

仙台地域の強震観測記録を用いた深部地盤構造モデルの検証と 1978年宮城県沖地震における地震動特性との比較検討

源 栄 正人、山本 優、陳 軍、大野 晋
東北大学工学研究科災害制御研究センター

1. はじめに

近い将来極めて高い確率で発生が予測されている宮城県沖地震の襲来をうける100万都市仙台とその周辺領域における都市構造物の耐震対策や地域の地震防災対策のための基礎資料として、これまで検討されてきている最新の地盤構造や地震観測記録に関する情報を整理することは重要である。特に、想定される宮城県沖地震の一部が破壊したとされる2005年8月16日の宮城県沖地震(M7.2)では仙台地域で多くの地震観測記録が得られており、筆者らが観測している住友生命ビルなどでは1978年6月12日の宮城県沖地震(M7.4)の際に全く同じ位置で貴重な観測記録が得られ、2つの地震による地震動特性の比較検討は次の宮城県沖地震の地震動予測を行なう上で興味深い。

以上のような背景の下に、本報告は、1) 今回の地震における仙台地域の強震観測記録の概要、2) 仙台地域の地下構造モデルと地震観測記録に基づく卓越周期の検証、3) 仙台地域の3次元波動伝播解析、4) 1978年宮城県沖地震と今回の地震の強震記録の比較、5) 1978年宮城県沖地震における仙台地域の再現地震動についてまとめたものである。

2. 今回の地震における仙台地域の強震観測記録

(1) 観測記録概要

表1には、筆者らが平成15年度に設置した仙台市小型強震計観測網¹⁾を中心に仙台地域における観測網一覧を示す。図1は仙台市の強震計の分布を既設の地震計も含んで示したもので、長町利府断層及び第四紀層基底深さのコンターも重ね書きしている。当観測網の強震計はETNAとQDRからなるが、うちQDRで長周期までSN比のよい記録が観測されたのは8/16の地震が初めてとなる。

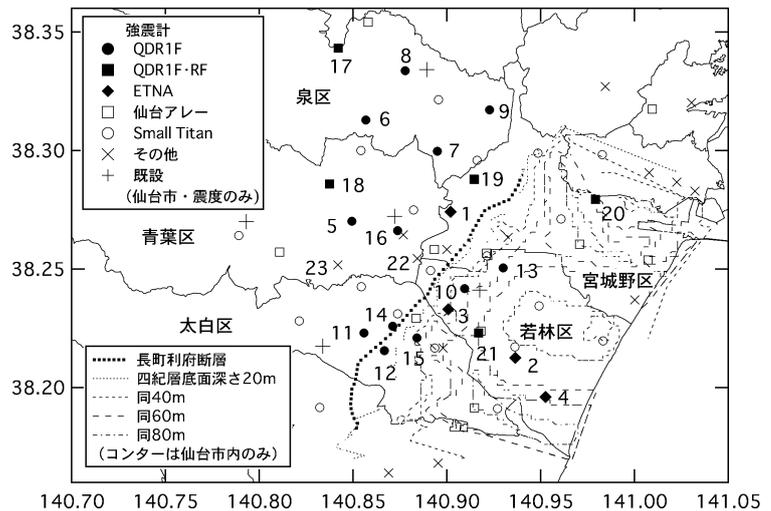


図1 仙台地域の強震観測点

(2) 観測記録とその特徴

表1には、8/16の地震で観測された記録の最大加速度、最大速度(3成分)及び計測震度値も記載している。最大加速度が最も大きかったのは市北部の将監中央小であり、400Galを観測している。市北部の造成宅地では2003年5月のスラブ内地震(M7.1)でも瓦屋根などの被害が発生し

表1 仙台地域の強震観測記録諸元

	観測点	緯度 (度)	経度 (度)	PGA(cm/s/s)			PGV(cm/s)			計測震度
				NS	EW	UD	NS	EW	UD	
小型強震計	幸町小学校	38.2741	140.9019	200	155	76	14	9	4	4.7
	六郷小学校	38.2125	140.9365	214	167	108	16	15	5	5.0
	古城小学校	38.2331	140.9009	139	156	76	13	10	4	4.8
	東六郷小学校	38.1960	140.9526	161	156	82	14	13	4	4.9
	第一中学校	38.2701	140.8495	90	84	57	10	9	4	4.4
	加茂中学校	38.3129	140.8569	238	161	81	15	15	6	4.9
	八乙女中学校	38.2997	140.8950	159	150	91	10	12	5	4.7
	将監中央小学校	38.3336	140.8777	329	403	115	15	18	5	5.2
	松森小学校	38.3171	140.9228	299	230	163	16	14	6	5.1
	宮城県立図書館	38.3432	140.8421	179	162	77	8	11	4	4.7
	仙台女子商業高等	38.2859	140.8375	189	121	60	10	7	5	4.5
	鶴谷小学校	38.2879	140.9145	124	135	82	10	8	4	4.5
	沖野小学校	38.2230	140.9170	193	132	65	20	14	5	5.0
	南小泉小学校	38.2417	140.9094	84	120	52	8	11	4	4.5
	富沢中学校	38.2155	140.8668	147	138	91	16	10	5	4.7
	東配水管理事務所	38.2504	140.9300	178	216	49	14	10	3	4.8
	滝沢寺	38.2258	140.8712	201	228	101	14	12	5	4.9
	長町南CC	38.2209	140.8840	195	225	65	20	21	5	5.3
	青葉区役所	38.2662	140.8737	156	139	83	10	10	4	4.5
	K-NET	MYG013	38.2633	140.9327	262	248	118	13	16	5
KiK-net	MYGH01	38.2370	141.0003	288	216	34	13	9	2	5.0
仙台アレー	中野	38.2539	141.0072	229	191	80	14	12	3	4.8
	折立	38.2572	140.8108	107	106	77	6	9	5	4.4
	玉川	38.3175	141.0094	98	200	88	5	7	3	4.3
	鶴巻	38.2606	140.9708	201	196	86	16	16	6	5.0
	泉電力ビル	38.3542	140.8581	217	193	80	9	12	4	4.6
	住友生命	38.2544	140.8842	121	78	56	12	7	3	4.5
	東北大	38.2519	140.8419	87	81	57	10	10	5	4.4

ており²⁾、盛土により短周期地震動を増幅させやすい傾向があると考えられる。一方、最大速度が最も大きかったのは長町南コミュニティセンターの21cm/sである。この場所は1978年宮城県沖地震で大きな被害を受けた地域であり³⁾、計測震度も5.3と最も高い値が得られている。

図2に仙台女子商(No.18)から東六郷小(No.4)まで、長町利府断層を横切った線での速度波形(住友生命以外は水平2成分を回転して求めたNS成分)を示す。沖野や六郷など長町利府断層の東側で、かつ78年で被害が大きかった場所³⁾の振幅が大きくなっていることが分かる。特に沖野では主要動部分のみならず、周期2~3秒が卓越している後続波の振幅も大きいことが分かる。

図3は図2のうち、第一中、住友生命ビル、沖野小、東六郷小の擬似速度速度応答スペクトルを重ね書きしたものである。前述の通り沖野で周期2~3秒の振幅が大きくなっている。図3には78年宮城県沖地震の住友生命ビル観測記録の応答スペクトルも示している。全体的に8/16の地震の方が振幅が小さいが、特に周期1-2秒の帯域でのギャップが大きいことが分かる。この周期帯は建物の被害に影響が大きいことが指摘されており⁴⁾、8/16の地震で建物被害が小さかったことの一因と考えられる。

