

4. 地震および地震動、津波

地震および地震動、津波に関する調査・研究活動は次の3点である。1) 建築研究所強震観測ネットワークなどによる本震と主要余震の強震記録の取得および解析と、2) 地震動特性に関する解析、3) 地震と津波に関する解析的研究である。以下にこれらの概要を示す。

4.1 地震の概要と特徴

4.1.1 地震諸元

表 4-1 に、平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震の本震と、マグニチュード (M) 7.0 以上の前震と余震の地震諸元を示す。本震の M 9.0 は日本の観測史上最大で、米国地質調査所 (USGS)によれば、1900 年以降世界で 4 番目の規模となる⁴⁻¹⁾。また M 7.0 以上の余震は本震の発生から 1 時間以内に 3 回、4 月に入って 2 回の計 5 回発生している。最大の余震は、本震の約 30 分後に発生した茨城県沖を震源とする M 7.7 の地震であった。なお、本震の 2 日前に M 7.3 の前震が本震近くで発生していた。

表 4-1 本震とマグニチュード (M) 7.0 以上の余震

	日時	震央	深さ	M
前震	3 月 09 日 11 時 45 分 12.9 秒	三陸沖 (38°19.7'N, 143°16.7'E)	8 km	Mj 7.3
本震	3 月 11 日 14 時 46 分 18.1 秒	三陸沖 (38°06.2'N, 142°51.6'E)	24 km	Mw 9.0
余震	3 月 11 日 15 時 08 分 53.5 秒	岩手県沖 (39°50.3'N, 142°46.8'E)	32 km	Mj 7.4
	3 月 11 日 15 時 15 分 34.4 秒	茨城県沖 (36°06.5'N, 141°15.9'E)	43 km	Mj 7.7
	3 月 11 日 15 時 25 分 44.4 秒	三陸沖 (37°50.2'N, 144°53.6'E)	34 km	Mj 7.5
	4 月 07 日 23 時 32 分 43.4 秒	宮城県沖 (38°12.2'N, 141°55.2'E)	66 km	Mj 7.1
	4 月 11 日 17 時 16 分 12 秒	福島県浜通り (36°56.7'N, 140°40.3'E)	6 km	Mj 7.0

Mj: 気象庁マグニチュード、Mw: モーメントマグニチュード

4.1.2 震度分布

本震で観測された震度の分布を図 4-1 に示す。赤い星(★)は震央の位置を表す。なお、この図の震度は、気象庁によって精査された震度を反映したものである⁴⁻²⁾。宮城県栗原市で震度 7 を観測したほか、宮城県、福島県、茨城県、及び栃木県に及ぶ広い範囲で震度 6 強を観測した。震度 6 弱の範囲はこれに加え、岩手県、群馬県、埼玉県、及び千葉県に広がる。

表 4-1 に示した余震のうち、3 月 11 日 15 時 15 分、4 月 7 日 23 時 32 分、及び 4 月 11 日 17 時 16 分の地震の震度分布を図 4-2 から図 4-4 に示す。なお 3 月 11 日 15 時 15 分の余震では、本震の影響で障害が発生した震度計のデータが欠落している。3 月 11 日 15 時 15 分の余震の最大震度は茨城県鉾田市の 6 弱、4 月 7 日 23 時 32 分の余震の最大震度は宮城県栗原市と仙台宮城野区の 6 強、4 月 11 日 17 時 16 分の余震の最大震度は福島県中島村、古殿町、いわき市及び茨城県鉾田市の 6 弱であった。いずれの余震でも震央の近傍で、震度 6 弱以上の激しい揺れを観測した。

