動の距離減衰式と全国の地点補正倍率、土木学会論文集A、64(4)、721-738、2008。
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、2012。
- 8) 土木学会：地震動研究の進展を取り入れた土木構造物の設計地震動の設定法ガイドライン(案)、土木学会地震工学委員会、2009。



川島 一彦

1972年名古屋大学修士課程修了後、建設省土木研究所配属。地震防災部耐震研究室長等を経て、1995年東京工業大学教授。2013年名誉教授、(株)長大顧問、川島地震防災研究室室長、工博、専門は土木構造物の耐震・免制震設計

防潮堤とまちづくり

平野 勝也

●東北大学 災害科学国際研究所 准教授

1. はじめに

防災施設というのは、筆者も専門とする土木の景観・デザインに取り組むものにとって、そもそも厄介なものである。河川・海岸堤防、砂防施設、法面保護工、治水ダムなど災害を防御するためだけに造られるこれらの構造物は、いざ災害時には大きな力を発揮するが、それ以外の日常時には、その巨大さ、堅牢さ故に、日常風景の中に織り込んでいくのは至難の業だからである。今回の津波被災地でのまちづくりも、防潮堤という巨大な存在をどのように街に織り込むことができるのか、安全で魅力的な街をつくる上での大きな課題となっている。

「あんなに高い堤防だとまちづくりがおぼつかない。低く設定するやり方はないのか？」そう津波工学の専門家に問うたことがある。しかし、その答えは「高くても、それを前提に新しい風景の価値を造るのが景観の仕事ではないのか」というものであった。一見すると正しい見解であるが、こんな喩えはどうだろうか。L1津波に耐えるまちづくり（現実にはL2津波にも耐えるまちづくりが進んでいる）というのは、L1地震動に対する建築物の耐震設計と相同である。さしずめ、先の主張は、建築物の耐震設計において、「工学的に耐震ブレースが最も効率的だから、それ以外は認めない。縦横無尽の耐震ブレースありきで、建築空間をデザインせよ。それができてこそ建築デザインである。」といったことを言っていることになる。実際には、気の利いた建築物の耐震設計においては、トイレや水回りと言った必然的に壁を必要とする箇所に構造壁を置き、それを効果的に用いて、その他の空間を軽やかに演出するといった構造設計が普通に行われている。隣の芝は青く見えるものだが、土木工学は、それ程までにエンジニアリングから遠ざかってしまったのかと哀しい気持ちになる。

いずれにせよ、そうしたメリハリある構造設計のような工夫を施すことは、今回の復興まちづくりにおける「多重防御」に相当するのではないかと思うが、その発想は、残念ながら、災害危険区域、二線堤と言った形で、L2防災のためには使われているが、湾口防波堤を除き、防潮堤を絡めたL1防災においては全く使われず、防潮堤のみでの防御となっている。



写真1 完成した防潮堤(仙台空港付近)

2. 批判に晒されはじめた防潮堤

(1)本格的に進み始めた防潮堤事業

そうしたまちづくりとの難しさを孕んだ防潮堤事業が、いよいよ本格化してきている。写真1は、仙台海岸に完成した防潮堤である。被災し、荒涼とした風景の中に延々と続く真新しい白いコンクリートブロックで覆われた防潮堤は、異様と言っても過言では無い風景を創り出している。もちろん、デザインが皆無というわけではない。調整コンクリート部分をリブ的に立ち上げ、縦方向のリズム感を出し、長大な印象の緩和を行うなど、資材不足の中で、様々な工夫が施されている。とはいえ、完成した防潮堤を取材した記者達が、一様に批判的、ないしは皮肉を込めた記事を書くのも致し方ないのではないかと思う。それほどに強烈な風景である。しかし、それは皮相的な評価でもある。もとよりこの海岸には、海岸保安林である立派な松林の海側に、今回完成した新堤防よりも1mだけ低い防潮堤が同じ延長で存在していた箇所である。風景の観点から見れば、防潮堤事業と並行して急ピッチで進められている保安林の復旧事業も含めて、被災前の風景へと元に戻す仕事でしかなく、風景論としては興味深い、まちづくりとの強い相克はそこにはない。