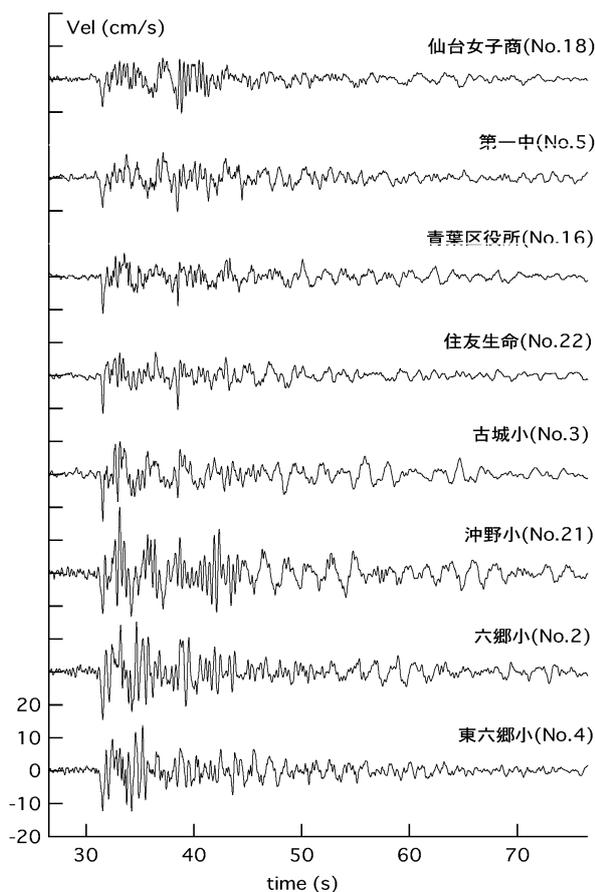


図2 観測記録速度波形
(2005. 8. 16 宮城県沖地震, NS 成分)

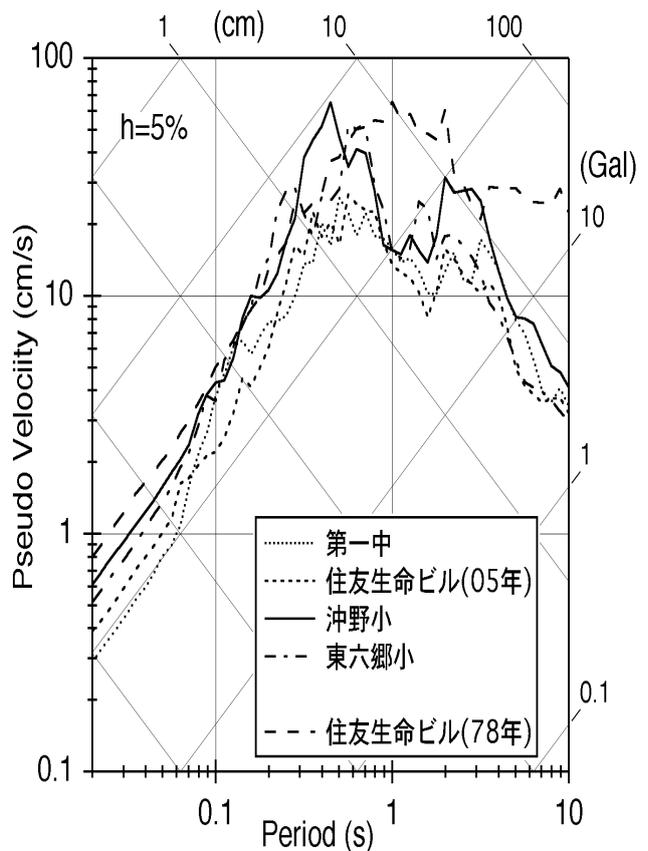


図3 観測記録の擬似速度応答スペクトル
(2005. 8. 16 宮城県沖地震 NS 成分)

3. 仙台平野南部の地下構造モデルと地震観測記録による卓越周期の検証

(1) 仙台地域の地盤構造の概要

仙台地域の地盤構造を浅い地盤構造（表層地質構造）と深部地盤構造に分けて概説する。

表層地質構造は、長町－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。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。仙台地域の第四紀層基底は深いところで80m程度であり、荒浜付近で若干浅くなっているが概ね海に向かって深度を増している。

一方、深部地盤構造は、後述のように海岸線から西に向かって徐々に深くなっており、基盤深度は仙台駅付近で約800m、カルデラ地形（白沢カルデラ）付近で最も深くなっている。

ここでは、地域における最新の深部地盤構造に関する情報として、平成14年度から平成16年度に実施された仙台平野南部地下構造調査（委員長：大槻憲四郎東北大学教授）で実施された地下

構造調査に基づく3次元地下構造モデルについて示す⁵⁾。

この調査では、既存の地下構造に関する文献・データ調査として、①既往の重力探査文献とデータ⁴⁾、②温泉等の試錐およびデータ、③既往反射法地震探査と微動観測等の文献、④地質文献、に関する文献調査を行なうとともに、新たに2測線における反射法探査と20点におけるアレー微動観測を実施し、図4に示す対象領域（長町ー利府断層線の走向方向とその直交方向に軸をもつ仙台市域とその周辺領域）において新たな3次元地下構造モデル構築している。

図中には、既往の反射法探査の主な測線（宮城県による3測線、H13年度科学技術振興調整費による測線、防災科研による測線）も表示してある。深部構造作成にあたり、上述の反射法探査データや愛宕神社の温泉ボーリング（1200m）、若林区サンピアの温泉ボーリング（350m）をはじめとする対象領域の深井戸のデータも用いている。

図5には3次元深部地盤構造モデルの基盤深度図を示す。主要な断面（東西方向断面と南北方向断面）の速度構造図については、後述に示す。図6と図7には、それぞれ、この3次元モデルの各位置の地盤構造でS波の鉛直入射に対する1次卓越周期と入射波に対する応答倍率の空間分布を示す。これらの図より、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秒以上になることが分かる。一方、増幅率は東部で大きくなっているのが特徴である。

（2）強震観測記録に基づく3次元地下構造モデルの1次卓越周期の検証

上記の調査により得られた3次元深部地盤構造モデルについては、防災科研のK-NET、KiK-netや東北工業大学のSmall-Titan、仙台高密度強震観測網（仙台アレー）等の既存の強震観測点において、1998年9月宮城県南部の地震記録等を用いて地盤の周期特性の検証が行われてきているが、必ずしも十分ではない。

一方、2004年に筆者らは仙台地域において、小型強震計を用いた強震観測網を新たに設置した¹⁾。また、この観測網とは別であるが、1978年宮城県沖地震で記録が得られた住友生命ビル地下2階においても地震計を設置している。

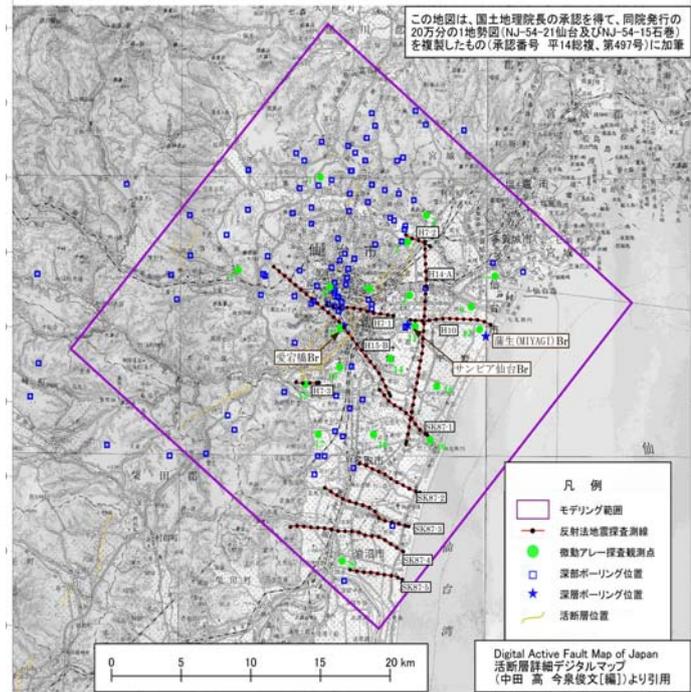


図4 仙台平野南部地下構造調査対象領域
(文献5)より

この観測網により、2005年8月16日の宮城県沖地震を含む多くの記録が得られている。そこで、8/16の観測記録の応答スペクトルと深部地盤構造モデルから得られる伝達関数から、1次卓越周期の比較を行った。また、図8は3つの断面の各地点における理論卓越周期と観測に基づく

