

## 地震動の周期に依存した建物被害と新たな課題

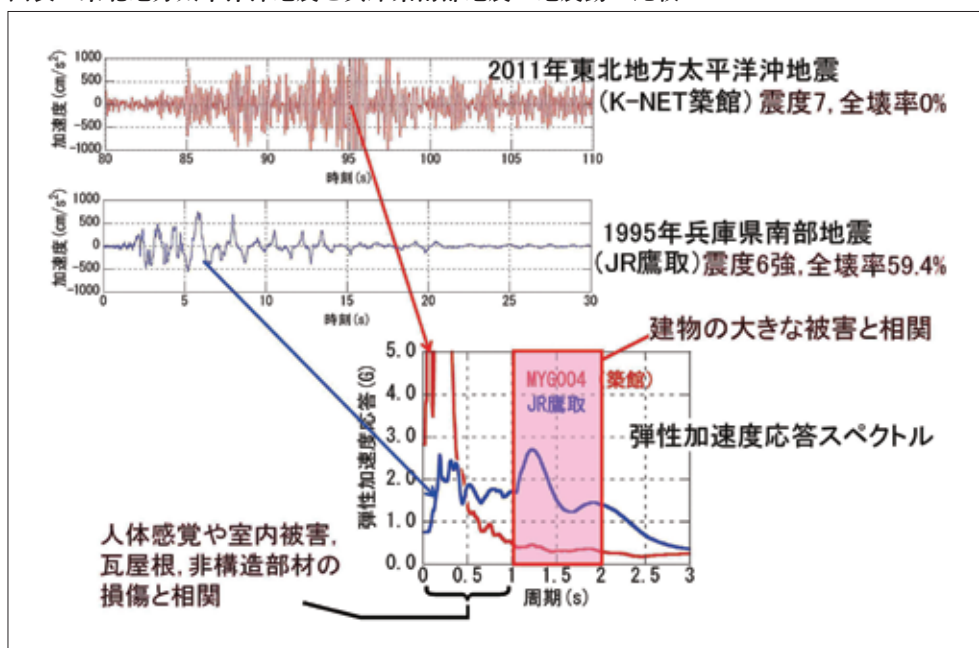
東日本大震災を起こした2011年東北地方太平洋沖地震と阪神・淡路大震災を起こした1995年兵庫県南部地震は、ともに多くの人命を奪い、甚大な被害を及ぼした。しかし、その被害の様相は全く異なる。東北地方太平洋沖地震は、大規模な津波被害を起こしたが、揺れによる建物被害は兵庫県南部地震の時ほど大きくはなかった。これは、東北地方太平洋沖地震が建物への影響が少ない周期1秒以下の地震動が顕著であったためである。一方、兵庫県南部地震は、建物に大きな被害を及ぼす周期1~2秒の地震動が顕著であった(図表参照)。

東北地方太平洋沖地震では、周期2秒以上の長周期地震動が首都圏で観測され、超高層ビルが大きく揺れた。しかし、既にダンパーや積層ゴムなどの制震や免震などの耐震対策がなされており、深刻な被害は報告されなかった。ただし、長周期地震動が長時間続いた場合や繰り返し起きた場合、超高層建物や免震建物が受ける影響については良く分かっておらず、今後の研究が必要である。

周期1~2秒の「やや短周期地震動」および周期2秒を超える「長周期地震動」は、現在使われている気象庁震度階という一指標だけでは表しきれない被害の様相をもたらす可能性がある。また、地震動の周期は、震源だけではなく、地盤構造や地震波の伝搬経路にも大きく影響され、同じ地震でも場所によって異なる。木造家屋や中・低層ビルに大きな影響を及ぼす「やや短周期地震動」に対して、これに特化した評価も重要である。

今後起きうる地震から被害を軽減するためには、地震学・地盤工学・土木建築工学といったそれぞれの学問・技術領域での個別の対応ではなく、領域間の相互連携や知識の共有と融合が必要である。

図表 東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の地震動の比較



提供：境有紀氏

# 地震動の周期に依存した 建物被害と新たな課題

市口 恒雄  
安全・システムユニット

松村 正三  
客員研究官

## 1 はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震は、約2万人の死者・行方不明者を出す東日本大震災を引き起こし、1923年の関東大震災以降最大の自然災害となった。ただし、ほとんどが津波による犠牲者であったため、地震動による被害はあまり注視されていない。現実には、地震動による被害も多様であった。地震災害の研究は、実際に起きた事跡を検証することが全てであり、私たちは、未曾有の大震災で明らかとなった事実に向け、それらから得られる教訓を謙虚に学ぶ必要がある。

科学技術政策研究所では、地震動による直接の建物被害に注目して、2012年2月7日に「東日本大震災の被害と防災の在り方」と題する講演会を行った。講演者および講演題目は以下の通りである。

- ①「揺れによる建物被害と防災システムの問題」 境有紀(筑波大学)
- ②「事業活動への影響と免震・制震の効果」 境茂樹 ((株)間組)

本報告では、両氏の講演内容に沿って東北地方太平洋沖地震による建物被害の特徴を紹介する。阪神・淡路大震災を引き起こした1995年兵庫県南部地震に比べて、東北地方太平洋沖地震では、一般住宅の全壊や大破といった構造部の損傷は少なく、被害は瓦屋根や壁などの非構造部分に集中しているという特徴が見られた。甚大な津波被害を出しかつ地震の震度も大きかった東日本大震災で、何故揺れによる建物崩壊が少なかったのかを明らかにし、今後の被害軽減に役立てたいということがこの講演会の主なテーマであった。

東北地方太平洋沖地震は、震源

近くの東北地方では主に短周期の地震動であったが、首都圏では長周期成分も見られ、超高層ビルが長時間にわたって大きく揺れた最初の事例ともなった。ここ数年の間に高い確率で起きるとされる首都圏直下型地震では、最大震度7の可能性も想定されており、兵庫県南部地震を上回る大きな建物被害も予想される。超高層建築を含め、首都圏の建物は本当に大丈夫なのか。もし、可能な対策があるとしたら、どのような対策があるのか。そういった問題も含め、少しでもその被害を少なくする方法を探ってみたい。

以上のように、両氏の講演内容の一部を紹介するとともに、将来の大震災に備えて、揺れによる建物被害についての教訓を汲み取ることが本稿の目的である。

## 2 地震動による建物被害の調査方法と調査結果

被害を受けた建物は、事後の安全性を確保するためにも、精密な調査が望まれる。しかし、被害を受けた建物を全て調査しても、被害総数は算出されるが、被害率と

いった数字は出てこない。被害率あるいは全壊率という数字は、被害の有無に拘わらず、地域全体を万遍なく調査して初めて得られるものである。現実には、広範囲の

全ての建物を調査することは不可能であり、むやみに調査しても震度や揺れ方との関係は明らかにできない。この関係を明らかにするためには、信頼できる地震計が設

置されている場所を選び、その地点を中心に半径何百メートルといったエリアを調査することが有効である。このように、建物被害の調査方法には、被害建物だけを調査して被害総数を算出する方法と、特定エリアの全棟調査により被害率を算出する方法がある。

日本には、(独)防災科学技術研究所が全国に約20kmの間隔で設置しているK-NETおよびKiK-netと呼ばれる強震観測施設が1,381箇所ある(図表1参照)。そのほかに、気象庁と自治体の強震観測設備がそれぞれ608箇所と2,839箇所存在する。それらの観測施設には、強い揺れでも針が振り切れない強震計やデータの送信装置などが装備され、地上に置かれた丈夫なケースに収納されている(図表1の写真参照)。

KiK-netは地中に設けた地震計と地表の強震計とがセットになったものである。K-NETおよびKiK-netで得られた地震波形などの記録は、インターネットで公開・配信されている<sup>2)</sup>。東北地方太平洋沖地震では、震度6弱以上を記録した強震観測点は200地点以上であった。

境有紀氏らの研究グループは、2011年3月16日から4月10日までの期間に、周辺の建物が多い個所などを考慮して、200地点の中から35地点を選んで調査を行った(図表2参照)。宮城県16地点、福島県7地点、栃木県6地点、茨城県6地点である。震度でいえば、震度7が2地点、震度6強が26地点、震度6弱が7地点となった。

現地調査の方法は、強震計が設置された観測点を中心に半径200m以内の建物全棟の被害チェックである。ただし、倉庫や車庫、および地滑りなどによる建物被害は対象外としている。半径200m以内と限定する理由は、この範囲内であれば、地震動が観測