(2)防潮堤事業の抱える問題

とはいえ、防潮堤に対する批判は、先述した素朴な印象に基づく批判だけではない。大きく三つの論点があるように思われる。一つには「防潮堤は人命を守るのか？」という問題、もう一つは、「事業性の問題」、さらには、「まちづくりとの相克」である。

人命に関する問題は、「海が引くのが見えたから避難ができた。防潮堤で海が見えなくなると、避難しなくなる」という批判である。実際、立派な防潮堤があったがために生まれた悲劇もあった。しかし、その一方で、「普代村の奇跡」と言われるように、周辺から反対されながら造られた巨大防潮堤が、完全に村を守り切ったという事例もある。防災事業が防災に貢献すればする程、安心感が生まれるのは、それこそが事業目的である以上、当たり前である。この点は、今すぐ答えが出る問題ではなく、防災事業が本質的に抱える矛盾と言っても良いだろう。

事業性の問題の論点は単純である。被災地で進む事実上のL2津波防災を行うまちづくりによって、低平地に住宅は皆無であるケースが相当数ある。そうした低平地を守るために果たして防潮堤は投資に見合った効果があるのかという批判である。防災事業の性質から言って、効率性の観点だけで事業性を評価してはならないことも確かであるが、そうした公平性の観点を含めたとしても、過剰投資になるのではないかと思える小漁村集落も多い。何らかの線引きが必要なのではないかと痛感している。

最後の、まちづくりとの相克が最も重い課題であろう。その課題と解決については本稿の主題でもあり、次章で整理し、述べることにする。

3. 防潮堤とまちづくりの相克

冒頭でも述べたように、今回整備される防潮堤はL1津波が対象とはいえ、高い。特にリアス式海岸部においては、地域によっては14mを越える海岸もある。ほとんどダムと言える様な防潮堤と、これから漁業×水産加工×観光による6次産業で、地域の活性化を狙う多くの被災地にとっては、観光資源としての風景、漁業資源としての海浜を防潮堤に奪われることは、その街の存亡に関わってくる問題となってしまう。つまり、街を守るための防潮堤が、その街を真綿で首を絞めるように将来性を奪っていく可能性があるのだ。そうした危惧を住民が持たざるを得ない防潮堤計画がある箇所については、防潮堤に対する強い反対意見がでることも当然と言えるし、事実、宮城県気仙沼市では、そのような強い反対の声が上がっている。

筆者が関わっている宮城県石巻市の旧北上川は、江戸時代より川湊として栄えてきた。そのため河岸まで家が建ち並び、堤防を整備することができないという治水、高潮、津波対策上の問題を抱えたままであった。

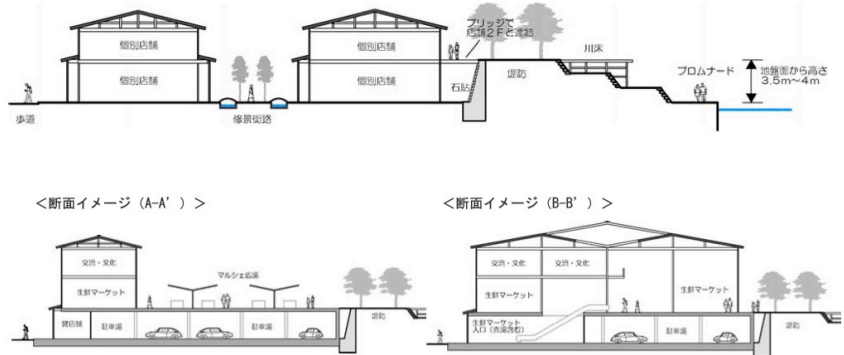


図1 石巻市街地堤防に対する地元からの要望(堤防の段差を建築で解決する)

しかし、その一方で、河岸に家が建ち並ぶその風景は、全国に比類の無い独特で魅力的な佇まいであった。今回の津波被災で、旧北上川を所管する国土交通省は堤防の建設を決定したが、当初はそうした河岸の魅力や川と共に生きてきた地元の人々からは、被災したにも拘わらず、反対の声があがった。

