

東日本大震災における地震動と建物被害の実態と教訓

源 栄 正 人

東北大学大学院工学研究科・教授

1. はじめに

2011年3月11日午後2時46分に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）では、津波災害を中心に多くの犠牲者を出したが、地震動による被害も数多く発生している。今回の地震は、宮城県域にとっては、1978年宮城県沖地震や2008年岩手・宮城内陸地震など過去の地震被災地を襲った巨大地震であったと位置付けられる。3分に及ぶ強震動は各地に大きな振動被害をもたらした。仙台市では、400箇所に及ぶ宅地被害が生じており、被災宅地の共通点として谷埋めで地下水位が高いこと、これらに加えて長い継続時間の地震動が作用したことが指摘されている。また、この長い継続時間の地震動は沖積地盤における間隙水圧と液状化現象をもたらし、杭基礎建物の被害にも結びついている。ここでは、筆者がこれまで実施してきた仙台市を中心とする宮城県域の地震動特性と建物被害に関する調査・分析結果に関する報告^{1),2)}をベースに、今後の都市・建築の総合的地震対策に向けた今回の東日本大震災の教訓に関する筆者の知見を示す。

報告内容としては、1) 地震防災に関する先人の教え、2) 観測された大加速度記録と長い継続時間、3) 仙台市域の地盤構造と強震動特性、4) 青葉山丘陵地の地震動増幅と建物被害、5) 杭基礎構造物の被害、6) 天井材落下被害、7) 悉皆調査に基づく木造建物の被害の特徴について示す。

2. 地震防災に関する先人の教え

ここでは、1978年宮城県沖地震の教訓として、山本壮一郎・宮城県知事（当時）が一年後に行った総括講演³⁾とこの地震の調査分析を行い我が国の耐震対策の向上に貢献した恩師・志賀敏男先生の教えを紹介する。

山本壮一郎・宮城県知事は、総括講演の主な項目として、1) 都市の近代化が地震の被害を拡大、2) 情報的的確で迅速な提供が大事、3) 個人個人の家庭の対応策の必要性、4) 安全な空間を一箇所はつくれ、5) 地質の再調査は防災体制の基本である（5年かけて「宮城県地震地盤図」作成）、6) 地域コミュニティの必要性、7) 実態に合った地震保険の国への要請、を指摘し、最後に古代中国「莊子」の「機心なき耕夫の話」を引用し、便利になった社会において、自主性・創造性を失わずに、道具をうまく使いこなすことの重要性を示した。今回の震災においても全く然りである。

恩師・志賀敏男先生は、災害調査では、壊れた建物と壊れなかった建物の「際」に着目することの重要性を指摘した。床面積に対する壁量と柱量で被害・無被害が説明できるとし、壁の威力を示し、「志賀マップ」を提唱した。これが、現行の既存建物の耐力評価や耐震診断法成立の契機となり、新耐震設計法の考え方に大きく影響を与えた。また、志賀先生は、常々「防災対策の基本は弱点の把握とその解消」であると言われた。さらに、地盤による被害状況の違いを示され、筆者は先生から「仙台市域のサイスミック・マイクロゾーニングを期待したい」との書簡をいただいた。また、1978年宮城県沖地震の調査・分析で多忙を極めているときに、当時理論解析に邁進していた筆者に実験観測の重要性を指摘され、図1に示すような「地震工学のはしご」の話をされた。今、将に大切な視点である。

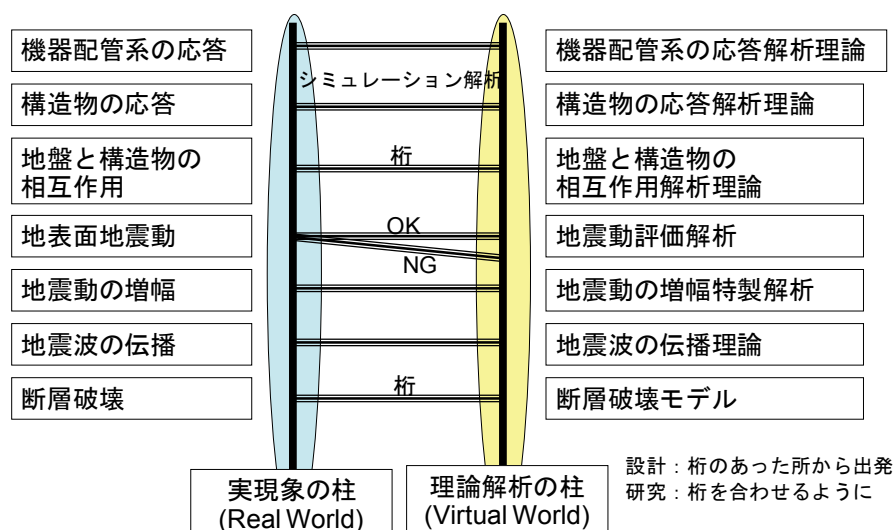


図1 地震工学のはしご

さらに、今回の震災を経験してあらためて考えさせられることを「防災の父」といわれる寺田寅彦の随筆集から引用する。

『天災と国防』（昭和9年）では「人間の団体（国家や国民）と称するのは有機的結合が進化し、その内部機能の分化が著しく進展すると、有機系の有る一部の損害が系全体に対して甚だしく有害を及ぼす。一小部分の障害が全系統に致命的となりうる。これに対し単細胞動物のようなものでは個体を切断しても各片が平気で生命を維持することができる。高等動物になると融通が効かなく針一本での打ち所次第では生命を失うようになる。」解説するまでもないが、複雑化した社会、過度に分化した社会の脆さを指摘している。現在でも当てはまる。「弱点の把握とその解消」は防災対策の要点であると、亡き恩師・志賀敏男先生も指摘している。今回の巨大地震は、あまりにも細分化した学問、縦割り行政に対する教訓を与えているように思える。今必要なのは、「学際連携」と「融合」であり、先人の教えを大切にしたい。

また、『災難雑考』（昭和10年）のなかでは、「（航空機白鳩号事故）災難に対して、科学者の仕事と探偵の仕事は少し違う。探偵は罪人を見つけ出しても将来の同じ犯罪をなくすことは難しそうである。事故の徹底的調査をして真相を明らかにし、後難を無くするということは新しい飛行機の数を増すと同時に極めて必要なことである」ことを指摘され、科学的原因究明の重要性とそればかりでなく、二度と同じ災難を起こさないための対策を考えることの重要性を示している。反対に、災難事故の真因が抹殺され、そのおかげで責任者が出ない代わりに同じ原因による犠牲者が後を絶たないようなことに対する懸念を示している。今回の震災対応でも重要なことである。

3. 観測された強震動記録とその分析

（1）強震動分布と大振幅記録

3月11日の東北地方太平洋沖地震では、東北地方の広い範囲で非常に強い揺れが観測された。また、4月7日には宮城県沖でM7.1のやや深いスラブ内地震が、4月11には福島県浜通りでM7.0の内陸地震が発生し、それぞれにおいても強い揺れが観測されている。

図2は、防災科学技術研究所K-NET、KiK-net地表、気象庁(web公開分のみ)、港湾航空技術研究所、東北大学災害制御研究センター、東北工業大学（加速度最大値と計測震度のみ）の強震観測による3月11日本震の加速度最大値と速度最大値の分布である。主な地点のNS方向の加速度波形も図中に示した。

この図から、500Gal以上の加速度が福島県東部から岩手県南部までの広い範囲で観測されているこ

と、50cm/s以上の速度が主に宮城県中央部の低地で観測されていることがわかる。また、加速度波形は大きく2つの波群で構成されているが、北部では最初の波群の振幅が、南部では2番目の波群の振幅が大きい。

表1には東日本大震災の本震で観測された記録のうち、計測震度が大きな順に主な記録の諸元を示す。宮城県に特に震度の大きい地点が多く、栗原市・仙台市・大崎市で大振幅の記録が観測されている。最も震度の大きな地点はK-NET築館(MYG004)であり、2,700Galの水平成分、1,880Galの上下成分が観測されている。このK-NET築館(MYG004)やK-NET古川(MYG006)の観測記録の分析、および仙台地域の地震動特性については後述する。