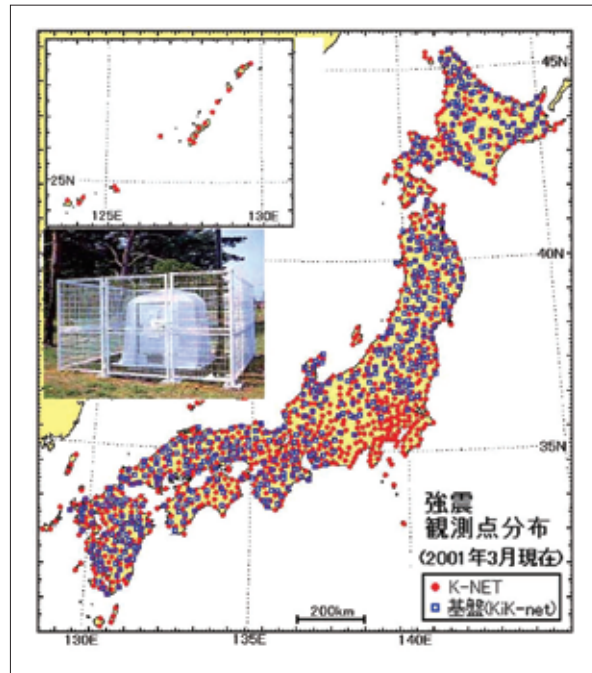
点とほぼ同じと見なせるからである。ただし、宅地の造成方法などによっては、家屋に伝わる地震動が大きく異なる場合もある。

現地では、建物の外観から全壊や大破を判定し、屋根瓦被害の有無を含めて、木造、RC造(鉄筋コンクリート構造)、鉄骨造など構造種別や階数などを区別して、地図上にプロットする。図表3の左側はK-NET塩竈の観測点(★印)を、右側は宮城県涌谷町にある気象庁の観測点(★印)を中心に半径200mの範囲内の建物を全棟調査した例である。これらの例では、建物の全壊・大破はなく、若干の瓦被害で済んでいた。ほかの地域の調査結果でも、被害状況は概ね同様であった。

研究グループによる建物被害調査の全体結果を図表4に示す。震度6弱の地点を一部含むが、概ね震度6強以上の地点での調査建物数の合計は2,954棟で、全壊・大破率は0.47%であった。

日本では、これまで全壊率30%以上の発生状況を以て、揺れの大きさを震度7と定義してきた。1996年以降の計測震度への改訂後も、

図表1 K-NETおよびKiK-netの強震観測地点と観測設備の写真



出典：参考文献1

図表2 東日本大震災による建物被害の調査地点



提供：境有紀氏

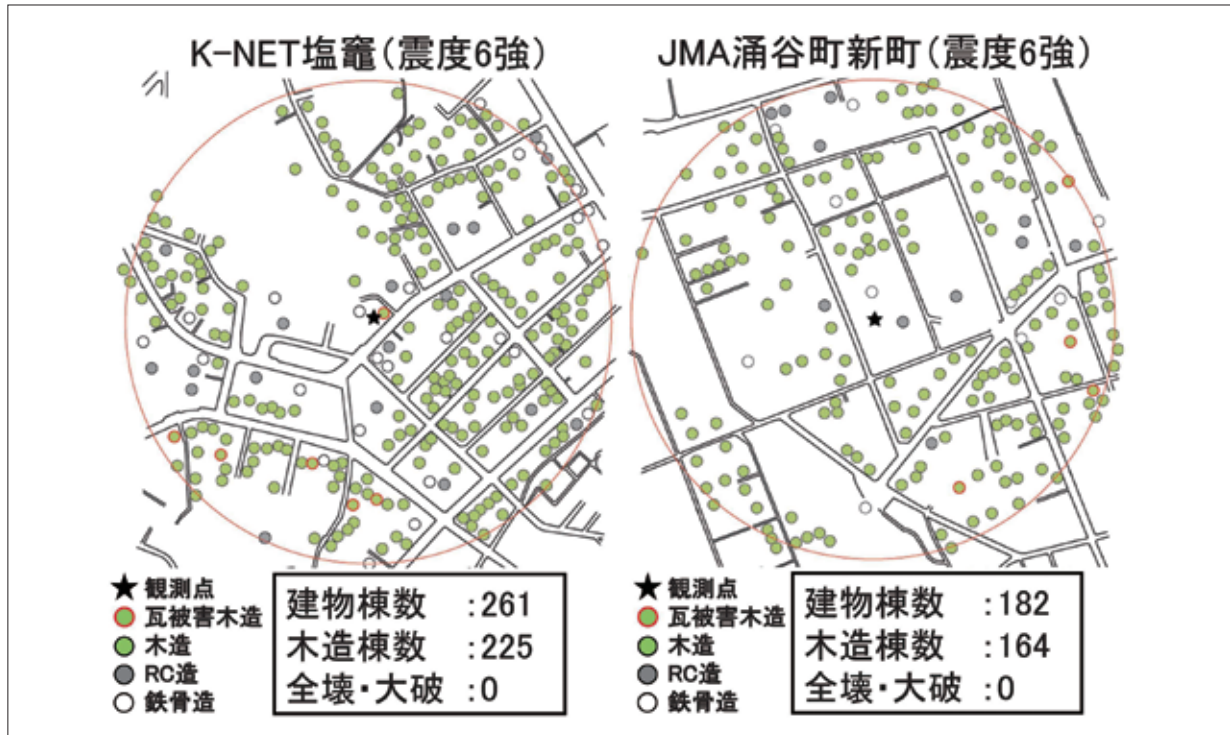
震度6強での全壊率は8~30%、震度7での全壊率は30%以上と評価されてきた。しかし、東北地方太平洋沖地震では、ほぼ震度6強以上での全壊・大破率が0.47%という極めて低い数値になっている。

強震観測点を中心に半径200mの範囲で全棟調査する方法は、全

壊・大破率などの被害率を算出でき、それを地震動と比較できる。ただし、恣意的に調査範囲を拡げることは統計学的信頼性を失わせるので、範囲外に全壊した建物があっても、その建物は調査対象にはならない。これと平行して、被害が大きかった建物を重点的に調

査し、どの部分がどういう風に壊れたかを調べる従来の方法による調査も、ほかのグループによって実施された。国土交通省国土技術政策総合研究所と(独)建築研究所の合同グループは、福島県内(三春町・二本松市・郡山市・福島市)や福島県・宮城県内(白河

図表3 東日本大震災による建物被害の調査例



提供：境有紀氏

図表4 東北地方太平洋沖地震による建物被害の調査結果

被害調査結果									
観測点名	計測震度	棟数	全壊・大破数	全壊・大破率(%)	観測点名	計測震度	棟数	全壊・大破数	全壊・大破率(%)
JMA大崎市古川三日町	6.21	257	7	2.72	K-NET古川	6.16	285	0	0.00
JMA筑西市舟生	6.06	27	0	0.00	K-NET銚田	6.41	17	0	0.00
JMA涌谷町新町	6.02	182	0	0.00	K-NET土浦	5.63	161	0	0.00
KiK-net岩瀬	6.24	17	0	0.00	k-NET日立	6.46	108	0	0.00
KiK-net西郷	6.00	8	0	0.00	鏡石町不時沼震度計	6強	169	0	0.00
KiK-net馬頭	6.14	14	0	0.00	須賀川市八幡町震度計	6強	229	5	2.18
KiK-net芳賀	6.50	59	0	0.00	宇都宮市白沢町震度計	6強	116	0	0.00
K-NET小川	5.97	146	1	0.68	笠間市中央震度計	6強	101	0	0.00
K-NET会津若松	5.86	199	0	0.00	高根澤町石末震度計	6強	155	1	0.65
K-NET岩沼	5.99	87	0	0.00	山本町浅生原震度計	6強	108	0	0.00
K-NET角田	5.83	159	0	0.00	真岡市石島震度計	6強	76	0	0.00
K-NET塩竈	6.02	261	0	0.00	大崎市鹿島台震度計	6強	123	0	0.00
K-NET白河	6.11	85	0	0.00	登米市南方町震度計	6強	3	0	0.00
K-NET須賀川	6.00	75	0	0.00	登米市米山町震度計	6強	18	0	0.00
K-NET仙台	6.38	21	0	0.00	東松島市矢本震度計	6強	200	0	0.00
K-NET相馬	5.85	159	0	0.00	名取市増田震度計	6強	181	1	0.55
K-NET築館	6.67	59	0	0.00	K-NET石巻	5.93	-	-	-
<b>震度6強以上の合計</b>							<b>2954</b>	<b>14</b>	<b>0.47</b>

提供：境有紀氏

市・須賀川市・仙台市)などの鉄筋コンクリート造や鉄骨造の建物の被害調査を行った<sup>3,4)</sup>。この調査結果でも、重大な被害は確認されたものの限定的であること、観測された震度の割には建物被害は大きくなく、外装材の被害はあっても構造的な被害は顕著でないこと、などが報告されている。また、大きな被害を受けた建物に

は、1978年の宮城県沖地震以前に建てられたものが多いことも報告されている。さらには、以前は水田であった地域での被害が大きいといった地盤条件の影響も指摘している。

このように、2つの独立した調査により、東北地方太平洋沖地震では、震度の割には揺れによる建物被害は大きくなかったことが明

らかになった。これは、建物の耐震性が向上している効果なのだろうか。あるいは、東北地方太平洋沖地震の揺れに何か特徴があったのだろうか。それを解き明かすために、次章では、建物被害の著しかった兵庫県南部地震(阪神・淡路大震災)の地震動との比較を試みる。