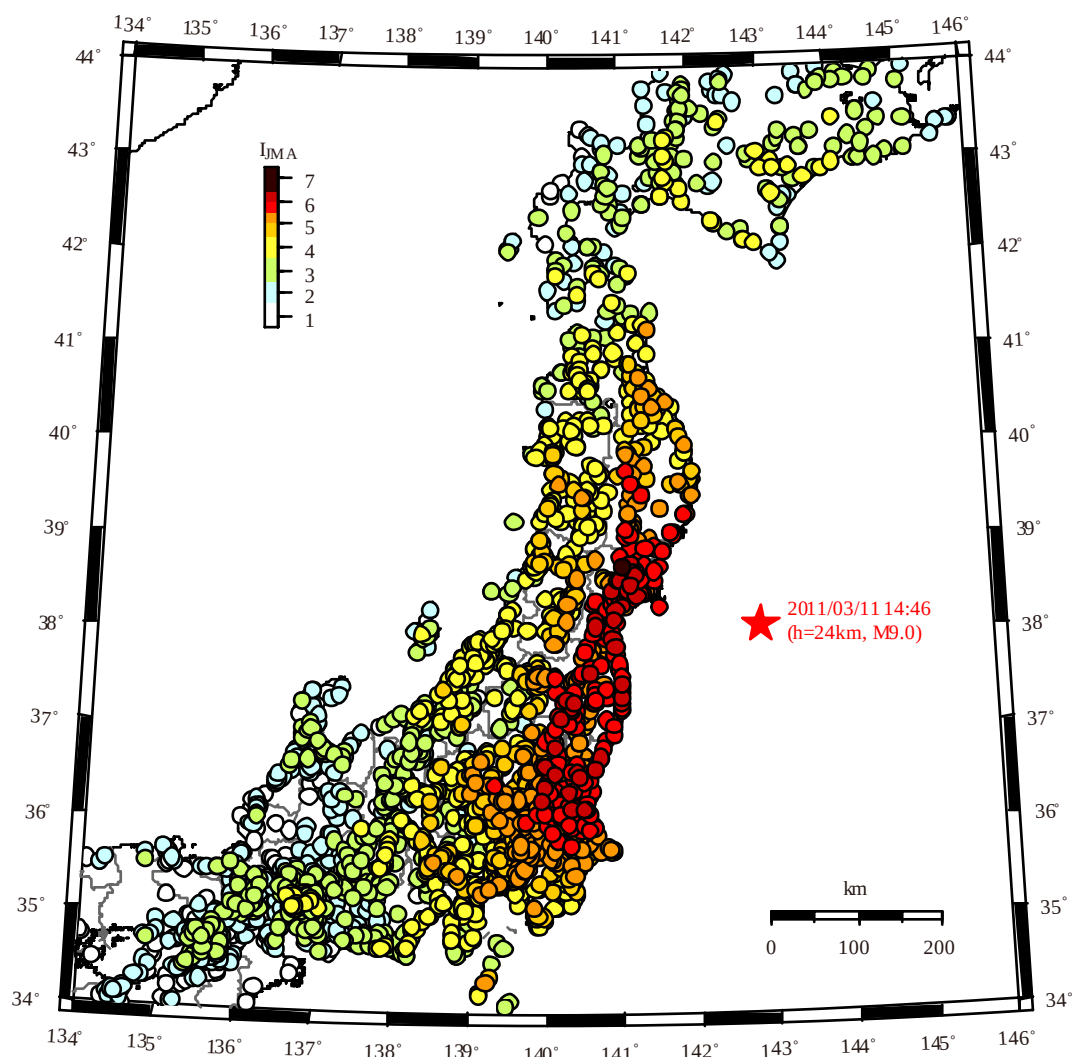


図 4-1 東北地方太平洋沖地震の震度分布

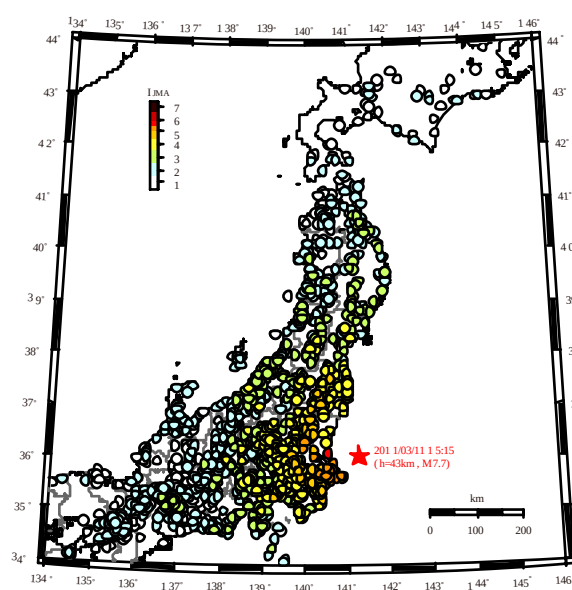


図 4-2 3 月 11 日 15 時 15 分の余震の震度分布

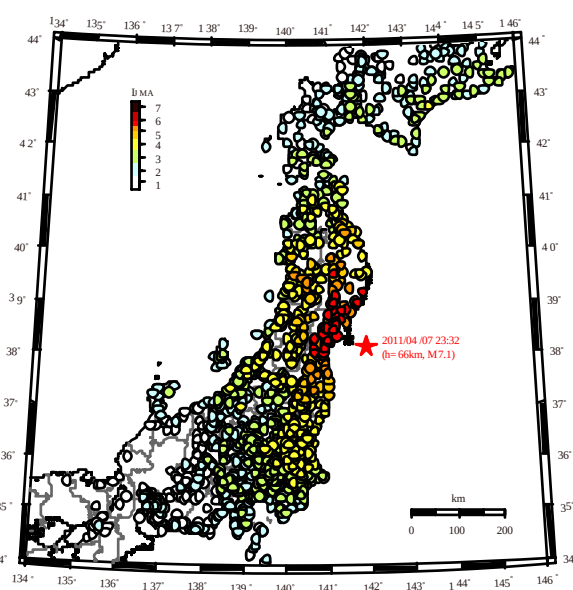


図 4-3 4 月 7 日 23 時 32 分の余震の震度分布

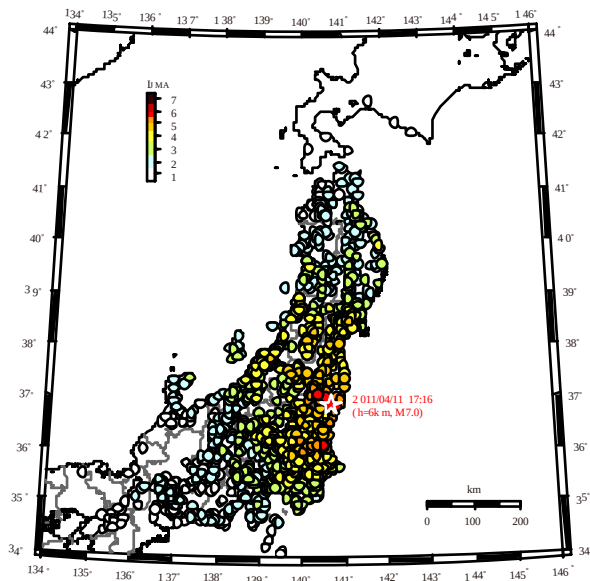


図 4-4 4 月 11 日 17 時 16 分の余震の震度分布

4. 1. 3 津波波高

東北地方太平洋沖地震による津波は 4.5 節の解析に使用された津波波形データにもあるように、大きく分けて次の 4 種類の観測機器で記録された。海の深いところから浅い所にかけて、海底津波計、GPS 波浪計、海象計（波高計）、検潮所である。気象庁⁴⁻³⁾では、沿岸部に設置された検潮所で観測された津波高をまとめている（図 4-5）。同庁によると北海道から青森県で 3 m 弱、岩手県から福島県で 4 m 以上の津波が観測された。ただし、東北地方の太平洋沿岸では観測施設が被害を受けるなどして、観測データが欠測した検潮所がある。その後、気象庁は現地データ回収により、宮古で 8.5 m 以上、大船渡で 8.0 m 以上、石巻市鮎川で 7.6 m 以上、相馬で 9.3 m 以上の津波が観測されたと発表した。

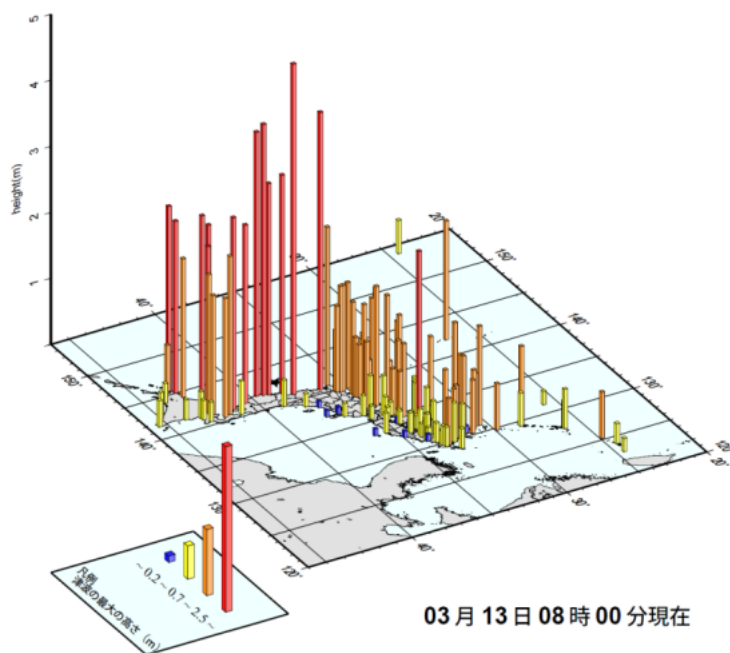


図 4-5 検潮所で観測された津波の高さ⁴⁻³⁾。

観測機器による津波波高記録の他に、現地調査による津波波高測定が、大学や研究機関の津波関係者による合同調査によって、北海道から沖縄の主に太平洋沿岸の広範囲で実施されている。現地調査結果等の情報はホームページに集約され適宜更新されている⁴⁻⁴⁾。北海道の太平洋沿岸では5 m程度、青森県から千葉県沿岸では最大10 m、岩手県三陸海岸で場所によっては30 mを越える標高まで津波が到達した痕跡（遡上高）や浸水高が報告されている（図4-6、2011年4月25日現在）。