1次卓越周期を比較して示したものである。

観測記録は今回（2005年8月16日宮城県沖 M7.2）のほかに、11月15日の三陸沖の地震（M7.1）と12月17日の宮城県沖の地震（M6.1）における記録も分析している。図8より、観測記録からは地震の違いによらず1秒から3秒にピークが見られる。ただし、卸町付近(No.15)や MYG013(No.24)の1次周期は、観測記録の方がやや長周期側に出ており、詳細な分析が必要である。

1978年の地震で記録が得られた住友生命においては2秒程度、東北大学では3秒程度、また1978年に被害の大きかった長町³⁾においては、3秒付近に1次卓越周期があることがわかる。

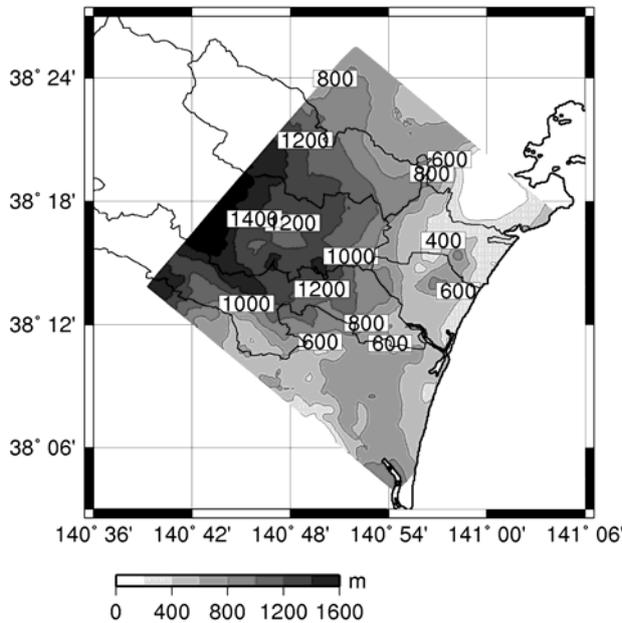


図5 深部地盤構造モデルの基盤深度

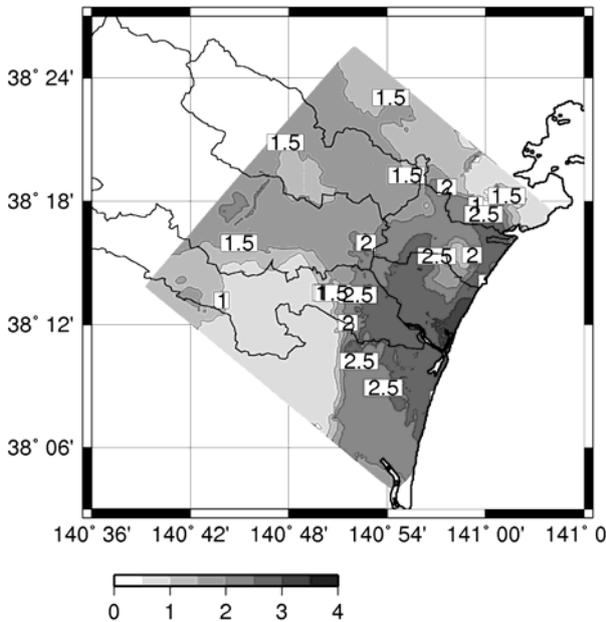


図6 深部地盤構造モデルの1次卓越周期

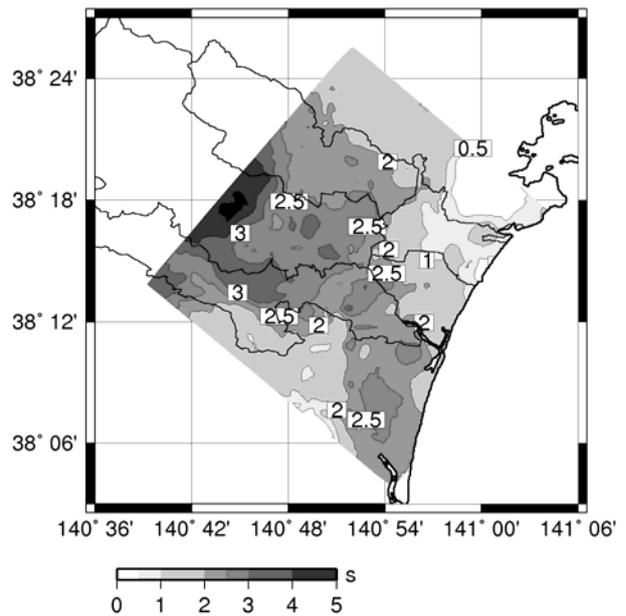


図7 1次卓越周期におけるS波の増幅率

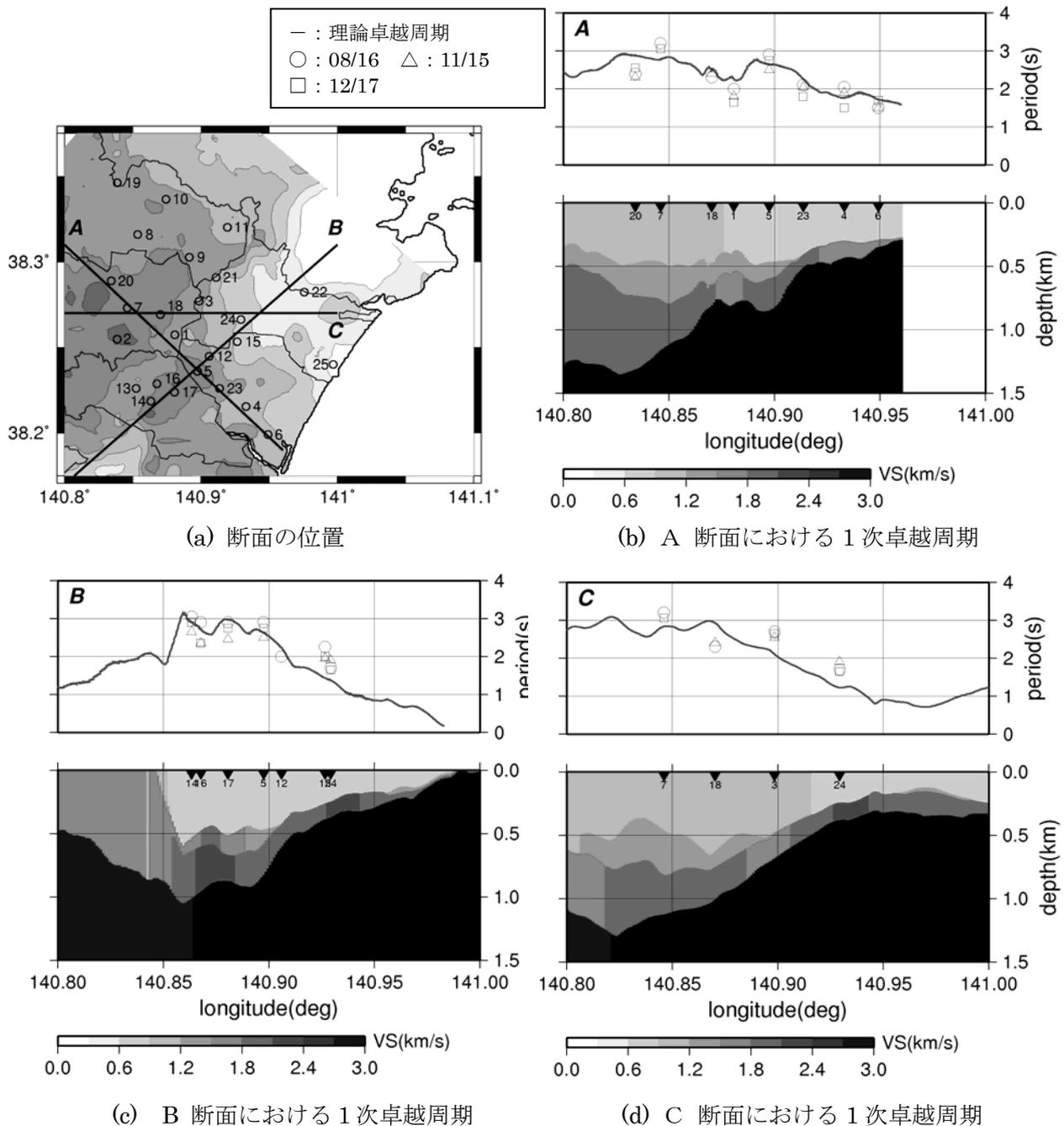


図8 深部地盤構造モデルの3断面における理論と観測による1次卓越周期の比較

3. 今回の地震における仙台地域の3次元波動伝播シミュレーション

(1) シミュレーション法の概要

本節では、前述した深部地盤構造モデルを用いて、3次元地震波動伝播シミュレーションを行った結果について報告する。シミュレーションはスタッガードグリッドを用いた3次元有限差分法(空間:4次、時間:2次精度)により行った。対象領域を図9に示す。ここで用いた差分法は文献