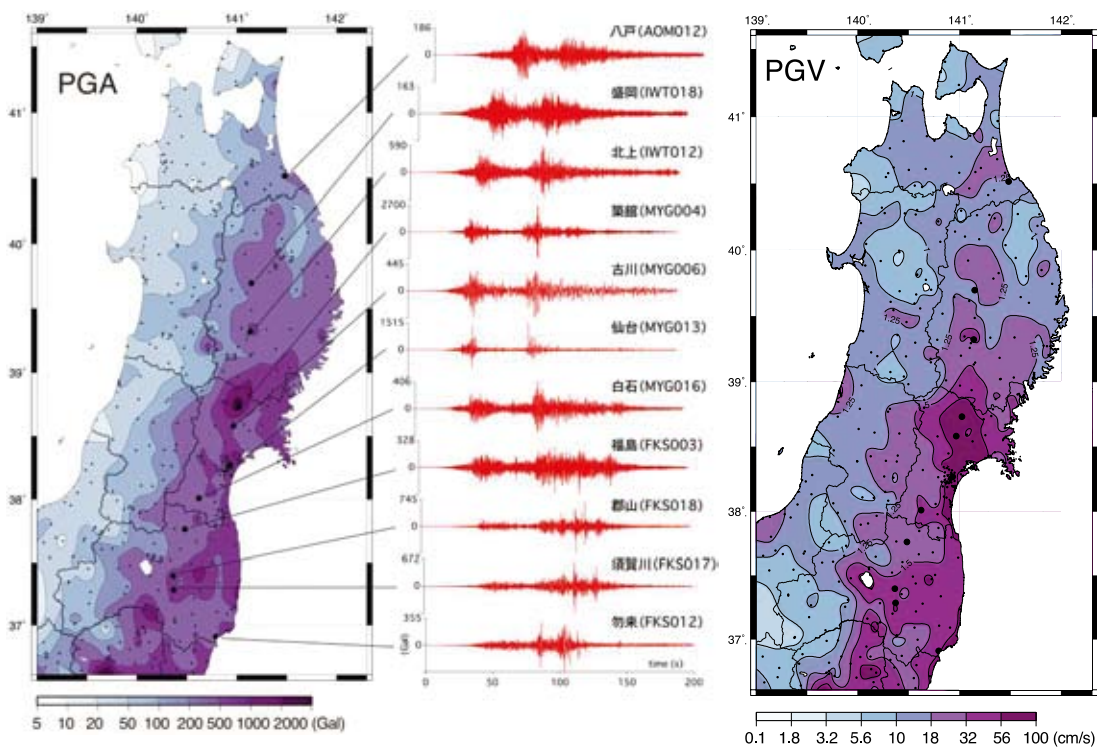


図2 東北地方太平洋沖地震の強震動分布

表1 東北地方太平洋沖地震で観測された大振幅記録（計測震度 ≥ 6.1 ）

No	機関	観測点	場所	計測震度	最大加速度 (cm/s/s)	最大速度 (cm/s)*
1	防災科研	MYG004	栗原市築館	6.6	2700	94
2	東北工業大学	smt.CCHG	仙台市若林区荒井	6.5	1074	-
3	東北工業大学	smt.IWAK	仙台市宮城野区岩切	6.4	859	-
4	東北大学	dcr.009	仙台市泉区松森	6.4	821	88
5	防災科研	MYG013	仙台市宮城野区苦竹	6.3	1517	74
6	気象庁	4B9	大崎市古川三日町	6.2	550	85
7	防災科研	MYG006	大崎市古川北町	6.1	572	98
8	東北大学	dcr.018	仙台市若林区沖野	6.1	512	79
9	防災科研	FKS016	福島県白河市新白河	6.1	1295	59
10	東北工業大学	smt.NAKI	仙台市泉区七北田	6.1	1853	-
11	東北大学	dcr.023	仙台市若林区卸町	6.1	613	77

*カットオフ周期50sで計算

図3は、表1の代表的な地点と、過去の地震の甚大な被害域で観測された記録の例として、1995年兵庫県南部地震の鷹取及び2004年新潟県中越地震の川口町について、擬似速度応答スペクトルを比較したものである。鷹取及び川口町の記録が周期1-2秒での振幅が大きいものに対して、MYG004（台地）は短周期は大きいもののその周期帯の振幅は小さい。一方MYG006（大崎平野）、MYG013（仙台平野）は築館に比べると周期1-2秒の振幅が大きく、さらに古川中心部の4B9（大崎平野）では鷹取に近い振幅を示している。

図4は最も震度の大きな地点はK-NET築館(加速度波形示したものである。100秒弱の時点で特にNS,UD方向が大きな振幅を示している。筆者らは、K-NET築館の大加速度記録を分析し、水平加速度の最大値発生時刻近傍における水平動に奇数倍調波成分、上下動に偶数倍調波成分が確認できることから基礎の浮き上がりや滑りを伴った非線形振動の可能性を示唆した⁶⁾。図6には最大値生起時刻100秒付近の南北—上下面のオービットを示したものであり、上下非対称な挙動を示している。

また、K-NET仙台（水平最大加速度1,517ガル）では、液状化による観測小屋の傾斜（南北方向の傾斜角2°）が確認された。強震計の設置位置、設置方法は要検討である。

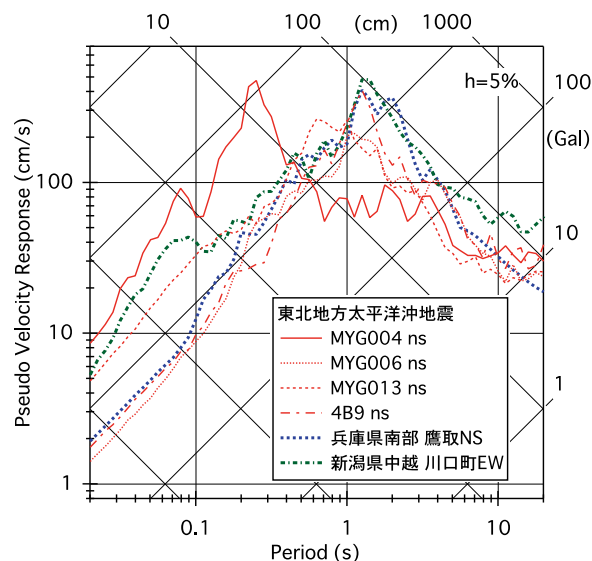


図3 主要記録の擬似速度応答スペクトルと過去の被害地震のスペクトルとの比較

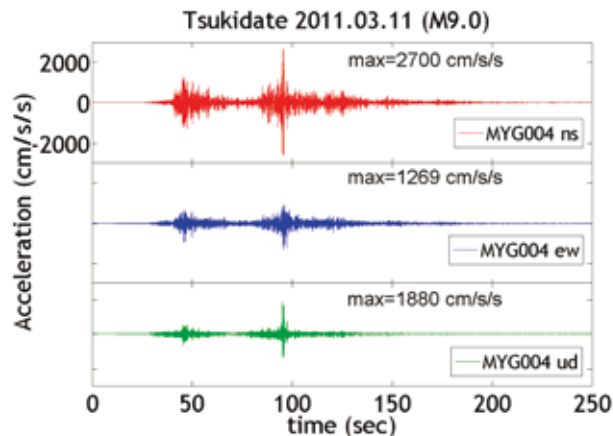


図4 K-NET築館の加速度波形

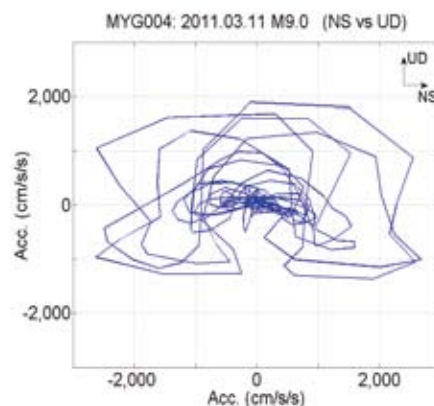


図5 加速度オービット（南北—上下）

(2) アンケートによる揺れの実態調査

筆者らは、震度7を記録した栗原市築館地区を含む栗原市と内陸部で大きな振動被害があった大崎市で小学校の児童の保護者を対象にアンケート震度調査を行い、計測震度との比較を行っている⁷⁾。図6は、小学校学区ごとの集計ではあるが、本震と余震（4月7日）のアンケート震度と計測震度を比較したものである。築館小学校区では、アンケート震度は5.6であり、同じ市内で被害が大きかった若柳小学校区では5.8となっている。大崎市内での、強震観測点を含む学区のアンケート震度は5.7～5.8となっており、5.9の学区もある。

図7は、本震と余震のアンケート震度と計測震度の比較であるが、アンケート震度の方が低くなる傾向を示している。本震では約0.3、余震では約0.76低くでている

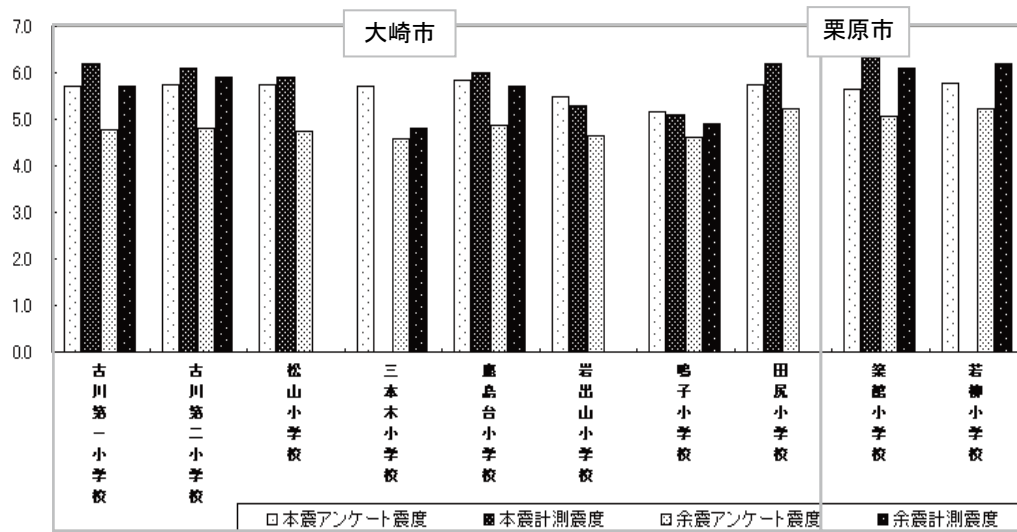


図6 本震と余震におけるアンケート震度と計測震度の比較

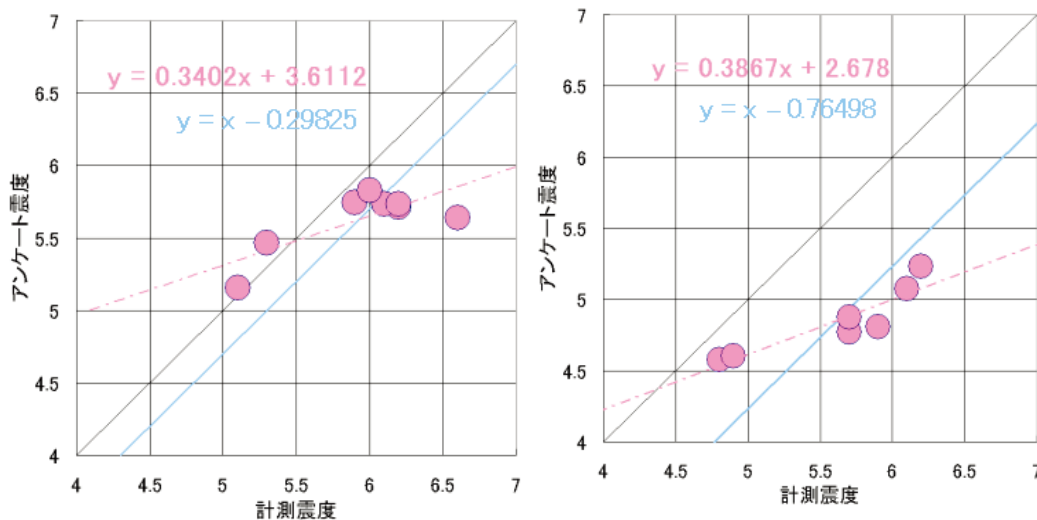


図7 本震と余震（4月7日）におけるアンケート震度と計測震度の関係

全体的にアンケート震度が低めにでる傾向が強いが、高震度になるほどその差は開いている。大きく差が出た余震は、短周期成分が大きかったのもその一因だと思われる。

（3）長い継続時間による繰り返し回数

東日本大震災では、長い継続時間を有する強震動により構造物は、極めて多い繰り返し回数の地震力による加振を受けた。宮城県北部の大崎平野の堆積盆地にある観測点であるK-NET古川観測点近傍の免震構造建物の鉛ダンパー免震装置が損傷被害を受けている。

