地震保険研究３１

過去の地震による長周期地震動とその被害に関する調査

２０１７年３月

損害保険料率算出機構

はじめに

2003年十勝沖地震で生じた長周期地震動により、苫小牧市で大型石油タンク火災が発生した。これを契機として、長くつづくゆっくりとした大きな揺れに特徴を持つ長周期地震動とその被害が注目されるようになった。その翌年には土木学会と日本建築学会が共同で「東海地震等巨大災害への対策特別調査委員会」を発足させ、2006年には「海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性に関する共同提言」を公表した。また、文部科学省の地震調査研究推進本部により長周期地震動の予測手法に関する研究が進められ、2009年には「長周期地震動予測地図」の試作版が公表された。こうした研究が進められる中、過去最大規模である2011年東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震では、東京都庁第一本庁舎(48階建)をはじめとする首都圏の高層建物で天井の落下やエレベータの停止といった被害が発生しただけでなく、震源から遠く離れた大阪府の咲洲庁舎（52階建）においても天井の落下などの被害が発生し、長周期地震動が社会的に大きく認識されることとなった。今後発生が想定される南海トラフ巨大地震では、2011年東北地方太平洋沖地震を上回る強い長周期地震動が発生する可能性があり、超高層建物が多く立地する三大都市圏の平野部でその被害が懸念される。

このような状況下において、被害想定の中で長周期地震動を適切に考慮することは重要である。しかし、近代日本の高層建物は大きな被害が生じるまでの長周期地震動を経験したことがなく、長周期地震動とその被害の予測に関する調査研究は少ない。

そこで、長周期地震動を考慮した被害の予測手法構築に向けた基礎調査として、過去の地震による長周期地震動とその被害に関する文献・資料調査、長周期地震動とその被害の予測手法に関する文献・資料調査を実施した。本報告書はその結果をまとめたものである。

本書が、防災や保険などの長周期地震動にかかわる分野において有益な資料となれば幸いである。

２０１７年３月

損害保険料率算出機構

目　　次

第1章　本調査の概要……1

第2章　長周期地震動に関する文献･資料調査……3

2.1　長周期地震動に関する既往研究……3

2.2　過去の地震による長周期地震動の発生状況……9

2.3　長周期地震動階級……33

第3章　長周期地震動による被害に関する文献･資料調査……39

3.1　長周期地震動による国内の主な被害……39

3.2　過去の長周期地震動による超高層建物の被害状況……42

第4章　長周期地震動とその被害の予測手法に関する文献・資料調査……53

4.1　長周期地震動の予測手法に関する既往研究……53

4.2　長周期地震動による被害の予測手法に関する既往研究……59

参考文献……81

第1章　本調査の概要

1.1　調査目的

2011 年東北地方太平洋沖地震では、震源から遠い大阪府の高層建物で長周期地震動による被害が生じており、今後発生すると言われる南海トラフ巨大地震では、高層建物の多い首都圏における長周期地震動による被害の発生が懸念される。このような状況において、被害想定の中で長周期地震動を適切に考慮することは重要であるが、近代日本の高層建物は大きな被害が発生するまでの長周期地震動を経験したことがなく、長周期地震動とその被害の予測に関する調査研究は少ない。

そこで本調査では、長周期地震動を考慮した被害の予測手法構築に向けた基礎調査として、過去の地震における長周期地震動の発生状況、被害状況および被害の予測手法・予測結果に関する研究事例の調査を行う。

1.2　調査内容

1.2.1　過去の地震における長周期地震動の発生状況、被害状況(住宅、家財)の調査

強い長周期地震動が発生するための条件として、建築研究所(2013)[1)]では、以下の 3 つの条件が挙げられている。

i)　地震規模が大きく、震源が浅いこと
ii)　地震波が伝わる経路に、揺れを大きく増幅させる要因となる軟らかい地盤があること
iii)　当該地を含む平野規模の地盤構造が堆積地盤であること

日本国内の過去の地震における長周期地震動の発生状況を、既往文献と資料に基づいて上記の 3 つの条件を踏まえ、過去の地震における長周期地震動がどのような条件で発生しているのかをより具体的に把握する。

1.2.2　長周期地震動とその被害の予測手法に関する研究事例の調査

長周期地震動とその被害の予測にかかる研究事例の調査を行う。

長周期地震動の予測手法については、地震調査研究推進本部(以下、地震本部と表記)から公表されている長周期地震動予測地図や、内閣府、国土交通省における検討の内容を調査し、各手法の特徴や課題などを整理する。

長周期地震動による被害の予測手法については、既往研究を調査し、各手法の特徴や課題などを整理する。

1.3　調査結果

1.3.1　過去の地震における長周期地震動の発生状況、被害状況(住宅、家財)の調査

長周期地震動の発生については、2011 年東北地方太平洋沖地震や 2008 年岩手宮城内陸地震などの国内の 12 地震を対象に、地震規模や震源深さ、長周期地震動が観測された地域、住宅被害発生の有無について文献を調査した。

高層建物や石油タンクなどの被害が観測された地震は、規模が概ね Mw7.0 以上で震源が比較的浅いことと、平野や盆地などの厚い堆積層上にあることが共通する。被害の内容は、石油タンクのスロッシングによる火災や高層建物におけるエレベータケーブルの切断、什器の転倒等であり、20 階以上の高層建物では大規模な補修が必要となる構造被害が発生した報告はなかった。

1.3.2　長周期地震動とその被害の予測手法に関する研究事例の調査

地震本部や内閣府、国土交通省による長周期地震動の予測手法と、既往の研究で提案されている長周期地震動による被害の予測手法を整理した。

長周期地震動の予測に関しては、2011 年東北地方太平洋沖地震との整合性の確認や得られた知見の反映などは行われているものの、地下構造モデルの精度向上やその他の地震に対する予測精度の検証などの課題がある。

長周期地震動による被害の予測手法に関しては、建物の被害を対象にした研究が主で、家財の被害を対象としたものは少ない。これらは計算した地震動指標から被害率を読み取る点は共通しているが、用いる地震動指標やその計算手法などが異なり、建物 1 棟ごとの被害を評価するものと、多くの建物被害を平均的に評価するものがある。ただし、これらは 2011 年東北地方太平洋沖地震より前の手法であり、2011 年東北地方太平洋沖地震の結果を説明できるかどうかの検討は行われていない。

1.4　報告書の構成

本報告書の構成概要を以下に示す。

「第 2 章 長周期地震動に関する文献・資料調査」では、その調査結果について、2.1 長周期地震動に関する既往研究、2.2 過去の地震による長周期地震動の発生状況、2.3 長周期地震動階級 として記述している。

「第 3 章 長周期地震動による被害に関する文献・資料調査」では、その調査結果について、3.1 長周期地震動による国内の主な被害、3.2 過去の長周期地震動による超高層建物の被害状況 として記述している。

「第 4 章 長周期地震動とその被害の予測手法に関する文献・資料調査」では、その調査結果について、4.1 長周期地震動の予測手法に関する既往研究、4.2 長周期地震動による被害の予測手法に関する既往研究 として記述している。

第2章　長周期地震動に関する文献・資料調査

2.1　長周期地震動に関する既往研究

長周期地震動に関する研究をレビューしたものとして、工藤(2005[2], 2008[3])、座間(1993[4], 2009[5], 2014[6])、笹谷ほか(2006)[7]などがある。以下では、工藤(2005, 2008)などに基づいて、被害を起こして問題となった長周期地震動の共通点、震源が長周期地震動に及ぼす影響、全国の長周期地震動の揺れやすさ分布、および表面波の長周期地震動への寄与について示す。

2.1.1　長周期地震動について

長周期地震動の周期範囲の定義は必ずしも明確ではないが、工藤(2005)は周期 3 秒から 20 秒の地震動を長周期地震動と呼んでいる。また、地震本部では、一般的な高層建物の固有周期が 2 秒～3 秒前後であるため、長周期地震動の下限周期を 2 秒とし、周期 3 秒、5 秒、7 秒、10 秒の長周期地震動予測地図(2012 年試作版)[8]を作成している。

工藤(2005)は、今までに被害を起こして問題になった長周期地震動を考えれば、共通点は以下のように整理されると述べている。

i)　Mw(モーメントマグニチュード)7.0 程度以上で震源が比較的浅い地震であること
ii) サイトが大きな平野部あるいは盆地などの厚い堆積層上の立地条件にあること

考察の対象とした地震は、1983 年日本海中部地震、1985 年メキシコ地震、1993 年北海道南西沖地震、1999 年トルコ・コジャエリ地震、1999 年台湾集集地震、2003 年十勝沖地震である。被害が生じた対象構造物としては、大型石油タンクや中高層の建物が挙げられている。なお、台湾集集地震では、台湾最大の石油会社「中国石油公司(CPC)」の石油基地 3 箇所(沙崙、新竹、鐵砧山)でスロッシングによる被害が生じている(座間(2014))。

2.1.2 震源特性などの影響

震源が長周期地震動に及ぼす影響について、工藤(2005)に基づいて以下に示す。

観測された加速度波形のフーリエスペクトル $O(T)$ は、特に震源に近くなければ次式のように表される(工藤(2005))。

$$O(T) = S(T) * P(T) * L(T) \tag{2.1-1}$$

$S(T)$ 、$P(T)$ 、$L(T)$ は、それぞれ震源加速度スペクトル、経路特性、観測サイト周辺の地盤特性であり、T は周期を表す。

震源加速度スペクトル $S(T)$ は、大局的には図 2.1-1 に示すような ω^2 モデルで記述されることが知られている。図 2.1-1 の震源スペクトルを M 6 と M 8 で比較すると、周期 1 秒以下では 10 倍程度の差であるが、10 秒付近では 100 倍の差となる。

このことから工藤(2005)は、長周期地震動の要注意のマグニチュードがおおよそ 7 程度以上であることを震源の特性から指摘できると述べている。

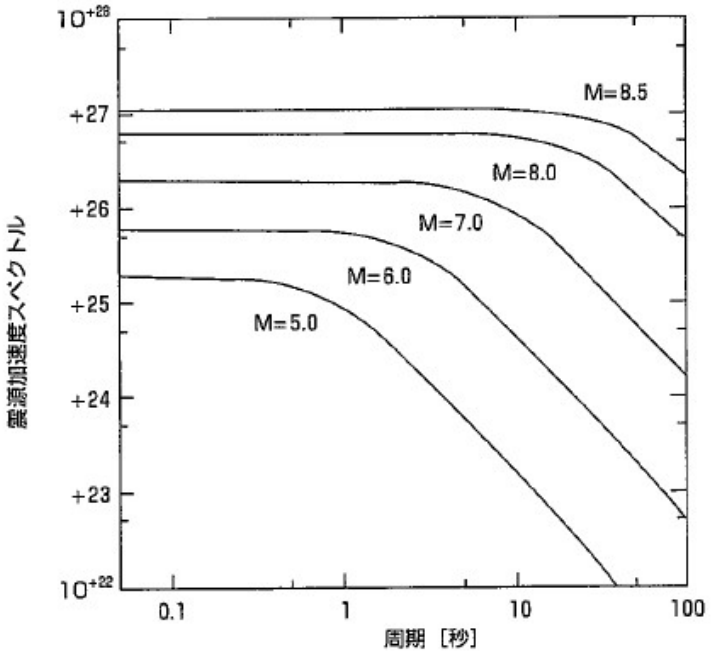


図 2.1-1　マグニチュードと震源加速度スペクトルとの関係
(工藤(2005)第 1 図より)

ω^2モデルによる震源加速度スペクトル$S(T)$の包絡線形状を図 2.1-2 に示す。震源加速度スペクトルは、周期Tによらず一定となる領域、周期Tのマイナス 1 乗に比例して減少する領域、および周期Tのマイナス 2 乗に比例して減少する領域に分けられる。これらの領域の境界となる周期$T_{c\tau}$、 T_{cL}がコーナー周期と呼ばれている。これらのコーナー周期は、それぞれ震源時間関数における立ち上がり時間の有限性と、断層の破壊伝播時間の有限性に関係している。

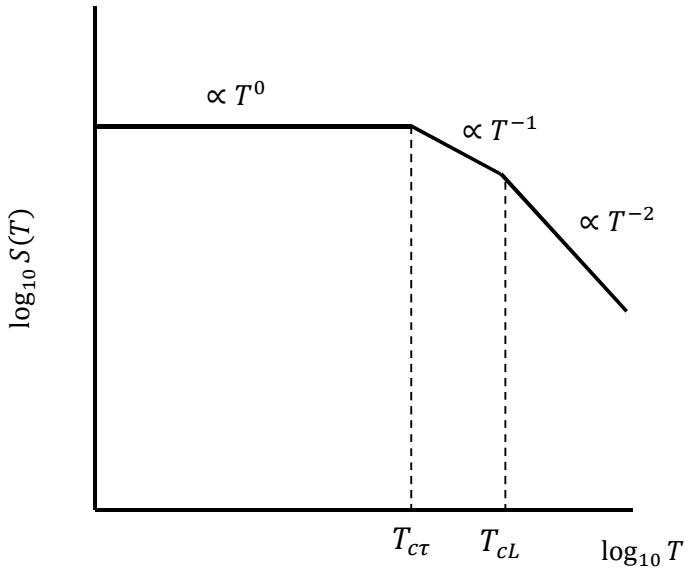


図 2.1-2　ω^2モデルによる震源加速度スペクトルの包絡線形状

震源の影響としては、他に以下の要因も関係すると述べられている。

i)　アスペリティ
　　アスペリティとよばれる断層の変位量(くい違い量)が大きい領域の影響
ii)　方位特性
　　方向によって波の振幅が異なる地震波の放射特性の影響
iii)　震源深さの影響

経路特性$P(T)$については、工藤(2005)では、「$L(T)$と明確に分離して考えることは難しいが、特殊な地盤を除けば、震源距離と媒質の内部摩擦や粘性による地震波の減衰項であり、長周期では比較的地域差が少ないと考えられる。」と述べられている。

観測サイト周辺の地盤特性$L(T)$については、工藤(2005)では、「短周期(1～2 秒以下)では、厚さ数 10m 程度以下の堆積層により特性がおおよそ決まってしまうが、長周期はより深い地盤構造(100m～数 km)で、かつ広がりを持った盆地や平野全体の影響(2・3 次元地下構造)を受けると考えるべきである。」と述べられている。

2.1.3　全国の長周期地震動の揺れやすさ分布

岡田・鏡味(1978)[9]は、気象庁観測網の 1 倍強震計等で得られた記録を用いてやや長周期の揺れやすさ分布を求めている。解析に用いている資料は地震月報から抽出した地震であり、地震を選び出す基準は下記の 3 つを満足する期間 1961 年から 1974 年までに日本および日本近海で発生したものとしている。

i)　震源深さ 60km 以浅(浅発地震)
ii)　同一地震による最大有感距離 300km 以上(顕著地震)
iii)　マグニチュード 5.4 以上

上記の基準 i)～iii)は、構造物への影響が大きいと思われる地震を抽出するために配慮されているものである。また、期間を解析時点での 15 年間に限定したのは、1961 年から気象庁ではコンピュータによる処理が開始され、震源位置などの精度が向上したことが考慮されているためである。以上の基準で選出された地震総数は 138 個であり、解析で対象とした気象庁の地震観測所は 94 地点である。

解析より得られたやや長周期(1～10 秒)の揺れやすさ分布を図 2.1-3 に示す。図中の数値が大きい方が揺れやすいとしており、揺れやすいと評価されているのは東京・大阪などの大平野と秋田・酒田・新潟などの日本海沿岸部の平野である。

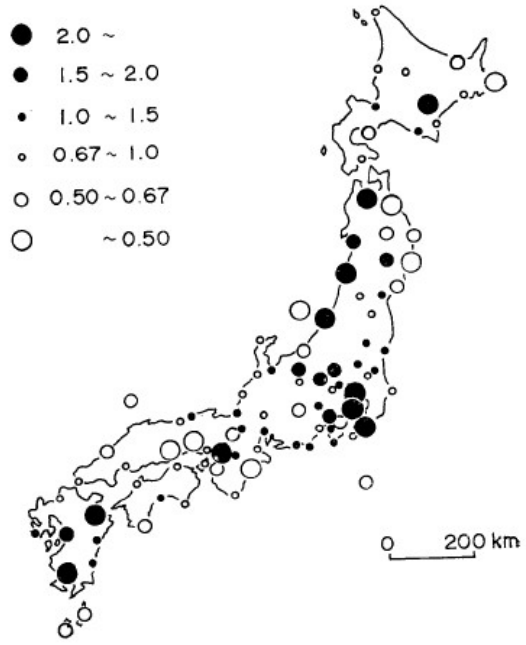


図 2.1-3　全国のやや長周期(1～10 秒)地震動の揺れやすさ分布
(岡田・鏡味(1978) Fig.10 より)

Mamula *et al.* (1984)[10]は、1961 年北美濃地震(Mj7.0)の記録を用い、かつ本州の平均的地下構造を仮定して、そこから計算される表面波と観測との差から長周期の揺れやすさを評価している。周期ごとの揺れやすさ分布の一例（周期 5 秒）を図 2.1-4 に示す。大阪では周期 5 秒までの揺れやすさランクは高いが、周期 7 秒を超えると平均的あるいは揺れにくい。一方、東京・横浜は 3～10 秒まで高いランクにあり、逆に静岡・神戸などはどの周期帯でも揺れにくい。

図 2.1-4　周期ごとの揺れやすさ分布の一例（周期 5 秒）
(Mamula *et al.* (1984) Fig.8 より翻訳して引用)

2.1.4 表面波の長周期地震動への寄与

長周期地震動には、震源から放射される S 波によるものと表面波によるものがある。表面波には、震源から放射される実体波が干渉し合って励起されるものと堆積盆地で生成されるものの 2 種類がある。さらに後者は、堆積盆地に入射した実体波から生成される盆地生成表面波と、堆積盆地に入射した表面波からモード変換によって励起される盆地転換表面波に分類される(川瀬(1993)[11])。

工藤(2008)は、長周期地震動への表面波の寄与について、「長周期地震動には表面波の寄与が大きい。表面波の性質で重要なことは、震源距離が大きくなっても、P 波や S 波ほどには振幅が小さくならない。表面波は、P 波や S 波よりも震動継続時間が長くなる。表面波は周期によって伝わる速度が変化する性質があり、深い構造を反映して早く伝わる波から、浅い速度の遅い地層を反映してゆっくり到達する波まで連続的に変化する。そのため、やや遠いところでは、長時間の揺れとなって観測される。」と述べている。

座間(1993)では、「やや長周期の強震動が主に表面波から構成されているとする考えはほぼ定着しており、2 次元地下構造モデルと震源モデルを組み合わせたシミュレーションによって主要動部分についてはある程度の再現性を容易に得ることができるようになった。」と述べられている。

表面波の振幅が、震源距離が大きくなっても P 波や S 波ほどには小さくならない理由は、以下のような幾何減衰により説明することができる。P 波や S 波の実体波は 3 次元的に伝播するため、波のエネルギーは風船が膨らむのと同じように風船の表面積に反比例して小さくなる。このため、波のエネルギーは震源距離の 2 乗に反比例し、振幅は震源距離に反比例して小さくなる傾向にある。これに対して表面波は 2 次元的に伝播するため、波のエネルギーは円柱が拡大するのと同じように円柱の円周長さに反比例して小さくなる。このため、表面波のエネルギーは震央距離に反比例し、振幅は震央距離の平方根に反比例して小さくなる傾向にある。

2.2　過去の地震による長周期地震動の発生状況

日本国内の過去の地震における長周期地震動の発生状況を、既往文献と資料に基づいて、震源、伝播経路、平野規模の地盤構造の 3 つの観点から整理を行い、過去の地震における長周期地震動がどのような条件で発生しているのかをより具体的に把握する。

2.2.1 調査対象とする地震について

調査対象とする地震は、国内で発生した地震で長周期地震動が発生したことが論文等で指摘されている地震とする。1995 年兵庫県南部地震を契機として、K-NET や KiK-net などの防災科学技術研究所(以下、防災科研と表記)による強震観測網が整備されており、これらの記録を利用した長周期地震動に関する研究も行われてきている。1996 年以降の主な被害地震と長周期地震動の発生状況を表 2.2-1 に示す。表中のモーメントマグニチュード Mw は、気象庁の HP で公開されている CMT 解によるものである。CMT とは、セントロイド・モーメント・テンソル(Centroid Moment Tensor)の略で、観測された地震波形を最もよく説明する地震の位置(セントロイド)、規模(モーメントマグニチュード)、および発生メカニズムを同時に求める解析法である。

なお、K-NET は、全国を約 20km 間隔で均質に覆う 1,000 箇所以上の強震観測施設からなる強震観測網であり、1996 年 6 月から運用されている。KiK-net の観測施設は、全国約 700 箇所に配置され、各観測施設には観測用の井戸(観測井)が掘削されており、地表と地中(井戸底)の双方に強震計が設置され、鉛直アレーを構成している。

表 2.2-1　1996 年以降の主な被害地震と長周期地震動の発生状況

地震名	地震諸元		長周期地震動の発生状況
	マグニチュード	震源深さ	
2000 年鳥取県西部地震	Mj 7.3, Mw 6.8	9km	大阪平野などで発生
2001 年芸予地震	Mj 6.7, Mw 6.8	46km	不明(発生を指摘している文献は見当たらない)
2003 年十勝沖地震	Mj 8.0, Mw 8.0	45km	勇払平野や石狩平野で発生
2004 年新潟県中越地震	Mj 6.8, Mw 6.7	12km	関東平野で発生
2007 年新潟県中越沖地震	Mj 6.8, Mw 6.7	17km	関東平野で発生
2008 年岩手宮城内陸地震	Mj 7.2, Mw 7.0	8km	宮城県仙北平野で発生
2011 年東北地方太平洋沖地震	Mw 9.0	24km	関東平野や大阪平野で発生

2.2.2 調査対象地域

既往の研究によれば、長周期地震動は平野部で観測されている場合が多く、平野端部で発生したラブ波やレーリー波などの表面波であることが指摘されている(たとえば、古村ほか(2004[12], 2007a[13]))。このため、調査対象地域は、調査対象論文で長周期地震動の発生が指摘されている平野であり、かつ長周期地震動の影響を大きく受ける超高層建物などが多いと考えられる関東平野、濃尾平野、大阪平野などとする。

工藤(2008)によると、「長周期の地震動を理解するためには少なくとも地震基盤(S 波速度～3km/s)までの地下構造が不可欠であるが、これまでに比較的情報が多いのは関東・大阪・濃尾などの平野に限られ、多くは良く分かっていない。」と述べられている。

平野の揺れやすい周期は、関東平野は 7～10 秒、濃尾平野は 3～4 秒、大阪平野は 4～6 秒である(福和(2013)[14])。これらの周期は、観測記録の応答スペクトルや表面波の分析などからわかっているものである。

検討対象とする地震に対して、地震諸元と地震のタイプおよび発生メカニズム、現時点までに文献調査で判明している表面波の有無と住宅被害の有無を表 2.2-2 に示す。モーメントマグニチュードと発生メカニズム(断層の動き方)は、気象庁から公表されている CMT 解によるものであり、地震のタイプ(プレート間地震、プレート内地震、内陸地殻内地震)は、地震本部の地震調査委員会や気象庁などからの公表資料に基づいている。

住宅被害については、長周期地震動が発生している地域と住宅被害が発生している地域を比較することにより、住宅被害が長周期地震動によるものかどうかについて、検討する必要がある。

表 2.2-2　検討対象地震に対する表面波と住宅被害の有無

地震名	地震諸元 地震タイプ 発生メカニズム	表面波の有無	住宅被害の有無 (長周期地震動によるものかどうかは不明)	出典
2000 年鳥取県西部地震	Mj 7.3, Mw 6.8 震源深さ 9km 内陸地殻内地震 横ずれ断層型	○:大阪平野などで観測	○:日野町や米子市で被害あり	久美田ほか(2002)[15]
2001 年芸予地震	Mj 6.7, Mw 6.8 震源深さ 46km プレート内地震 正断層型	△:表面波ありと指摘している文献は見当たらない	○：被害あり	内閣府 HP
2003 年 5 月 26 日宮城県沖の地震	Mj 7.0, Mw 7.0 震源深さ 82km プレート内地震 逆断層型	×:関東平野で観測されていない	△：不明	古村ほか(2012)[16]
2003 年十勝沖地震	Mj 8.0, Mw 8.0 震源深さ 45km プレート間地震 逆断層型	○:勇払平野と石狩平野で観測	○：日高、十勝、釧路地方などで被害あり	畑山ほか(2004)[17] 北原(2004)[18]
2004 年紀伊半島南東沖の地震	Mj 7.1, Mw 7.3 震源深さ 38km プレート内地震 逆断層型	○:関東平野、大阪平野および濃尾平野で観測	△：不明	古村ほか(2004) 赤澤(2005)[19] Miyake *et al.* (2005)[20]
2004 年新潟県中越地震	Mj 6.8, Mw 6.7 震源深さ 12km 内陸地殻内地震 逆断層型	○：関東平野で観測	○：被害あり	古村ほか(2004)
2004 年新潟県中越地震の余震(10 月 25 日)	Mj 5.8, Mw 5.7 震源深さ 15km 内陸地殻内地震 逆断層型	×:関東平野で観測されていない	△：不明	古村ほか(2004)