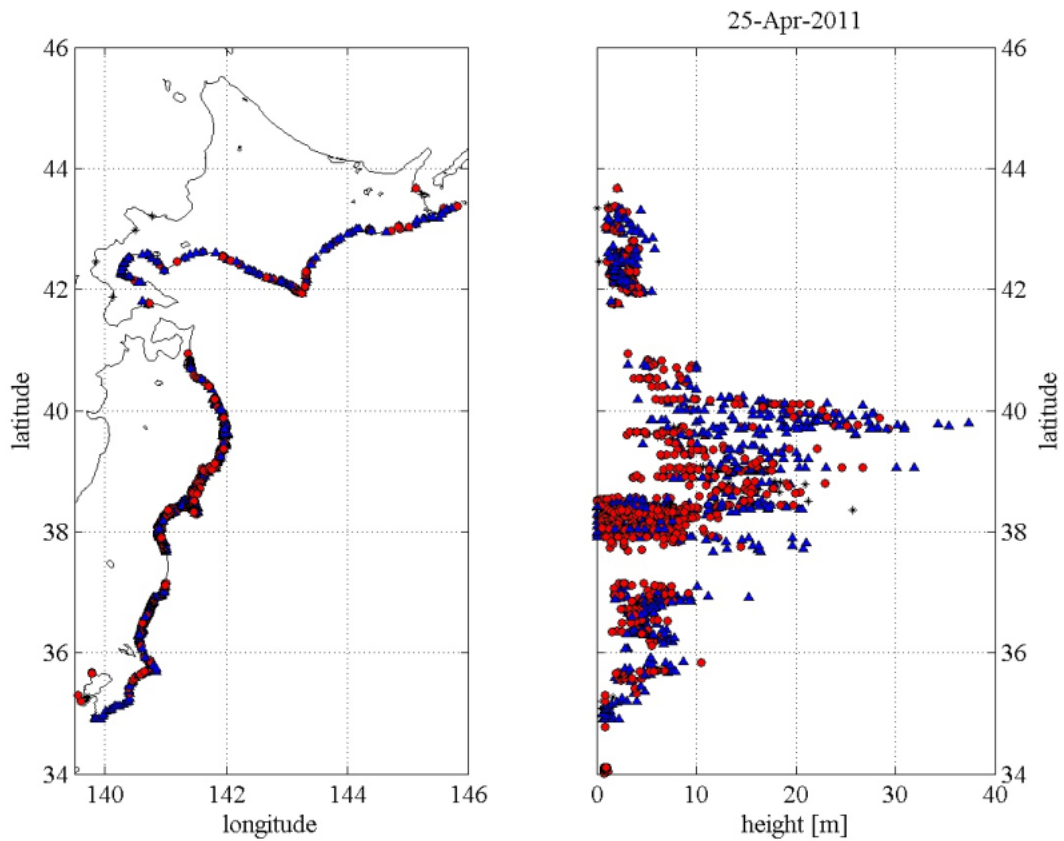


図 4-6 現地調査による津波波高分布⁴⁻⁴⁾。赤丸は浸水高、青三角は遡上高。

4.1.4 震源モデル

建築研究所は東北地方太平洋沖地震に関して3種類の独自の地震学的解析を行った。それらは、1) 本震・前震・余震の震源再決定と主要地震の断層面の特定と2) 遠地P波の高周波震動継続時間とそれに基づくマグニチュード、3) 津波の波源モデルと最大津波波高(シミュレーション)である。ここでは、それら研究成果の概要と他機関が実施した解析結果の一例を示す。なお、3) 津波の波源モデルと最大津波波高(シミュレーション)については、4.5節で紹介する。

4.1.4.1 本震・前震・余震の震源再決定と主要地震の断層面の特定

気象庁(JMA)と米国地質調査所(USGS)は前震と余震も含めて東北地方太平洋沖地震の震源を公表している。気象庁データの特徴は、国内の密な地震観測網データを用いて、小さな地震まで震源決定していることである。また、内陸に近い地震の震源決定精度は非常に高いが、地震観測点から遠く離れる日本海溝付近の震源精度が悪いことである。一方、USGSデータの特徴は、全世界の地震観測点を使っているために、日本海溝付近の地震についてもある程度の精度があることである。

余震の震源分布は地震の断層面を決める有力な手法の一つである。これは、余震が主として本震の断層面上で発生する性質を利用している。しかし、一般に海域に発生した地震の震源の深さは精度が悪く、余震分布から主要地震の断層面を特定できない場合がある。

そこで、東北地方太平洋沖地震(本震)とそれに伴った前震と余震の震源を、改良連携震源決定法^{4,5)}を用いて精度よく決定し、主要4地震($M_w \geq 7.0$ の本震と前震、2余震)の断層面を特定する。なお、本節で用いるマグニチュードは、地震の大きさを最も適切に表していると考えられ、地震学で最もよく引用されている、グローバルCMT解^{4,6)}の M_w (モーメント・マグニチュード)である。

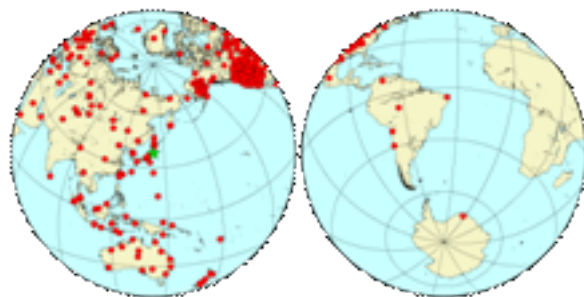
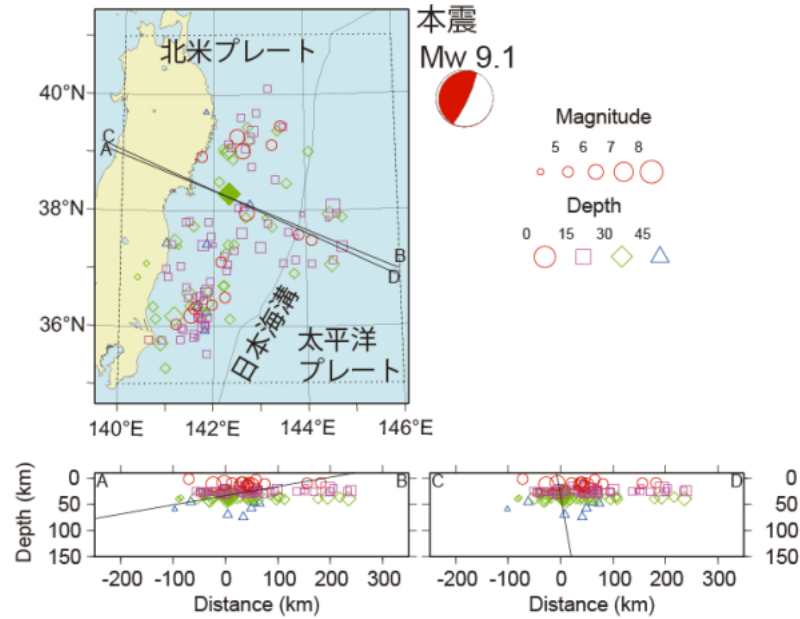


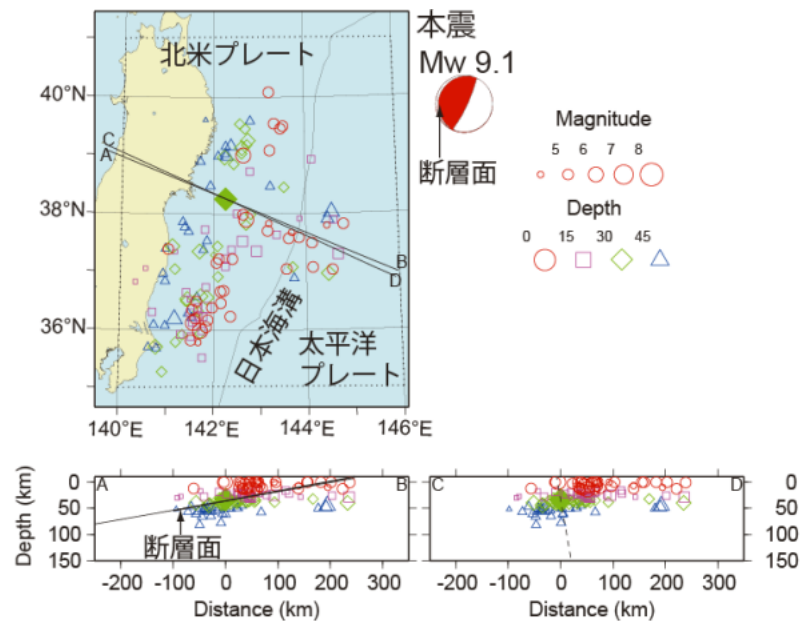
図 4-7 震源再決定に用いた地震観測点。

用いたデータは、USGSが地震直後から公開している、全世界の地震観測点におけるP波の到着時刻である。用いた地震は、本震の前後1週間以内(世界標準時で3月4日から18日まで)に、北緯 $35.0^\circ - 41.0^\circ$ 、東経 $140.0^\circ - 146.0^\circ$ の範囲で発生した地震である。走時残差(観測走時と理論走時の差)2秒以内の読取值のみ用いた。その結果、363観測点(図4-7)を用いて459地震の震源を決定した。その内、420地震の震源を精度よく決定した。