ここではK-NET古川で観測された強震記録を対象に、特定周期の構造物が受ける変位の繰り返し回数を検討した例を紹介する。図8(a)は、K-NET古川の東西方向の加速度記録、同図(b)はその変位応答スペクトルである。盆地状の平野中心部にある古川地点では4秒付近に卓越周期があることが分かる。図9はいろいろな周期の1自由度系（減衰10%）周期4の変位応答波形に対し、特定の閾値を超える回数を求め、縦軸に閾値を横軸に回数をプロットしたものである。周期4秒・減衰10%の1自由度系は40cm以上の振幅で3回、20cm以上の振幅の揺れが15回程度繰り返されることが分かる。

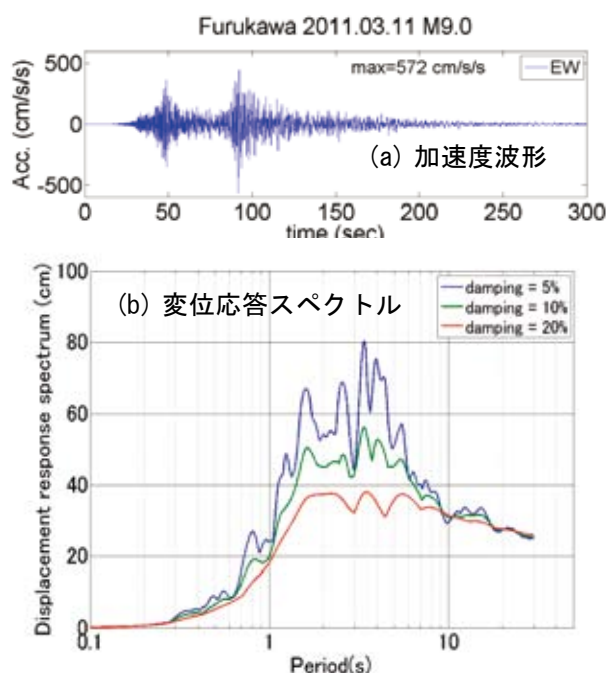


図 8 K-NET 古川の加速度波形と変位応答スペクトル (EW 方向)

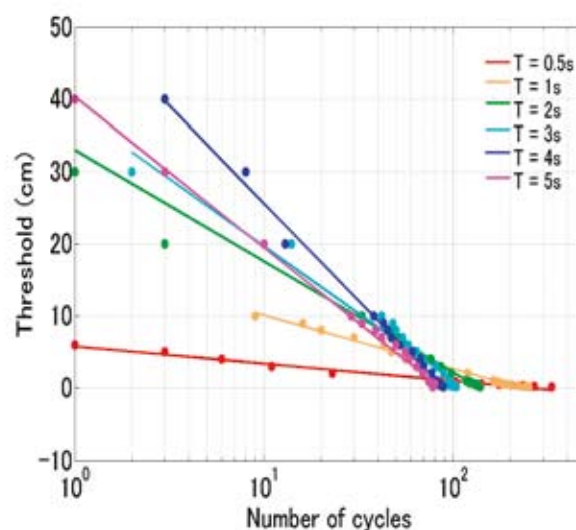


図 9 周期成分ごとの応変位波形と閾値に対する繰り返し回数

図10は各周期の1自由度系の累積応変位を示したものである。4秒の周期の累積変位は20mを超え、3秒と5秒の周期では17mに達する。図11は東日本大震災の他の観測点過去の被害地震における主要観測記録の累積変位を示したものである。仙台駅前の住友生命ビルの記録は周期3秒に対し5.9m、青葉山では周期3秒で7.8m、兵庫県南部地震の鷹取波は周期4秒で5.5m、新潟県中越地震の川口町波は周期4秒で3.3mとなっている。また、K-NET古川における2008年岩手・内陸地震における累積変位は周期4秒で13mとなっている。このような変位の繰り返し回数の情報は、構造部材や免震装置などの損傷や破壊に対して有効な情報となろう。

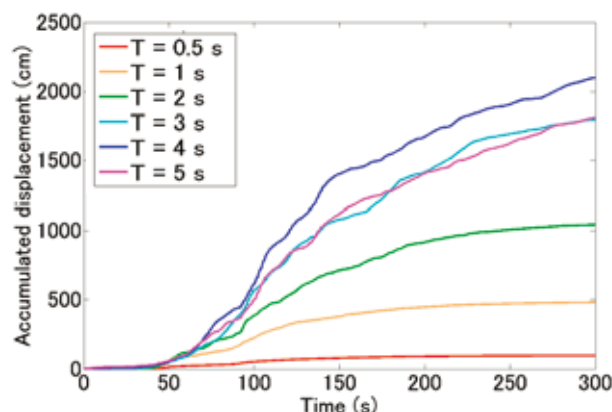


図 10 周期成分ごとの累積変位 (減衰 10%)

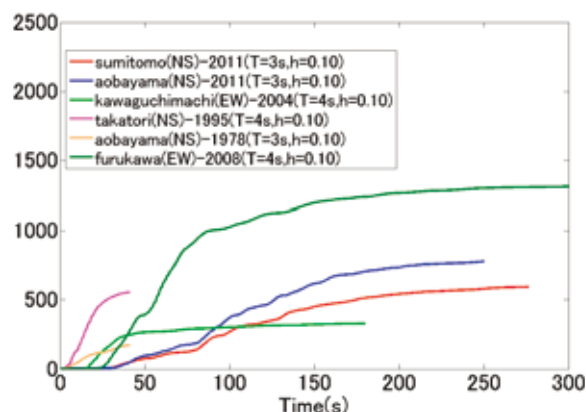


図 11 他の観測点と過去の主な地震記録の累積変位 (減衰 10%)

(4) 同一観測点での1978年宮城県沖地震との観測記録比較

仙台駅前の住友生命ビル (地下2階) における観測記録は、1978年宮城県沖地震における貴重な観測記録を得た観測点の記録であり、仙台地域における工学基盤の地震動として位置づけられる。この観測点における今回の地震の地震動特性を地域に大きな被害をもたらした1978年宮城県沖地震を比較

することは重要であり、2005年宮城県沖地震の地震動特性と合わせた比較検討を行った。

表2は今回の東北地方太平洋沖地震(M9.0)、1978年宮城県沖地震(M7.4)、2005年宮城県沖地震(M7.2)の3成分の最大加速度を比較して示す。

図12には、表6に示す3つの地震における南北方向の波形を比較して示す。また、図13には、3つの地震における水平2方向成分の応答スペクトルを比較して示す。

表2 仙台駅前における最大加速度値の過去の地震との比較

地震		南北方向	東西方向	上下方向	地震計
年月日	M	S25E	S65W		
2011/3/11	9.0	317.7	234.1	160.3	SSA-1
1978/6/12	7.4	250.9	240.9	90.8	SMAC-Q
2005/8/16	7.2	120.8	78.0	56.4	SSA-1

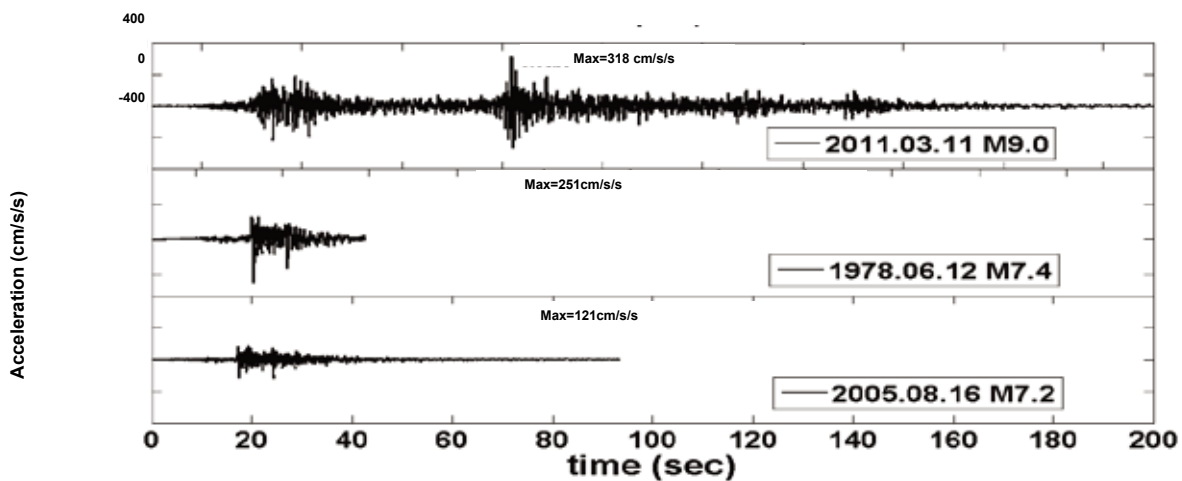


図12 加速度波形の過去の地震との比較(南北方向)