表 2.2-2　検討対象地震に対する表面波と住宅被害の有無（つづき）

地震名	地震諸元 地震タイプ 発生メカニズム	表面波の有無	住宅被害の有無 （長周期地震動によるものかどうかは不明）	出典
2004 年新潟県 中越地震の余震 （10 月 27 日）	Mj 6.1, Mw 6.0 震源深さ 12km 内陸地殻内地震 逆断層型	×：関東平野で観測されていない	△：不明	古村ほか （2004）
2005 年 8 月 16 日 宮城沖の地震	Mj 7.2, Mw 7.1 震源深さ 42km プレート間地震 逆断層型	×：同上	△：不明	古村ほか （2012）
2007 年新潟県 中越沖地震	Mj 6.8, Mw 6.7 震源深さ 17km 内陸地殻内地震 逆断層型	○：関東平野で観測	○：被害あり	古村ほか （2007a）
2008 年岩手 宮城内陸地震	Mj 7.2, Mw 7.0 震源深さ 8km 内陸地殻内地震 逆断層型	○：宮城県仙北平野で観測	○：被害あり	片岡（2011）[21] 内閣府 HP
2011 年東北地方 太平洋沖地震	Mw 9.0 震源深さ 24km プレート間地震 逆断層型	○：関東平野や大阪平野で観測 *1	○：被害あり*2	*1 植竹（2012）[22] *2 肥田ほか （2012）[23]

2.2.3　長周期地震動の発生状況に関する既往文献

(1)　2003 年十勝沖地震

1)　平野規模の地盤構造の影響

畑山ほか(2004)は、2003 年十勝沖地震において石狩平野と苫小牧地域をかかえる勇払平野が大きな長周期地震動に見舞われたことを示し、その成因について考察している。震源から勇払平野に至る K-NET の観測点(図 2.2-1)における加速度波形を積分して速度波形(0.05～0.5Hz)にしたものを図 2.2-2 に示す。勇払平野南東端の門別(K-Monbetsu)から振幅の増大と継続時間の伸長傾向が始まり、苫小牧(K-Tomakomai)と千歳(K-Chitose)で大振幅かつ継続時間の長い長周期地震動となる。これらの現象は平野手前では発生しておらず、勇払平野の地下構造の影響を受けたものと考えられると述べている。勇払平野には、図 2.2-3 に示すように関東平野、大阪平野と同様に厚い堆積層が存在することがわかる。

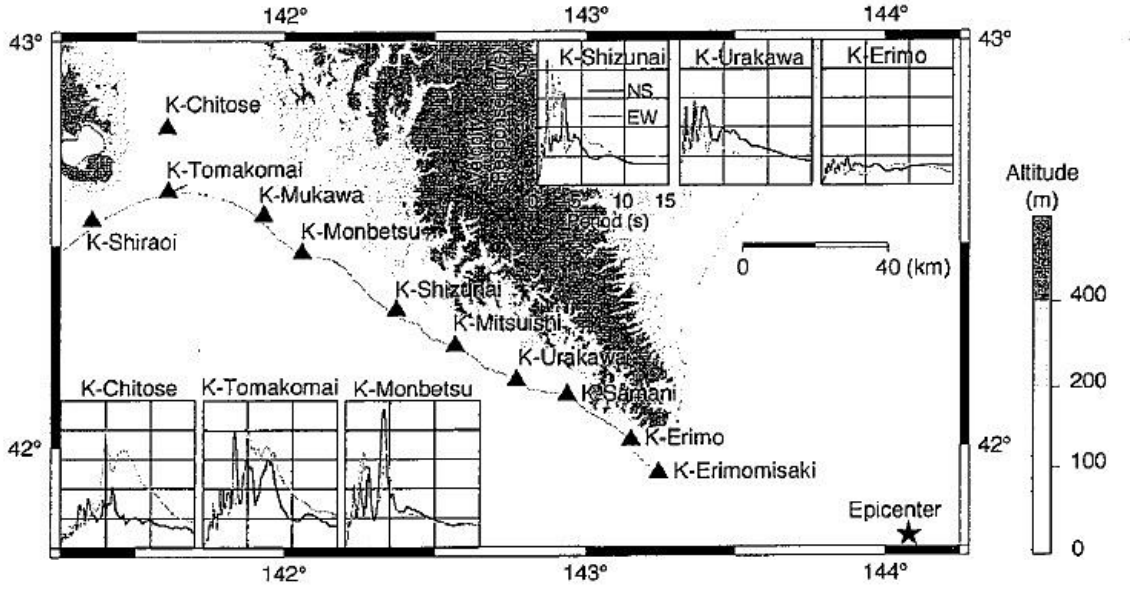


図 2.2-1　2003 年十勝沖地震の震源(星印)と勇払平野

(畑山ほか(2004)Fig.5 より)

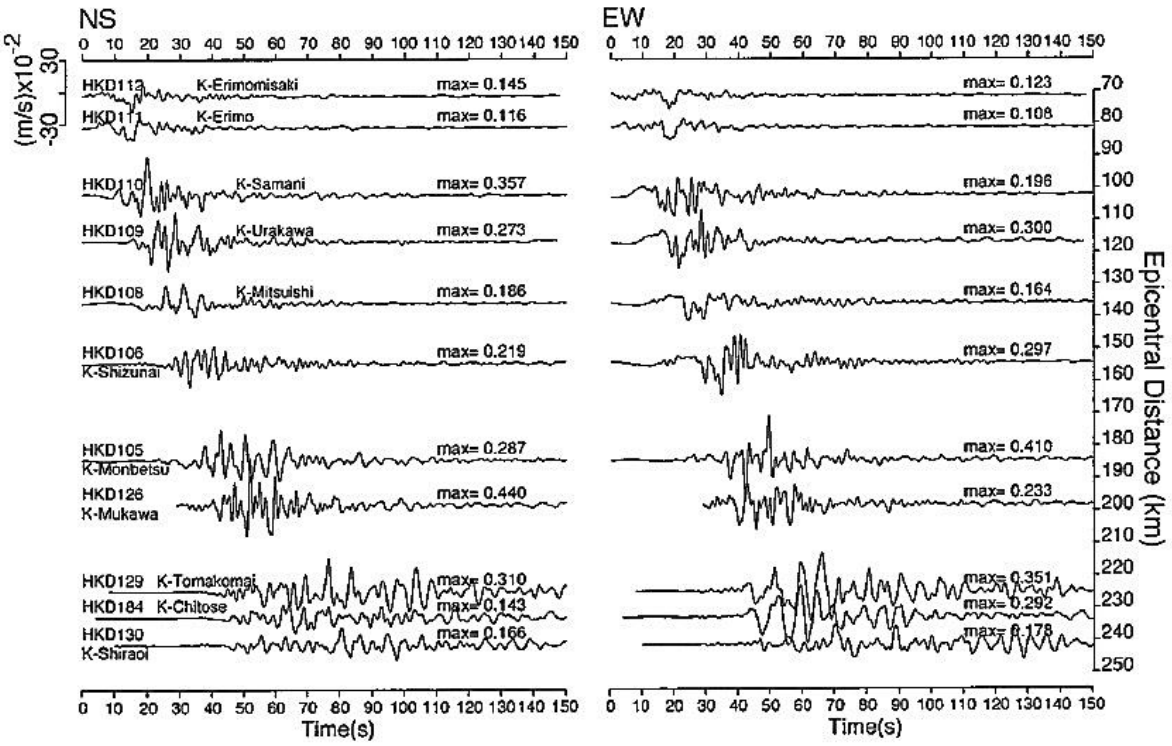


図 2.2-2　2003 年十勝沖地震の震源から勇払平野で観測された速度波形
（畑山ほか(2004) Fig.6 より）

北海道における基盤の上面深さの分布を図 2.2-3 に、2003 年十勝沖地震による周期 10 秒の速度応答スペクトルの空間的な分布を図 2.2-4 に示す。勇払平野では基盤の上面深さが深く、速度応答も大きくなっていることがわかる。

図 2.2-4 においては、襟裳岬よりも東側においても速度応答が大きくなっている。前田ほか(2006)[24]は、2003 年十勝沖地震による最大地動加速度と最大地動速度の空間分布と距離減衰関係について検討している。前田ほか(2006)による最大加速度と最大速度の分布を図 2.2-5 に示す。図中の☆は、ハーバード大学の CMT 解による震央位置を示している。また、最大地動加速度・最大地動速度と断層からの距離との関係を図 2.2-6 に示す。図では、火山フロント前弧側のデータを●、背弧側のデータを○で表している。また、実体波と表面波に対する幾何減衰による距離減衰関係も示されており、最大地動速度は 200km 付近を境として距離減衰の傾きが変化し、近距離では実体波の傾き（$1/\sqrt{R}$、R は断層からの距離）、遠距離では表面波の傾き（$1/\sqrt{R}$）に近い傾向を確認することができる。さらに、速度波形の解析から、近地(～150km まで)では S 波が、遠地では周期約 20 秒のレーリー波が最大地動速度を与えていることを明らかにしている。

なお、襟裳岬よりも東側の海岸線近くの観測点は近地に相当するため、速度応答が大きくなっている理由としては、震源から放出された S 波の長周期成分による影響を受けている可能性がある。

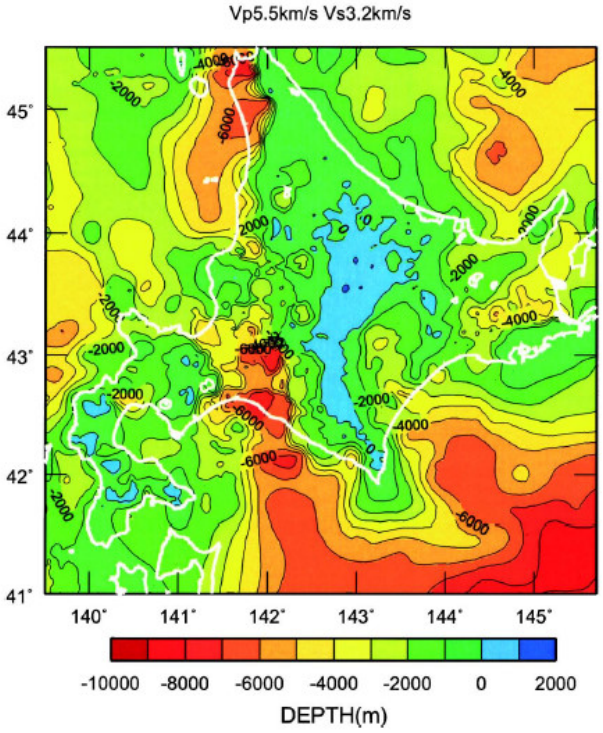


図 2.2-3　北海道における基盤の上面深さ

（笹谷ほか(2006) Fig.8 より）

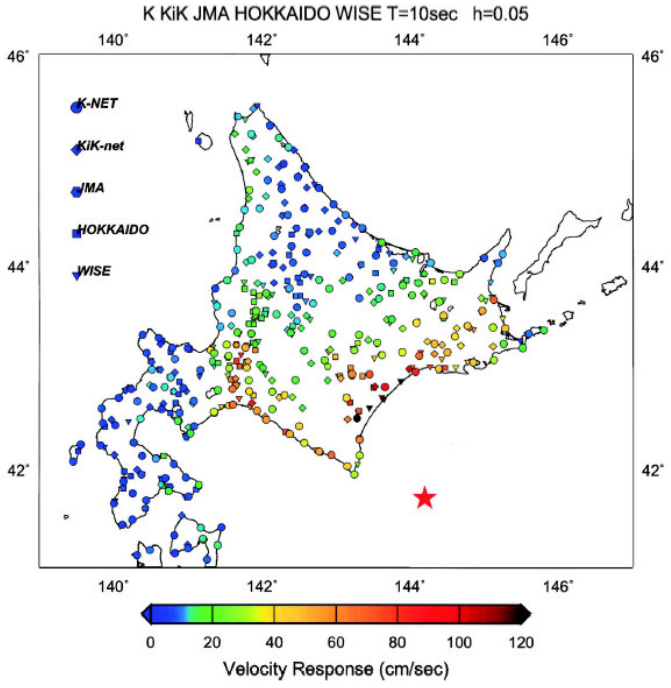


図 2.2-4　2003 年十勝沖地震における周期 10 秒の速度応答の空間分布

（笹谷ほか(2006) Fig.9 より）

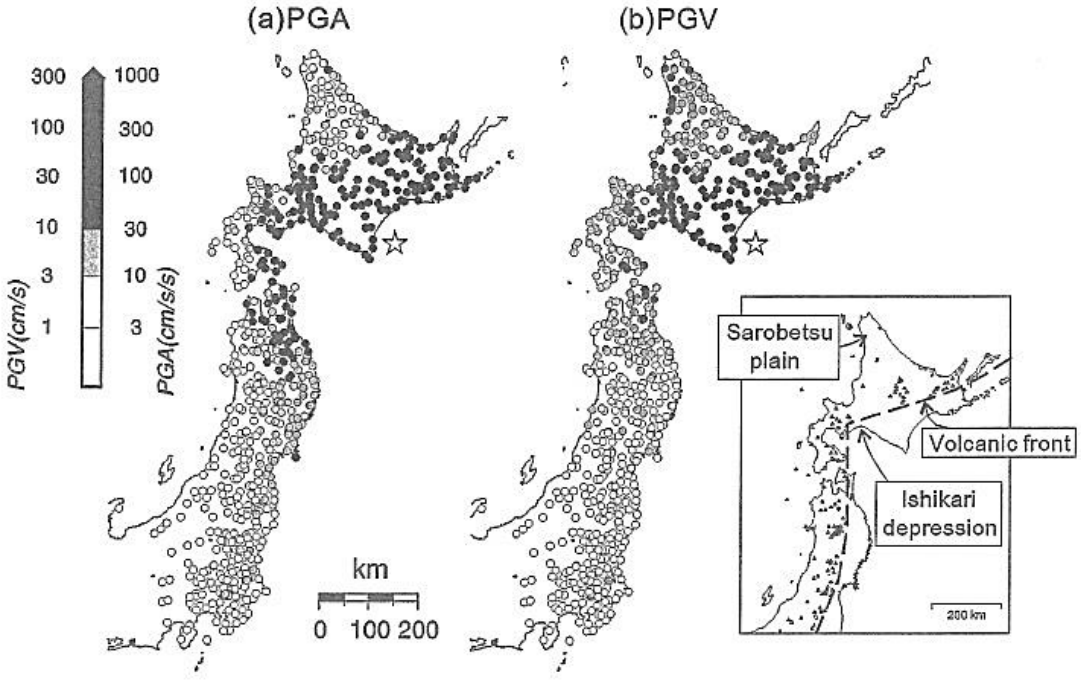


図 2.2-5　2003 年十勝沖地震における最大加速度(a)と最大速度(b)の分布

（前田ほか(2006) Fig.8 より）

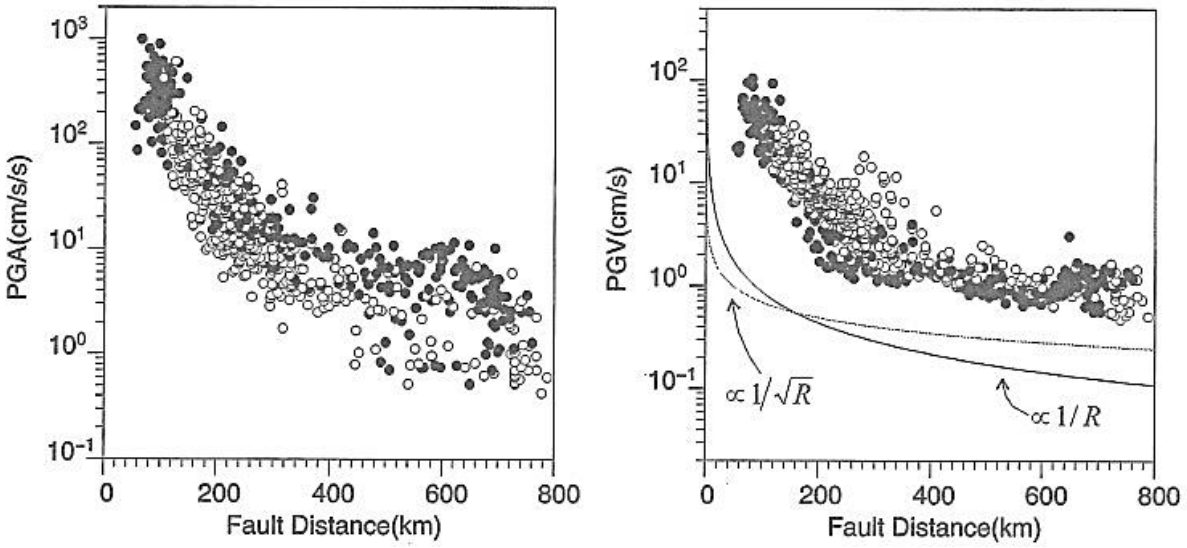


図 2.2-6　2003 年十勝沖地震における最大加速度・最大速度の距離減衰特性

（前田ほか(2006) Fig.9 より）

(2) 2004 年新潟県中越地震と 2007 年新潟県中越沖地震

1) 震源特性の影響

2004 年新潟県中越地震と 2007 年新潟県中越沖地震においては、関東平野で周期 7 秒前後の長周期地震動が観測されている(古村ほか(2004, 2007a))。これらの地震の気象庁マグニチュード Mj は 6.8 であり、震源深さはそれぞれ 12km、17km と浅い。

2004 年新潟県中越地震の 10 月 25 日の余震(Mj 5.8、Mw 5.7、震源深さ 15km)と 10 月 27 日の余震(Mj 6.1、Mw 6.0、震源深さ 12km)では、関東平野において長周期地震動が観測されたという報告はない。

古村ほか(2007a)は、周期 10 秒を超えるような長周期の地震波は,コーナー周期が 10 秒を超える Mw 7 以上の大地震ではじめて震源から強く放出され, Mw 7 以下の中小地震からの放射はとても小さいと述べている。

このことから、コーナー周期が 7 秒となる Mw はおよそ 6.5 であるため、これらの余震では関東平野において長周期地震動が生成されなかったと考えられる。

2) 伝播経路の影響

伝播経路については、古村ほか(2007b)[25]によると、2004 年新潟県中越地震と 2007 年新潟県中越沖地震において長周期地震動が生成した原因として、熊谷から高崎付近の地下で、基盤岩が溝のように深くなっている地下構造があるために、ここを通って地震波が平野へとよく伝わってきた可能性があると述べられている。

また、産業技術総合研究所のホームページ(産総研(2005)[26])では、新潟から関東を結ぶエリアにはハーフグラーベン(半地溝)を埋め尽くす厚い堆積層があると述べられている。

ハーフグラーベンについては、産総研(2005)において以下のように説明されている。

「地殻が水平方向に引っぱられると、正断層に区切られたブロックが傾きつつ全体として水平方向に延びていく。このときブロックとブロックの間には三角形の凹みが形成され、その凹んだ部分は堆積物により埋め尽くされる(図 2.2-7)。このように、片側を正断層で区切られたブロックが傾きつつ凹んだ部分をハーフグラーベン(半地溝)と呼ぶ。ちなみに両側を正断層で区切られたものはグラーベン(地溝)とされる。ブロックが傾く方向の断面では、堆積層は扇状の形態を示す。」

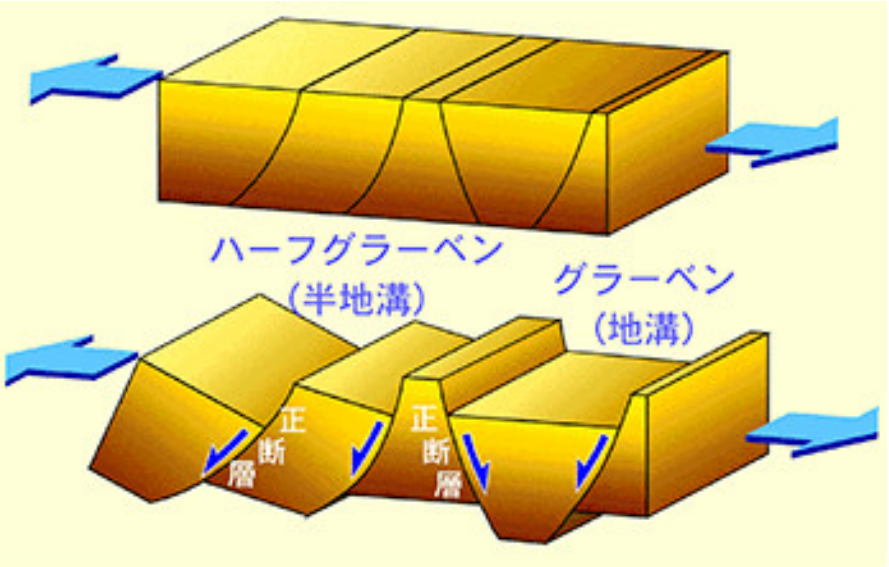


図 2.2-7　グラーベンおよびハーフグラーベンの形成過程概念図
(産総研(2005)図 8 より)

3)　平野規模の地盤構造の影響

K-NET の観測記録を分析した古村(2004)から、2004 年新潟県中越地震の際に関東平野で観測された周期 7 秒前後の長周期地震動は、群馬・埼玉県境付近で生成されたレーリー波やラブ波、すなわち表面波であることが確認できる。

関東平野の 3 次元基盤構造として、基盤深度分布と基盤構造の 3 次元表示を図 2.2-8 に示す。また、2007 年新潟県中越沖地震による最大加速度分布と最大変位分布を図 2.2-9 に示す。古村ほか(2007a)では、関東平野では、平野の中心部である東京湾から千葉県中部にかけての地下で堆積層が最大 4000～6000m 以上と厚くなっており、周期 7～12 秒以上の表面波が強く発達すると述べられている。また、図 2.2-9 の最大変位分布を見ると、長周期地震動を生成した関東平野全体にわたって 1～5cm の大きな地動が生成されており、大きな地動が観測された領域は、関東平野の基盤深度の形状とよく一致していることを指摘している。

最大変位が大きい領域は、Mamula *et al.* (1984)による周期 3 秒～10 秒の周期ごとの揺れやすさ分布と比較的対応している。

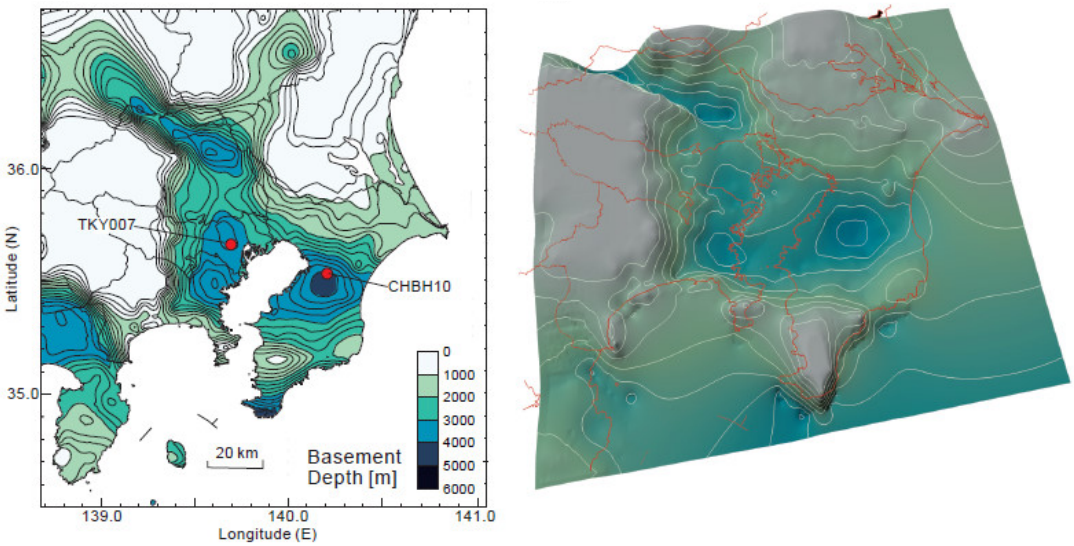


図 2.2-8　関東平野の 3 次元基盤構造
（古村ほか(2007a) 図 3 より）

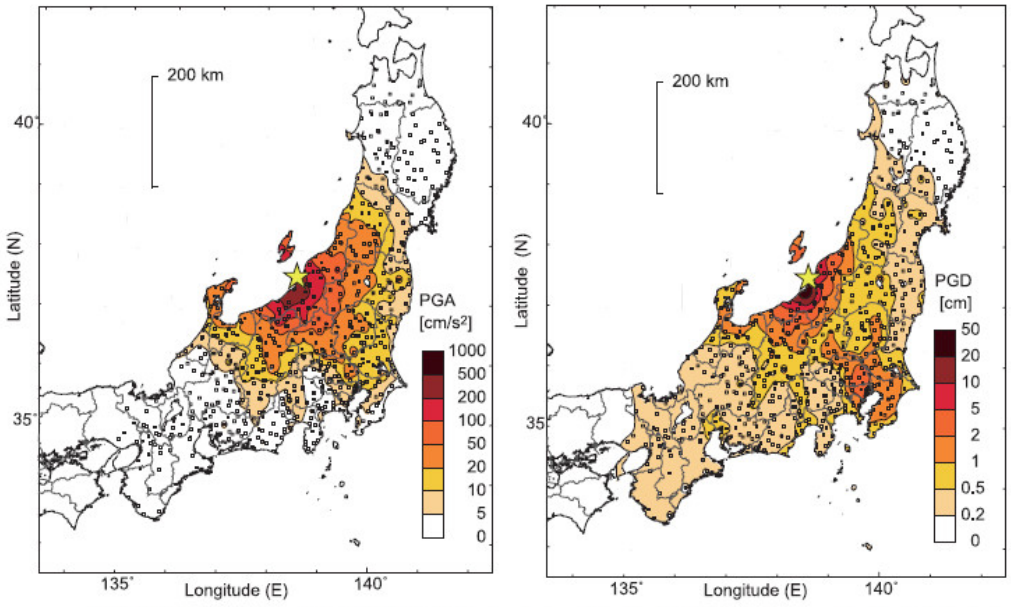


図 2.2-9　2007 年新潟県中越沖地震による最大加速度分布(左)と最大変位分布(右)
(古村ほか(2007a) 図 4 より)

