

長周期地震動に関する情報のあり方 報告書

平成 24 年 3 月

長周期地震動に関する情報のあり方検討会

気象庁地震火山部

目次

はじめに	1
第1章 長周期地震動の影響をうける長大構造物の特徴や地震情報の課題	2
1. 長周期地震動に対する震度の課題	2
2. 長周期地震動によって影響を受ける長大構造物	5
3. 長周期地震動によって長大構造物で被害が発生した地域	7
第2章 東北地方太平洋沖地震における長大構造物における揺れの実態調査 からみた長周期地震動に関する情報の必要性	8
1. 東北地方太平洋沖地震における長周期地震動の特徴	9
2. 長周期地震動の影響を受けた高層ビル内等の揺れの状況に関する 聞き取り調査およびアンケート調査結果	11
3. 地震時の防災センター職員や石油タンク事業者の対応行動に関する 聞き取り調査結果	17
4. 調査結果からみた地震情報の課題と長周期地震動に関する情報 の必要性	21
第3章 長周期地震動に関する情報のあり方	22
1. 長周期地震動に関する情報の基本的な方向性	22
2. 長周期地震動に関する情報が対象とする周期	22
3. 長周期地震動に関する情報の発表に資する地震動の分析手法	23
4. 長周期地震動に関する情報の発表のタイミングおよび内容	26
5. 施設管理者、防災関係機関等の特定ユーザーに対するデータ提供等	28
第4章 今後の課題	29
1. 長周期地震動に関する指標、情報の具体的な発表の方法、提供手段 に関する検討	29
2. 大都市圏等における気象庁の強震動観測体制の強化	29
3. 長周期地震動の大きさと、高層ビル内における人の行動や心理、 生理や什器転倒等の被害との対応等に関するさらなる調査の実施	29
4. 長周期地震動による高層ビル等の揺れの特性や室内の安全対策等 に関する周知、啓発	30
5. 長周期地震動に関する予報の検討	30
文献	31
巻末資料	

長周期地震動に関する情報のあり方検討会委員名簿

座長	翠川三郎	東京工業大学大学院総合理工学研究科教授
副座長	福和伸夫	名古屋大学大学院環境学研究科教授
	青井 真	(独) 防災科学技術研究所観測・予測研究領域地震・火山 防災研究ユニット地震・火山観測データセンター長
	飯場正紀	(独) 建築研究所構造研究グループ長
	井上勝徳	国土交通省住宅局建築指導課長
	越智繁雄	内閣府参事官(地震・火山・大規模水害対策担当)
	金子美香	(株) 大崎総合研究所研究部長
	川島一彦	東京工業大学大学院総合理工学研究科教授
	北村春幸	東京理科大学理工学部教授
	小鹿紀英	(株) 小堀鐸二研究所副所長
	座間信作	総務省消防庁消防研究センター火災災害調査部長
	寺田博幹	文部科学省研究開発局地震・防災研究課長
	西山 功	国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部長
	久田嘉章	工学院大学建築学部教授
	山口英樹	総務省消防庁国民保護・防災部防災課長
	横田 崇	気象庁気象研究所地震火山研究部長

(事務局) 気象庁地震火山部地震津波監視課

検討会の開催状況

第1回 (日時)	平成23年11月14日 (月) 10:00~12:00
(場所)	気象庁2階講堂
第2回 (日時)	平成23年12月21日 (火) 10:00~12:00
(場所)	気象庁2階講堂
第3回 (日時)	平成24年2月14日 (火) 15:00~17:00
(場所)	気象庁5階大会議室
第4回 (日時)	平成24年3月27日 (火) 10:00~12:00
(場所)	気象庁2階講堂

はじめに

地震動は、ガタガタとした短い周期の揺れと、ゆっくり繰り返す長い周期の揺れなど様々な周期で構成される。長周期地震動は後者を指し、マグニチュードが大きい地震ほど振幅が大きくなる傾向にある。高層ビルや、石油タンク、長大橋梁等の長大構造物は、周期数秒から十数秒の固有周期を有するため、大地震に伴って発生する長周期地震動によって大きな揺れを生ずることがある。

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震では、長周期地震動により、首都圏や大阪府などで高層ビルなどにおいて大きな揺れが観測されたが、近い将来に発生が懸念されている南海トラフにおける巨大地震では、東京、名古屋、大阪等に立地している長大構造物に大きな揺れが生じると懸念されている¹⁾。

気象庁では、地震発生後直ちに震度に関する情報を発表しているが、震度は周期数秒以下の地震動を処理して求めているため、長大構造物内の揺れの大きさや被害の程度を表現できない、という課題がある。長大構造物を有する地域における人的・物的被害の早期把握や、迅速かつ的確な災害応急体制の確立等を支援するためには、観測された地震動から、長大構造物における揺れの状況を迅速に分析し、被害発生の可能性等について評価し、一般の方や防災関係機関に揺れの大きさや特徴等を分かりやすい情報として発表することが有効と考えられる。

このため、気象庁は、今年度、有識者の参画を得て、長周期地震動に関する情報のあり方検討会を設置し、長周期地震動による長大構造物内での行動の困難さや不安感、生理的な影響などの人への影響や、高層ビル等での初動対応の状況を踏まえつつ、長周期地震動に関する情報のあり方について、情報の役割や内容の基本的な考え方、発表のタイミング等を中心に検討を進めた。本報告書は検討会における議論を踏まえ取り纏めたものである。

第1章 長周期地震動の影響を受ける長大構造物の特徴や地震情報の課題

1. 長周期地震動に対する震度の課題

気象庁が地震情報で発表している震度は、以下の手順で算出する計測震度を用いている。

<計測震度の算出>

速度記録水平動2成分、上下動1成分)のそれぞれのフーリエ変換を行う。

地震波の周期による影響を補正するフィルター(図1)を掛ける。

逆フーリエ変換を行い、時刻歴の波形にもどす。

得られたフィルター処理済みの3成分の波形をベクトル合成する。

ベクトル合成した波形の絶対値がある値 a 以上となる時間の合計を計算したとき、これがちょうど0.3秒となるような a を求める。

で求めた a を、 $I = 2 \log a + 0.94$ により計測震度 I を計算する。

計算された I の小数第3位を四捨五入し、小数第2位を切り捨てたものを計測震度とする。

計測震度で用いているフィルターは周期2秒以上を通過させている(図1)。従って、長周期地震動が卓越した場合でも、⑤で求めた a が同じであれば、同一の震度と算出される。

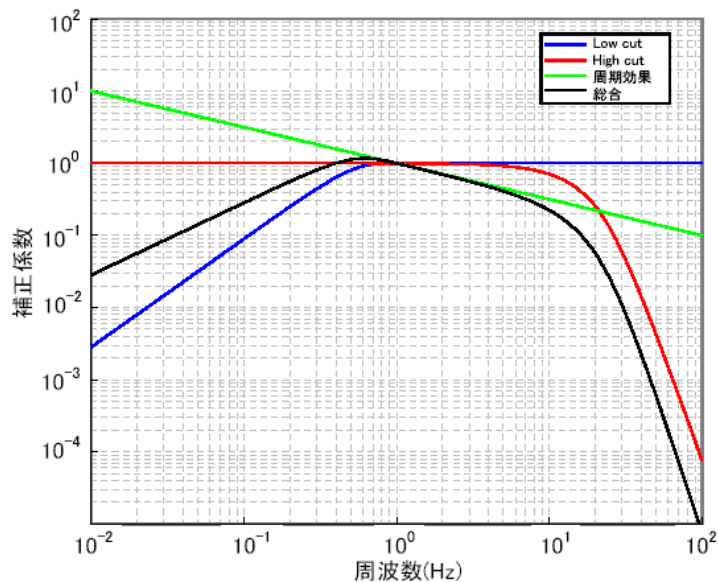


図1 計測震度の算出に用いるフィルター

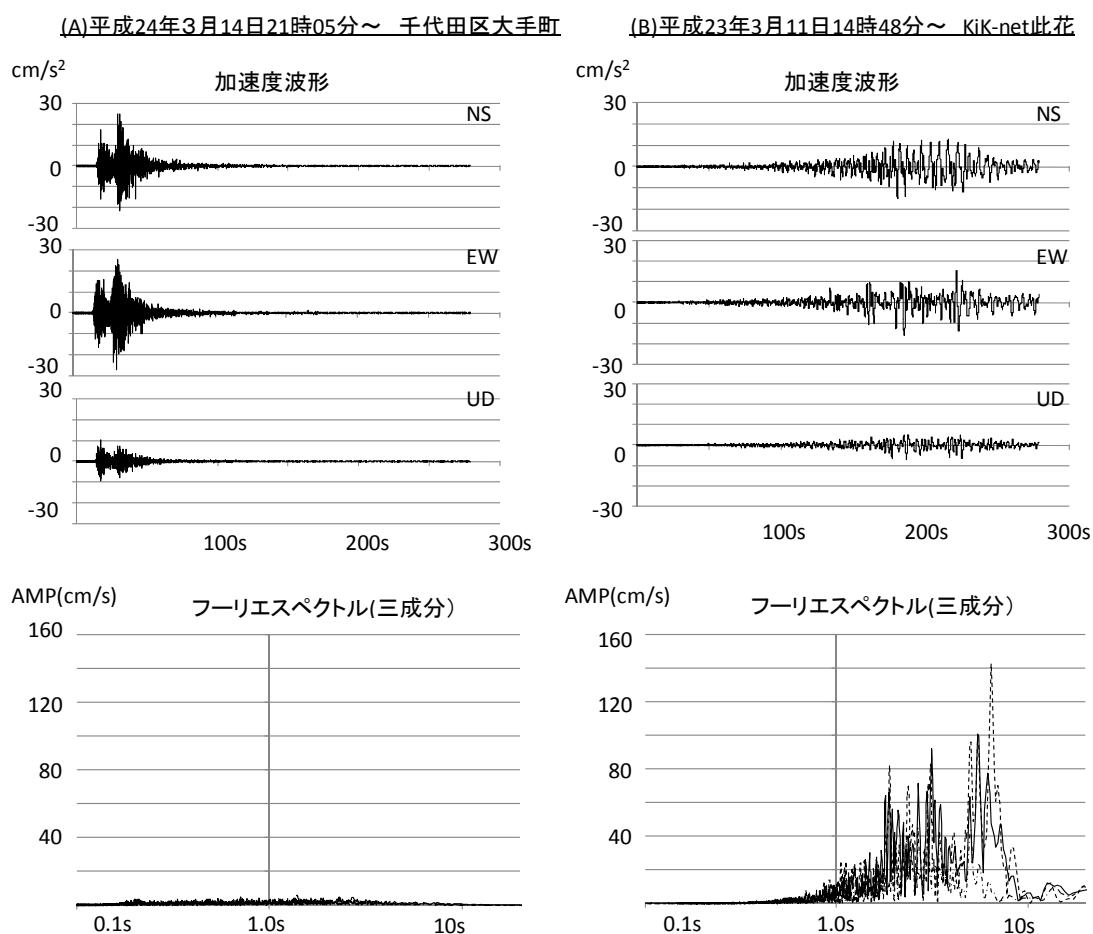


図2 震度3を観測した地点における加速度波形およびフーリエスペクトルの例

(A)：平成24年3月14日の千葉県東方沖の地震(M6.1)において東京都千代田区で観測されたもの

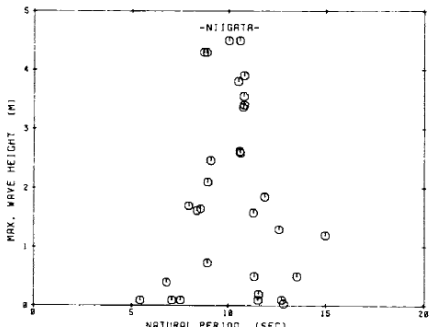
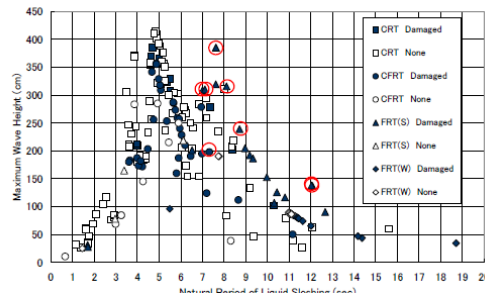
(B)：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震において大阪市此花区で観測されたもの

図2は震度3を観測した地点における加速度波形およびフーリエスペクトルである。(A)は周期1秒以下の成分が、(B)は周期1秒以上、とりわけ6～8秒の成分が卓越している。また、(A)はほぼ数十秒で揺れが収まっているが、(B)は数分程度継続している。(A)の観測点に近い東京都千代田区内等の20階建以上のビル約20棟に聞き取り調査を行ったところ、地震時管制運転装置により数分程度エレベータが停止したビルはあったが、特段、揺れによる被害は確認されなかった。一方、(B)の観測点から半径1km程度に立地する55階建の高層ビルにおいて大きな揺れが生じ、エレベータのロープ類の損傷や内装材等の被害が発生した²⁾。このように、(A)と(B)には震度は同一であるが、

周期成分の違いによって観測点近傍の高層ビルにおける揺れの程度に差が認められる。

また、近傍で観測された震度と、周期数秒程度以上の地震動の影響を受ける石油タンク内のスロッシングの高さとを比較する。昭和 58 年（1983 年）日本海中部地震では新潟市内で、平成 15 年（2003 年）十勝沖地震では苫小牧市内で、4 m を超える大きなスロッシングが観測・解析されているが、前者は震度 3、後者は震度 5 弱であり、震度の大きさと石油タンク内のスロッシング高の間には明瞭な関係は認められない（表 1）。

表 1 震度の大きさと石油タンクのスロッシング高

地震および近傍の震度	スロッシング高のデータ
昭和 58 年（1983 年） 日本海中部地震 新潟 震度 3 最大スロッシング高 450 cm ³⁾	 <p data-bbox="630 1131 1045 1176">Fig. 4.4-3 Relation between maximum wave height and natural period of sloshing at Niigata.</p>
平成 15 年（2003 年） 十勝沖地震 苫小牧 震度 5 弱 最大スロッシング高 410 cm ⁴⁾	 <p data-bbox="630 1556 1117 1624">図 4 苫小牧における全タンクに対する屋根形式を考慮した最大波高予測値の分布と被害程度</p>

このように、震度を主体とした既存の地震情報では長周期地震動による長大構造物における揺れの大きさの表現が困難、という課題がある。このため、平成 8 年に気象庁が公表した震度階級関連解説表では、注意書きに、「(4) 大規模な地震では長周期の地震波が発生するため、遠方において比較的低い震度であっても、エレベータの障害、石油タンクのスロッシングなどの長周期の揺れに特有な現象が発生することがあります。」と記載し、平成 21 年に行った同解説

表の改訂でも、「大規模構造物への影響」という項目を設け、長周期地震動による超高層ビルの揺れや石油タンクのスロッシングについては、別に解説を行っている。

2. 長周期地震動によって影響を受ける長大構造物

建築物の固有周期(秒)は、高さを H (m) として、例えば、鉄骨造では $0.0256 \times H$ 、鉄筋コンクリート造では $0.0195 \times H$ で求められる⁵⁾。日本国内に立地する最も高いビルは約 300m であり、固有周期は最大で概ね 7~8 秒程度とみられる。また、概ね高さ 45m 以上(概ね 14,15 階建以上)の建物では固有周期が 1 秒を超えるとみられる。

石油タンクにおけるスロッシングの固有周期は、タンクの直径を D (m)、液面高を HL (m)、重力加速度を g とすると、 $2 \sqrt{\frac{D}{3.682g} \cdot \coth\left(\frac{3.682HL}{D}\right)}$ で求められる⁶⁾。同一直径のタンクでも液の量によって固有周期は変化するが、日本国内に立地する石油タンクのうち最大のもの直径が概ね 100m 程度である⁶⁾ ため、固有周期は最大で 20 秒程度と考えられる。

斜張橋や吊り橋は、概ね支間長が 200m で一次固有周期が 2 秒となり、支間長の長さが長くなると一次固有周期が長くなる⁷⁾。国内で最も支間長の長い明石海峡大橋(支間長、1991m)の一次固有周期は 12.5~25 秒である⁸⁾ が、周期 25 秒は上下振動モードに対するものであり風による影響は大きい地震動による影響は小さいと見られ、地震動に影響を受ける周期帯域としては最大で周期 20 秒程度と考えられる。

このように、現状では、国内に立地する長大構造物の固有周期は最大でも 20 秒程度とみられる。

法令上、高層建築物は消防法で定義されており、同法第 8 条の 2 において高さ 31 メートルを超える建物とされている。また、建築基準法では、高層建築物の高さの定義はないが、高さ 31m および 60m を境に設計時の構造計算が異なり、高さ 31m 以下の建築物は許容応力度等計算などが、高さ 31m を超え 60m 以下の建築物は保有水平耐力計算や限界耐力計算などが用いられ、また、高さ 60m を超える建築物は時刻歴応答解析などを行った上で国土交通大臣の認定が必要となる。

本報告では、概ね固有周期が 1~2 秒程度以上の構造物(高層ビル、石油タンク、長大橋)を長大構造物と呼び、これらを対象に検討を行うこととする。ここで高層ビルとは、概ね高さ 45m 程度以上(概ね 14,15 階建以上)のもの、長大橋とは、斜張橋や吊り橋で概ね支間長 100m 程度以上のものを指すこととする。なお、固有周期が 1~2 秒程度以上の構造物には免震構造を取り入れた建築

物が含まれる。積層ゴム支承や鉛支承などを用いた免震構造物は、数秒の固有周期を有する⁹⁾ため、長大構造物などと同様、長周期地震動に影響を受けると考えられる。

都道府県等の消防年鑑等によれば、平成23年3月現在、国内には高さ31m以上の高層建築物が約50,000棟あり、うち、高さ45mを超え60m以下の高層建築物は約4,500棟、高さ60mを超える高層建築物は約2,500棟である。

1970年代以降、大都市圏での再開発やいわゆるウォーターフロント開発によって、高層ビルが集中的に立地する地域が認められるようになった(図3)。高層のオフィスビルや高層マンションには数千人から数万人の在館者がいる場合もあり、都市構造等の変化に伴って、近年、長周期地震動による揺れの影響を受ける人口が増加している。

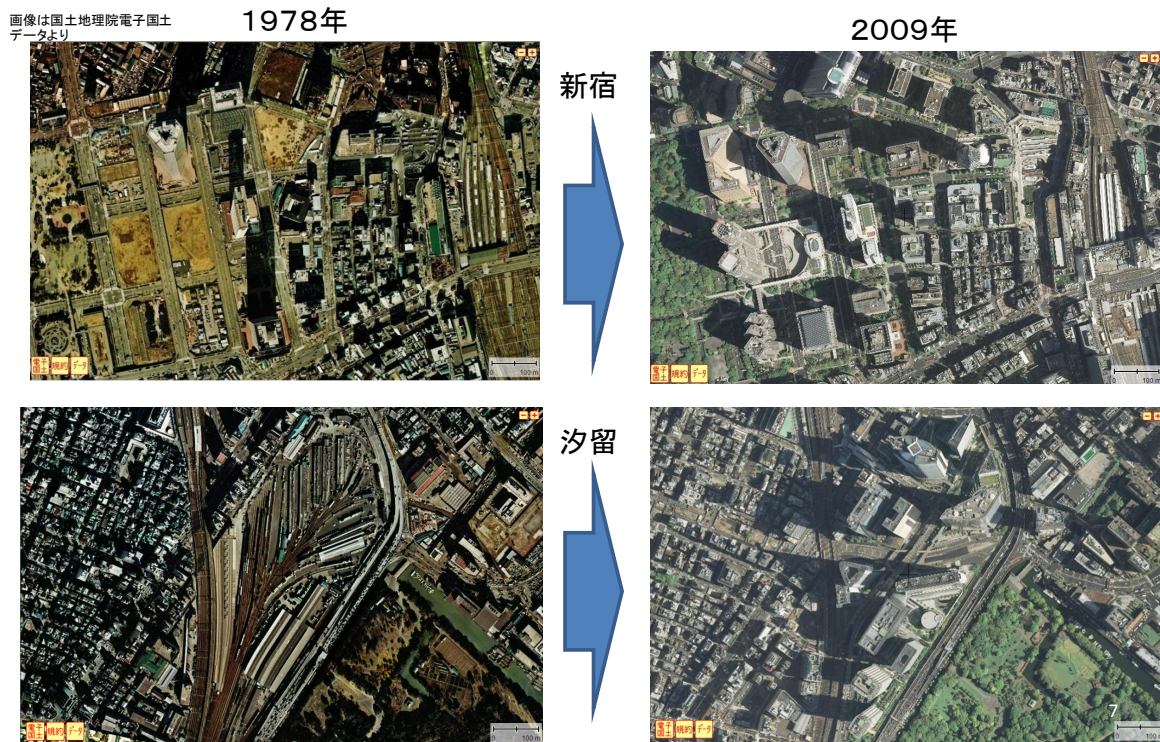


図3 東京都心における再開発等の状況

3. 長周期地震動によって長大構造物で被害が発生した地域

1980年以降の地震による長大構造物における主な被害を表2に示す。例えば、昭和58年(1983年)日本海中部地震では、震源域から数百km離れた東京の高層ビルでエレベータのロープが損傷する⁶⁾など、長大構造物における揺れによる被害等は、震央から離れた地域でも発生している。また、平成12年(2000年)鳥取県西部地震では、震度1の東京都内の高層ビル内で揺れを感じた人が多かった、という報道もある¹⁰⁾。長周期地震動は、短い周期の波に比べ、遠方まで弱まらずに伝わり、平野や盆地の構造によって新たに励起、増幅されることがあるため、震央から離れた地域の長大構造物で思いがけない揺れに見舞われることがある。

表2 1980年以降の地震による長大構造物における主な被害⁶⁾

発生年	地震名(Mj 気象庁マグニチュード: Mw モーメントマグニチュード)	長周期地震動によって発生した主な被害と発生地点
昭和58年 (1983年)	昭和58年(1983年)日本海中部地震 (Mj7.7)	石油タンクのスロッシング(秋田市、新潟市等)、高層ビルでの揺れによるエレベータワイヤーロープ損傷等(東京23区)
昭和59年 (1984年)	昭和59年(1984年)長野県西部地震 (Mj6.8)	高層ビルでの揺れによるエレベータワイヤーロープ損傷等(東京23区)
平成5年 (1993年)	平成5年(1993年)北海道南西沖地震 (Mj7.8)	石油タンクのスロッシング(秋田市、新潟市等)
平成7年 (1995年)	平成7年(1995年)兵庫県南部地震 (Mj7.3)	高層ビルでの揺れによる什器転倒等(大阪市等)
平成12年 (2000年)	平成12年(2000年)鳥取県西部地震 (Mj7.3)	高層ビルでの揺れによる什器転倒等(神戸市、大阪市等)
平成15年 (2003年)	平成15年(2003年)十勝沖地震 (Mj8.0)	石油タンクのスロッシング(苫小牧市等)、高層ビルの揺れによるエレベータワイヤーロープ損傷等(札幌市等)
平成16年 (2004年)	平成16年9月5日の紀伊半島沖の地震 (Mj7.1) 平成16年9月5日の東海道沖の地震 (Mj7.4)	石油タンクのスロッシング(大阪市、市原市等)、高層ビル内での揺れによる什器転倒等(大阪市等)
平成16年 (2004年)	平成16年(2004年)新潟県中越地震 (Mj6.8)	高層ビルでの揺れによるエレベータワイヤーロープ損傷等(東京23区)
平成23年 (2011年)	平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0)	高層ビル内での揺れによるエレベータワイヤーロープの損傷や什器転倒等(東日本から西日本の広い範囲)、石油タンクのスロッシング(東日本)

第2章 東北地方太平洋沖地震における長大構造物における揺れの実態調査からみた長周期地震動に関する情報の必要性

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震では、広い範囲で長周期地震動が観測され、石油タンクにおけるスロッシングの発生や高層ビル内において大きな揺れが発生した。長周期地震動の影響がこのように広い範囲で発生した地震はこの 10 年程度の間には発生しておらず、この地震において、長周期地震動によりどのような被害が発生したか、また、既存の地震情報で何が足りないのかを分析することが重要である。平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震における石油タンクにおけるスロッシングについては総務省消防庁によって詳細な調査が行われており（資料 3）、また建築物の構造被害については建築学会や国土交通省国土技術政策総合研究所および独立行政法人建築研究所による調査結果がある^{11,12)}。一方、長周期地震動に関する情報の利用者や利用目的、また、情報の発表のタイミングや内容を検討するために必要な、高層ビル内における人の行動の難しさや恐怖感、生理的な状況、家具・什器等の転倒・移動等の室内の様相や、高層ビルや石油タンクにおける施設管理者等における地震時の初動対応の状況等については調査事例が少ない。このため、主として 20 階建以上のオフィスビルや石油タンク事業者に対して対面方式による聞き取りおよびアンケート調査等を行った。

1. 東北地方太平洋沖地震における長周期地震動の特徴

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震は、我が国での観測史上最大のマグニチュード 9.0 の巨大地震であり、東北地方を中心に北海道から九州地方にかけて震度 1 以上となった（図 4）。

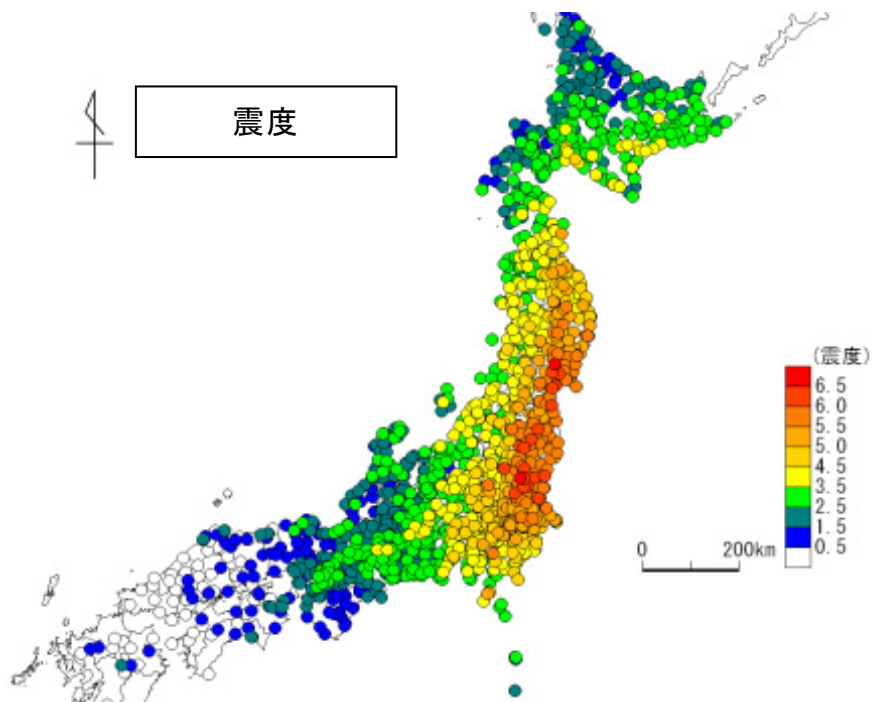
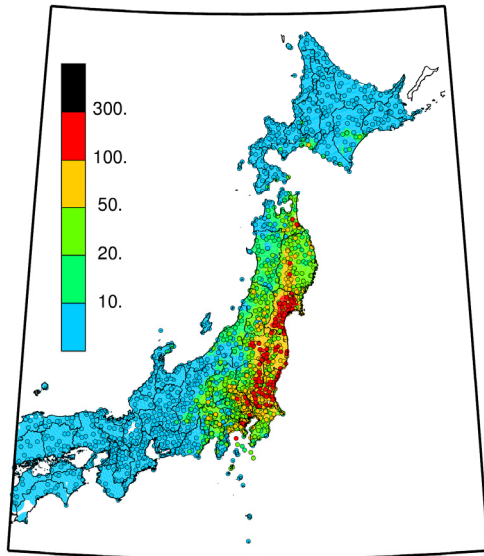
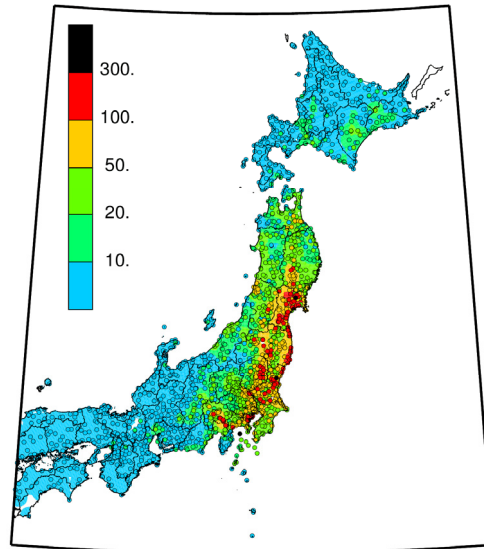


図 4 東北地方太平洋沖地震における震度分布図

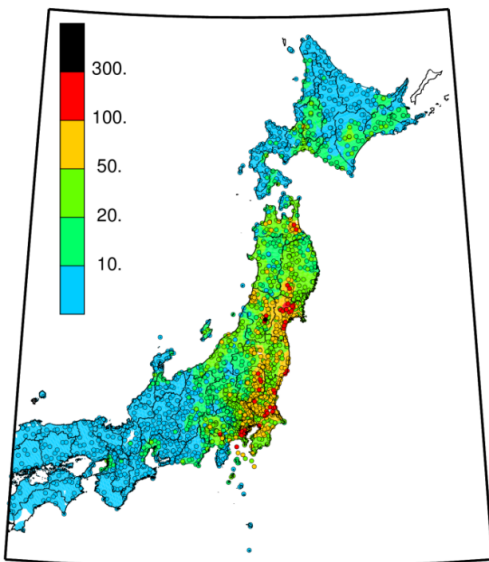
防災科学技術研究所の強震観測網では、東北南部から関東南部まで周期 1 秒の速度応答スペクトルが 100cm/s を超える揺れが観測された中、周期 2 秒以上の速度応答スペクトルも広い範囲で数十 cm/s 以上となるなど、各地で長周期地震動による揺れが観測された（図 5）



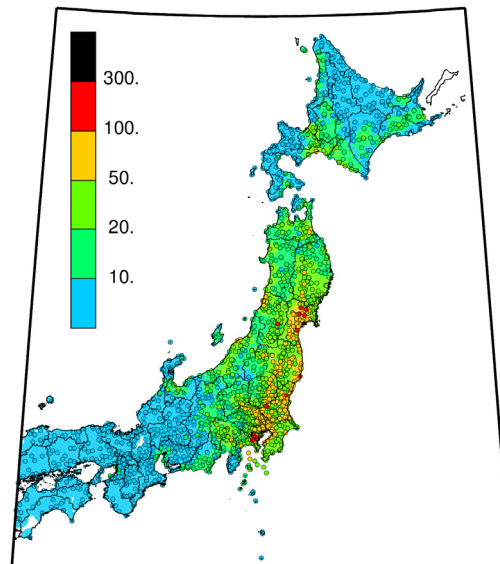
速度応答スペクトル (cm/s)
周期 1 秒 (減衰定数 5%)



速度応答スペクトル (cm/s)
周期 2 秒 (減衰定数 5%)



速度応答スペクトル (cm/s)
周期 4 秒 (減衰定数 5%)



速度応答スペクトル (cm/s)
周期 8 秒 (減衰定数 5%)

図 5 防災科学技術研究所強震観測網における速度応答スペクトル分布図

2. 長周期地震動の影響を受けた高層ビル内等の揺れの状況に関する聞き取り調査およびアンケート調査結果

2-1. 揺れによる行動の困難さ、恐怖感、生理的な状況等に関する聞き取り調査結果

高層ビル内の揺れの状況等を把握するため、3月11日14時30分～15時頃にかけて東京都内39棟、大阪府内4棟の主として高層階におられた85人の方へ聞き取り調査を行った。その結果、揺れの感覚や長さ、行動の困難さ、恐怖感、生理的な状況について、以下のような回答が得られた。聞き取り調査の詳細は資料1に示す。

【揺れの感覚】

- ・船に乗っているような感じ
- ・最初円をかくようになって、次第に大きく回る感じ
- ・足元の床が無くなるのではないかと、というような感じ 等

【揺れの長さ】

- ・非常に長かった
- ・いつ終わるとも知れなかった 等

【行動の困難さ】

- ・物に掴まりたいと思った
- ・物に掴まっても立ってられなかった
- ・椅子から降りて這いつくばった 等

【恐怖感】

- ・死ぬほど怖かった
- ・悲鳴が聞こえた
- ・ガタガタという揺れに比べ、特に怖さは感じなかった 等

恐怖感については、「過去経験の無い揺れだった」と証言されるのに加え、「窓から外を見ると隣のビルがぶつかりそうになるくらい揺れていて怖かった」「スライド式書架が左右に大きく移動し、ぶつかり合う音が大きく響いていたことが怖かった」という視覚、聴覚による状況や、「何かきしむような音が聞こえ、ビルが壊れるのではないかと思い怖かった」など事態悪化を想像させる状況で恐怖が増したとの回答があった。また、一回揺れが治まった後に、また非常に大きく揺れ始めたということで、一体この揺れはどこまで大きくなるのだろうかという恐怖感があった。またどこまで揺れ続けるのだろうかという、揺れの長さが恐怖感に繋がったとの回答もあった。

【生理的な状態】

- ・船酔いのように、吐き気がするなど、気分が悪くなった

・めまいのような感じが長く続いた 等

2-2. 内装材の破損や家具、什器等の移動・転倒に関する聞き取り調査結果

東京都内の34棟の高層ビルにおいて、館内の被害状況等に関する聞き取り調査を行った。その結果、内装材の破損や家具、什器等の移動・転倒について、以下のような結果が得られた（図6）。