様々な議論が巻き起こったが、災害に強いまちづくりのために堤防は必要だという意見、堤防沿いに街並みを作り上げればよいというアイデアにより地元はその実現に向けて要望書を出すに至った(図1)。通例では難しいそうした河川堤防とまちづくりの一体的なデザインについて、地元と約束をし、実現手法を責任持って模索した国土交通省北上下流河川事務所の熱意により、形を変えつつも、実現に向けて動き出している。

こうした、技術的、行政的な解決策を丁寧に模索しなければ、反対運動は収まらないであろうし、収まったとしても、その街の将来は不安なものになってしまう。それだけの責任が、防災事業にはあるのだ。

4. おわりに

防潮堤が、いまだ問題となっている箇所も多い。限られた時間の中で、最大限、叡智を集め、土木が忘れがちなエンジニアリングマインドとともに、まちづくりとの相克を解いていかなければならない。いまだ被災地は、そういう状況下にある。



平野 勝也

1993年東京大学大学院修了。建設省を経て、1995年より東北大学助手。2012年より現職。博士(工学)専門：土木景観・まちづくり

ジョン・ミルン展での特別イベントの報告

齊藤 大樹

●豊橋技術科学大学 教授

1. はじめに

6月11日から9月8日の間、国立科学博物館・上野本館において、ジョン・ミルン没後100年特別公開の展示が行われた(主催：国立科学博物館)。ジョン・ミルンは日本地震学会を創設し、ミルン水平振り地震計(重要文化財)の開発をするなど、日本の地震学の基礎を築いた人物である。今回の企画に際しては、東京大学地震研究所、日本地震学会とともに日本地震工学会も共催として加わった。

7月13日には、日本館1階中央ホールにおいて、特別イベント「専門家によるスペシャルトーク」と題して、本学会の名誉会員・スペシャルアドバイザーでもある東北大学名誉教授・柴田明德氏とノンフィクション作家の森本貞子氏による講演会が行われた。また、講演会のあとは日本地震学会会長・東京大学地震研究所教授の加藤照之氏の司会でジョン・ミルンゆかりの方々とのトークが行われた。

2. 特別イベントの様子

特別イベントの開催にあたり、駐日英国大使館科学技術部長エリザベス・ホグベン女史から挨拶がなされた。ジョン・ミルンの没後100周年にあたっては母国のイギリスにおいても様々な企画が予定されているそうである。



写真1 エリザベス・ホグベン女史の挨拶



写真2 柴田明德氏の講演



写真3 会場の様子(立ち見が出るほどの人が訪れた)

「専門家によるスペシャルトーク」では、最初に柴田明德氏より「地震学者ジョン・ミルン没後100年よせて」と題する講演が行われた。ミルンが後半生を過ごしたワイト島に柴田氏が訪問されたお話から始まり、ミルンが1880年の横浜地震をきっかけに日本地震学会を設立したことや、1891年濃尾地震のあとに出版した報告書「The Great Earthquake in Japan, 1891」のことなど、日本の地震学・地震工学に果たしたミルンの業績について解説された。

森本貞子氏は、ミルンの妻、トネの生涯について長年にわたり調べられ、「女海溝—トネ・ミルンの青春



写真4 森本貞子氏の講演



写真5 ウィリアム・トワイクロス氏（左）と加藤照之氏（右）



写真6 トネの甥のご子息である明石乗二氏

を執筆されている。「ジョン・ミルン夫人トネの魅力的な生き方」と題する講演では、トネがミルンと出会ったなれそめや、明治初期の函館の様子、当時の女性の生き方などについてお話しされた。トネは英国から帰国後に甥の明石信道氏（早稲田大学教授、建築家）に建物の勉強を勧めたというエピソードも紹介された。

お二人の講演のあと、加藤照之氏の司会でトークが行われた。会場には、トネの甥の明石信道氏のご子息である明石乗二氏と、ジョン・ミルンの親族のウィリアム・トワイクロス氏が出席され、今回のイベントで感動的な対面が実現した。

3. おわりに

ジョン・ミルン展に先立ち、日本地震工学会と日本地震学会が共同で、ジョン・ミルン没後100年を記念した論説を柴田明德氏と泊次郎氏（東京大学地震研究所・特別研究員）に依頼し、それぞれの会誌とニュースレターに同時掲載する企画が行われた（筆者は当時の会誌編集委員長を務めた）。