図4-8に本震($M_w 9.1$ 、日本時間14時46分)と本震後24時間以内に発生した余震の震源を示す。図4-8(a)のUSGS震源では、深さが一様であり、空間依存性は示さない。一方、図4-8(b)の再決定震源では、震源の深さが西北西方向に向かって徐々に深くなっており、本地震が本当に北米プレートと太平洋プレートの境界面で発生した低角逆断層型地震であることがよくわかる。なお、断面図に示した直線は、震源メカニズムの2節面を表す。2節面の内、一つが断層面であるが、震源メカニズムからはどちらの節面が断層面であるかはわからない。本解析結果から、余震がA-B断面に示された節面上に分布することから、西北西に10度の傾きで傾斜するこの節面が断層面であることが確認できた。同様に、本震の2日前(3月9日)に宮城県沖で発生した最大前震($M_w 7.5$)と、本震の29分後(日本時間15時15分)に茨城県沖で発生した最大余震($M_w 7.9$)(いずれも本震同様の低角逆断層型地震)の断層面もそれらの地震の余震分布からプレート境界面であることがわかった。



(a) 米国地質調査所 (USGS) 震源。

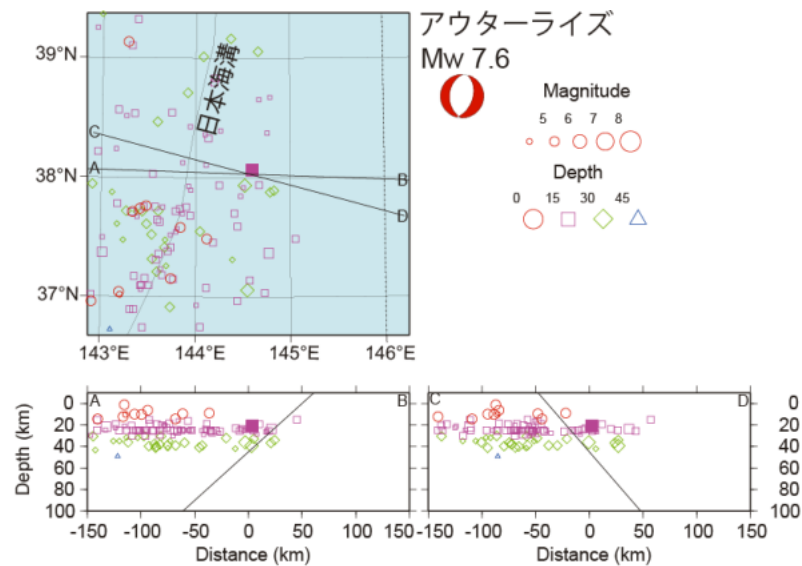


(b) 本研究による再決定震源。

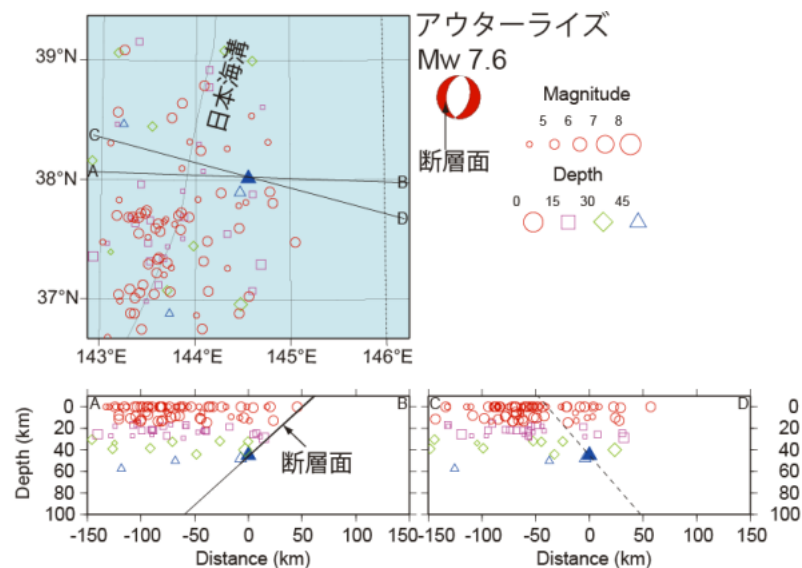
図 4-8 本震と 24 時間以内の余震の震源分布図。震央分布図と A-B と C-D に沿った深さ断面図を示す。震源メカニズムは Dziewonski (1981)⁴⁻⁶⁾とその後の更新結果 (グローバル CMT 解) による。2 方向 A-B と C-D は本震のグローバル CMT 解の 2 節面に垂直な方向である。図 (b) の A-B 断面図の太い実線が断層面に対応する。

一方、本震の 39 分後 (日本時間 15 時 25 分) に三陸沖の日本海溝の東側のアウターライズと呼ばれる場所で発生した 2 番目に大きな余震 (Mw 7.6) は本震等とは全く震源メカニズムが異なる正断層型地震であった。図 4-9(a) の USGS 震源では深さ精度が悪くて断層面はわからないが、図 4-9(b) の再決定震源から西側に 45 度の傾きで傾斜する節面が断層面であり、破壊が断層深部から始まったことが

わかる。また、この断層よりも東側では地震は全く発生していない。この地震は、本震により太平洋プレートが北米プレートの下に沈み込み、そのために日本海溝下の太平洋プレート上部に生じた東西張力により生じた。応力解放だけを見れば、断層面はどちらの節面であってもよいが、プレート沈み込みを考えれば、断層面の西側が落ちるこの節面が断層面でなければならない。今回の解析結果はこの考え方を支持する。



(a) 米国地質調査所 (USGS)。



(b) 本研究による再決定震源。

図 4-9 海溝東アウターライズの Mw 7.6 余震。シンボル等は図 4-8 と同じ。注) この地震の余震以外の地震 (本震に直接関連する余震) も、この地震の西側で多数発生している。

なお、気象庁によれば表 4-1 に示したように、本震の 22 分後 (日本時間 15 時 8 分) に M 7.4 の地震が岩手沖で発生しているが、USGS とグローバル CMT 解のリストにはこの地震は載っていない。理由は、本震の後続波に邪魔されて、この地震が検出されなかったためだと思われる。

4.1.4.2 遠地P波の高周波震動継続時間とそれに基づくマグニチュード

遠地で観測されるP波の高周波成分の震動継続時間は、地震の震源時間（断層面上の滑りが始まってから終わるまでの時間）とよい相関を示し、震源時間の目安になる⁴⁻⁷⁾。全球的に設置された広帯域地震観測網（Global Seismographic Network）で記録された東北地方太平洋沖地震の遠地P波の上下動波形データをIRIS（Incorporated Research Institutions for Seismology、米国の大学コンソーシアム）のデータセンターから取得し、高周波震動継続時間を測定した（観測点数は54）。図4-10に測定例を示す。測定値の中央値は170.5秒と求められ、震源時間が3分程度であったと考えられる。この値は4.1.4.3節に挙げられた震源モデルと調和的である。