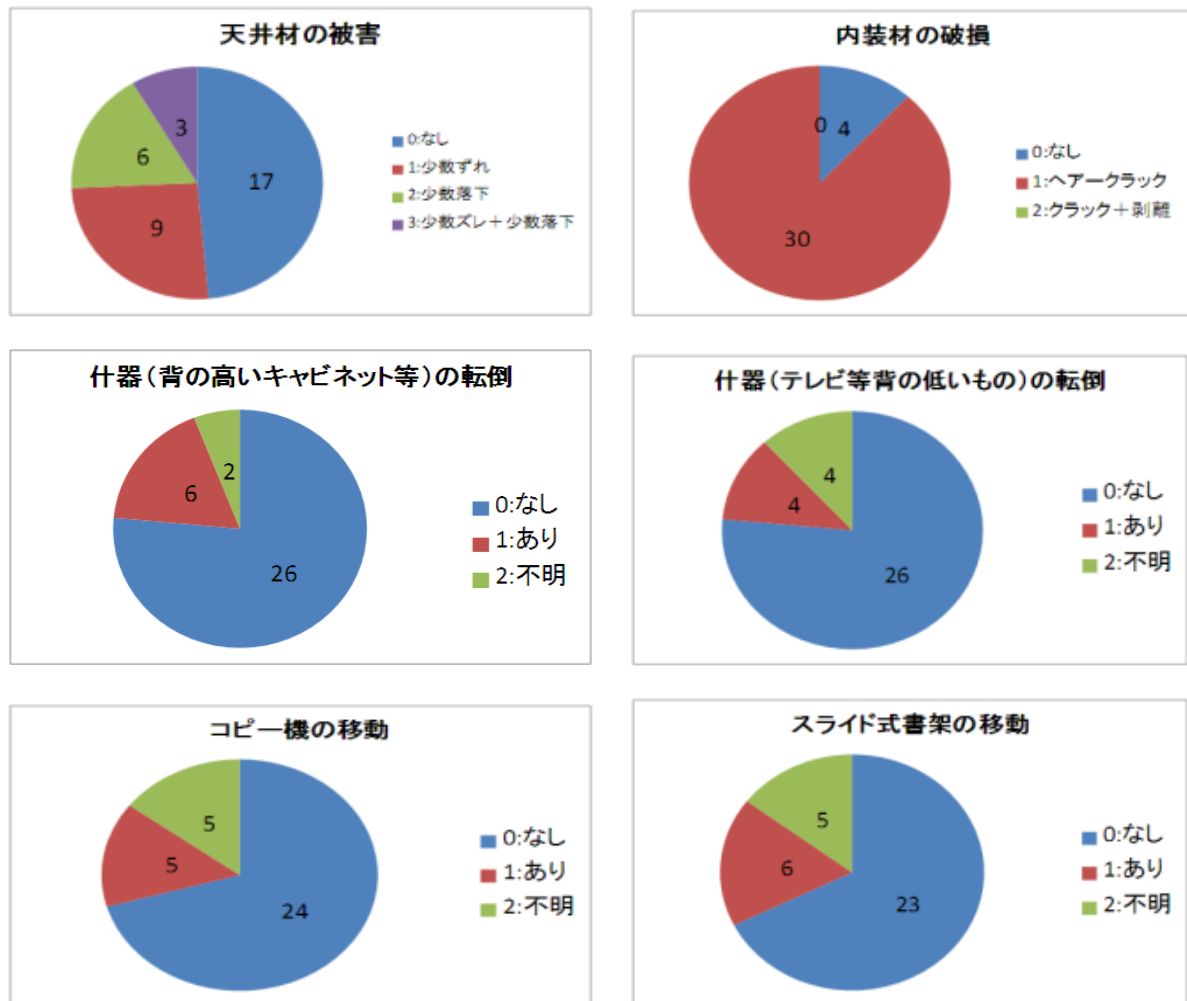


図6 高層ビル内における内装材の破損や家具、什器等の移動・転倒に関する聞き取り調査結果

多くの高層ビルで、内装材に亀裂が生じるなど、軽微な損傷が認められたほか、半数近くの高層ビルで天井材のずれや落下などの被害が見られた。一方、固定していない什器の転倒は見られたものの、大多数の高層ビルでは什器の転倒やコピー機の移動は認められなかった。しかし、建築学会の調査では、高層マンションの上層階では、室内で家具等が転倒した事例が70%に上る¹³⁾など、家具や什

器等の転倒の度合いに違いが認められる。本調査はオフィスビルを対象に調査を行ったが、転倒しなかった理由について、「消防署等の指導を受け、特に高層階に対しては耐震固定の徹底を呼びかけている」「什器は作り込みになっており、転倒は生じない」「液晶テレビが普及し、置き型ではなく、壁に固定するなど、不安定な置き方をしていない」といった回答があった。一方、建築学会が行った調査では、オフィスビルに比べ住宅においては家具等の固定が進んでいないという結果が得られている¹³⁾。室内における家具・什器等の転倒は、家具や什器等の固定の状況で違いが大きいと考えられる。

2-3. エレベータの障害等の発生状況

高層ビルでは、地震時にエレベータの停止や障害等が発生することがある。長周期地震動が大きい場合、特に、長い行路を有するエレベータのロープ類が建物の揺れに共振して振れ幅が大きくなり、昇降路内の突起物に引っ掛かって損傷するなどの被害が発生することがある。例えば、平成15年（2003年）十勝沖地震では札幌市内で、平成16年（2004年）新潟県中越地震では東京都内などでそのような被害が発生している^{14,15)}。平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震でも、ロープ類の引っ掛かり等の被害が21～25件発生している¹⁶⁾。聞き取りを行った高層ビルにおいても、エレベータのロープ類の損傷等により、復旧までに数ヶ月を要した事例も認められた。また、日本エレベータ協会の調べによれば、東北地方のほか、東京都等15都道府県の少なくとも210台で閉じこめが発生した¹⁷⁾。

2-4. 低層階と高層階における体感や家具、什器等の転倒の違いに関するアンケート調査結果

高層ビル内の揺れの状況等を把握するため、表3に示す東京都内の4棟の高層ビルにおいて、3月11日14時30分～15時頃にかけて在館された方約800人に対するアンケート調査を行った。その結果、アンケート調査を行ったいずれのビルにおいても、低層階から高層階になるにつれ行動が困難になったり、本棚や車輪付き什器等の動きが大きくなるといった傾向が認められた(図7)。調査に用いたアンケート調査票およびアンケート調査結果の詳細は資料2に示す。

表3 アンケート実施対象

調査対象名	高さ(周期)	調査人数	実施期間	備考
工学院大学	100～150m (周期約3秒)	147人	平成23年 7月	武蔵野台地上
Aビル	100～150m (周期約3秒)	数十人	平成23年 11月	武蔵野台地上。低層階と高層階はアンケート回答数が10以下のため参考値
Bビル	100～150m (周期約3秒)	数百人	平成24年 1～2月	東京湾岸
Cビル	150m以上 (周期約5秒)	数百人	平成24年 1月	武蔵野台地上。高層階のみアンケートを実施

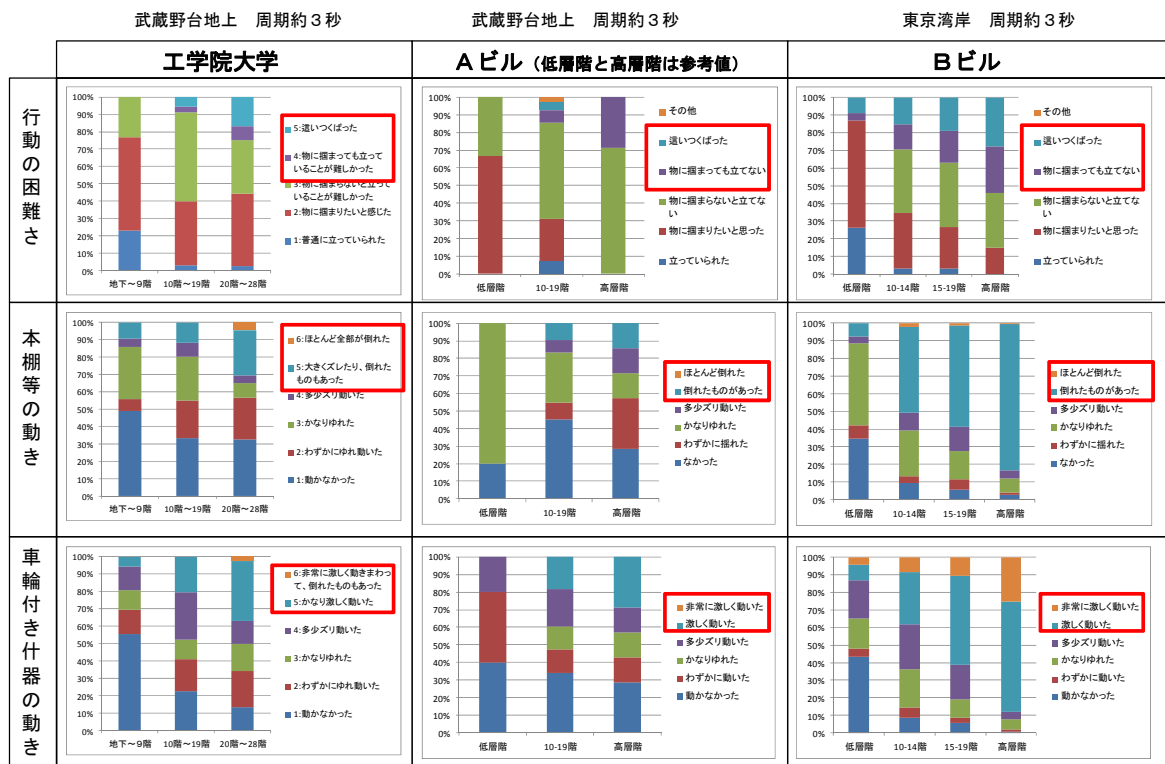


図7 高層ビル内の揺れの状況に関するアンケート調査結果

各ビルで10人以上の回答があったもの。

なお、Aビルの低層階と高層階は回答数が10サンプル以下であるため参考値とする。

低層階にある防災センター職員への聞き取り調査でも、低層階にある防災センターで高層階の揺れの大きさを認識出来たか聞いたところ、震度5弱だったので高層階では揺れが大きいと思ってはいたものの、館内を巡視している職員から「立ってられない」などの連絡があり、想像以上の揺れに驚いた、といった回答が多かった。

2-5. 高層ビル内での揺れの時間変化に関する聞き取り調査結果

東京都内の軒高 100～150mクラスの高層ビルにおいて什器が転倒した室内にいた二人の方から揺れの時間変化について話を伺った。その結果、高層ビル高層階では、揺れ始めてから揺れが大きくなるまでの時間があったが、大きな揺れになってからでは身動きが出来ず、危険回避行動が困難な状況となっている。また揺れが収まってから地震情報を見ても、発表されている地上の震度とは次元が違う揺れと感じた、ということが分かった。

<聞き取り調査結果>

【揺れ始め～揺れが次第に大きくなる時間帯の揺れ】

- ・ A氏：少し大きな地震だ、と感じていたところ、次第に揺れが大きくなり、本棚がガタンガタンと動き始めたので、広いスペースに逃げた。
- ・ B氏：ちょっと大きな地震だ、と同僚と話した後、椅子に座っていたら、周囲の本棚が揺れ始め、抑えようと必死に手を伸ばした。

【最も大きな揺れの時間帯の揺れ】

- ・ A氏：床に胡坐をかいて座っていても体が前後に揺さぶられ、四つん這いにならないと安定を保てなかった。机の上に乱雑に置いたものは落ちていなかったが、しばらくすると、本棚が一斉に倒れた。
- ・ B氏：さらに揺れが大きくなって、机の下のキャスターがついた FAXなどが動き、背後から本棚が倒れてきた。倒れ方がゆっくりだったため当たっても衝撃は少なかったが埋もれてしまった。

【次第に揺れが収まる時間帯の揺れ】

- ・ A氏：本棚の下敷きになった人がいたので、声を掛けた。
- ・ B氏：本棚を動かすことは出来ず、身体をよじりながら抜け出した。みんなでも声を掛けた。

【不安感や、揺れている時間の長さ、生理的な感覚】

- ・ A氏：揺れは兎に角長く、気持ち悪くなる揺れだった。
- ・ B氏：怖くて手がぶるぶる震えた。

【地震情報を見聞きしたときの違和感】

- ・ A氏：宮城県沖での地震とあったが、あまりにも大きな揺れで首都直下地震かとも思い、当初どのような地震か理解できなかった。
- ・ B氏：震度情報をみると、震度 5弱となっていたがこれまで経験した震度 5弱とは次元が違い、自らが感じた揺れの大きさとその震度が全く一致しなかった。

3. 地震時の防災センター職員や石油タンク事業者の対応行動に関する聞き取り調査

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の発生時における東京都内の高層ビルの防災センター職員や北陸地方の石油タンク事業者の対応行動に関する聞き取り調査を行った。その結果、発表された震度からは高層階での揺れの大きさや被害を認識できず、初期対応に多少の混乱が認められること、また、観測された震度を初動対応の開始の基準としており、概ね震度 3 や 4 など施設内の巡視等を行うこととしているが、長周期地震動が大きい場合、日頃経験している初動対応の開始時と状況が異なっており、意識を切り替えるのに苦慮していたことが分かった。なお、管理者の地震発生時の初動対応の基準の例を図 8 に示し、地震発生時の対応事例を図 9 に示す。

<高層ビルの防災センターにおける聞き取り調査結果>

【高層ビルの防災センターにおける初動対応の状況】

- ・地震発生時、テレビやインターネットで情報を収集し、近傍で観測された震度が 3 ないし 4 の場合、初動対応を行うこととしている。
- ・防災センターでは、設備等の警報装置が作動しているかどうかを確認し、その上で、地震発生後 30 分程度以内の初動対応として、館内放送の実施、続いて、館内の共用部分や設備等の目視点検、エレベータメンテナンス会社等への連絡、テナントへの連絡と被害状況の集約等を行っている。

【館内放送の実施状況について】

- ・エレベータが停止するような状況のときは、館内放送を実施することとしており、3 月 11 日当日も放送した。
 - ・地表階の加速度計による震度を基準に放送しており、東北地方太平洋沖地震では基準に達しなかったことから放送を行わなかったが、高層階で大きな揺れがあったのになぜ放送しなかったのか、と問われ、以後基準を下げた等
- なお、館内放送は、全館一斉放送であるため、地震だからといって頻りに流すと飲食店等のテナントなどから苦情が寄せられる、といった回答もあった。

【当日の対応で苦慮したこと】

- ・震度 3 なのに様々なアラームが鳴って、そんなに揺れていないのだが、と初め不審に思った。
- ・防災センターではほとんど揺れを感じなかったが、高層階のテナントから

ひどく揺れたという電話連絡があったため館内放送を行った。

- ・テナントとは通常外線でやりとりするが、輻輳で全く通じなかった。中で什器が倒れていたという情報は後で分かったが、それほどの揺れだったかな、と思った。
- ・高層階を巡回中の職員から、立ってられないほど、という連絡があり、普段でも防災センターは揺れを感じにくく、初めは何が起きているのかよく分からなかった。
- ・高層階の管理事務所から、低層階の防災センターに「異常はないか報告を」との要請があったが、揺れていないので不審に思った。
- ・震度4なのになぜエレベータを直ぐ復旧しないのか、といった苦情が寄せられた。長くゆったりとした揺れがあった場合、エレベータの昇降路内でロープ類の絡み付きなどが発生する可能性があり、全て確認をしないと復旧できないため、説明に苦慮した。
- ・宮城県沖の地震なのに、何故揺れが大きいというのか理解できなかった。等なお、ビル内に設置した加速度計を活用した安全判定システム等を運用している所では、東北地方太平洋沖地震では構造的な被害の発生の可能性が低いと評価され、このシステムが有効であった、との話もあったが、さらに揺れが大きくシステムで構造的な被害の発生が示された場合には、継続使用の可否について管理者だけでは判断できず施工者や設計者などの専門家の確認が必要との声も聞かれた。

【後日の対応で苦慮したこと】

- ・震度5弱だったが館内の設備に被害が多く、テナントから「宮城県沖の地震で、震度5弱なのになぜこんなに被害が出たのか」と言われ説明に苦慮した。 など

<石油タンク事業者における聞き取り調査結果>

【石油タンク事業者における初動対応の状況】

- ・地震発生時、油面計や施設内に設置している地震計等の計器類の確認を行った上で、テレビ等から地震情報を入手する。震度3から施設内の浮き屋根式石油タンクの外周点検等を行い、所轄の消防署や本社等への連絡・報告を行っている。
- ・震源が遠く、ゆったりとした揺れで、マグニチュードが大きかったので、過去の経験でこれはスロッシングが発生すると思い、直ぐに社員を退避させ、余震を考慮しながら点検した。

【施設点検の実施状況について】

- ・油面計は精密に油の残量などを測ることが出来るが、データ入手間隔が 10 分や 30 分と長く、また、一点しかないため、スロッシングの状況を把握することは困難であり、施設内に設置している地震波形の速度応答スペクトルに基づいてスロッシングが発生しているか否かを判断する。
- ・スロッシング時には、浮き蓋が側面に当たって大きな音がするので、発生を覚知することは可能。スロッシングが発生している間は危険なので施設点検は見合わせる。
- ・タンク上部に登らないと浮き屋根の被害状況等は分からないが、余震でスロッシングが発生する可能性もあるため、タンク上部に登るのは地震が落ち着いてからとしている。
- ・施設内に設置している地震計を用いたスロッシング評価システムを活用して、どのタンクが最もスロッシングが大きいのか、などを評価した上で、重点的な点検を行うこととしている。

【施設点検等で苦慮していること】

- ・施設内は非常に広く、車や自転車などを用いて点検を行うが、1 時間程度は掛かる。その間に様々な機関から被害状況等の問い合わせがあり、スロッシングの状況を概略でも共有できると良い。
- ・震度 3 から施設点検に入ることとしているが、スロッシングが発生する長周期地震動が卓越した震度 3 とスロッシングには直接影響しない短周期地震動しかない震度 3 がある。安全サイドに立てば震度 3 からの点検は重要であるが、スロッシングが発生するかどうかを予め評価した上で点検に入る方が効率的である。

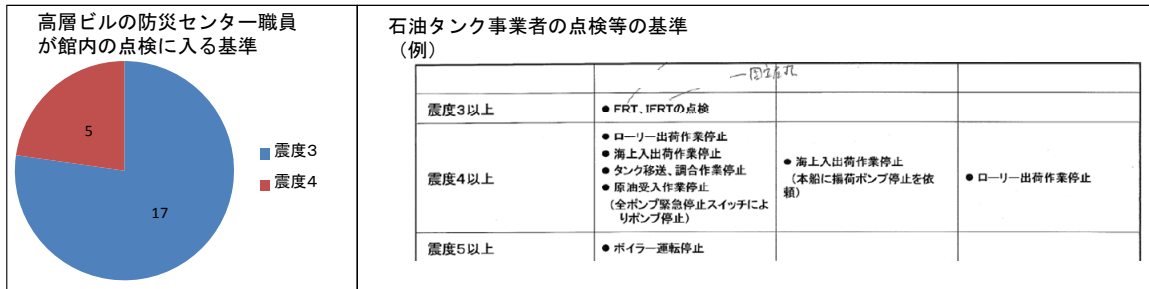


図8 施設管理者等の初動対応の基準の例

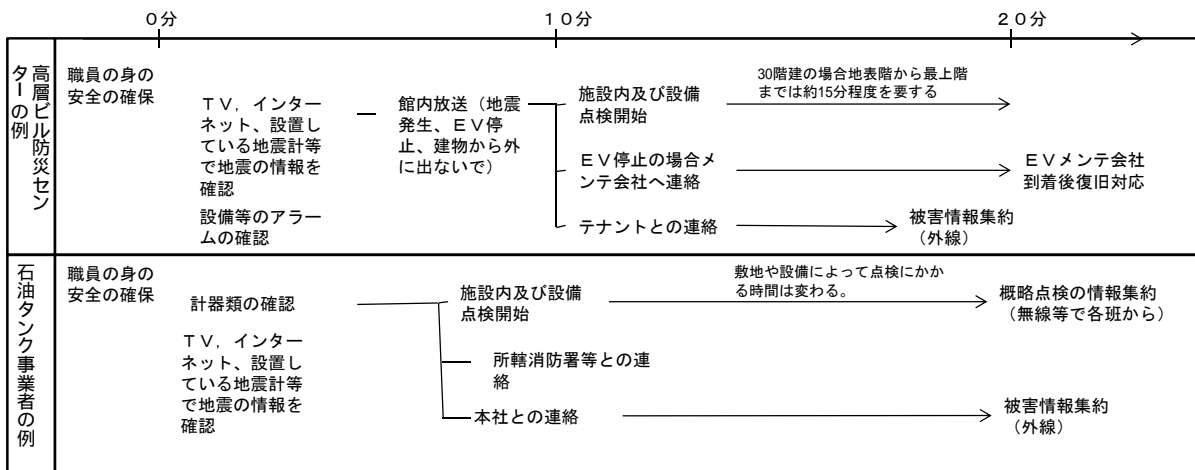


図9 施設管理者等の初動対応の事例

4. 調査結果からみた地震情報の課題と長周期地震動に関する情報の必要性

気象庁が発表する地震情報には、初動対応用情報（非常参集基準、点検開始基準等）、災害応急対応用情報（被害の大きい地域の判別等）、状況を確認するための情報（揺れの大きさの理解・認識等）の役割がある¹⁸⁾。

聞き取り調査やアンケート調査では、高層ビルでは階数が上がるにつれて行動が難しくなり、また本棚等の家具や什器の転倒・移動が増加し、また、高層ビル内では周期の長いゆったりした揺れや継続時間に起因するとみられる船酔いのような生理的な影響が発生している。これらの揺れによる影響は、日頃見聞きし、かつ、揺れの経験の頻度が高い、震度ではイメージしにくいいため、長周期地震動による揺れがあったことが分かる情報があれば、高層ビル内の方々の体感した揺れの状況の理解に繋がると期待される。また、低層階の防災センターでは高層階の揺れの大きさを認識しにくく、初動対応の行動開始基準として用いられている震度に加えて、高層階における揺れの大きさや室内等での家具・什器等の転倒・移動など被害の発生可能性等を認識出来る情報があれば、施設管理者におけるさらなる的確な対応に繋がると期待される。

このため、住民、施設管理者、防災関係機関等の方々が、日頃見聞きし、かつ、揺れの経験の頻度が高い地表の揺れに対応した震度に加えて、長周期地震動による長大構造物内での行動の困難さや不安感、生理的な影響や、室内での家具・什器等の転倒・移動など被害の発生可能性について認識出来るような情報が必要であると考えられる。

第3章 長周期地震動に関する情報のあり方

ここでは、長大構造物内での行動の困難さや不安感、生理的影響、家具・什器等の転倒・移動などの被害の発生可能性について広く一般に発表する長周期地震動に関する情報のあり方の検討結果を示す。

1. 長周期地震動に関する情報の基本的な方向性

長周期地震動によって揺れが大きくなった構造物内での行動の困難さや不安感、家具や什器等の転倒・移動などの室内での被害の発生可能性を正しく伝える、長周期地震動に関する情報の役割および内容について、基本的な考え方を以下に示す。

【長周期地震動に関する情報の基本的な役割】

- 震度と同様、被害や揺れの大きさについて、住民、施設管理者、防災関係機関に共通して理解される分かりやすいものとする。
- 機能（利用者の行動）は、それを見聞きし即時的にどのような防災対応を執るべきかの判断に役立つ情報として、また日頃の備えの目安として語られる情報として、現行の地震情報と同様な役割を想定する。

【長周期地震動に関する情報の内容についての基本的な考え方】

- 建物内の家具等の転倒・人の行動しにくさなどを一般にも分かり易くし、かつ、既に一般にも十分に浸透している震度情報との関係性を可能な限り確保する。
- 速やかに発表する内容は、非常時の情報過多による混乱を与えない範囲で最小限のものに抑える。

2. 長周期地震動に関する情報が対象とする周期

第1章2. で示したように、国内に立地する高層ビルや石油タンク、長大橋の固有周期は最大20秒程度とみられる。このうち、長大橋と高層ビルでは、人が、長周期地震動による構造物の揺れによって、直接、行動の困難さや不安感等を生じることがある。高層ビルは大都市圏等に多数存在し、また、一棟あたりの在館者数が数千人から数万人となる場合があり、長周期地震動による構造物の揺れの影響を受ける人数が他の長大構造物に比べて遙かに多い。地域内における長大橋や石油タンク施設の管理者は、数機関であるが、高層ビルの管理者は多数存在する。大きな揺れに見舞われた場合、被害状況は、石油タンクや長大橋は監視カメラ等で把握することが出来るが、高層ビルでは、地震時にエレベータが停止すると高層階まで徒歩で点検しなければならないなど時間を要

することが多い。

揺れの影響を受ける人数、初動対応等が必要な機関数から、高層ビルは長大橋や石油タンクに比べ多数のユーザーが存在し、また、被害状況の把握のしにくさがあることから、初動対応に際して、長周期地震動による高層ビル内の揺れの状況が認識できる情報が必要である。第1章2. で示したとおり、その高層ビルは概ね高さ45m以上（概ね14, 15階建以上）の固有周期1~2秒以上の建築物である。日本国内で最も高いビルは約300mであり、固有周期としては最大7~8秒である。このため、長周期地震動に関する情報は、高層ビルに大きな影響を及ぼす概ね1~2秒から7~8秒程度までの周期帯を対象とする。なお、この周期帯は、都市部に多い支間長700mクラスまでの斜張橋や吊橋、数万klクラスの浮き屋根式タンクも対象範囲となるため、これら施設管理者の防災対応の支援にも有効である。

3. 長周期地震動に関する情報の作成に用いる地震動の分析手法

長周期地震動は、これまでの研究等により、地動の最大速度や最大変位¹⁹⁾、長周期成分を考慮した組み合わせ震度²⁰⁾、長周期地震動を考慮した震度指標、1自由度系の応答スペクトル²¹⁾などが、評価に有効な分析手法として考えられる(表4)。地動の最大速度は長周期構造物の設計等において考慮され²²⁾、また最大変位は周期2秒以上の建物における変位応答等との相関が良い、との研究結果がある¹⁹⁾。長周期成分を考慮した組み合わせ震度は、計測震度の算出式に加速度ではなく速度もしくは変位を用いる。また、長周期地震動を考慮した震度指標は、計測震度で用いるフィルターのうちハイカットフィルターを長周期側まで伸ばして算出する。組み合わせ震度や長周期地震動を考慮した震度指標は、現在の計測震度と類似した数値で算出される。一方、1自由度系の応答スペクトルは、地震動の周期毎の強さをスペクトルとして表すもので、構造物の応答を考慮した指標となる。

長周期地震動に関する情報の発表に際しては、これらの分析手法について、計算時間、情報内容への利用のしやすさ、過去の被害等との調査のしやすさなどを考慮する必要がある。地動の最大速度や最大変位は、計算時間が短く、揺れの大きさを迅速かつ簡潔に表現できるが、固有周期毎の揺れの差を評価できない、といった課題もある。長周期成分を考慮した組み合わせ震度や長周期地震動を考慮した震度指標は、数値で表現できるので指標等への利用がしやすい反面、新たな「震度」を用いることで、従来の震度との混乱が生じるおそれがあるのではないかと考えられる。1自由度系の応答スペクトルは、地震動に対する高層ビルの応答を考慮しているため、固有周期毎に高層ビルの揺れの大きさを評価できるが、そのまま用いると情報内容が複雑かつ膨大となる、と考

えられる。

このように、長周期地震動の分析手法にはそれぞれ利点および課題があり、長周期地震動に関する情報の作成にあたっては、震度のように一つの分析手法だけではなく、複数の分析手法を組み合わせることも有効であると考えられる。

迅速かつ単純な情報を発表する手法としては、例えば、高層ビルでの体感の大きさや被害発生可能性について、最大地動速度や最大地動変位を用いて閾値を設定し、震度と組み合わせ、震度3や4を観測した地域で閾値を超えた最大地動速度や最大地動変位が観測された場合に情報を発表する、といった手法も考えられる。また、詳細な情報を発表する手法としては、固有周期に応じた構造物の応答をモデル化した時系列に、人の体感・恐怖感や家具等の転倒と相関のよい指標を適用するといった手法も考えられる。なお、長周期地震動の特徴の一つである継続時間を加味することも検討する。

長周期地震動に関する情報の発表には、各地で観測された地震波形を利用する。気象庁では現在、気象庁が設置した震度計および多機能型地震計の地震動データをリアルタイムで収集しており、当面、これらのデータが利用可能である。長周期地震動の評価には、通常の震度観測に比べ、長い地震動データの収録時間が必要であり、データの伝送、処理および収録の手法についてもさらなる検討が必要である。

表4 長周期地震動の評価に有効な分析手法

長周期地震動の評価に有効とされる解析手法	内容	計算時間	メリット	課題
地動最大速度、最大変位	震度が用いている加速度に比べ長周期地震動によって大きくなる。長周期建造物の設計等には最大速度が用いられ、また、周期2秒以上の建物の応答には変位が相関が良い、との研究結果 ¹⁹⁾ がある。	数分以内 (震央と観測点の位置によって異なる)	<ul style="list-style-type: none"> ・波形を迅速に入手できれば、計算時間が短い。 ・構造計算等の過去の実績が多く、指標等の作成時に調査がしやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・震源域近傍でも大きくなるため、指標だけでは長周期地震動のみの影響を取り出せない。 ・波形がないと過去の地震による評価がしにくい。 ・従来、高層ビルの構造への影響等については評価されてきたが、新たに高層ビル内の体感やビル内の被害等との関係について検討する必要がある。 ・継続時間は評価できない
長周期成分を考慮した組み合わせ震度 ²⁰⁾ など、資料4)、長周期地震動を考慮した震度指標(資料5)	速度や変位、また震度フィルターを長周期側まで伸ばしたものをを用い、計測震度と同様の数値を得る。長周期地震動が大きい場合、計測震度に比べ大きな値が算出される。	数分～十数分以内	<ul style="list-style-type: none"> ・絶対値で表現できるので、指標等への利用がしやすい。 ・震度との差が分かりやすい。 ・最大値を取る時間を延ばすと、継続時間を考慮可能 	<ul style="list-style-type: none"> ・震源域近傍でも大きくなるため、指標だけでは長周期地震動のみの影響を取り出せない。 ・波形がないと過去の地震による評価がしにくい。 ・新たな「震度」を用いることで、従来の震度との混乱が生じるおそれがある。 ・高層ビル内の体感やビル内の被害等との関係について検討する必要がある。
1自由度系の応答スペクトル ²¹⁾ (資料6, 資料7)	地震動の周期毎の強さをスペクトルとして表す。	数分	<ul style="list-style-type: none"> ・対象とする周期帯での地震動の大きさを評価しやすい。 ・構造計算等の過去の実績が多く、指標等の作成時に調査がしやすい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・スペクトルを情報化することは、情報内容が複雑かつ膨大となり、そのままでは難しい。 ・波形がないと過去の地震による評価がしにくい。 ・スペクトル強度と高層ビル内の体感やビル内の被害等との関係について検討する必要がある。 ・継続時間は評価できない

4. 長周期地震動に関する情報の発表のタイミングおよび内容

顕著な地震が発生した場合、緊急地震速報に始まり、地震および地震動については、震度速報、震源・震度に関する情報、各地の震度に関する情報、推計震度分布図を、また、海域で発生した地震においては、津波予報（警報、注意報を含む）、津波観測情報を発表し、これらはテレビ・ラジオにより随時伝達されている。

このように、地震直後に発表する情報量が多くなっていることから、利用者が優先度に応じて情報を適切に選択するとともに、発表する側も防災対応を鈍らせたり、伝達資源をオーバーフローさせたりしないよう、効率的、効果的な発表に努めるべきである。既存の多種類の情報が発表される中、長周期地震動に関する情報の発表のタイミングや内容は、利用者が情報の選択で混乱しないようにしなければならない。

気象庁が発表する地震および津波に関する情報で最も重要なものは、直ちに警戒避難が必要な緊急地震速報（警報）と津波警報・注意報および津波情報であり、次いで被害状況の迅速な把握に資する震度に関する情報である。長周期地震動に関する情報の発表にあたっては、出来る限り既存の情報体系の中に簡潔に組み込むことが必要である。また、長周期地震動の継続時間が長いことを考慮すると時間と共に詳しい情報を提供することが可能であるが、防災に効果的な情報とするためには、短い観測時間で分析した迅速で簡潔な情報と、時間をかけて情報量を高めたより詳しい情報の二段階に分けて発表することが考えられる。

例えば、施設管理者や高層ビル内にいる方が通常の地震とは異なる揺れであることを理解し、また、震度が同じであっても高層ビルに何らかの影響があることを認識して意識を高めて頂くため、地震発生から約5分後から発表する地震情報において、震度速報で発表する地域毎（〇〇県北部等）に、高層ビルに影響があるとみられる長周期地震動が発生していることを簡潔な内容で発表し、さらに、体感した揺れに対するさらなる理解や事後の行動の判断、防災対応の優先順位の検討や危機管理対応の検討などを行うために、より詳しい情報を必要とする利用者に対しては、一連の地震情報の発表が終了した後、インターネットHPや携帯端末等で観測地点毎に、被害発生可能性や揺れの大きさ等の指標や継続時間など、より詳細な情報が見られるようにする。つまり、揺れの全体像に関する即時的なPush型情報と、地点毎の情報を提供するPull型情報という段階的な伝え方が考えられる（図10）。なお、地点毎の情報についてもPush

型情報での提供を求めるユーザーもあると考えられる。このようなニーズに対しては、民間の情報配信事業者等の役割が期待され、気象庁においては、民間の情報配信事業者等が利用しやすい形での情報の提供も検討する必要がある。