なお、ジョン・ミルンの母国である英国でも、多くの記念行事が行われた。4月15日には、ゆかりのワイト島ニューボートの町で、多くのミルン関連資料を持つカリスブルック城博物館においてミルン特別展が開催され、開幕式に日本駐英大使・林景一氏が出席された。また、7月31日には、博物館内にミルン・トワイクロス記念室が開設され、ウィリアム・トワイクロス氏の制作したミルンの伝記ドキュメンタリーが常時上映されることになった。同日の夜には、セントポール教会で100年記念祭が催され、多くの人たちが集まってミルンを偲び、そこにトネが建てたミルンのお墓にお参りした。7月31日の行事には、日本から加藤照之氏、森本貞子氏及び柴田明德氏が参加し、ミルンがつなぐ日英の交流を深めた。

今年はジョン・ミルン没後100年、関東大震災90周年、鳥取地震70周年など、地震学・地震工学において、過去を振り返る節目の年である。今回のイベントでは、ジョン・ミルンとそれを支えた妻トネの情熱的な生涯に触れることができた。会場には、立見が出るほどの観客が訪れ、関心の高さを伺わせた。なお、9月6日には、天皇、皇后両陛下がジョン・ミルン展をご鑑賞されるという嬉しいニュースがあった。

謝辞

本原稿を書くに当たり、加藤照之先生、柴田明德先生からは貴重な示唆を頂きました。ここに感謝します。

関東地震90周年記念シンポジウム—過去に学び、未来に備える—

加藤 研一／福喜多 輝

●小堀鐸二研究所 ●清水建設技術研究所

1. はじめに

標記シンポジウムが以下の日程で開催された。当日は300名近くの参加者があり、会場を交えた活発な議論が行われるなど、たいへん盛況であった。会誌を通して当日の様子を会員の皆様にお伝えする。

日時：平成25年(2013年)8月27日(火)

(午前)巡検：関東大震災を歩く

(午後)記念シンポジウム

場所：東京都江戸東京博物館ホール

主催：日本地震学会、日本地震工学会、歴史地震研究会

後援：東京都、墨田区、NHK

対象：社会人、学生(大学生・高校生)

参加費：無料

2. 巡検：関東大震災を歩く

吉川弘文館から出版されている「関東大震災を歩く：現代に生きる災害の記憶」の著者である名古屋大学・武村雅之氏の解説のもと、横網町公園とその周辺を10:00～12:00にかけて巡検した。具体的には、江戸時代から続く勧進相撲の地としても有名な回向院を訪れ、次に横網町公園内の復興記念館などを見学した。定員の約20名が参加し、武村氏による丁寧なご説明に熱心に聞き入っていた。普段は見逃しそうな碑に、災害の記憶が残されていることを改めて実感した。残暑が厳しかったものの、時折、隅田川から秋を思わせるさわやかな風が吹くなか、昼前に横網町公園にて解散となった。



関東大震災を歩く：回向院での巡検風景

3. 記念シンポジウム

3.1 主旨説明

主催者側の挨拶として、日本地震学会の加藤照之会長(東京大学地震研究所)より主旨説明がなされた。関東地震発生から90周年を迎えた今、関東地震がどのような地震であり、なぜ東京で大きな災害となったかを最新の知見を交えつつ学ぶことは、来るべき首都圏直下の地震に備えるために重要である。また、一昨年の東日本大震災においては、東京湾沿岸も大きな災害に見舞われた。そこで、大都市の地震に対する脆弱性や問題点を明らかにすると共に、それを克服して地震災害を少しでも軽減するための知恵を探るために、本シンポジウムを企画したとの主旨説明があった。



講演を待つ会場風景

3.2 第一部 基調講演

「関東地震のメカニズムと災害」と題し、武村氏による基調講演が行われた。震災は地震のせいではなく、地震は震災のきっかけを与えているだけである。震災の大きさは人間の対応で大きく変わるため、今の首都圏を関東地震が襲った時に、どのような被害になるかを過去の事実から真剣に検討すべきと強調された。