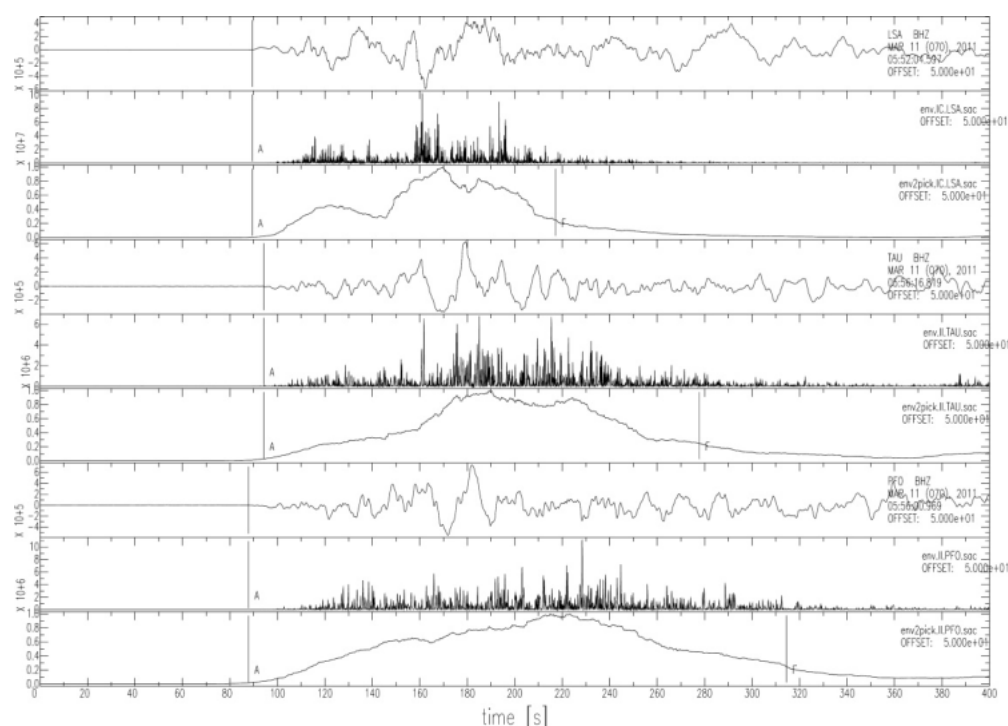


図4-10 遠地P波の高周波震動継続時間の測定例。観測点はチベット、オーストラリアのタスマニア、米国カリフォルニアに設置された広帯域地震観測点（観測点コードはそれぞれLSA、TAU、PFO）。震源から観測点までの距離、方位角はそれぞれ4767km、274度、9010km、176度、8636km、57度。LSA、TAU、PFO各観測点に対して、上から観測波形（上下動）、2-4Hzのハイバンドパスフィルターを掛けた時系列、フィルタをかけた時系列を平滑化した結果を示した。「A」、「F」はそれぞれ地震の到着時刻、高周波震動の終わりを表している。

次に、方位角 ± 30 度の幅で高周波震動継続時間の移動平均を取った結果を図4-11に示す。方位角が100度周辺で長く、240-260度付近で短くなる方位角依存性が得られた。この依存性は高周波成分を大きく励起した断層運動が南西に進んだことを示唆する。

Hara (2007)⁴⁻⁷⁾は高周波震動継続時間を使って地震のマグニチュードを計算する次式を求めた：

$$M = 0.79 \log A + 0.83 \log \Delta + 0.69 \log t + 6.47$$

ここで、 M はマグニチュード、 A はP波の最大変位振幅（m）、 Δ は震央距離（km）、 t は高周波震動継続時間（秒）である。この式を使って東北地方太平洋沖地震のマグニチュードを求めると8.96となった。この値は気象庁及び米国地質調査所のモーメントマグニチュード9.0とよく一致しており、超

巨大地震に対するこの手法の有効性が確認できた。

上の式の右辺第 1 項（振幅の寄与）と第 2 項（距離補正）の和を横軸に、第 3 項（高周波震動継続時間の寄与）を縦軸にとって、1994 年以降に発生したマグニチュード 8 以上の全ての地震を図 4-12 に表示した。マグニチュードが東北地方太平洋沖地震と同程度である 2004 年 12 月 26 日に発生したスマトラ地震と比べると、東北地方太平洋沖地震は高周波震動継続時間が短く、最大変位が大きい。高周波震動継続時間は震源時間及び断層の長さに関係し、東北地方太平洋沖地震とスマトラ地震の断層長がそれぞれ約 450km（4.1.4.3 項参照）と 900 km 程度（例えば、Fujii and Satake, 2007⁴⁻⁸⁾）と推定されていることと調和的である。一方、最大変位は断層面上のすべり量に関係し、東北地方太平洋沖地震とスマトラ地震の最大滑り量がそれぞれ 30 m（あるいはそれ以上。4.5 節参照）と約 25 m（例えば、Fujii and Satake, 2007⁴⁻⁸⁾）と推定されていることと調和的である。

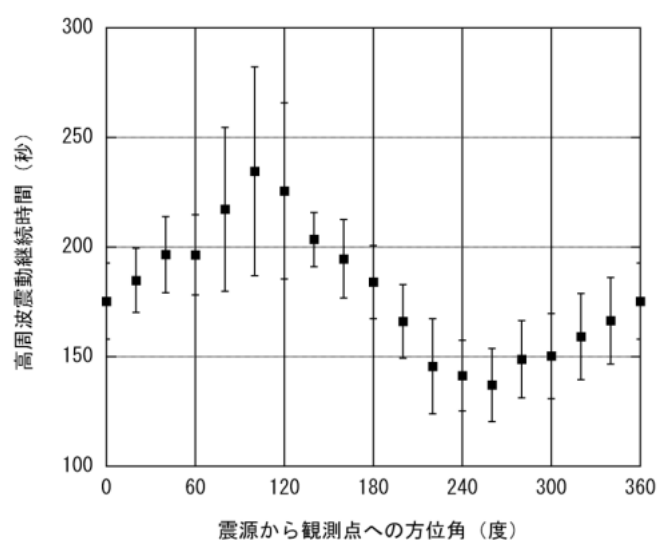


図 4-11 高周波震動継続時間について、方位角 ±30 度で移動平均を取った結果。

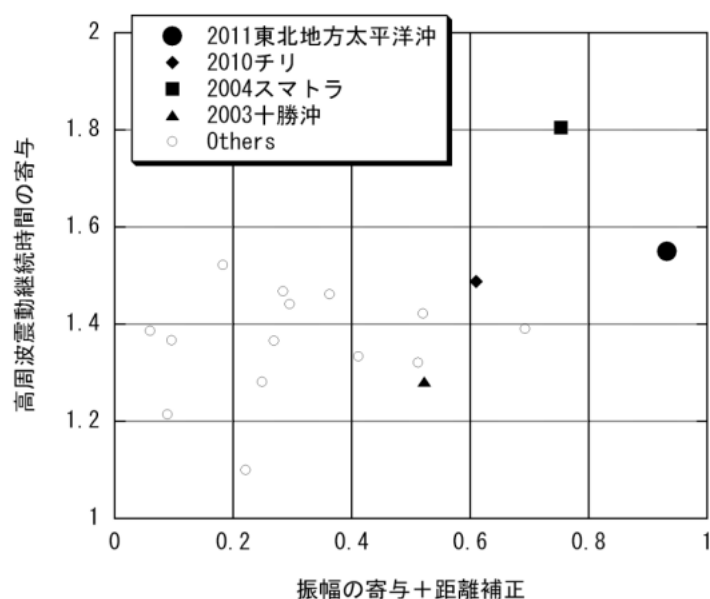


図 4-12 Hara (2007)⁴⁻⁷⁾のマグニチュードの式における振幅の寄与（と距離補正を含む）と高周波震動継続時間の寄与。1994 年以降に発生したマグニチュード 8 以上の全ての地震を表示。