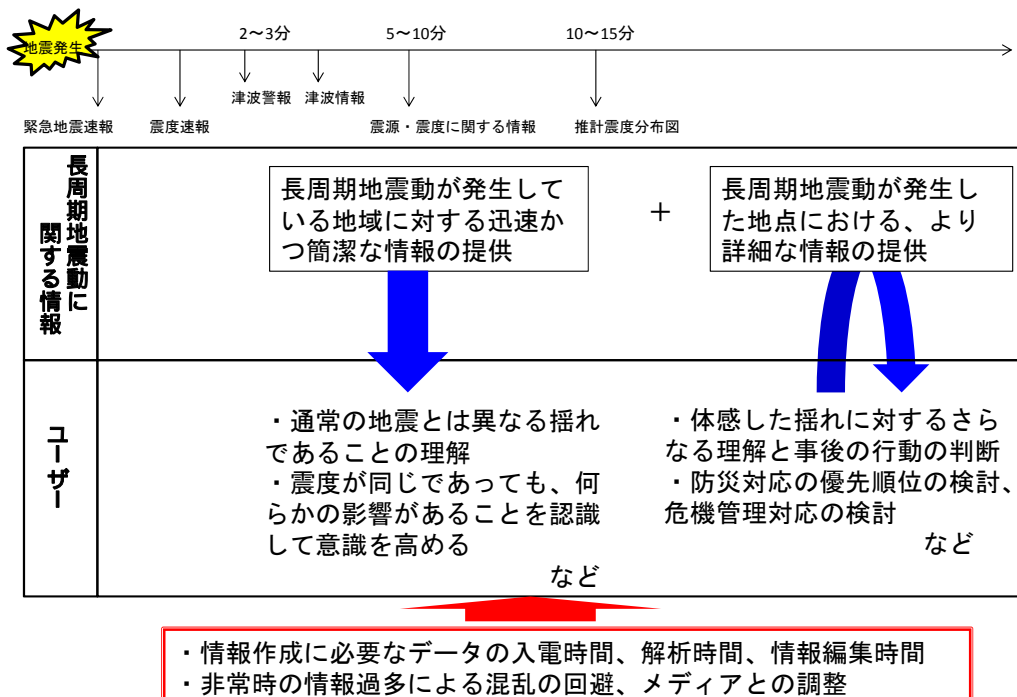


図 10 長周期地震動に関する情報の発表のタイミングおよび内容のイメージ

情報の内容は、TVのテロップで流すのか、放送原稿の参考にしていただけるようにするのか、何らかのアラームとして用いるのか、図情報とするのか、によって異なる。長周期地震動による高層ビル内の揺れは、震度とは異なる体感や被害を生じるため、その状況を分かり易くすることが必要である。また、長周期地震動による高層ビル内での体感や室内の様相について、震度階級と類似した指標、解説等があれば分かりやすい、ということも考えられるが、高層ビル内での揺れの大きさと被害発生については、未だ不明な点も多い。

このため、まずは、「大きく揺れる」「家具等の転倒の可能性がある」などの文章表現を用いるなど、構造物内の揺れの大きさをイメージしやすく簡潔な表現での発表を検討する。構造物内の揺れの大きさとの関係などについて、広く共通して理解されてきた震度と震度階級関連解説表が示す体感および室内の様相を、長周期地震動に関する情報内容や表現においても参考にすべきである。長周期地震動による被害の実態と地震動の大きさとの関係を、震度との違いなどは混同しないよう明確にしつつさらに調査・整理していくことが必要である。

5. 施設管理者、防災関係機関等の特定ユーザーに対するデータ提供等

高層ビルの施設管理者等は、被害が軽微な場合でも、継続使用の判断のため、近傍等で観測された地震動を用いた評価や、館内の点検等詳細な調査を行っている。また、石油タンクのスロッシングについては、速度応答スペクトルと液面高からスロッシング高を推定できるため、施設内で観測された地震動を用いて評価を行っている。このため、高層ビルや、石油タンクや長大橋などの施設管理者、防災関係機関等の特定ユーザーに対しては、一般向けの地震情報とは別に、防災対応の目的のために利用可能な波形や応答スペクトル等のデータの提供を検討することも必要である。

第4章 今後の課題

1. 長周期地震動に関する指標、情報の具体的な発表の方法、提供手段に関する検討

今後、情報を発表するための指標を確定し、過去の地震で観測された地震動から求めた指標の分析結果と、高層ビル内での揺れによる行動の困難さや不安感、生理的影響、家具・什器等の転倒・移動の状況等の状況の関係を踏まえ、発表するための閾値や情報に用いる表現、発表対象地域など、具体的な発表の方法を検討する必要がある。また、メディアやユーザーの意見を踏まえながら、具体的な提供手段を検討する必要がある。なお、長周期地震動による高層ビルにおける損傷の発生等の状況との関係については、関係各機関・学会等の調査・研究の動向などを調査しつつ、慎重に検討することが必要である。

2. 大都市圏等における気象庁の強震動観測体制の強化

第3章3. で示したように、長周期地震動に関する情報の作成には、当面、気象庁が設置した震度計および多機能型地震計の地震波形を利用する。しかし、気象庁の多機能型地震観測点は出来る限り地盤の良い場所を選んでおり、地震観測としての環境はよいが、長周期地震動が観測されにくい。また、これまでは、観測点の設置に際し高層ビルの立地状況は加味していなかったが、長周期地震動に関する情報を発表するためには、高層ビルが集中する場所の近傍に観測点を設置することが必要であると考えられる。

今後、気象庁を中心とした関係機関との連携を進めると共に、気象庁においても、長周期地震動による揺れの迅速な評価や、データの蓄積をするため、関係機関の観測点の位置などを考慮しながら、大都市圏等における観測点の増設に向けた検討を行う必要がある。

3. 長周期地震動の大きさと、高層ビル内における人の行動や心理、生理や什器転倒等の被害との対応等に関するさらなる調査の実施

気象庁では、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震において長周期地震動の影響を受けた高層ビル内等における人の行動や心理、生理への影響や、什器の転倒・移動等の特徴的な被害の調査を行ったが、気象庁のみの調査では箇所数、データ数共に限界があり、地表で観測された長周期地震動の大きさと、高層ビル内における行動の困難さや恐怖感、生理的な状況や家具転倒等との関係など、長周期地震動に関する情報を活用するための解説表などを作成するに

は至っていない。

現在、関係機関・学会等が、今般の東日本大震災等における高層ビルの被害の調査・研究を行われている。今後、これらの関係機関・学会等の協力を得つつ、揺れの大きさと、高層ビル内における揺れの体感や什器転倒等の実態に関するさらなる調査・検討が必要である。

4. 長周期地震動による高層ビル等の揺れの特性や室内の安全対策等に関する周知、啓発

長周期地震動による揺れの実態調査によって、高層ビルでは、構造被害が発生しない程度の揺れであっても、人的被害が発生しかねない様相を呈していたと推測される。ビルの固有周期や揺れの特性、揺れによって発生する可能性がある被害の様態、家具等の固定などの長周期地震動による被害の防止・軽減策の励行、さらに高層ビル等建物の長周期地震動対策の促進と共に、長周期地震動に関する情報の利用普及を進めていくことが重要である。

今後、気象庁では、新たに発表する予定の「長周期地震動に関する情報」を国民広くが認知するよう、周知を進めると共に、関係機関と連携しつつ、長周期地震動による揺れの特性、揺れによって発生する可能性がある被害等について、周知・啓発を図っていくことが必要である。

5. 長周期地震動に関する予報の検討

長周期地震動による高層ビル等の揺れは、その固有周期と共振する波が繰り返し入力することによって成長するため、長周期地震動の揺れが到達し、揺れが大きくなるまでの時間を考慮すると、長周期地震動に対して、緊急地震速報と同じように予報を発表することにより、地上の揺れに対する緊急地震速報よりも、さらに、高層ビル内等の方々の安全の確保等が図れることが期待されるため、予報についても検討が必要である。

文献

- 1) 中央防災会議（2011）東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告
- 2) 大阪府（2011）、咲洲庁舎の安全性等についての検証結果、大阪府ホームページ（http://www.pref.osaka.jp/hodo/attach/hodo-06971_4.pdf）
- 3) 吉原浩（1984）1983年日本海中部地震による石油タンクのスロッシングとその被害について、日本海中部地震による危険物施設の挙動に関する調査報告書、自治省消防庁消防研究所
- 4) 座間信作（2006）石油タンクのスロッシングと対策
- 5) 勝俣英雄・佐野剛志・鈴井康正（2011）地震後の応急危険度判定と早期復旧対策、日本建築学会構造委員会長周期建物地震対応ワーキンググループ、長周期地震動対策に関する公開研究集会資料,p.237-280
- 6) 太田外気晴・座間信作（2005）巨大地震と大規模構造物ー長周期地震動による被害と対策一、共立出版、pp.287
- 7) 土木学会地震工学委員会地震動研究の進展を取り入れた公共社会インフラの設計地震力に関する研究小委員会（2009）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）
- 8) 宮田利雄・山田均・勝地弘・中川洋(2003)明石海峡大橋常時微動データからの振動特性同定土木学会第58回年次学術講演会概要集
- 9) 齋藤大樹（2005）耐震・免震・制震のはなし、日刊工業新聞
- 10) 朝日新聞（2000）ガーデンプレイスの怪、AERA,2000.11.13
- 11) 日本建築学会（2011）2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報
- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所（2012）、平成23年（2011）東北地方太平洋沖地震被害調査報告
- 13) 日本建築学会構造委員会長周期建物地震対応小委員会（2012）長周期地震動対策に関する公開研究集会資料5., p.151-202
- 14) 鹿島建設（2007）プレスリリース「世界初、長周期地震に対応したエレベータ地震時管制運転システムを開発」、鹿島建設ホームページ（<http://www.kajima.co.jp/news/press/200708/31a1-j.htm>）
- 15) 添川光雄（2006）長周期地震動検知システム～六本木ヒルズ森タワーにおける取り組み～、建築設備&昇降機、No.60、p.23-26
- 16) 社団法人日本エレベータ協会（201～2）東北地方太平洋沖地震などの

昇降機被害調査報告、エレベータ界、201～2年1月、p.4-8

- 17) 国土交通省(2011)国土交通白書
- 18) 総務省消防庁・気象庁(2009)震度に関する検討会報告書
- 19) 長橋純男・小林啓美(1971)重層建築物の耐震設計を対象とした地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅,日本建築学会論文報告集, no.210, p.11-22
- 20) 清野純史・藤江恵悟・太田裕(1999)組合せ震度の提案・定式化とその応用について,土木学会論文集, no.612, p.143～151
- 21) 大崎順彦(1994)新・地震動のスペクトル解析入門,鹿島出版会
- 22) 日本建築センター高層建築物構造評定委員会(1986)高層建築物の動的解析用地震動について,ビルディングレター

資料

資料 1 : 高層ビルにおける聞き取り調査結果

資料 2 : 高層ビルにおけるアンケート調査票およびアンケート調査結果

資料 3 : 東北地方太平洋沖地震における石油タンクのスロッシングに関する調査結果（第 1 回検討会、座間委員資料）

資料 4 : 長周期地震動の指標に関する研究事例を踏まえた調査結果（第 2 回検討会、気象庁資料）

資料 5 : 長周期の揺れの尺度の検討（第 2 回検討会、小鹿委員資料）

資料 6 : 構造物の応答を考慮すべき気象庁震度（第 2 回検討会、川島委員資料）

資料 7 : 家具類の地震被害推定方法と長周期地震動による被害推定例（第 2 回検討会、金子委員資料）

資料 1 : 高層ビルにおける聞き取り調査結果

資料 1 高層ビルにおける聞き取り調査結果

高層ビル内の揺れの状況等を把握するため、東京都内 39 棟、大阪府内 4 棟に 3 月 11 日 14 時 30 分～15 時頃にかけて主として高層階におられた合計 85 人に対する聞き取り調査を行った。行動の困難さや恐怖感、生理的な状況等に関する結果を以下の表に示す。なお表中、建物番号の大は大阪府内、東は東京都内を指す。

建物番号	高さ	証言
大 1	60-100m	<ul style="list-style-type: none"> ・船に乗っているような、大きな横揺れを感じたが、行動に支障はなく、怖さもなかった（17 階、男性） ・普通に立っていられた（17 階、男性）
大 2	150m 以上	<ul style="list-style-type: none"> ・立ってられないほどの揺れで机に手をつけて支えていた（43 階、男性） ・歩くことは困難だった。（43 階、男性） ・特に大きな揺れとは感じなかった。地震に気付かない同僚もいた（1 階、男性）
大 3	150m 以上	<ul style="list-style-type: none"> ・支えていないと立ってられなかったが、よろめきながらも歩いて移動できた。小物類が倒れるようなことはなかった。同じような大きさの揺れが兎に角長かった。怖かった。（52 階、男性） ・足を踏ん張る必要はあったが立っていられた（20 階、男性） ・エレベータホールからバシンバシンという大きな音が聞こえて怖かった（20 階、女性） ・シャンデリアが大きく揺れて、地震だ、と気付いた（1 階、男性）
大 4	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・歩くのには支障はなかったが、大きな横揺れで驚いた（25 階、男性） ・低層階でも全員が揺れを感じたが、驚くほどのものではなかった（1 階、男性）
東 1	60m 以下	<ul style="list-style-type: none"> ・ガラスがガシャガシャと当たったが壊れるようなことはなかった。そのままでも立っていられたが、何かで支えようとカウンターに掴まった（10 階、女性）
東 2	60m 以下	<ul style="list-style-type: none"> ・速く大きな横揺れで、机にしがみついたが、身体がふられた。とても歩けなかった（8 階、男性） ・壁に身体をつけていたが、とても立ってられずしゃがみ込んだ。本棚がガタガタした後倒れ、恐怖で引きつった（8 階、女性） ・揺れがだんだん大きくなって行って、椅子から立ち上がって机にもぐろうとしたが、動けなくなって中腰のまま揺れを感じていた。窓枠がビシビシという音を立てガラスが割れるのではないかと思い怖かった（7 階、男性）

建物番号	高さ	証言
東 3	60-100m	<ul style="list-style-type: none"> ・ぐらぐら、とした緩やかな揺れが長く続いた。初めは立っていらなかった (20 階、男性) ・揺れの大きさに驚いたが、怖くはなく、普通に立っていられた (1 階、男性)
東 4	60-100m	<ul style="list-style-type: none"> ・ゆったりとした大きな横揺れで、床に手をついていないと転がる感じがした (20 階、男性)
東 5	60-100m	<ul style="list-style-type: none"> ・揺れが長く泣き出す女性がいた。立てない、歩けないという程ではなかった (19 階、男性) ・大きな揺れで驚いたが身体がしんどいほどではなかった (1 階、男性)
東 6	60-100m	<ul style="list-style-type: none"> ・上層階では全く歩けなかった。テレビや低いキャビネットが倒れた (18 階、男性) ・机に手をついていないと身体が持っていられる感じで、怖かった (8 階、男性) ・初め速い横揺れがあり、そのうちゆったりとした揺れになった。天井に吊ってある物がガシャガシャと音を立て、落ちてくるのではないかと思って怖かった (5 階、女性)
東 7	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・1m くらい椅子が動いた。叫び声は聞いていない。立ってられない状況だった (17 階、男性) ・恐怖感あった。業務のため、ゆったりとした揺れのなかをよろめきながら走った。女性の叫び声聞こえた (13 階、男性) ・業務のため持ち場へ走り始めたが、しばらくして走りづらくなった。2 分くらいのときは机に掴まっていなくて怖いくらいだった (2 階、男性)
東 8	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・立ってられないくらいの揺れで、気持ち悪く、長い揺れだった (11 階、男性)
東 9	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・立ってられないほどの揺れだった。(20 階、男性) ・ユラユラした横揺れで机に掴まった (地下 1 階、男性)

建物 番号	高さ	証言
東 10	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・あまりにも大きな揺れでとても立ってられず、床にしゃがみ込んだ。女性の悲鳴が聞こえた（21階、男性） ・大きな揺れでとっさに机の中に潜り込んだら、本棚が倒れてきた（20階、男性） ・大きな横揺れが長く続いてとても立ってられなかった。建物からギシギシという音が聞こえて壊れるのじゃないかと思い、怖さが募った（18階、女性） ・嵐の中の船の中にいるような揺れで、目が回ってしゃがみ込んだ。気持ち悪かった（18階、女性） ・立ってはいられたが、机に手を置いて支えていた（1階、男性）
東 11	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・ゆったりとした横揺れで、船の中にいるような感じ。立ってはいられた（19階、男性） ・スライド式書架が左右に動き回ってぶつかり、その音が兎に角怖かった（19階、男性）
東 12	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・立ってられずしゃがみ込んだ。ビル全体がぐるぐる回る感じ（30階、男性） ・あまりにも大きな揺れで、動けなくなってうずくまった（4階、男性）
東 13	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・揺れが大きく、掴まっていないと立ってられなかった。歩くことはとても出来なかった。ギシギシという音が聞こえてビルが壊れるかも、と思った（21階、男性）
東 14	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・揺れが始まって暫くして、あまりにも横揺れが大きくしゃがみ込んだ（20階、男性）
東 15	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・しゃがみこんだ。立っているのはつらかった。ブラインドが大きく揺れて、椅子が動き回った（25階、男性） ・初めは動けたが、次第にゆれがきつくなり、立ってられなくなった。外を見ると、隣のビルがしなるように大きく揺れていて怖さが募った（18階、男性） ・初め縦揺れがあつて、あ、地震だと思ったら、次第に揺れが大きくなりうずの中にいるような感じがした（18階、男性）
東 16	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・船に乗っている感じ。足を踏ん張っていても立てなかった（19階、男性） ・ゆったりとした大きな横揺れが兎に角長く続いて普通の地震じゃない、と思った（地下1階、女性）
東 17	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・一番揺れが大きいときは、掴まりなくなる程の揺れ。揺れている最中は歩けなかった（22階、男性）

建物 番号	高さ	証言
東 18	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・歩くことは困難で、船酔いのようなになった（23 階、男性） ・仕事があるので持ち場に急いだが、よろめいて真っ直ぐ歩くことは出来なかった（11 階、男性）
東 19	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・立ってられないほどではなく、歩けた。回りのビルが揺れているのが見えて、それが恐かった（10 階、男性） ・机の中に潜り込んだが、床がフライングカーペットのようだった。怖くて頭を抱えていた（22 階、男性）
東 20	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・椅子に座っていたが次第に左右に大きく振られ、床に座り込んだ（20 階、男性） ・揺れが大きく、隣のビルがぶつかりそうになって、目をつぶった（18 階、女性） ・地震だね、などと話していたら、船の中にいるような揺れとなつてとても立ってられなかった。壁にひびが入るのをみて怖くて仕方なかった（18 階、男性）
東 21	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・ガタガタという短い横揺れがあつて、あ、地震だ、と気付いた後、ユラユラー、と兎に角長い横揺れになった。歩けないほどではなかったが、気持ち悪かった（18 階、男性）
東 22	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・かなり大きな縦揺れがあつて、その後はぐるぐる回るような変な揺れが長く続いた。窓の外をみると高速道路の電灯の柱がブンブン振れていて大きな地震だ、とおもった（10 階、男性）
東 23	100-150m	<ul style="list-style-type: none"> ・屋上で設備の点検をしていたら、次第に揺れが大きくなって、振り落とされるのではないかと思い、床に這いつくばった。給水塔の水が大きく揺れているのが分かった（屋上階、男性） ・地震だ、と思って机に手をおいて支えていた。ゆったりした横揺れが長く続いたように思う。特に悲鳴などはなかったが驚いた（地下 1 階、男性）
東 24	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・揺れは、最初円をかくようになって、次第に大きく回る感じ。高層階は立ってられないくらい。暫くして揺れが収まってからも、階段は手すりを掴まりながらでないと歩けなかった（22 階、男性）
東 25	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・揺れは大きく、とても驚いたが、ソファに座っている状態では怖くはなかった（40 階、男性）
東 26	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・立てないくらいの揺れで、とても歩くことは出来なかった。女性の悲鳴が聞こえた（32 階、男性） ・ゆっくり揺れた。船に乗っているような感じ（10 階、男性）

建物番号	高さ	証言
東 27	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・立ってられず、歩けない。座り込みながらワゴンを動かさないように支えているのがやっとだった (35 階、男性) ・時化の船に乗っているような感じ。一方向に揺れが大きく、身体が揺さぶられたので向きを変えたら少し安定できた (30 階、男性)
東 28	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・船に乗っている感じで、揺れが大きく、怖くてしゃがみ込んだ (30 階、女性)
東 29	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・今までに経験したことのない揺れの大きさ、長さ。スライド式書架がぶつかる音やギギーギギーと建物の中で何かが擦れるような音が響いて、怖くて目をつぶっていた (29 階、男性)
東 30	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・かなり揺れた。階段を B1F まで降りたが真っ直ぐ歩けなかった (1～2 階、男性)
東 31	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・東西方向にすごい揺れ。歩けず、掴まないと立ってられないくらいで、揺れによって気持ち悪くなった。非常階段を下りようとしたらひびが入っていて怖かった (31 階、男性) ・床が無くなるのでは、と思うような揺れ。身体が振られて立っているのはつらかったのでしゃがみ込んだ (16 階、男性) ・早い横揺れが大きかったが、立ってはいられた。悲鳴は聞こえなかった (2 階、男性)
東 32	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・会議室から自席に戻る途中だったが、揺れが大きく、真っ直ぐ歩けなかった。壁に手をつけて歩いた (43 階、男性) ・歩けることは歩けたが、普通に歩くことは出来なかった。女性が悲鳴を上げていたように思う (35 階、男性) ・そのまま立っているのはつらい感じだった。怖くはなかった (8 階、男性)
東 33	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・船に乗っているような感じ。立ってはいられた (32 階、男性)
東 34	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・初め大きな縦揺れを感じた。立ってられないほどではなかった (10 階、男性) ・身動きできず、立ってられない状態だった。揺れは長くて気持ち悪かった (48 階、女性) ・机に手を置いて身体を支えていたが、次第に難しくなってしゃがみ込んだ (50 階、女性)
東 35	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・大きな揺れを感じたが歩けた。それほど怖くはなく、揺れている最中も周りとお話をしていた (40 階、男性)

建物 番号	高さ	証言
東 36	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・歩けたが掴まっていた。それまでに自宅で経験した震度 5 弱の方がよっぽど怖かった (39 階、男性) ・机にしがみついていた。怖くて泣き出しそうだった (39 階、女性) ・椅子に座り続けることは出来たが、足を踏ん張っていないと椅子が動き出しそうだった (39 階、男性) ・大きな揺れで机に手をつけて支えた。ビルからギシギシという音が聞こえたが、風が強いときもよくあるのでそれほど怖くはなかった (3 階、男性) ・人口池の水が大きく揺れてあふれ出したのが見えたが、揺れが大きくて動けず、あしがびしょびしょになった (43 階、女性)
東 37	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・かなり揺れたが歩けた。周りでも歩けなかったという人はいなかったように思う (50 階、男性)
東 38	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・歩けないというほどではなく、物も特に落ちなかった (52 階、男性) ・きつい揺れという感じはせず、低い建物の自社に戻ったときの方が被害が大きくびっくりした (52 階、男性)
東 39	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・立ってはいられたが真っ直ぐは歩けない。初めは揺れに気がつかなかった (55 階、男性) ・女性の悲鳴が聞こえたが、揺れている最中でも自分はそれほど怖くはなかった (54 階、男性)
東 40	150m以上	<ul style="list-style-type: none"> ・揺れが大きく、机の中に潜りこんだ。手をついていないと身体を支えていられなかった (24 階、女性) ・あぐらをかいて座ったが、身体が振られて、這いつくばった (24 階、男性)

資料 2 高層ビルにおけるアンケート調査票およびアンケート調査結果

資料2 高層ビルにおけるアンケート調査票およびアンケート調査結果

【アンケート調査票】

2011年3月11日の地震の際、詳細なゆれの状況を把握するため、アンケート調査を実施しております。調査した資料は気象庁での検討のための資料とさせていただきます。皆様におかれましては、ご多用のところ大変恐縮ではございますが、以下の調査項目にご回答くださいますようお願いいたします。

性別： 1. 男性 2. 女性（差し支えなければ、年齢を記入ください→年齢 歳）

(0) 3月11日の地震発生当時、オフィスにいましたか。

1. いた 2. いなかった

これ以後のアンケートは、(1)で“いた”と答えた方にうかがいます。“いなかった”とお答えされた方はアンケートが終了となります。

(0-1) 3月11日の地震発生の際、何階にいましたか。

(_____ 階)

(1) 3月11日の地震発生の際、緊急地震速報を見聞きしましたか。

1. はい 2. いいえ

(1-1) (1)で“1. はい”とお答えした方にうかがいます。緊急地震速報は何で見聞きしましたか。

1. テレビ 2. ラジオ 3. 携帯電話 4. 館内放送 5. その他
(_____)

(2) あなたは地震のとき、ブラインド、カレンダー、カーテン、電灯やスイッチのひもなど、吊してあるものが揺れ動くのを認めましたか。

1. 注意しなかった 2. 見たが動きは認められなかった 3. かすかにゆれた
4. かなり激しくゆれた 5. 非常に激しくゆれた 6. ゆっくりとゆれた

(3) コップ等の水、又はガラスビンの中のモノ(飲料水など)の動きはいかがでしたか。

1. 注意しなかった 2. 見たが動きは認められなかった 3. かすかに動いた
4. かなり動いた 5. 激しく動いた 6. あふれる程に、激しく動いた

(4) 具体的に、地震のあとで、開閉が困難になった戸や窓はありましたか。

1. なかった 2. あった 3. わからない

(5) 具体的に、棚から落ちた本などはありましたか。

1. なかった 2. 落ちたものがあった 3. いくつかのものが落ちた
4. 多くのものが落ちた 5. 棚ごと倒れた 6. わからない

(6) 本棚・戸棚など、重い家具の動きは認められましたか。

1. 動かなかった
2. わずかにゆれ動いた
3. かなりゆれた
4. 多少ズリ動いた
5. 大きくズれたり、倒れたものもあった
6. ほとんど全部が倒れた

(6-1) 家具の動きが認められた方にうかがいます。その家具を固定していましたか。

1. 固定していなかった
2. 何らかの手段で固定していた

(6-2) キャスター(車輪)付きのコピー機(複合機)やワゴン、キャスター付きの機器の動きは認められましたか。

1. 動かなかった
2. わずかにゆれ動いた
3. かなりゆれた
4. 多少ズリ動いた
5. かなり激しく動いた
6. 非常に激しく動きまわって、倒れたものもあった

(7) 本棚・戸棚などの扉や引き出しはどうなりましたか(複数回答可)

1. 何も変化はなかった
2. 扉がひらいたものがあった
3. ほとんど全ての扉が開いた
4. 引き出しが飛び出したものがあった
5. ほとんど全ての引き出しが飛び出した
6. 引き戸がうごいたものがあった
5. ほとんど全ての引き戸がうごいた
7. わからない

(8) フロアー全体としてのゆれはいかがでしたか。(複数回答可)

1. 認められなかった
2. わずかにゆれた
3. かなりゆれた
4. 激しくゆれた
5. 非常に激しくギシギシゆれた
6. 倒れんばかりにゆれた
7. ミシミシとゆっくりゆれた

(9) ゆれの変化はどのようなものでしたか

1. はじめに大きくゆれてすぐにおさまった
2. しだいにゆれが大きくなった
3. 間欠的に大きなゆれがあった
4. わからない

(10) フロアーには、なんらかの被害はありましたか。

1. 幸い、全然なかった
2. 額がはずれたり、掛物が傾いたりした程度
3. 壁かけ、額などが落ち、または花びん・ガラス器具が割れた
4. 液晶ディスプレイが倒れた
5. わずかながら壁にヒビ割れが入った
6. 天井板がずれたり、落下したものがあつた
7. かなりヒビ割れが入り、柱や壁の継ぎ目の食い違いも目につく程度

8. 被害はかなり大きく、修理の必要がある 9. 床の傾きが目立った

10. その他(落下した物など :)

(11) あなたは、地震のゆれている時間をどのように感じましたか。

1. 非常に短かった
2. 短かった
3. どちらともいえない
4. 長かった
5. 非常に長かった
6. いつ終わると知れなかった

(12) あなたが、地震をもっとも強く感じたのは、どのようなゆれのときですか。(複数回答可)

1. ドンと突き上げてくる感じのゆれ
2. かなり速い横ゆれ
3. ゆっくりとした横ゆれ
4. 特に区別できなかった
5. その他()

(13) あなたは地震に気がついたとき驚きましたか。

1. 全然驚かなかった
2. 多少驚いた
3. かなり驚いた
4. 非常に驚いた
5. このうえなく驚いた

(14) それではこわさの程度はいかがでしたか。

1. なんとも思わなかった
2. 少々こわいと思った
3. かなりこわいと思った
4. 非常にこわいと思った
5. 絶望的になった

(15) 窓の外を見てどう思いましたか

1. 外は見なかった(見えなかった)
2. なんとも思わなかった
3. 風景がうごいているのを見て多少不安になった
4. 風景がうごいているのを見てかなり不安になった
5. 風景がうごいているのを見て非常に不安になった
6. 風景がうごいているのを見てこのうえなく不安になった

(16) 地震のときフロアーいた方にうかがいます。あなたはそのときどのような行動に出ましたか。

1. なんにもする必要を感じなかった
2. 意識的に身の安全を考えた
3. 1階に避難した
4. ほとんど知らない間に建物の外へとび出した
5. 全く本能的に行動したので、よく覚えていない

(17) 地震のときフロアーいた方にうかがいます。地震のとき立っていられましたか

1. 普通に立っていられた
2. 物に掴まりたいと感じた
3. 物に掴まらなないと立っていることが難しかった
4. 物に掴まっても立っていることが難しかった
5. 這いつくばった

(18) 地震のときに動いていた方にうかがいます。

1. 行動に少しも支障を感じなかった
2. やや支障を感じたが滞りなく行動できた
3. 乱れるが滞りなく行動できた
4. かなり乱れ動き続けるのは困難であった
5. 立っては動けなかった
6. はいづくばってしまった
7. 体をすくわれて倒れた

(19)地震後 1 時間程度の間、気分が悪くなったりしましたか。

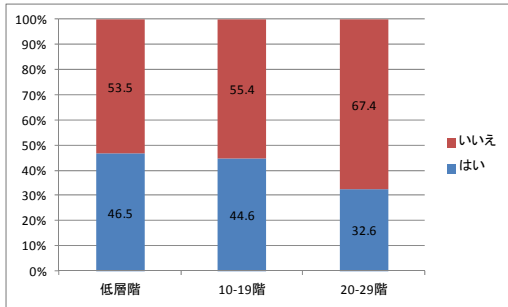
1. なんともなかった
2. めまいがするなど少し気分がわるくなった
3. めまいや吐き気でかなり気分がわるくなった
4. 嘔吐するなど、非常に気分がわるくなった
5. 寝込んでしまった
6. 覚えていない

(20)(19)で1. 以外の方にお伺いします。気分が悪くなって、どういう気持ちになりましたか

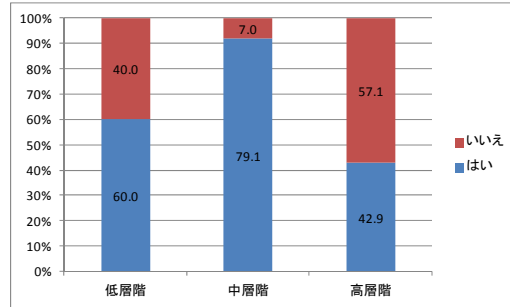
1. そのままでも平気だった
2. 動きたくないと思った
3. 部屋の中にかくないと思った
4. ビルの外に出たいと思った
5. 病院に行きたいと思った
6. 帰りたいと思った
7. 覚えていない

【アンケート調査結果】

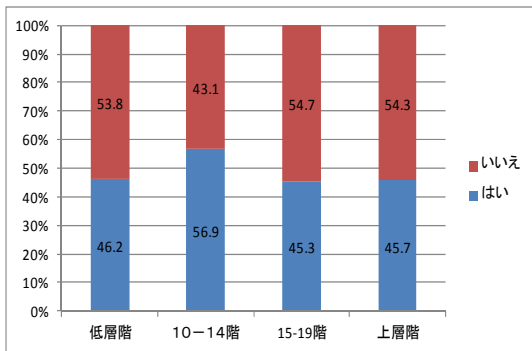
(1) 3月11日の地震発生の際、緊急地震速報を見聞きしましたか



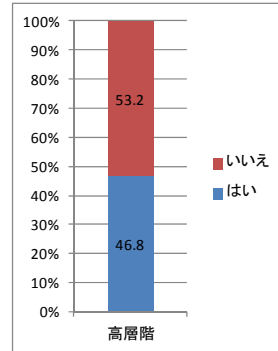
工学院大学



Aビル

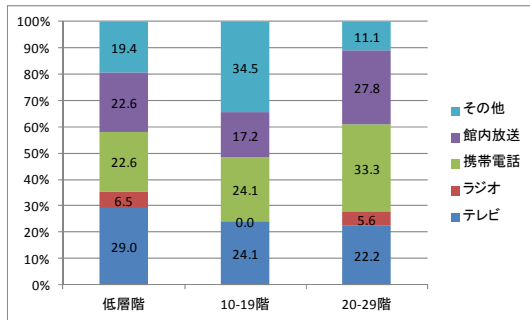


Bビル

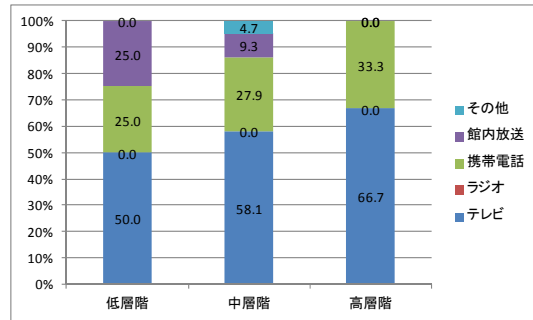


Cビル

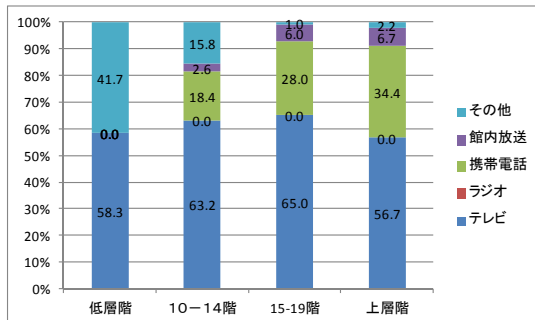
(1)で“1. はい”とお答えした方にうかがいます。緊急地震速報は何で見聞きしましたか