3.3 第二部 講演会及びパネルディスカッション

(1) 講演会

引き続き、4名の講師による講演会が開催された。

名古屋大学・廣井悠氏は「関東地震と都市火災について」と題し、当時の出火・延焼・避難状況の概要を述べた後、現在は当時以上の混乱が起きる可能性がある。過去の災害教訓に学んで避難場所の安全性の再検証や、避難計画・行動の再確認の重要性を指摘した。

東京電機大学・安田進氏は「関東大震災と東日本大

震災における液状化被害の比較」と題し、被害地域が必ずしも重ならないこと、首都圏直下地震では両震災と液状化被害の様相が異なる可能性を指摘した。

東京都総務局・村山隆氏は「首都圏直下地震の想定と東京都の防災対策」と題し、被害想定で明らかになった課題と東日本大震災の教訓を踏まえて、平成24年11月に修正した東京都地域防災計画(震災編)を紹介した。木密地域やゼロメートル地帯の対策、危機管理体制の強化・充実、被災者の生活を早期に再建する対策を講じていくと述べられた。

最後の講演として、NHK解説員・松本浩司氏は「首都圏直下地震と報道対応」と題し、渋谷の放送センターの機能が停止した場合は大阪放送局やさいたま放送局がバックアップする体制の整備を進めていることを紹介した。また、東日本大震災で役に立ったメディアはラジオ(51%)とテレビ(21%)であるが、携帯やカーナビなどのワンセグ(19%)やソーシャルメディアなどのインターネット(7%)の利用も広がったのが新しい流れと指摘した。

(2) パネルディスカッション

講演者と加藤氏が登壇し、松本氏の司会のもと、「首都直下地震に備えるため、今何が必要なのか、わたしたちひとりひとりにできることは何かを考える」というテーマでパネルディスカッションが行われた。

まず、加藤氏より過去に大地震が繰り返し発生していること、地震発生のメカニズムを考慮すると首都直下地震の切迫性は高いと言わざるを得ない、とのコメントがあり、それに対して行政・専門家が今急ぐべきことは何か、をキーワードに講演者がそれぞれの専門家の立場で意見を述べた。

(武村氏) 今、1923年と同じ関東地震が起こったらどうなるかを検証することで、対策はどこまでできていて何が足りないかを見極めることが大事である。

(廣井氏) 火災による被害は過去の大震災(関東、阪

神・淡路、東日本)ごとに様相が異なるため、避難ルートや避難手段の再検証を行う必要がある。

(村山氏) 会社や学校滞り時に地震が発生した場合、無理して帰宅しないように薦めている。最低でも3日間の滞留ができるように備蓄確保に努めて欲しい。

(安田氏) 住宅だけでなく、周辺の道路、電気、ガス、水道などのライフラインに被害が出ることも問題である。街区、地域全体の事前の対策が重要である。

次に、住民は何をすべきか、何ができるかという観点から、専門家としての意見が述べられた。

(武村氏) 地震の際、周囲をよく確認し、安全な場所に移動できるように普段から避難場所を調べておくとともに、自分で考え行動する習慣を身につける。

(廣井氏) 東日本大震災時の首都圏は帰宅困難者が多数発生したが、首都直下地震の揺れはさらに大きい。共助・公助には限界があるため、「自助」の準備を。

(安田氏) 国土地理院の地盤情報などにより、宅地の揺れやすさ、危険度などがわかるようになってきた。また「地盤品質判定士」の制度をスタートさせ、技術者のレベルを上げる取り組みを行っている。

(村山氏) 公的な補助金を活用しながらマンション、戸建て住宅の耐震化を個人で進めて欲しい。建物の倒壊による道路封鎖を回避することにもつながる。

最後に会場からの質疑もあり、活発なパネルディスカッションであった。

4. おわりに

主催者の挨拶として、日本地震工学会の安田進会長より、シンポジウムの内容を振り返り、それぞれの立場で今何ができるかを考え、将来発生する地震に備えて欲しいとの話があった。最後に、日本地震工学会は、各分野の研究者、技術者が横断的に活動する学会であり、他学会と連携をして今後もこのようなシンポジウムを企画、開催していきたいと述べ、閉会した。



第二部：パネルディスカッション(左から松本氏、武村氏、廣井氏、安田氏、村山氏、加藤氏)