4.1.4.3 震源モデル

多くの機関と研究者が種々の地球物理データを解析して、震源モデル（震源断層の位置・大きさ、断層面上のすべり量分布等）を提案している。データとしては、余震の震源分布、短周期地震波、長周期地震波、津波、GPS、合成開口レーダー等がある。

ここでは、4月11日の地震調査研究推進本部地震調査委員会に提出された、各地の強震動に密接に結び付く近地強震波形を用いた気象庁気象研究所のモデル⁴⁻⁹⁾を紹介する（図4-13）。主な解析結果は以下に示すとおりである。1）すべりの大きな領域は、破壊開始点の東から北東側（震源よりも浅い部分）にあり、最大すべり量は約30m。2）主な断層の長さは約450km、幅は約150kmで、Mwは9.0。3）断層の破壊は、破壊開始点付近で徐々に拡大した後（0～60秒）、南北方向に分かれて進行。4）破壊継続時間は約170秒間。5）大きくすべった領域の周辺で余震が多発。

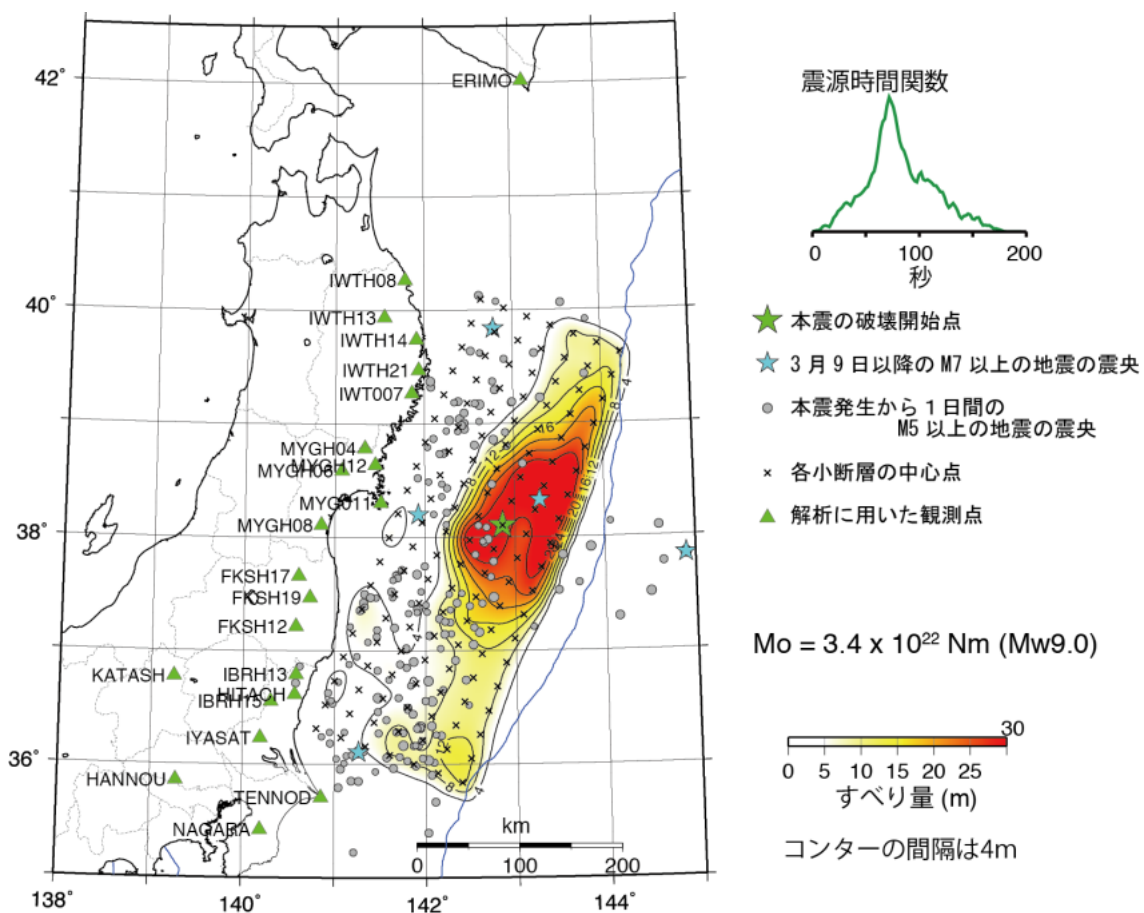


図 4-13 震源モデルの一例⁴⁻⁹⁾

余震活動域も含めて、多くの他のデータを用いた震源モデルは、図4-13の震源モデルと整合的である。但し、短周期地震波動を多く生成した領域と長周期地震波動を多く生成した領域あるいは、津波を多く生成した領域には多少違いがあり、今後の研究課題である。

なお、各種データで求められた震源モデルはホームページで数多く紹介されている^{4-10～4-14)}。

4.2 被災地域の地形および地質

東北地方太平洋沖地震の被災地域は、広く東日本に及ぶ。主な被災地域である東北地方、関東地方東部の略図を、図 4-14 に示す。青森県尻屋崎(①)から千葉県野島崎(②)は、直線距離で約 740 km である。

東北地方の地形は、太平洋側に北上山地(③)・阿武隈山地(④)が南北に雁行し、その西側に奥羽脊梁山脈と出羽丘陵が平行している。これらに挟まれて北上川・阿武隈川流域の低地帯、奥羽脊梁山脈と出羽丘陵のあいだの山間盆地群がある^{4-15,4-16)}。北上山地の東側を縁どる三陸海岸は、北部は海食台が続き、宮古(⑤)より南ではリアス海岸が発達する^{4-16,4-17)}。北上川・阿武隈川に代表される主要河川沿いには、扇状地・河岸段丘および沖積平野が広がっている。また、久慈湾、宮古湾、大船渡湾、広田湾、気仙沼湾など、北上山地東斜面から流れ出る比較的流域面積の広い河川が流入する湾奥部には小規模な沖積平野が発達する⁴⁻¹⁷⁾。

関東地方東部は、阿武隈山地南端が茨城県日立まで連なり、その西側に八溝山地(⑥)が 100 km にわたって連なる⁴⁻¹⁸⁾。阿武隈・八溝山地南端より南側は関東平野となり、丘陵(上総丘陵(⑦)、安房丘陵、等)、台地(東茨城台地、下総台地(⑧)、等)、関東平野を流れる河川や沿岸部に分布する低地(那珂川涸沼低地、鹿島低地、利根川下流低地(⑨)、九十九里浜低地(⑩)、等)が広がる^{4-18,4-19)}。

東北地方の表層地質は、先新第三系が北上山地・阿武隈山地と出羽丘陵の太平(⑪)・朝日(⑫)・飯豊(⑬)の各山地に集中するほか、奥羽脊梁山脈にも小分布が散在している⁴⁻¹⁶⁾。新第三系・第四系は、先新第三系の分布域と重複して、これらの起伏を埋積して山地帯や低地帯に広く分布する⁴⁻¹⁶⁾。また東北地方には 50 近い火山があり、その多くは第四紀に形成され、奥羽脊梁山脈の頂部を占めてほぼ南北に配列するほか、出羽丘陵にある^{4-15,4-16)}。