古村ほか(2007a)は、2007 年新潟県中越沖地震における K-NET と KiK-net の 696 地点における加速度記録を積分して速度波形を算出し、観測点間の地動を線形補間して各時刻の地動の空間分布を求め、地震の揺れが広がる様子を可視化画像で示している。関東平野に入射した地震波は、平野の地下を覆う厚い堆積層で強く増幅され、平野全体にわたって大きく長く揺れたことがわかる。特に、都心部の揺れは大きく、3 分以上にわたって長く揺れ続けたことがわかると述べられている。

また、関東平野において長時間にわたって大きく揺れ続けた地震波の特徴とその生成・伝播過程を確認するために、震源から関東平野に向けて北北西―南南東に並んだ 9 観測点の速度波形(EW 成分)を図 2.2-10 のように調べている。各観測点の速度波形は最大振幅で正規化してあり、地動の最大振幅は波形の右上に表示されている。震源から放射された P 波と S 波は、それぞれ約 5km/s と 3km/s の速度で震源から関東平野へと伝わり、そして S 波が関東平野の北端の基盤岩／堆積層境界に入射すると、長周期の表面波が生成したことがわかると指摘している。

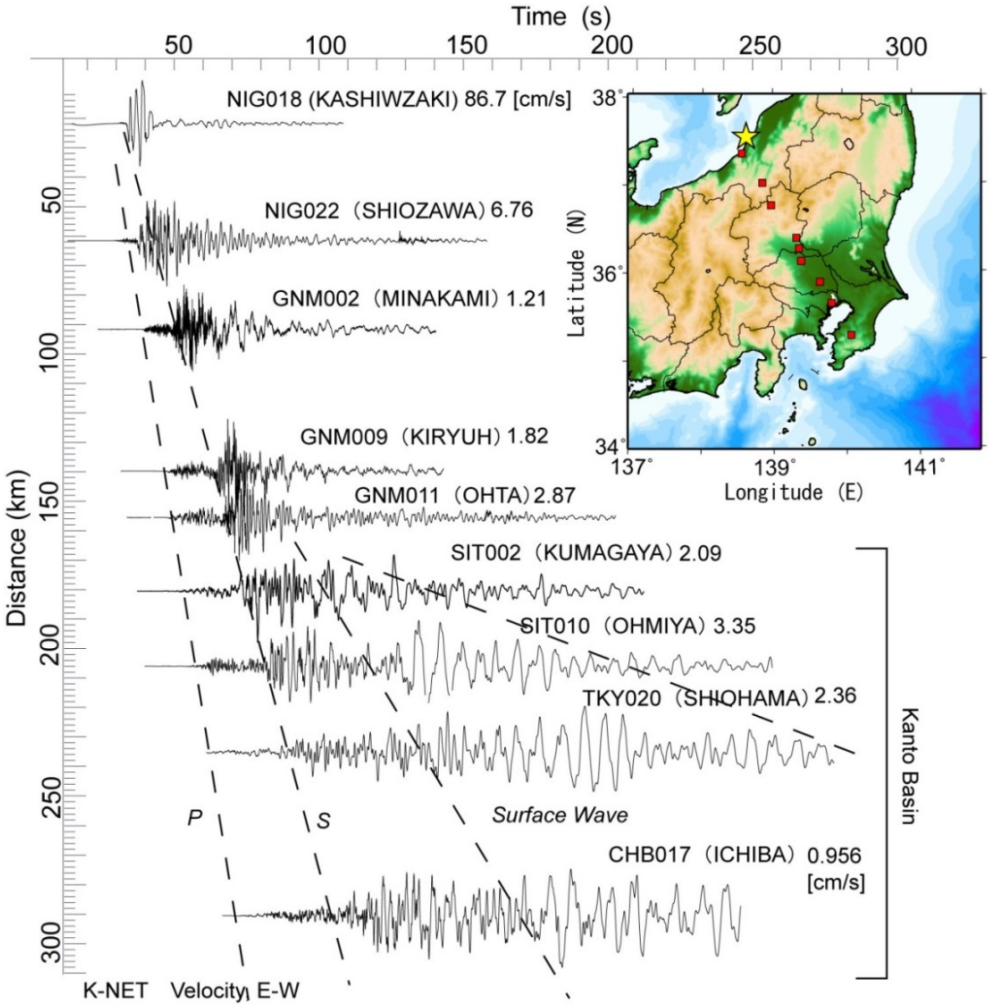


図 2.2-10　2007 年新潟県中越沖地震における観測速度波形

(http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/people/furumura/lp/lp.html より)

(3) 2003 年 5 月 26 日の宮城県沖の地震と 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震

1) 震源特性の影響

2003 年 5 月 26 日の宮城県沖の地震(Mj 7.0、震源深さ 82km)と 2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震(Mj 7.2、震源深さ 42km)では、表面波がほとんど励起されていない。古村ほか(2012)は、この原因として以下の 2 点を挙げている。

i) 震源が深く、表面波の励起が小さいこと
ii) 関東平野への S 波の入射角が小さいために堆積層内での全反射と表面波への変換が起きにくいこと

さらに、シミュレーションにより震源深さが表面波の励起に与える影響についても調べており、震源深さが 20km では表面波の振幅は S 波の振幅と同程度であり、震源深さが 40km 以深では表面波の振幅がほとんど認められなくなると述べている。また、震源が浅い M 7 クラスの宮城県沖の地震が起きた場合には、関東平野において強い表面波の励起と長周期の応答が起きることが予想されると指摘している。

(4) 2004 年紀伊半島南東沖の地震

1) 震源特性の影響

2004 年紀伊半島南東沖の地震(Mj 7.1、震源深さ 38km)では、関東平野と大阪平野および濃尾平野において長周期地震動が観測されている。この地震による震度分布と最大地動変位分布を図 2.2-11 に示す。

図から、関東平野において最大地動変位が大きくなっていることがわかる。これについて古村ほか(2012)は、震源深さは 38km と浅くはないが、伝播経路の影響が大きいと指摘している。

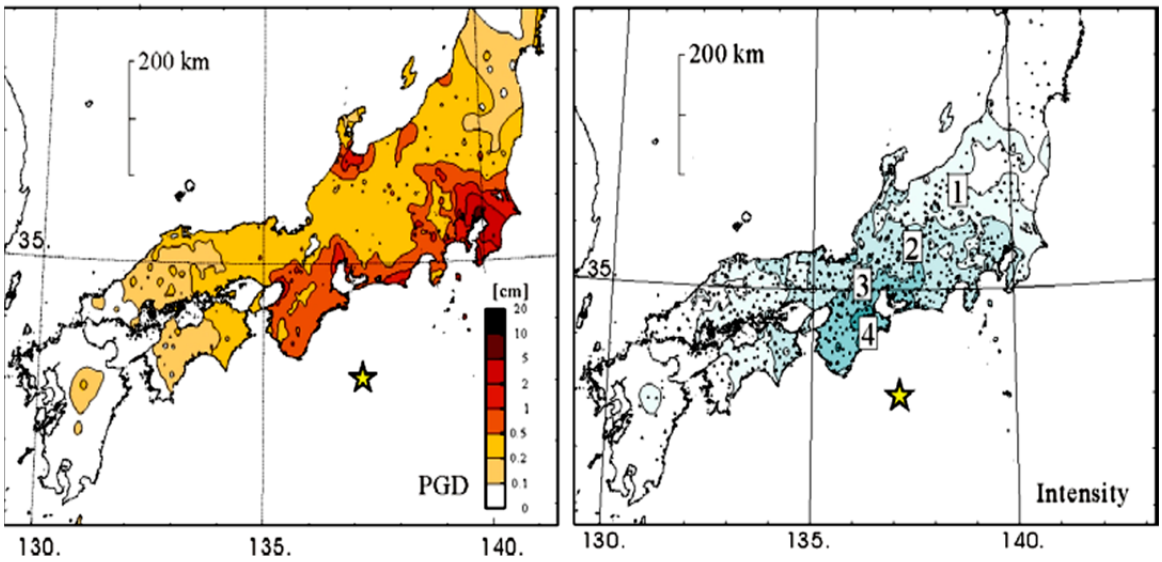


図 2.2-11　2004 年 9 月 5 日紀伊半島南東沖の地震の震度分布(右)と最大地動変位(左)
(古村ほか(2012)図 3 より)

2)　伝播経路の影響

古村ほか(2012)は、長周期地震動が生成された要因として、「フィリピン海プレートの上面に厚く(5～10km)堆積した低速度の付加体の存在が大きい。この厚い Low-*V*表層に沿って伝播することにより、長周期の表面波がよく発達する。」と述べている。Low-*V* は低速度を意味する。付加体の分布と観測された地震動波形を図 2.2-12 に示す。

付加体※とは、海洋プレートが沈み込むときに、海溝にたまった土砂とともに大陸側に押しつけられてはぎ取られた地質体のことをいう(産業技術総合研究所 地質調査総合センターHP より)。

※「付加帯」という用語が用いられることがあるが、本報告書では「付加体」を採用している。

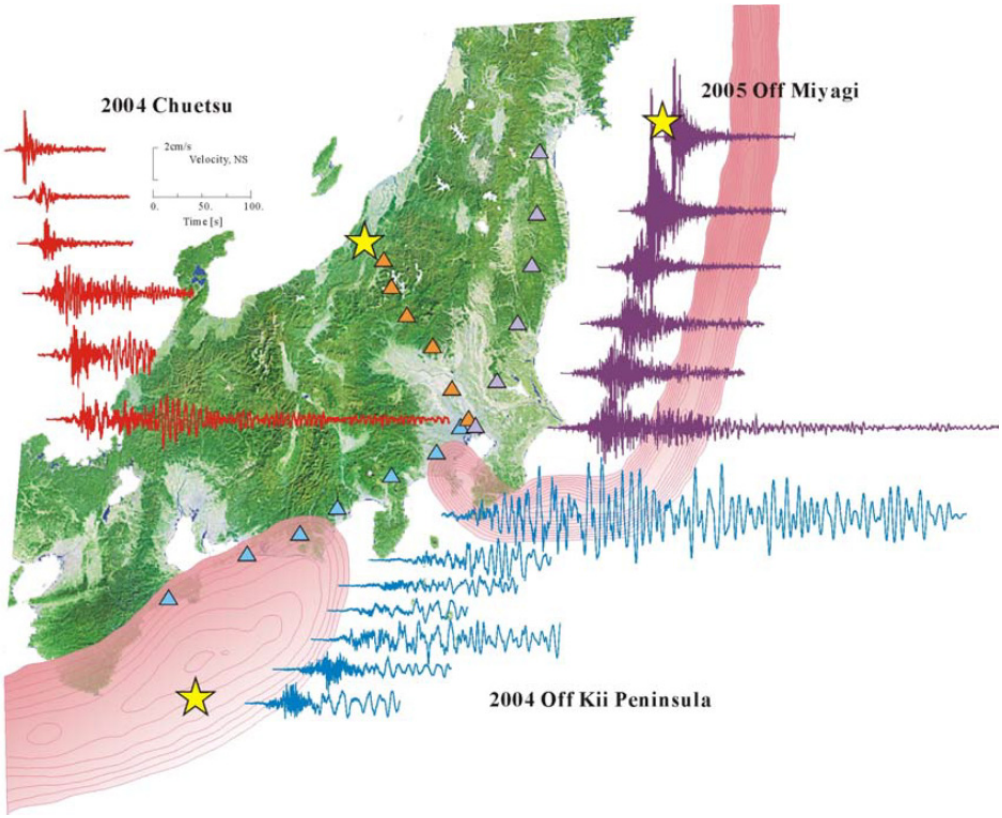


図 2.2-12　2005 年宮城県沖の地震、2004 年新潟県中越地震
および 2004 年紀伊半島南東沖の地震の地震波の伝播
（ピンク色のコンターは海洋プレート上面の付加体堆積物の厚さ）
(古村ほか(2012)図 4 より)

3) 平野規模の地盤構造の影響

赤澤(2005)は、大阪平野で観測された地震記録の応答スペクトル特性として周期5～6秒のやや長周期域が卓越している点、非定常スペクトルの分析から波群の伝播速度がラブ波の群速度に良く対応している点、また震源が南東方向であるのに対してこの波群が東南東から到来している点を踏まえて、これらは生駒の堆積層境界で生成されたラブ波と考えられると述べている。

Miyake *et al.* (2005)は、2004 年紀伊半島沖南東沖地震による大阪平野と濃尾平野および関東平野における長周期地震動について調べている。図 2.2-13 は、伊豆半島から関東平野の観測地点における加速度波形の EW 成分を示したものであり、波形は各観測点における最大値で基準化して示されている。この図から、関東平野の外側では加速度波形には明瞭な長周期成分は見られないが、関東平野内の神奈川、東京、千葉の観測点では長周期成分が観測されていることがわかる。また、関東平野の外側の SZOH41 地点の加速度波形を積分して速度波形を求めると、長周期成分が含まれていることがわかる。この成分は震源あるいは伝播経路において生成されたものであり、震源と伝播経路の影響によるこの長周期成分が盆地へ入力し、盆地生成表面波がよく生成されていると述べられている。

2004 年紀伊半島沖南東沖地震と同じように震源が浅く、大きな海溝型地震である 2003 年十勝沖地震においても盆地生成表面波が観測されている(Koketsu *et al.* (2005)[27])。

減衰 5%の周期別の擬似速度応答スペクトルは、大阪平野と濃尾平野では周期 5 秒～7 秒、関東平野では周期 7 秒～10 秒が大きくなっている。一例として、周期 7 秒の擬似速度応答スペクトル分布を図 2.2-14 に示す。御前崎においては周期 5 秒、7 秒および 10 秒の擬似速度応答スペクトルが大きくなっており、この点について、Miyake *et al.*(2005)は、御前崎から海側にかけての領域は S 波速度が小さい厚い堆積層が存在していることが影響していると指摘している。図中の紫色の部分は、海底地形を表していると記述されている。

次に、擬似速度応答スペクトルのコンターと堆積層の厚さを比較したもの図 2.2-15 に示す。(a)と(b)は、それぞれ濃尾平野と大阪平野における周期 5 秒の擬似速度応答のコンターと堆積層の厚さの色分け表示を重ねて示したものである。(a)の濃尾平野においては、両者の対応関係が比較的明瞭であり、擬似速度応答が 4cm/s 以上となっている領域の堆積層厚さは約 0.5km 以上となっていることがわかる。(b)の大阪平野においては、両者の対応関係は必ずしも明瞭ではないが、堆積層厚さが約 0.5km 以上の領域は擬似速度応答が概ね 6cm/s 以上となっている。(c)は、関東平野における周期 7 秒の擬似速度応答のコンターと堆積層の厚さの色分け表示を重ねて示したものである。濃尾平野と同じように擬似速度応答が 4cm/s 以上の領域は色が表示されている厚い堆積層の領域と概ね対応している。しかし、堆積層が最も深い部分と擬似速度応答がピークとなる領域は対応していない。これは、長周期地震動による大きな擬似速度応答が厚い堆積層だけでなく、表層の S 波速度の小さい層の影響も受けるためと考察を加えている(Miyake *et al.*(2005))。

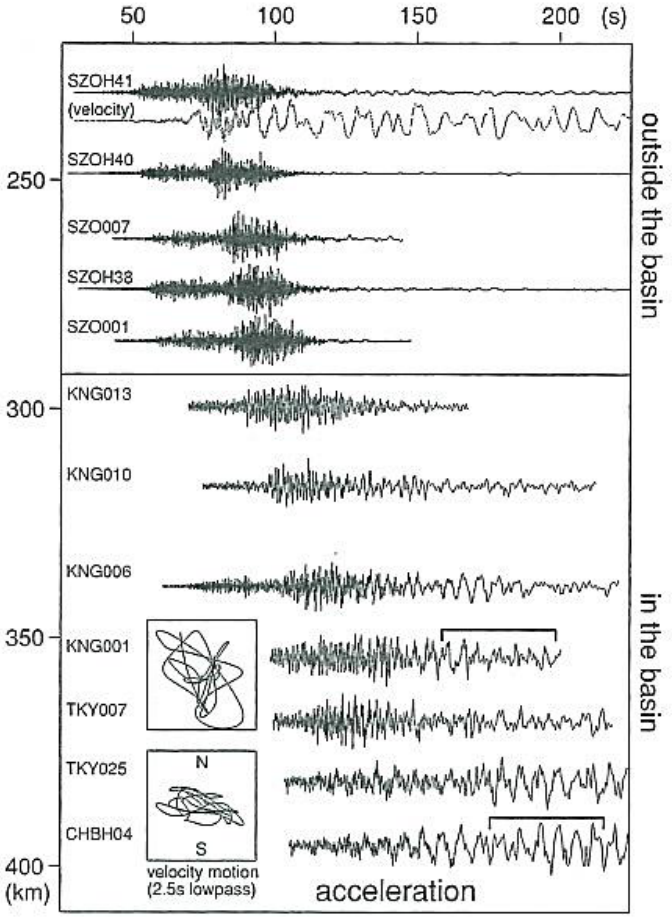


図 2.2-13　観測された加速度波形の EW 成分

(Miyake *et al.* (2005) Fig.2 より)

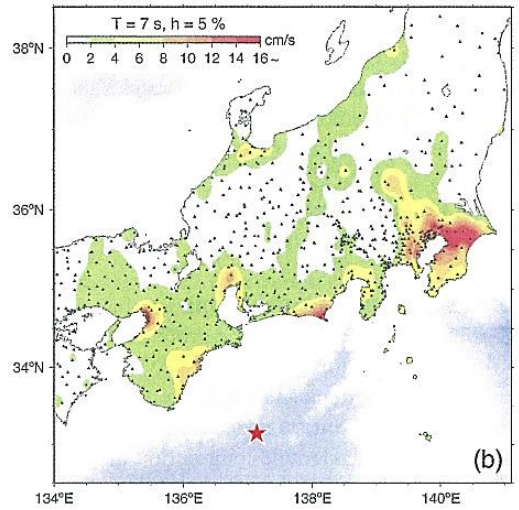


図 2.2-14　減衰 5%の擬似速度応答スペクトル分布の一例（周期 7 秒）

(Miyake *et al.* (2005)Fig.3 より)

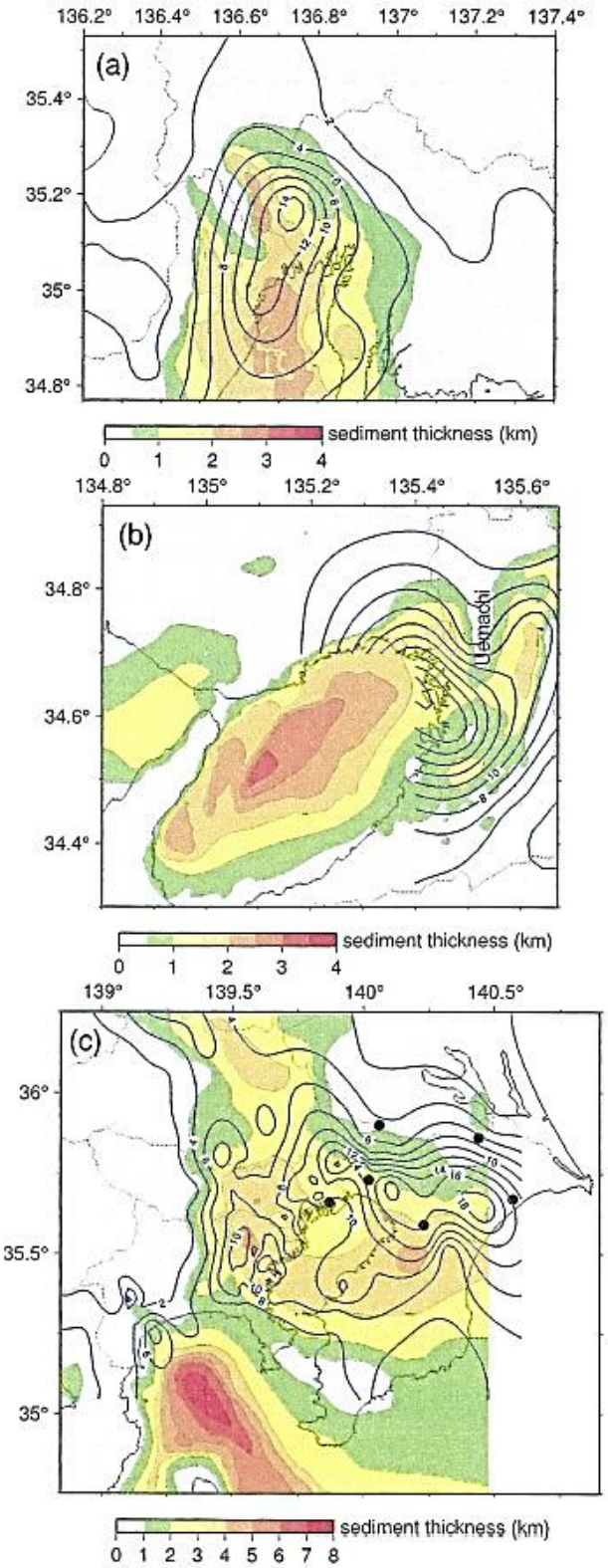


図 2.2-15　擬似速度応答スペクトルの分布と堆積層の厚さ
(Miyake *et al.* (2005) Fig.4 より)

(5) 2011 年東北地方太平洋沖地震

1) 震源特性の影響

植竹(2012)は、2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された東京湾岸の長周期地震動について分析を行っている。検討には、東京電力による東京湾岸の広帯域地震観測点における観測記録を用いている。また、各観測点の最大加速度、最大速度、および最大変位を表 2.2-3 に示す。植竹(2012)は、本震の速度応答スペクトル形状には、周期 5～10 秒の範囲で顕著なピークが見られないことを指摘している。

津野ほか(2012)[28]は、2011 年東北地方太平洋沖地震における本震と余震の計 12 地震について、MeSO-net, K-net, KiK-net 等の約 680 地点の観測記録を用い、首都圏およびその周辺地域における長周期地震動の特性について分析を行っている。関東平野で観測された本震の減衰 5%の擬似速度応答スペクトルを周期 2 秒、3 秒、5 秒、8 秒、10 秒、12 秒について調べると、特に周期 5 秒以上の地震動では地震規模(Mw 9.0)から想定されるほどの大きさを持っていなかったと指摘している。

表 2.2-3　各観測点の最大加速度・最大速度・最大変位　(植竹(2012)表 2 より)