日本地震工学会刊行物案内

日本地震工学会では、強震記録データ、定期刊行物のほか、年次大会梗概集、研究委員会報告書などを発行しております。最新版は下記のとおりですが、購入方法は出版物案内一覧にてご確認ください。

学会出版物案内詳細：<http://www.jaee.gr.jp/jp/stack/publication/>

(2013年10月30日在庫)

強震記録データ、年次大会梗概集、研究委員会報告書など

<ul style="list-style-type: none"> ○兵庫県南部地震における強震記録データベース ○東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所における強震データ全地点全記録等<改訂版> ○中部電力(株)浜岡原子力発電所における「2009年8月11日駿河湾の地震」の観測記録 ○東京電力(株)福島第一原子力発電所および福島第二原子力発電所において観測された平成23年3月11日東北地方太平洋沖地震の本震記録<改訂版> ○東北電力(株)女川原子力発電所における「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の加速度時刻歴波形データ ○「南関東・福島県太平洋沿岸における岩盤の鉛直アレー観測網「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の本震・余震等の加速度時刻歴波形データ」 ○The following table lists all strong motion data that are currently available. Please follow the links in the table to find how each data set can be purchased. http://www.jaee.gr.jp/en/strong-motion-data/ ○性能規定型耐震設計法の現状と課題「平成15年度報告書」 ○第1回性能規定型耐震設計法に関する研究発表会講演論文集 ○性能規定型耐震設計法－性能目標と限界状態はいかにあるべきか「平成16年度報告書」 ○2004年12月26日スマトラ島沖地震報告会梗概集 ○第13回日本地震工学シンポジウム(DVD版) ○セミナー地震発生確率-理論から実践まで- ○津波災害の軽減方策に関する研究委員会報告書(平成20年5月) ○セミナー(第2回)「実務で使う地盤の地震応答解析」資料 ○セミナー－構造物の地震リスクマネジメント-日本地震工学会大会-2003梗概集 	<ul style="list-style-type: none"> 日本地震工学会大会-2004梗概集 日本地震工学会大会-2005梗概集 日本地震工学会大会-2008梗概集 日本地震工学会大会-2009梗概集 日本地震工学会大会-2011梗概集 日本地震工学会大会-2012梗概集 日本地震工学会誌No. 10 日本地震工学会誌No. 11 日本地震工学会誌No. 12 日本地震工学会誌No. 13 日本地震工学会誌No. 14 日本地震工学会誌No. 16 東日本大震災 特集号(2) 日本地震工学会誌No. 17 東日本大震災 特集号(3) 日本地震工学会誌No. 18 東日本大震災 特集号(4) 日本地震工学会誌No. 19 ○講習会「性能設計に基づく耐震設計事例の紹介」 ○講演会「東日本大震災の津波被害の教訓」 ○「原子力発電所の地震安全問題に関する調査委員会」報告書 ○微動の利用技術<微動利用技術研究委員会報告書> ○東日本大震災と南海トラフの巨大地震 ○東北地方太平洋沖地震の地震動と地盤に関する国内ワークショップ ○表層地盤が強震動に及ぼす影響に関する国際ワークショップ ○10th International Workshop on Seismic Microzoning and Risk Reduction (10th IWSMRR)
--	--



本学会に関する詳細はWeb上で

日本地震工学会とは

日本地震工学会は、建築、土木、地盤、地震、機械等の個別分野ではなく、地震工学としてまとまった活動を行うための学会として2001年1月1日に発足しました。その目的は、地震工学の進歩および地震防災事業の発展を支援し、もって学術文化と技術の進歩と地震災害の防止と軽減に寄与することにあります。

ぜひ、皆様も会員に

本会では、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野の方々を対象とし、会員（正会員、学生会員、法人会員）を募集しています。本会の会員になることで、各種学会活動、日本地震工学会「JAEE NEWS」のメール配信、地震工学論文集への投稿・発表・ホームページ上での閲覧、講習会等の会員割引など、多くの特典があります。ぜひ皆様も会員に、ホームページからお申込みください。