### 3 兵庫県南部地震と東北地方太平洋沖地震との比較

#### 3-1

##### 揺れの特徴の比較

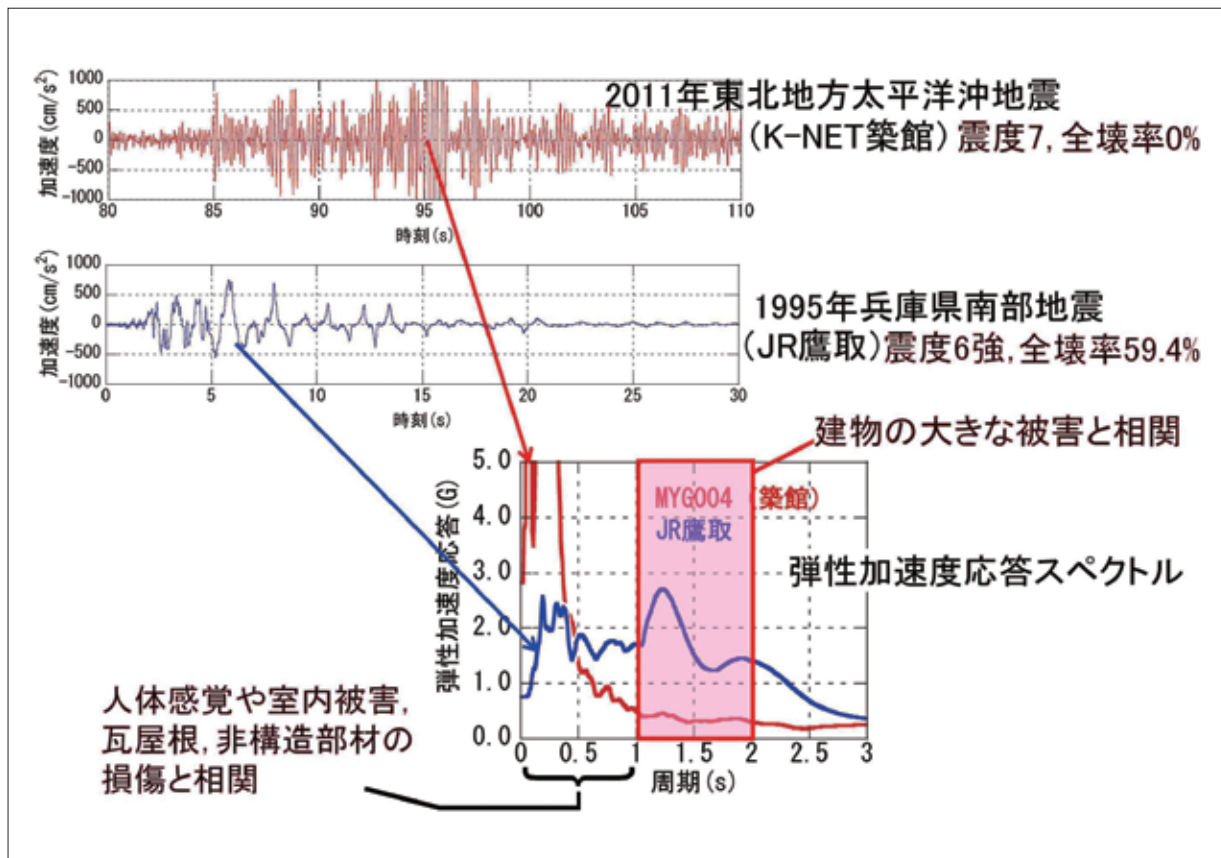
図表5は、東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の地震動の比較例である。それぞれの測定地点は、宮城県のK-NET 築館とJR西日本の鷹取駅構内である。築館

では震度7で全壊率0%であるのに対して、鷹取では震度6強に対して全壊率59.4%であり、両者には極めて大きな違いがある。

両者の揺れの特徴を見ると、大きな違いがあることがわかる。東北地方太平洋沖地震では短い周期の強い揺れが長時間続いたのに対して、兵庫県南部地震では比較的周期の長い揺れが観測されて

いた。地震動の縦軸の単位  $\text{cm/s}^2$  は加速度を示しており、通常は「ガル」と呼ばれる単位である。980  $\text{cm/s}^2$  を1G(重力加速度)として、Gで表すこともある。東北地方太平洋沖地震のグラフでは最大値が1,000ガルを超えていたが、1,000ガル以上の部分を省略して図示している。この地震動のグラフから、振動強度(弾性加速度応

図表5 東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の地震動の比較



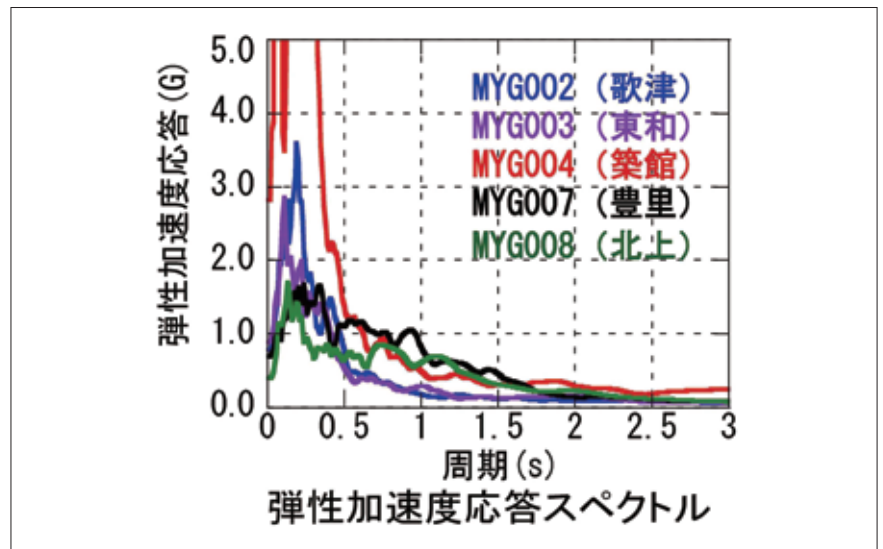
提供：境有紀氏

答) と周期との関係を表すグラフを描けば、2つの地震動の特徴の違いは一目瞭然である。東北地方太平洋沖地震では周期が0.5秒以下の振動強度が大きい、周期が1~2秒の領域では、兵庫県南部地震の方が振動強度は大きい。建物被害に関しては、周期が1~2秒の地震動の影響が大きく、被害率との相関も指摘されている。一方、周期が1秒以下の振動は、人体感覚と合致しており、瓦屋根や壁などの非構造部材や室内被害との相関が見られる。

東北地方のほかの測定地点でも、弾性加速度応答は、0.5秒以下の周期で大きく、建物被害に結びつく1~2秒周期では小さかった(図表6参照)。東日本大震災では、建物に影響する地震動が大きくなかったから、建物被害がさほど生じなかったのである。建物の耐震性が兵庫県南部地震以来向上したというわけではない。従って、東北地方太平洋沖地震という超巨大地震でも大丈夫だったからといって、今後の大地震で建物は大丈夫だろうと即断するわけにはいかない。

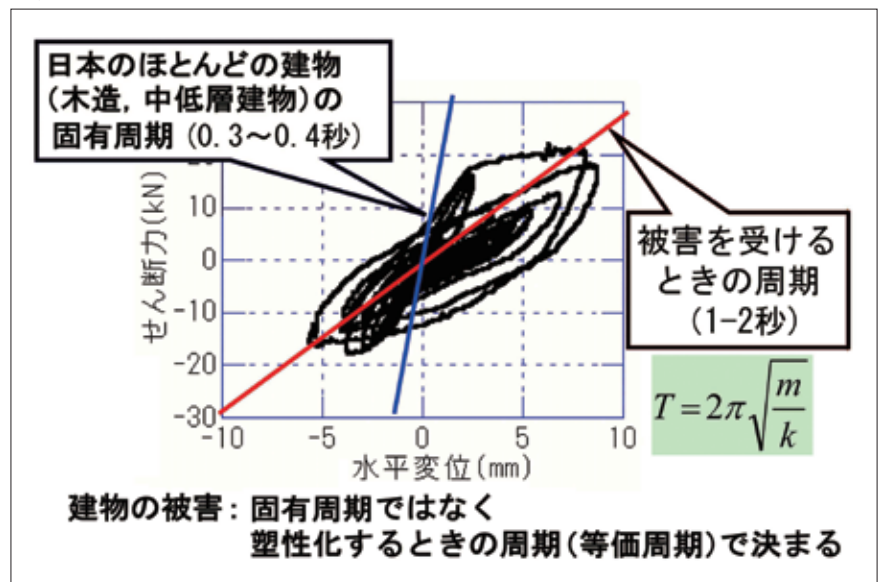
ただし、ほとんどの木造家屋や中低層建物は0.3~0.4秒の固有周期を持つことがわかっており、それよりも長い周期1~2秒の地震動で大きな建物被害が起きるといのは、奇妙な現象に思える。この固有周期0.3~0.4秒というのは弾性限界内での周期であり、弾性限界を超えて塑性変形が起き始めると共振する振動の周期は長くなると考えられる。建物の被害は、塑性化するときの等価周期で決まり、非線形モデルによるシミュレーションや模型実験の結果(図表7参照)によっても確かめられている。周期が1~2秒の地震動は、たとえ一回の振動であっても、建物の塑性化を引き起こして大きな被害を与えることがある。従って、周期が1~2秒の地震動は、「キラー・パルス」という呼称