関東地方東部の表層地質は、中・古生界が阿武隈山地、八溝山地、那珂湊、銚子に、新第三系は房総半島南部に分布する⁴⁻¹⁸⁾。その他は、第四系の丘陵、台地、低地が広く分布し、低地は沖積層で構成されている⁴⁻¹⁸⁾。

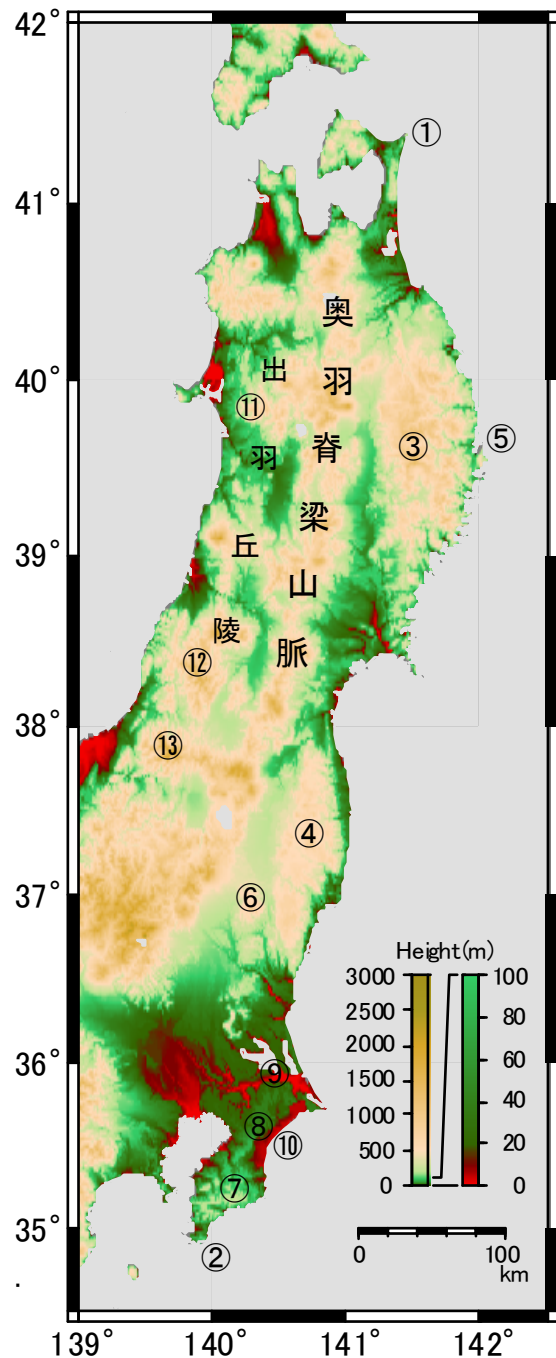


図 4-14 東北地方、関東地方東部の地形略図

4.3 本震および主要な余震の地震動特性

本節では建築物への影響を念頭において東北地方太平洋沖地震の本震及び主要な余震による各地の揺れの程度を把握するため、公開された(独)防災科学技術研究所 K-NET の観測記録から求めた応答スペクトルをまとめて示す。また、応答スペクトルの特徴等を把握する上で参考とするため、建築物の被害調査の際に確認したいくつかの K-NET 観測点の状況等を簡単に示す。

(1) 本震の地震動特性

図 4-15 に本震(3月11日14時46分頃)の擬似速度応答スペクトル pSv (cm/s)を示す。いずれも減衰定数 5%とし、各周期の2次元等方性単振子(水平面内)の最大変位を擬似速度^{注1)}で表示したものである。図中の黒色の破線と点線は建築基準法の第2種及び第3種地盤に対応する応答スペクトル^{注2)}であり、灰色の点線(右上がりの直線)は擬似加速度^{注1)}が 500, 1000, 1500(cm/s/s)、灰色の破線(右下がりの曲線)は変位が 25, 50, 75(cm)であることを示す。

注 1) 固有円振動数 ω の系の最大変位 S_d に対して、擬似加速度は $pSa=\omega^2 S_d$ 、擬似速度は $pSv=\omega S_d$ である⁴⁻²⁰⁾。

注 2) 限界耐力計算(建築基準法施行令第82条の5)で安全限界の検証(同条第五号)に用いられる地震力に相当する。ここで、地域係数 Z は 1.0 とし、表層地盤による加速度の増幅率 G_s はいわゆる略算(平成12年建設省告示第1457号第10第1項)とした。

図 4-15(a-1)及び(a-2)には最大加速度が特に大きい6地点の応答スペクトルを示す。震度7とされた宮城県栗原市の築館は、周期0.25秒程度に極めて大きなピークがあるものの、0.5秒以上になると建築基準法のレベルを下回っている。宮城県の塩竈、茨城県の日立、栃木県の今市でも同様に、0.3秒前後に鋭いピークを持っているが、0.5秒以上になるとスペクトルは小さくなっている。宮城県の仙台では周期1.5秒程度まで、茨城県の鉾田では0.8秒程度までの短周期領域で建築基準法の2種地盤の値を上回っている。

図 4-15(b-1)～(b-6)には震度が大きかった岩手県、宮城県、福島県、茨城県、栃木県の観測点における応答スペクトルを示している。なお、図 4-15(a-1)及び(a-2)で既出の地点は除いている。岩手県では北上や一関のスペクトルが比較的大きい。宮城県の石巻、古川、岩沼、角田では周期1～2秒の範囲でも建築基準法と同等かそれ以上となっている。福島県の相馬、会津若松、白河、須賀川などでは1秒以下の短周期成分が比較的大きくなっている。相馬、須賀川、いわきでは周期2秒程度に、また湖畔にある猪苗代や郡山市湖南町中野では1.5秒前後や2.8秒程度にスペクトルの山が見られる。茨城県では高萩の記録が周期1～1.5秒程度の範囲で建築基準法と同等かそれ以上となっており、つくばでは1.3秒程度に顕著なピークが見られる。内陸の栃木県では茂木の記録が0.4秒程度に極めて大きなピークを持ち、前出の図 4-15(a-2)に示した今市や茨城県の日立と類似のスペクトルとなっている。また那須郡那珂川町小川の記録は周期1～2秒の範囲で建築基準法を大きく超えている。

多数の観測点で非常に大きな地動加速度が観測されているが、応答スペクトルで見ると主に短周期成分が卓越していた地点が多いことが分かる。倒壊等の構造的な被害に関連すると言われている周期1～2秒程度に着目して、建築基準法の2種地盤(図の黒の破線)を上回る地点を示すと、宮城県の仙台、古川、石巻、角田、岩沼、福島県の中野、茨城県の高萩、つくば、栃木県の小川が挙げられる。