	加速度(cm/s/s)			速度(cm/s)			変位(cm)		
観測点	NS	EW	UD	NS	EW	UD	NS	EW	UD
常陸那珂(HTN)	281.7	329.3	279.2	42.5	52.5	20.0	64.7	74.3	47.3
鹿島(KSM)	434.2	344.9	172.8	48.0	40.6	12.8	42.7	46.2	31.4
千葉(CHB)	99.0	126.4	46.4	29.8	26.9	12.5	63.6	50.7	40.0
五井(GOI)	106.4	87.1	60.7	27.2	29.4	11.7	62.2	54.8	42.1
姉崎(ANG)	85.9	60.9	38.8	22.6	22.8	12.5	53.4	53.8	36.8
袖ヶ浦(SDG)	114.4	118.7	34.0	29.1	26.1	11.2	54.3	54.5	38.0
富津(FUT)	87.7	97.4	33.1	18.6	27.5	13.0	43.4	59.7	30.3
品川(SNG)	78.3	101.9	44.9	24.2	22.1	13.8	49.7	48.8	37.5
大井(OOI)	108.4	147.8	52.7	36.3	29.9	14.2	47.4	54.3	38.2
川崎(KWS)	102.2	108.4	35.1	46.9	32.5	11.1	58.4	51.0	37.5
東扇島(HOG)	142.7	136.0	45.3	46.9	32.1	11.8	53.2	53.1	36.2
研究所(RDC)	94.9	93.0	34.9	22.6	19.0	10.8	47.1	50.5	34.2
横浜(YKH)	86.1	84.5	43.0	19.4	26.5	10.1	52.3	49.9	33.2
南横浜(MYK)	91.3	79.8	45.3	22.6	20.2	9.9	52.4	48.6	29.3
横須賀(YKS)	37.2	37.2	38.9	15.8	15.9	8.3	35.9	57.9	22.4

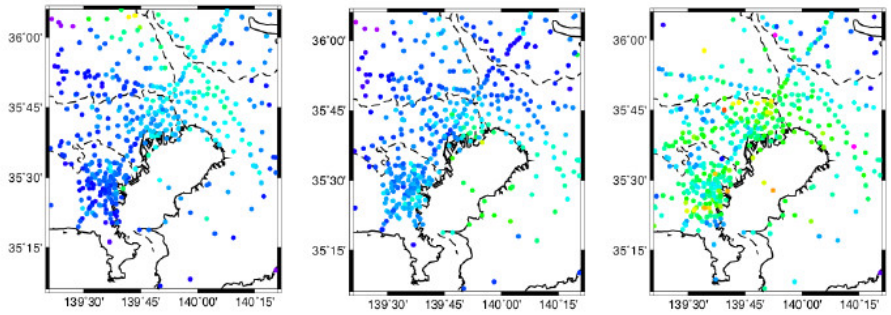
2)　平野規模の地盤構造の影響

植竹(2012)は、2011 年東北地方太平洋沖地震の本震およびその前震・余震、および長野県北部の地震で観測された東京湾岸の長周期地震動について分析を行い、震源位置により長周期地震動の励起が異なることを確認している。本震の速度応答スペクトル形状には、周期 5～10 秒の範囲で顕著なピークが見られなく、宮城県沖～茨城県沖で発生した前震・余震でも同様の傾向にあるが、一方で長野県北部の地震では周期 5～7 秒の卓越が見られていることを指摘している。

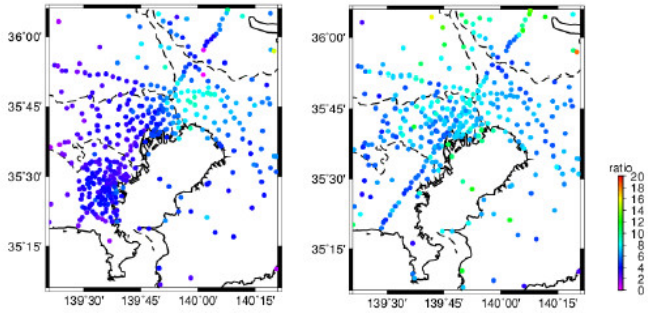
津野ほか(2012)は、観測記録から震源特性と伝播経路特性を取り除いたサイト地盤増幅特性と震源位置との関係について調べている。検討対象とした地震は、2011 年東北地方太平洋沖地震の本震と余震、長野県北部地震、茨城県沖地震、静岡県東部地震、福島県浜通り地震および福島県沖地震である。サイト増幅特性は、地震基盤の地震記録により地表面の地震記録を除することにより求めている。首都圏およびその周辺地域における減衰 5%の擬似速度応答スペクトル比の分布の一例として、周期 3 秒のものを図 2.2-16 に示す。また、首都圏およびその周辺地域における本震の減衰 5%の擬似速度応答スペクトル比の分布の一例として、周期 3 秒のものを図 2.2-17 に示す。

この分析により、首都圏へ入力される周期 3 秒以上の地震動に対しては、サイト増幅特性が観測点と震源の方位に依存することを明らかにしている。特に、周期 5 秒と 8 秒では長野県北部地震によるサイト増幅特性が大きく、周期 3 秒と 8 秒では静岡県東部地震のサイト増幅特性が大きくなっている。また、本震による首都圏およびその周辺地域のサイト増幅特性は、首都圏に対して方位が同じである福島県浜通り地震と福島県沖地震に類次しており、長野県北部地震や静岡県東部地震ほど大きくないことを示している。

なお、関東平野におけるサイト増幅特性の方位依存性については、関東平野に入射した長周期地震動が地下速度構造の水平方向に対する不均質性により増幅効果の影響を受けることで解釈可能であると考えられると述べられている。

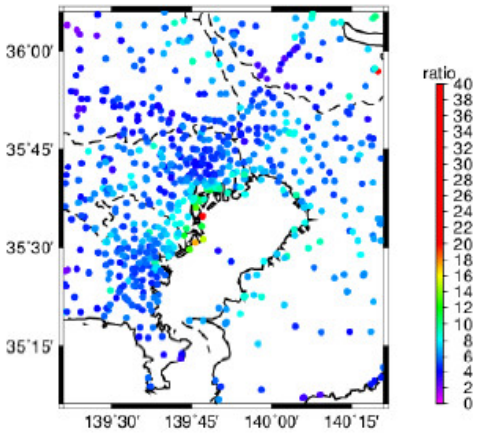


(a) 長野県北部地震（Mj 6.7）(b) 茨城県沖地震（Mj 6.4）(c) 静岡県東部地震（Mj 6.4）



(d) 福島県浜通り地震（Mj 6.4）(e) 福島県沖地震（Mj 6.5）

図 2.2-16　首都圏およびその周辺地域における
減衰 5%の擬似速度応答スペクトル比の分布
（周期 3 秒）（津野ほか（2012）図 11 より）



(a) 周期 3 秒

図 2.2-17　首都圏およびその周辺地域における
本震の減衰 5%の擬似速度応答スペクトル比の分布
（周期 3 秒）（津野ほか（2012）図 17 より）

(6) まとめ

長周期地震動の発生状況に関する既往文献のまとめを表 2.2-4 に示す。

表 2.2-4　文献調査による長周期地震動の観測状況

地震名	地震諸元	伝播経路	長周期地震動の観測状況ほか	出典
2003 年十勝沖地震	Mj8.0, Mw 8.0 震源深さ 45km	―	・勇払平野と石狩平野で観測されている。	畑山ほか (2004)
2004 年紀伊半島南東沖の地震	Mj 7.1, Mw 7.3 震源深さ 38km	Low-V (低速度) の付加体あり	・関東平野と大阪平野および濃尾平野で観測されている[1*]。 ・大阪平野と濃尾平野では周期 5 秒～7 秒、関東平野では周期 7 秒～10 秒の擬似速度応答スペクトルが大きい[2*]。	[1*]古村ほか (2012) 赤澤(2005) [2*]Miyake *et al.* (2005)
2004 年新潟県中越地震	Mj 6.8,Mw 6.7 震源深さ 12km	ハーフグラーベンを埋め尽くす厚い堆積層あり[1*]	・関東平野における周期 7 秒前後の長周期地震動は、群馬・埼玉県境付近で生成された表面波(ラブ波とレーリー波)である[2*]。	[1*]産総研 (2005) [2*]古村ほか (2004)
2004 年新潟県中越地震の余震 (10 月 25 日)	Mj 5.8, Mw 5.7 震源深さ 15km	同上	・関東平野で観測されていない。 ・周期 7 秒は Mj 6.5 のコーナー周期に相当するため、これ以上の地震で長周期地震動が強く励起されると考えられる。	古村ほか (2007a)
2004 年新潟県中越地震の余震 (10 月 27 日)	Mj 6.1, Mw 6.0 震源深さ 12km	同上	同上	同上
2005 年 8 月 16 日の宮城沖の地震	Mj 7.2 Mw 7.1 震源深さ 42km	伝播経路での長周期地震動の生成は、2004 年紀伊半島南東沖の地震に比べずっと小さい	・関東平野で観測されていない。 ・震源が深く表面波の励起が小さかった点と S 波の入射角が小さかった点が原因と考えられる。 ・シミュレーションでは、震源深さが 40km 以深では表面波の振幅がほとんど認められなくなる。 ・浅い M7 クラスの地震が起きた場合には、関東平野において強い表面波の励起と長周期の応答が起きることが予想される。	古村ほか (2012)

表 2.2-4　文献調査による長周期地震動の観測状況（つづき）

地震名	地震諸元	伝播経路	長周期地震動の観測状況ほか	出典
2007 年新潟県中越沖地震	Mj6.8 Mw 6.7 震源深さ 17km	ハーフグラーベンを埋め尽くす厚い堆積層あり [1*]	・関東平野の中心部で観測されている周期 7 秒前後の長周期地震動は、関東平野の北側の端部でＳ波から生成されたレーリー波である [2*]。 ・Mj6.5 から 7 以上では、周期 7 秒前後の長周期地震動が効率的に生成されるが、Mj6.5 未満では長周期地震動は生成されない [2*]。	[1*]産総研(2005) [2*]古村ほか(2007a)
2011 年東北地方太平洋沖地震の本震と余震	Mw 9.0 震源深さ 24km (本震)	―	・関東平野で観測された本震の長周期地震動は大きかったが、周期 5 秒以上の地震動では地震規模(Mw 9.0)から想定されるほどの大きさを持っていなかった。 ・首都圏へ入力される周期 3 秒以上の地震動に対しては、サイト増幅特性が観測点と震源の方位に依存する。特に、周期 5 秒と 8 秒では長野県北部地震(Mw 6.7)によるサイト増幅特性が大きく、周期 3 秒と 8 秒では静岡県東部地震(Mw 6.4)のサイト増幅特性が大きい。 ・本震による首都圏およびその周辺地域のサイト増幅特性は、首都圏に対して方位が同じである福島県浜通り地震(Mj 6.4)と福島県沖地震(Mj 6.5)に類似しており、長野県北部地震や静岡県東部地震ほど大きくない。 ・サイト増幅特性の方位依存性は、関東平野の地下速度構造の水平方向に対する不均質性による増幅効果の影響を受けていると考えられる。	津野ほか(2012)

2.3　長周期地震動階級

2.3.1　はじめに

気象庁は、2013 年 3 月 28 日から長周期地震動に関する観測情報(試行)の気象庁 HP への掲載を開始している。ここでは、気象庁の HP の情報に基づいて、長周期地震動階級の定義と過去の地震における長周期地震動階級を示す。

2.3.2　長周期地震動階級の定義について

長周期地震動階級は、高層建物の高層階における揺れの大きさを表す指標として、気象庁により定義されたものである。気象庁では、地上に設置している地震計の観測データから求めた図 2.3-1 に示す絶対速度応答スペクトル Sva(減衰定数 5%)の周期 1.6 秒から周期 7.8 秒までの間における最大値から表 2.3-1 の定義によりその地点の長周期地震動階級を定めている。

絶対速度応答スペクトルの対象周期の下限は、長周期地震動に関する情報の対象を高さ 45m 以上の高層ビルとし、概ね周期 1.5 秒程度で「短くガタガタとした揺れ」から「ゆっくりとした揺れ」に人の揺れの感じ方が変わるという実験結果等を踏まえて、周期 1.5 秒に設定されている。対象周期の上限は、2014 年時点で国内に立地する高層ビルの固有周期を踏まえて、周期 8.0 秒に設定されている。

長周期地震動階級を評価する際に最大床応答速度を採用している理由は、長周期地震動の揺れによる行動の困難さなどの状況を区分しやすい観測値は最大床応答速度であることが調査研究から指摘されているためである。また、周期 1.5 秒～8.0 秒の周期帯において、最大床応答速度の値はほぼ一定であることが得られている(気象庁(2013)[29])。

気象庁の HP で公開されている長周期地震動に関する情報検討会(第 3 回)の議事要旨によると、長周期地震動階級 4 を超えるものを設定すべきかどうかの議論が行われており、Sva(減衰定数 5%)の値が 180cm/s 以上を長周期地震動階級 5 とする案も検討されている。180cm/s は構造躯体に被害が生じることが予想される大きさである。このため、気象庁として出す指標の中に大破レベルの情報を含むべきか、構造的なチェックをすべき段階位で指標を抑えるかなどの議論が行われたが、現在の長周期地震動階級には設定されていない。

高層ビルにおける人の体感・行動、室内の状況等と長周期地震動階級との対応関係を表 2.3-2 に示す。

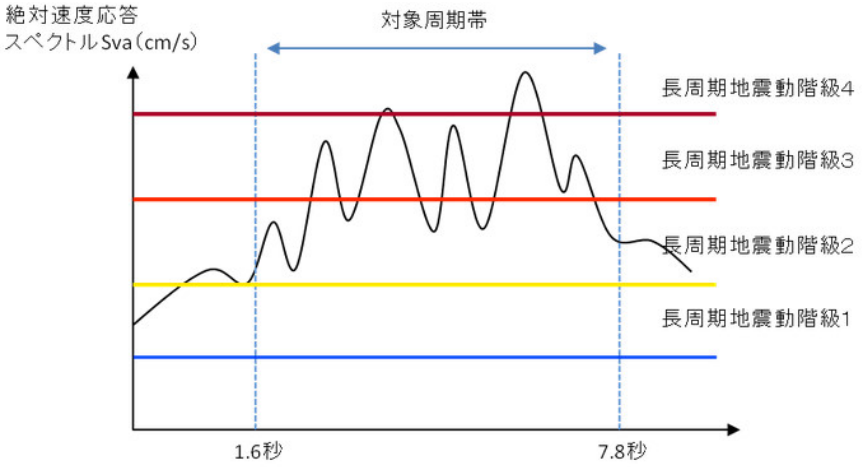


図 2.3-1　絶対速度応答スペクトル Sva(減衰定数 5%)のグラフ(気象庁 HP より)

表 2.3-1　長周期地震動に関する情報の発表に用いる長周期地震動階級の絶対速度応答スペクトル Sva(減衰定数 5%)の値(気象庁 HP より)

長周期地震動階級	絶対速度応答スペクトルSva（減衰定数5%）の値（対象周期T　1.5秒＜T＜8.0秒）※
長周期地震動階級１	5cm/s≦Sva＜15cm/s
長周期地震動階級２	15cm/s≦Sva＜50cm/s
長周期地震動階級３	50cm/s≦Sva＜100cm/s
長周期地震動階級４	100cm/s≦Sva

※当面、周期1.6秒から7.8秒において、0.2秒刻みで計算する。

表 2.3-2　長周期地震動階級関連解説表
高層ビルにおける人の体感・行動、室内の状況等(気象庁 HP より)

長周期地震動階級	人の体感・行動	室内の状況	備考
長周期地震動階級１	室内にいたほとんどの人が揺れを感じる。驚く人もいる。	ブラインドなど吊り下げものが大きく揺れる。	―
長周期地震動階級２	室内で大きな揺れを感じ、物に掴まりたいと感じる。物につかまらないと歩くことが難しいなど、行動に支障を感じる。	キャスター付き什器がわずかに動く。棚にある食器類、書棚の本が落ちることがある。	―
長周期地震動階級３	立っていることが困難になる。	キャスター付き什器が大きく動く。固定していない家具が移動することがあり、不安定なものは倒れることがある。	間仕切壁などにひび割れ・亀裂が入ることがある。
長周期地震動階級４	立っていることができず、はわないと動くことができない。揺れにほんろうされる。	キャスター付き什器が大きく動き、転倒するものがある。固定していない家具の大半が移動し、倒れるものもある。	間仕切壁などにひび割れ・亀裂が多くなる。

2.3.3　過去の長周期地震動における長周期地震動階級について

気象庁から過去の地震における長周期地震動階級の事例[30]として、2011 年東北地方太平洋沖地震、2004 年新潟県中越地震、2004 年 9 月 5 日の東海道沖の地震、2003 年十勝沖地震、2000 年鳥取県西部地震における長周期地震動階級の分布図が公開されている。一例として、2011 年東北地方太平洋沖地震の分布図を図 2.3-2 に示す。

また、気象庁の HP では、2013 年 3 月 28 日以降に長周期地震動階級 1 以上を観測した地震のリストが「長周期地震動に関する観測情報（試行）」として公開されている。気象庁から公開されている情報に基づいて、最大で長周期地震動階級 4 を観測した地震を表 2.3-3 に、最大で長周期地震動階級 3 を観測した地震を表 2.3-4 に示す。表には、気象庁マグニチュード、モーメントマグニチュード、震源深さ、地震のタイプ、発生メカニズム、および観測地域を示している。気象庁から観測地域名が公表されていない地震に対しては、観測地域が空欄となっている。

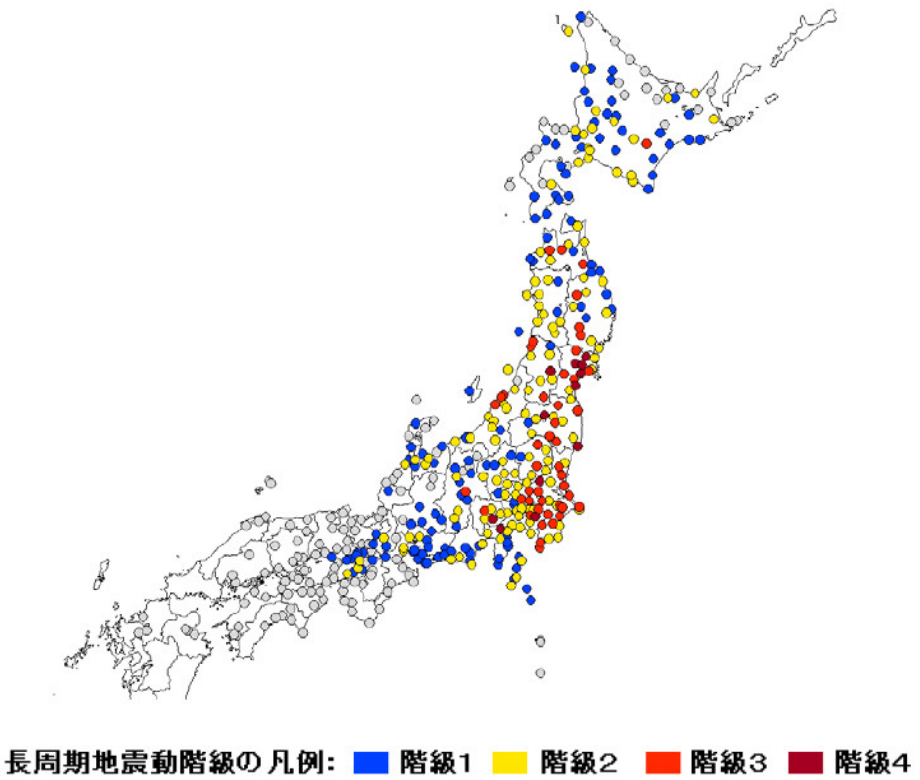


図 2.3-2　2011 年東北地方太平洋沖地震における長周期地震動階級
（気象庁 HP より）

表 2.3-3　最大で長周期地震動階級 4 を観測した地震

（気象庁 HP 資料による[1*]）

地震名	地震諸元			地震タイプと発生メカニズム	観測地域[2*]
	Mj	Mw	震源深さ(km)		
2000 年鳥取県西部地震	7.3	6.8	9	内陸地殻内地震 横ずれ断層型	鳥取県西部
2003 年 5 月 26 日の宮城県沖の地震	7.0	7.0	82	プレート内地震 逆断層型	
2003 年 7 月 26 日の宮城県北部の地震	6.4	6.1	12	内陸地殻内地震 逆断層型	
2003 年十勝沖地震	8.0	8.0	45	プレート間地震 逆断層型	十勝地方中部　日高地方東部　日高地方中部
2004 年新潟県中越地震	6.8	6.7	12	内陸地殻内地震 逆断層型	新潟県中越
2004 年 10 月 23 日 18 時 34 分頃の新潟県中越地方の地震	6.5	6.4	14	内陸地殻内地震 逆断層型	
2007 年能登半島沖地震	6.9	6.6	11	内陸地殻内地震 逆断層型	
2008 年岩手宮城内陸地震	7.2	7.0	8	内陸地殻内地震 逆断層型	
2011 年東北地方太平洋沖地震	—[3*]	9.0	24	プレート間地震 逆断層型	宮城県北部　宮城県中部　宮城県南部　山形県村山　福島県浜通り　福島県会津　茨城県南部　東京都 23 区　山梨県東部・富士五湖　静岡県東部
2011 年 4 月 7 日の宮城県沖の地震	7.2	7.1	66	プレート内地震 逆断層型	
2011 年 4 月 11 日の福島県浜通りの地震	7.0	6.7	6	内陸地殻内地震 正断層型	

[1*] 調査日：2016 年 2 月 23 日

[2*] 観測地域は、気象庁からの公表資料による。空欄となっているものは、観測地域が公表されていない地震である。

[3*] 2011 年東北地方太平洋沖地震に対しては、Mj だけが公表されている。

表 2.3-4　最大で長周期地震動階級 3 を観測した地震

（気象庁 HP 資料による[1*]）

地震名	地震諸元			地震タイプと発生メカニズム	観測地域[2*]
	Mj	Mw	震源深さ(km)		
1997 年 3 月 26 日の鹿児島県薩摩地方の地震	6.6	6.1	12	内陸地殻内地震 横ずれ断層型	
1998 年 9 月 3 日の岩手県内陸北部の地震	6.2	5.9	8	内陸地殻内地震 逆断層型	
2000 年 7 月 30 日の三宅島近海の地震	6.5	6.5	17	地殻内地震 横ずれ断層型	
2004 年 10 月 23 日 18 時 11 分頃の新潟県中越地方の地震	6.5	6.4	14	内陸地殻内地震 逆断層型	
2004 年 10 月 27 日の新潟県中越地方の地震	6.1	6.0	12	内陸地殻内地震 逆断層型	
2005 年 8 月 16 日の宮城県沖の地震	7.2	7.1	42	プレート間地震 逆断層型	
2007 年新潟県中越沖地震	6.8	6.7	17	内陸地殻内地震 逆断層型	
2008 年 7 月 24 日の岩手県沿岸北部の地震	6.8	6.8	108	プレート内地震 正断層型	
2008 年 9 月 11 日の十勝沖の地震	7.1	6.7	31	プレート間地震 逆断層型	
2011 年 3 月 11 日 15 時 15 分頃の茨城県沖の地震	7.6	7.7	43	プレート間地震 逆断層型	
2011 年 4 月 12 日の福島県通りの地震	6.4	5.9	15	内陸地殻内地震 正断層型	
2014 年 11 月 22 日 22 時 08 分の長野県北部の地震	6.7	6.2	5	内陸地殻内地震 逆断層型	長野県北部
2015 年 5 月 13 日 6 時 13 分の宮城県沖の地震	6.8	6.8	46	プレート間地震 逆断層型	宮城県北部

[1*] 調査日：2016 年 2 月 23 日

[2*] 観測地域は、気象庁からの公表資料による。空欄となっているものは、観測地域が公表されていない地震である。

第3章　長周期地震動による被害に関する文献・資料調査

長周期地震動による被害としては、屋外貯蔵タンクのスロッシングによる被害や高層建物のエレベータのケーブル被害などが知られている。ここでは、既往文献に基づいて、国内における長周期地震動による主な被害について整理する。

3.1　長周期地震動による国内の主な被害

3.1.1　長周期地震動による被害

長周期地震動の被害は、屋外貯蔵タンク、超高層建物、免震構造物、および長大橋などの長周期構造物が出来たことにより生じている。座間(1993, 2009, 2014)は、主に屋外貯蔵タンクのスロッシングによる国内外の被害事例についてまとめている。また、太田・座間(2005)[31]では、屋外貯蔵タンクの被害に加えて、高層建物のエレベータのケーブル被害や揺れによる什器転倒被害についても述べられている。気象庁(2012)[32]では、1980 年以降の地震による長大構造物における主な被害がまとめられている。これらの記載をもとに、国内における長周期地震動による主な被害事例を表 3.1-1 に示す。

3.1.2　屋外貯蔵タンクの被害事例

屋外貯蔵タンクの被害が生じた地震と地域としては、1923 年関東地震(横須賀市)、1964 年新潟地震(新潟市等)、1983 年日本海中部地震(秋田市、新潟市、苫小牧市等)、1993 年北海道南西沖地震(秋田市、新潟市等)、2003 年十勝沖地震(苫小牧市ほか道内各地)、2004 年 9 月 5 日の紀伊半島南東沖の地震(大阪市、市原市等)、2004 年 9 月 5 日の東海道沖の地震(大阪市、市原市等)、および 2011 年東北地方太平洋沖地震(北海道、秋田、宮城、福島、山形、新潟、茨城、千葉、東京、神奈川の 10 都道県)がある。