図表6 複数の測定地点での地震動のスペクトル



提供：境有紀氏

図表7 模型実験による結果



提供：境有紀氏

で報道されることもある。

## 3-2

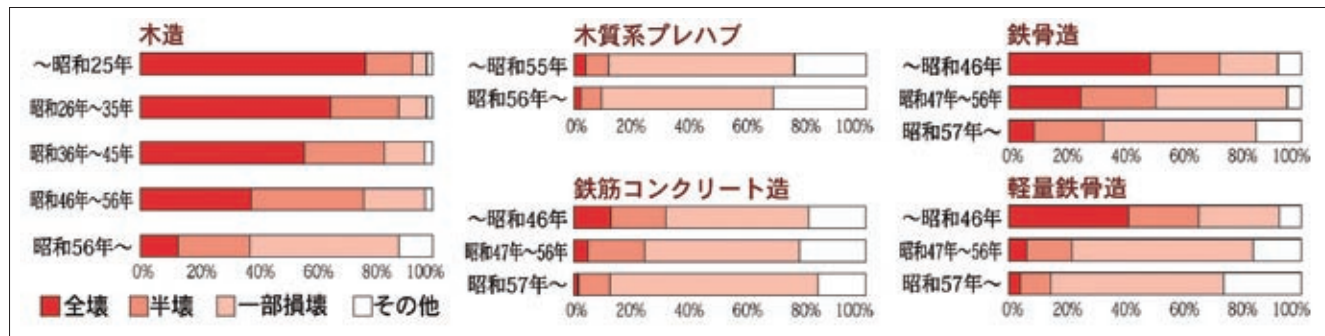
### 建物被害の比較

兵庫県南部地震は、全半壊の住宅が合わせて約25万棟という大きな建物被害を起こした。死者6,432名のうちの約80%が住宅倒壊による圧死と言われている。木造住宅の場合、1階の柱が折れて2階部分が下に落ちることにより、1階で就寝中の人々が圧死するケースが多く見られた。

芦屋市(人口約9万人)では、建物の全棟調査により、「芦屋市/建築物の被害と復旧」<sup>5)</sup>として詳細な記録を残している。芦屋市域全建築物15,421棟のうち、全壊は4,722棟、半壊は4,062棟となり、全・半壊率は57%に達した。建物数としては、木造住宅が圧倒的に多く、10,514棟のうち約70%が全壊または半壊の被害にあった。木造住宅に次いで多い鉄筋コンクリート造の建物も2,577棟のうち20%強が全・半壊している。

地震被害を受けた建物は、建築基準法が改正された1981年(昭

図表8 芦屋市における建築物の築年代別の被害状況



出典：参考文献6

和56年)6月以前に建てられた住宅が多く、しかも築年数が古いものほど全・半壊が多くなっている(図表8参照)。市域のほぼ中央を東西に縦断した震度7の帯上に位置する地域では、全・半壊率が90%を超えた地域も存在する。この地域では、人的被害も多く発生した。

柱が折れて上層階が落下する現象は、「層崩壊」と呼ばれる。層崩壊は、木造住宅だけではなく、鉄骨造や鉄筋コンクリートのビルでも起きた(図表9参照)。兵庫県南部地震の発生時刻が午前5時46分と早朝であったため、ビルの層崩壊による死傷者は少なかったと考えられる。もし、地震が昼に発生し、百貨店などの人の集まる商業ビルで層崩壊が起きれば、多数の死傷者が出たことは想像に難くない。

境有紀氏たちの調査によれば、東北地方太平洋沖地震の揺れによる建物の全壊・大破率はわずか0.47%である。しかし、国土交通省国土技術政策総合研究所と(独)建築研究所の合同チームの報告<sup>3,4)</sup>によれば、層崩壊した建物も存在し、建物によっては大きな被害を受けた。図表10(a)および(b)は、交差点に面した鉄筋コンクリート造の建物である。いずれも1階部分は店舗であり、耐力壁の少ない「ピロティ」構造となっていた。両者とも交差点に面した隅柱のせん断破壊が原因で1階部分が層崩壊を起こした。ただし、

1階が柱だけのピロティ住宅は、地震に耐えさえすれば流水圧を受けにくく、津波の被害からはのがれた例も報告されている。図表10(c)は大学の校舎で、以前から耐震強度の不足が指摘されており、補強を計画している段階での被災となった。敷地内のすぐ隣の建物では、外見上の被害は全く観測されなかった。図表10(d)は、一部損壊として最も多く観測された壁被害の例である。

前述のように、東北地方太平洋沖地震では0.5秒以下の周期の地震動が顕著であり、壁などの非構造部材や室内被害が多く発生した。また、天井材や照明器具の落下、立体駐車場のスロープの落下などで、首都圏でも死傷者が出た。住宅では瓦がずれるなどの被害が発生し、地盤の液状化による被害も発生した。

工場でも、天井材の脱落や内装材などの被害が生じた。電子部品工場のクリーン・ルームのエクспанション・ジョイント部がはずれて、気密性の確保が維持できなくなった例も報告されている。工場では、建物だけでなく製造装置の転倒など生産設備の損傷によっても大きな経済的被害を受

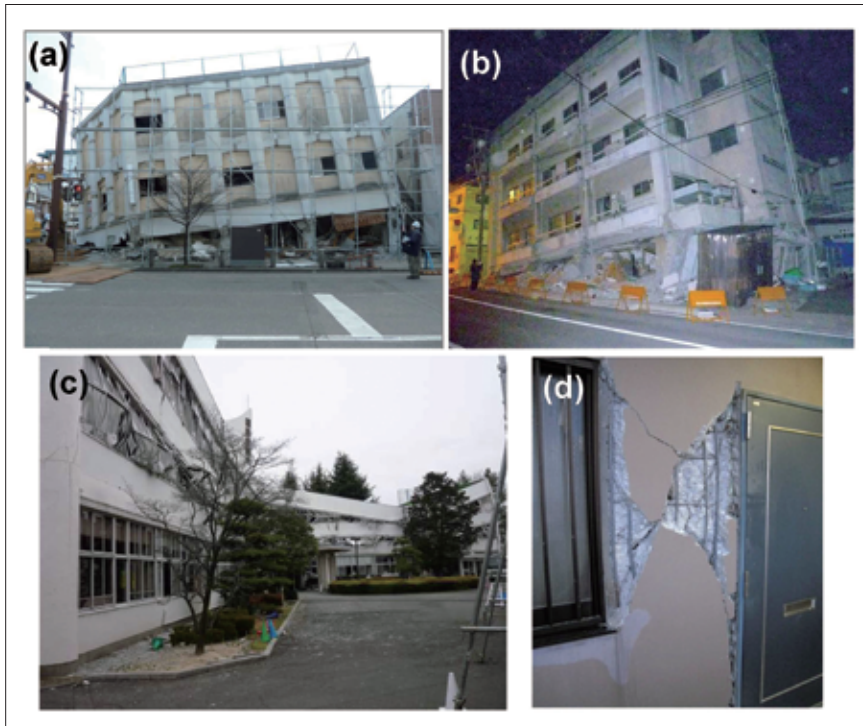
図表9 兵庫県南部地震によるビルの層崩壊



提供：境有紀氏

けた。一社の工場被害が、サプライチェーンを通じて産業界にも大きな影響を与えた。例えば、ルネサスエレクトロニクス(株)の半導体工場の操業停止は、世界の自動車生産に大きな影響を与えた。こうした経済的な意味の被害まで防ぐためには、産業界としては、災害発生時にも事業活動を低下さ

図表 10 東北地方太平洋沖地震による建物被害



出典：参考文献3および4

せないハード面の「災害抵抗力」と、事業活動を継続しつつ復旧を早めるソフト面の「災害対応力」を兼ね備えることが重要である。事業者は、この2点を意識した「事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）」を予め作り、実地訓練することが必要である。

## 4 過去の地震における建物被害

周期1秒以下の振動が顕著な地震動は「短周期地震動」と呼ばれ、周期1～2秒の振動が顕著な地震動は「やや短周期地震動」と呼ばれる。関東平野・濃尾平野・大阪平野などの厚い堆積層地盤では、周期が2秒以上の「長周期地震動」が観測される場合もある。長周期地震動に関しては、周期が2～5秒の場合を「やや長周期地震動」、周期が5秒以上の場合を「長周期地震動」として区別することもある。