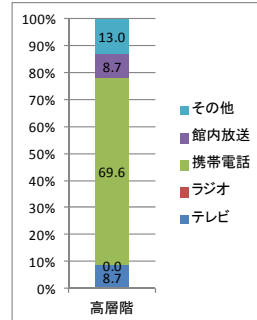
工学院大学



Aビル

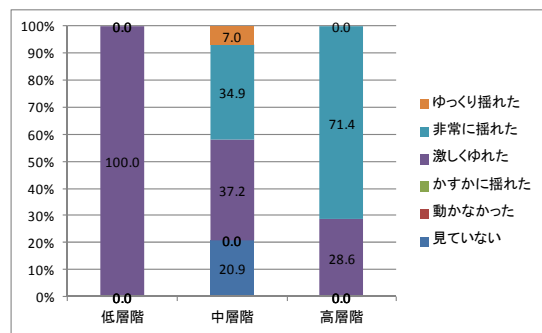
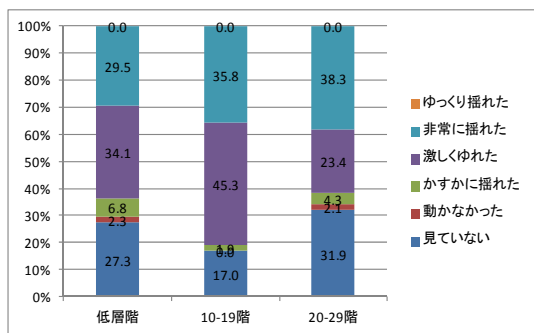


Bビル

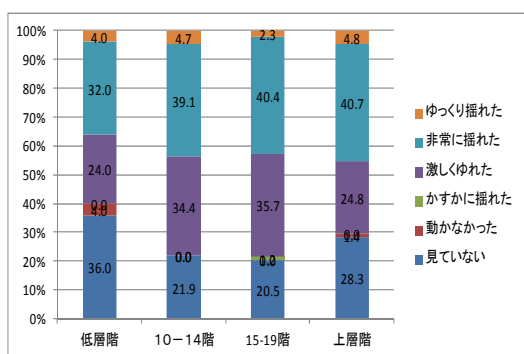


Cビル

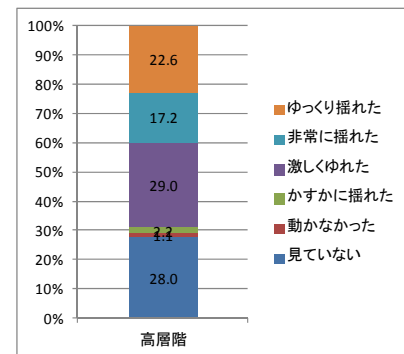
(2) あなたは地震のとき、ブラインド、カレンダー、カーテン、電灯やスイッチのひもなど、吊してあるものが揺れ動くのを認めましたか。



工学院大学



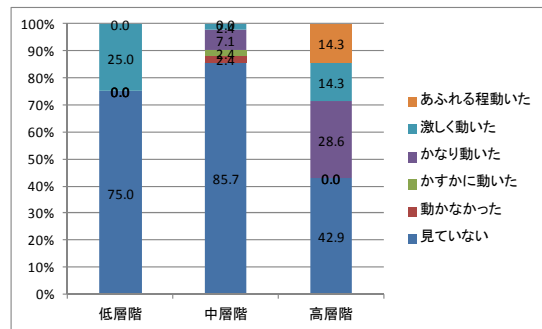
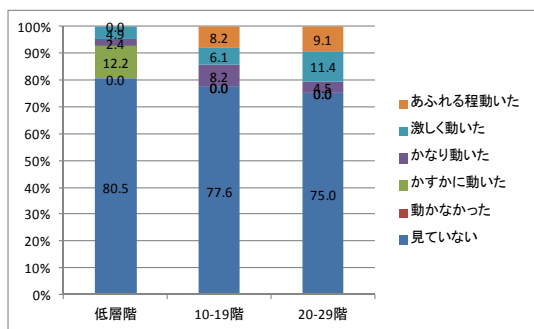
Aビル



Bビル

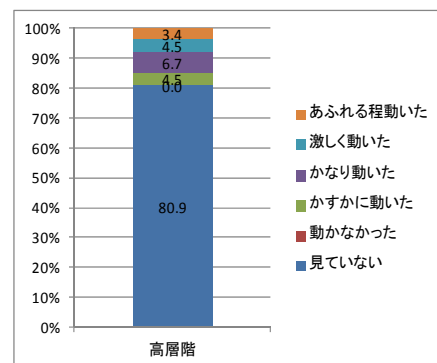
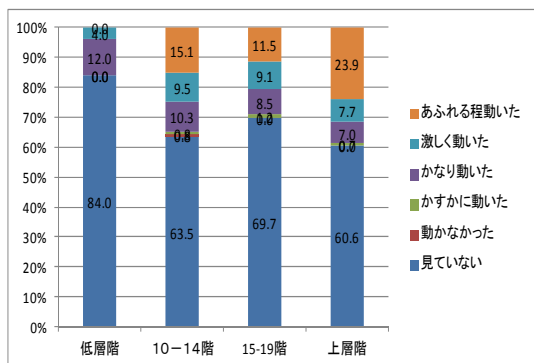
Cビル

(3) コップ等の水、又はガラスビンの中のモノ（飲料水など）の動きはいかがでしたか。



工学院大学

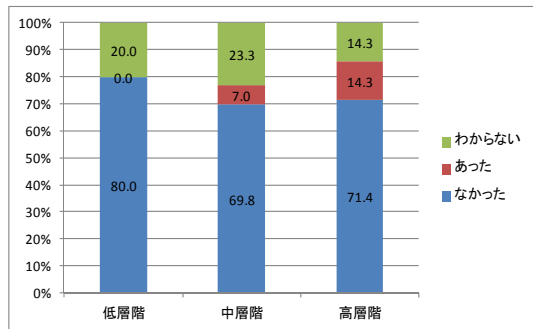
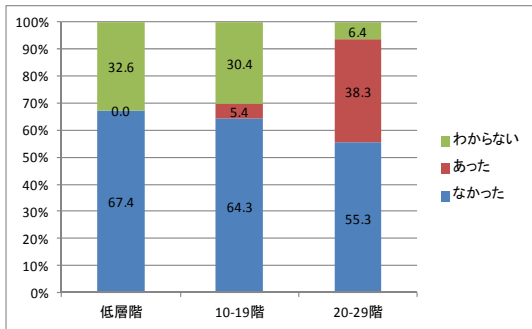
Aビル



Bビル

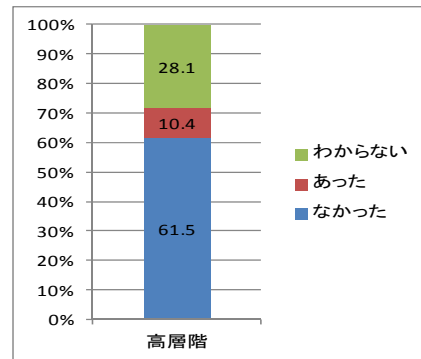
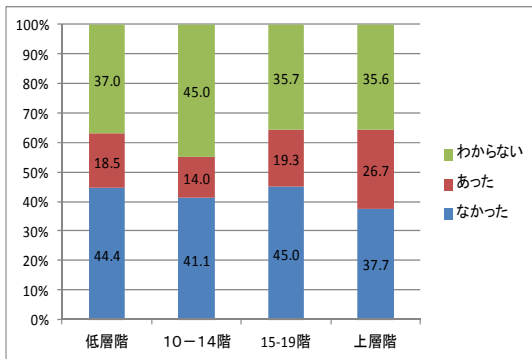
Cビル

(4) 具体的に、地震のあとで、開閉が困難になった戸や窓はありましたか。



工学院大学

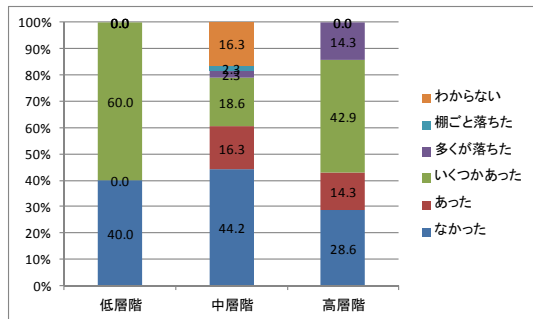
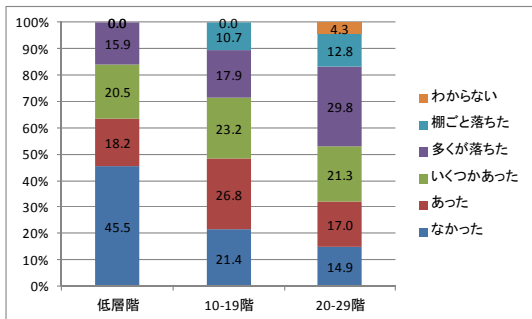
Aビル



Bビル

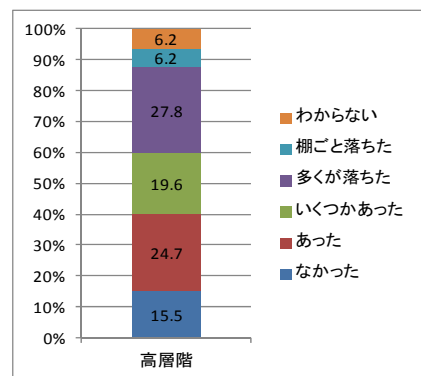
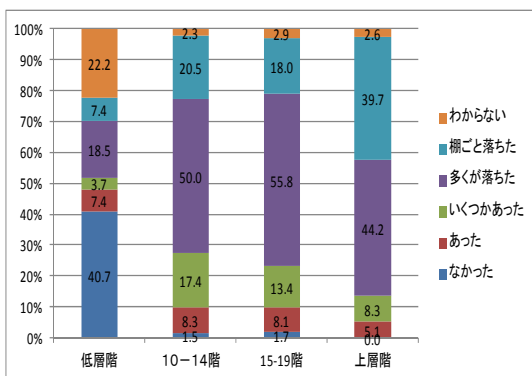
Cビル

(5) 具体的に、棚から落ちた本などはありましたか。



工学院大学

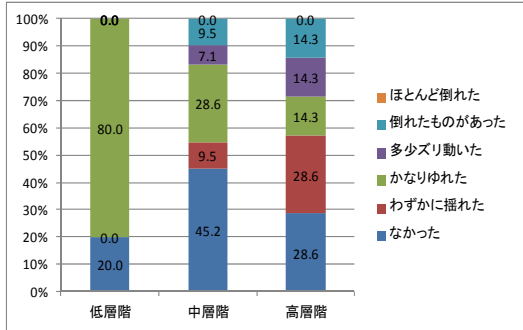
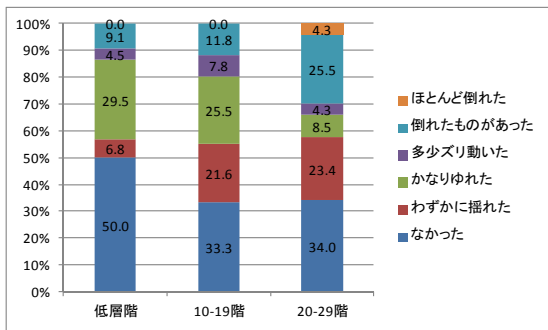
Aビル



Bビル

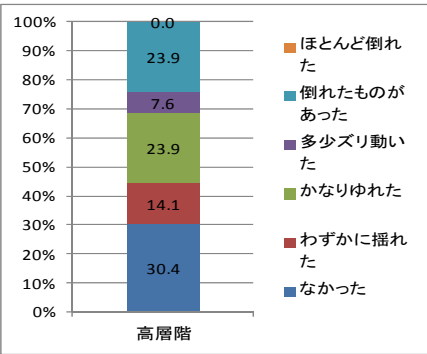
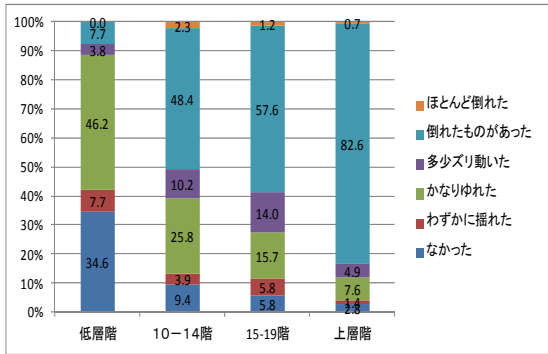
Cビル

(6) 本棚・戸棚など、重い家具の動きは認められましたか。



工学院大学

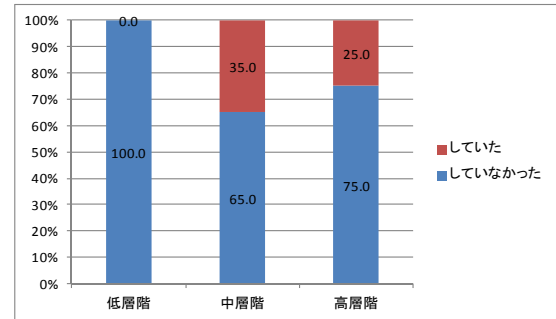
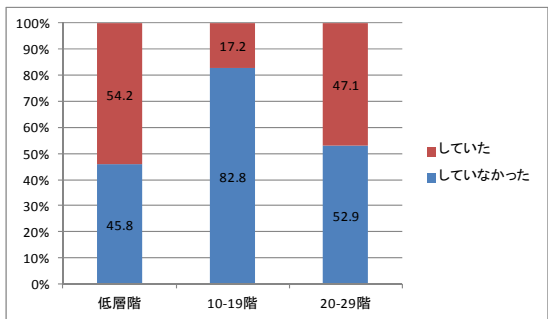
Aビル



Bビル

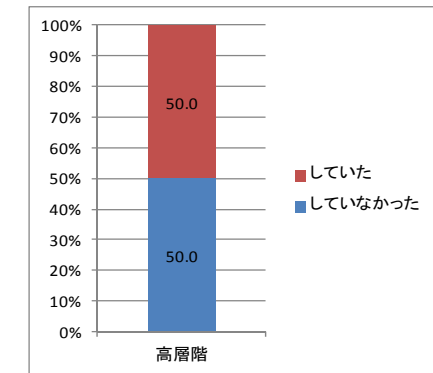
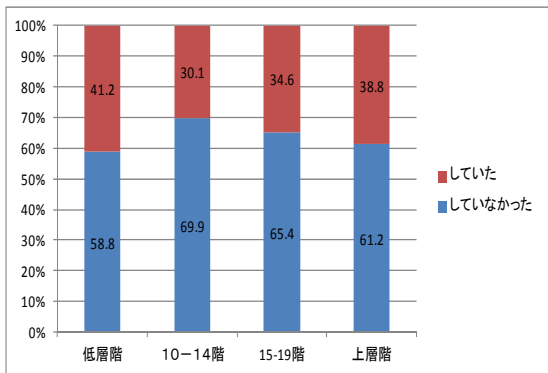
Cビル

(6-1) 家具の動きが認められた方にうかがいます。その家具を固定していましたか。



工学院大学

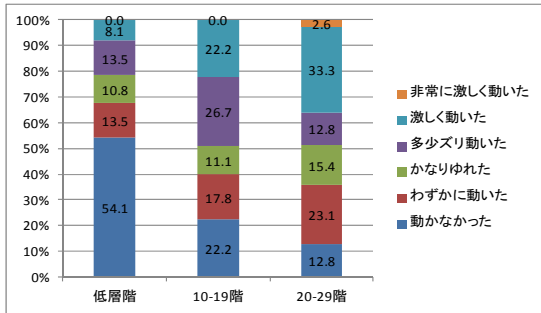
Aビル



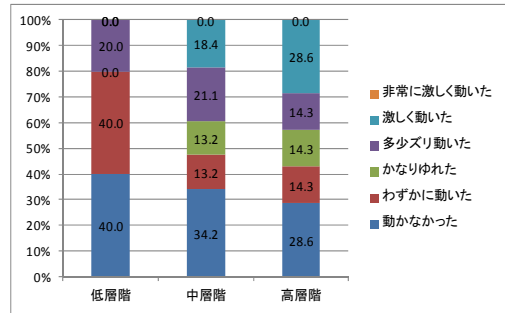
Bビル

Cビル

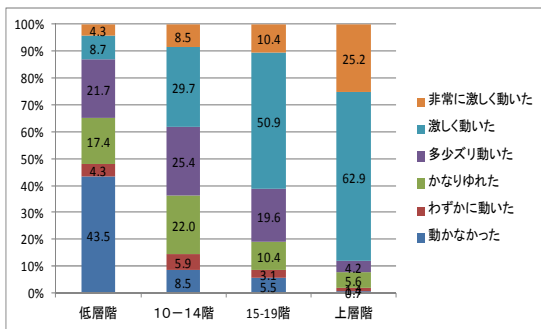
(6-2) キャスター(車輪)付きのコピー機(複合機)やワゴン、キャスター付きの機器の動きは認められましたか。



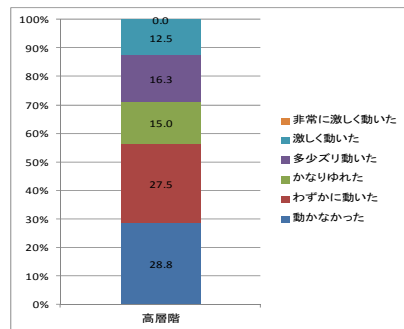
工学院大学



Aビル

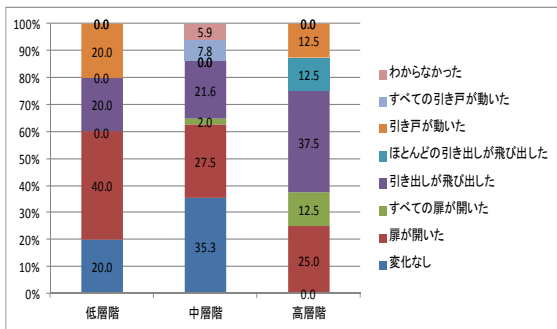


Bビル

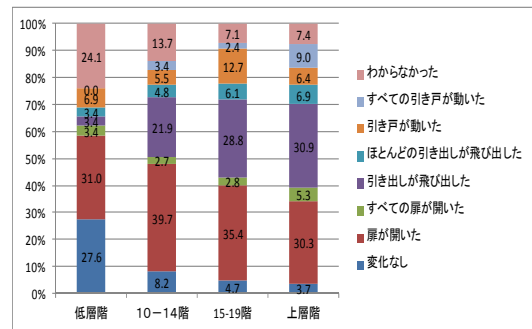


Cビル

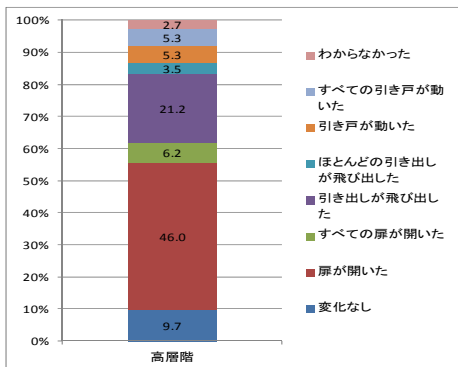
(7) 本棚・戸棚などの扉や引き出しはどうなりましたか(複数回答可)(工学院大学では設問になし)



Aビル

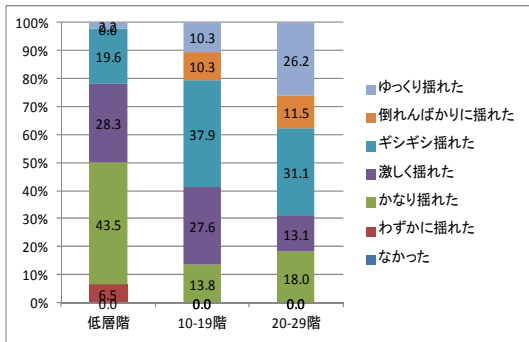


Bビル

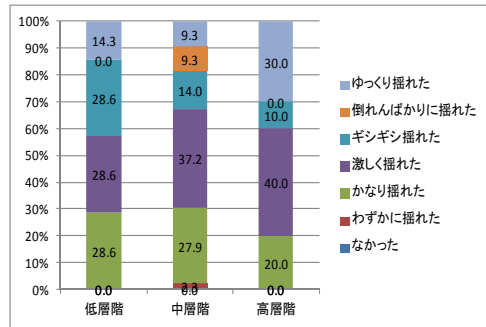


Cビル

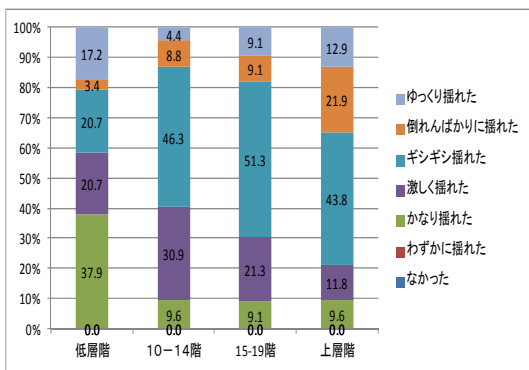
(8) フロア全体としてのゆれはいかがでしたか。(複数回答可)



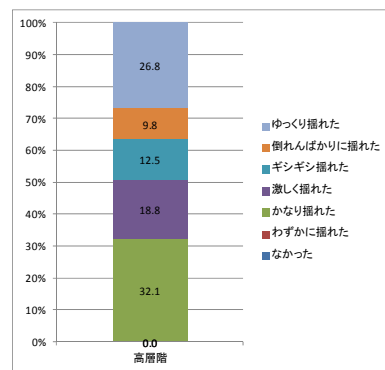
工学院大学



Aビル

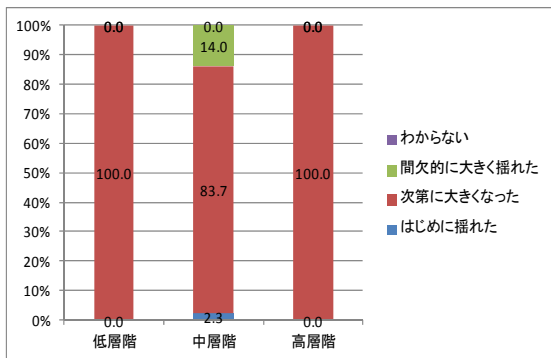


Bビル

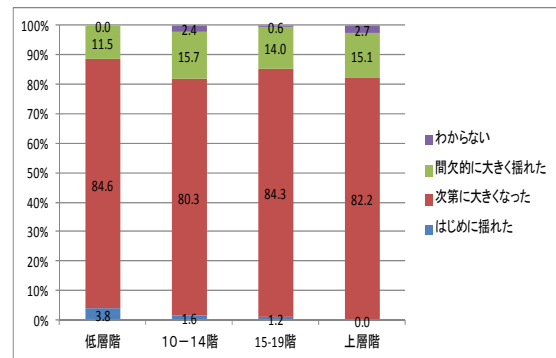


Cビル

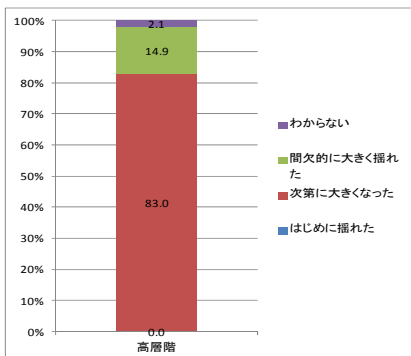
(9) ゆれの変化はどのようなものでしたか (工学院大学では設問になし)



Aビル

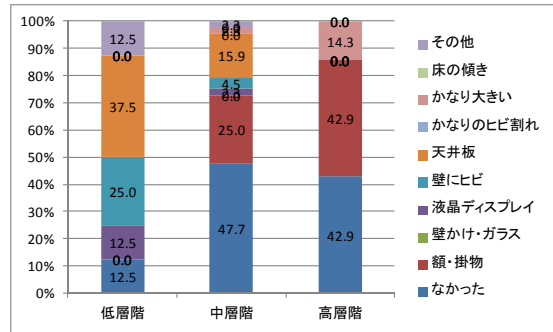
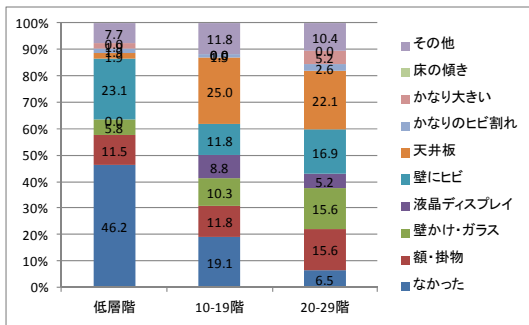


Bビル



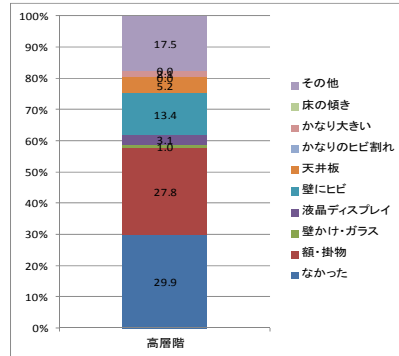
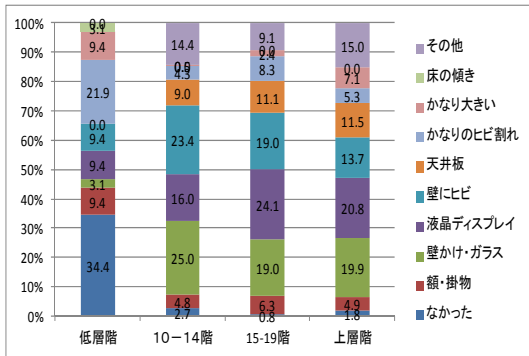
Cビル

(10) フロアーには、なんらかの被害はありましたか。



工学院大学

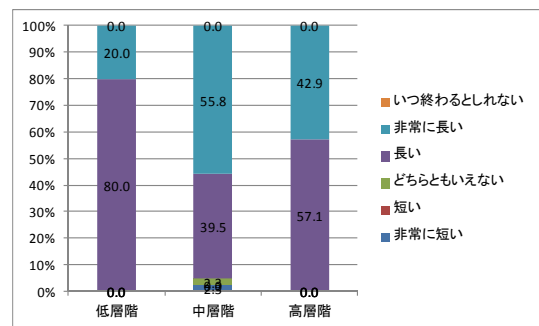
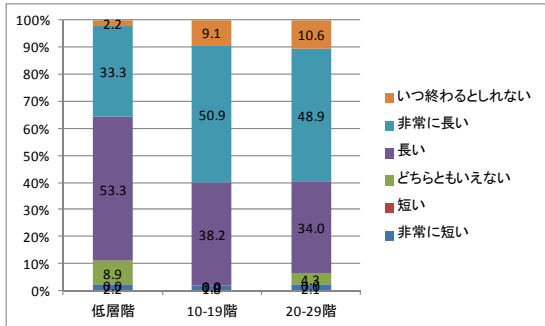
Aビル



Bビル

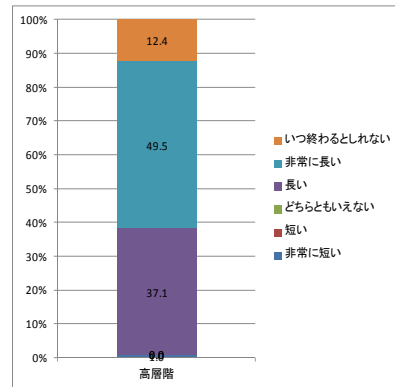
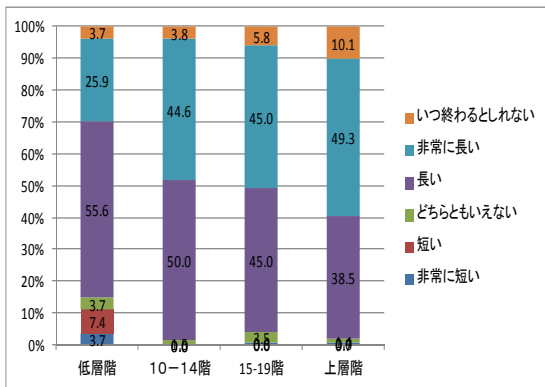
Cビル

(11) あなたは、地震のゆれている時間をどのように感じましたか。



工学院大学

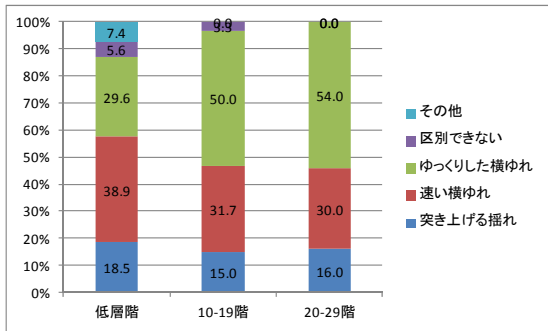
Aビル



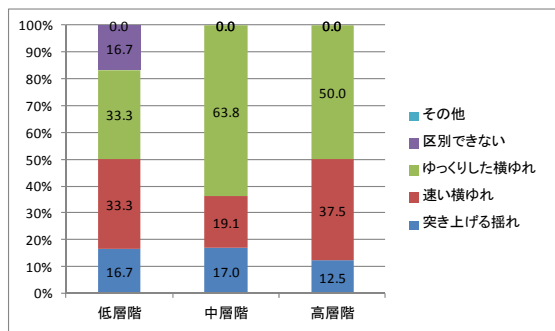
Bビル

Cビル

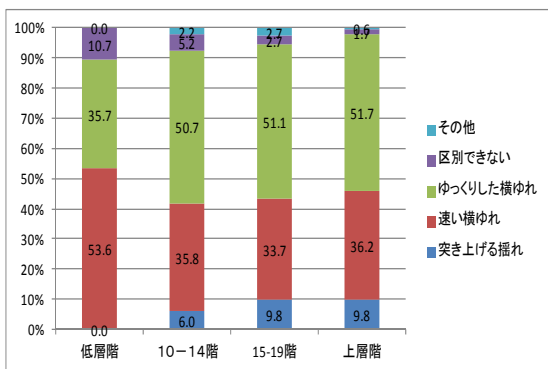
(12) あなたが、地震をもっとも強く感じたのは、どのようなゆれのときですか。(複数回答可)



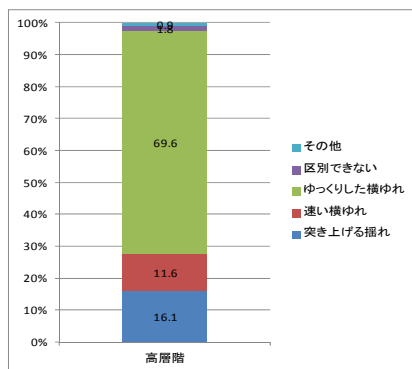
工学院大学



Aビル

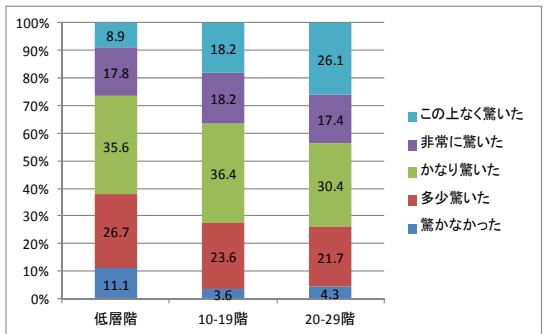


Bビル

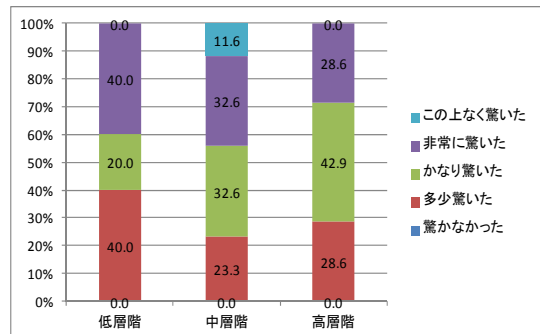


Cビル

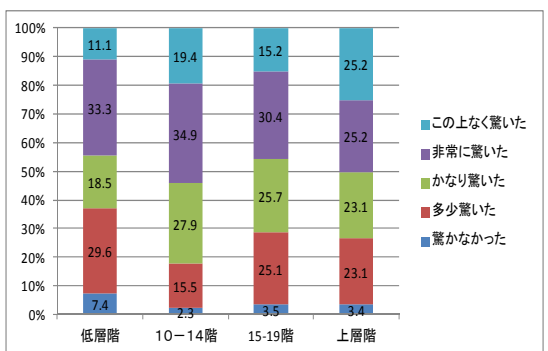
(13) あなたは地震に気がついたとき驚きましたか。



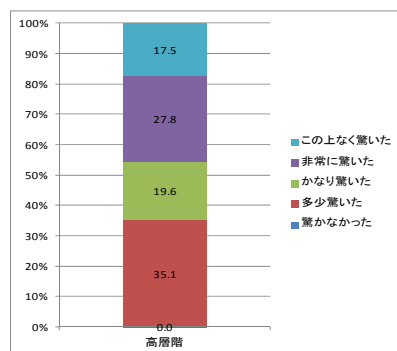
工学院大学



Aビル

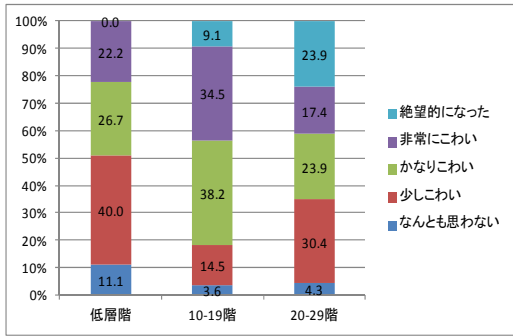


Bビル

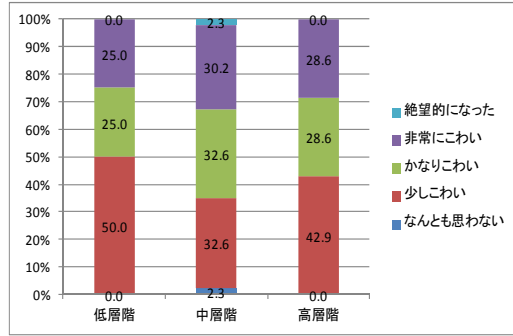


Cビル

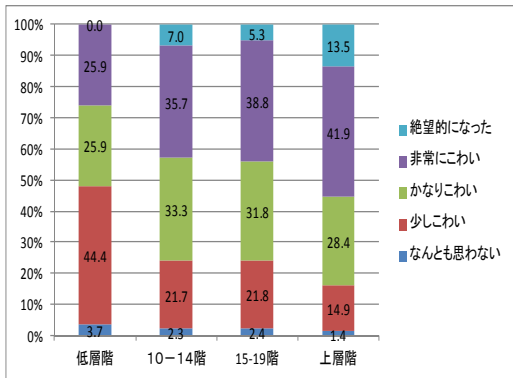
(14) それではこわさの程度はいかがでしたか。



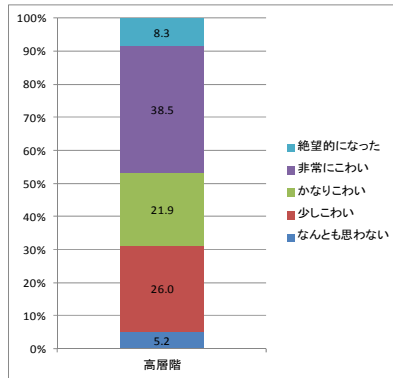
工学院大学



Aビル

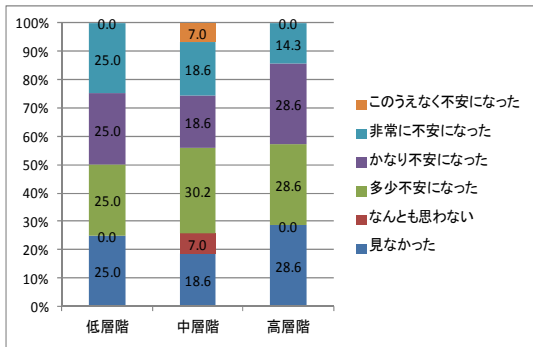


Bビル

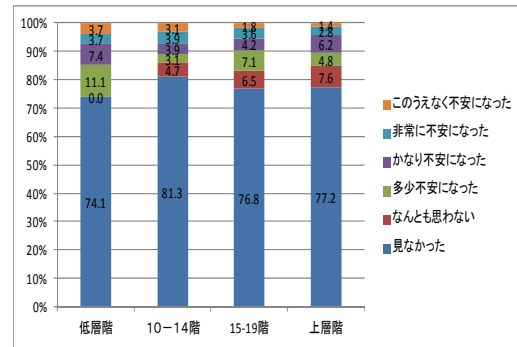


Cビル

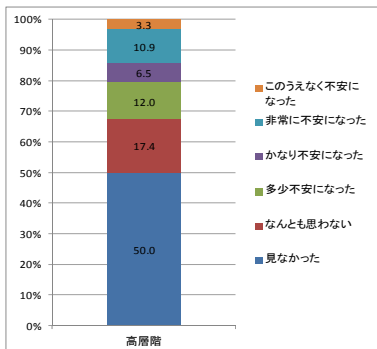
(15) 窓の外を見てどう思いましたか（工学院大学では設問はなし）



Aビル

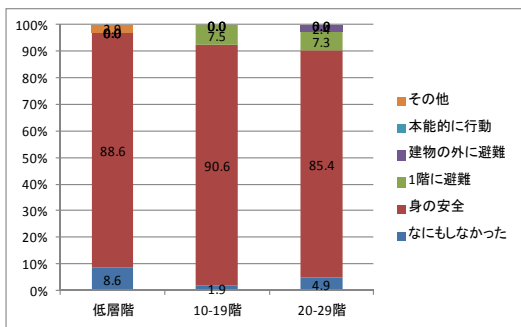


Bビル

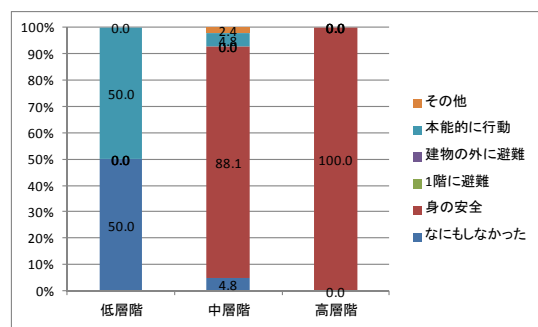


Cビル

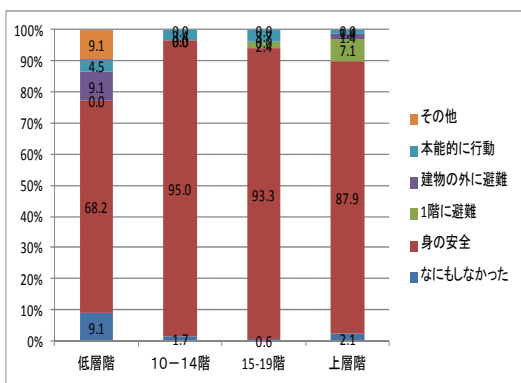
(16) 地震のときフローアーいた方にうかがいます。あなたはそのときどのような行動にしましたか。