3.1.3　高層建物のエレベータの被害事例

高層建物のエレベータ被害が生じた地震と地域としては、1983 年日本海中部地震(東京・新宿)、1984 年長野県西部地震(東京・新宿)、2003 年十勝沖地震(札幌市等)、2004 年新潟県中越地震(都内)、および 2011 年東北地方太平洋沖地震(東日本から西日本の広い範囲)がある。

3.1.4　高層建物の揺れによる什器転倒の被害事例

高層建物の揺れによる什器転倒の被害が生じた地震と地域としては、1995 年兵庫県南部地震(大阪市等)、2000 年鳥取県西部地震(神戸市、大阪市等)、2004 年 9 月 5 日の紀伊半島南東沖の地震(大阪市等)、2004 年 9 月 5 日の東海道沖の地震(大阪市等)、および 2011 年東北地方太平洋沖地震(東日本から西日本の広い範囲)がある。

表 3.1-1　国内の長周期地震動による主な被害

地震名	地震諸元		主な被害
	地震規模	震源深さ	
1923 年関東地震	M 7.9 (Mw は未公表)	―	・「横須賀軍港箱崎山の山腹造成地にあった総貯蔵量約10万tの重油タンク群が壊滅的な打撃を受けた。このうち、容量 6,000t の満液タンクでは屋根板を突き破って、油が間欠的に溢流したといわれ、その際発火・炎上・爆発に至ったと報告されている。」（座間(2014)）
1964 年新潟地震	Mj 7.5 (Mw は未公表)	40km	・「製油所内の 3 万 kl 浮屋根式タンクがスロッシングを起こし、浮屋根が 3～4 回大きく揺れはね上がったとき、タンク側板を越えて溢流した原油に着火したことが目撃された。このタンク火災は隣接のタンクを巻き込み約半月間燃え続けた。」(座間(2014))
1983 年日本海中部地震	Mj 7.7 (Mw は未公表)	14km	・「この地震で震源に近い秋田のみならず、遠く離れた新潟、苫小牧で石油タンクに被害が認められた。スロッシングについては多数のタンクで貯液の揺動の痕跡、溢流、浮屋根と付属設備に損傷が認められている。」(座間(2014)) ・震央距離約 500km の東京の新宿において、1 棟の超高層建物のエレベータケーブルが切断された事故が発生(座間(1993))。
1984 年長野県西部地震	Mj 6.8 (Mw は未公表)	2km	・1933 年日本海中部地震と同様のエレベータ被害が新宿の何棟かの超高層建物でみられた(座間(1993))。
1993 年北海道南西沖地震	Mj 7.8 Mw 7.7	35km	・石油タンクのスロッシング(秋田市、新潟市等)(太田・座間(2005))
1995 年兵庫県南部地震	Mj 7.3 Mw 6.9	16km	・高層建物の揺れによる什器転倒等(大阪市等) (太田・座間(2005))

表 3.1-1　国内の長周期地震動による主な被害(つづき)

地震名	地震諸元		主な被害
	地震規模	震源深さ	
2000 年鳥取県西部地震	Mj 7.3 Mw 6.8	9km	・高層建物のエレベータ停止(神戸市、大阪市等) (太田・座間(2005))
2003 年十勝沖地震	Mj 8.0 Mw 8.0	45km	・北海道内各地の数多くの大型石油タンクに被害が発生した。特に、苫小牧市周辺での被害は深刻で、屋外貯蔵タンクの 58%にあたる 170 基で何らかの被害を受けた(畑山ほか(2004))。 ・高層建物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)(気象庁(2012))
2004 年 9 月 5 日の 紀伊半島南東沖の地震	Mj 7.1 Mw 7.3	38km	・石油タンクのスロッシング(大阪市、市原市等) (畑山・座間(2005)[33])
2004 年 9 月 5 日の 東海道沖の地震	Mj 7.4 Mw 7.5	44km	・高層建物の揺れによる什器転倒等(大阪市等) (気象庁(2012))
2004 年新潟県中越地震	Mj 6.8 Mw 6.7	12km	・都内の超高層建物のエレベータのメインケーブルが大きく揺れ損傷した(藤田(2006)[34])。
2011 年東北地方 太平洋沖地震	Mw 9.0	24km	・長周期地震動によるスロッシング被害は、北海道、秋田、宮城、福島、山形、新潟、茨城、千葉、東京、神奈川の 10 都道県の 64 基で生じている(座間ほか(2013)[35])。 ・高層建物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) (気象庁(2012))。 ・東京湾岸部などにおいて超高層集合住宅の被害あり(肥田ほか(2012))。

3.2　過去の長周期地震動による超高層建物の被害状況

3.2.1　1984 年長野県西部地震による被害事例について

1984 年長野県西部地震においては、新宿のいくつかの超高層建物でエレベータのケーブルが切断される事故が発生している。東京の震度は 3 であったが、制御用の震度計は作動しなかった(太田・座間(2005))。超高層建物における地震計による変位軌跡を図 3.2-1 に示す。同図中(a)は、記録開始後 41～61 秒の変位軌跡、(b)は 72～88 秒の軌跡である。地下室の変位が点線で、屋上での変位が実線で示されており、最大応答のときはほぼ 8 倍に増幅されている。揺れの周期は約 5 秒、楕円形の最大片振幅は 16.5cm である(太田・座間(2005))。図 3.2-1(a)の 1 方向の最大片振幅は 15.5cm であるが、ベクトル合成値の最大値を図から読み取ると 16.5cm となる。

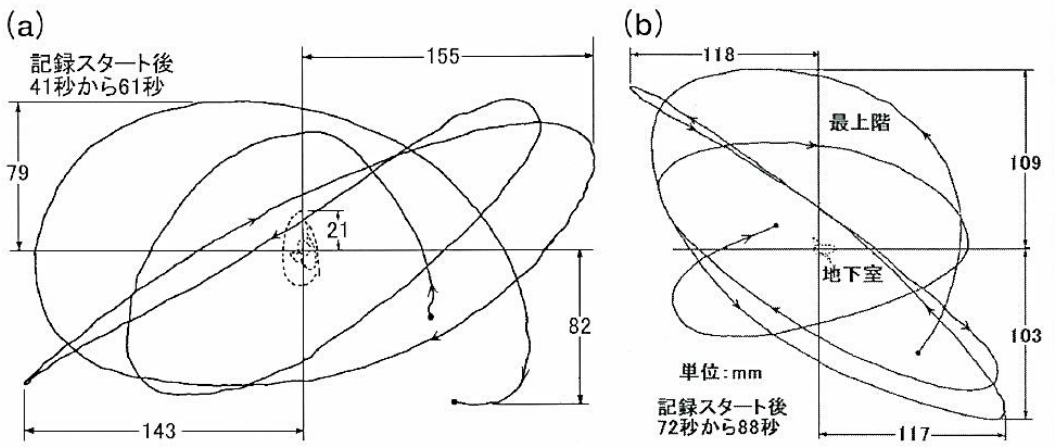


図 9.1　1984 年長野県西部地震における超高層ビルの変位軌跡[9.1)]
(a) 記録開始後 41 ～ 61 秒
(b) 記録開始後 72 ～ 88 秒

図 3.2-1　1984 年長野県西部地震における超高層ビルの変位軌跡
(太田・座間(2005)図 9.1(村松(1989)[36)]より引用して加筆したもの) より)

この地震における長野県飯田市から千葉県銚子市までの気象庁 1 倍強震計の変位波形を震央距離の順に並べたものを図 3.2-2 に示す。変位波形は、関東平野の熊谷市と東京で振幅が急に大きくなっている。東京の最大片振幅は約 1.9cm、周期は 7.2 秒であり、図 3.2-1 に示した新宿の超高層建物の地階の最大片振幅 2.1cm と近い値となっている。このように、震度が 3 程度であっても、超高層建物に長周期地震動が作用することにより大きな揺れが生じ、エレベータケーブル切断という被害が生じている(太田・座間(2005))。

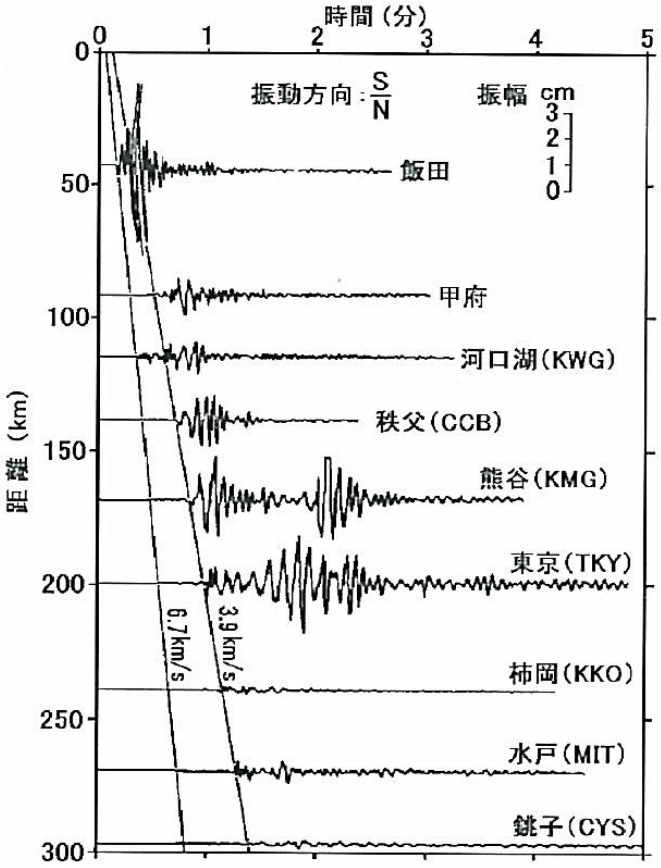


図 3.2-2　1984 年長野県西部地震における気象庁 1 倍強震計の走時ダイアグラム
（太田・座間(2005)図 9.2(瀬尾(1986)[37]より引用して加筆したもの）より）

3.2.2 2011 年東北地方太平洋沖地震による被害事例について

(1) 気象庁の聞き取り調査

気象庁は、2011 年東北地方太平洋沖地震の際の東京都内における高層ビルの揺れの実態に関する聞き取り調査を行っている(気象庁(2011)[38])。

対象建築物は、東京都内の軒高 60m 以上のオフィスビル 34 棟であり、調査は、地震時の在館者(各ビル数名程度以内)を対象に面談方式で行っている。高さ(軒高)別内訳は、60～100m が 4 棟、100～150m が 13 棟、150m 以上が 17 棟である。

1) 調査の意義

既往地震の経験から、0～50cm/s の速度応答では高層建物における室内被害はほとんど発生しないとされている。一方で、実験やシミュレーションにより、150cm/s 以上の速度応答では高層建物において大きな室内被害が発生するとされている。

50～150cm/s の速度応答と被害の関係は不明であったが、2011 年東北地方太平洋沖地震では、周期 1 秒～7 秒において、東京都内で 50～100cm/s の速度応答が観測されている。そこで、50～150cm/s の速度応答と被害の関係を把握するために聞き取り調査を実施している。

2) 調査の結果

調査結果の概要を以下に示す。

- 東京都内では、調査した範囲では、構造躯体に被害は発生していない。
- 天井材については、約半数のビルで何らかの変形・損傷が生じている。
- 内装材の破損については、多くのビルで、特に非常階段の内装材にひび割れ、塗装の剥離など軽微な損傷が生じている。
- エレベータについては、すべてのビルでエレベータが全台停止し、閉じ込めがあったビルは 1 棟、エレベータロープの絡まりや破損は 4 棟で認められている。
- 什器の転倒については、大多数のビルで生じておらず、什器の転倒はすべて固定しないもので発生している。転倒が生じなかった理由として、以下のような点が挙げられている。
    - i) 消防署の指導を受け、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。
    - ii) 什器は作り込みになっており、転倒は生じない。
    - iii) 液晶テレビの普及により壁固定型などが多く、置き方が不安定でなかった。
- コピー機の移動については、大多数のビルでは移動は生じておらず、コピー機の移動はすべて固定していないもので発生している。
- スライド式書架の移動については大多数のビルでは認められなかったが、一部、大きく左右に動くことによって破損を生じたものがあった。

(2)　肥田ほか(2012)による超高層集合住宅の居住者へのアンケート調査

肥田ほか(2012)は、関東、関西地域に建設されている 24 階建以上の RC 系の超高層集合住宅のうち、強震観測が行われている建物を含む 15 棟の居住者を対象にアンケート調査を実施し、2011 年東北地方太平洋沖地震における居住者の行動難度や揺れの感じ方、被害状況について調べている。

対象とした建物の一覧を表 3.2-1 に示す。対象建物は関東地域で 9 棟、関西地域で 6 棟であり、すべて 24 階建以上の RC 系(RC 造、SRC 造、CFT 造(コンクリート充填鋼管構造))の超高層集合住宅で賃貸物件である。いずれも関東平野、大阪平野内に位置し、本震時の長周期地震動の影響を受けているものと考えられる。各建物には最上階、中間階付近および最下階に強震計が設置されており、強震計設置階付近の連続した 5 層分の住戸を対象にアンケート用紙を配布している。これらの住戸をそれぞれ高層、中層および低層と呼んでいる。有効回答数は 516 であり、本震時に部屋にいた割合はほぼ半数である。

表 3.2-1　検討対象建物一覧(肥田ほか(2012)表 1 より)

地域	名称	階数	構造	地域	名称	階数	構造
関東	A	30	RC	関東	I	41	RC
関東	B	25	RC	関西	J	33	RC
関東	C	30	RC	関西	K	36	RC
関東	D	24	RC	関西	L	25	SRC
関東	E	32	RC	関西	M	43	RC
関東	F	33	RC	関西	N	40	S, CFT
関東	G	28	RC	関西	O	31	RC
関東	H	24	RC				

建物や家財の被害に関係するアンケート結果を図 3.2-3 に示す。関東地域の高層部におけるタンス、冷蔵庫、食器棚等の状態を(a)に、食器、本、テーブル上の小物等の状況を(b)に示す。家具等の移動に関する被害状況は、小物等の被害状況と同様の傾向となっている。千葉県の沿岸部に位置する建物 G および内陸部の建物 H では、家具や小物等の移動・散乱が極めて多くなっている。

低層部における室内の壁紙等の亀裂に関する回答結果を(c)に、柱や壁、梁などのコンクリート部分の亀裂に関する回答結果を(d)に示す。東京沿岸部の建物 E では内装材とコンクリートの被害が多い。また、建物 G でも内装材とコンクリート部分の亀裂が極めて多くなっている。この建物は激しい液状化被害が生じた地域に位置しており、長周期の振動によって建物の揺れが大きくなった可能性が示唆されると肥田ほか(2012)は述べている。建物 B および F は、高層部で家具や小物等の移動・散乱が比較的多かったのに対し、低層部の内装材やコンクリート部分の亀裂は少ない。このように、建物建設位置、規模等によって揺れや被害の傾向は異なるため、より細かい分析が必要となることが指摘されている。

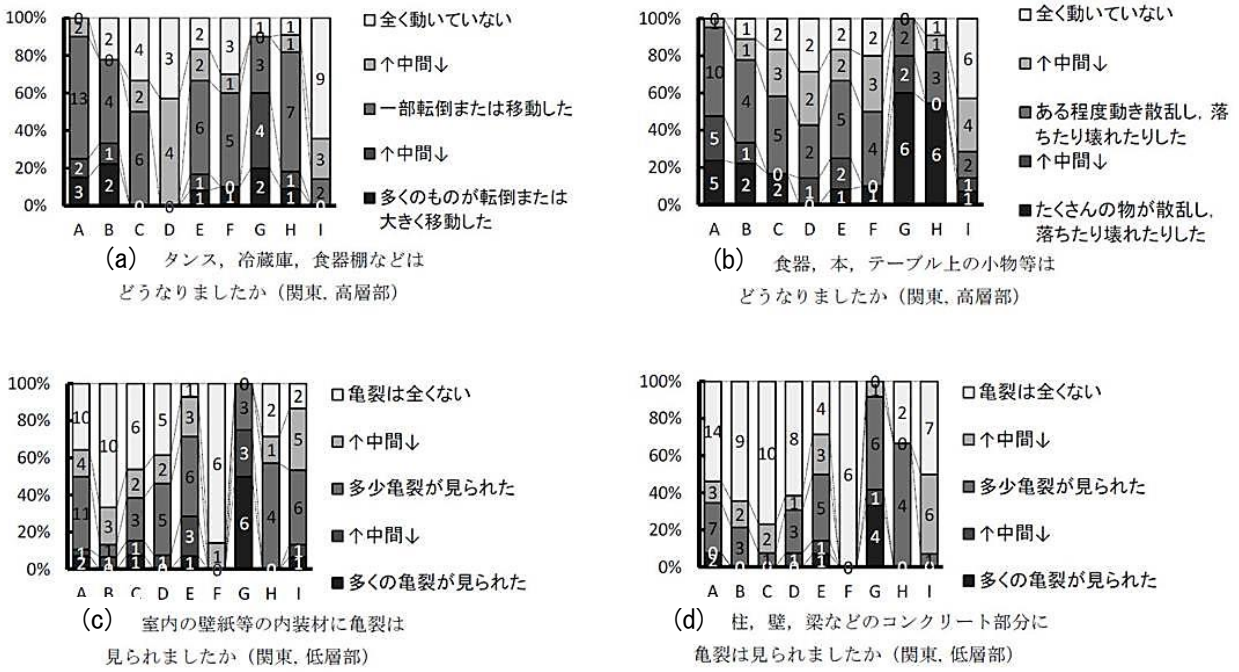


図 3.2-3　関東における超高層集合住宅のアンケート調査結果
（肥田ほか(2012)図 21-14 より）

(3)　山根ほか(2014)[39]による超高層集合住宅の室内被害の分析

山根ほか(2014)は、首都圏に建つ超高層集合住宅 9 棟(いずれも 24 階建以上であり、RC 造の耐震構造)を対象とし、2011 年東北地方太平洋沖地震時に記録された小規模工事等受付台帳や災害状況報告書等を調査し、内装材や非構造部材等の被害の高さ分布について検討を行っている。また、最上階と最下階の強震記録とモード形状に基づいて最大層間変形角の高さ分布を簡易予測し、シミュレーション解析が行われている建物と併せて最大層間変形角と室内被害との対応関係について整理分析している。

山根ほか(2014)による最大層間変形角の簡易予測手法の概略手順を以下に示す。

i)　最上階と地下 1 階の強震記録から相対加速度と伝達関数を求める。伝達関数とは、各振動数における建物の応答倍率を示すものであり、強震記録のフーリエスペクトルの比(最上階／地下 1 階)を求めることにより得られる。

ii)　伝達関数から 1 次の固有振動数を読み取り、バンドパスフィルターを用いて 1 次に対応する相対加速度波形を求める。1 次だけを取り出している理由は、2011 年東北地方太平洋沖地震では、2〜3 次モードの影響が少ないことが確認されているためである。バンドパスフィルターは、ある帯域の振動数成分を取り出すためのフィルターである。

iii)　ii)で求めた相対加速度波形と、設計モデルから得られる 1 次のモード形状を掛け合わせて、各階の相対加速度波形を求める。

iv)　相対加速度波形を 2 回積分して各階の変位応答を求め、さらに下の階に対する相対変位応答の最大値を階高で除して最大層間変形角を求める。

v)　上記の簡易予測手法による最大層間変形角はシミュレーション解析から得られた目標値に比べて低層階で小さく、高層階で大きく評価される傾向にあるため、最大層間変形角の高さ分布を係数 α により補正する。

$$\alpha(h) = 1.3\cos\left(\frac{h\pi}{2.5}\right)$$

ここに、h は基準化階であり、階番号を地上階数で除したものである。

上記の補正係数は、表 3.2-1 の建物 A (RC 造、30 階建)の NS 方向に対するシミュレーション解析から提案されている。また、建物 G に本手法を適用して相対加速度波形を概ね良好に評価できることを確認している。

これらの整理分析の結果として、主に以下の知見が得られている。

i) 主な建物内部被害は、壁紙等の内装材破損や ALC 壁等の非構造部材の破損、扉やサッシの開閉不良、タイル材の破損の 4 つが多い。

ii) 内装材破損の被害件数が最も多く、タイル材の被害は少なかった。建物の内部被害の高さ方向の分布は低層から中層にかけて多く発生しており、高層では被害が少なかった。内装材の亀裂に関するアンケート調査からも同様の傾向が見られた。

iii) 2011 年東北地方太平洋沖地震では、建物の 1 次モードに比べ高次モードの影響は小さかった。また、同地震時における建物の非線形性の影響により、下層階で層間変形が大きくなる傾向を示した。

iv) 内装材の破壊については、最大層間変形角 5.0×10^{-3}rad 以降で被害が多くなる傾向が見られた。いずれの被害も、最大層間変形角が大きくなるほど多くなる傾向にあり、これは内装材の亀裂に関するアンケート結果とも対応した。

(4) 超高層建物の被害事例

2011 年東北地方太平洋沖地震においては、超高層建物の東京都庁本庁舎、工学院大学、および咲洲庁舎でも被害が生じており、被害状況や地震観測記録が公表されている。各建物の基本情報を表 3.2-2 に示す。各建物の被害状況を以下に示す。

表 3.2-2 建物の基本情報

建設地	建物名	構造	階数
東京都新宿区	東京都庁第一本庁舎	S(SRC)	48
東京都新宿区	東京都庁第二本庁舎	S	34
東京都新宿区	工学院大学新宿校舎高層棟	S	29
大阪府大阪市	咲洲庁舎	S	52

1) 東京都庁第一本庁舎

東京都財務局(2011)[40]から公表されている被害状況を以下に示す。

・漏水(第一本庁舎北側機械室内冷水系熱交換器)
・エレベータ(地震感知後に全基が一時停止・安全が確認されたものから順次復旧)
・天井ボードや壁パネルの脱落、防火戸の破損(業務への影響なし)

2) 東京都庁第二本庁舎

東京都財務局(2011)から公表されている被害状況を以下に示す。

・漏水(第二本庁舎 33 階体育室スプリンクラー)
・エレベータ(地震感知後に全基が一時停止・安全が確認されたものから順次復旧)
・天井ボードや壁パネルの脱落、防火戸の破損(業務への影響なし)

3) 工学院大学新宿校舎高層棟

久保ほか(2012)[41]による被害状況を以下に示す。

・エキスパンションジョイント(高層階と中層階の接続部)カバーの脱落や移動
・システム天井材の落下(14, 21, 27, 28 階)
・システム天井材のたわみ(14, 16, 19, 20, 23, 24, 26, 28 階)
・本棚の影響による間仕切り壁の変形(24 階)
・固定されていない棚の転倒(16, 20, 24 階)
・コピー機の移動(12, 17, 19, 25 階)
・キャスター付きのオフィス什器の移動(21 階)
・移動棚の移動(25 階)
・テレビの落下と破損(28 階)
・エレベータケーブルの絡み(復旧まで 3 週間)

4) 咲洲庁舎

大阪府総務部(2011)[42]から公表されている建物の揺れの大きさと被害状況を表 3.2-3，4 に示す。また、被害状況を以下に箇条書きにして示す。

・中央廊下の防火戸のゆがみ(49 か所)
・消火栓上部鉄板のへこみ(33 か所)
・事務所・テナントの天井の落下・床の浮き(59 か所)
・階段室の壁面ボードのゆがみ・亀裂・落下(72 か所)
・階段室床面の浮き・亀裂・はがれ(8 か所)
・中央廊下・居室内の壁面ボード亀裂・パネル落下(110 か所)
・電気室吹き付け材の落下(4 か所)
・トイレ洗面台の排水トラップの損傷(25 か所)
・エレベータ停止・閉じ込め(全 32 基が停止。うち 25 基は地震時管制運転装置が正常に作動したが、4 基でロープの絡まりによる閉じ込め事象が発生。)

表 3.2-3　2011 年東北地方太平洋沖地震の際に咲洲庁舎で観測された建物の揺れ(大阪府総務部(2011)より)

【観測された建物の揺れ】(本震時のデータ：３月１１日１４時４９分頃到達)

		最上階（５２階）	中間階（１８階）
最大振幅（片側）	短辺方向	１３７ｃｍ	３０ｃｍ
	長辺方向	８６ｃｍ	３２ｃｍ
最大加速度	短辺方向	１３１ガル	４１ガル
	長辺方向	８８ガル	３９ガル

・ガル：加速度を表す単位(1 ガル＝1cm/s/s)。地震の揺れの強さを示すのに用いられる。

表 3.2-4　2011 年東北地方太平洋沖地震の際の咲洲庁舎における内装・設備等の被害状況(大阪府総務部(2011)より)