図表11は、過去の震度6弱以上の地震による被害状況を文献7より抜粋し、周期が1～2秒の地震動が多く観測された地震を☆印で、一部の地域で観測された地震を○印で記してある。(2003年の宮城県北部を震源とした地震では、消失した波形もあり、周期が1～2秒の地震動があったかどうかは不明)。図表11の☆印と○印は建物の被害数と強い相関があることがわかる。東北地方太

平洋沖地震では膨大な建物被害を出したが、そのほとんどは津波によるもので、地震動によるものは少ない。また、東北地方太平洋沖地震の翌朝に発生した長野県・新潟県県境付近を震源とする地震では、長野県栄村や新潟県十日町市を中心に住宅に被害を及ぼした。

図表11では、周期が1～2秒の地震動が観測された地震に印を付けたが、地震動の周期は、地震の震源過程だけで決まらず、観測点での地盤の状況や地震波の伝搬経路に大きく左右される。図表12は、新潟県中越沖地震の時に、長岡市小国町と柏崎市で観測された弾性加速度応答である。小国町では周期が1秒以下の地震動が顕著であるが、柏崎市では周期2秒あるいはそれ以上の周期の地震動が顕著になっている。この様に、同じ地震であっても、場所によって地震動は異なる。従って、地震による建物被害の軽減研究において

は、単に地震の研究だけではなく、地震・地下構造・地盤・建築物を含む総合的な研究が必要である。

2008年岩手・宮城内陸地震や2009年の駿河湾を震源とする地震では、観測地点のほとんどでは短周期地震動であったが、K-NET古川やK-NET鳴子などの特定の観測地点では周期が1～2秒の「やや短期地震動」や周期2秒以上の「長期地震動」が観測されている(図表13)。この2つの地震による建物被害調査の結果をまとめたのが図表14である。いずれの地震でも、瓦屋根の被害を除き、調査域内では全壊や大破といった大きな建物被害はなかった。ただし、岩手・宮城内陸地震は、全体として176棟の全・半壊被害と23名の死者・行方不明者を出し、一関西観測点(岩手県一関市巖美町)では、4,022ガルというそれまでの観測史上最大の地震加速度が記録された。



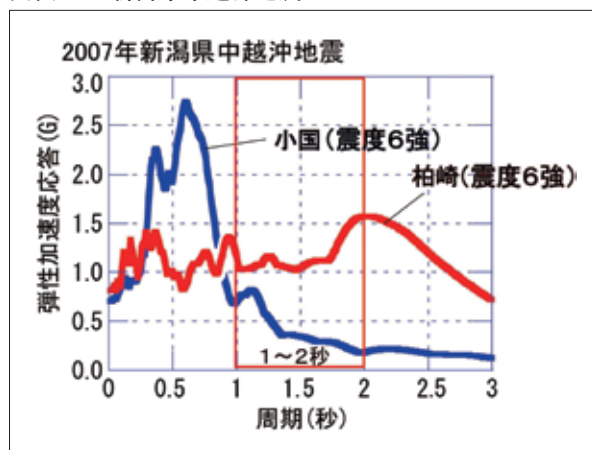
図表11 過去の震度6弱以上の地震による被害状況。

☆印および○印は、それぞれ周期1～2秒の地震動が顕著に観測された地震と一部の地域で観測された地震。

発生年	地震名または震央地名	M	最大震度	津波 (メートル)	死者・不明者数	建物被害		振動周期
						全壊(棟)	半壊(棟)	
1995年	兵庫県南部地震	7.3	7	有	6,437	104,906	144,274	☆
1997年	鹿児島県薩摩地方	6.4	6弱	無	0	4	31	
1998年	岩手県内陸北部	6.2	6弱	無	0	0	0	
2000年	新島・神津島近海など3回	6.5	6弱	0.14	1	15	20	
2000年	鳥取県西部地震	7.3	6強	無	0	435	3,101	○
2001年	芸予地震	6.7	6弱	無	2	70	774	
2003年	宮城県沖	7.1	6弱	無	0	2	21	
2003年	宮城県北部	6.4	6強	無	0	1,276	3,809	不明
2003年	十勝沖地震	8.0	6弱	2.55	2	116	368	
2004年	新潟県中越地震	6.8	7	無	68	3,175	13,810	○
2005年	福岡県西方沖	7.0	6弱	無	1	144	353	
2005年	宮城県沖	7.2	6弱	0.12	0	1	0	
2007年	能登半島地震	6.9	6強	0.22	1	686	1,740	○
2007年	新潟県中越沖地震	6.8	6強	0.32	15	1,331	5,709	○
2008年	岩手・宮城内陸地震	7.2	6強	無	23	30	146	
2008年	岩手県沿岸北部	6.8	6弱	無	1	1	0	
2009年	駿河湾	6.5	6弱	0.36	1	0	6	
2011年	東北地方太平洋沖地震	9.0	7	9.3以上	19,263	128,582	244,031	
2011年	長野県・新潟県県境付近	6.7	6強	無	3	73	426	
2011年	静岡県東部	6.4	6強	無	0	0	103	

出典：参考文献7,8および境有紀氏講演

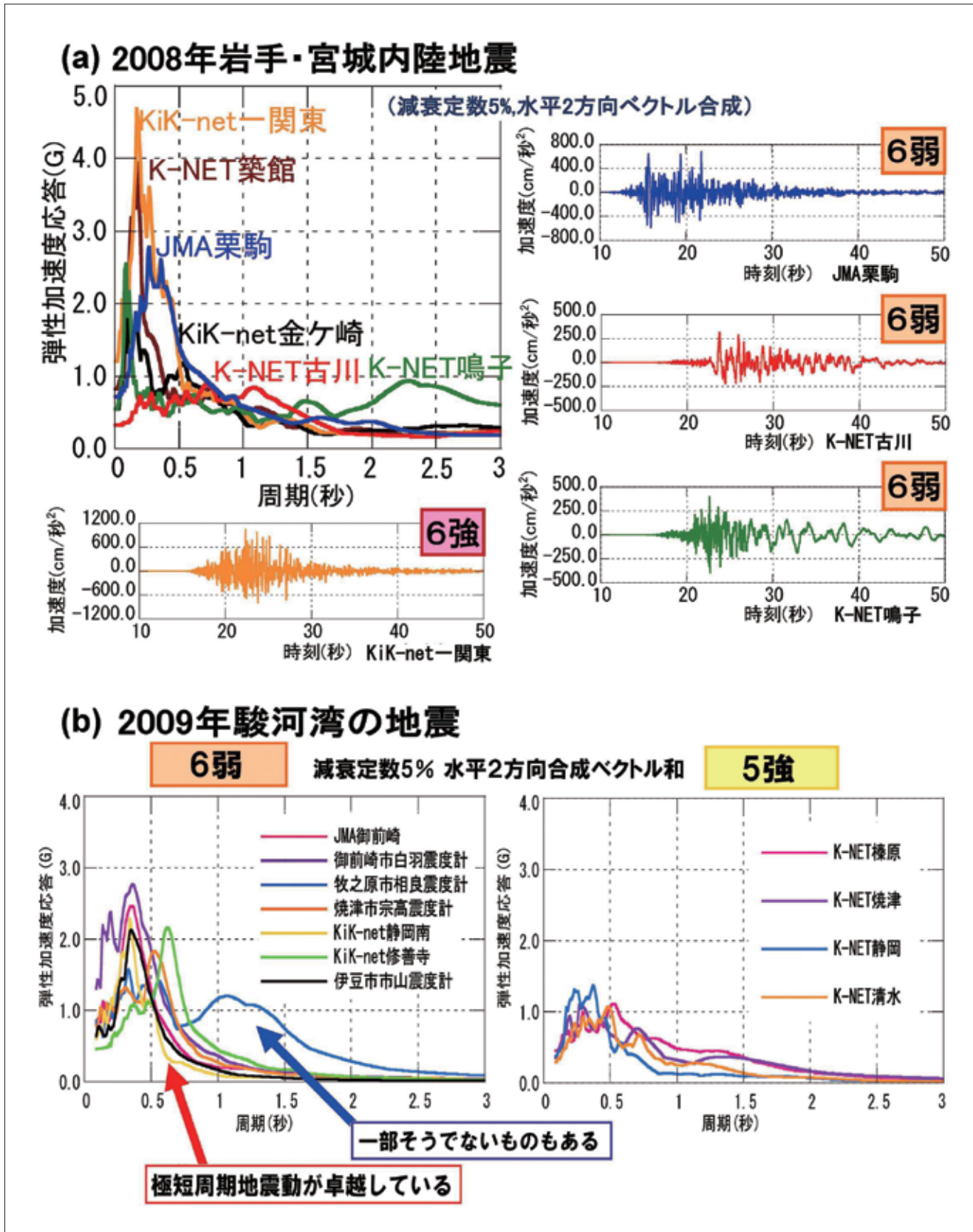
図表12 新潟県中越沖地震のスペクトル



提供：境有紀氏

建物に全壊や半壊の被害を与えるとされてきた最大震度6弱以上の地震は、年に1.3回程度の頻度で起きている。しかし、被害率という観点から見れば、ほとんどの地震では、明らかに想定より被害は小さい。むしろ、兵庫県南部地震は、例外的な存在と言えよう。このことは、震度という単一の指標では、地震による建物被害を語れないことを如実に物語っているものと思える。