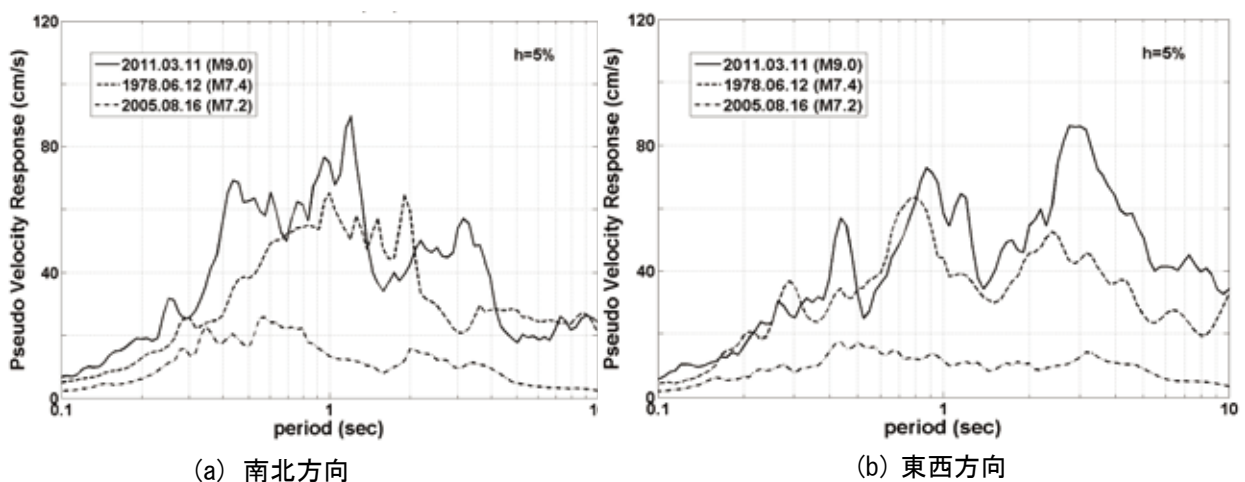


図13 速度応答スペクトルの過去の地震との比較

これらの図より、1978年宮城県沖地震との比較では、以下のことが分かる。

- 1) 今回の地震は2つの大きな波群で構成され、1978年宮城県沖地震の波形包絡線は第1波群と同程度である。

- 2) スペクトル特性を比較すると、1.5秒以下の周期成分はNS方向が大きく、1978年の宮城県沖地震より大きい。1秒付近で2割増、0.5秒付近で2倍程度大きい。
- 3) 3秒付近の周期成分はEW方向が大きく、1978年の地震より2倍程度大きい、この周期は深部地盤構造から推定される図10の1次卓越周期とは異なる。

4. 仙台市域の地盤構造と強震動特性

(1) 仙台市域の地盤構造

仙台市域の地形・地質を図14に示す。表層地質構造は、長町ー利府断層を境に北西側は仙台駅前、一番町など市街地中心部が位置する洪積台地になっており、南東側は沖積平野になっている⁸⁾。1978年の宮城県沖地震で大被害を受けた卸町などはこの沖積平野にある。また、市街地中心部の位置する洪積台地を取り巻くように、向山・青葉山などの丘陵地が存在しており、台地の北部には大規模造成地が存在している。仙台地域の第4紀層基底は深いところで75m程度である。

図15には、仙台平野南部地下構造調査により得られた基盤震度図を、図16には、深部地下構造による鉛直S波入射に対する1次卓越周期分布を示す。深部構造の1次卓越周期は東部で短く西に向かって長くなっていることが分かる。仙台駅付近の市街地中心部で2.0～2.5秒程度であり、東北大（青葉山）と長町で3秒程度である。仙台市西部の最も長いところでは4秒以上になっている。

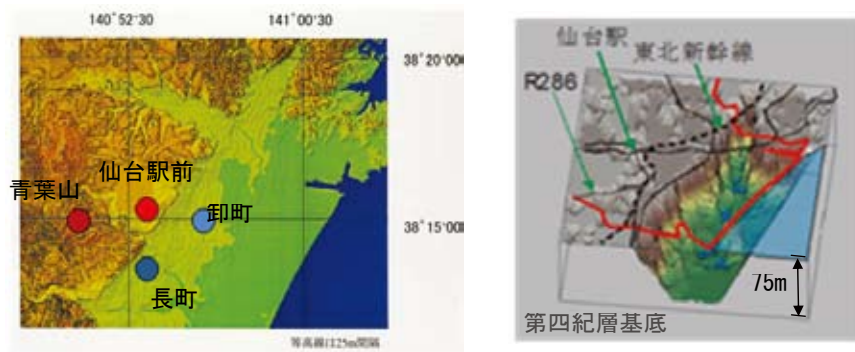


図 14 仙台市域と地形・地質

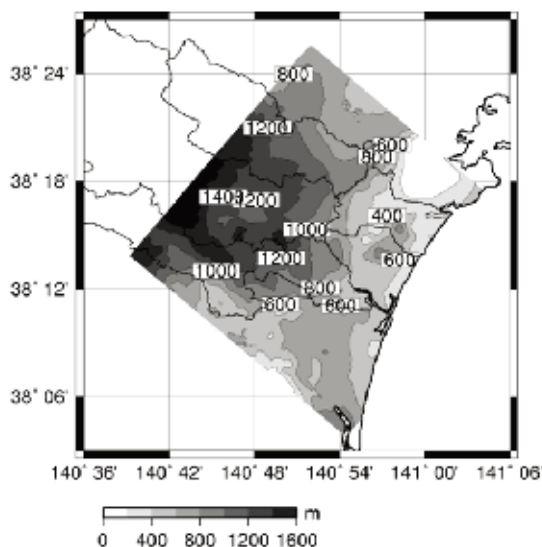


図 15 仙台平野南部の基盤震度⁸⁾

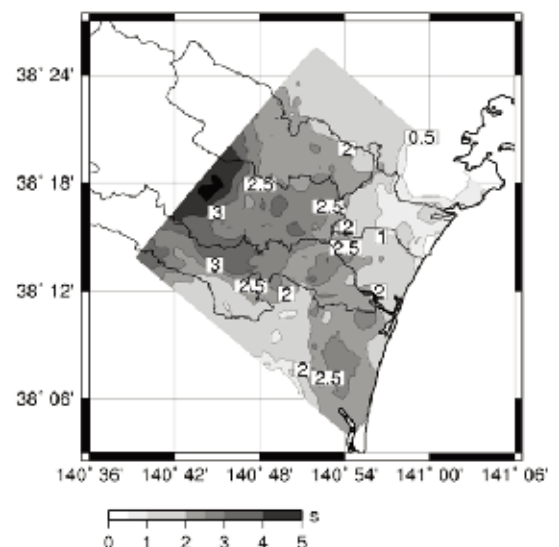


図 16 仙台平野南部の深部地盤構造による1次卓越周期⁹⁾

(2) 東日本大震災における仙台市域の強震動特性

筆者らの東北大学災害制御研究センター(DCRC)では、仙台市内の公共建築物を中心に建物の1階(幾つかは最上階との同時観測)で強震観測を行っており、今回の地震で貴重な記録が得られている⁹⁾。表1に観測概要を示す。観測点配置を図17に示す。

DCRC強震観測網で得られた本震時の最大加速度は300ガル～840ガルの範囲、最大速度は30cm/s～80cm/s程度となっており、仙台市北部の固い岩盤に表層地質が堆積した観測点で大きな加速度値を示している。これらの観測点における卓越周期は0.4秒から0.7秒の短周期成分であった。

図18には、仙台市東部の沖積平野にある若林区卸町地区や太白区長町地区における南北方向の観測記録の速度応答スペクトルを工学基盤の揺れとして位置づけられる仙台駅前のスペクトルと比較して示す。図中には、告示スペクトル(安全限界)もあわせて示してある。地震動特性の違いによるスペクトル特性は顕著であり、これは地盤条件の違いによるものである。

卸町地区では、1秒以下の周期成分が2倍以上増幅していること、長町地区では1秒の周期成分が仙台駅前の4倍近く増幅し、5%の速度応答スペクトルで300cm/sにも達する揺れであったことが分かる。また、3秒の周期成分も卓越しており、深部地盤構造の影響で仙台駅前に比べて2倍以上のスペクトル値である。