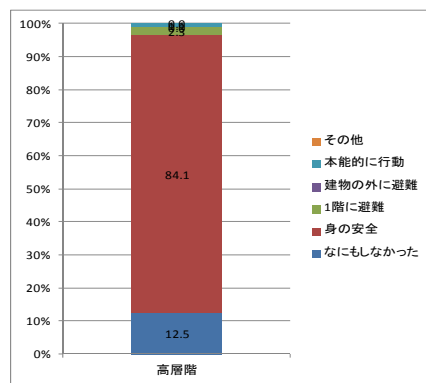
工学院大学



Aビル

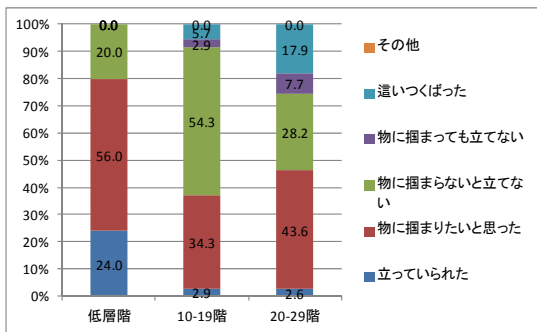


Bビル

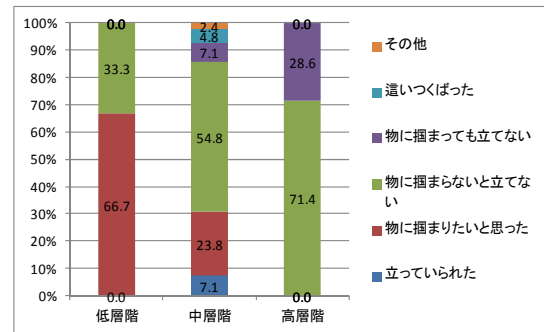


Cビル

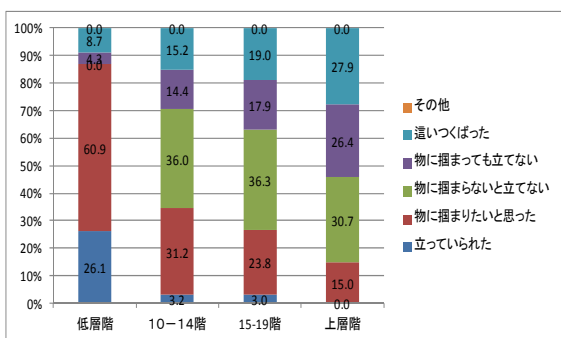
(17) 地震のときフローアーいた方にうかがいます。地震のとき立っていられましたか



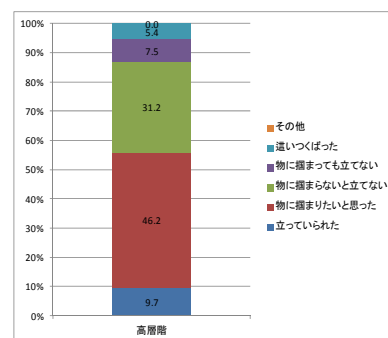
工学院大学



Aビル

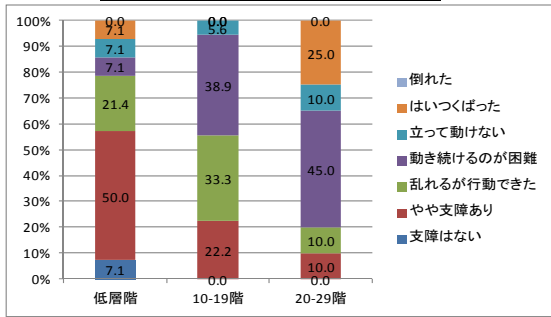


Bビル

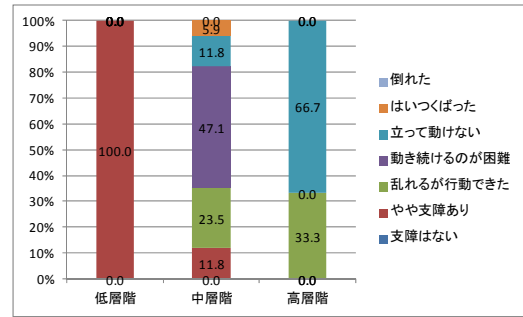


Cビル

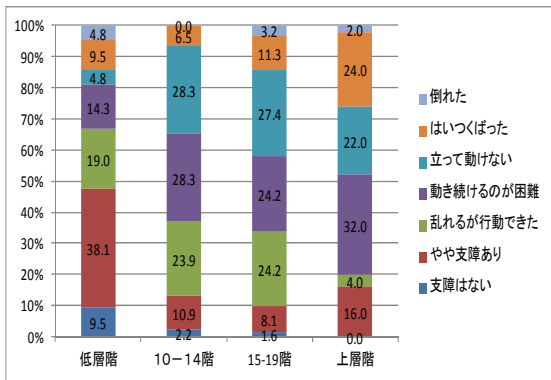
(18) 地震のときに動いていた方はいかが입니다。



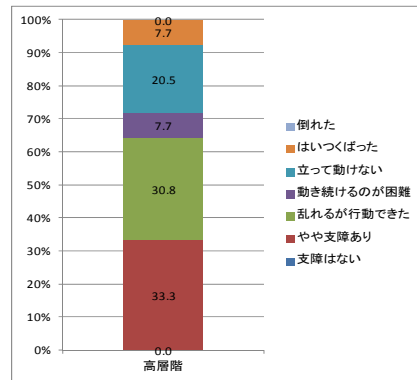
工学院大学



Aビル

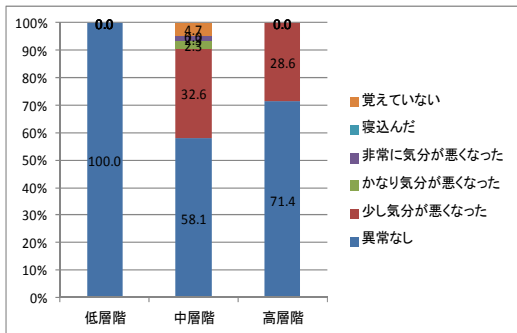


Bビル

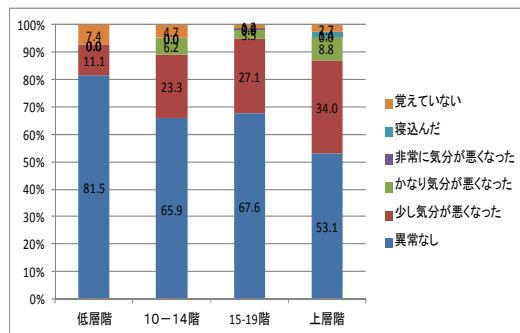


Cビル

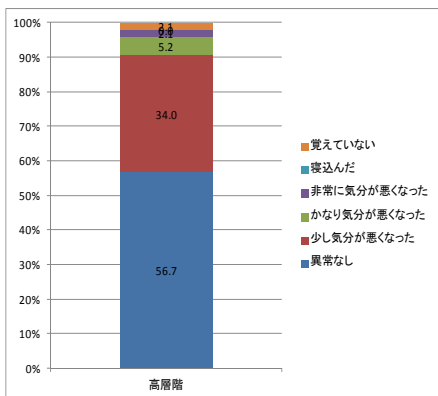
(19) 地震後1時間程度の間、気分が悪くなったりしましたか。



Aビル

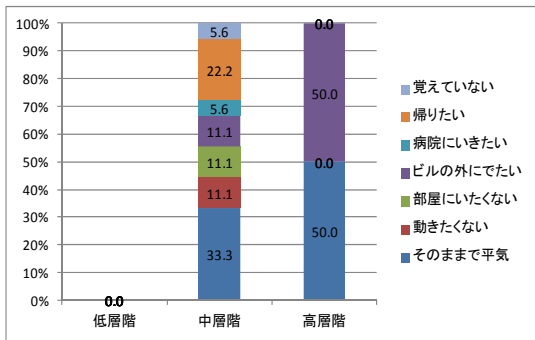


Bビル

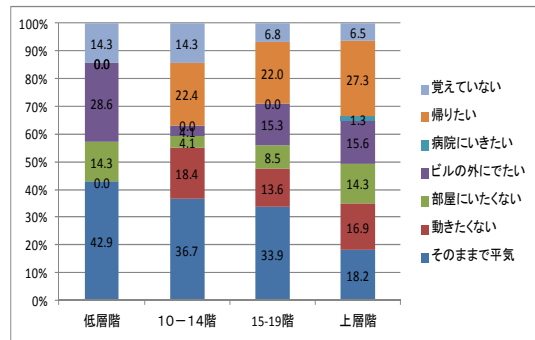


Cビル

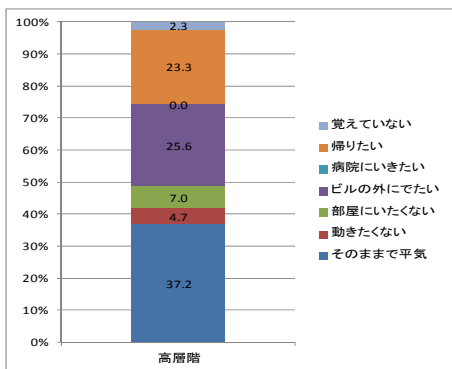
(20) (19)で1. 以外の方にお伺いします。気分が悪くなって、どういう気持ちになりましたか



Aビル



Bビル



Cビル

資料 3 : 東北地方太平洋沖地震における石油タンクのスロッシングに関する調査結果
(第 1 回検討会、座間委員資料)

東北地方太平洋沖地震における 石油タンクのスロッシングに関する調査結果

総務省消防庁消防研究センター
座間信作

1

地震による石油タンク被害

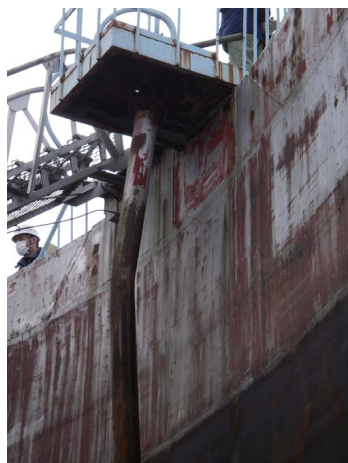
- 短周期地震動による被害
- **長周期地震動による被害**
- 地盤変状による被害
- 津波による被害



津波: 気仙沼



像の足座屈: 仙台



スロッシング: 新潟



地盤変状: 小名浜

2

浮屋根式タンクのスロッシング被害(消防庁)

2003年十勝沖地震を受け

- ・シングルデッキ浮屋根
- ・容量2万KL以上
- ・空間余裕高さ $H_c \geq 2m$

→ 適合タンクに流出なし

要耐震基準適合 (H29年3月31日まで)

浮き屋根の種類		耐震基準対象		適合別		危険物流出の有無	
シングル デッキ	36	該当	28	適合済	4	流出有	0
						流出無	4
				未適合	24	流出有	5
						流出無	19
		非該当	7	流出有	3		
				流出無	4		
不明	1	流出有	0				
		流出無	1				
ダブル デッキ	14			流出有	7		
				流出無	7		

3

特定屋外貯蔵タンクの設計水平震度 【長周期地震動】

空間余裕高さ H_c 自治省告示 (1983.04.28)

$$H_c = 0.45 \cdot D \cdot K_{h2} \quad (D: \text{タンク直径}, K_{h2}: \text{水平設計震度})$$

$$K_{h2} = 0.15 \nu_1 \nu_4 \quad (\nu_1: \text{地域別補正係数 } 0.7-1.0)$$

$$\nu_4 = 4.5 / T_s \quad (T_s: \text{スロッシング固有周期})$$



速度応答スペクトル法

スロッシング最大波高 W_h

$$W_h = D / 2g \cdot 0.837 (2\pi / T_s) S_v \quad (S_v: \text{速度応答スペクトル})$$

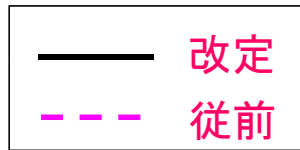
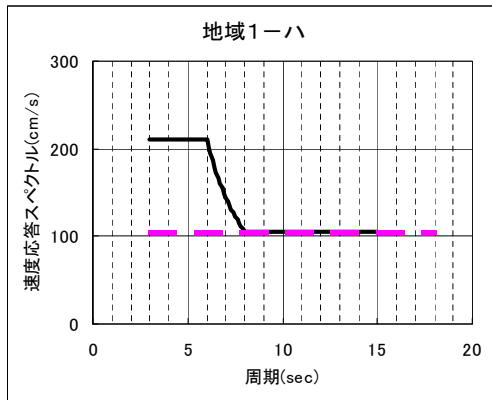
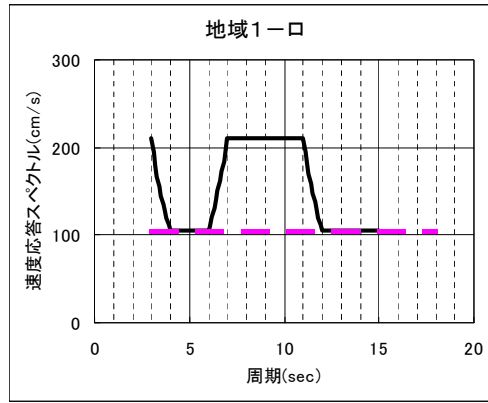
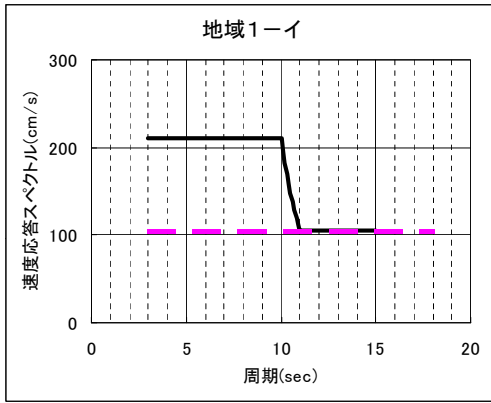
$$T_s = 2\pi \sqrt{D} / (3.682g) \cdot \coth(3.682H/D)$$

$\nu_1 = 1$ 、 $W_h = H_c$ の時

$$H_c = D / 2g \cdot 0.837 (2\pi / T_s) \cdot 113 \quad (\text{全国一律} \cdot \text{周期依存性なし})$$

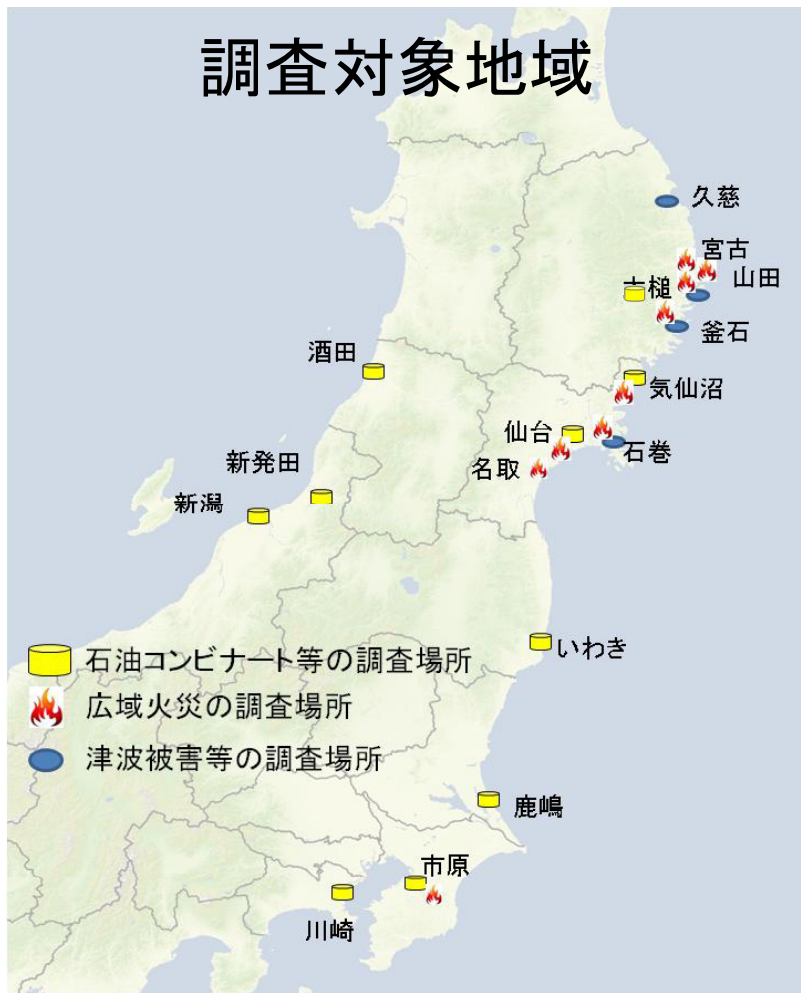
4

改訂された長周期帯域の速度応答スペクトル(Sv)



地域1-I 苫小牧, 酒田, 新潟
 地域1-O 東京湾岸
 地域1-H 石狩, 上磯, 秋田, 清水, 名古屋,
 四日市, 大阪湾岸

調査対象地域



スロッシングによる被害(新潟東港)



デッキ上への漏洩



アルミ製内部浮き蓋の破損



ポンツーン内への原油の滞油(3室で破損有)

スロッシング波高約1.9m

7

スロッシングによる被害(新潟西港)



ゲージポールの変形
スロッシング波高約1.4m



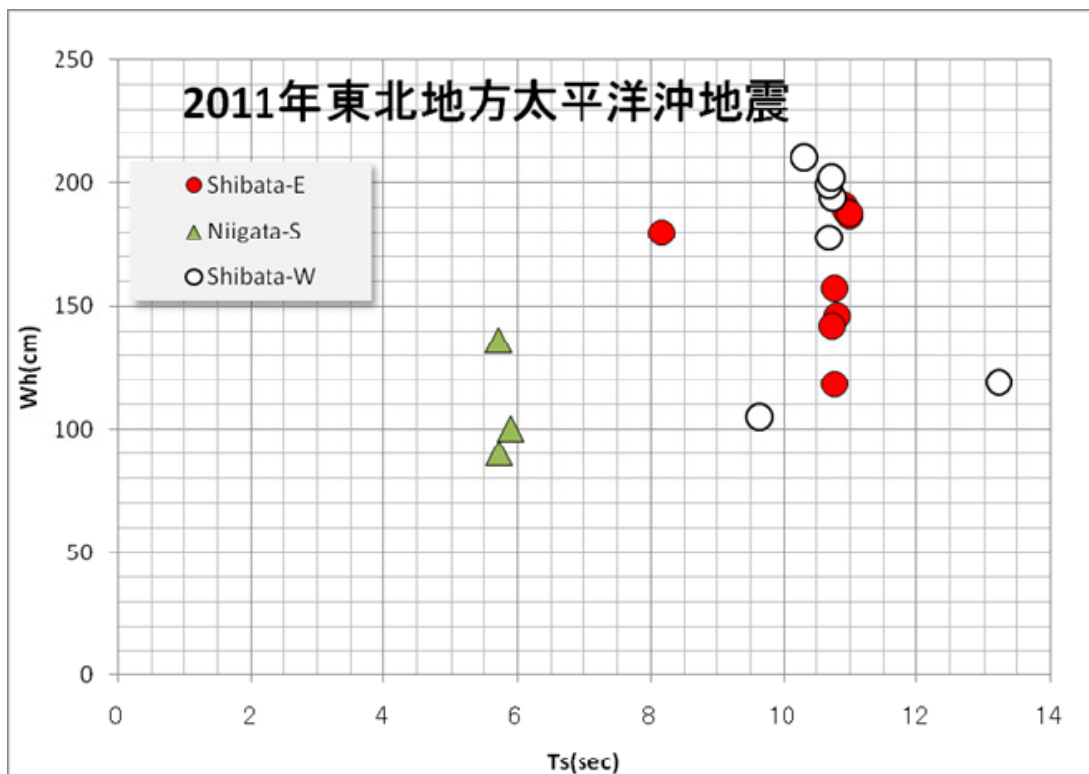
ガイドローラーの変形

8

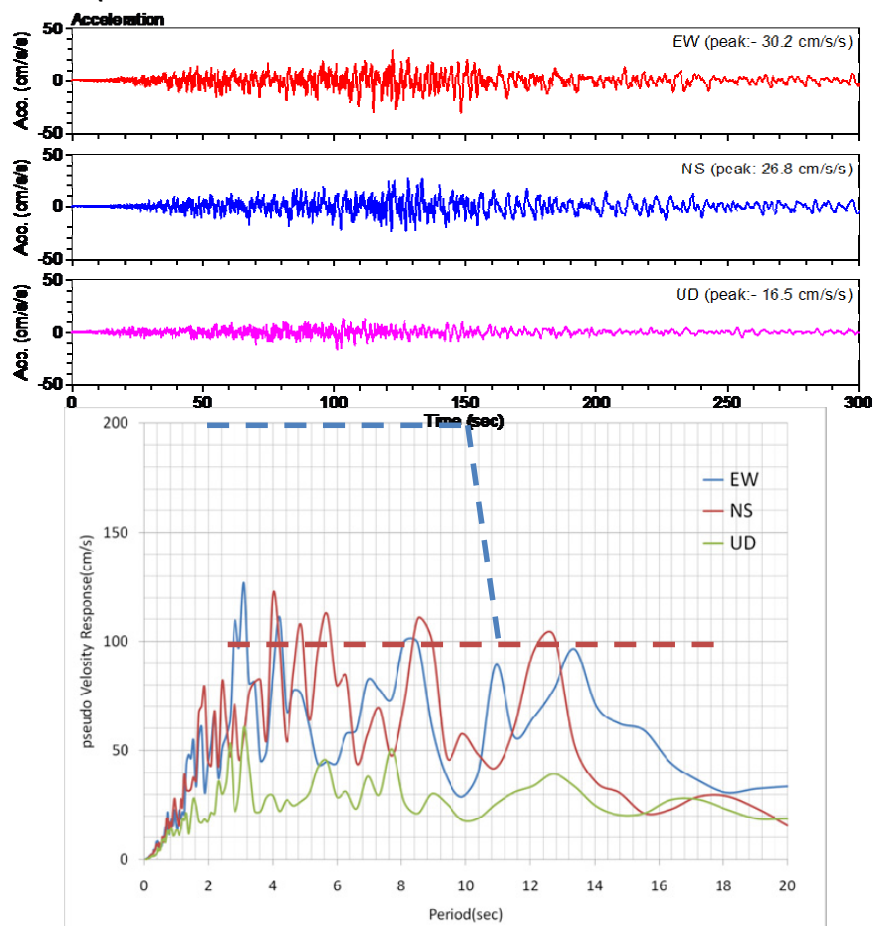
スロッシング最大波高の計測



スロッシング固有周期と最大波高との関係

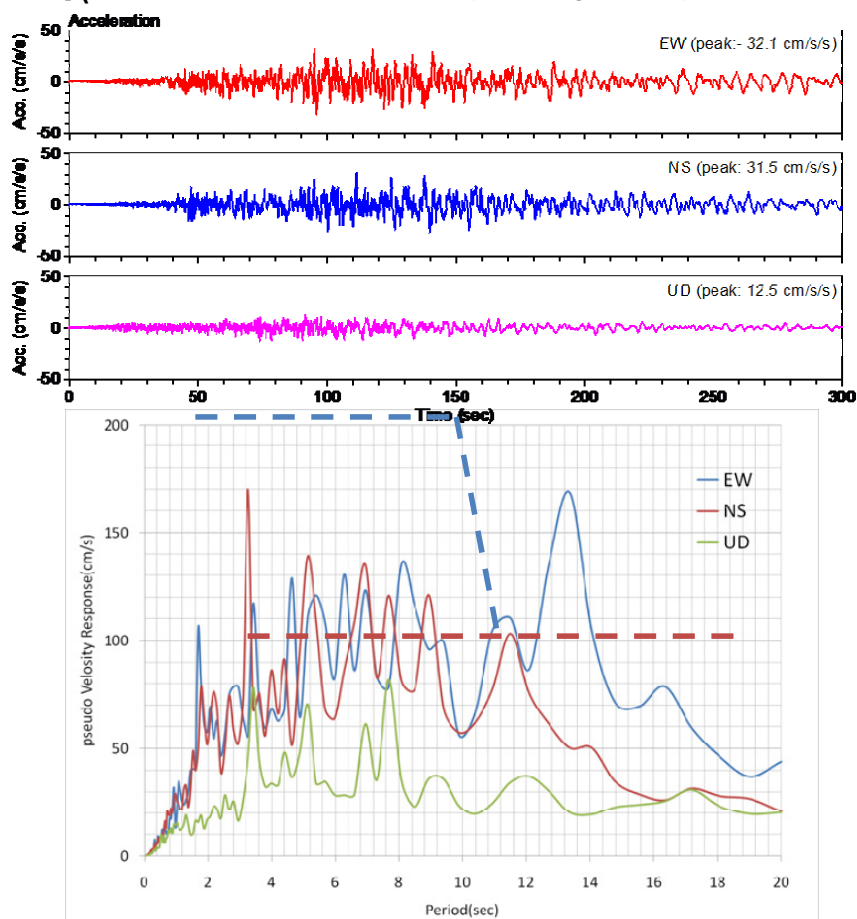


新発田(東港東地区)での加速度記録と速度応答スペクトル



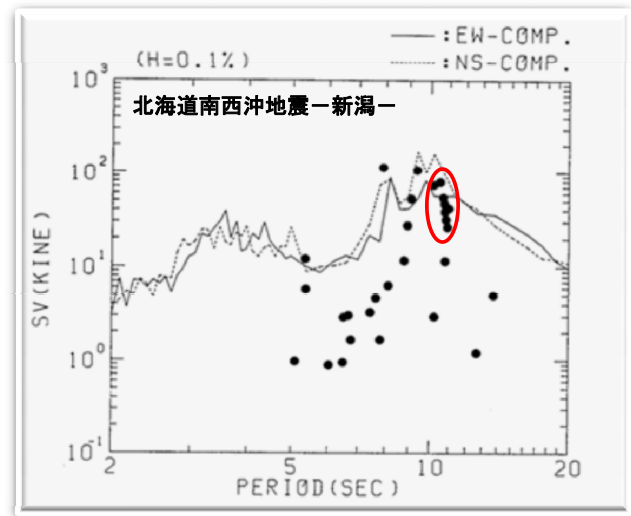
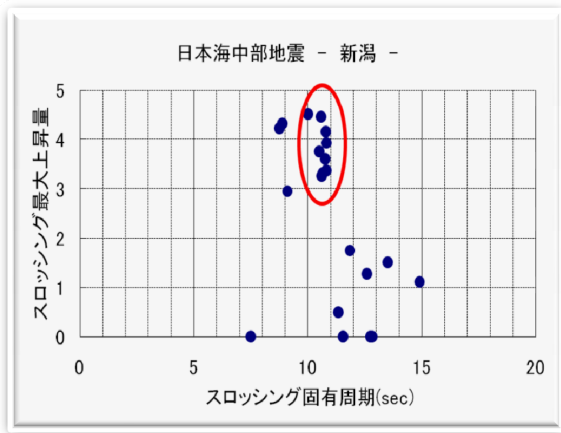
11

新潟(西港)地区での加速度記録と速度応答スペクトル

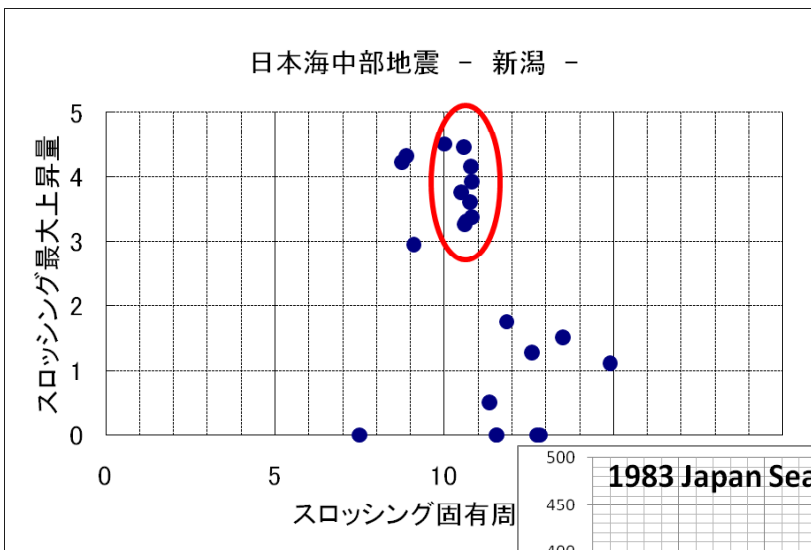


12

過去の地震でのスロッシング状況:新潟

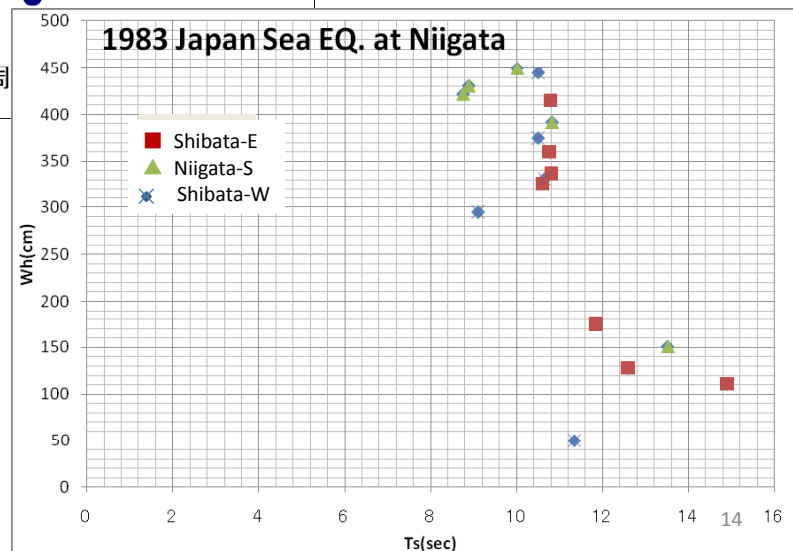


13

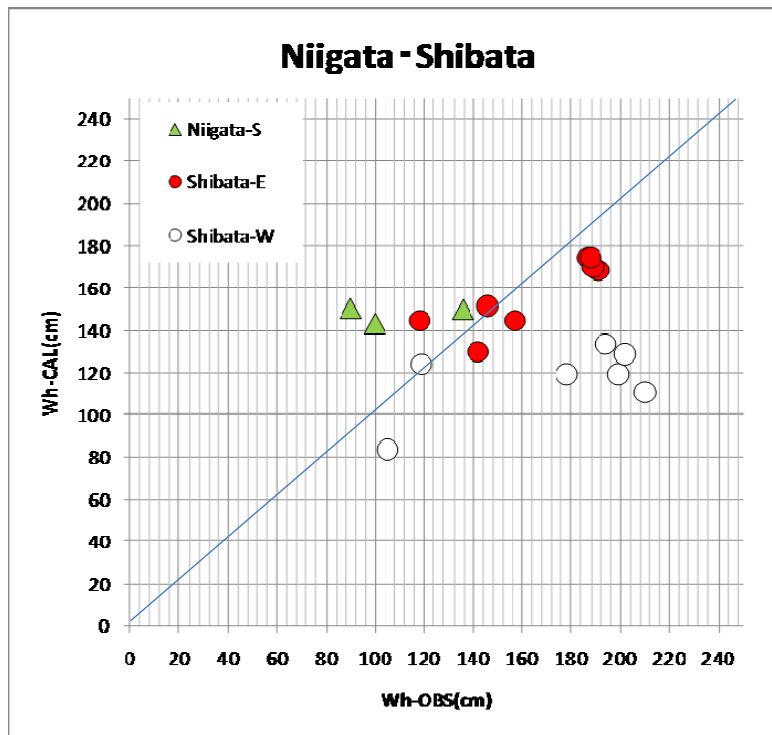


スロッシング最大波高
 (新潟)のばらつきの要因

- ・サイト毎の地震動の違い
- ・浮屋根等の構造の違い?