図表 13 岩手・宮城内陸地震と駿河湾を震源とする地震のスペクトル



提供: 境有紀氏

図表 14 2つの地震での建物被害の調査結果

(a) 2008年岩手・宮城内陸地震の建物被害の調査結果

	強震観測点	計測震度	震度計から半径200mの範囲内での被害状況	建物棟数			
				全体	木造	非木造	全壊・大破
6強	栗原市一迫震度計	6.2	外装材の剥落、ブロック塀の倒壊、屋根瓦の損傷など	22	17	5	0
	奥州市衣川区震度計	6.1	RC造建物外壁のひび割れ、屋根瓦の損傷、地盤被害など	38	31	7	0
	KiK-net一関東	6.0	公民館および体育館の外装材の損傷	4	4	0	0
6弱	JMA栗原市栗駒	5.9	外装材の剥落など軽微な建物被害	14	13	1	0
	栗原市鶯沢震度計	5.8	老朽化した倉庫の倒壊、軽微な建物被害	40	32	8	0
	K-NET築館	5.7	特に被害なし	53	47	6	0
	JMA大崎市古川三日町	5.6	外装材の剥落など軽微な建物被害	284	261	23	0
	栗原市金成震度計	5.6	傾いた倉庫、外装材の剥落、地盤被害など	26	14	12	0
	K-NET古川	5.5	外装材の剥落、窓ガラスの破損などの軽微な建物被害	281	255	26	0
	K-NET鳴子	5.5	特に被害なし	15	14	1	0
	KiK-net金ヶ崎	5.5	ブロック塀の被害、地盤被害	12	11	1	0
	大崎市田尻震度計	5.5	外装材の剥落、RC造建物基礎部のひび割れなど	110	99	11	0
	栗原市高清水震度計	5.5	外装材の剥落など軽微な建物被害	111	101	10	0
5強	栗原市花山震度計	5.5	外装材の損傷、ブロック塀の被害など	38	30	8	0
	栗原市志波姫震度計	5.5	RC造建物外壁のひび割れ、外装材の剥落など	57	43	6	0
	奥州市胆沢区震度計	5.5	特に被害なし	19	14	5	0
	K-NET一関	5.0	特に被害なし	164	131	33	0

(b) 2009年駿河湾を震源とする地震の建物被害の調査結果

6弱	観測点名	計測震度	観測点から半径200mの範囲内での被害状況	建物棟数					瓦被害率 (%)	全壊率 (%)
				木造	非木造	全壊	半壊	瓦被害		
	JMA御前崎市御前崎	5.7	屋根瓦被害あり	131	7	0	0	6	4.35	0
	御前崎市白羽震度計	5.9	屋根瓦被害多数、外壁被害あり	95	8	0	1	18	17.48	0
	牧之原市相良震度計	5.9	屋根瓦被害多数	83	28	0	0	19	17.12	0
	牧之原市静波震度計	5.5	屋根瓦被害多数	154	33	0	0	17	9.09	0
	焼津市宗高震度計	5.6	屋根瓦破損多数	45	11	0	0	9	16.07	(0)
	KiK-net静岡南	5.6	屋根瓦被害あり、公営プールの内装被害	14	8	0	0	1	4.55	(0)
	KiK-net修善寺	5.7	被害なし	1	0	0	0	0	0.00	(0)
	伊豆市市山震度計	5.5	屋根瓦被害あり	65	19	0	0	2	2.38	(0)
	K-NET榛原	5.4	屋根瓦被害多数	87	27	0	0	8	7.02	0
	K-NET焼津	5.4	屋根瓦被害あり	229	42	0	0	5	1.85	0
	K-NET静岡	5.1	屋根瓦被害あり	334	214	0	0	1	0.18	0
	K-NET清水	5.2	被害なし	35	29	0	0	0	0.00	(0)

提供：境有紀氏

## 5 震度と建物被害との関係

現行の日本の気象庁震度階は、0から4までと、5弱、5強、6弱、6強、そして震度7と合計10段階で与えられる。1996年までは0から7までの8段階であったが、兵庫県南部地震の時に、震度5および震度6の地域での被害状況の幅が広がったことから、その後、それぞれに強弱の震度階が新たに設けられた。震度とは、加速度や

振幅といった明確な物理量ではなく、揺れの振幅や周期あるいは継続時間といった要素が複雑に絡み合う量であり、1995年以前は、被害状況や体感によって決められていた。近年になって地震計の記録波形に数値処理を施すことによって、自動的に機械判定することが可能となり、1996年以降は、この計測震度が用いられている。

例えば、震度4とは計測震度が3.5以上4.5未満、震度5弱とは計測震度が4.5以上5.0未満、震度5強とは計測震度が5.0以上5.5未満を意味している。

計測震度によって震度が自動判定できるようになり、現在では、地震発生から1~2分程度で各地の震度がテレビやラジオで報道されるようになった。現時点では日

本だけが持つ画期的な速報システムである。その一方で、人体感覚に依拠してきた旧震度と現行の計測震度との間の連続性に対する疑問も出ている。気象庁資料によると、1988～1994年に起きた実際の地震に対して旧震度と計測震度とが少なくとも旧震度6の範囲までよく一致することが示されている。しかし、1995年以降については、震度6強を超える強震動の範囲で旧震度と計測震度との一致は保証されておらず、その不一致がその後の震度と建物被害率との乖離の1つの原因となっている可能性がある。

気象庁が計測震度を取り入れた1996年以降、計測震度6弱以上の出現頻度が、旧震度6以上に比べて飛躍的に増加した<sup>9,10)</sup>。図表15から、地震の発生頻度自体は大きく変化していないが、震度6弱以上を記録した地震の回数が1996年頃を境に、発生率にしておよそ15倍と大きく増加している様子がわかる。この理由は、旧震度評価が行なわれていた観測拠点数に比べて計測震度計の設置点数がはるかに増加し、それによって最大震度の観測漏れがほぼ無くなったせいであろうと説明されてきた。これは一見、合理的な解釈にも思えるが、15倍にも及ぶ発

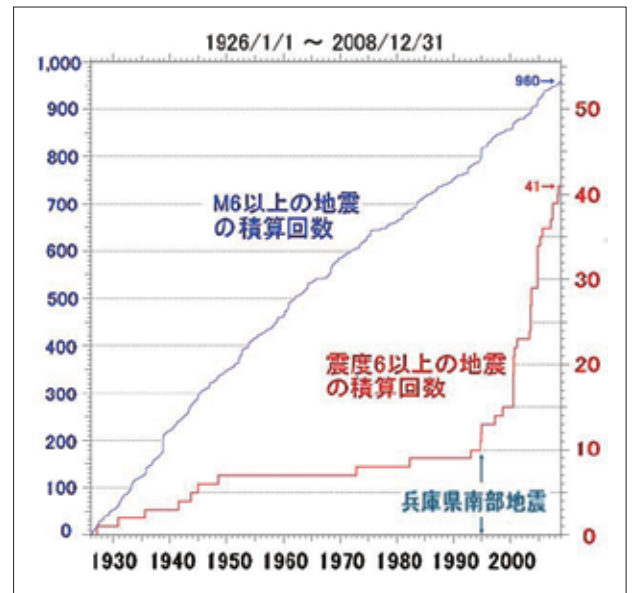
生率の違いを説明しきれないかどうかは不確かである。この発生率の違いの一部は、計測震度と旧震度との間に生じたずれに起因している可能性は否定できない。

境有紀氏は、計測震度とは別に、震度に応じてフィルターの周波数帯域を変えた別の指標を提案している<sup>11)</sup>。震度6弱以上の地震に関して、被害

率との乖離が度々生じるとなれば、指標としての震度の意義が問われかねない。現行の計測震度を変えることに慎重であるべきとするならば、建物の構造体被害に焦点をあてた別指標を用意することも考慮すべき案と言えよう。

地震動の多くは、周期が1秒以下の短周期であり、1～2秒の周期が観測される「やや短周期地震動」は必ずしも多く発生するわけではない。しかも、地震動の周期は、地盤構造や伝搬経路に依存する。今回の東北地方太平洋沖地震で震度6強や震度7となったにも拘わらずほとんどの住宅が倒壊し

図表15 震度6以上の地震の積算回数



出典：参考文献10

なかったという経験により、多くの人が、その程度の地震では自宅は倒壊しないと思込むかも知れない。しかし、それは誤りであり、そういった思い込みは危険である。震度が大きくかつ周期1～2秒の地震動を伴う地震の場合には、阪神・淡路大震災の時のような大きい建物被害が発生する可能性があることを忘れてはならない。特に住宅などの中・低層建物に対しては、周期1～2秒の地震動を想定した耐震対策が重要であることを指摘したい。