6)によって提案されたものであり、境界面に入射した波が吸収される吸収境界条件と境界面から 15 格子点を帯状の吸収領域が併用されており、媒質の非弾性減衰も考慮されている。震源の運動学的断層モデルとして三次元場の食い違い格子におけるモーメントテンソルを近似的に表現する方法である。

シミュレーションはまず、震源を含む地震基盤までの大構造モデル⁷⁾を用いて、地震基盤における波形を求めた。これを入射波とし、前述の3次元地下構造モデル⁵⁾を用いて、工学的基盤を自由境界としたときの波形を求めた。上述の2つの地盤構造モデル間の境界条件は吸収境界としている。

また、住友生命で観測された波形を地震基盤まで戻した後、距離補正を行い、この波形を3次元地下構造モデルに平面波として入射し、工学的基盤上の波形を求めた。入射角度は40度⁸⁾を仮定している。

(2) 8月16日宮城県沖地震の断層モデル

8月16日宮城県沖地震における本震の破壊過程については、波形インバージョンなどにより様々な断層モデルが提案されている。本検討では、呉・瀨瀨(2005)⁷⁾が提案した断層モデル(図10)を用いた。地震動シミュレーションを行なう計算領域は長辺方向が210 km、短辺方向が110 kmである。表2に2005年8月16日地震の震源パラメータを示す。解析周波数は0.6Hzまでとした。

前述の3次元深部地下構造を有限差分法に用いた。仙台地域以外領域の地下速度構造に関しては呉・瀨瀨(2005)⁷⁾を参考にした。

(3) シミュレーション結果

各観測点の地中速度の計算波形を図11に示す。

表2 2005年8月16日地震震源パラメータ

地震モーメント(Nm)	6.27x10 ¹⁹
緯度	38.137
断層原点 経度	142.167
深さ(km)	30.0
破壊伝播速度 V _R (km/s)	3.4

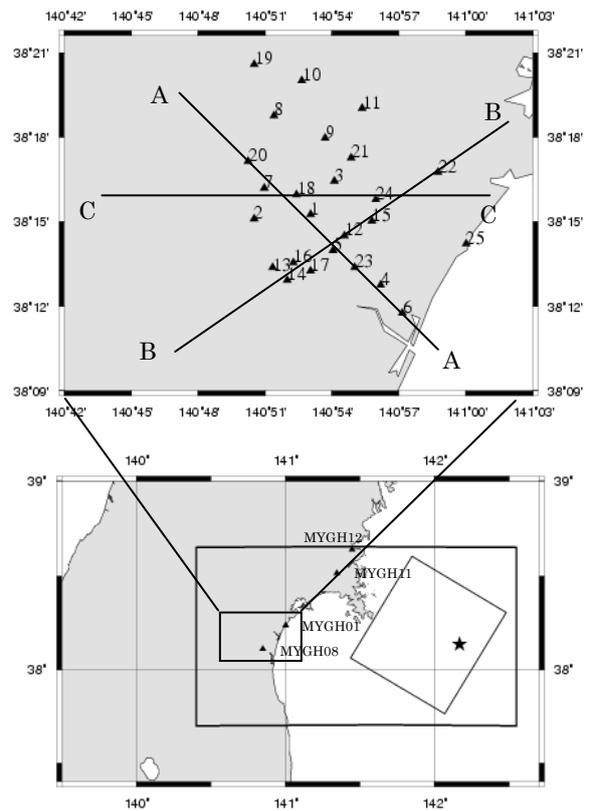


図9 解析対象地域

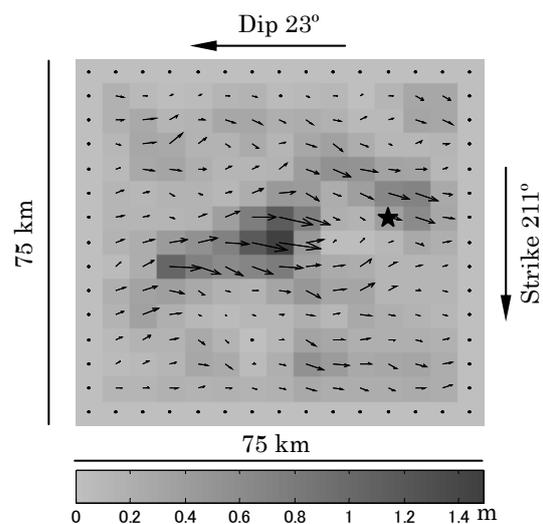


図10 断層の不均質すべり分布⁷⁾

波形を比較すると、計算波形は観測波形に良く一致している。但し、計算したMYGH08の水平成分波形は観測波形より小さくなっており、これについては、震源・構造の両面から、より詳細な検討をする必要がある。

図12と図13は各断面上の観測速度波形と計算速度波形の比較を示す。上から順に観測波形、3次元計算波形、深部地盤構造を1次元で計算したときの波形（NSのみ）を示す。右数字は各波形の最大速度(cm/s)を示している。波形を比較すると波形の形は良く一致しているが、計算した波形の値は観測波形より小さい。この原因としては先程のMYGH08における結果が小さかったことと同様な理由であると考えられる。

図14は、住友生命で観測されたNS成分波形を基盤まで戻したものを平面波入射し、計算波形を求めたものと、観測速度波形と比較したものを示す。洪積台地における波形は比較的良好一致している。長町付近においては、他の地点と比べ計算と観測両方の波形の振幅が大きくなっているのがわかる。沖野小や東六郷小での計算波形は観測波形より小さめとなっており、この原因については、さらに詳細な検討をする必要がある。