図19～図21には、図18に示した3地点の疑似速度応答スペクトルに対応するSa-Sdスペクトルを示す。

周期ごとの変位量は地盤条件によってかなり異なることは明確であり、耐震設計にこの差を取り入れることが望まれる。

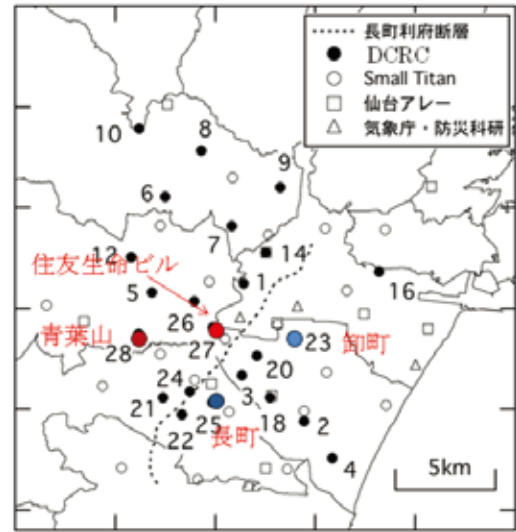


図17 DCRC強震観測網の観測点位置

表1 東北大学災害制御研究センター強震観測網による観測概要

No	地震計	地点名	2011/4/7			2011/3/11			2011/3/9		
			PGA (cm/s ²)	PGV* (cm/s)	計測 震度	PGA (cm/s ²)	PGV* (cm/s)	計測 震度	PGA (cm/s ²)	PGV* (cm/s)	計測 震度
2	ETNA	六郷小	311	42.1	5.7	欠測			欠測		
3	ETNA	古城小	251	22.4	5.1	320	61.3	5.6	24	3.1	3.2
4	ETNA	東六郷小	撤去			613	74.2	5.9	29	3.4	3.4
5	QDR	第一中	230	19.3	5.1	383	41.5	5.6	28	2.9	3.4
8	QDR	将監中央小	534	25.3	5.5	840	64.2	6.0	30	2.2	3.2
9	QDR	松森小	767	75.5	6.2	822	88.2	6.4	46	4.2	3.6
10	QDR	宮城県立図書館1F	279	18.0	4.9	407	65.0	5.5	20	2.4	3.1
11	QDR	宮城県立図書館3F	欠測			欠測			34	3.1	3.5
12	QDR	仙台青陵中等教育学校1F	欠測			欠測			19	3.5	3.3
14	QDR	鶴谷小学校1F	432	30.6	5.6	欠測			20	1.9	3.0
16	QDR	中野小学校1F	欠測			欠測			40	3.2	3.5
18	QDR	沖野小学校1F	360	31.8	5.5	512	79.4	6.1	37	3.5	3.5
20	QDR	南小泉小	220	25.7	5.2	381	63.7	5.5	19	2.4	3.1
21	QDR	西多賀中	186	16.4	5.0	400	47.3	5.5	23	3.0	3.4
22	QDR	富沢中	232	21.1	5.1	416	57.9	5.7	29	3.2	3.3
23	QDR	東配水管理事務所	472	37.3	5.7	613	77.0	6.1	30	2.6	3.2
24	QDR	滝沢寺	撤去			欠測			欠測		
25	QDR	長町南コミュニティセンター	264	29.5	5.5	494	68.3	5.9	59	6.0	4.0
26	QDR	青葉区役所	318	21.9	5.1	欠測			24	3.2	3.2
27	SSA-1	住友生命ビル	167	14.0	4.9	318	30.0	5.3	15	2.2	3.1
28	SMAC-MD	東北大学1F	欠測			333	59.8	5.6	35	4.4	3.6

*カットオフ周期10秒

*カットオフ周期50秒

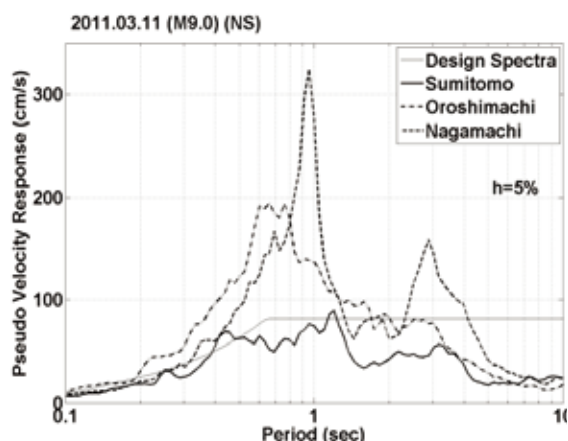


図 18 仙台駅前と卸町・長町の応答スペクトルの比較

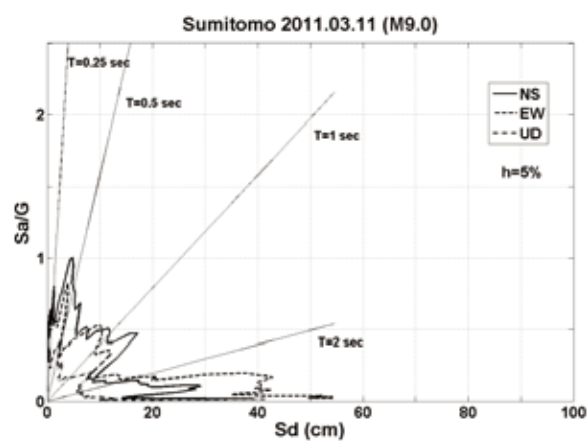


図 19 仙台駅前の Sa-Sd スペクトル

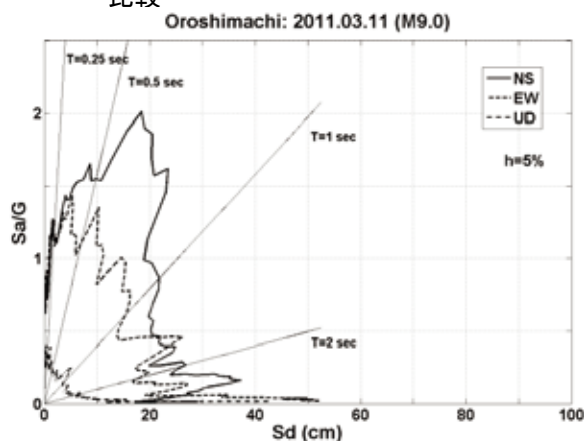


図 20 仙台市卸町地区の Sa-Sd スペクトル

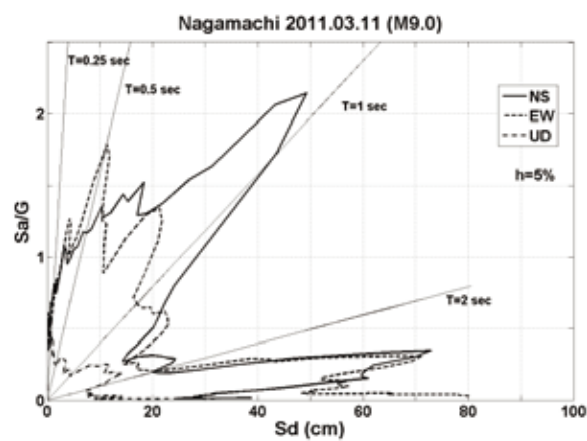


図 21 仙台市長町地区の Sa-Sd スペクトル

5. 青葉山丘陵地の地震動増幅特性と建物被害

(1) 地震動増幅特性

今回の地震で大きな被害を受けた東北大学工学部の人間・環境系建物の入力地震動特性を仙台駅前の住友生命ビルと比較することは重要である。今回の地震と1978年宮城県沖地震の青葉山丘陵地の増幅特性について比較検討する。

図22には、今回の地震と1978年宮城県沖地震において青葉山の人間・環境系建物1階で観測された強震記録の南北方向成分を示す。図23には、2つの地震における南北方向の応答スペクトルを示すとともに、仙台駅前のスペクトルと比較して示す。これらの図より、丘陵地の1秒付近の周期成分は今回の地震でも、1978年宮城県沖地震での2倍強増幅していることが分かる。これらの地形による増幅効果は建築構造物の耐震設計/耐震診断・補強に反映する必要がある。

なお、仙台駅前（住友生命ビル）に対する一秒付近で2倍の増幅特性は、本震の第2波群によるもので、本震の第1波群では1秒付近のスペクトル特性青葉山の増幅は見られないことを確認している。

(2) 東北大学青葉山キャンパスの建物被害

東北大学工学部建築学科の卒業生にとっては、「学びの館」である青葉山キャンパスの人間・環境系研究棟（SRC造3階建、1969年築）がセットバックした3階部分の4つの隅柱すべての柱脚部で大破した（写真1）¹⁰⁾。また、この建物の強震観測記録の分析により倍調波成分の励起を確認し、3階床面

から上部が浮き上がり振動を起こしていたことを示唆した¹¹⁾。

この建物は、1978年宮城県沖地震を経験し、2000年秋～2001年春にかけて耐震改修した。3階部分の梁間方向（南北方向）の構造耐震指標 I_s 値は、改修前は0.54、改修後には0.84となった。筆者は、耐震改修前後に起振機による振動実験を行い当該建物の振動特性を分析している¹²⁾。改修後は、2005年宮城県沖の地震や2008年岩手・宮城内陸地震を経験した。

図24には、今回の地震により観測された9階の南北方向の観測記録波形を1978年宮城県沖地震における観測記録と比較して示す。継続時間の長さの違いは一目瞭然である。図25には、9階における観測記録の南北方向の速度応答スペクトルを1978年の地震におけるスペクトルと比較して示す。同図には図19に示した1階の応答スペクトルも合わせて示している。また、本震の2つの波群それぞれに分けた応答スペクトルを示している。