## 6 超高層建物と免震・制震方法

東北地方太平洋沖地震では、震源から遠い東京でも震度5弱を観測し、都心の超高層ビルも長時間にわたって大きく揺れた。建築基準法には「超高層建物」という言葉はないが、同法第20条第1号に規定する60mを超える建物のことを「超高層建物」と呼ぶことが多い。高さ60mを超える建物については、決められた地震波形を用いて動的に解析（時刻歴応答

解析）し、耐震基準を満たすことが義務づけられている。

建物の耐震構造は、大きく分けて次の3種類が存在する。

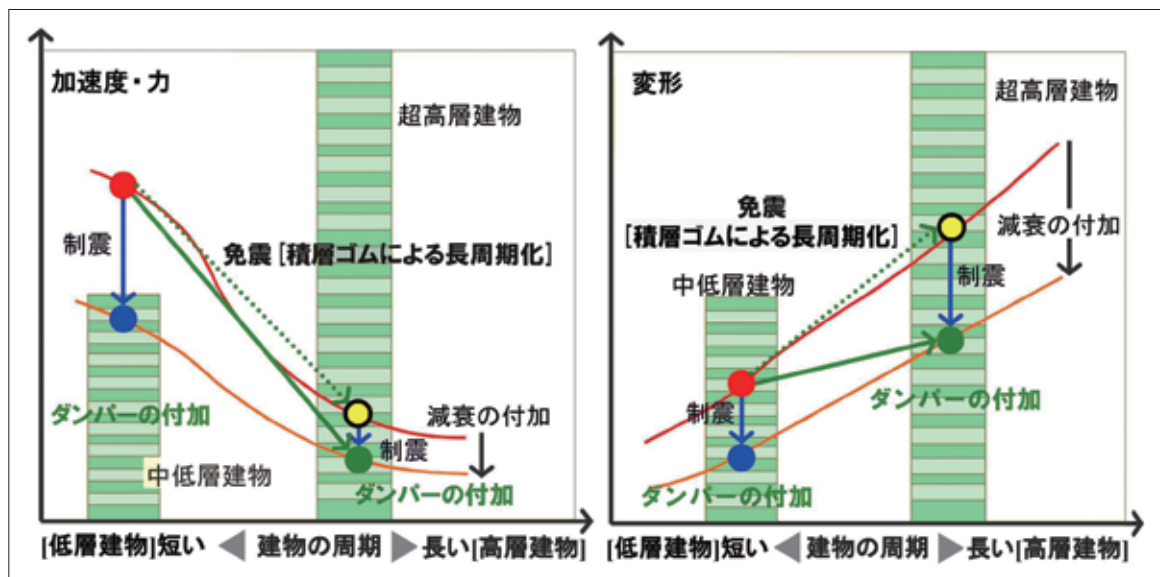
- 構造体の強度を増して地震に耐える力を与える狭義の耐震構造
- エネルギーの吸収機構によって振動を抑制する制震構造
- 積層ゴムやすべり支承などを用いて上階への地震力を受

けにくくする免震構造

一般家屋では、構造壁や筋交いなどを用いて耐震性能を高めることが多いが、超高層建物では変形を抑制または制御する制震構造や免震構造が用いられる。

低層建物の固有周期は0.5秒以下だが、高層建物の固有周期は1～2秒、超高層建物になると固有周期は2～6秒程度となる。一般的には、高層であればあるほど建

図表 16 建物に加わる力と変形



提供：境茂樹氏

物の固有周期は長くなって、地震動の卓越周期との差が大きくなり、その結果、建物に伝わる力や加速度は小さくなる（図表 16 左図）。ところが、建物の揺れの振幅、即ち変形は、超高层建物になれば逆に大きくなる（図表 16 右図）。制震構造では、地震のエネルギーをダンパーに吸収させることによって、建物に加わる力を小さくして、同時に建物の変形を抑えることができる。一方、免震構造では、積層ゴムなどを用いて等価的に建物の共振周期を長くすることによって、建物に伝わる力を小さくすることができる。

制震構造にはいくつかの種類があり、典型的には次の3種類に分類される。

- (a) 層間ダンパー型制震構造：建物の上層の床と下層の天井（または床）とをダンパーを用いて連結し、ダンパーにエネルギーを吸収させて建物の損傷を防ぐ。ダンパーには、図表 17 に示したオイルダンパーや金属の塑性化を利用した低降伏点鋼ダンパーなどがある。
- (b) マスダンパー型制震構造：建物の最上部に「おもり」を設置し、建物の上層部を揺

れにくくする。この場合も、おもりと建物とをダンパーで連結し、エネルギーを吸収させる。場合により、アクチュエータなどで連結し、建物が揺れる方向と逆方向に力を加えてアクティブ制御することもある。

- (c) 連結型制震構造：建物の構造を複数に分割した上で、ダンパーで連結して揺れを抑える。連結制震ブリッジで複数の棟をつなぐ晴海アイランド・トリトンスクエアや、中心部に心柱構造を設けて本体とダンパーでつなぐ東京スカイツリーがある。一方、免震構造は、建物の基礎の部分に

図表 17 層間ダンパーの種類



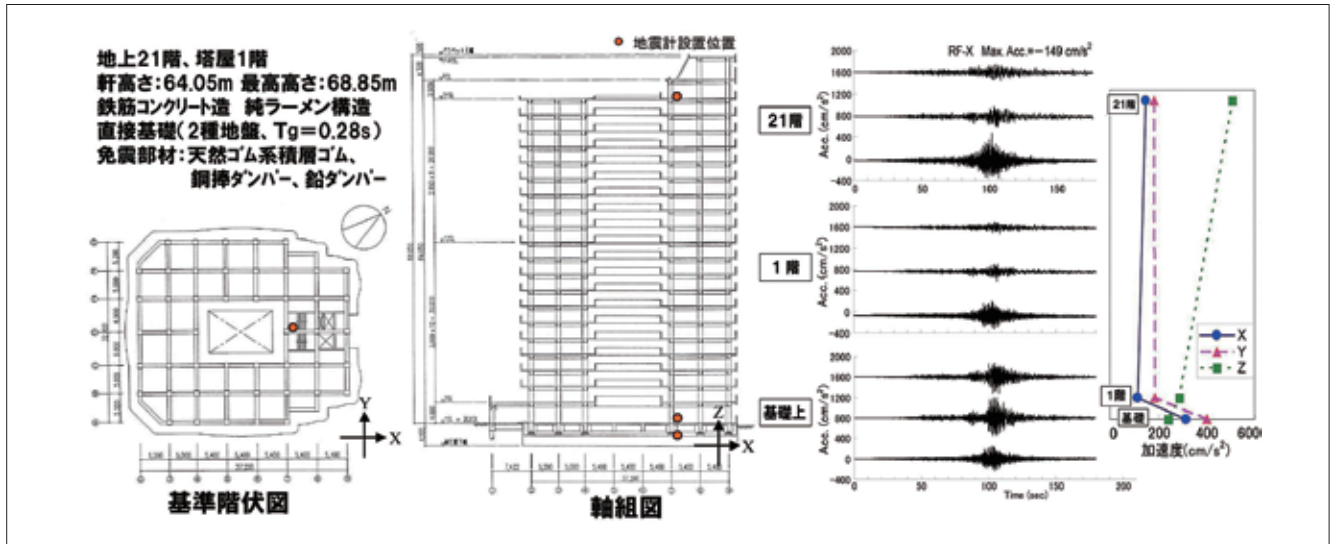
提供：境茂樹氏

図表 18 免震建物用の構造部材



提供：境茂樹氏

図表 19 免震構造の超高層建物で観測された東日本太平洋沖地震の地震動



提供：境茂樹氏

図表 18 のような積層ゴムや鋼材ダンパーを入れて、地震動が建物に直接伝わらないようにした構造である。免震構造部分を含む建物の固有周期を長くすることによって地震動は建物に入り難くなる（図表 16 参照）。固有周期が長くなると、建物内部に掛かる力は小さくなるが、逆に変形は大きくなる。この変形を積層ゴムや鋼材ダンパーなどに集中させて、建物上部に被害が出ないようにしている。ただ、風圧の影響が大きい超高層建物では、風による建物の揺れが大きくなる可能性があるため、免震機構の設置には十分な注意が必要である。また、床や建物が地面と異なる動きをするので、出入り口や建物周囲で地面とのジョイント部に十分配慮を払う必要がある。