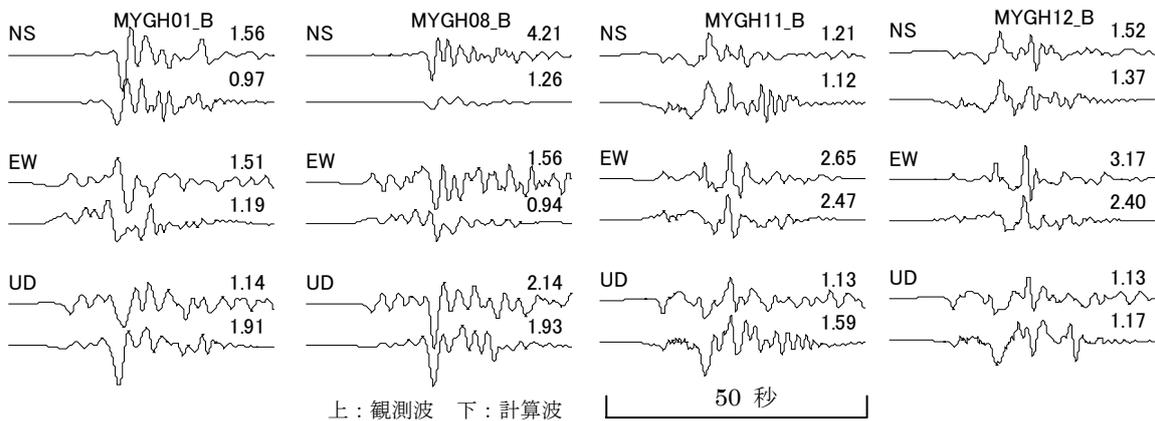


図 11 地中観測波形と計算波形の比較（右の数値は波形の最大速度[cm/s]）

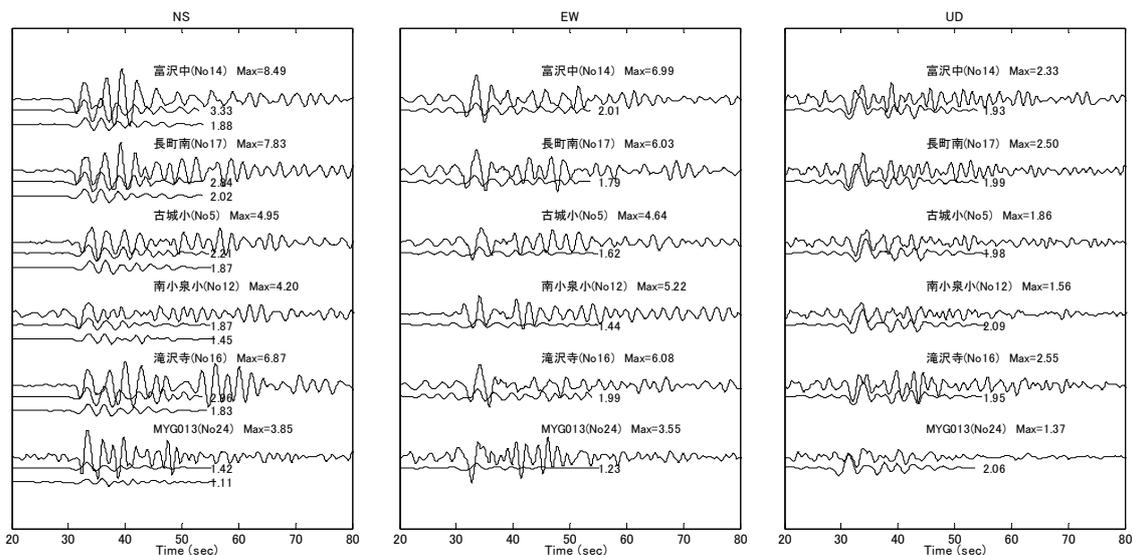


図 12 B-B 断面上の観測速度波形と計算速度波形の比較

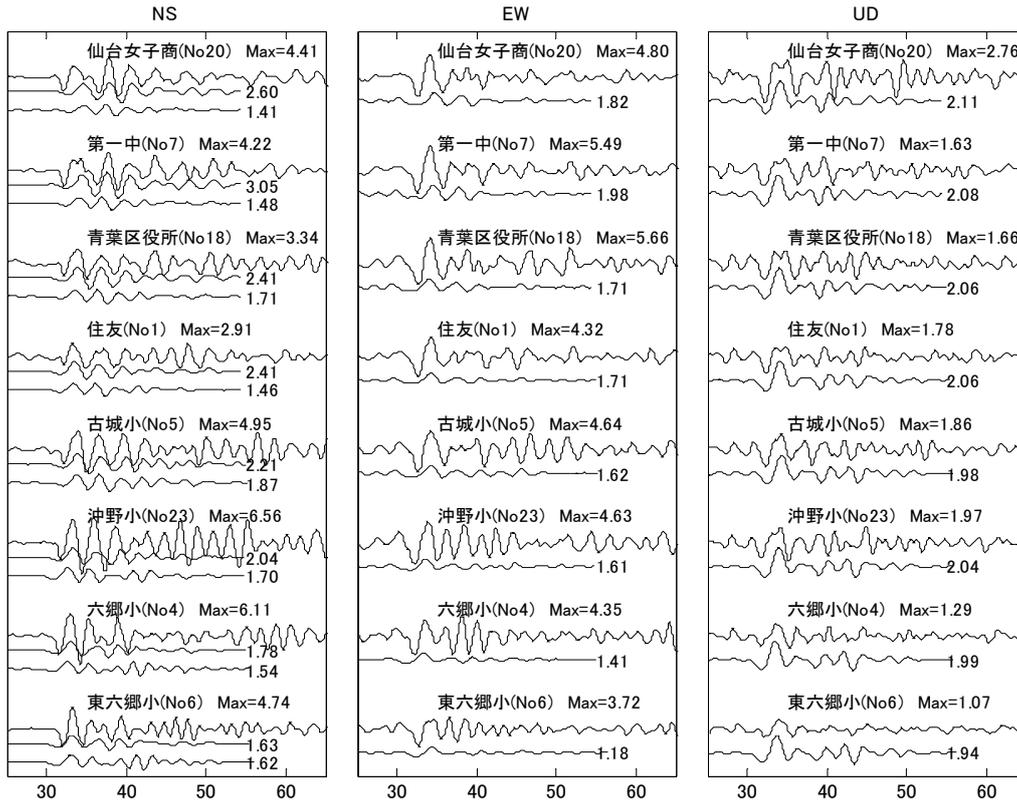


図 13 A-A 断面上の観測速度波形(上)と計算速度波形の比較

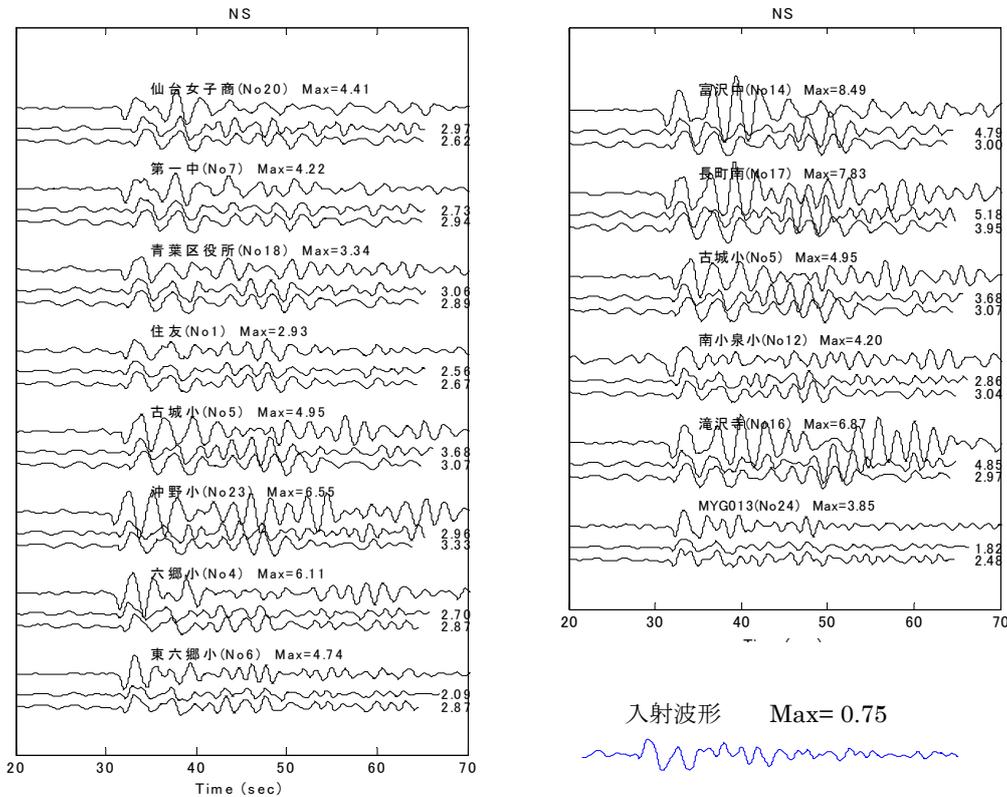


図 14 住友で観測された NS 成分波形を入射、A-A、B-B 断面上の観測速度波形(上)と計算速度波形の比較

4. 1978年6月12日宮城県沖地震と今回の地震の強震記録の比較

前述のように、住友生命ビル地下2階及び東北大学（工学部人間・環境系研究棟）1階においては、1978年6月12日と2005年8月16日の両方の地震記録が得られている。図15と図16にはそれぞれ、今回の地震と1978年の地震における両建物における加速度観測波形を比較して示す。住友生命が建っている旧市街地は、広瀬川河段丘上にあり、硬質地盤である。地下2階となると凝灰岩層(N>50)となっているところが多く^{3),8)}、地盤の非線形の影響は少ないと考えられる。

図17には擬似速度応答スペクトルをNS方向について示す。東北大学のある青葉山キャンパスは丘陵地にあり、新第3期の向山層や大年寺層の上に青葉山礫層が堆積しており、仙台駅前付近の住友生命ビルに比べて、1秒付近と3秒付近のスペクトル値が大きくなっている。