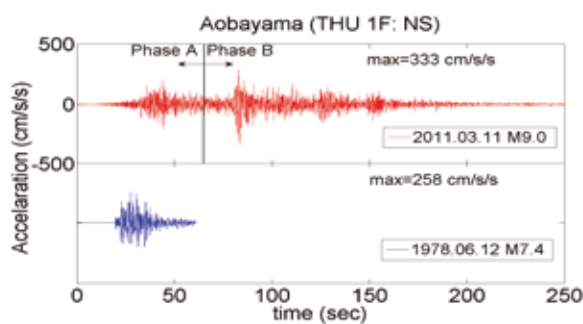


図22 建物1階における南北方向の強震観測記録（上）今回の地震、（下）1978年宮城県沖

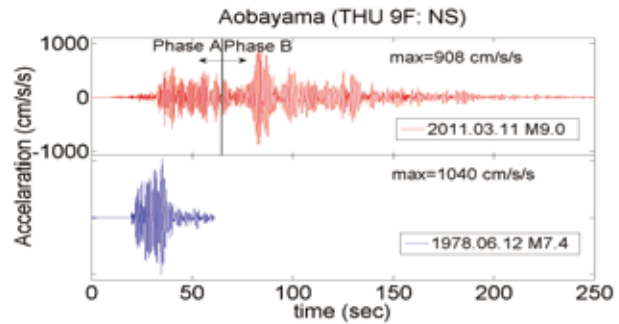


図24 建物9階における強震観測記録（上）今回の地震、（下）1978年宮城県沖地震

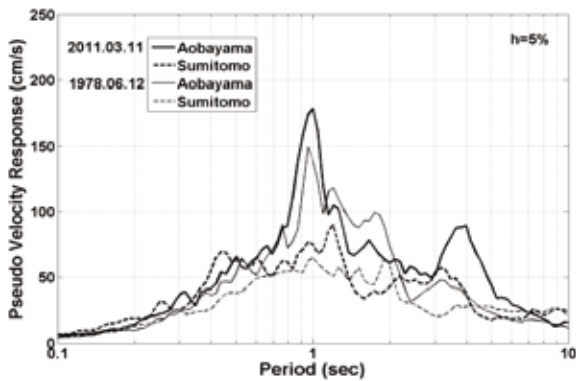


図23 速度応答スペクトル（実線：青葉山、点線：仙台駅前）

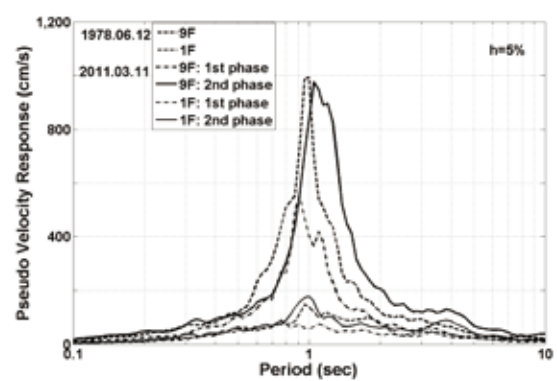


図25 今回の地震と1978年宮城県沖地震の応答スペクトル比較（梁間方向）



写真1 妻壁両端隅柱の柱脚部の被害状況¹⁰⁾

この図より、1秒の周期成分によって9階建の建物が共振し、大きく増幅していること、1978年宮城県沖地震の際よりも、周期が伸びていることが分かる。

図26には、拡張カルマンフィルタで本震時の人間・環境系研究棟の減衰・固有振動数を推定した結果を示す。減衰定数については最大点付近では振幅の増大に伴って増加しているが、その後は振幅が大きい時に減衰が小さくなっていることがわかる。固有振動数については、第一波群（Phase A）、第2波群（Phase B）振幅が大きくなるにつれて段階的に小さくなっており、損傷に伴う剛性低下が見られる。これは被害状況と整合する。振幅が小さくとも固有振動数の増加（剛性の回復）はほとんど見られない。

当該建物では、竣工時から地震観測、微動観測、振動実験が行われ、記録が蓄積されている。ここでは、Motosaka et al. (2004)¹²⁾に基づき卓越周期と建物の変形角の関係を求め、振動特性の振幅依存性を調べた。図27には建物の変形角と卓越周期との関係を損傷の大きかった短辺方向について示す。図中の記号は大きく4つの期間(Term1～Term4)に分け、さらにTerm3とTerm4についてはそれぞれ2つに分けて識別表示した。図中には表1に示す地震以外の地震のデータもプロットされている。この図より、今回の地震の第1波群では1978年宮城県沖地震の時より変形は小さかったが、第2波群では上回っている。本震後は、1978年宮城県沖後の剛性よりも低下していることが分かる¹⁰⁾。

なお、青葉山キャンパスでは、人間・環境系研究棟のほかにも8階建、9階建の建物が大きな被害を受けており、青葉山丘陵地の1秒付近の卓越周期に共振したことが被害をもたらした要因の一つであると判断できる。

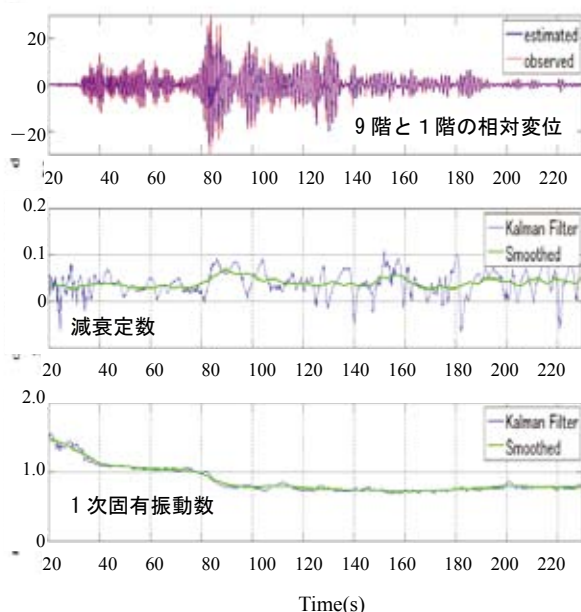


図 26 NS 方向（梁間方向）のシステム同定結果

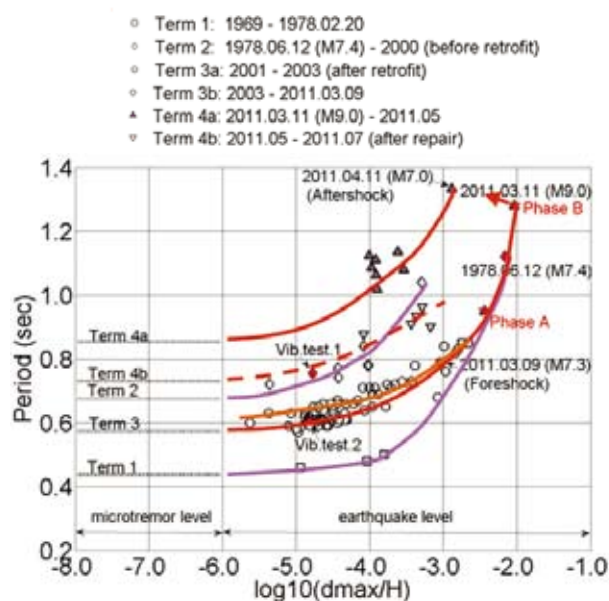


図 27 長期モニタリングによる変形角と一次固有周期の関係（梁間方向）

6. 地盤に係る特徴的な被害建物

(1) 仙台市若林区卸町地区の被害

前述のように仙台市東部の沖積平野部にある若林区卸町地区では、洪積台地にある仙台駅前に比べ大きな揺れであった(図18参照)。

卸町地区では3月11日の本震において、流通団地338棟のうち倒壊建物は2棟であった(写真2)。4月7日の余震で5棟に拡大した。この地区は1978年宮城県沖地震で数多くの建物が被災（RC造建物の調

査193棟中、中破以上が17棟）した地区である。倒壊した建物はいずれも新耐震設計施行以前の建物（1969年築）であり、1978年の宮城県沖地震を経験している。蓄積した損傷の評価が重要である。

筆者は、地震発生時に倒壊したRC造2階建建物（写真2左）の一階に居て奇跡的に助かった会社従業員2名（男女各1名）にヒアリングを行い、図28に示す卸町の揺れの状況と建物被害との関係を調査している。2人の証言により、1つ目の大きな揺れ（第一波群）ではなく2つ目の大揺れ（第2波群）で建物が倒壊したことが分かった。南北に大きい地震の揺れの大きさと倒壊方向は一致している。



写真2 仙台市卸町地区の倒壊建物

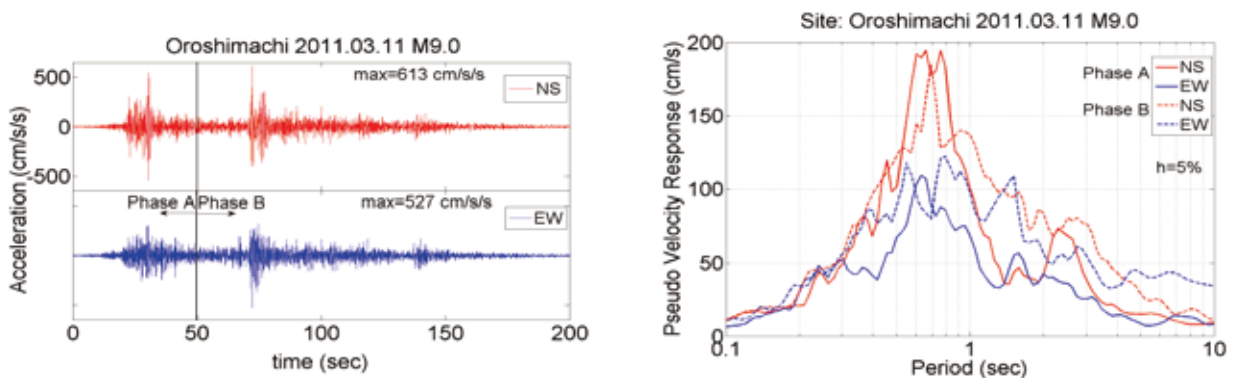


図28 仙台市卸町における観測波形と2つの波群に対する応答スペクトル

（2）明暗分けた1978年宮城県沖地震の杭基礎被害建物

1978年の地震で被害を受けた2つの杭基礎建物、一つは宮城野区のSマンション（SRC14階建）、もう一つは、長町の郡山市営住宅（SRC11階建）の被害状況調査を行った。いずれも「L字型」でエキスパンション・ジョイント（Exp. J）を介して2棟で構成される集合住宅である。前者の1棟は大きく傾斜、各階のExp. Jの間隔として測定された傾斜角は本震で1/56、4月7日の余震で1/45になった（写真3）。

図29には、10月に行われた沈下測定の結果を示す。図に示す11か所で基準点に対する相対高さ（単位m）が測定され、右側のA棟が西側



写真3 傾斜したSRC造14階建のSマンション
（左）全景（右）Exp. J部の開き

(No. 10とNo. 11) および中央部 (No. 4とNo. 3) で14mのアームに対して31cm南側に沈下していることが確認された。傾斜角 $1/45$ でありExp. J部の間隔で評価した傾斜角と同じであること、傾斜が進行していないことが分かった。