新潟でのスロッシング最大上昇量(計算値との比較)

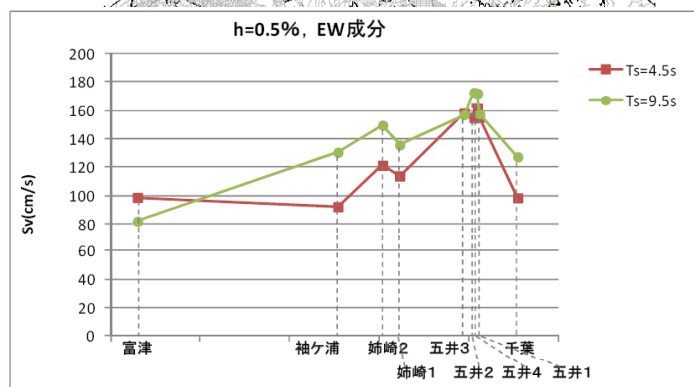
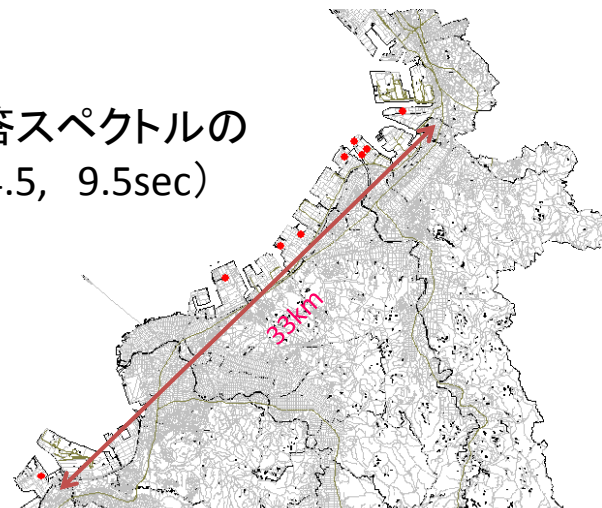


計算ではShibata-Wに対してもShibata-Eの記録を用いた結果、
⇒ Shibata-Eについてはよく一致、Shibata-Wでは過小評価



高々2.5km離れていても、周期10.5秒付近の
地震動強さに50%程度の違いがある！！

0.5%速度応答スペクトルの 空間変化(T=4.5, 9.5sec)



まとめ

- 新発田、新潟地区の石油タンクのスロッシングは周期10.5秒付近で最大約2mであった。
- デッキ上への油流出、ポンツーン破損、ガイドポール変形などの軽微な被害を生じた。
- 地震記録を用いた応答解析から、高々2.5km離れていても、周期10.5秒付近の地震動強さに50%程度の違いがあることが分かった(ただし、浮屋根構造の僅かな違いが応答に影響しないと仮定)。
- 従来から指摘されていた地域、タンク諸元がほぼ同一でも観測スロッシング波高が大きくばらつくことに関しては、地区を一纏めにして整理していることが原因の一つと考えられる。

17

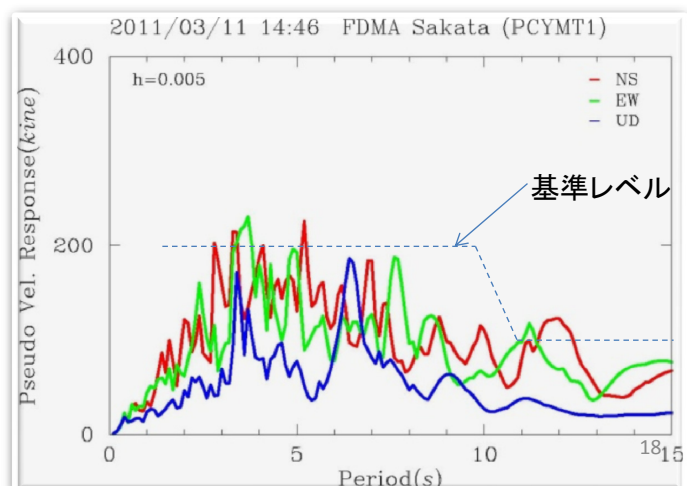
酒田

- 調査年月日:平成23年3月25日(金)
- 調査対象タンク:
No.201ガソリンタンク
(アルミ製内部浮き蓋付きコーンルーフタンク)
直径15.508m, 高さ16.655m
容量2740kL
地震時液高9.294m
(スロッシング固有周期4.17秒)

$$\eta_{\max\text{-cal}}=202\text{cm}$$

$$\eta_{\max\text{-cal}}/R \sim 15^\circ$$

$$\varepsilon_{\max\text{-cal}} \sim 2\% ?$$





No.201タンク



破断したデッキスキン、フロートチューブ



ゲージポール近傍の破損浮き蓋散乱状況

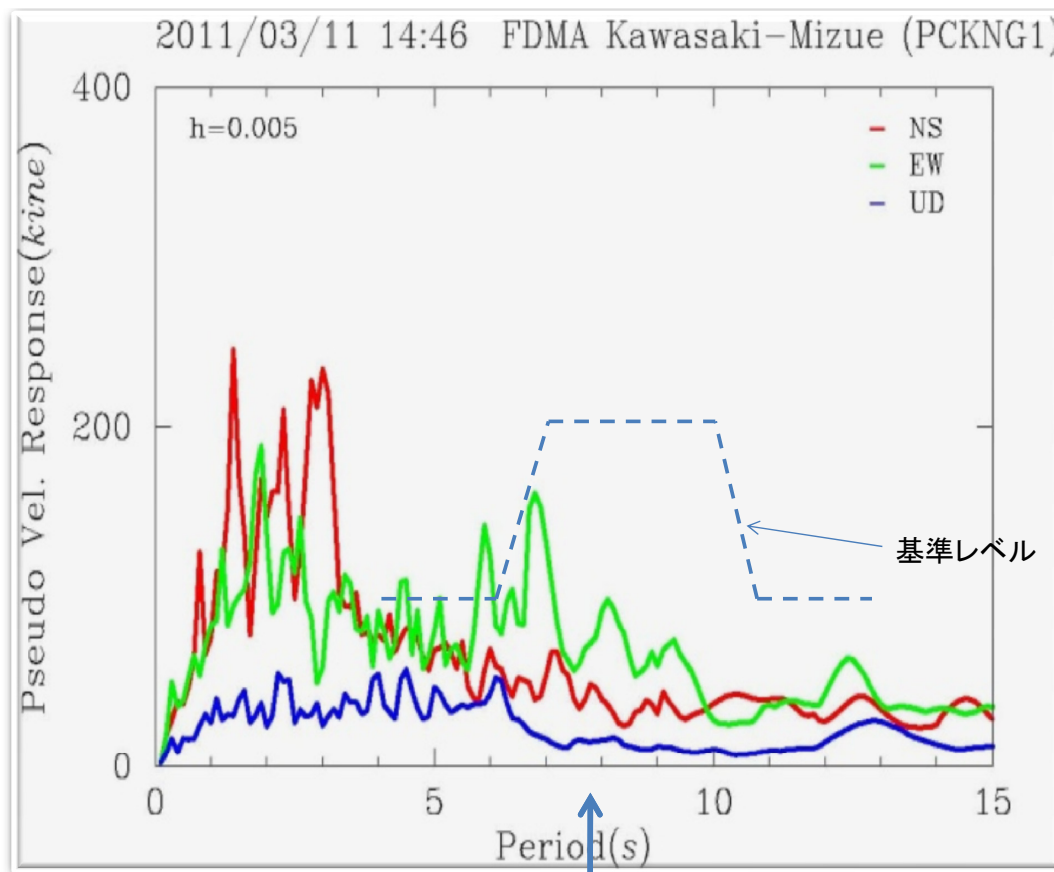


破断したフロートチューブ1



破断したフロートチューブ2

(西@消防研)



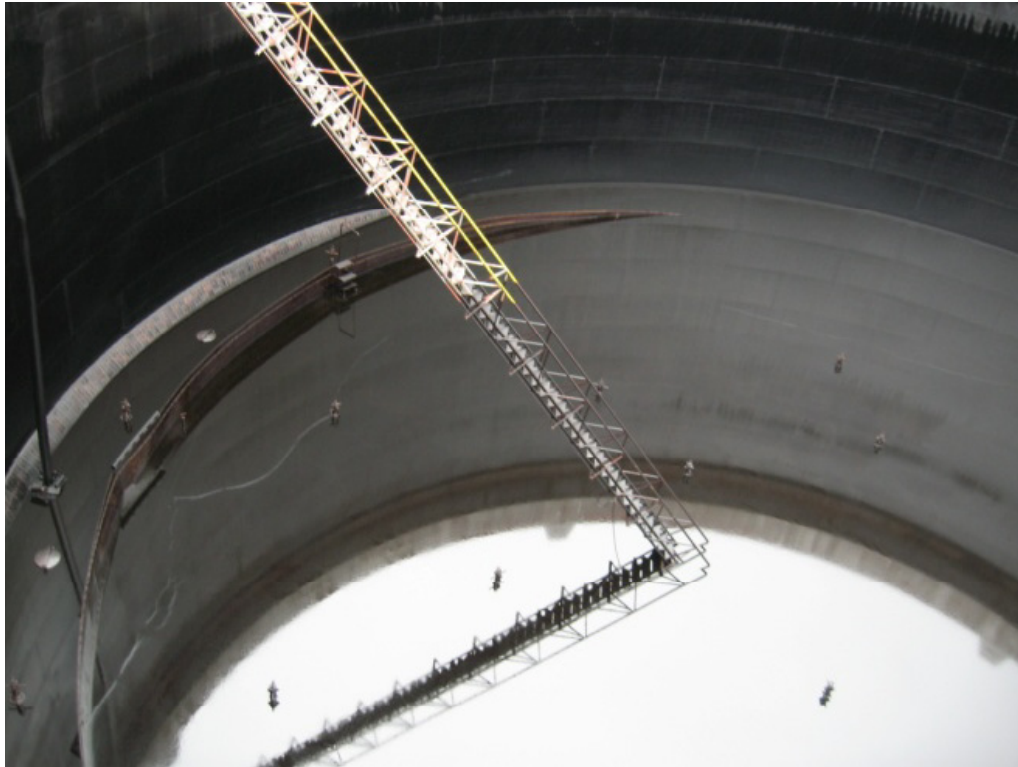
川崎

①

消防庁:コンビナート観測点
0.5%擬似速度応答スペクトル

①重油タンク(FRT)

D38.74m、H \varnothing 8.94m、Ts7.83sec



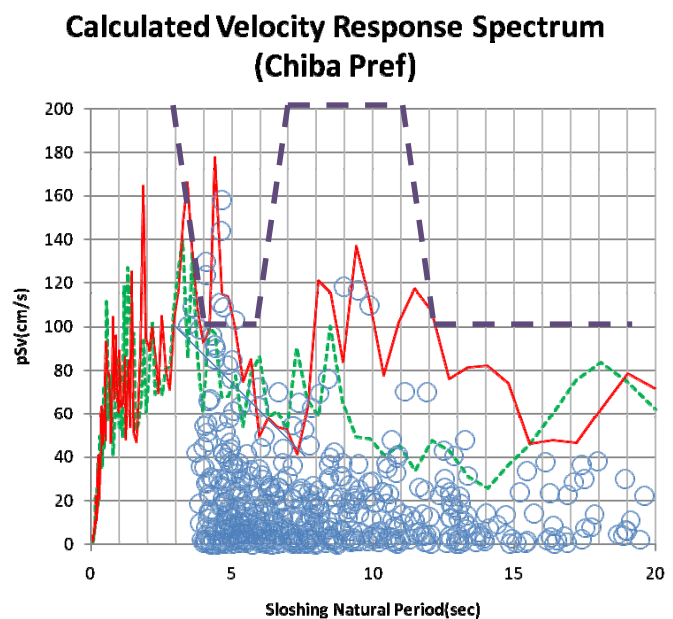
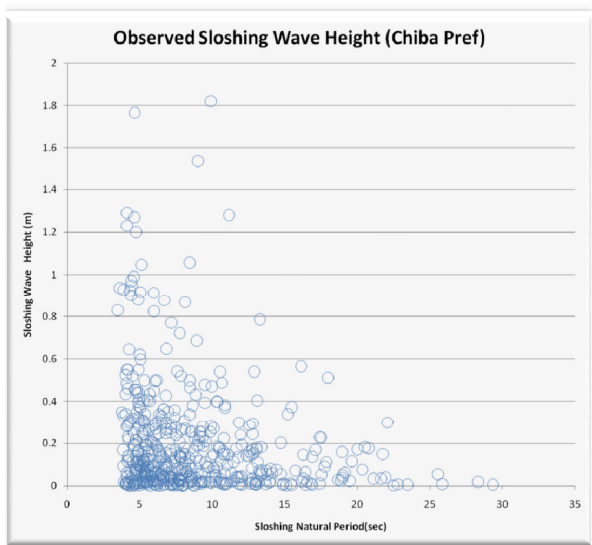
浮き屋根上に溢流→14日浮き屋根沈没

西@消防研

21

千葉県のスロッシング状況

(アンケート、現地調査による)



主な被害(千葉県調べ)

- 容量 11,376KL シングルデッキ ナフサ D28m H20m HL10.03m Ts5.94s 屋根母材料に亀裂 屋根上に流出
- 容量 68,591KL シングルデッキ 原油 D75.5m H18.3m HL14.54m Ts11.63s 母材に亀裂、補強リング付近亀裂 屋根上に流出
- 容量 51,089KL シングルデッキ D67.4m H18.3m HL6.61m Ts14.58s ガイドポールの溶接部に亀裂
- 容量 4,906KL 内部浮き蓋(シングル・ポンツーン) D19.4m H19.4m HL8.04m Ts4.83s ローリングサポートの破損 屋根上に流出

資料 4 : 長周期地震動の指標に関する研究事例
を踏まえた調査結果（第 2 回検討会、
気象庁資料）

長周期地震動の指標に関する 研究事例を踏まえた調査結果

気象庁

1

検討会（第1回）で頂いたご意見

- ・情報は長周期地震動が起こるような地震があった、という大雑把なものとするべき
- ・一般利用者に対しては、周期別震度のような形とするべき
- ・観測体制と、どのタイミングで情報が出せるかの検討が必要



【事務局の検討の方向性】

- ・気象庁震度観測点（約600点）を用いて、まずは、長周期地震動が起こるような地震であったかどうかを評価する指標について検討。
- ・特に、長周期地震動については計測震度では評価できないことを考慮し、過去の研究事例を参考に、周期別の指標について検討。

【（参考）気象庁における強震観測データ収集の現状】
気象庁震度観測点（約600点）については、平成23年度内にほぼリアルタイムでの加速度波形収集が可能となる。

2

平成20年度「震度に関する検討会」報告

第1章

計測震度と被害等との関係について（抄）

倒壊など重大な建物被害と計測震度の相関は必ずしも良くない。境指標、清野指標など重大な建物被害にも対応する指標が提案されているが、まだデータが十分ではない。今後も倒壊など重大な建物被害と関係する指標の調査・検討を続ける必要がある。

なお、それまでの間、顕著な地震発生時には、地震の特徴や各地の揺れの特徴を示すためのものとして、気象庁は、報道発表の機会などを活用して地震波の特徴などについても、速やかに社会に示すことが重要である。

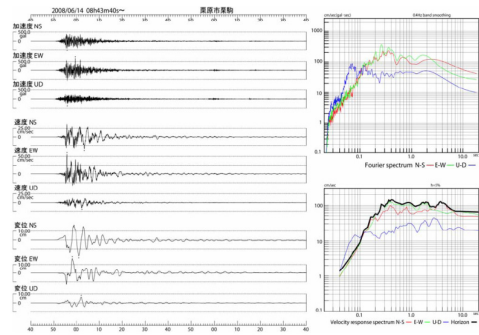
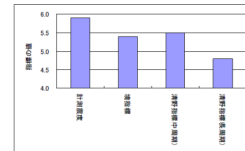


図 7-2(1) 取りまとめ例 <2008年岩手・宮城内陸地震 栗原市栗駒> (波形とフーリエスペクトル)



観測点名	計測震度	境指標	清野指標
栗原市栗駒	5.9	5.4	5.5
			4.8

図 7-2(2) 取りまとめ例 <2008年岩手・宮城内陸地震 栗原市栗駒観測点>

長周期地震動に対応した周期別震度に関する研究報告例

清野・藤江・太田（1998）：組み合わせ震度の提案・定式化とその応用について
土木学会論文集、No.612, I-46, pp.143-151

篠（2010）：1自由度系の速度応答に基づく震度の提案、
土木学会論文集A、Vol.66, No.4, pp.863-873

清野・藤江・太田（1998）による手法

2) 清野・藤江・太田(1999)による手法

清野ら(1999)の手法は、図 2-1 に示すように、加速度記録から積分して速度記録および変位記録を算出し、それぞれについて短周期震度、中周期震度および長周期震度の3種類を求めて、それぞれの特性に応じて用いることとしている。

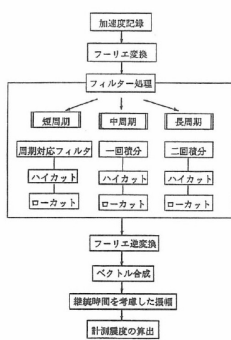


図 2-1 組み合わせ震度決定の手順

$$\text{短周期震度: } I_j = 2.00 \log(a_0) + 0.94 \quad (10)$$

$$\text{中周期震度: } I_m = 1.91 \log(v_0) + 2.50 \quad (11)$$

$$\text{長周期震度: } I_l = 1.94 \log(d_0) + 3.20 \quad (12)$$

図 2-3 短周期震度、中周期震度および長周期震度の算出式

表 2-1 継続時間を変化させた場合の振幅と震度の相関係数

	$\tau=0.1$	$\tau=0.3$	$\tau=0.5$	$\tau=1.0$	$\tau=1.5$	$\tau=2.0$
速度	0.97	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99
変位	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98

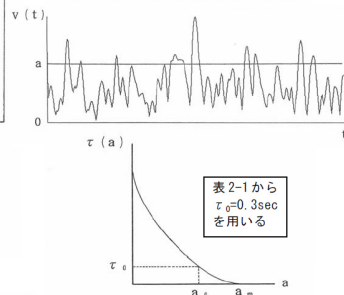


図 2-2 a_0 , v_0 , d_0 の決定手順

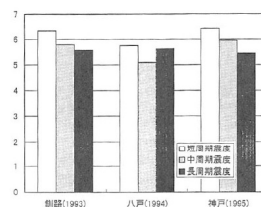


図 2-5 震度VIが観測された3つの地震に対する組合せ震度の比較 (1993年釧路沖地震、1994年三陸はるか沖地震、1995年兵庫県南部地震)

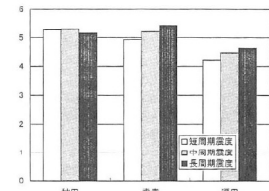


図 2-6 1993年日本海中部地震の際の秋田・青森・酒田観測波から求めた組合せ震度

【清野指標】

中周期 (Im):

免震建物や高層建物を対象として、0.7 秒～5 秒程度の周期区分で設定

長周期 (Il):

石油タンクのスロッシングや頂戴構造物を対象として、5 秒程度以上の周期区分で設定

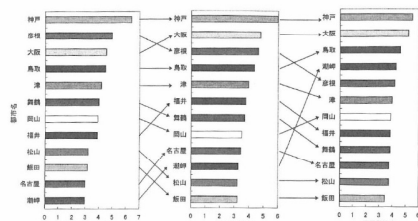


図 2-4 1995年兵庫県南部地震における各観測点ごとの組合せ震度の比較

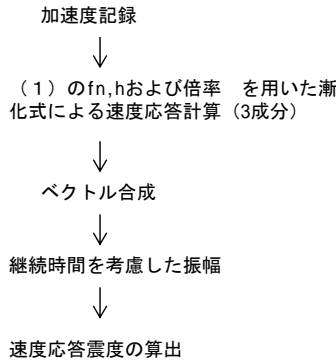
篠 (2010) による手法

篠 (2010) の手法は、3.333Hz、0.7Hz、0.16666Hzの各固有振動数について1質点減衰系の速度応答の力積応答関数の振幅特性として減衰定数と倍率を考慮して加速度記録から速度応答を求め、それぞれについて、短周期速度応答震度、速度応答震度、長周期速度応答震度として算出するものである。

【1質点減衰系の速度応答の力積応答関数の振幅特性】

$$|H_V(\omega)| = \frac{\omega}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4h^2\omega_n^2\omega^2}} \quad (1)$$

【速度応答震度の算出】



$$I_{VR} = a \log(Sv_0) + K$$

- I_{VR} : 速度応答震度
- I_{VRS} : 短周期速度応答震度
- I_{VRL} : 長周期速度応答震度

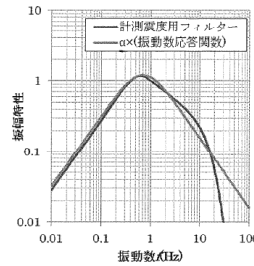


図3 調整後の振動数応答関数の振幅特性

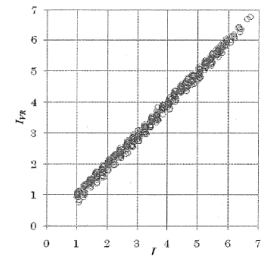


図4 計測震度と速度応答震度 (S15記録)

表-1 各種速度応答震度の計算時パラメータ

震度の種類	f_n (Hz)	h	α	τ_0
I_{VR}	0.7	0.95	10.0	0.3
I_{VRS}	3.333	0.95	47.6	0.0630
I_{VRL}	0.1666	0.95	2.38	1.26

$$I_{VR} = 2 \cdot \log(v_0) + 0.94 \quad (11)$$

$$I_{VRS} = 2 \cdot \log(v_{30}) + 0.18 \quad (12)$$

$$I_{VRL} = 2 \cdot \log(v_{10}) + 2.26 \quad (13)$$

表-7 新潟県中越地震時の東京の超高層ビル近傍における各種速度応答震度と50%応答継続時間 D_{50}

観測点コード	I_{VR}	D_{50} (s)	I_{VRS}	D_{50} (s)	I_{VRL}	D_{50} (s)
TKY007	2.71	60.0	2.62	199	3.91	68.6
TKY015	3.51	6.6	3.43	3.0	3.65	84.9
TKY016	3.10	46.3	2.97	2.3	3.91	98.3
TKY021	3.54	16.0	3.01	15.0	3.69	95.8
TKY022	3.29	45.2	2.89	9.6	3.60	99.1
TKY028	3.17	24.7	2.87	11.7	3.70	96.3

表-8 新潟県中越沖地震時の東京の超高層ビル近傍における各種速度応答震度と50%応答継続時間 D_{50}

観測点コード	I_{VR}	D_{50} (s)	I_{VRS}	D_{50} (s)	I_{VRL}	D_{50} (s)
TKY007	2.52	86.8	1.47	46.3	3.54	98.2
TKY015	2.88	59.4	1.92	28.8	3.67	97.5
TKY016	2.84	74.3	1.68	66.3	3.65	89.7
TKY021	2.81	67.2	1.88	48.2	3.54	124.0
TKY022	2.74	78.7	2.00	15.1	3.50	126.0
TKY028	2.83	50.1	1.75	50.6	3.55	106.3

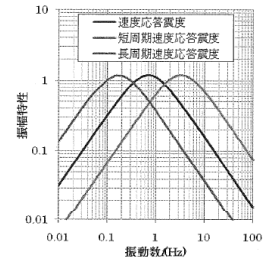


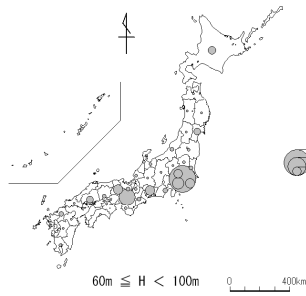
図-7 各種速度応答震度における振動数応答関数の振幅特性 (αを乗じたもの)

清野指標 (中周期、長周期) による 長周期地震動の評価

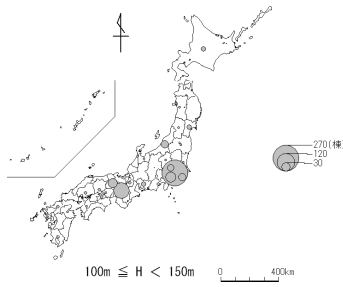
対象とすべき建造物の分布

高さ60m以上の高層建築物の棟数分布（全国）

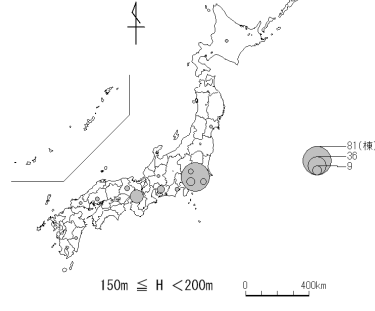
概ね固有周期 3 秒以下



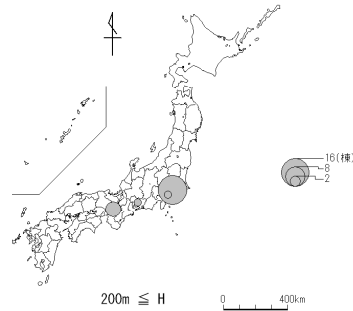
概ね固有周期 4 秒以下



概ね固有周期 5 秒以下

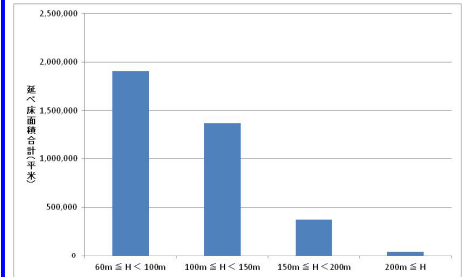
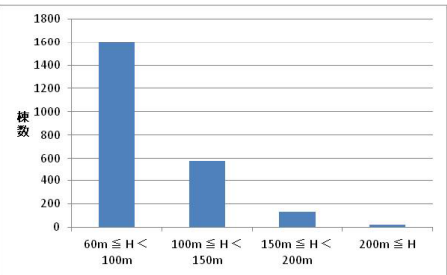


概ね固有周期 5 秒以上



総務省消防庁資料より気象庁調べ

高さ60m以上の高層建築物の高さ別棟数と延べ床面積合計（全国）



総務省消防庁資料より気象庁調べ

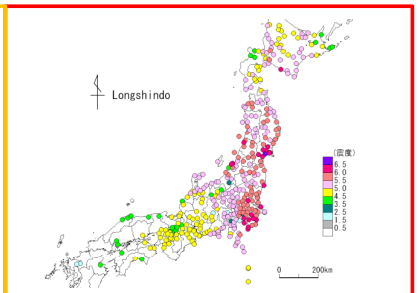
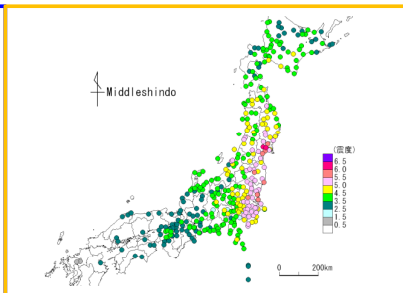
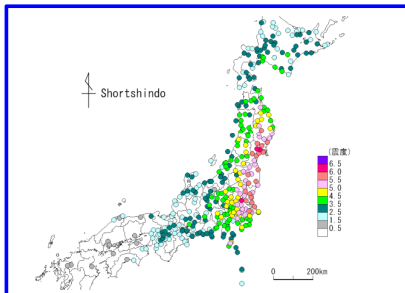
清野ほか（1998）の手法による広域的な長周期地震動の評価

計測震度

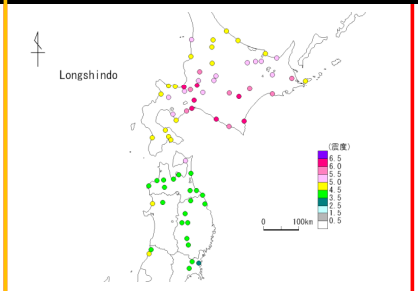
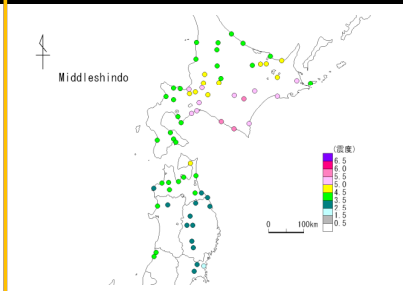
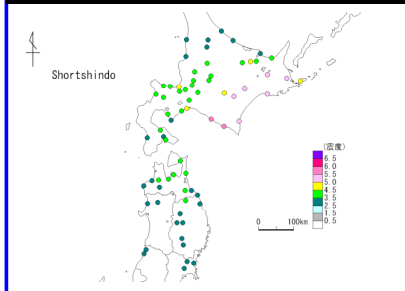
清野指標（中周期）

清野指標（長周期）

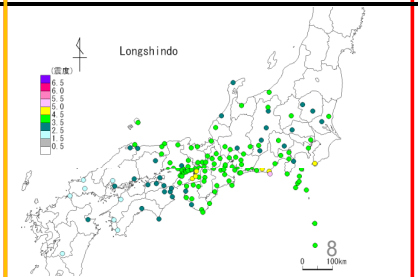
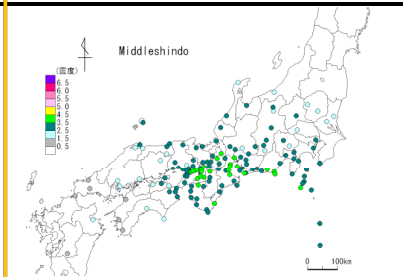
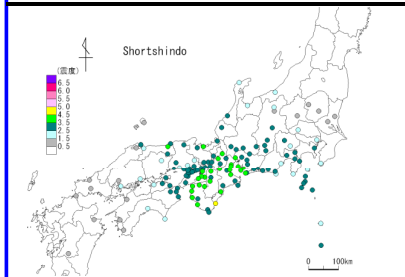
平成23年
東北地方太平洋沖地震