図18には住友生命ビルと東北大学の1978年と2005年の応答スペクトル比も示している。周期4秒付近（4秒以上は地震計SSA-1とSMAC-E計器特性やノイズの可能性あり）まで、両建物における2つの地震間のスペクトル比の形状は良く似ている。この図より、2005年の地震に比べ1978年の地震では、特に、1秒～2秒の成分が強く放出されていたと考えられる。前述のように、仙台市域は1～3秒に1次卓越周期を持つ地盤となっており、1978年では、震源の1～2秒の成分が地盤によりさらに増幅され、大きな被害をもたらしたものと思われる。逆に、2005年の地震では、この周期帯域の成分が少なかったために建物被害が小さかったと判断できる。

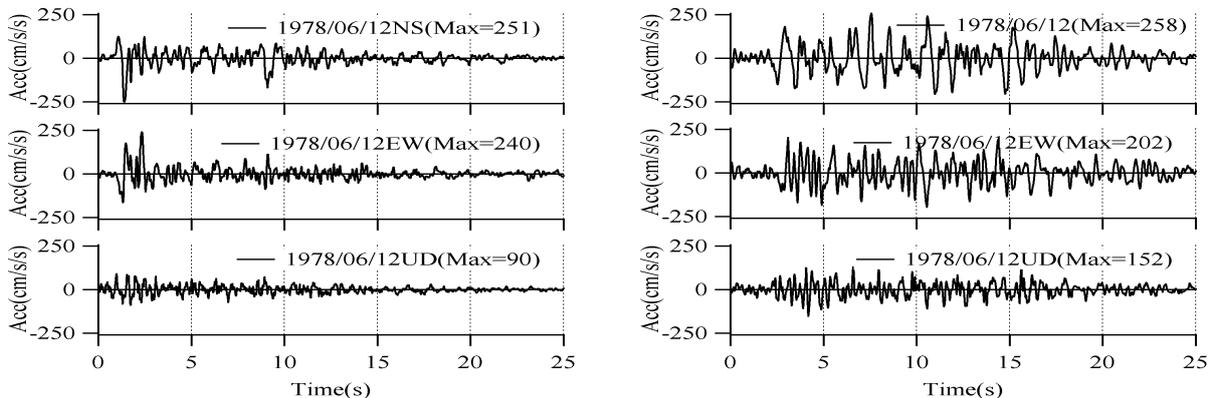


図15 1978年6月12日宮城県沖地震における住友生命ビル（左）と東北大学（右）の観測記録

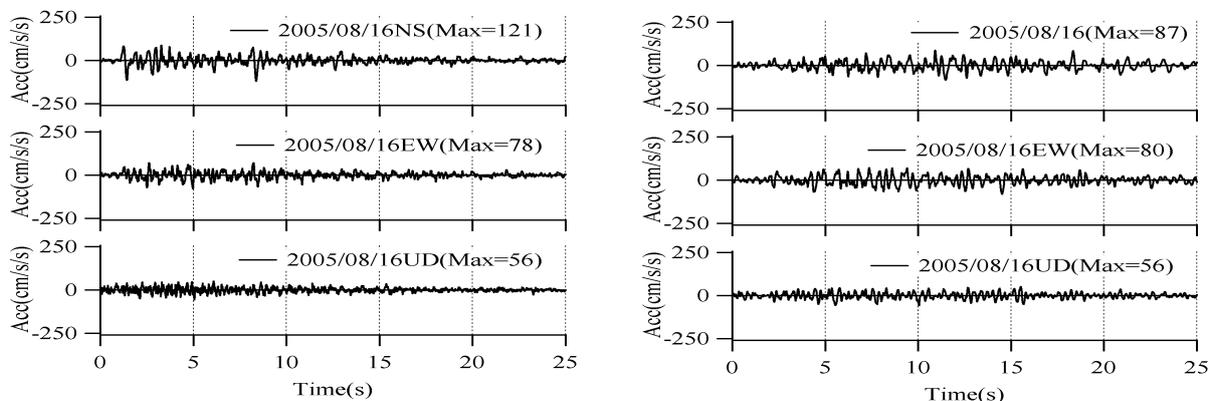


図16 今回の地震における住友生命ビル（左）と東北大学（右）の観測記録

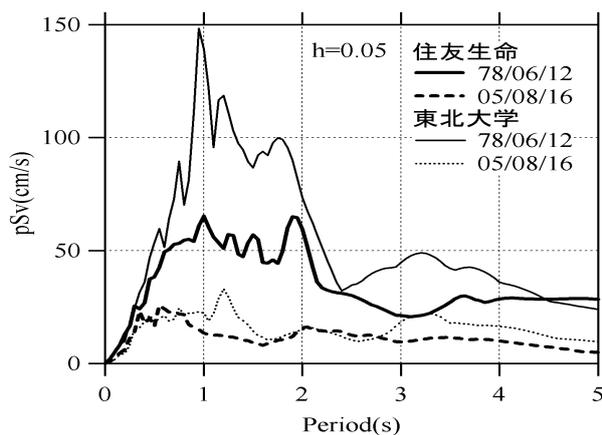


図 17 応答スペクトルの比較 (NS 成分)

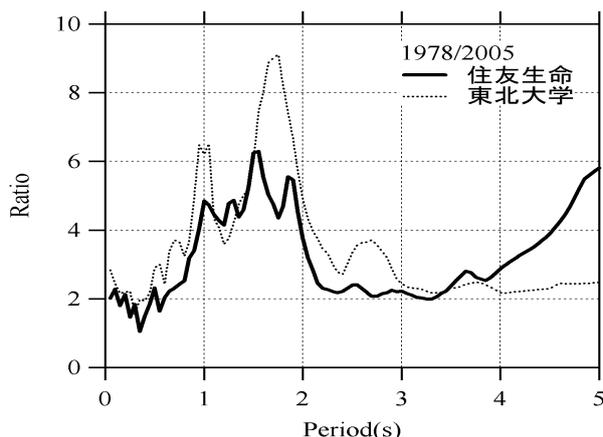


図 18 1978 年と 2005 年の応答スペクトル比 (住友、東北大 1F、NS 成分)

5. 観測記録を用いた 1978 年宮城県沖地震における仙台地域の再現地震動

(1) 評価方法

仙台平野南部地下構造調査によって得られた深部地盤構造を用いて、1978 年宮城県沖地震の面的な地震動評価を以下の手順で行った。

まず、1978 年宮城県沖地震における住友生命ビル地下 2 階の強震記録 (NS 方向成分) から、深部地盤構造 (図 20) を用いて、SH 波 40 度⁹⁾入射の逆応答により地盤基盤上の波形を求める (図 19)。そして、既往の研究により推定されているアスペリティの中央⁹⁾からの距離で距離補正を行い、各観測点の第三紀上面の基盤波を求める。次に、推定した深部地盤構造を用いて、SH 波 40 度⁹⁾入射の線形増幅特性を評価し、第三紀上面の地震動を求める。さらに、被害想定¹⁰⁾の表層地盤構造を用いて、一次元等価線形理論により非線形増幅特性を評価し、地表面の地震動を求める。

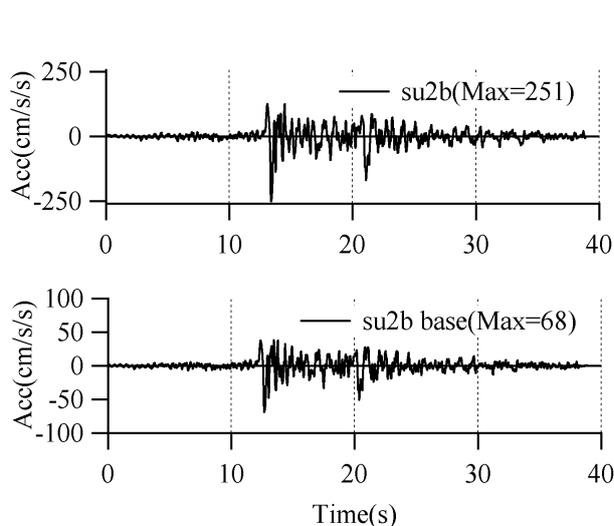


図 19 住友生命ビルの観測記録(上)と推定基盤入射波形(下)