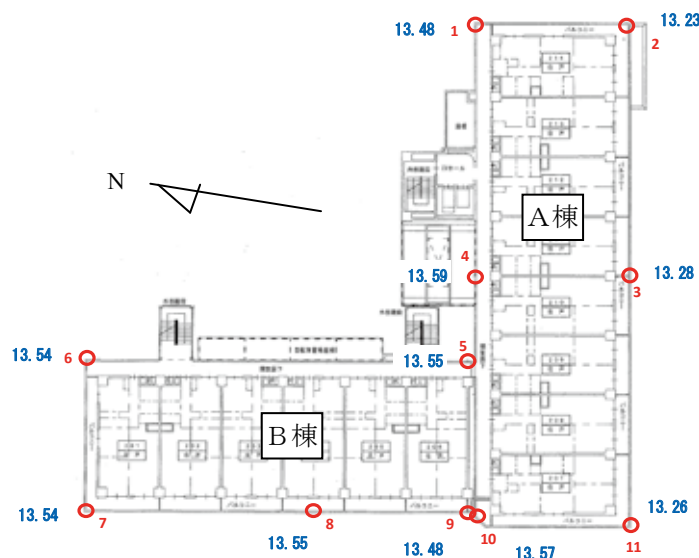


図 29 S マンションにおける沈下測定の結果

一方の長町の郡山市営住宅は、1978年の地震で傾斜したが、基礎の耐震補強¹³⁾を行った建物であり、今回の地震では1秒付近の地震動の大きな増幅(図21参照)にもかかわらず補強の効果により構造上の被害は無かった。



写真 4 仙台市太白区の市営住宅(左)と 1978 年宮城県沖地震後の基礎部の補強¹³⁾(右)

(3) その他の特筆すべき建物被害

仙台市若林区で新耐震設計施行以降に建てられたRC造4階建(杭長26m)が傾斜した(傾斜角 $1/30$) (写真5)。杭基礎の損傷による傾斜と思われる。上部構造に損傷は見られなかった。建物周辺には噴砂やマンホールの浮き上がり、電柱の沈下などの液状化現象が見られた。

大崎市古川地区では杭基礎の公立中学校の耐震改修が予定されていた校舎が沈下・傾斜する被害(写真6)が生じ解体された。また、この中学校の近隣にある私立高校では耐震改修を行った校舎が杭基礎の損傷により解体せざるを得なくなった。



写真5 傾斜したRC造4階建て杭基礎建物
(左) 全景 (右) 沈下した南東端柱脚部

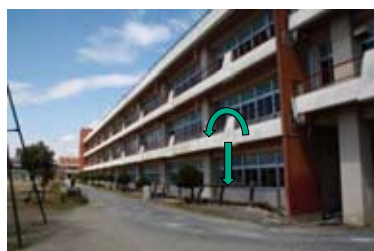


写真6 杭の損傷によると推定される学校校舎の沈下・傾斜（大崎市立古川東中学校）

7. 天井材落下被害

今回の地震では、大空間を有する構造物であるホールや大型店舗の天井材の落下により犠牲者を出した。文教施設関連だけでも1,630箇所の天井被害があったと報告されている。また、国土交通省が実施した151箇所の天井被害の調査によると1000 m²を超える大規模天井の被害も54件報告されている¹⁴⁾。この被害報告によると振れ止めがあった天井も多く落下している。

写真7および写真8は、筆者が視察した仙台市内の建物の天井材落下被害状況である。特に、写真8の被害状況は、たまたま未使用の時間帯であった有ったことが幸いしたが犠牲者が出る状況であった。



写真7 仙台市青葉区のS複合施設のつり天井落下被害



写真8 仙台市太白区の文化センターホールのつり天井落下被害

図30には写真8に示す天井材落下被害があった仙台市太白区の文化センターの屋根面中央部で微動計による振動測定を行った結果を示したものである。水平動入力により励起されると推定される2.3Hz付近の上下動の卓越が見られる。5Hz付近と8Hz付近にも上下動の卓越周期が確認できる。

このような大空間構造物では、例え横揺れの入力に対しても屋根面には大きな上下動が誘発される。天井材の耐震設計においては、この上下動に対する配慮と、横揺れに対しては十分なクリアランスの確保が必要である。天井材の落下被害状況を見ると、上下動に対する耐力不足

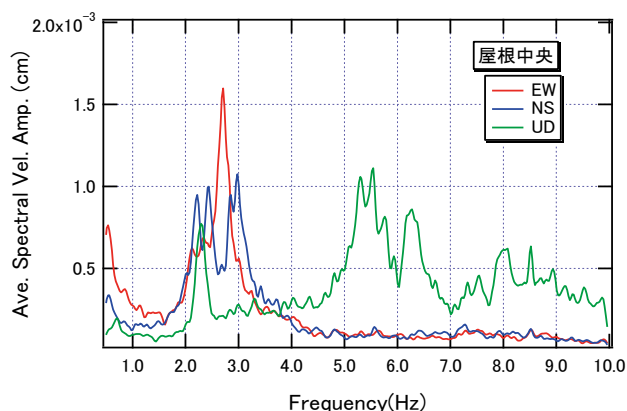


図30 仙台市太白区の文化センターホールの屋根中央部における微動観測結果

と水平動による非構造材同士の衝突が主な原因となり、被害が拡大したと考えられる。非構造材の上下動に対する荷重設定は甘いと言わざるを得ない。

地震エネルギーが地盤から建物に入り構造躯体、屋根を介して天井材が揺すられることを考えると、共振が重なるとオーダー違いの揺れにならないとも限らない。発電用重要構造物で行っているような床応答スペクトル法などの採用など耐震基準の見直しが求められる。

また、つり天井の振動問題は曲げ材をバネで支持するシステムと見なすことができ、バネの剛性が曲げ材の剛性に対して特定の値（閾値）以下になった場合に振動エネルギーが水平に伝播するようになる。このとき、2005年の宮城県沖地震の際に仙台市泉区の屋内プール施設の釣り天井落下被害¹⁵⁾において、「天井が波打つように揺れていた」証言のような挙動を示す。このような挙動を示さないような天井材の設計が求められる。

8. 悉皆調査による木造建物被害

建物の悉皆調査とは、ある一定エリアにある建物の被害状態に関する全数調査をいう。調査目的は、地震動と建物被害の関係の解明、地域のハザード情報や地質・地形等とのオーバラップによる対象地区の脆弱エリア同定過去の被災経験建物の追跡調査などである。ここでは、内陸部で大きな被害を受けた宮城県大崎市の10地区を対象に行った調査¹⁷⁾のうち、木造建物の調査（1,088棟）の分析結果を紹介する。

図31に建築年代別の木造建物被災度を示したものである。建築年代が古くなるにつれて、建物被災度が高くなる傾向が見られる。これは、近年の地震被害と同じ傾向である。近年の地震災害として、2007年能登半島地震と2007年新潟県中越沖地震の建築年代別の木造建物被災度を図32に示す。両地震ともに震度6強を観測した地域で同じ調査方法で調査した結果である。2007年の両地震と今回の大崎市の結果と比較して、一部損壊以上の被害率としては同じ程度の被害率であったが、全半壊率で比較してみると今回の震災の被害率が低いことが分かった。

次に、屋根種別による木造建物被災度の関係を把握するために、築10～30年の木造建物を抽出し、建物被災度と屋根種別のクロス集計を行った。図33に屋根種別と築10～30年の木造建物被災度の関係を示す。屋根種別が瓦屋根の場合では、全半壊率は5%以下、金属屋根では10%程度、スレート屋根では3%程度であった。一部損壊に関しては、瓦屋根では約6割程度、金属屋根では3割程度、スレート屋根では4割程度であった。一部損壊の被害率が最も高いのは瓦屋根であり、金属屋根、スレート屋根は同程度である。また、全半壊率では、瓦屋根より金属屋根の方が大きい割合であった。近年の地震災害では、屋根荷重が大きいほど被害の大きくなる傾向であった。しかし、本結果では、一部損壊の被害率については瓦屋根の被害率が高く近年の地震災害の被害傾向と合致しているが、全半壊率に関しては、金属屋根の全半壊率が最も高く近年の地震災害の被害傾向とは異なる結果であった。この要因については、今後の追加調査やさらなる分析が必要である。