【内装・設備等の被害状況】

○　内装材・防火戸等の損傷（合計３６０か所）

中央廊下の防火戸のゆがみ	４９か所
消火栓上部鉄板のへこみ	３３か所
事務所・テナントの天井の落下・床の浮き	５９か所
階段室の壁面ボードのゆがみ・亀裂・落下	７２か所
階段室床面の浮き・亀裂・はがれ	８か所
中央廊下・居室内の壁面ボード亀裂・パネル落下	１１０か所
電気室吹付材の落下	４か所
トイレ洗面台の排水トラップ（ジョイント部分）の損傷・その他	２５か所

○　エレベータの停止・閉じ込め

・　全３２基が停止。うち２５基は地震時管制運転装置が正常に作動したが、４基でロープの絡まりによる閉じ込め事象が発生。

(5)　日本建築学会による超高層建物の被害の整理

日本建築学会(2013)[43]では、2011 年東北地方太平洋沖地震において地震観測が実施されていた建物に関する文献を調査し、観測された最大応答加速度と被害状況との関係を整理している。その内容については本書（地震保険研究 31）の冊子版に掲載した。

(6)　高層住宅管理業協会のアンケート調査によるマンションの被災状況

高層住宅管理業協会*では、会員が東北・関東で受託するマンションを対象として、被災状況についてのアンケート調査を実施している(高層住宅管理業協会(2011)[44])。東北 6 県と関東 1 都 6 県におけるマンションの管理棟数と被災状況別の棟数と全体棟数に対する割合を表 3.2-6 に示す。また、20 階建以上の超高層住宅に対する結果も併せて示している。

20 階建以上の超高層住宅では大破と中破の被害は生じていないが、小破と軽微の被害割合は全体に対するものよりも高くなっており、超高層住宅が 20 階未満の住宅に比べて、小破と軽微の被害を多く受けていることを示している。

*2013 年 4 月にマンション管理業協会へ名称変更

表 3.2-6　2011 年東北地方太平洋沖地震における東北・関東地方のマンションの被災状況

建物の分類	地域	管理棟数	建物被害				
			大破	中破	小破	軽微	被害無し
全体	東北 6 県	1,642	0	26	283	1,024	309
	関東 1 都 6 県	44,723	0	18	901	6,453	37,351
	合計	46,365	0	44	1,184	7,477	37,660
			0.00%	0.09%	2.55%	16.13%	81.23%
超高層住宅〈20 階建以上〉	東北 6 県	15	0	0	0	15	0
	関東 1 都 6 県	488	0	0	39	197	252
	合計	503	0	0	39	212	252
			0.00%	0.00%	7.75%	42.15%	50.10%
	(免震・制震装置設置建物)	(102)	(0)	(0)	(1)	(48)	(53)

%表示の数値は、管理棟数の合計に対する各被害を受けた棟数の割合を示している。

第4章　長周期地震動とその被害の予測手法に関する文献・資料調査

4.1 長周期地震動の予測手法に関する既往研究

4.1.1 はじめに

地震本部では、「長周期地震動予測地図」2009 年試作版[45]、2012 年試作版、2016 年試作版[46]を公開している。内閣府では、南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告を公開している(内閣府(2015)[47])。国土交通省では、観測データに基づく設計用長周期地震動の作成手法を開発している(国交省(2010)[48])。また、気象庁では、長周期地震動の距離減衰式による長周期地震動階級の予測精度について検討を行っている(気象庁(2014a)[49])。以下では、主としてこれらの公的機関で採用されている長周期地震動の予測手法について紹介する。

4.1.2 長周期地震動予測地図（地震本部）

地震本部では、一般的な地震動の予測手法として「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）」を示している。レシピでは、震源モデルと地下構造モデルを作成し、統計的グリーン関数法と呼ばれる半経験的手法で計算した短周期成分と、差分法により理論的手法で計算した長周期成分を合成して地震動の予測とするハイブリッド合成法(入倉・釜江(1999)[50])が採用されている。

「2009 年試作版」、「2012 年試作版」、「2016 年試作版」について、対象地震などを比較したものを表 4.1-1 に示す。

表 4.1-1　長周期地震動予測地図の比較

項目	2009 年試作版	2012 年試作版	2016 年試作版
対象地震	・想定東海地震 ・東南海地震 ・宮城県沖地震	・南海地震(昭和型)	・相模トラフ沿いの M8 クラスの地震
震源モデル	前イベント震源モデル ・東南海地震 ・宮城県沖地震 特性化震源モデル ・想定東海地震	前イベント震源モデル ・南海地震(昭和型)	・1923 年大正関東地震 ・1703 年元禄関東地震 を念頭に置いた特性化震源モデルで、アスペリティ配置や面積等の多様性を考慮
地下構造モデル	地下構造モデル(1 次)	地下構造モデル(1 次)の作成手法を改良して作成した地下構造モデル	地層の連続性を考慮して作成した浅部地盤構造モデルを地下構造モデル(1 次)と接続した浅部・深部統合地盤構造モデル
対象周期帯域	周期 3.5 秒以上	周期 2 秒以上	周期 1.2 秒以上
速度応答スペクトルの分布図の周期	周期 5 秒、7 秒、10 秒	周期 3 秒、5 秒、7 秒、10 秒	周期 2 秒、3 秒、5 秒、7 秒、10 秒

長周期地震動予測地図について、速度波形、速度応答スペクトル、地下構造モデル、および速度応答スペクトルの分布図、長周期地震動における最大速度の分布図、長周期地震動の継続時間の分布図の高解像度版のデータが公開されている。

2009 年試作版：

http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/09_choshuki/

2012 年試作版：

http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/12_choshuki/

2016 年試作版：

http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/16_choshuki/

長周期地震動予測地図の各報告書で挙げられている主な課題を表 4.1-2 にまとめた。

表 4.1-2　長周期地震動予測地図の各報告書で挙げられた今後の課題

項目	2009 年試作版	2012 年試作版	2016 年試作版
震源モデル に関する課題	・海溝型地震の特性化震源モデルは、内陸地殻内地震に比べてさらなる研究が必要 ・そのため、想定東海地震の周期 5 秒未満の計算結果は本来より小さい可能性がある。	・震源モデルの短周期側への拡張や大きな地震のモデル化に関しては、南海トラフで発生が懸念される巨大地震に向けてさらなる研究が必要	・アスペリティ配置等の多様性を考慮したが、その他の個々の断層パラメータでばらつきを考慮する手法を確立することが必要 ・多様性を考慮した個々のシナリオの重みはすべて 1 としており、計算結果が本来より小さい可能性がある。
地下構造 モデル に関する課題	・全国の 1 次地下構造モデルの構築に向けて検討を進める予定	・さらなる精度向上に加え作成領域の拡張が必要 ・長周期帯の再現性等を重視したため、地質学等の既往知見と十分に整合しない懸念がある。 ・地下構造調査結果が少ない堆積平野や、地震記録が少ない海域等では検証が十分と言えない。	・周期 1 秒以上の計算には、地下構造モデルの精度向上、観測記録の蓄積が必要 ・相模トラフ地震のような震源断層から近い場合の検証が十分とは言えない。 ・現在の計算資源では表層地盤を含む広域の解析が困難 ・陸域の観測記録を再現するモデルを構築したが、海域の観測記録も再現するようなモデル更新が望まれる。
対象周期帯域 に関する課題	・計算上の問題等で周期 3.5 秒以上の計算としたため、周期帯の拡張を目指す。	・2009 年試作版の地震も周期 2～3 秒で計算するなど、工学的活用に向け継続的な取り組みが必要	・周期 1.2 秒以上の計算としたが、2 秒未満の精度検証が不十分 ・周期 2 秒の応答値の精度向上については今後の課題

4.1.3 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告（内閣府）

内閣府の「南海トラフの巨大地震モデル検討会」から、南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告が 2015 年 12 月 17 日に公開された。概要を以下に示す。

(1) 検討条件

内閣府の検討では、以下の条件で三次元差分法により長周期地震動を予測している。

1) 検討対象とする地震と長周期地震断層モデル

過去地震については、1707 年宝永地震(M 8.6)、1854 年安政東海地震(M 8.4)、1854 年安政南海地震(M 8.4)、1944 年昭和東南海地震(M 7.9)、1946 年昭和南海地震(M 8.0)の 5 地震を検討対象としている。

長周期地震断層モデルの検討にあたっては、最大クラスの地震に相当する 2011 年東北地方太平洋沖地震など、過去地震における断層の破壊過程に関する解析結果を収集し、その特徴等を整理して、2011 年東北地方太平洋沖地震等から得られた知見を反映させている。

2) 対象とする地震動の周期

長周期地震動による被害が懸念される超高層建築物の固有周期や、貯蔵されている石油を含む石油タンクのスロッシング固有周期をふまえて、周期 2～10 秒程度の地震動を検討対象としている。

3) 地盤構造モデル

浅い地盤構造モデルについては、深さ 30m までの S 波平均速度(AVS30)から表層地盤による震度の増幅分を求め、これを工学的基盤における震度の予測結果に加えることで、地表での震度を予測している。

深い地盤構造モデルについては、地震本部から公開されている「全国一次地下構造モデル(暫定版)」(2012)を基にして、四国および東海地域等で観測した水平動と上下動の振幅比に合致するよう地盤構造モデルを修正している。

(2) 今後の課題

長周期地震動の予測手法の高度化、地盤構造モデルの高度化、建築物の挙動・影響の評価機能の充実を挙げている。また、長周期地震動の予測は、発展途上の技術であり、震源や強震動生成域の場所、地盤構造モデル等の計算条件により、予測結果は大きく変わる場合があり、今回の想定とは異なる事象が発生する可能性があることにも留意する必要があると指摘している。さらに、今回の検討は、あくまでも現時点の科学的知見に基づいたものであり、今後の科学的知見の蓄積を踏まえ検証し、必要に応じて修正していくべきものであると述べられている。

4.1.4 長周期地震動作成手法の試案（国土交通省）

国土交通省は、地震動の観測データに基づいて設計用長周期地震動(ただし水平動のみ)を作成する手法の試案を提示し、意見募集を行った(国交省(2010))。ここで提案された手法は、各観測地点の解放工学的基盤における加速度応答スペクトルと、群遅延時間の平均値および分散を回帰式から算出し、フーリエ(逆)変換を用いて時刻歴波形を作成するものである。

なお、本手法では、周期 0.1 秒から 10 秒の周期成分を適用範囲とし、沖縄県および想定東海地震、東南海地震、宮城県沖地震の断層直上およびその近傍地域は対象外としている(国交省(2010))。

国交省(2010)による提案手法に対する意見募集が終了した翌月の 3 月 11 日に 2011 年東北地方太平洋沖地震が発生した。2011 年度建築基準整備促進事業では、事業主体((株)大崎総合研究所)と建築研究所との共同研究として、上記意見募集で出された意見への対応や提案手法の検証なども含めて、2011 年東北地方太平洋沖地震における長周期地震動特性について検討し、提案手法の改良などを行っている。この検証内容や作成手法の改良については、大川ほか(2013)[51]にまとめられており、この改良案に対する意見募集が国交省により行われている(国交省(2015) [52])。

作成手法の改良点は、以下の 2 点である。

i) 提案式をM_w9 のマグニチュードまで適用可能としたこと
ii) 震源域による増幅率とサイト係数の違いの考慮

これらの改良を加えた予測式による値と 2011 年東北地方太平洋沖地震の各地での観測記録とを比較し、改良を加えた予測式がより良く観測値を再現していることが確認されている。さらに、地震本部の昭和南海地震を対象とした 2012 年版長周期地震動予測地図との比較も試みた結果、両者に大きな相違がないことも確認されている(大川ほか(2013))。

4.1.5 距離減衰式の比較（気象庁）

気象庁の長周期地震動予測技術検討ワーキンググループでは、長周期地震動に関する 4 つの距離減衰式を取り上げて、長周期地震動階級の予測精度に関する検討を行っている(気象庁(2014a))。検討に用いられた距離減衰式は、表 4.1-2 のとおりである。

この検討では、緊急地震速報(警報)を発表した Mj5.5 以上の地震について、警報が発表された報、M 最大となった報、最終報のそれぞれの震源を利用して、予測と観測の適合度を調べている。その結果、4 式とも実用に耐えるレベルの予測適合度が得られており、長周期地震動階級を予測するために提案された防災科研式(b)の予測精度が最も高いという結果が得られている。

ただし、巨大地震に対する長周期地震動の予測技術については、今後も検討を進める必要があると述べられている。

表 4.1-2　長周期地震動に関する距離減衰式の特徴の比較

	距離減衰式の評価手法			
	建築研式 佐藤ほか (2010[53], 2012[54])	防災科研式(a) Morikawa and Fujiwara(2013)[55]	内閣府式 横田ほか (2011)[56]	防災科研式(b) 気象庁(2014b)[57]
評価対象	絶対加速度応答スペクトル	絶対加速度応答スペクトル	相対速度応答スペクトル	絶対速度応答スペクトル
応答スペクトルの減衰定数	海溝型(5%) 内陸型(1%と 5%)	5%	5%	5%
マグニチュードの種類	モーメントマグニチュード	モーメントマグニチュード	モーメントマグニチュード	気象庁マグニチュード
震源からの距離の取り方	断層最短距離	断層最短距離	震源距離	震源距離
地震タイプの考慮の有無	内陸型と海溝型を考慮	考慮していない	内陸型と海溝型を考慮	考慮していない
深部地盤の影響の考慮の有無	海溝型については、地震基盤から工学的基盤までの S 波の鉛直伝播時間を考慮	深い堆積層による振幅の増幅効果を考慮	深部地盤の一次固有周期により考慮	観測記録、深部地盤による補正係数を考慮
その他の特徴	海溝型については、震源域(太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震)による伝播特性の違いを考慮	Mw 9 まで適用可能	－	長周期地震動階級を予測するために提案されている

4.2 長周期地震動による被害の予測手法に関する既往研究

4.2.1 はじめに

長周期地震動による被害の予測手法に関しては、以下のような研究が行われている。

i) 建物をモデル化して、時刻歴応答解析を行う手法
ii) 距離減衰式や応答スペクトルなどを用いる手法
iii)簡易応答評価式を用いる手法

以下では、上記の手法の概要と既往研究について述べる。

4.2.2 建物をモデル化して、時刻歴応答解析を行う手法

建物を 3 次元モデルや等価な曲げせん断棒にモデル化して、時刻歴応答解析により各階の最大床応答加速度と最大応答層間変形角などを求めて、内外装、躯体、設備、天井などの被害を評価する手法である(たとえば、恒川ほか(2013)[58])。恒川ほか(2013)では、S 造 14 階建建物を対象に地震予想最大損失率(PML：Probable Maximum Loss)の評価を行っている。予測対象は建物(構造部材と非構造部材)であり、家財は予測対象とはなっていない。

各部位に対する最大床応答加速度、あるいは最大応答層間変形角と被害割合の関係は被害関数として設定されている。間仕切壁と天井(システム天井)、外装と床仕上、および設備のクライテリアと被害関数との関係を表 4.2-1～3 に示す。間仕切壁のクライテリアは加登ほか(2007)[59]の実験を参考に、天井のクライテリアは田村ほか(2005)[60]の研究を参照して表 4.2-1 のように設定し、童ほか(1996)[61]の変換式により加速度に変換している。外装のクライテリアは PC カーテンウォールを、床仕上のクライテリアは標準的なフリーアクセスフロアを想定し、表 4.2-2 に示すように設定されている。大破の被害関数は、解体およびガラ搬出費用を考慮し 150%としている。竪配管については、S 造では層間変形角 1/100 を考慮することとされていることから、表 4.2-3 のように設定されている。一般的に、外装、内装、および設備の竪配管などの被害は最大応答層間変形角に依存し、天井、および床置型や吊下げ型の設備機器は最大床応答加速度に依存するように設定される場合が多い。

また、設備機器および配管の最上階、中間階、および最下階における配置割合を表 4.2-4 に示す。復旧費用の評価は、各階の部位ごとの復旧費用を求め、これを足し合わせて建物全体の復旧費用を算定している。

表 4.2-1 間仕切壁と天井のクライテリアと被害関数(恒川ほか(2013) 表 7 より)

	間仕切壁		天井（システム天井）	
	層間変形角	被害関数	床応答震度	被害関数
小破	1/200	10%	5	10%
中破	1/100	50%	6	30%
大破	1/50	150%	7	150%

表 4.2-2 外装と床のクライテリアと被害関数(恒川ほか(2013) 表 8 より)

	PC 版	床仕上	被害関数
	変形角	応答加速度	
小破	1/150	400gal	10%
中破	1/100	800gal	30%
大破	1/50	1,000gal	150%

表 4.2-3 設備のクライテリアと被害関数(恒川ほか(2013) 表 9 より)

	機器，横配管	竪配管	被害関数
	応答加速度	変形角	
小破	660gal	1/100	10%
中破	1,000gal	1/75	20%
大破	1,500gal	1/50	40%
崩壊	2,000gal	1/30	150%

表 4.2-4 設備機器および配管の建物内配置 (恒川ほか(2013) 表 10 より)

	機器，横配管	竪配管
最上階	5.0%	1.33%
中間階	65.0%	17.33%
最下階	10.0%	1.34%
計	80.0%	20.0%

この手法は、個々の建物に対して被害の予測を詳細に行う場合に用いられる手法である。多くの建物を対象として被害の予測を行う場合には、個々の建物の振動モデルと入力地震動の作成、および時刻歴応答解析に多くの労力を要するため、より簡易的な手法を用いる必要がある。

4.2.3 距離減衰式や応答スペクトルなどを用いる手法

建物を 1 自由度系でモデル化して、応答スペクトルから最大応答変位を求め、またエネルギースペクトルから長時間の揺れによる繰返し回数を評価して被害を簡易的に予測する手法である。また、距離減衰式により建物被害と相関が高い周期帯域の平均速度応答を求めて、この平均速度応答を用いて構造種別と建物の層数に応じた被害関数を設定する手法も提案されている。以下では、これらの予測手法の概要について述べる。

(1) 阿部ほか(2013)[62]による被害の予測手法

地震動や建物特性が持つバラツキを考慮した上で、地域全体の面的な被害予測を行うために、時刻歴応答解析を行うことなく簡易に超高層建物の応答や被害を予測できる手法を提案している。この手法の予測対象は建物(構造部材)であり、建物(非構造部材)と家財は予測対象とはなっていない。

手法の概要は以下のように述べられている。

「 ①地震動特性はスペクトルで表現する。

②想定する建物は、等価 1 自由度系に置換し、建物全体を Bi-Linear 型にモデル化する。

③評価指標を最大値に関わる評価指標(最大変位、最大層間変形角)と繰返しに関わる評価指標(部材累積塑性変形)とに分類し、最大値に関わる評価指標は応答スペクトルにより、繰返しに関わる評価指標はそれに加えてエネルギースペクトルにより推定する。」(阿部ほか(2013))

a) 最大値に関わる評価指標の算出

等価線形化手法により建物の縮約 1 自由度系モデルを作成し、減衰を考慮した応答スペクトル(Sa-Sd 曲線)から代表点の層間変形角を求め、これに係数を乗じて最大層間変形角を算出している。この係数は、3 種類の S 造純ラーメン架構の骨組モデルの時刻歴応答解析結果による代表点変形角と最大層間変形角の関係から図 4.2-1 に示すような近似折線で設定されている。

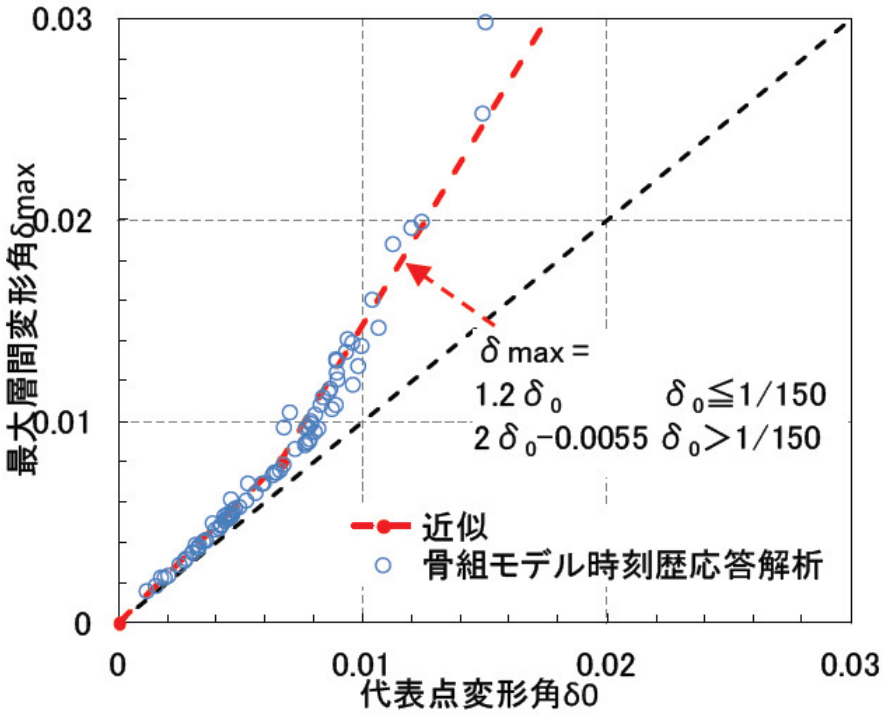


図 4.2-1　代表点変形角と最大層間変形角の関係（阿部ほか(2013)図 3 より）

b)　繰返しに関わる評価指標の算出

部材累積塑性変形倍率の算出フローを図 4.2-2 に示す。ここに、部材累積塑性変形倍率は、部材の塑性変形を累積したものを部材の弾性範囲の限界を表す降伏変位で除したものである。

まず、弾性時から最大応答時までの周期帯域におけるエネルギースペクトルの平均値から総入力エネルギーを評価する。総入力エネルギーのうち損傷寄与分のエネルギーを、最大応答時の 1 サイクル消費エネルギーで除して、繰返し回数を求める。部材累積塑性変形倍率の安全側の評価として、最大部材塑性率が前述の回数分繰返すとして、部材累積塑性変形倍率を評価する。最大部材塑性率は図 4.2-3 に示すように代表的な骨組モデルの解析結果をもとにした代表点応答変形角との関係から求めている。

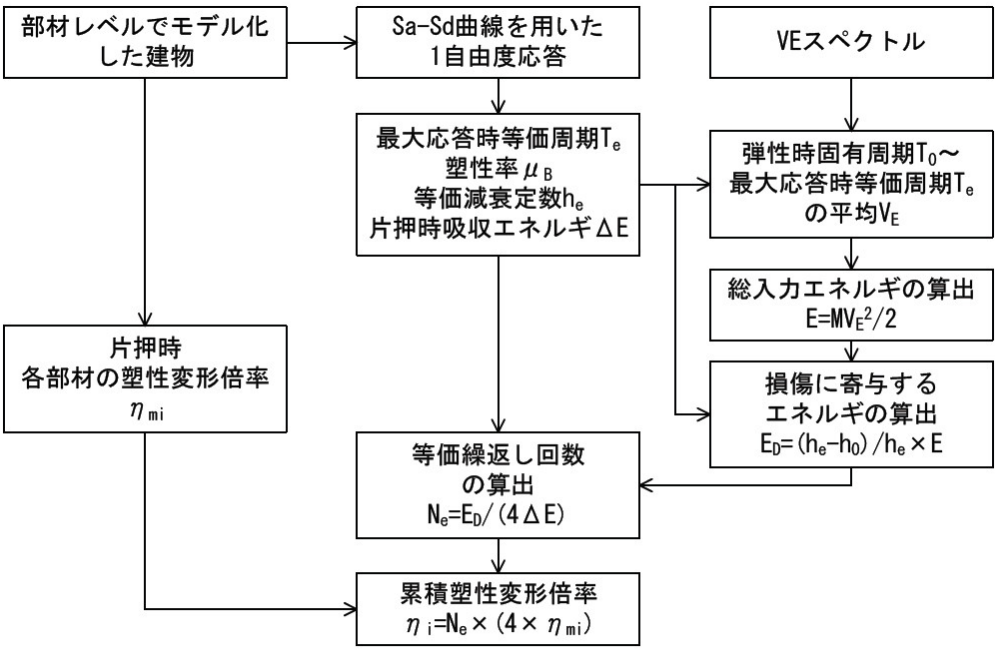


図 4.2-2　エネルギースペクトルを用いた累積応答の算出(阿部ほか(2013) 図 4 より)