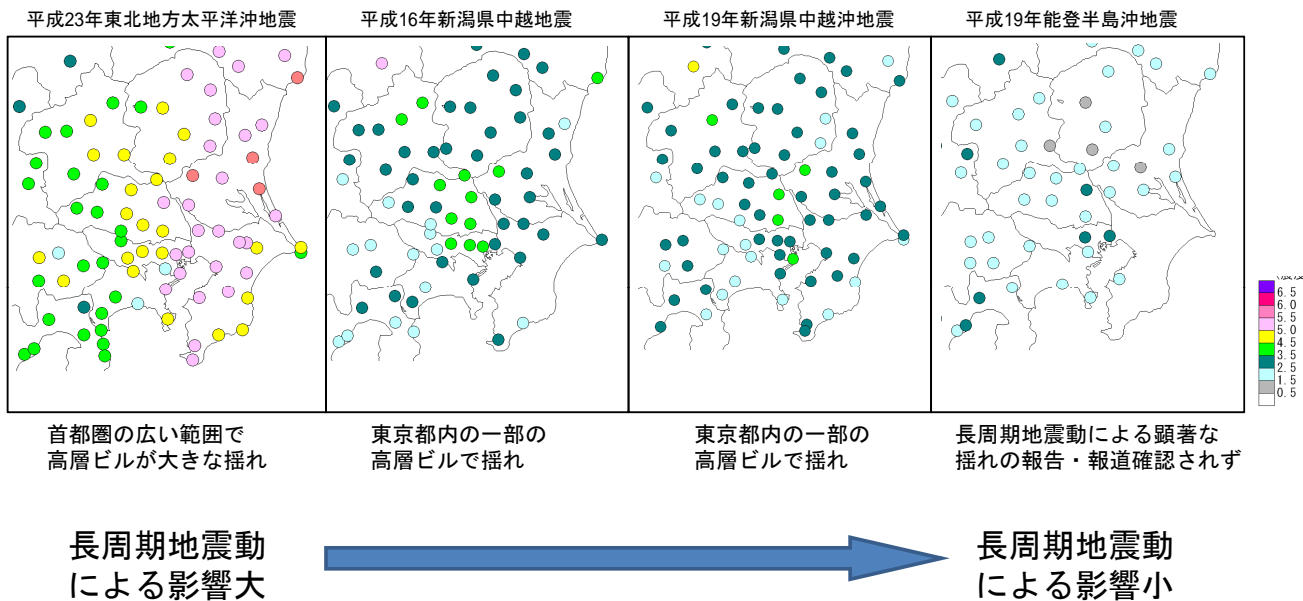
平成15年
十勝沖地震



平成16年9月5日の
東海道沖の地震

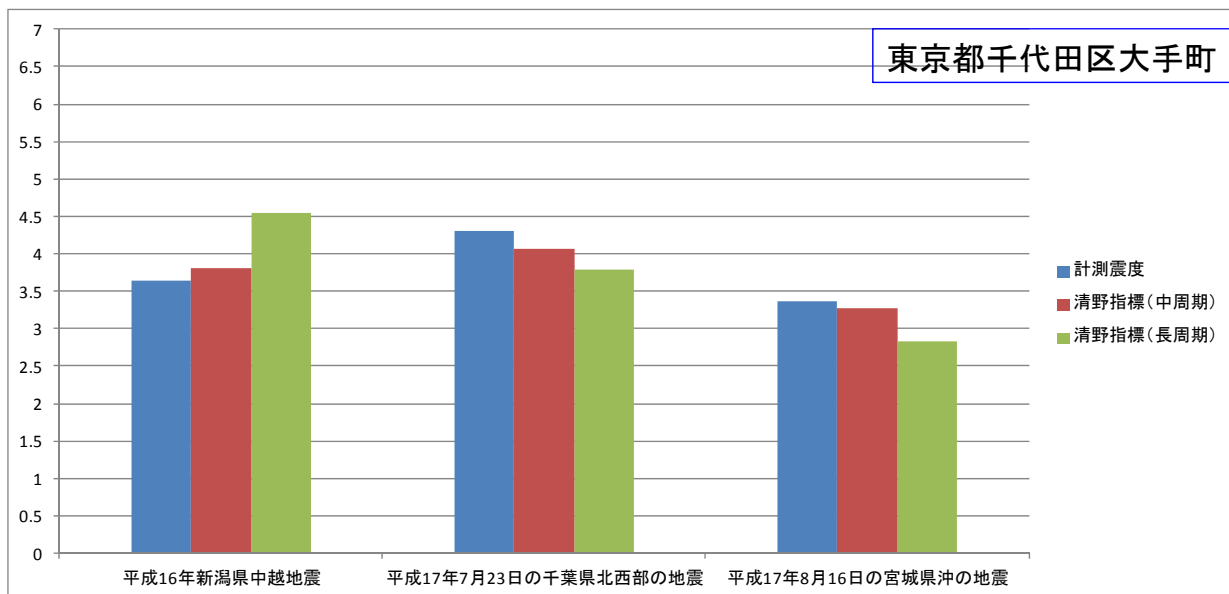


清野ほか（1998）の手法による地域的な長周期地震動の評価



長周期地震動による高層ビルの揺れの地域的な広がりが、観測点毎の清野指標（中周期）の分布と整合する

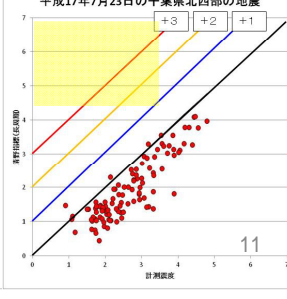
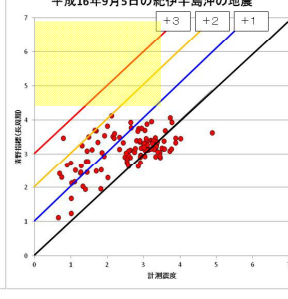
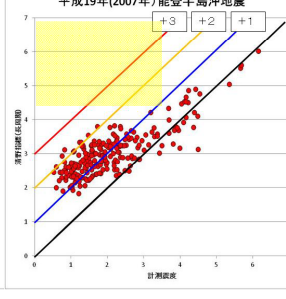
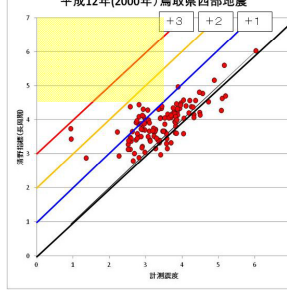
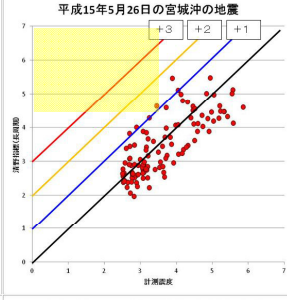
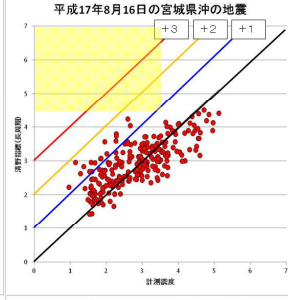
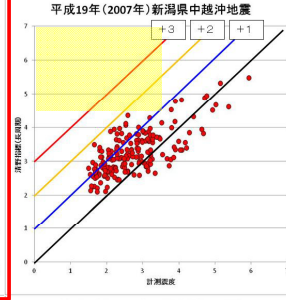
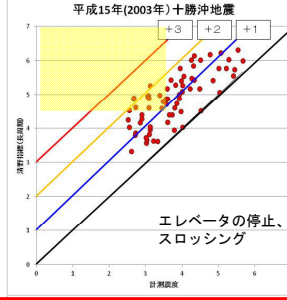
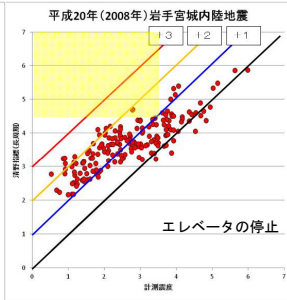
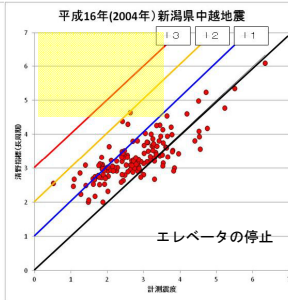
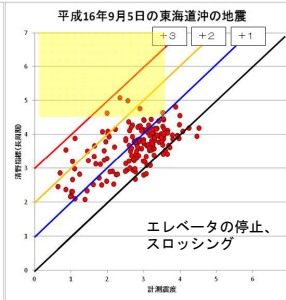
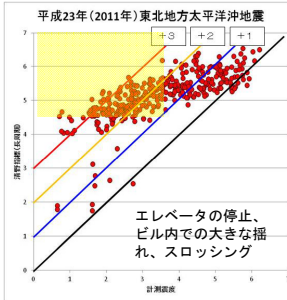
清野ほか（1998）の手法による観測点毎の長周期地震動の評価



計測震度で震度3～4であっても、長周期地震動の大きさが異なることが、清野指標では評価できる。

計測震度が低くても長周期地震動による影響が発生した地震の評価

震度3や4以下でも長周期地震動による顕著な被害の報道・報告があった地震



資料 5 : 長周期の揺れの尺度の検討 (第 2 回検討会、小鹿委員資料)

長周期の揺れの尺度の検討

(1) 概要

長周期地震動の揺れに対する尺度としては、タンクのスロッシングなどのように固有周期で揺れるものについては、その周期に対する速度応答スペクトルが通常用いられる。一方、人間に対する揺れの尺度として震度がよく用いられている。ここでは、長周期帯域の体感（行動難度、不安度）の評価曲線を参考に、計測震度を算定する際に用いられるフィルタの振動数帯域を長周期側に変更したものを「長周期震度」として定義し、長周期の揺れの尺度として検討を行った。

(2) 長周期域での体感の周期特性について

長周期の揺れに対する行動難度および不安度に関する評価曲線について、被験者を振動台に載せた実験に基づいて求めた例を図1および図2に示す。長周期域では行動の難易度は概ね速度に比例して高くなり、また同じ速度でも周期が長くなる程低下していくという結果が得られている。これは、振幅については対数的な感度で、周期に対しては速度と加速度の中間的な特性となっている。これは計測震度を求める際に使われているフィルタの特性に近い。計測震度は長周期成分を除いて求められているが、ここでは逆に長周期成分を抽出して評価を行うこととする。

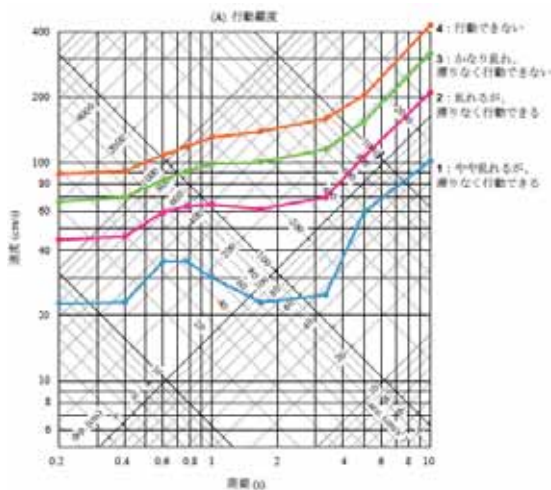


図3 単調加振に対する行動難度の評価曲線（平均値）

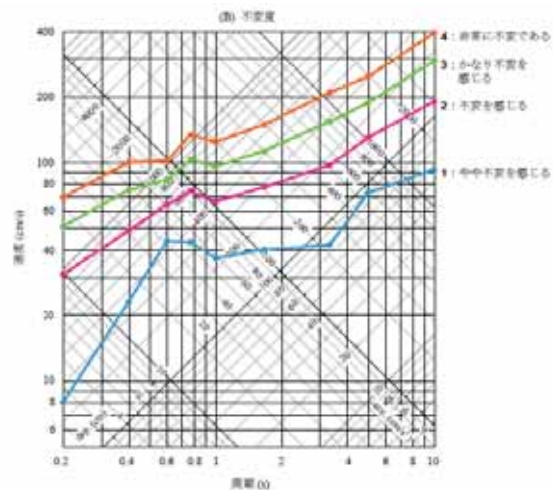


図4 単調加振に対する不安度の評価曲線（平均値）

図1 振動台に載せた被験者のアンケートに基づいて評価した揺れに対する評価曲線（高橋・他：長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界評価曲線の提案、2007年 AIJ 大会）

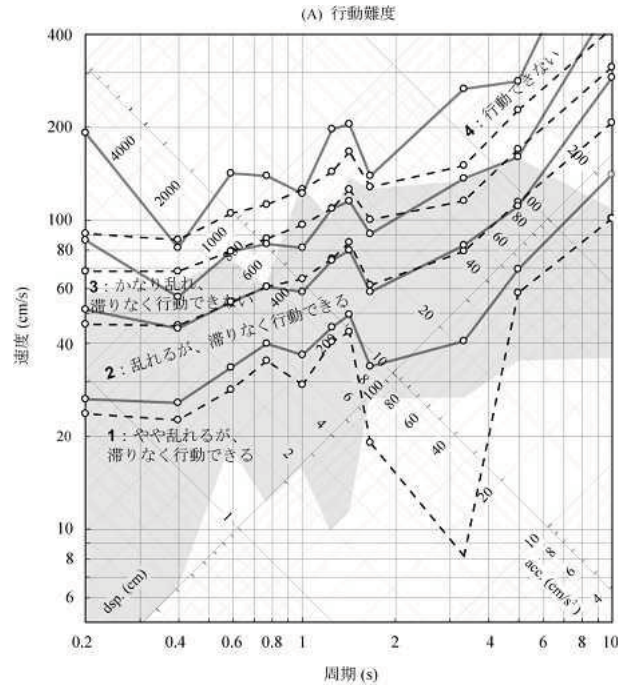


図2 行動難度についての床応答の評価曲線（鈴木・他：避難行動限界の周波数特性に関する研究、2009年 AIJ 大会）

(3) 震度の算定方法

計測震度は以下の手順で算定される。長周期震度についてもパラメータの値を変えて計測震度と同じ手順で算定する。

- 各成分の加速度記録をフーリエ変換し、スペクトルを計算する。
- 計算したスペクトルに次の三種類のフィルタを掛ける。

(ア) 周期に関係したフィルタ

$$(k/f)^{1/2} \tag{1}$$

(イ) ハイカットフィルタ

$$\left(1 + 0.694X^2 + 0.241X^4 + 0.0557X^6 + 0.009664X^8 + 0.00134X^{10} + 0.000155X^{12}\right)^{-1/2}$$

ここで、 $X = f/f_c$ (2)

(ウ) ローカットフィルタ

$$\left(1 - \exp\left(-\left(f/f_0\right)^3\right)\right)^{1/2} \tag{3}$$

- フィルタを掛けたスペクトルを逆フーリエ変換し、加速度波形を求める。
- 得られた各成分の加速度波形をベクトル合成する。
- ベクトル波の絶対値があるレベル a 以上である時間の合計を $\tau(a)$ とすると、

ちょうど、 $\tau(a_0)=\tau_0$ となる a_0 を求める。

➤ 次式に a_0 を代入して計測震度 I を算定する。

$$I = 2\log(a_0) + c \quad (4)$$

ここで、パラメータは表1に示すように与える。

表1 震度計算のパラメータ

パラメータ	計測震度 (通常)	長周期震度 1	長周期震度 2	長周期震度 3
k	1.75	1.75	1.75	1.75
f_c (Hz)	10	10	1	0.25
f_0 (Hz)	0.5	0.05	0.05	0.05
τ_0 (秒)	0.3	3.0	3.0	3.0
c	0.7	1.2	1.5	2.0

ここで、 c の値は、震度4以上(3.5以上)の範囲がおおよそ対応するように震度が評価されるようにフィルタごとに設定した。それぞれの震度の計算に用いるフィルタの利得特性を図3に比較して示す。

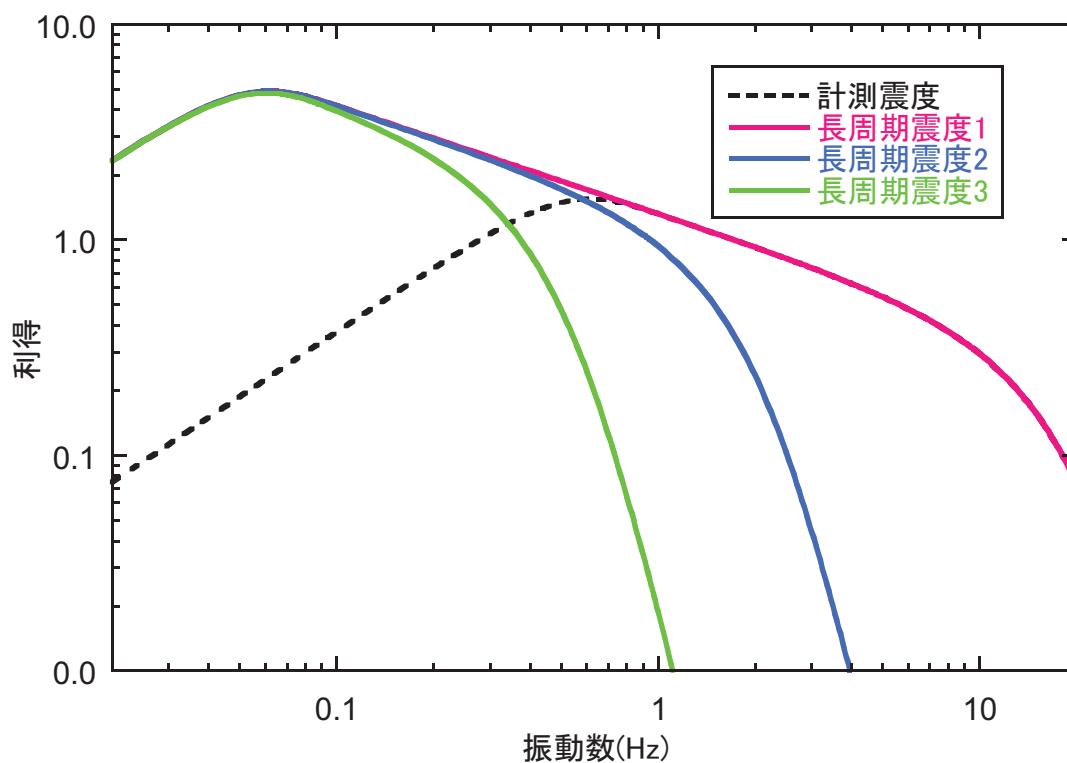


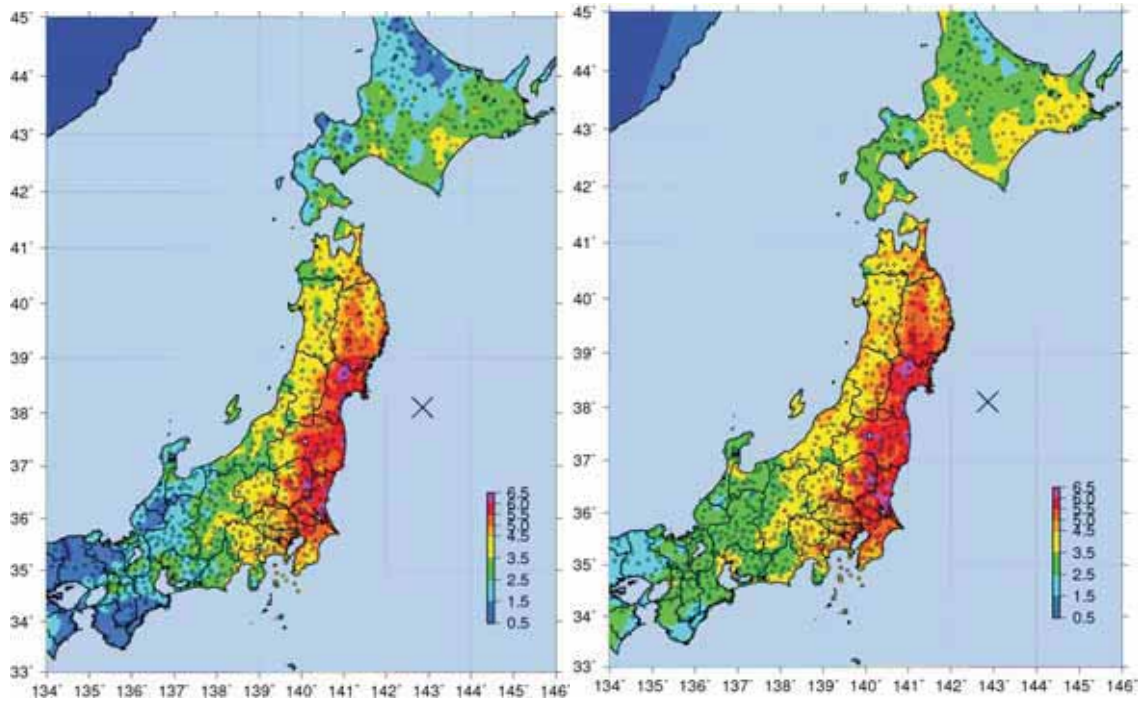
図3 フィルタの総合特性に比較

(4) 観測記録の震度評価

長周期地震動が観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震、2000 年鳥取県西部地震、2003 年十勝沖地震、2004 年新潟県中越地震および 2004 年紀伊半島沖の地震（前震と本震）について、K-NET および KiK-net の観測記録を用いて、それぞれの震度分布を評価し、それぞれ図 4~図 9 に示す。長周期震度は、一般的には平野や盆地で大きくなる傾向が見られ、平野や盆地での長周期成分の増幅が現れている。それぞれの地震での特徴を以下に分析する。

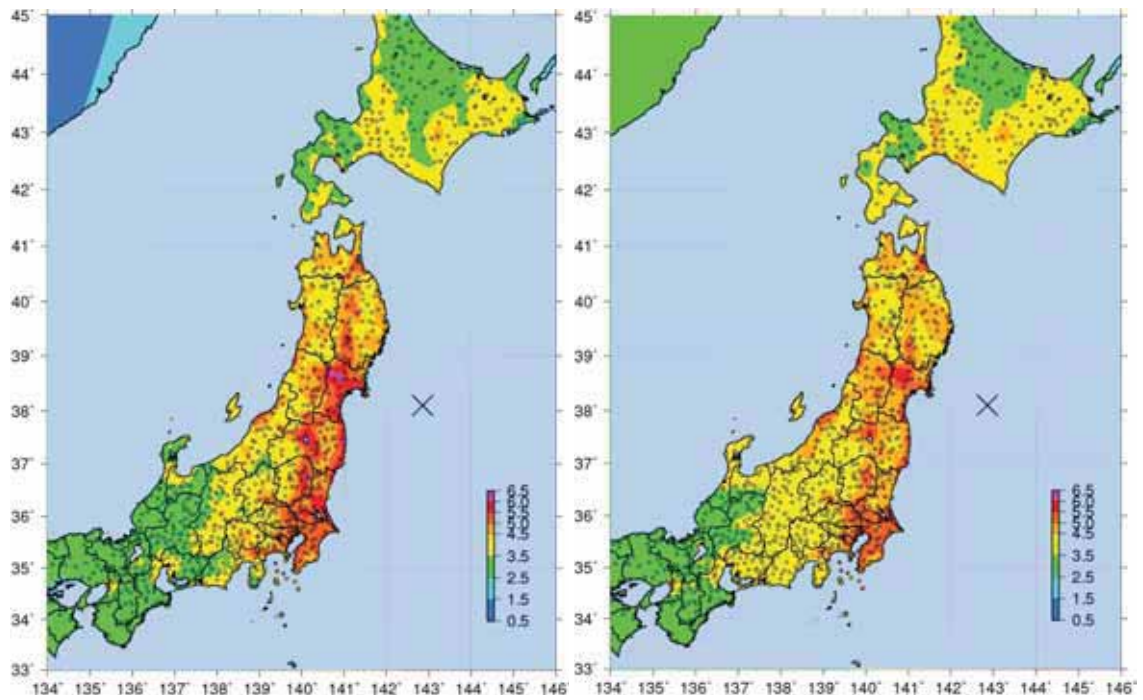
- ・ 図 4 に示す 2011 年東北地方太平洋沖地震では、計測震度は奥羽山脈の火山フロントを挟んで減衰している様子が見られるが、長周期震度は顕著な減衰は見られず、庄内平野（酒田）や新潟平野などの日本海側の平野部で大きくなっている。
- ・ 図 5 に示す 2000 年鳥取県西部地震では、長周期震度は大阪や名古屋での平野部で大きくなっている。
- ・ 図 6 に示す 2003 年十勝沖地震では、長周期震度は勇払平野から石狩平野での平野部で大きくなっている。
- ・ 図 7 に示す 2004 年新潟県中越地震の場合は、長周期震度は東京で若干大きくなり平野での増幅の影響が現れているが、全体的には計測震度の分布との差があまり見られない。地震規模が M6.8 と大きくないため平野での増幅は短周期と同等であったためと考えられる。
- ・ 図 8 および図 9 に示す 2004 年紀伊半島沖（三重県南東沖）の地震の前震と本震については、計測震度が大きい近傍の紀伊半島では長周期震度は小さくなるが、大阪や名古屋の平野部は変わらず、東京や千葉の平野部では逆に長周期震度の方が大きくなる傾向がみられる。

以上のように、長周期震度は、遠地の平野部で大きくなるという長周期地震動の特徴を表しており、人間の体感と対応した長周期の揺れを表す一つの尺度として有効と考えられる。



(a)計測震度 (10Hz~0.5Hz)

(b) 長周期震度 1 (10Hz~20 秒)



(c)長周期震度 2 (1 秒~20 秒)

(d)長周期震度 3 (4 秒~20 秒)