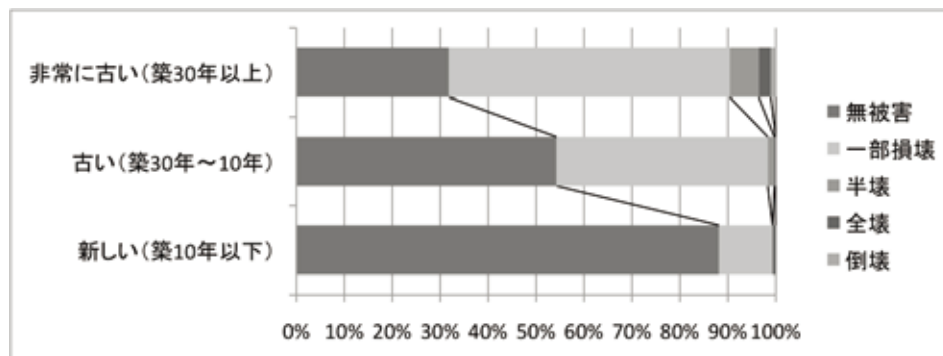


図 31 大崎市における悉皆調査に基づく建築年代別の木造建物被災度

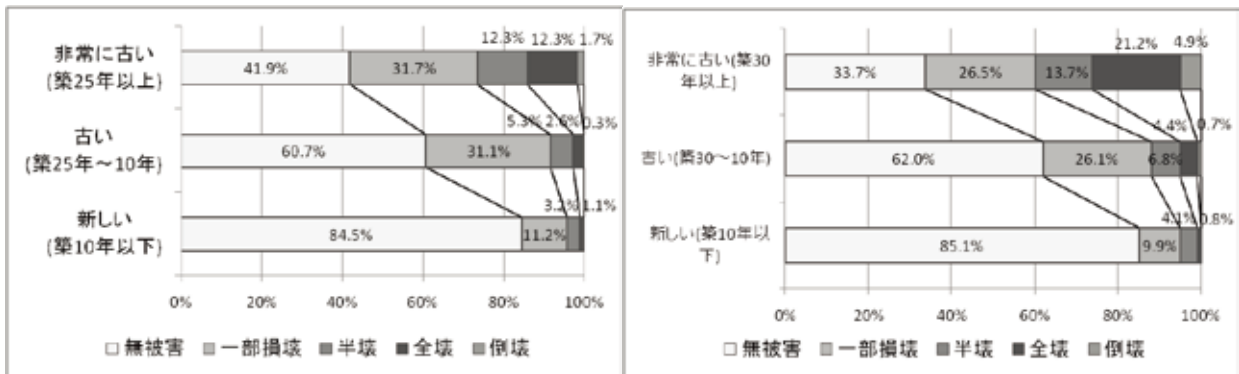


図 32 2007 年能登半島地震 (左) と 2007 年新潟県中越沖地震 (右) の建築年代別の木造建物被災度

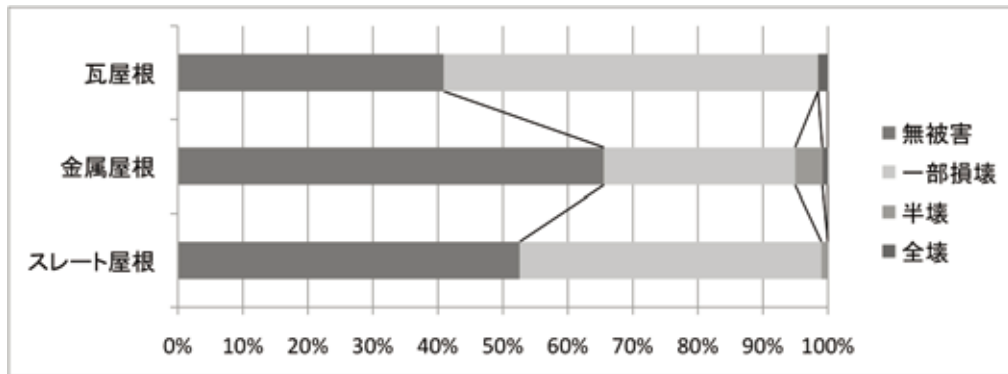


図 33 屋根種別による木造建物被災度

9. まとめ

今回の東日本大震災における建築構造物の被害状況を見る限り、1978年宮城県沖地震に比べて地震動が大きかったにもかかわらず構造被害が少なかった。これは耐震基準の変遷と既存不適格建物の耐震改修・補強の普及促進により耐震性が向上したことによるのは事実であろう。今後、より地震に強い都市・建築に向けて、今回の地震における振動被害の教訓を以下に示す。

- 1) 地震動の地盤条件による差は顕著である。耐震設計・耐震診断／補強における適切な考慮が必要であり、サイスミック・マイクロゾーニングの重要性が高まった。耐震基準への反映、自治体の条例として取り込むことも考える必要がある。
- 2) 被害を論じるときの地震動指標として、計測震度は必ずしも適切ではなく、対象とする被害に対応した適切な指標が必要である。
- 3) 今回の地震で観測された大加速度記録を分析すると、地震観測装置の設置場所・設置法について検討する必要がある。
- 4) 継続時間の長い地震動における大振幅での繰り返しや数多く発生する余震に対する耐震要素の健全性評価の必要性が指摘される。
- 5) 地震動と建物被害の分析において、地震動の非定常と建物の非線形性を考慮した分析が不可欠である。
- 6) 過去の地震や今回の地震で被災した建物の残存耐震性能の適切な評価法の確立が望まれる。
- 7) 構造躯体ばかりでなく、非構造材・設備の耐震性とのバランス、基礎構造と上部構造のバランスなど建物全体の総合的耐震対策が必要である。

また、地盤環境調和型の耐震対策・地震対策に向けた今後の研究課題として以下の点を指摘したい。

- 1) 地盤構造と地震動の卓越周期との関係に着目すると、仙台駅前の観測記録に含まれる3秒の卓

卓越周期成分は、伝播経路の途中の牡鹿半島や塩釜の観測点では3秒の卓越周期成分は見られないこと、およびこれまでの地盤調査に基づく深部構造の卓越周期（2秒付近）と一致しない。この原因は要検討である。

- 2) 傾斜基盤を伝播する表面波は伝播の方向によって卓越周期が異なることもあらためて認識させられた。方向性のある丘陵地などの増幅特性は、免震構造の卓越周期の設定などで要検討である。
- 3) 地震動予測精度の向上の観点から、今回のような巨大地震に対する地震動評価法の未熟さを指摘せざるを得ない。今回の東日本大震災の本震、および数多くの余震の観測データの有効活用が期待される。
- 4) 特に、早期地震警報のための地震動予測に関しては、筆者らが提案している前線観測点の観測情報をリアルタイムに活用する研究¹⁷⁾の推進が期待される。地震の到来方向が分かった時の前線観測点と評価対象地点との伝達特性を有効に活用すれば、震源特性の曖昧を少しでも解消でき、予測精度の向上が期待できる。

参考文献

- 1) 源栄正人、東日本大震災における地震動と建物被害、建築防災、2011年10月
- 2) 源栄正人、東日本大震災を経験して—地震動と建物被害を中心として—、日本地震工学会会誌、東日本大震災特集号、2011年10月
- 3) 山本壮一郎、宮城県沖地震の教訓、内外情勢調査会、1979年
- 4) 大野・源栄、2011年東北地方太平洋沖地震とその余震における仙台市内の強震動特性、日本地球惑星科学連合2011年合同大会，MIS036-P72，2011.5
- 5) 日本建築学会、2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、2011年7月
- 6) Masato Motosaka and Tsoggerel Tsamba, Investigation of High Acceleration Records at K-NET Tsukidate Station during the 2011 off the Pacific Coast Tohoku Earthquake, JAEE annual meeting, 2011
- 7) 坂本拓也、源栄正人、柴山明寛、アンケート調査に基づく2011年東北地方太平洋沖地震における揺れの実態調査、第30回日本自然災害学会学術講演会講演概要集、平成23年11月
- 8) 宮城県、仙台平野南部地下構造調査報告書、平成17年3月
- 9) 源栄正人、山本優、大野晋、仙台地域の深部地盤構造に起因するやや長周期地震動特性と長周期構造物の現況、月刊 地球／号外 No. 55、227-233、2006.
- 10) 源栄正人他、2011年東北地方太平洋沖地震における被害建物の地震前後の振動特性の変化、日本建築学会大会梗概集、2011年8月
- 11) Tsamba and Motosaka, Investigation of dynamic behavior of a damaged 9-story building during the 2011 off the Pacific Coast Tohoku Earthquake, JAEE annual meeting, 2011
- 12) Motosaka, Masato, Takeshi Sato, and Yu Yamamoto, Amplitude Dependent Dynamic Characteristics of an Existing Building, 13WCEE, CD-ROM No.1023, 2004
- 13) 志賀敏男、地震とコンクリート杭、コンクリート工学、Vol.18, No.8, 14-21, 1980
- 14) (社) 建築性能基準推進協会報告書、2011年9月
- 15) 源栄正人、天井落下被害を受けた屋内プール施設の屋根とつり天井の動的挙動に関する基礎的検討、第25回日本自然災害学会学術講演集、19-20、2006年
- 16) 濱崎喜有、柴山明寛、石田寛、大野晋、岡田成幸、佐藤健、源栄正人、東日本大震災で被災した建物の悉皆調査、東北地域科学研究、第48号、2012年
- 17) Serdar Kuyuk and Masato Motosaka, Real-Time Ground Motion Forecasting Using Front-Site Waveform Data Based on Artificial Neural Network, Journal of Disaster Research Vol. 4, No. 4, 261-266, 2009

著 者 略 歴



氏 名 源 栄 正 人 (モトサカ マサト)

所 属 東北大学大学院工学研究科・工学部 災害制御研究センター

略 歴

1952 (S27) 年 茨城県生まれ。工学博士

1971 (S46) 年 茨城県立水戸第一高等学校卒業

1975 (S50) 年 東北大学工学部建築学科卒

1977 (S52) 年 東北大学大学院工学研究科建築学専攻修了。

1977 年 4 月～1996 年 3 月：鹿島建設株式会社において、耐震構造解析・地震動特性研究を中心
に地震工学・耐震工学の研究と実務に従事（武藤研究室、小堀研究室）

1996 (H8) 年 4 月：東北大学工学研究科助教授

1999 (H10) 年 4 月：東北大学工学研究科教授

現在、災害制御研究センターの地震地域災害研究分野を担当

受 賞 歴

1997 年日本建築学会論文賞受賞。

所属学会 日本建築学会、日本地震工学会、日本自然災害学会、日本地震学会、日本安全教育学会（顧問）

社会活動

- ・ 仙台市地震対策専門部会委員（代表幹事）
- ・ 宮城県地震対策専門部会委員（幹事）、
- ・ 仙台市有施設耐震診断等判定委員会委員
- ・ 仙台市宅地保全審議会委員 など

主な著書

- ・ 緊急地震速報－揺れる前にできること（共著）（東京法令出版）
- ・ 宮城県沖地震の再来に備えよ（監修）（河北新報出版センター）
- ・ 都市防災シリーズ 1：大地震と都市災害（共著）（鹿島出版会）
- ・ 構造物と地盤の動的相互作用解析—時間領域処理法—（共訳）（鹿島出版会）など

プロフィール

源栄教授は、東北大学大学院工学研究科災害制御研究センターの地震地域災害研究分野の教授として、国際的な最先端の研究と地域に根ざした研究により多大な社会貢献を实践している。地震工学並びに地震防災が専門。構造物と地盤の振動／波動問題に関する研究をベースに、地盤環境調和型地震対策や早期地震警報システムの研究に取り組んでいる。地震災害軽減のため、研究成果や社会動向を市民に分かりやすく情報提供するための活動を積極的に行っている。

今回の東日本大震災では、日本建築学会の災害調査のまとめ役や日本建築学会東北支部災害調査連絡会委員長などの役職を務めるとともに、大きな被害を受けた東北大学の「東日本大震災を踏まえた東北大学の施設整備検討会」の座長を務めている。