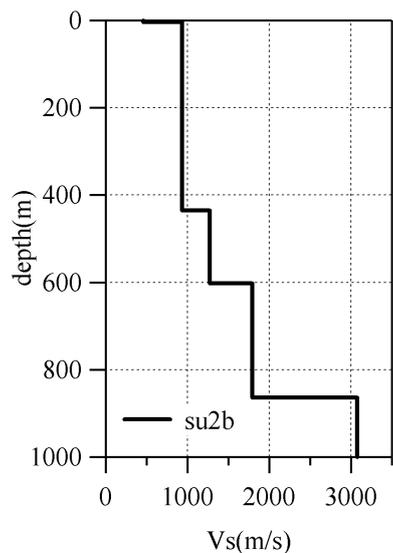


図 20 住友生命ビル地点における地盤構造

参考のために、図 21 には、住友生命ビルにおける観測記録と基盤入射波との伝達関数（各層の減衰は $Q=VS/15$ として評価）を示す。また、図 22 には基盤入射波の擬似速度応答スペクトル（5%）を示す。

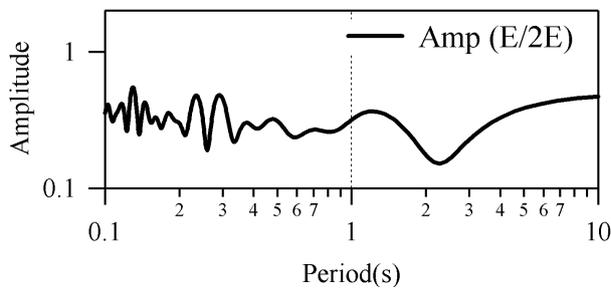


図 21 住友生命ビルの観測記録の逆応答解析に用いた伝達関数

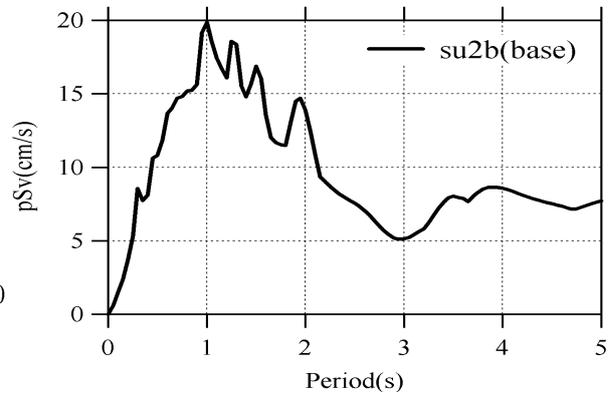


図 22 基盤入射波の擬似速度応答スペクトル

(2) 1978 年宮城県沖地震の推定地震動分布

図 23 には、工学基盤における地動最大加速度分布を示す。また、図 24 には被害想定¹⁰で用いられた表層地盤構造を用いて、一次元等価線形解析により得られた、地表面の最大加速度分布（仙台平野南部地下構造調査領域のうち仙台市域のみ）について示す。

図 25 には、前述の図 8 の断面線 A 上の観測点における再現地震動（地表面）の加速度波形と擬似速度応答スペクトルを示す。図 26 には、前述の 1978 年の地震と 2005 年の地震の応答スペクトル比から得られる各観測点位置における 1978 年の宮城県沖地震際の応答スペクトルを点線で示している。

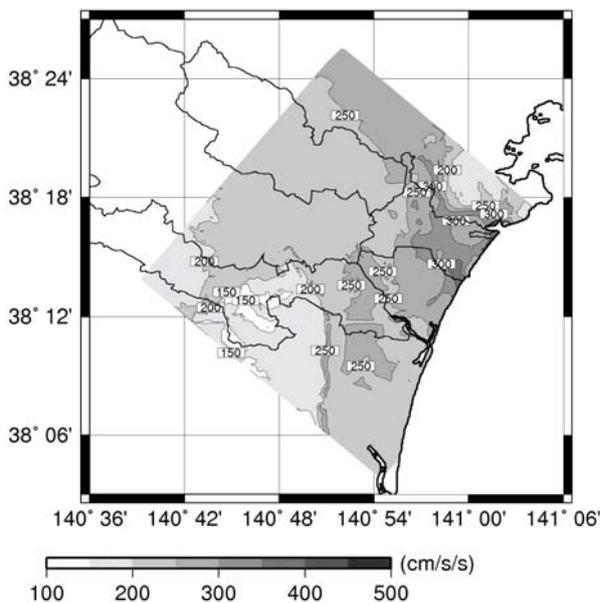


図 23 工学基盤における最大加速度分布

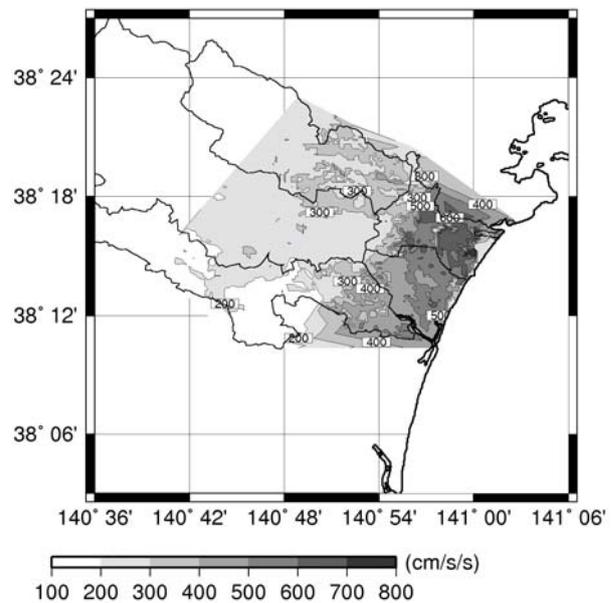


図 24 地表における最大加速度分布

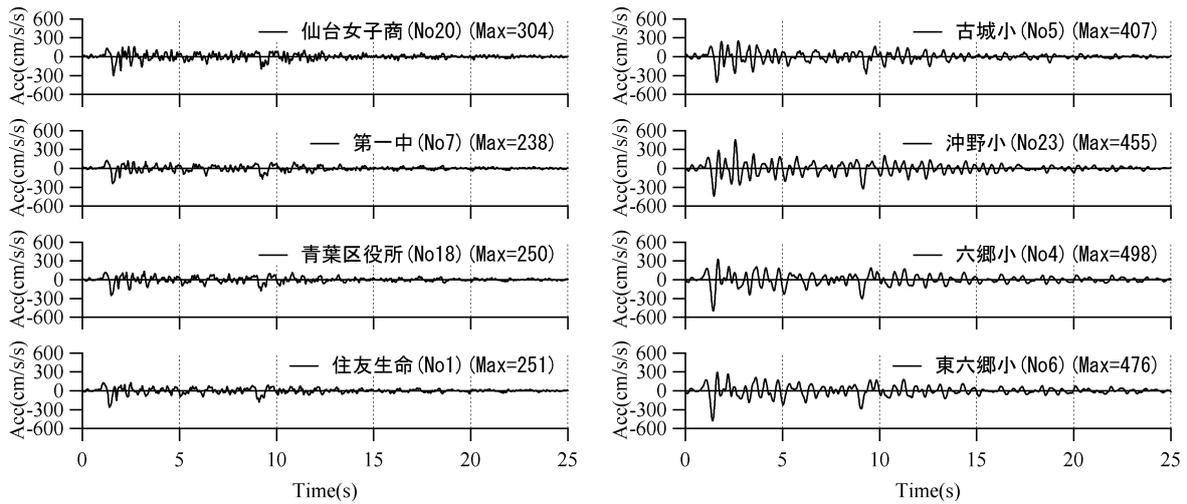


図 25 推定された加速度波形 (図 8(a)の断面線 A 上の観測点)