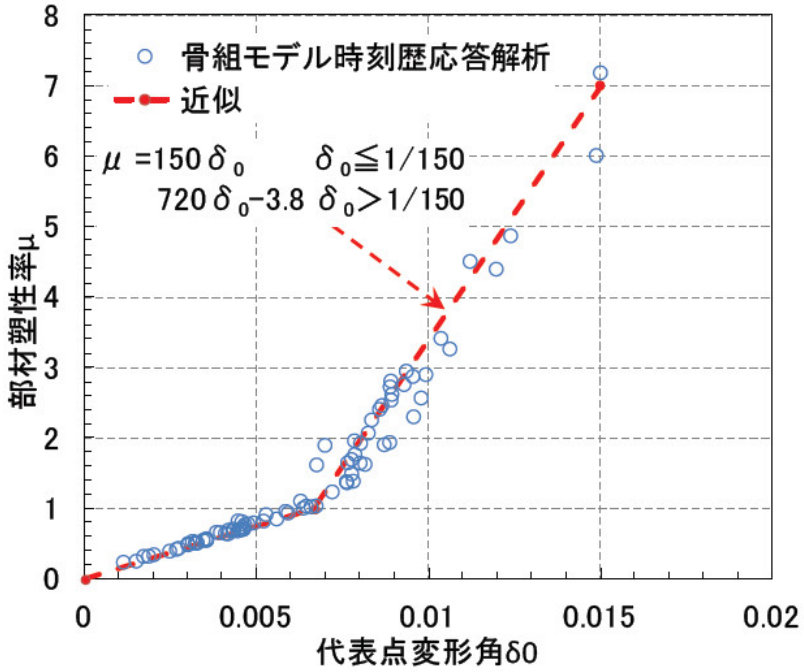


図 4.2-3　代表点変形角と最大部材塑性率の関係(阿部ほか(2013) 図 5 より)

c) 超高層建物のモデル設定

簡易な超高層建物モデルは、既往の超高層建物データをもとに、以下のように剛性と耐力を設定することにより、Bi-Linear 型でモデル化している。

i) 剛性は、建物の弾性 1 次周期に基づいて設定している。既往の研究(勝俣ほか(2011)[63])による高さ H (m)と周期 T_1 (秒)の関係から$T_1 = 0.0256H$としている。なお、Bi-Linear 型モデルの第 2 勾配の第 1 勾配に対する比については、論文に記載されていない。

ii) 耐力は、設計せん断力の 1.5 倍程度の耐力を有すると仮定している。設計せん断力係数は、既往の研究(日本建築学会(2007)[64])にある設計せん断力係数 C_B と周期 T_1 の関係から$C_B = 0.3/T_1$ としている。すなわち、平均的な耐力 Q は $Q = 0.45/T_1$ と設定している。

d) 検討に用いている長周期地震動

東海-東南海-南海の 3 連動地震(紀伊半島沖から破壊開始、陸地寄りアスペリティ)モデルでシミュレーションした東京付近の 2km メッシュごとの地震動を設定している。検討に用いている長周期地震動のある周期での擬似速度応答スペクトル値の分布を図 4.2-4 に示す。3 秒～5 秒では中央本線の南側や所沢周辺など局所的に応答が大きくなる場所がある。東京都心部に比べて横浜や東京都西部ではあまり大きくない(阿部ほか(2013))。上記のシミュレーション波形に関する出典の記載はないが、阿部ほか(2013)の「まとめ」には「南海トラフ地震に対する長周期地震動予測地図検討のため、東京近傍での長周期地震動の面的な被害評価を試行した。」と記載されている。

e) 被害の予測結果

検討用長周期地震動に対して求めた超高層建物の最大層間変形角の面的分布を図 4.2-5 に示す。想定する超高層建物は 30 階～60 階までの 4 種としている。埼玉県南部や東京都内中央本線の南側の地域では30階建と40階建で層間変形角が1/100 (0.01) radを超えるが、それ以外は概ね1/100 rad以下となっている。1/100 radは通常の設計クライテリアであり、それ以上は設計クライテリアを超えた大きな応答となり大きな被害が発生する可能性があると述べられている(阿部ほか(2013))。

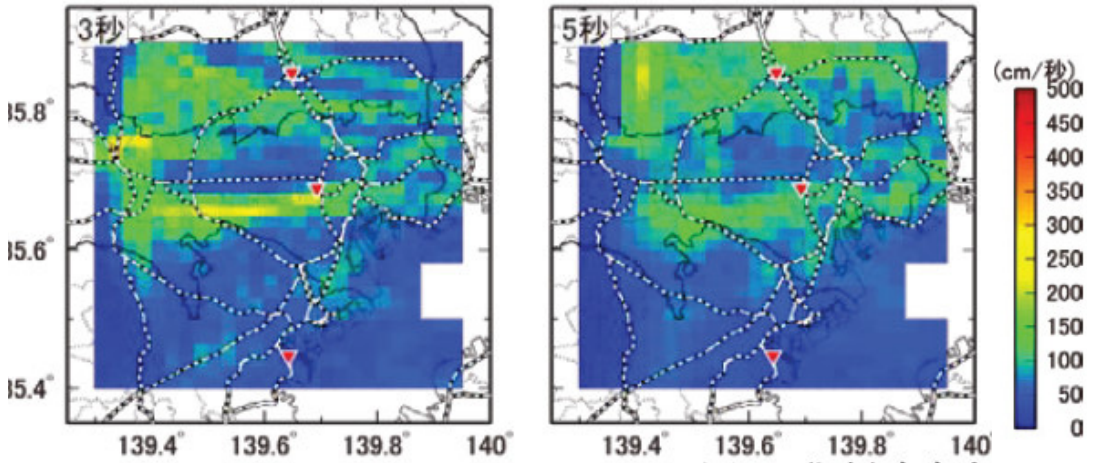


図 4.2-4　擬似速度応答スペクトル値の分布

(阿部ほか(2013)図 6 より)

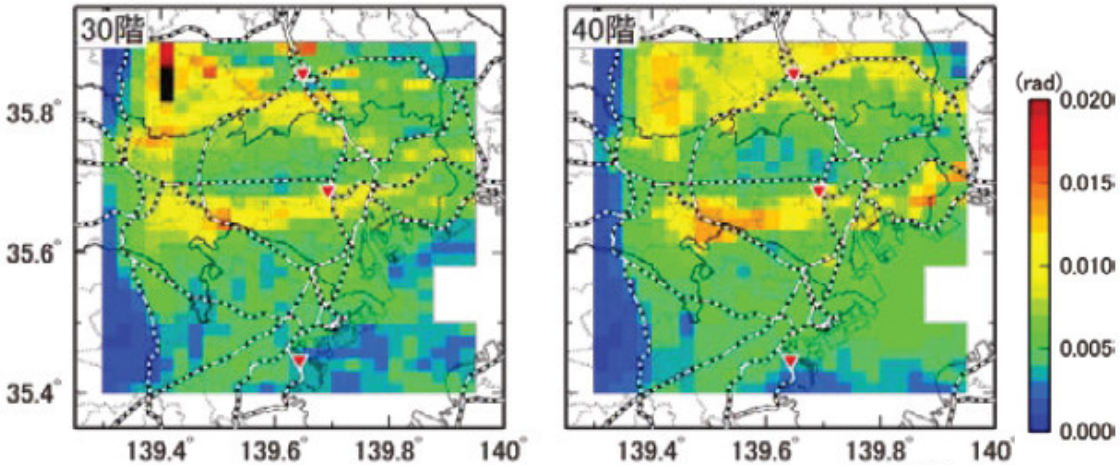


図 4.2-5　応答最大層間変形角の分布

(阿部ほか(2013)図 7 より)

(2) 新井ほか(2011)[65]による被害の予測手法

建物の構造種別や層数を考慮した被害の予測手法を提案している。この手法では、それぞれの建物被害と対応した地震動強さ指標が用いられている。この手法の予測対象は建物(構造部材)であり、建物(非構造部材)と家財は予測対象とはなっていない。

1) 建物種別の分類

建物層数の違いによって被害が対応する地震動の周期帯(地震動強さ指標)が異なり、また、木造建物と非木造建物の耐震性能(被害関数)が異なることから、建物群を木造、中低層(10 階以下)非木造、高層(11 階以上)非木造の 3 つの建物種別に分類している。

非木造建物の中低層と高層を 10 階で分けた理由については、以下のように記述されている。

i) 非木造建物の大部分を占める鉄筋コンクリート造建物の 1～10 階の弾性周期が木造建物の弾性周期とほぼ同じ 0.2～0.5 秒となる。
ii) 建物の被害を評価する際の地震動指標についても、既往研究(境(2009)[66]、熊本ほか(2008)[67])において同じ指標(1-1.5 秒平均速度応答)が提案されている。
iii) 上記の 2 点から、木造と中低層(10 階以下)非木造については、被害関数における地震動強さ指標として同じものを用いることができると考えられる。

なお、周期 T_1 秒から T_2 秒までの平均速度応答 $V_{T_1-T_2}$ は、次式のように定義されている。

$$V_{T_1-T_2} = \frac{1}{T_2 - T_1}\int_{T_1}^{T_2} V(T)dT \qquad (4.2\text{-}1)$$

T_1, T_2 ：下限周期、上限周期
$V(T)$ ：周期 T の 弾性速度応答(減衰定数 5%、水平 2 方向ベクトル和)

2) 被害関数

被害率として、木造建物に対しては全壊率、中低層非木造建物と高層非木造建物に対しては大破率が用いられている。これらの建物に対する被害関数は、以下のように設定されている。被害関数における地震動強さ指標としては、木造建物と中低層非木造建物に対しては 1-1.5 秒平均速度応答、高層非木造建物に対しては 2-4 秒平均速度応答が用いられている。1-1.5 秒平均速度応答を用いている理由は、1)に示したように既往研究(境(2009)、熊本ほか(2008))において、木造建物と中低層非木造建物に対しては同じ地震動指標が提案されているためである。なお、高層非木造建物に対して 2-4 秒平均速度応答が用いられている理由については、論文に記載されていない。

(4.2-2)式と(4.2-3)式は 1993 年釧路沖地震から 2008 年岩手沿岸北部地震までの 17 地震 61 記録とその周辺の実被害データを基に導かれたものであるが、(4.2-4)式については、高層非木造建物の実被害データがほとんど存在しないため、これらの強震記録を用いて、様々な高層建物を対象とした地震応答解析結果に基づいて設定したと述べられている(新井ほか(2011))。

$$D_w = \Phi(2.90 \log V_{1-1.5} - 8.15) \quad (4.2\text{-}2)$$

$$D_l = \Phi(2.26 \log V_{1-1.5} - 7.07) \quad (4.2\text{-}3)$$

$$D_h = \Phi(5.78 \log V_{2-4} - 13.94) \quad (4.2\text{-}4)$$

D_w, D_l, D_h ：木造建物，中低層非木造建物，高層非木造建物の被害率

$V_{1-1.5}, V_{2-4}$ ：1-1.5 秒平均速度応答，2-4 秒平均速度応答

Φ ：標準正規分布の累積確率

3) 平均速度応答の予測式

1-1.5 秒平均速度応答と 2-4 秒平均速度応答の予測式として、下記の式を提案している。

$$V_{1-1.5} = \frac{1}{0.5}\left(1.5 \cdot 10^{aI_{JMA}+b} - 1.0 \cdot 10^{c\log PGA+d}\right) = 3 \cdot 10^{aI_{JMA}+b} - 2 \cdot 10^{c\log PGA+d} \qquad (4.2\text{-}5)$$

$$V_{2-4} = \frac{1}{2.0}\left(4.0 \cdot 10^{eI_{JMA}+f} - 2.0 \cdot 10^{g\log PGV+h}\right) = 2 \cdot 10^{eI_{JMA}+f} - 2 \cdot 10^{g\log PGV+h} \qquad (4.2\text{-}6)$$

$V_{1-1.5}, V_{2-4}$ ：1-1.5 秒平均速度応答，2-4 秒平均速度応答
I_{JMA} ： 計測震度
PGA ：最大地動加速度(cm/s^2)
PGV ：距離減衰式による最大地動速度(cm/s)
$a \sim h$ ：回帰係数

回帰係数$a \sim h$は、1993 年釧路沖地震から 2008 年岩手沿岸北部地震までの 17 地震 61 記録を用いて最小二乗法により決定している。

予測式より求めた平均速度応答と観測記録より算出した平均速度応答との対応関係を図 4.2-6 に示す。1-1.5 秒平均速度応答と 2-4 秒平均速度応答がそれぞれ精度よく予測できていると述べられている(新井ほか(2011))。

波形データが得られない震度観測点においては、計測震度と最大地動加速度が得られるが、最大地動速度は得られない。このため、安中ほか(1997)[68]による最大地動速度PGVの距離減衰式が用いられている。

$$\log PGV = 0.697M_j + 0.00293H - \log X - 0.00163X - 2.116 \qquad (4.2\text{-}7)$$

M_j ：気象庁マグニチュード
H ：震源深さ(km) (H >100km のときは H =100km とする)
X ：震源距離 (km)
(安中ほか(1997)では等価震源距離を、新井ほか(2011)では震源距離を用いている。)

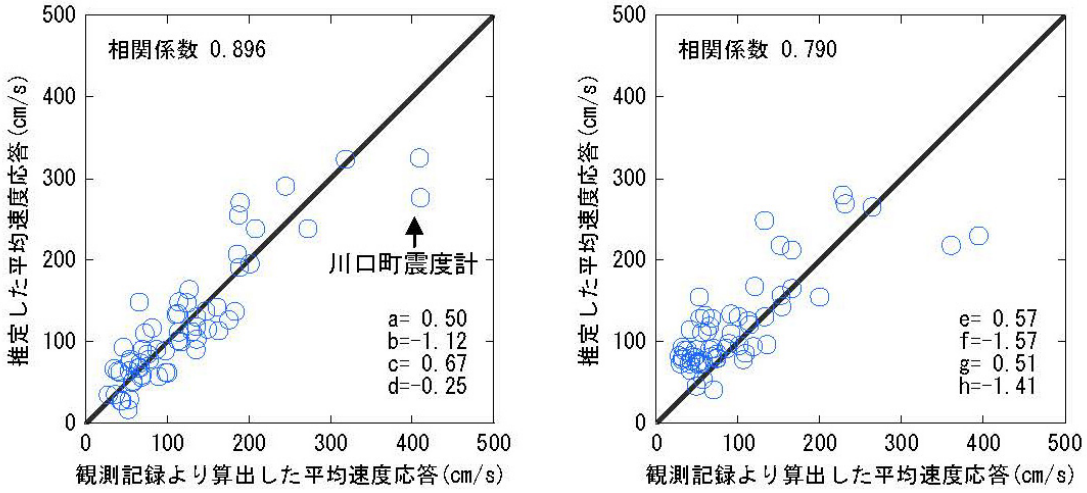


図 4.2-6　予測した平均速度応答と観測記録より算出した平均速度応答の対応
（新井ほか(2011) 図 3 より）

4)　過去の地震における被害の予測

1995 年兵庫県南部地震から 2009 年駿河湾の 14 地震に対して、提案した被害の予測手法を適用し、実被害との対応関係について検討している。なお、検証に用いる実被害データについては、木造、非木造、中低層、高層ごとのものは、現状ではほとんど存在しないため、建物全体としての実被害データにおける全壊棟数と、被害の予測結果における全壊・大破棟数の比較に留まっている。

過去の地震における被害の予測は、以下のような手順で行っている。

①　観測点における地震動強さ指標の算定

強震観測点における地震動強さ指標として、平均速度応答 $V_{1-1.5}$ と V_{2-4} を(4.2-5)式と(4.2-6)式により評価する。

②　地震動強さ指標の面的補間

被害の予測を面的に行うために、地震動強さ指標(平均速度応答 $V_{1-1.5}$ と V_{2-4})を面的に補間している。この面的補間のために、K-NET と KiK-net の強震記録のみを使った場合とこれらの記録に加えて、震度計情報を加えた場合についても検討を行っている。追加する震度計は、気象庁や地方自治体が設置したものの中で、震度 5 弱以上を記録したものとしている。なお、1995 年兵庫県南部地震においては、K-NET と KiK-net の設置以前であるため、震度計情報の追加の有無に関する場合分けは行っていない。

面的補間方法として、以下の 3 つを用いている。

・重み付け平均

距離による重み付け平均を行う方法であり、求めたい任意点から最大 50km 以内かつ最大 5 点の観測点における地震動強さ指標を用いて、次式による距離の重み付けを行い、任意点における地震動強さ指標Vを算出する。

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{5} \frac{V_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^{5} \frac{1}{d_i}} \tag{4.2-8}$$

V_i ：i 観測点における地震動強さ指標
d_i ：任意点と i 観測点の距離

・三角形線形補間

三角形線形補間法は、三角形で囲まれた任意点を近似するものであり、連立方程式を使用して解く方法である。三角形の内部での地震動強さ指標を一次式で近似できるとすれば、地震動強さ指標を変数が 3 つの連立方程式で表すことができ、連立方程式を解くことにより、任意点の地震動強さ指標を求めることができる。

・Simple Kriging

Simple Kriging 法は、平均値(トレンド成分)と共分散を既知として補間する方法である。基盤面における(4.2-9)式に示す安中ほか(1997)の加速度応答スペクトルの値を擬似速度応答スペクトルにし、それをもとに算出した基盤相当の値の残差をランダム成分として空間補間を行っている。共分散関数は距離に比例する指数関数型とし、相関距離は既往の研究より 20km に設定されている。

$$\log SH = c_m M_j + c_h H - \log X - bX + c_0 \tag{4.2-9}$$

SH ：水平加速度応答スペクトル(cm/s^2)
M_j ：気象庁マグニチュード
H ：震源深さ(km)
X ：震源距離(km)
c_m, c_h, b, c_0 ：係数

補間位置は、重み付け平均と三角形線形補間については地表と基盤、Simple Kriging については基盤としている。また、1995 年兵庫県南部地震においては、気象庁や関西地震観測研究協議会など様々な機関から公開されている強震波形データを用いて、面的補間方法と補間位置だけを変化させている。

面的補間を工学的基盤上で行う場合は、対象とする地震動指標(平均速度応答$V_{1-1.5}$とV_{2-4})の表層地盤の増幅率が必要となる。この手法では、$V_{1-1.5}$の増幅率として先名ほか(2009)[69]による微地形区分ごとのスペクトル増幅率、V_{2-4}の増幅率として J-SHIS で公開されている微地形区分ごとの最大速度の増幅率を用いている。

3 つの面的補間方法を適用する際の場合分けを表 4.2-5 に示す。

表 4.2-5　適用の際の場合分け(新井ほか(2011)表 3 より)

補間方法	補間位置	K-NET・KiK-net の強震記録のみ	震度計情報を加える
重み付け平均	地表	KKiK (重み付け地表)	KKiK+震度計 (重み付け地表)
	基盤	KKiK (重み付け基盤)	KKiK+震度計 (重み付け基盤)
三角形線形補間	地表	KKiK (三角形地表)	KKiK+震度計 (三角形地表)
	基盤	KKiK (三角形基盤)	KKiK+震度計 (三角形基盤)
Simple Kriging	基盤	KKiK (Kriging基盤)	KKiK+震度計 (Kriging基盤)

実被害(全壊数)と被害の予測結果(全壊･大破建物数)を比較した結果を図 4.2-7 に示す。実被害は消防庁のホームページで公開されている災害情報を用いているが、消防庁の全壊数は、(4.2-2)式～(4.2-4)式の基となった研究者による判定のほぼ 2 倍となるため(山口ほか(1999)[70])、1/2 の値を実際のデータとして用いている。

高層非木造建物の被害の予測結果(全壊・大破建物数)については、1995 年兵庫県南部地震では約 110 棟～140 棟、2007 年新潟県中越沖地震では数棟の被害となっており、その他の地震では 0 となっている。このため、新井ほか(2011)による検証は、主に木造建物と中低層非木造建物を対象とした検証となっている。

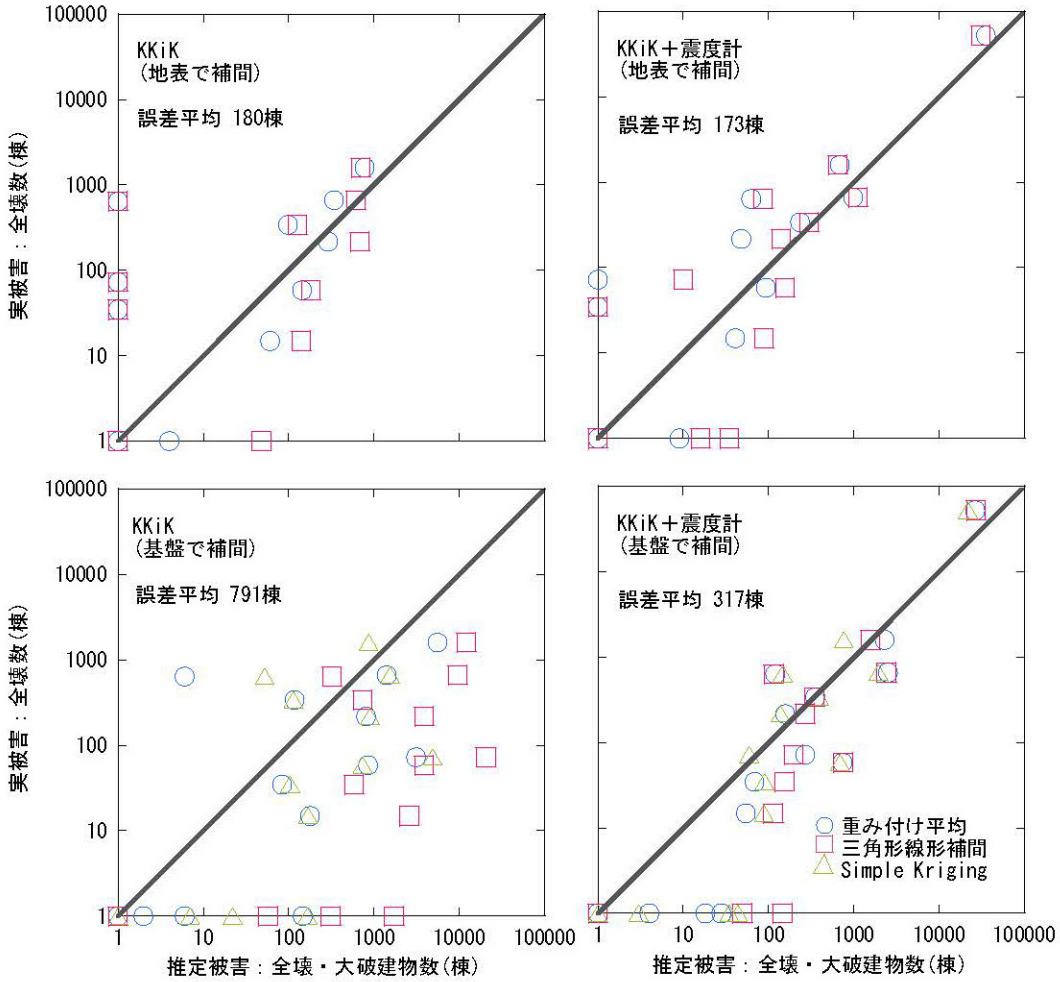


図 4.2-7　全壊・大破建物数と全壊数の対応(新井ほか(2011)図 6 より)

4.2.4 簡易応答評価式を用いる手法

高層建物の各階の応答加速度と層間変形角を簡易応答評価式により算定し、これらの応答量から家具・機器類の転倒・移動危険性と非構造部材の損傷可能性を評価する手法である。この手法の予測対象は建物(非構造部材)と家財である。

(1) 中村ほか(2005)[71]による被害の予測手法

中村ほか(2005)は、田村ほか(2005)による高層建物の簡易応答評価式を用いて、高層建物における家具・機器類の転倒・移動危険性と非構造部材の損傷可能性を評価する手法を提案している。また、提案手法の適用性検証のため、2004 年新潟県中越地震における非構造部材の被害状況と提案手法による評価結果との対応関係を調べている。

1) 家具・機器類の転倒危険性評価

家具・機器類の転倒危険性については、金子(2003)[72]により提案されている家具分類ごとの転倒率Rで判定している。

$$R = \begin{cases} \alpha \cdot \Phi\left((lnA_f - \lambda)/\zeta\right) & F_f \le F_b \\ \alpha \cdot \Phi\left((lnV_f - \lambda)/\zeta\right) & F_f > F_b \end{cases} \qquad (4.2\text{-}10)$$

A_f (cm/s^2)，V_f (cm/s) ：床の最大応答加速度と最大応答速度

Φ ：平均値λ，標準偏差ξ (対象とする家具分類の寸法の分布等から算定)の正規分布関数

F_f (Hz)：床応答の等価振動数[$= A_f/(2\pi V_f)$]

F_b (Hz)：家具の形状(奥行きB (cm)，高さH (cm))から算定される境界振動数

[$= 15.6/\{H^{0.5}(1 + B/H)^{1.5}\}$]

α ：床の滑りにくさを表す指標で、家具分類と床分類ごとに設定

家具分類は以下の 4 種類としており、家具の配置条件も考慮している。

H1　：高さH≧150cm で、「壁際」以外に配置
H2　：H≧150cm で、「壁際」に配置
L1　：90cm ≦H ＜150cm で、「壁際」以外に配置
L2　：90cm ≦H＜150cm で、「壁際」に配置