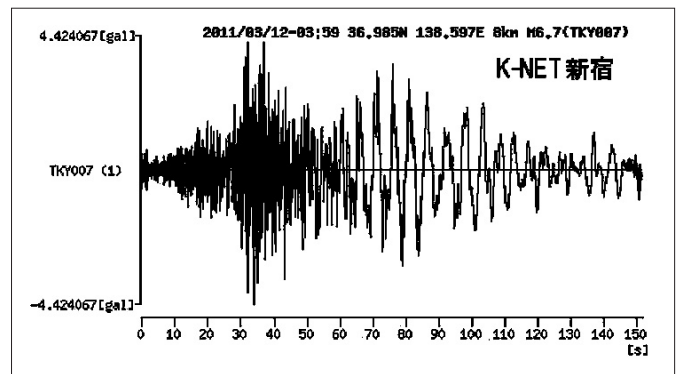
図表 19 は、免震構造の超高層建物で観測された東北地方太平洋沖地震の地震動を示している。基礎上・1階・21階の3箇所で観測しており、それぞれ3種類の波形は、上2つが水平方向、下1つが垂直方向の地震動である。基礎上と1階の水平方向の地震動には大きな違いが見られる。1階で観測された加速度は、基礎上で観測された加速度の約1/3になっており、免震機構が有効に働

ていることがわかる。しかし、垂直の地震動は減衰しておらず、一般的な免震構造には働かない。免震機構が無い場合のこの建物の揺れは測定

できないのでシミュレーションに頼るしかないが、下層階の揺れは約  $320 \text{ cm/s}^2$  から約  $100 \text{ cm/s}^2$  に、上層階の揺れは約  $280 \text{ cm/s}^2$  から約  $160 \text{ cm/s}^2$  に低減されているという結果が得られた。また、層間変形角（各層での変形を柱の長さで割った値）は、免震構造でない場合には中層階では1/200近くに達するが、免震構造の場合にはどの階でも1/1000以下に抑えられていることもわかった。層間変形角が1/200以上になると、壁に亀裂が生じ始めると言われており、免震構造では層間変形角を抑える効果ははっきりと確認された。実際にこの建物では、壁や柱面のひびなどの被害や家具の転倒などの被害も報告されていない。

制震建物や免震建物は、どちらの場合もダンパーや積層ゴムに地

図表 20 東北地方太平洋沖地震余震の新宿における地震動



出典：参考文献 2

震力や変形を集中させて、建物全体を守っている。従って、ダンパーや積層ゴムの強度や繰り返し耐力が問題となる。東北地方太平洋沖地震後には、残留変位が生じている鋼材系ダンパーや亀裂の入った鉛ダンパー、そしてボルトの緩みなどが確認できた。このような状況では、制震や免震の効果は以前より低下している恐れがあり、早急な修理や交換が必要な場合もある。特に、強い余震を伴う地震の場合には致命的ともなりかねないことから、地震直後の応急点検は重要である。現時点では、繰り返し振動による健全性評価や地震後の残余耐力の評価基準や評価方法が明確になっておらず、今後の重要な課題である。

また、東北地方太平洋沖地震は、首都圏の超高層ビルが長時間

にわたって大きく揺れた初めての事例となった。新宿の超高層ビル群は、約13分間にわたり、最大で108cmの振幅で揺れた。この様子は、ビデオに撮影され動画投稿サイトで見ることができる。首都圏では、「長周期地震動」を伴う余震も観測され、図表20は、3月12日の午前3時59分に起きた余震の新宿における地震動である。この余震では、地震動加速度自体はあまり大きくはなかったが、図表20の65秒から110秒までの時間で、約5.6秒周期の「長周期地震動」が明確に観測されている。

日本で、「長周期地震動」が注

目されるようになったきっかけは、2003年十勝沖地震の時に、苫小牧市のコンビナートでスロッシング（タンク内で石油が共振する現象）で溢れた石油による火災であった。2004年新潟県中越地震や2007年新潟県中越沖地震では、首都圏での「長周期地震動」によって、超高層ビルのエレベーターの損傷やトラブルが発生した。また、1964年の新潟地震の時の新潟市での石油タンク火災も、当初は地盤の液化化によるスロッシングが原因と考えられていたが、現在では、「長周期地震動」が原因と考えられている。

1967年完成の霞ヶ関ビルを嚆矢とした日本の超高層建物は、今回の大地震に遭遇するまで大きな震災に見舞われる経験を持っていなかった。しかもこうした超高層建物は、東京（首都圏）・大阪・名古屋に多く存在し、長周期地震動が起きやすい堆積層地盤上にある。長周期地震動と超高層建物の組み合わせは、地震災害研究にとっても未知の領域と言えよう。今回の経験を踏まえた上で将来の被災軽減を図ることは、今後の研究課題の中でも重要な位置づけにある。

## 7 まとめ

本稿では、東日本大震災（東北地方太平洋沖地震）の被害の様相を、阪神・淡路大震災（兵庫県南部地震）と比較し、その違いを明らかにすることにより、今後の地震防災への教訓を読み取る事を目的とした。

東北地方太平洋沖地震は、マグニチュードも大きく、震度6弱以上の地域も広範囲に及ぶ巨大地震であったが、それにも拘わらず、兵庫県南部地震に比べて、揺れによる建物の被害率は小さかった。この理由は、地震動の振動周期の違いによって説明できる。東北地方太平洋沖地震では、周期1秒以下の「短周期地震動」が顕著であり、周期1~2秒の「やや短周期地震動」の割合が低かった。「短

周期地震動」は、人体には大きく感じられ、建物の壁材や天井材などに被害をもたらすものの、建物の全壊や半壊といった構造被害への影響は少ない。一方、兵庫県南部地震では、「やや短周期地震動」が卓越し、多くの建物倒壊の原因となった。

また、東北地方太平洋沖地震およびその余震では、首都圏で「長周期地震動」が観測され、超高層ビルが大きく揺れた。今回の地震では、免震・制震装置に一定の効果は見られたが、長周期地震動に対する安全性は未知の領域であり、今後検討すべき課題は多い。

周期1~2秒の「やや短周期地震動」、そして、周期2秒を超える「長周期地震動」、これらも

たらず被害の対象や様相は、それぞれに全く異なる。こうした周波数帯に依存する影響の相違は、被害の様相をますます多様化させることになる。東日本大震災で地震動による建物被害が小さかったことは、ある意味の僥倖であり、将来、同程度の震度に見舞われた時、必ずしも今回と同様の被害様相となるわけではないことを考慮すべきである。予測震度に基づく地震防災計画は、あくまでもひとつの目安であり、気象庁震度階という一指標だけでは全ての被災状況が把握しきれない場面をも想定しなければならない。

最後に、講演や資料提供をして頂いた境有紀氏と境茂樹氏に感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) (独)防災科学技術研究所ホームページ：[http://www.hinet.bosai.go.jp/about\\_earthquake/sec9.5.html](http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec9.5.html)
- 2) (独)防災科学技術研究所 K-NET：<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/gk/overview.html>
- 3) 平成23年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第一次調査（速報）：二本松市、郡山市、福島市におけるRC造、鉄骨造及び非構造部材を中心とした被害：<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/110314kentiku.pdf>

- 4) 平成 23 年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第一次調査：白河市、須賀川市、仙台市における RC 造、S 造、非構造部材を中心とした建築物被害調査（速報）：<http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/110324kentiku3.pdf>
- 5) 芦屋市／建築物の被害と復旧（芦屋市ホームページ）：<http://www.city.ashiya.lg.jp/bousai/shinsai/bunseki.html>
- 6) 阪神・淡路大震災 芦屋市の記録 '95～'96（芦屋市発行）
- 7) 日本付近で発生した主な被害地震（平成 8 年～平成 23 年 12 月）、気象庁ホームページ：  
<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/higai/higai1996-new.html>
- 8) 阪神・淡路大震災について（確定報）、平成 18 年 5 月 19 日、消防庁：  
<http://www.fdma.go.jp/data/010604191452374961.pdf>
- 9) 岡田義光、震度 6 が一日に 3 回をめぐって、地震ジャーナル、36、2003.
- 10) 震度で見た地震回数と M で見た地震回数（独）防災科学技術研究所ホームページ：  
[http://www.hinet.bosai.go.jp/about\\_earthquake/sec1.3.html](http://www.hinet.bosai.go.jp/about_earthquake/sec1.3.html)
- 11) 境有紀、地震動の性質と建物被害の関係、日本地震工学誌、2009 年 9 号、p12-19.

---

## 執筆者プロフィール

---



### 市口 恒雄

安全・システムユニット リーダー  
 科学技術動向研究センター 客員研究官  
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

理学博士。専門は半導体、超伝導、磁性体の物理。サブミリ波やマイクロ波を用いた物性測定を中心に、米国の大学や日本の電機メーカーで研究に従事。現在は、当研究センター常勤として、科学技術予測や科学技術動向研究に従事。



### 松村 正三

科学技術動向研究センター 客員研究官  
<http://www.bosai.go.jp/>

専門は地震学。微小地震観測を通じて大地震の前兆現象検知を目指している。特に東海地震を対象にして、地震活動バタンの変化からスロースリップや準静的滑りにもとむる応力再配分の状況を把握したいと考えている。地震調査研究推進本部専門委員。理学博士。