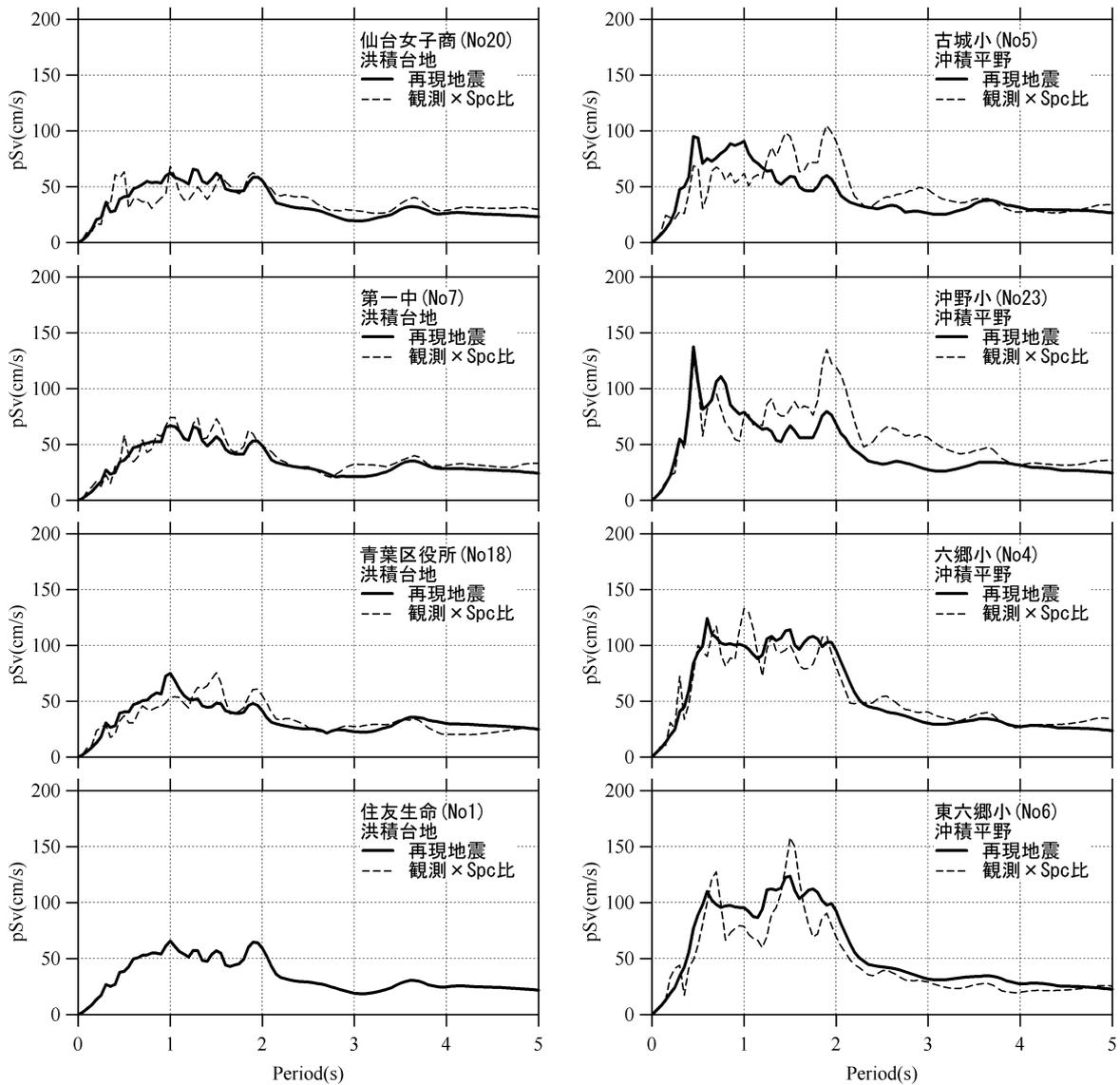


図 26 推定された擬似速度応答スペクトル (図 8(a)の断面線 A 上の観測点)

図 23 の地表面の最大加速度分布から明らかなように、長町一利府断層の南東側の沖積平野部では仙台駅前に比べて表装地盤により加速度が大きく増幅されていることが分かる。図 24 の推定加速度波形から洪積台地部では 250～300 ガル程度であるのに、沖積平野部では 400～500 ガルとなっていることが分かる。

図 26 の応答スペクトルについて、実線と破線を比較すると洪積台地の観測点は両者の一致度は比較的良く、比較的小ひずみレベルにおける観測点間の応答スペクトルを用いた強震時の応答スペクトル予測が可能であることを示唆している。沖積地盤においては、1978 年の地震時における地盤の卓越周期のところで破線の方が大きく 2005 年の地震時における地盤の卓越周期のところで実線の方が大きくなる傾向にある。これらの違いは、1 秒以下の成分については、地盤の非線形化の影響、1 秒～2 秒の周期帯域の違いは沖積平野部の記録に見られる後続位相（表面波）の影響によると思われる。これらについては、沖積地盤の非線形化の影響を考慮した応答スペクトルの補正など、今後さらに検討を進める必要がある。

7. まとめ

本報告では、まず、2005 年 8 月 16 日の宮城県沖地震(M7.2)における仙台地域の強震観測記録について示した。この観測記録を用い仙台平野南部地下構造調査に基づく 3 次元地盤構造モデルの卓越周期特性の検証を行なったところ、モデルの理論卓越周期と観測にもとづく 1 次卓越周期は概ね整合していることが分かった。次に、この深部地盤構造を用いた 2005 年 8 月 26 日の宮城県沖地震 (M7.2) の 3 次元波動伝播シミュレーション解析例を示すと共に、1978 年 6 月 12 日の宮城県沖地震と今回の地震の地震動特性に関する比較検討を行った。今回の地震では 78 年の地震に比べて 1 秒～2 秒の周期成分がかなり少ないことがわかった。最後に、1978 年宮城県沖地震における仙台地域の再現地震動の評価を行い、1978 年の宮城県沖地震における仙台地域の強震動分布を推定した。

以上の成果は、近い将来極めて高い確率で発生が予測されている宮城県沖地震の襲来をうける 100 万都市仙台とその周辺領域における都市構造物の耐震対策や地域の地震防災対策のための基礎資料として役立つものと思われる。

謝辞

本報告で示した仙台地域の深部地盤構造モデルは宮城県が平成 14 年度～平成 16 年度に行なった「仙台平野南部地下構造調査」に基づくものである。関係各位に感謝いたします。また、8 月 16 日宮城県沖地震 3 次元波動伝播シミュレーション解析に用いた震源モデルに関するデータは東京大学地震研究所の瀧川一起教授と研究員の呉長江氏からご提供頂きました。深く感謝いたします。図の作成には GMT を使用させていただきました。

今回解析に用いた強震観測網は、国土交通省平成 15-16 年度建設技術研究開発費補助金「強震観測網を用いた都市構造物群の耐震改修戦略システムの開発」(研究代表者:源栄正人)および文部科学省科学研究費補助金(基盤研究(C)(2))「1978 年宮城県沖地震における仙台地域の地震動分布再現の高精度化と被害分布の評価」(研究代表者:源栄正人)によるものである。

参考文献

- 1) 大野、源栄、佐藤、山本、小型強震計を用いた構造物耐震性評価のための仙台市高密度強震観測網の構築、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1075-1076、2004.
- 2) 落合、源栄、大野、日本地震工学会大会-2003梗概集、特114-特115、2003.
- 3) 自然災害特別研究(I)1978年宮城県沖地震による被害の総合的調査研究、1979.3
- 4) 境他、日本建築学会構造系論文集、555、85-91、2002.
- 5) 宮城県、仙台平野南部地下構造調査報告書、平成17年3月.
- 6) Graves, R. W., Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered grid finite differences, Bull. Seism. Soc. Am. 86, 1091-1106, 1996.
- 7) Changjiang Wu., Kazuki Koketsu, Complicated repeating earthquakes on the convergent plate boundary , Rupture processes of the 1978 and 2005 Miyagi-ken Oki earthquakes, submitted to GRL, 2005.
- 8) 宮城県、'78 宮城県沖地震災害の教訓＝実態と課題＝、1980
- 9) http://www.aob.geophys.tohoku.ac.jp/news/latest/20050816_news/miyagi4.html#miyagi4-2
- 10) 平成 14 年度仙台市地震被害想定調査報告書、仙台市、2002