床は滑りにくさにより 3 分類(床 A, B, C)としている。床 B の場合の 4 分類の家具の転倒率と床応答との関係を図 4.2-8 に示す。転倒危険性は転倒率の大きさにより 4 段階に分類されている。

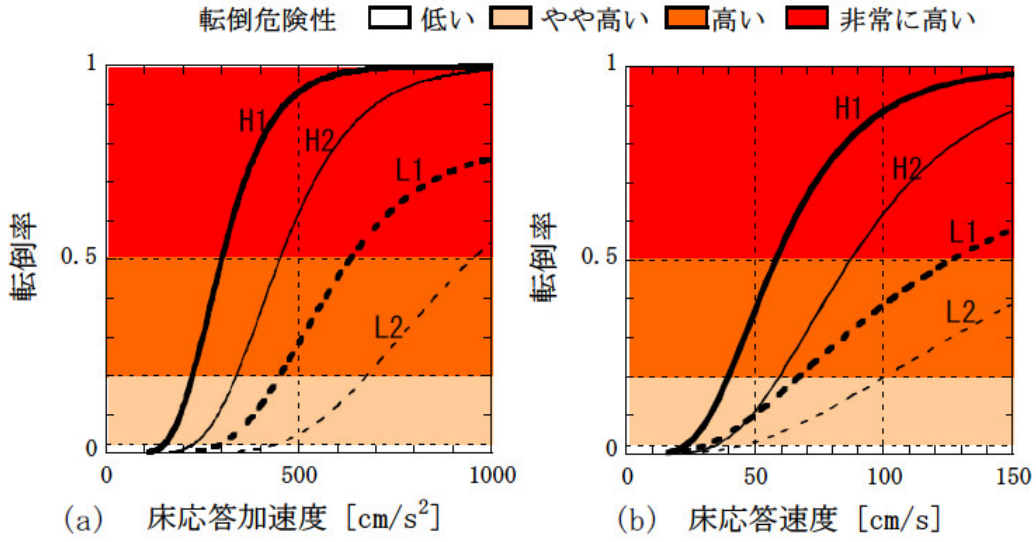


図 4.2-8　家具の転倒率と転倒危険性評価(中村ほか(2005) 図 1 より)

2)　家具・機器類の移動危険性評価

家具・機器類の移動危険性については、移動確率と移動量の 2 つの指標で判定している。移動確率は$1-\alpha$とし、移動量dは、摩擦係数μ、床応答の等価振動数F_f、床の最大応答速度V_fを用いて金子ほか(1999)[73]の提案式で評価している。V_fとdとの関係を図 4.2-9 に示す。移動確率と移動量による移動危険性の評価法を図 4.2-10 に示す。移動確率が高く移動量が大きいものほど危険性が高いと評価している。

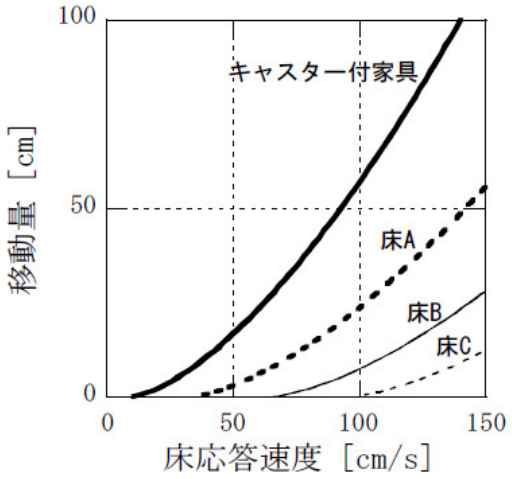


図 4.2-9　家具の移動量評価(中村ほか(2005)図 2 より)

移動危険性　低い　やや高い　高い　非常に高い

		移動確率　1−α			
		1−α=0	0<1−α<0.5	0.5≦1−α<1	1−α=1
移動量δ［cm］	δ=0				
	0<δ<2				
	2≦δ<20				
	20≦δ				

図 4.2-10　家具の移動危険性評価(中村ほか(2005)図 3 より)

3)　非構造部材の耐震性分類と損傷レベルの設定

非構造部材については、耐震実験等の文献を基に層間変形角(あるいは加速度)に対する損傷レベルを整理し、多様な非構造部材の耐震性をある程度統一的に扱えるように、耐震性を表 4.2-6 に示す 4 つに分類している。

表 4.2-6　非構造部材の耐震性分類(中村ほか(2005)表 1 より)

耐震性分類	被害と相関の高い指標	耐震性	部材例
A	層間変形角	高	・ALC　(挿入筋構法以外) ・カーテンウォール ・乾式間仕切壁 (軸組下地ボード)
B	層間変形角	中	・ALC　(挿入筋構法) ・乾式間仕切壁 (直張りボード)
C	層間変形角	低	・タイル (RC下地 湿式仕上げ)
D	層間変形角と加速度	―	・天井

損傷が層間変形角による外壁・間仕切壁は、耐震性の高さで 3 つに分け(分類 A, B, C)、損傷が層間変形角と応答加速度の両方による天井を分類 D としている。

耐震性分類 A, B, C の非構造部材について、層間変形角と損傷レベルの関係を図 4.2-11 のように設定している。損傷レベルは被災度 0(被害なし)、被災度 1(軽微な被害・小規模補修必要)、被災度 2(中規模な補修必要)、被災度 3(大規模な補修・取替えが必要)の 4 段階に区分している。

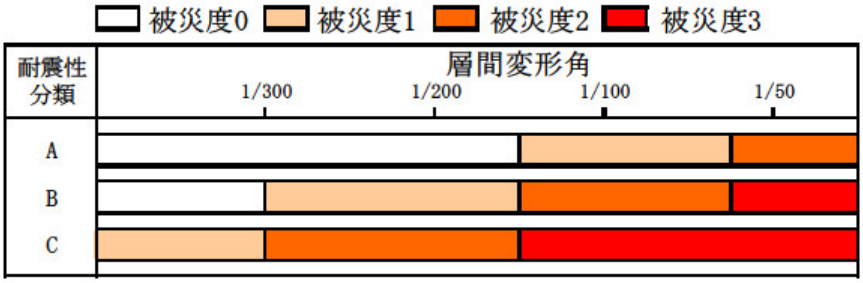


図 4.2-11　耐震性分類(A, B, C)の層間変形角と損傷レベルの関係
(中村ほか(2005)図 4 より)

4)　2004 年新潟県中越地震の非構造部材の被害との対応

中村ほか(2005)は、2004 年新潟県中越地震で被災した長岡市、十日町市、小千谷市の非木造建物の外観調査による非構造部材の被害状況と上記の手法による評価結果との比較を行っている。

3 市における地震観測記録の最大加速度と最大速度から田村ほか(2005)の簡易応答評価式を用いて 3 階建 S 造建物の最大層間変形を計算し、階高を 350cm と仮定して、最大層間変形角の平均値を算出している。可動窓ガラス(耐震分類 A)、ALC[挿入筋構法](B)、現場張りタイル(C)、ラスモルタル(C)についての損傷評価結果と 3 市の被害状況との比較結果を図 4.2-12 に示す。評価結果は概ね被害状況と対応していると述べられている。

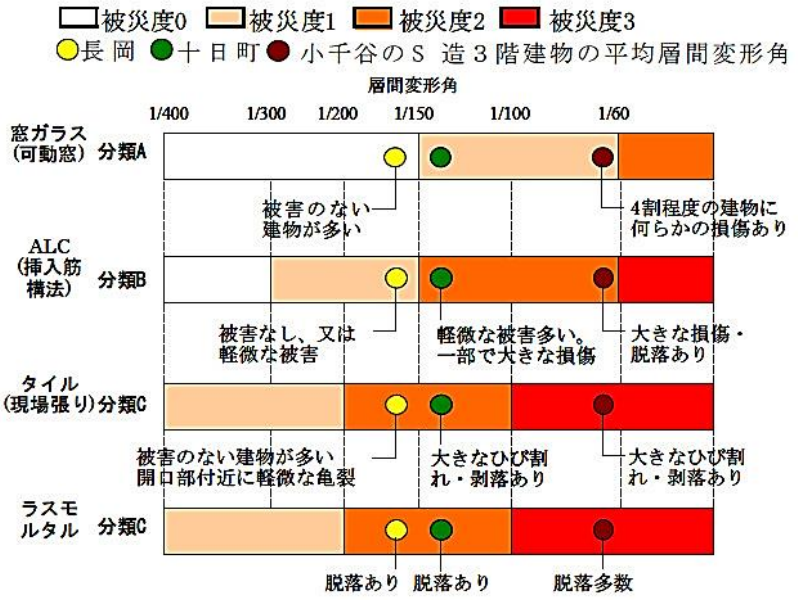


図 4.2-12　2004 年新潟県中越地震の非構造部材の損傷評価結果と被害状況
(中村ほか(2005) 図 5 より)

4.2.5　長周期地震動による被害の予測手法の比較

4.2.2 から 4.2.4 で示した被害の予測手法について、評価対象、予測内容、手法の検証状況、メリットおよびデメリットをまとめたものを表 4.2-7 に示す。

なお、これらは 2011 年東北地方太平洋沖地震より前の手法であり、2011 年東北地方太平洋沖地震の被害を説明する検討は行われていない。

表 4.2-7　長周期地震動による被害の予測手法の比較

	時刻歴応答解析を行う手法 (恒川ほか(2013))	応答スペクトルと入力エネルギースペクトルを用いる手法 (阿部ほか(2003))	簡易応答評価式を用いる手法 (中村ほか(2005))	応答スペクトルを用いる手法 (新井ほか(2011))
評価対象	建物(構造部材) 建物(非構造部材)	建物(構造部材)	建物(非構造部材) 家財	建物(構造部材)
用いる地震動情報	入力地震動の加速度時刻歴	Sa-Sd 曲線および入力エネルギースペクトル	最大加速度 最大加速度と最大速度の比(A/V)	速度応答スペクトル
建物のモデル化	3 次元モデルや曲げせん断棒モデル	等価 1 自由度系モデル(復元力特性は Bi-Linear 型)	多質点のせん断棒モデル	—
被害の予測に用いる指標	最大層間変形角 最大床応答加速度	代表点変形角	最大層間変形角 最大床応答加速度	2～4 秒の平均速度応答
上記指標の評価手法	時刻歴応答解析	Sa-Sd 曲線および入力エネルギースペクトル	簡易応答評価式	回帰式
用いる被害関数	小破、中破、大破などに対する層間変形角や応答加速度を設定	被害関数は設定されていない	損傷度に対応する層間変形角と応答加速度の閾値を設定	正規分布の累積関数
予測内容	各階の部位別被害率	最大層間変形角 部材累積塑性変形倍率	各階の部位別損傷度 (0, 1, 2, 3)	高層非木造の建物被害率
被害関数の設定根拠	設計クライテリアや既往の実験結果	—	既往の耐震実験等	強震記録による様々な高層建物を対象とした応答解析結果
予測手法の検証状況	行われていない	東海-東南海-南海地震に対する被害の予測を行っているが、過去の地震に対する検証は行われていない	2004 年新潟県中越地震における長岡市、十日町、小千谷市の非木造建物に対して検証を実施	1995 年兵庫県南部地震までの 14 地震に対して主に木造、中低層建物に対する検証を実施
その他の特徴	PML(Probable Maximum Loss)の評価手法	長周期地震動の影響を考慮	非構造部材を耐震性に基づいて 4 種類に分類	地震動強さ指標の面的補間
メリット	高精度である	多くの建物に適用可能	多くの建物に適用可能	多くの建物に適用可能
デメリット	振動解析モデルの設定と入力地震動の評価が必要であり、多くの建物には適用困難	簡易予測のため高さ方向の被害が適切に予測できない場合があり、応答スペクトルと入力エネルギースペクトルの設定が必要	建物の非線形性が考慮されていない	過去の地震に対する十分な検証が行われていない

参考文献

1) 独立行政法人 建築研究所, 2013, 長周期地震動と建築物, BRI NEWS, Vol. 62.
2) 工藤一嘉, 2005, 長周期地震動について, 配管技術, 47, 11, pp. 4-11.
3) 工藤一嘉, 2008, 長周期地震動研究の現状と課題, KIZUKU, Vol. 31, No.2, 日本大学生産工学部建築工学科教室, pp. 2-3.
4) 座間信作, 1993, やや長周期の地震動, 地震, 第2輯, 46, pp. 329-342.
5) 座間信作, 2009, 長周期地震動, 地震, 第2輯, 61, pp. 433-440.
6) 座間信作, 2014, 巨大地震と石油タンクのスロッシング, Safety & Tomorrow, No. 154, pp. 25-33.
7) 笹谷努, 前田宣浩, 高井伸雄, 2006, 北海道の長周期地震動と深部地盤構造：レビュー, 物理探査 第59巻, 第4号, pp. 315-326.
8) 地震本部, 2012, 「長周期地震動予測地図」2012 年試作版 －南海地震(昭和型)の検討―
9) 岡田成幸, 鏡味洋史, 1978, 日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み, 日本建築学会論文報告集, 第267号, pp. 29-38.
10) Mamula, L., K. Kudo and E. Shima, 1984, Distribution of ground-motion amplification factors as a function of period (3-15 sec), in Japan, Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo, Vol. 59, pp. 467-500.
11) 川瀬博, 1993, 表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション, 地震, 第2輯, 46, pp. 171-190.
12) 古村孝志, 2004, 2004 年新潟県中越地震の地震波動伝播と関東平野の強い揺れ, http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/furumura/04Chuetsu/
13) 古村孝志, 武村俊介, 早川俊彦, 2007a, 2007年新潟県中越沖地震(M6.8)による首都圏の長周期地震動, 地學雜誌, 116(3), pp. 576 587.
14) 福和伸夫, 2013, 長周期地震動, 予防時報254, pp. 12-17.
15) 久美田岳, 小檜山雅之, 山崎文雄, 2002, 2000 年鳥取県西部地震の米子市被害調査結果における木造住宅被害の特性, 地域安全学会論文集 No.4, pp. 135-142.
16) 古村孝志, 早川俊彦, 2012, 2005年宮城沖の地震による地震波の伝播と強震動―短周期地震動による異常震域の形成と長周期地震動による関東平野の揺れ―, http://www.aob.gp.tohoku.ac.jp/wp-content/uploads/2012/05/050816m-15.pdf
17) 畑山健, 座間信作, 西晴樹, 2004, 2003 年十勝沖地震による周期数秒から十数秒の長周期地震動と石油タンクの被害, 地震, 第2輯, 57, pp. 83-103.
18) 北原武夫, 2004, 平成 15 年十勝沖地震の被害状況とその対応について, 建築防災, 2004年4月号, pp. 7-12.
19) 赤澤隆士, 2005, 大阪平野における 2004 年紀伊半島南東沖の地震の長周期地震動特

性，日本地震学会講演予稿集，P181.
20) Miyake, Hiroe and Kazuki Koketsu, 2005, Long-period ground motions from a large offshore earthquake: The case of the 2004 off the Kii peninsula earthquake, Japan, *Earth Planets Space*, Vol. 57, pp. 203-207.
21) 片岡俊一，2011，2008 年岩手・宮城内陸地震の際に宮城県仙北平野で観測されたやや長周期地震動の特徴，日本地震工学会論文集 第 11 巻，第 5 号，pp. 17-27.
22) 植竹富一，2012，東北地方太平洋沖地震及びその前震・余震で観測された東京湾岸の長周期地震動，日本地震工学会論文集 第 12 巻，第 5 号(特集号)，pp. 192-206.
23) 肥田剛典，永野正行，2012，アンケート調査に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震時の超高層集合住宅の揺れと被害，日本建築学会技術報告集 第 18 巻，第 39 号，pp. 579-584.
24) 前田宣浩，笹谷努，2006，2003 年十勝沖地震(Mw8.3)による周期約 20 秒の長周期地震動，北海道大学地球物理学研究報告，No. 69，pp. 175-190.
25) 古村孝志，武村俊介，纐纈一起，三宅弘恵，2007b，新潟県中越沖地震 － 強震動と長周期地震動， http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/furumura/07Chuetsu/
26) 独立行政法人　産業技術総合研究所　プレスリリース，2005，首都圏における長周期地震動増幅の可能性，
https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2005/pr20050426/pr20050426.html
27) Koketsu, Kazuki, Ken Hatayama, Takashi Furumura, Yasushi Ikegami and Shinichi Akiyama, 2005, Damaging Long-period Ground Motions from the 2003 Mw 8.3 Tokachi-oki, Japan Earthquake, *Seism., Res., Lett.,* Vol. 76, pp. 67-73.
28) 津野靖士，山中浩明，翠川三郎，山本俊六，三浦弘之，酒井慎一，平田直，笠原敬司，木村尚紀，明田川保，2012，2011 年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の本震記録と余震記録を用いた首都圏およびその周辺地域に於ける長周期地震動の特性，日本地震工学会論文集 第 12 巻，第 5 号(特集号)，pp. 102-116.
29) 気象庁，2013，長周期地震動に関する情報検討会，平成 24 年度報告書
30) 気象庁 HP，過去の長周期地震動における長周期地震動階級の事例，
http://www.data.jma.go.jp/svd/eew/data/ltpgm_explain/ltpgm_level_example.pdf
31) 太田外気晴，座間信作，2005，巨大地震と大規模構造物―長周期地震動による被害と対策―，共立出版，p.287.
32) 気象庁，2012，長周期地震動に関する情報のあり方，長周期地震動に関する情報のあり方検討会報告書
33) 畑山健，座間信作，2005，2004 年 9 月 5 日紀伊半島南東沖の地震による石油タンクのスロッシングと長周期地震動，消防研究所報告，第 99 号，pp. 52-67.
34) 藤田聡，2006，地震災害とエレベータ，予防時報 227，pp. 42-48.

35) 座間信作，畑山健，西晴樹，山田實，2013，東北地方太平洋沖地震による石油タンクのスロッシング被害と長周期地震動，圧力技術 第51巻，第1号，pp. 4-10.
36) 村松郁栄教授退官記念有志の会，1989，大自然の力，pp. 62-64.
37) 瀬尾和大，1986，地下構造に基づく地震記象の解釈，第 14 回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp. 63-68.
38) 気象庁，2011，東北地方太平洋沖地震時における長周期地震動による揺れの実態調査について，長周期地震動に関する情報のあり方検討会(第1回)資料，
http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/study-panel/tyoshuki_kentokai/kentokai1/siryou1.pdf
39) 山根義康，永野正行，肥田剛典，保井美敏，山本健史，井川望，田沼毅彦，2014，2011 年東北地方太平洋沖地震時における超高層集合住宅の室内被害の分析と建物応答との対応，日本建築学会技術報告集 第20巻，第44号，pp. 67-72.
40) 東京都財務局，2011，3月 11 日(金曜)に発生した地震による都庁舎設備への影響及び展望室の閉鎖について，
http://www.metro.tokyo.jp/INET/OSHIRASE/2011/03/2013e300.htm
41) 久保智弘，久田嘉章，相澤幸治，大宮憲司，小泉秀斗，2012，東日本大震災における首都圏超高層建築における被害調査と震度アンケート調査，日本地震工学会論文集 第12巻，第5号(特集号)，pp. 1-20.
42) 大阪府総務部，2011，咲洲庁舎の安全性等についての検証結果，
http://www.pref.osaka.lg.jp/attach/13203/00078593/230624file3-1.pdf
43) 日本建築学会，2013，長周期地震動と超高層建物の対応策　－専門家として知っておきたいこと－.
44) 高層住宅管理業協会，2011，東日本大震災の被災状況について(続報)，
http://www.kanrikyo.or.jp/news/data/hisaihoukoku20110921.pdf
45) 地震本部，2009，「長周期地震動予測地図」2009 年試作版
46) 地震本部，2016，「長周期地震動予測地図」2016 年試作版　－相模トラフ巨大地震の検討―
47) 内閣府，2015，南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告
48) 国土交通省，2010，「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」に関するご意見募集について，別紙1　観測データに基づく設計用長周期地震動の作成手法
49) 気象庁，2014a，長周期地震動に関する情報検討会 第7回資料，資料3：長周期地震動予測技術検討ワーキンググループからの報告について
50) 入倉孝次郎，釜江克宏，1999，1948 年福井地震の強震動　―ハイブリッド法による広周波数帯域強震動の再現―，地震，第2輯，52，pp. 129-150.
51) 大川出，佐藤智美，佐藤俊明，藤堂正喜，北村春幸，鳥井信吾，辻泰一，北村佳久，

2013, 超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討 -長周期地震動作成のための改良経験式の提案と南海トラフ３連動地震による超高層・免震建物の応答解析-, 建築研究資料, No.144 号, 622p.

52) 国土交通省, 2015, 「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策案について」に関するご意見募集について, http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000601.html

53) 佐藤智美, 大川出, 西川孝夫, 佐藤俊明, 関松太郎, 2010, 応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成, 日本建築学会構造系論文集, 第 649 号, pp. 521-530.

54) 佐藤智美, 大川出, 西川孝夫, 佐藤俊明, 2012, 長周期地震動の経験式の改良と 2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション, 日本地震工学会論文集第 12 巻, 第 4 号, pp. 354-373.

55) Morikawa, N. and H. Fujiwara, 2013, A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, Journal of Disaster Research, Vol. 8, No.5, pp. 878-888.

56) 横田崇, 池内幸司, 矢萩智裕, 甲斐田康弘, 鈴木晴彦, 2011, 長周期地震動の距離減衰および増幅特性, 日本地震工学会論文集 第 11 巻, 第 1 号, pp. 81-101.

57) 気象庁, 2014b, 長周期地震動予測技術検討ワーキンググループ第 3 回資料

58) 恒川裕史, 宇佐美徹, 中山信雄, 2013, 三次元弾塑性応答解析を用いた地震予想最大損失率に基づく性能設計の鋼構造物への適用, 日本建築学会技術報告集 第 19 巻, 第 43 号, pp. 843-848.

59) 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛, 2007, 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証, 日本建築学会大会構造系論文集, 第 614 号, pp.139-146.

60) 田村和夫, 中村豊, 金子美香, 神原浩, 2005, 高層建物の地震時安全性評価技術の開発（その１）全体概要と建物の簡易応答評価手法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2, pp.623-624.

61) 童華南, 山崎文雄, 1996, 地震動強さと新しい気象庁震度との対応関係, 生産研究 48 巻 11 号, pp. 547-550.

62) 阿部雅史, 鈴木芳隆, 神田克久, 岡野創, 小鹿紀英, 藤原広行, 2013, 長周期地震動に対する超高層建物の被害推定検討　その 1　超高層建物の応答と被害の簡易評価法, 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II, pp.1189-1190.

63) 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, 長周期地震動対策に関する公開研究集会資料, 日本建築学会構造委員会長周期建物対応 WG, pp. 237-255.

64) 日本建築学会, 2007, 長周期地震動と建築物の耐震性

65) 新井健介，境有紀，建物被害と相関を持つ地震動強さ指標を用い構造種別や層数を考慮した地震被害推定システムの開発，2011，日本地震工学会論文集　第 11 巻，第 4 号，pp. 88-107.
66) 境有紀，2009，建物被害と対応した地震動の周期帯の再検討－2007 年能登半島地震，新潟県中越沖地震のデータを加えてー，日本建築学会構造系論文集，第 642 号，pp. 1531-1536.
67) 熊本匠，境有紀，2008，非木造建物の被害と相関を持つ地震動の周期帯－2007 年能登半島地震，中越沖地震の非木造建物の被害状況とその対応ー，日本建築学会学術講演梗概集 B-2，pp. 675-676.
68) 安中正，山崎文雄，片平冬樹，1997，気象庁 87 型強震記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第 24 回地震工学研究発表会，pp. 161-164.
69) 先名重樹，翠川三郎，2009，地形・地盤分類に基づく地震動のスペクトル増幅率の推定，日本地震工学会論文集　第 9 巻，第 4 号，pp. 11-25.
70) 山口直也，山崎文雄，1999，1995 年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定，土木学会論文集，第 612 号，pp. 325-336.
71) 中村豊，田村和夫，金子美香，神原浩，2005，高層建物の地震時安全性評価技術の開発（その 2）家具・機器類の挙動評価と非構造部材の損傷評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2，pp.625-626.
72) 金子美香，2003，地震時における家具転倒率の簡易推定法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 B-2，pp. 61-62.
73) 金子美香，林康裕，田村和夫 1999，地震時における家具滑り量の簡易評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 B-2，pp. 537-538

地震保険研究31

過去の地震による長周期地震動と
その被害に関する調査

２０１７年3月発行

発行　損害保険料率算出機構（損保料率機構）
〒163-1029　東京都新宿区西新宿３－７－１
TEL　03-6758-1300（代表）
URL　http://www.giroj.or.jp

印刷　新日本法規出版株式会社
〒469-8455　愛知県名古屋市中区栄1-23-20