図 4 2011/3/11 東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の尺度比較

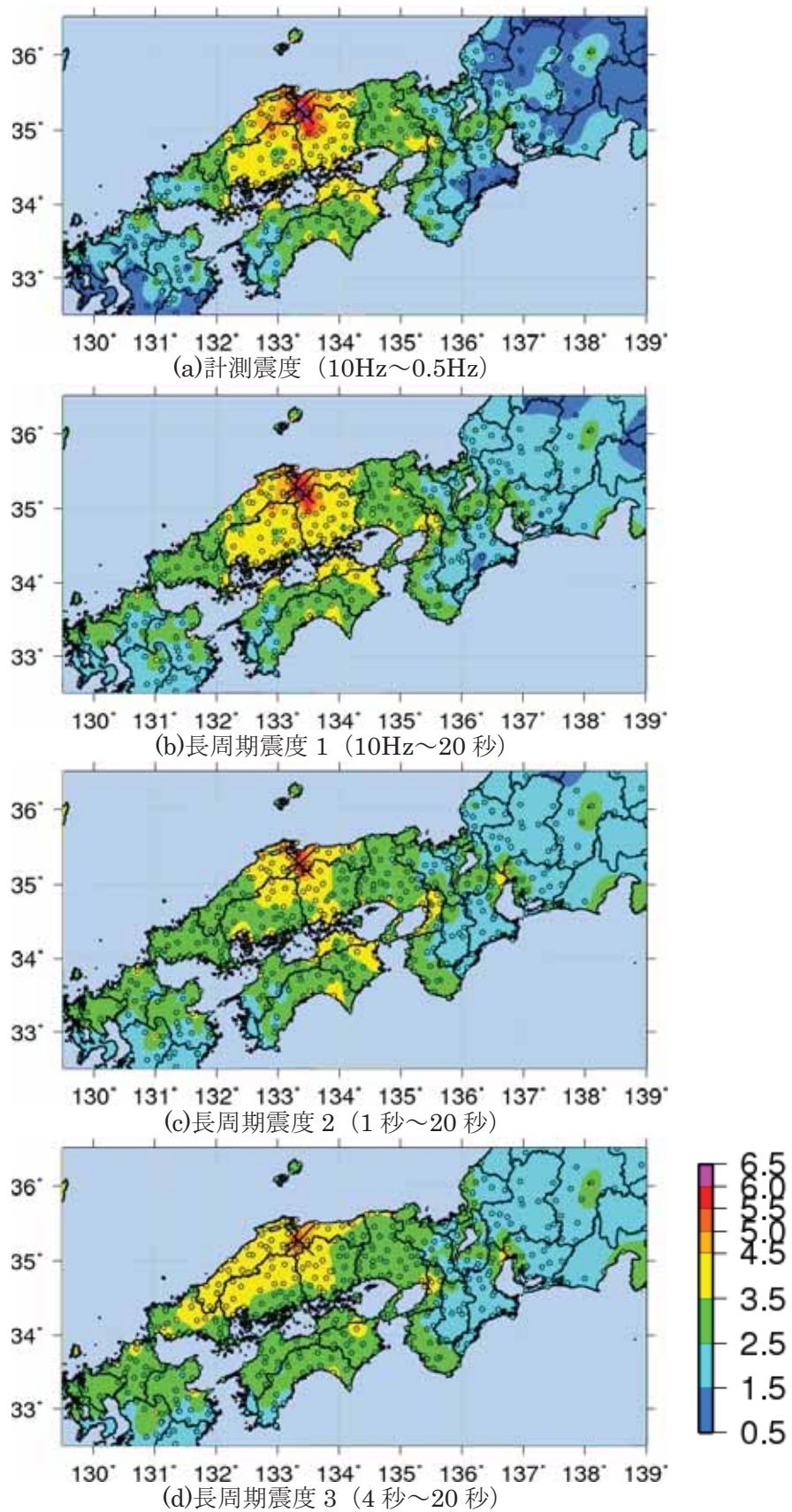


図5 2000/10/6 鳥取県西部地震(M_J7.3)の尺度比較

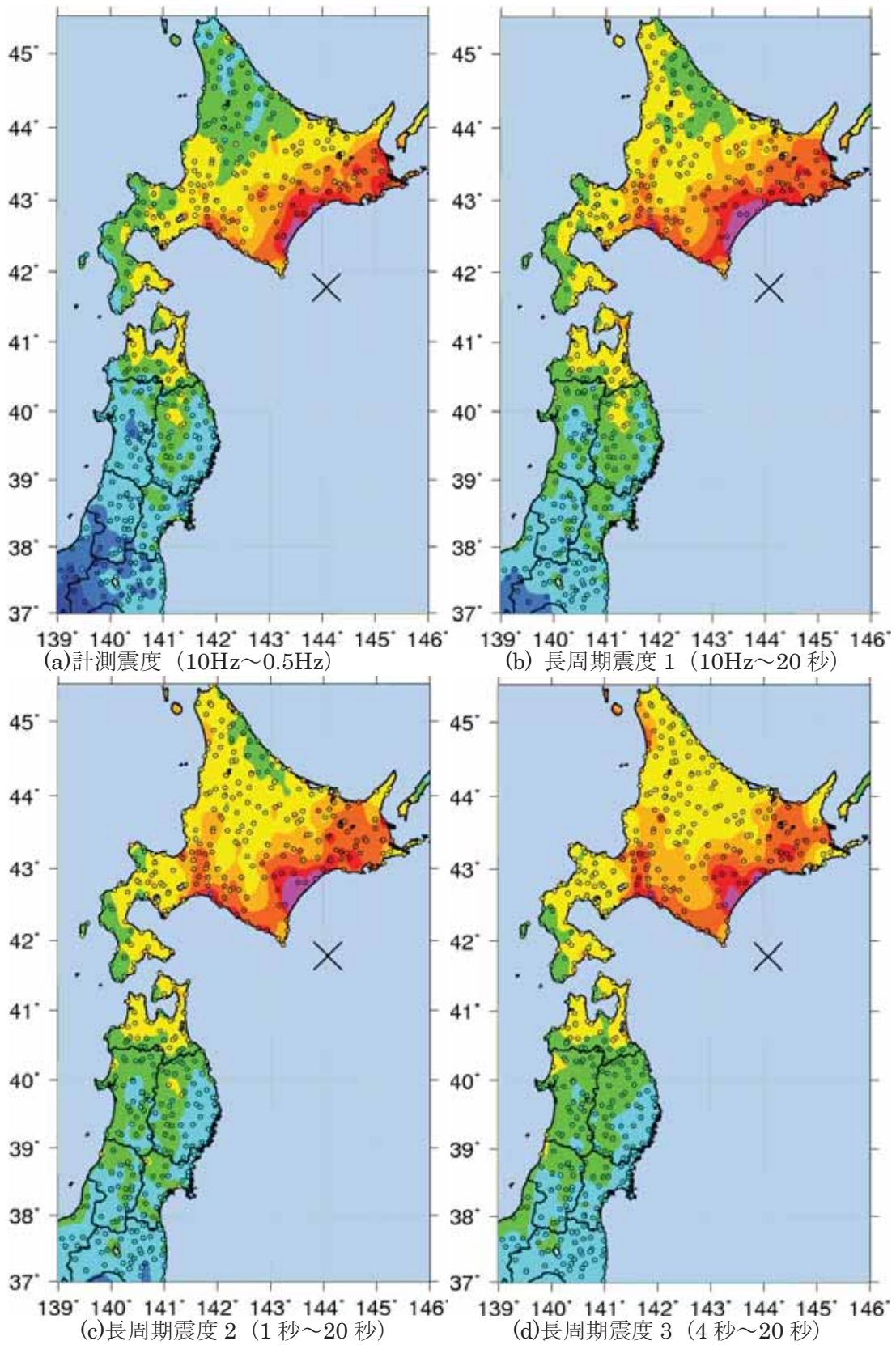


図6 2003/9/26十勝沖地震(M_J8.0)の尺度比較

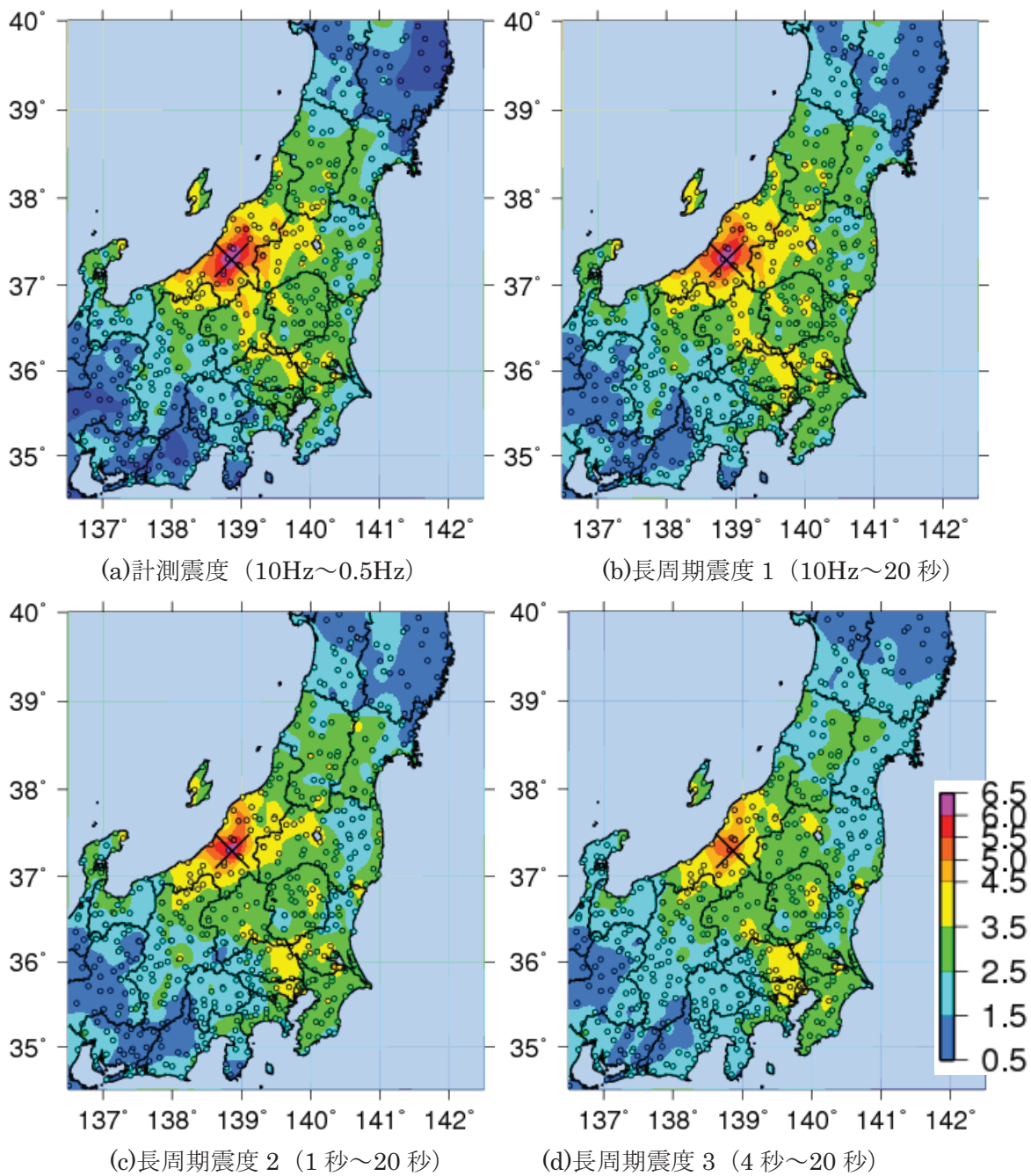


図 7 2004/10/23 新潟県中越地震(Mj6.8)の尺度比較

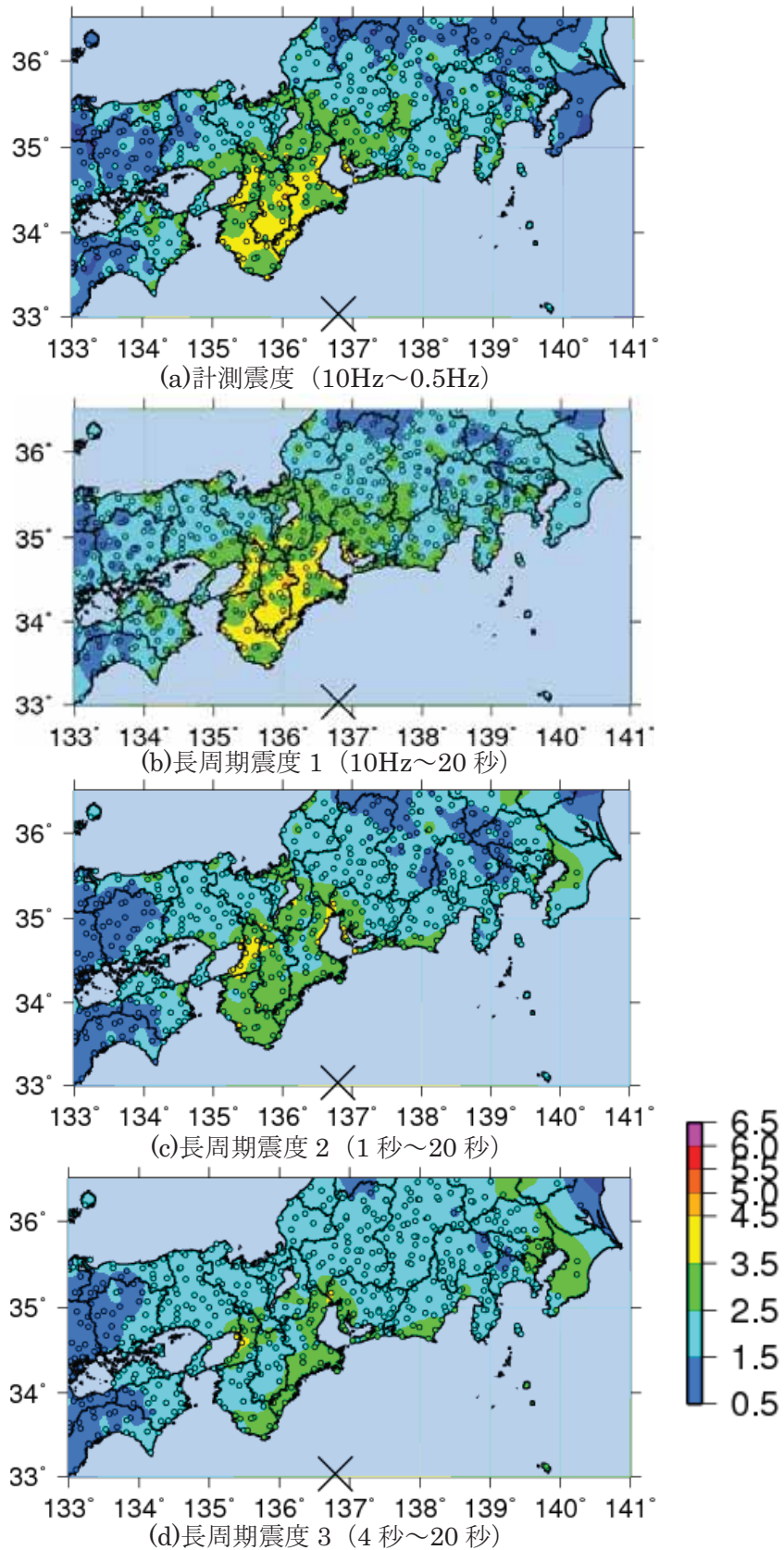


図 8 2004/9/5 19:05 三重県南東沖の地震(M_J7.1)の尺度比較

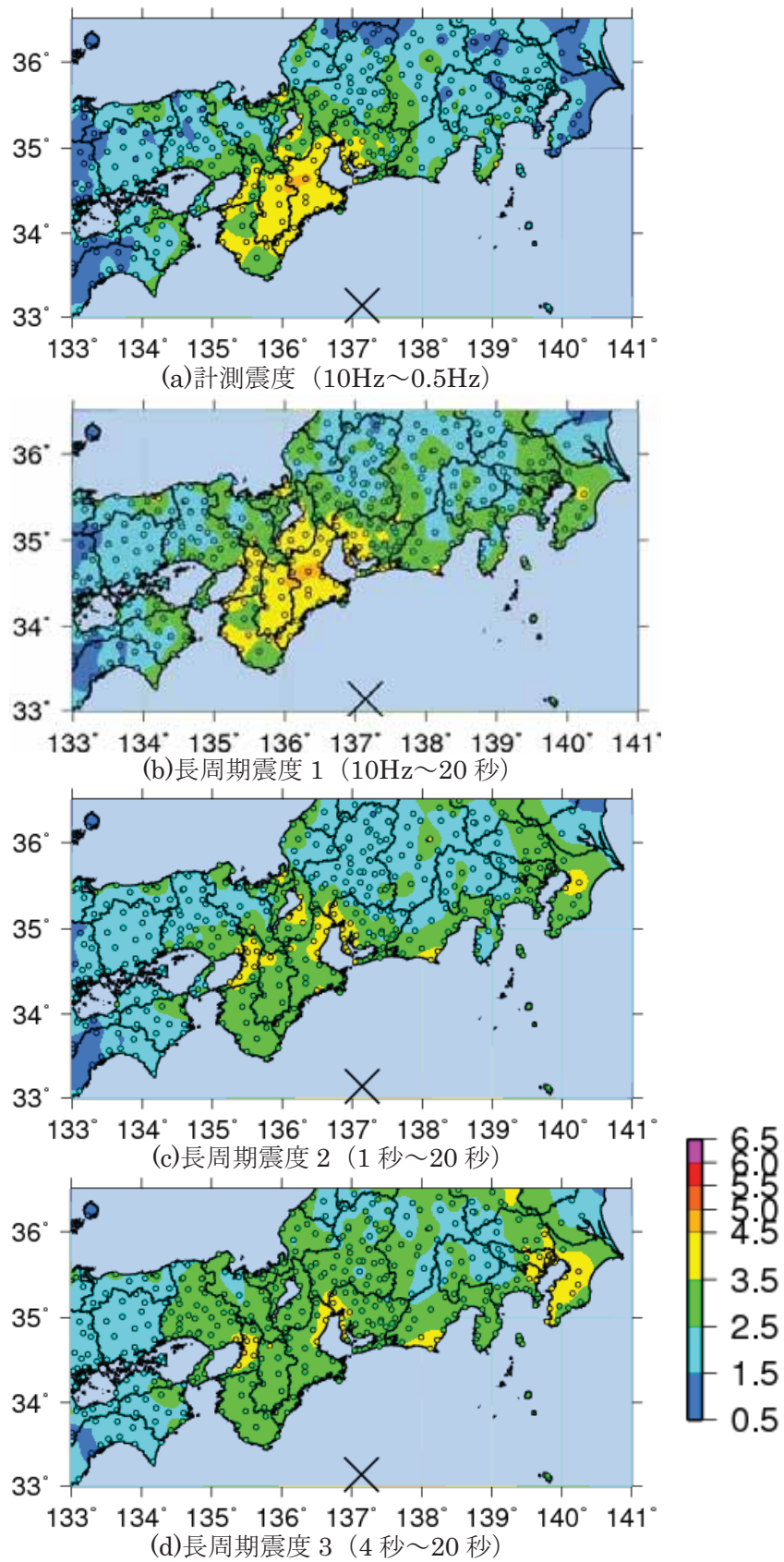


図9 2004/9/5 23:56 三重県南東沖の地震(M_J7.4)の尺度比較

資料6：構造物の応答を考慮すべき気象庁震度
(第2回検討会、川島委員資料)

長周期地震動に関する情報のあり方検討会 気象庁講堂

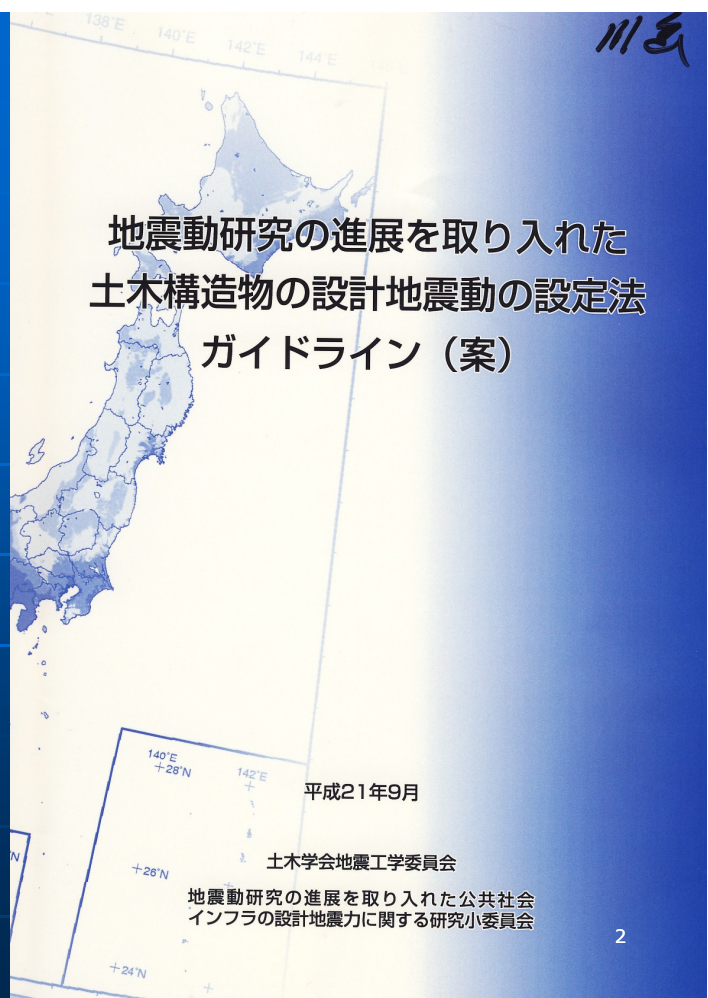
建造物の応答を考慮すべき気象庁震度

平成23年12月21日

東京工業大学
大学院理工学研究科土木工学専攻
川島一彦

1

●土木学会地震工学委員会の中に設けられた「地震動研究の進展を取り入れた公共社会インフラの設計地震動に関する研究小委員会」で、平成18年度～20年度の3年間にわたって、検討した成果



2

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)

1. 設計地震動の設定の基本方針
 2. 断層近傍地震動の特性
 3. 短周期地震動が土木構造物に与える影響
 4. 長周期地震動の特性
 5. 震源断層を特定した地震動の推定手法とその利用
 6. 確率論的な地震動評価とその利用
 7. 設計地震動の設定に使用してはならない気象庁震度階
 8. 設計地震動の設定と工学的判断
- 付属資料

3

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)

1. 設計地震動の設定の基本方針
 2. 断層近傍地震動の特性
 3. 短周期地震動が土木構造物に与える影響
 4. 長周期地震動の特性
 5. 震源断層を特定した地震動の推定手法とその利用
 6. 確率論的な地震動評価とその利用
 7. 設計地震動の設定に使用してはならない気象庁震度階
 8. 設計地震動の設定と工学的判断
- 付属資料

4

7. 設計地震動の設定に使用してはならない 気象庁震度階

- 気象庁震度は国民にもよく知られた指標
- 気象庁震度階はかつて体感や、周囲の震動、被害状況に基づいて定められてきたが、1996年以降は、計測震度計により自動的に観測される。
- 計測震度は、基本的に、従来の体感震度に近い値を与えるように、地震動にフィルター処理し、これを0～7の10段階で与えたもの。

5

なぜ、気象庁震度に基づいて設計地震動を定めることが不適當か？

気象庁震度は5強であった



地震の揺れの大きさを表す指標

この地区の被害は、気象庁震度6弱相当よりも弱かった



被害レベルを表す指標

建造物の被害レベルは、地震の揺れの大きさだけでなく、当然、建造物の応答、強度によって異なってくる⁶

なぜ、気象庁震度に基づいて設計地震動を定めることが不適當か？(2)

- 気象庁震度に示される被害と、実際の被害には大きな違いが生じる場合がある。
- たとえば、2008年岩手・宮城内陸直下地震では、気象庁震度は6強であったにもかかわらず、木造家屋の倒壊率はほとんど0であった。
- 構造物被害にまで気象庁震度を適用しようとする、致命的な誤解を与える可能性がある。ある構造物が震度6強に耐えるとか、震度7にも倒壊しないといった使い方には十分注意しなければならない。
- 上限のない「震度7に対しても安全」といった表現は、耐震設計では使用すべきではない。

設計地震動は、気象庁震度ではなく、構造物の応答を支配する物理量に基づいて、設定すべき

- 設計地震動の設定には、構造物の応答を表す物理量を用いるべき。
- 地震動加速度(PGA)は、構造物の応答とは直接の関係はない。
- 少なくとも応答スペクトル(線形、非線型)、より直接的には構造物の応答に基づいて、設計地震動を設定するのがよい。

構造物の応答を取り入れてきていない気象庁震度は今までも破綻していた

- “地震動”の強さを表す指標としての気象庁震度の意味は理解できる。
- 気象庁震度の目安として、構造物の壊れ具合を持ち出したとたんに、問題が噴出
 - ✓ 構造物の被害は強度によって異なってくる。構造設計の世界では当たり前のことが、気象庁震度には見込まれていない。
 - ✓ 構造物の応答を考慮していない。剛構造物では、構造物の震動 \approx 地震動であるため問題は少ないが、構造物の固有周期特性および減衰定数によって、構造物の震動 \neq 地震動となる。
- 今回の長周期地震動の問題は、従来から抱えている気象庁震度の問題の延長線上の問題。⁹

いつまでも国民の理解を気象庁震度に閉じ込めるのではなく、構造物の応答を取り入れた理解が可能なように、積極的に気象庁が情報をだしていくべき

- 主要官庁が情報を出していかないと、国民の理解は深まらない。その結果、国民の正しい理解が得られないのみならず、説明する側も、いつも苦しい説明を強いられ、かつ、国民から不審の念を抱きかれない。
- 地震学分野では、新聞やTVの科学分野で、相当詳しい情報が国民に提供されている。これに引き替え、地震動に関する情報としては、ほとんど気象庁震度に限定されている。たまにガルが使われる程度。ガルに関してはほとんどの国民が理解できていない。

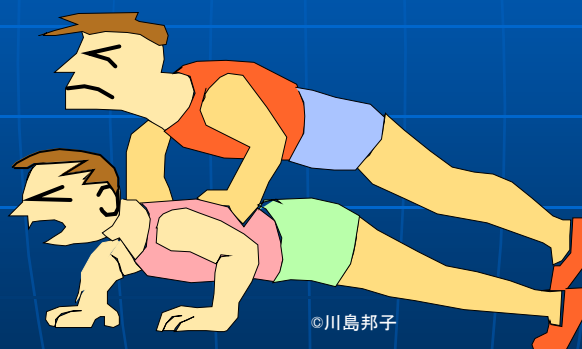
構造物には固有周期と減衰があり、これらによって揺れ方は変わってくることを、全面に打ち出すべき

- 地震応答スペクトルを持ち出すまでもなく、構造物の震動が固有周期と減衰によって変わってくることは、国民にも直感的に理解できる内容であるはず。
- 自分の家屋の固有周期が何秒かというくらいは知っているという状態に持って行くべき。その次でよいが、減衰定数に対する理解も広めていくことが重要。
- “地震応答スペクトル”という表現は専門用語としてはよいが、もっと国民にわかりやすい表現を関連工学系学会が連携して、作るべきではないか。
- “ガル”よりも“g”の方が国民に受け入れられるのではないかと？ 重力として受けている力を尺度にしやすいためである。

11

“ガル”よりも直感的に理解されやすい“g”

2gの振動とは？



©川島邦子

12

構造物の応答を考慮した気象庁震度のイメージ

●ただいま、++でM7.5の地震が発生しました。予想震度は以下の通りです。++では震度4、……。ただし、建物の震動は固有周期によって変わります。++でも、固有周期が5～7秒の建物では震度6, 7～10秒の建物では震度7と予想されます。

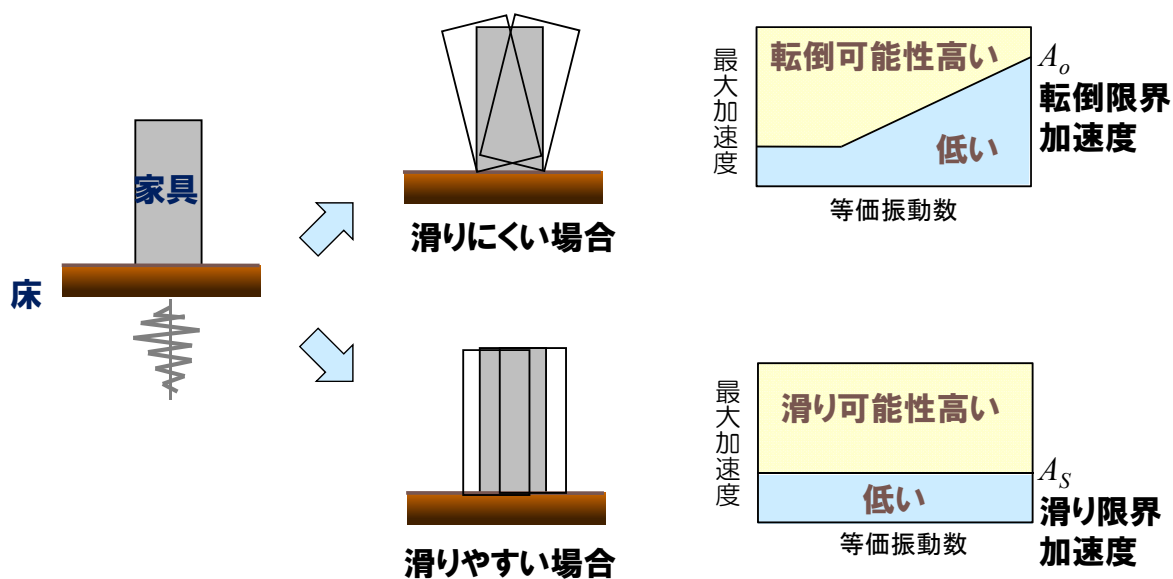
資料 7 : 家具類の地震被害推定方法と長周期地震動による被害推定例 (第 2 回検討会、金子委員資料)

家具類の地震被害推定方法と 長周期地震動による被害推定例

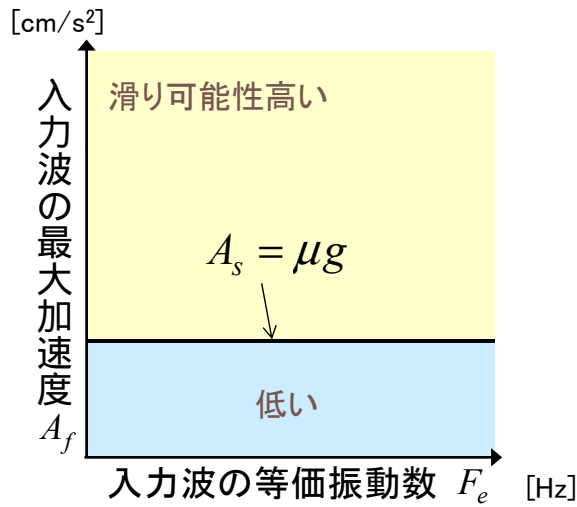
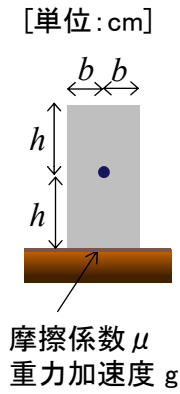
2011年12月21日

(株)大崎総合研究所 金子美香

家具の地震時挙動

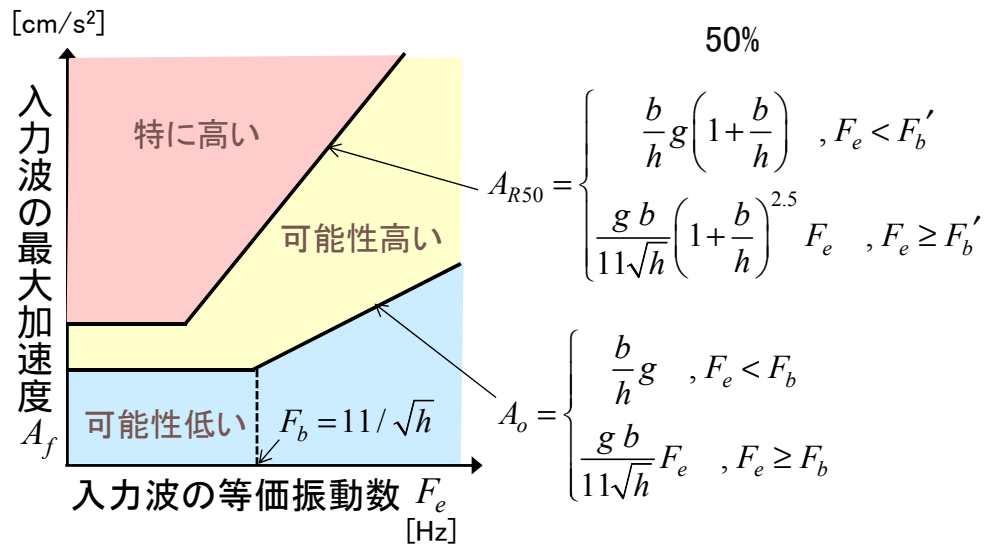
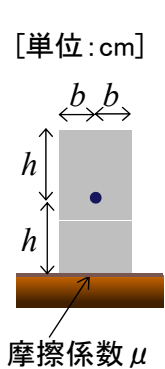


滑り限界加速度

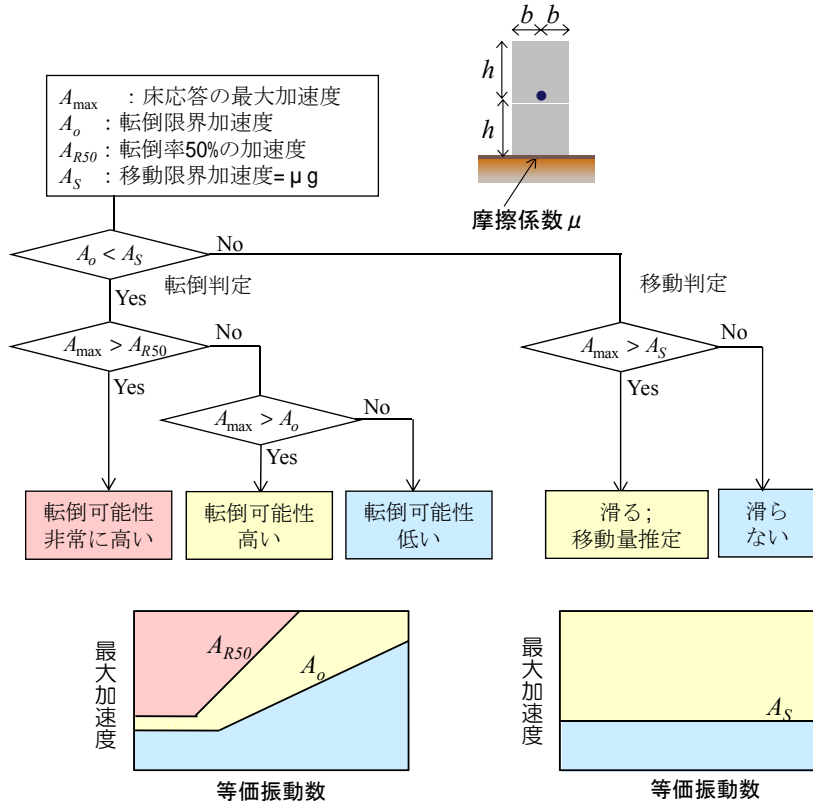


等価振動数 : $F_e = A_f / (2\pi V_f)$

転倒限界加速度



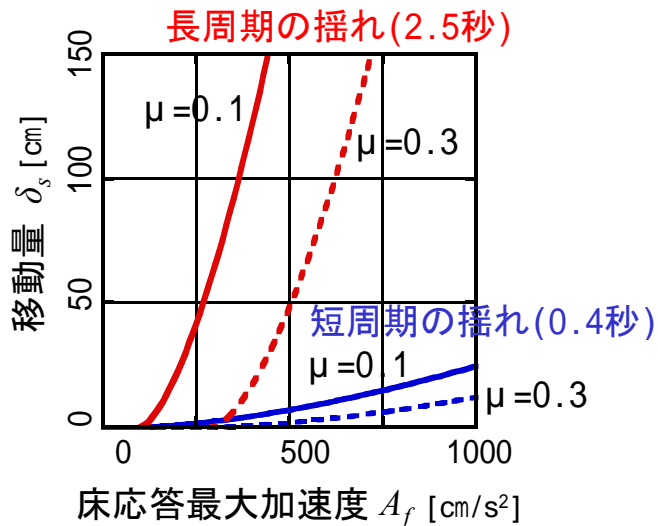
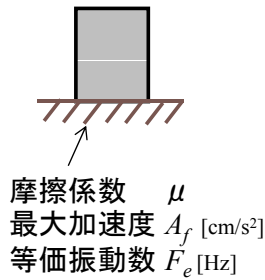
家具被害の簡易推定フロー



移動量の簡易推定式

家具の平均すべり移動量 [cm]:

$$\delta_s = \begin{cases} 0 & , A_f \leq \mu g \\ 0.02\mu^{-0.3} F_e^{-0.5} \left(\frac{A_f - \mu g}{2\pi F_e} \right)^{1.56} & , A_f > \mu g \end{cases}$$



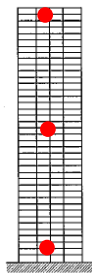
長周期地震動による被害推定例

日本建築学会 構造委員会
長周期建物地震対応ワーキンググループ
長周期地震動対策に関する公開研究集会
資料(2011年3月) より

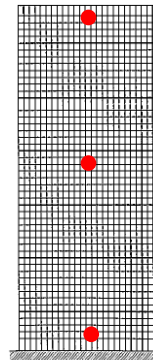
7

想定した地震動と建物

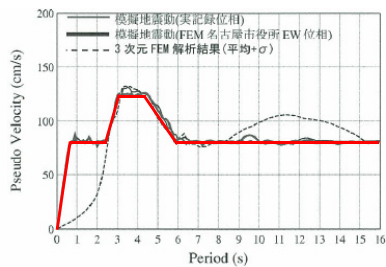
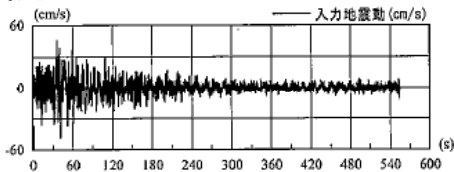
住宅
(RC40)



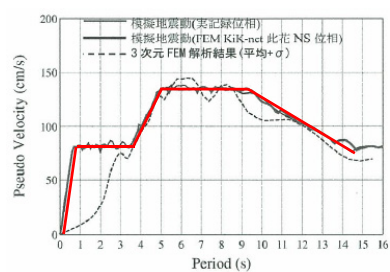
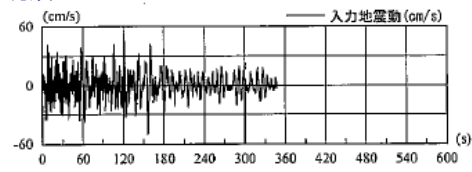
オフィス
(S50)



濃尾ゾーン1

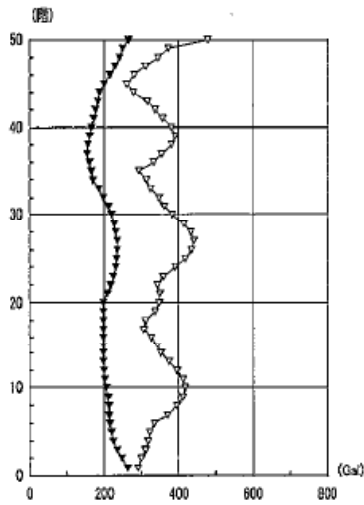


大阪ゾーン1

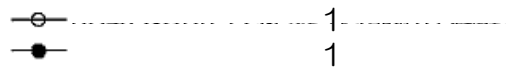
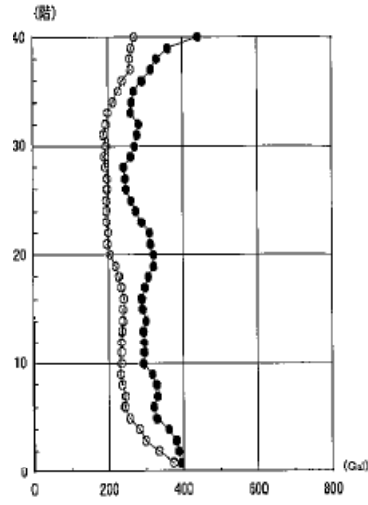


想定建物の応答加速度

50階建てオフィス
大阪ゾーン1

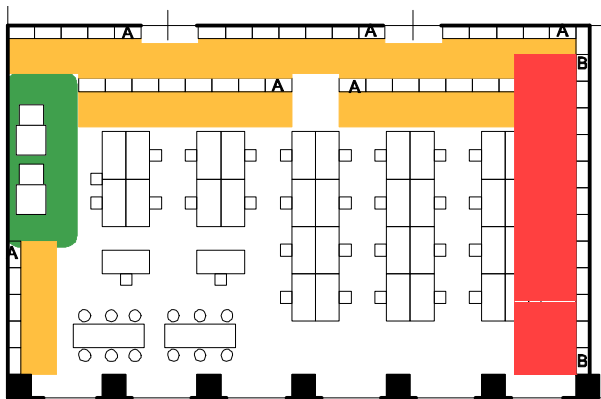


40階建て住宅
濃尾ゾーン1

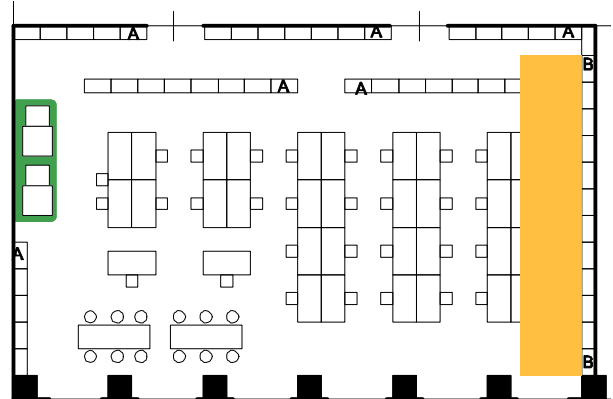


大阪の50階建てオフィスの被害




最上階



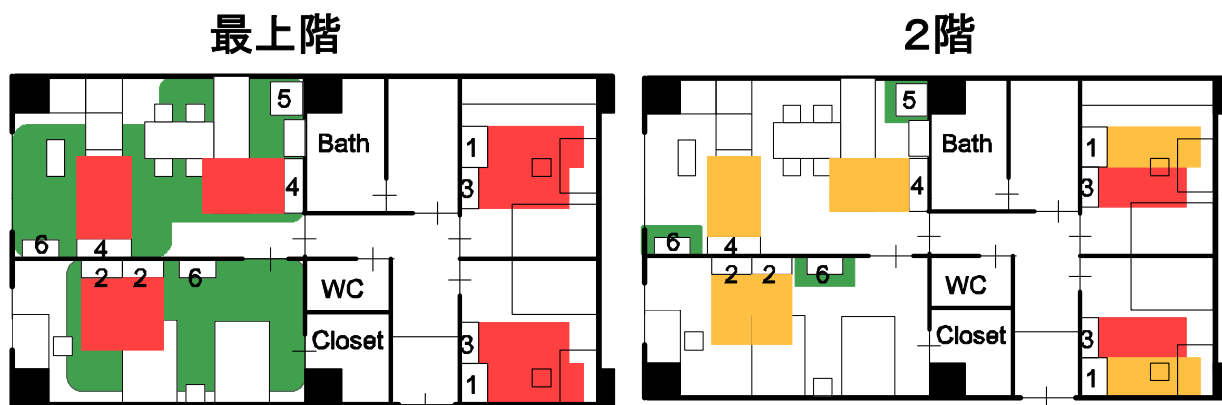
2階



- 転倒可能性が非常に高い
- 転倒可能性が高い
- 滑動

	オフィス		
	タイプA	タイプB	コピー機
配置した家具の例			
高さ[cm]	120	210	95
奥行[cm]	45	45	70
床との摩擦係数	0.4	0.4	0.1

濃尾の40階建て住宅の被害



- 転倒可能性が非常に高い
- 転倒可能性が高い
- 滑動

	住宅		
	本棚	洋たんす	TV台
配置した家具の例			
高さ[cm]	200	210	45
奥行[cm]	40	60	40
床との摩擦係数	0.3	0.3	0.05

被害推定結果のまとめ

- 上層では、ほとんどの家具が転倒し、キャスター付き家具が2,3m移動。避難通路や出入口が塞がれる恐れがある。
- 下層でも、スレンダーな家具が転倒、キャスター付き家具が数十センチ移動する。
- 家具の転倒移動が増えると、人的被害も増加すると考えられる。家具の転倒移動を防ぐことで、人的被害を低減できる。