本号より、「学会の動き」欄は、下記のホームページでご覧いただくことにしました。日本地震工学会の会則、学会組織、役員、行事、委員会活動、出版物の在庫案内など最近の活動状況などの詳しい情報はホームページをご覧ください。ホームページには、学会の情報の他に、最新の地震情報、日本地震工学会論文集など多くの情報が掲載されています。ぜひご活用ください。

入会方法や入会後の会員情報変更の詳細は本会ホームページ中の「会員ページ」に記載されています。

日本地震工学会ホームページ <http://www.jaee.gr.jp/>

会員ページ <http://www.jaee.gr.jp/members.html>



会誌への原稿投稿のお願い

日本地震工学会会誌では、「地域での地震防災に関する話題」、「地震工学に関連した各種学術会議・国際学会等への参加報告」、「興味深い実験や技術の紹介」、「当学会や会誌への要望や意見」等に関して、皆様からの原稿を募集しております。なお、投稿原稿は原則として未発表のものに限ります。また、「速報性を重視する内容（原則として年3回の発行であるため）」、「ごく限られた会員のみに関係する内容」、「特定の商品等の宣伝色が濃いもの」はご遠慮下さい。

投稿内容、投稿資格、原稿の書き方・提出方法等の詳細は、本会ホームページ中の「投稿・応募ページ」よりご確認頂けます。

日本地震工学会ホームページ 投稿・応募ページ <http://www.jaee.gr.jp/contribution.html>



問い合わせ先

不明な点は、氏名・連絡先を明記の上、下記までお問い合わせ下さい。

日本地震工学会 事務局 〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館

TEL : 03-5730-2831 FAX : 03-5730-2830 電子メールアドレス: office@general.jaee.gr.jp

編集後記：

2020年東京オリンピック・パラリンピックの開催が決まり、競技施設の建設や首都圏のインフラ再整備などの計画が具体化されつつあります。最近ではゲリラ的な大雨・集中豪雨や竜巻などによる災害も以前より多く耳にしますが、やはり首都圏で最も深刻な被害をもたらす要因としては首都圏直下地震において他にありません。これを機に、地震に強い首都圏をめざしてほしいと思います。

さて、今年には1923年関東大地震から90年ということで、さまざまなイベントが行われております。今回は「過去に学び、未来に備える」と題した特集の第一回目として「首都直下の大地震を考える」を企画してみました。地震に備えるためには地震に対する正しい知識が不可欠ということで、過去に起こった首都圏直下地震像、首都圏直下のテクトニクスと想定される首都直下地震に関する最新の知見、構造物の耐震の考え方について御寄稿いただきました。また、前号から始まった「シリーズ：TOHOKUナウ復興に向けて」も連載が続いております。いかがだったでしょうか。

会誌については、前号から年3回の発行となっておりますが、予算配分などの都合上、さらなるスリム化が必要となり、毎号載せていた「学会の動向」は年1回の記載とさせていただくことになりました。学会に関する情報は、地震工学会ホームページで随時更新されておりますので、そちらをご覧ください。その分、会誌編集委員会では中身の濃い会誌づくりを目指してゆく所存でございます。

最後になりますが、お忙しいところ原稿を執筆いただいた著者の方々、ご協力いただいた関係者各位に、心よりお礼申し上げます。

南雲秀樹（東電設計）

会誌編集委員会

委員長	久田 嘉章	工学院大学	委員	上田 恭平	鉄道総合技術研究所
幹事	田中 清和	大林組	委員	佐伯 琢磨	三菱総合研究所
幹事	南雲 秀樹	東電設計	委員	桜井 朋樹	新エネルギー・産業技術総合開発機構
幹事	高橋 郁夫	清水建設	委員	佐藤 健	東北大学
			委員	松岡 昌志	東京工業大学
			委員	松本 浩幸	海洋研究開発機構
			委員	山崎 義弘	東京工業大学
			委員	渡壁 智祥	日本原子力研究開発機構

日本地震工学会誌 第20号 Bulletin of JAEE No.20

2013年10月31日発行（年3回発行）

編集・発行 公益社団法人 日本地震工学会

〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館

TEL 03-5730-2831 FAX 03-5730-2830

©Japan Association for Earthquake Engineering 2013

本誌に掲載されたすべての記事内容は、日本地震工学会の許可なく転載・複写することはできません。

Printed in Japan