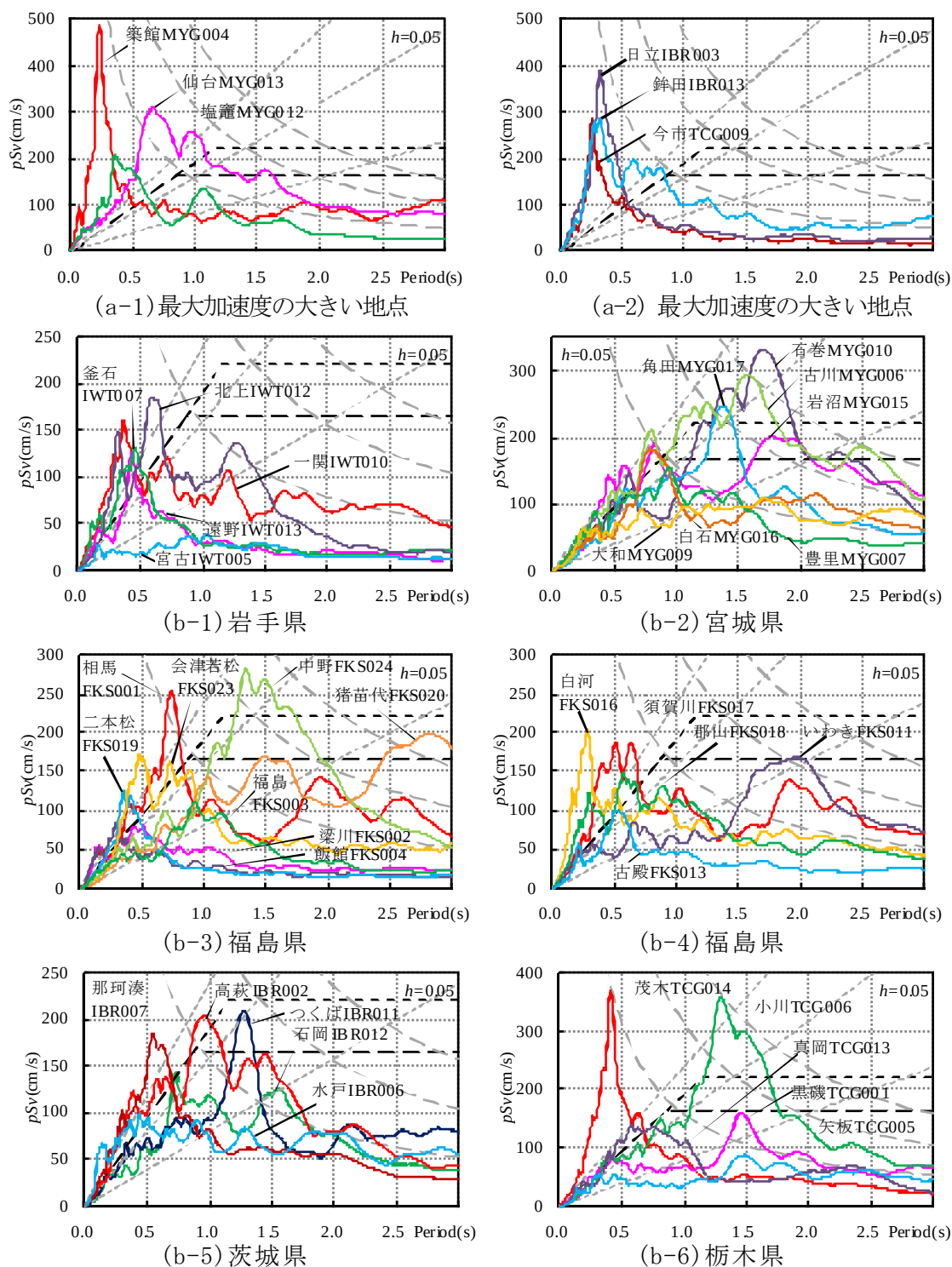


図 4-15 本震の擬似速度応答スペクトル ($h=0.05$)

図 4-16 には仙台、石巻、小川の記録による応答スペクトルを過去の強震記録と比較して示している。仙台の記録は 1995 年兵庫県南部地震の際の JMA 神戸の記録とスペクトルの大きさや形状がほぼ等しくなっている。甚大な被害をもたらした JR 鷹取駅や川口の強震記録と比較すれば、今回の地震動はさほど大きくはない。

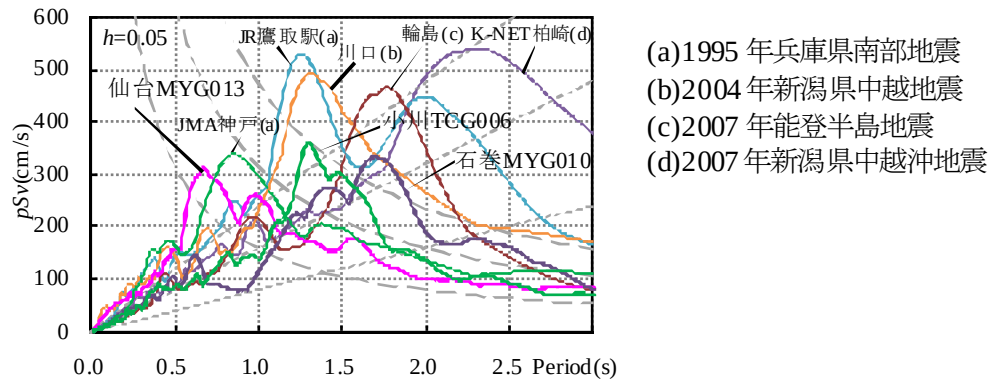


図 4-16 擬似速度応答スペクトル ($h=0.05$) : 本震と過去の強震記録との比較

図 4-17 には、東京都の新宿と東雲、神奈川県横浜について、周期の範囲を 10 秒までとした応答スペクトルを示している。東雲では周期 2.5～3 秒程度にピークが見られ、新宿でも 2.5 秒と 5 秒程度に小さなピークがある。長周期領域に顕著なピークが見られないのは、公開されたデータが 300 秒間（5 分間）であり、地震動が十分収束しないうちにデータが終わってしまっているためである。よって、今回の K-NET の記録では長周期地震動を十分に検討することはできなかった。

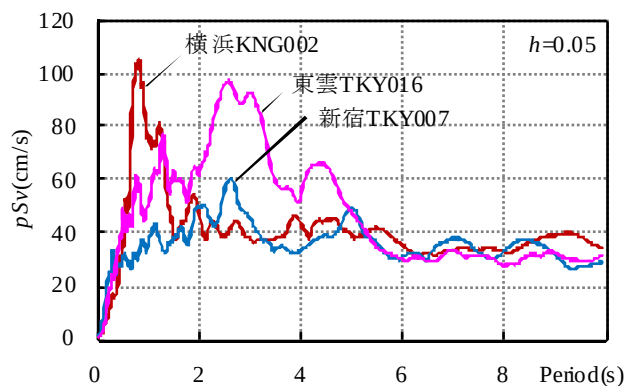


図 4-17 本震の擬似速度応答スペクトル ($h=0.05$) : 東京都と神奈川県の例

(2) 主要な余震の地震動特性

K-NET の公開データや地震のマグニチュード (M) や各地の震度から判断し、4 月 7 日 23 時 32 分頃に発生した余震（震源は宮城県沖、M7.1）と、4 月 11 日 17 時 16 分頃に発生した余震（震源は福島県浜通り、M7.0）の 2 つの余震による記録を、本震の記録と比較する。図 4-18 に 18 地点での本震と余震の応答スペクトルを示す。図 4-18(a-1)～(a-4)の岩手県では、4 月 7 日の余震は本震とほぼ等しい。図 4-18(b-1)～(b-4)の宮城県では、築館と仙台では 4 月 7 日の余震が本震と同程度であるが、南にある岩沼や角田では本震に比べてかなり小さい。図 4-18(c-1)～(c-4)の福島県では本震より余震の方が小さい場合が多いが、古殿では本震よりも 4 月 11 日の余震の方が大きくなっている。2 つの余震を比べると、福島県浜通りを震源とする 4 月 11 日の余震の方が 4 月 7 日の余震より大きい。図 4-18(d-1)～(d-4)に示した茨城県や、図 4-18(e-1)～(e-2)の栃木県では、4 月 11 日の余震の方が震源からの距離に近いが、本震よりもかなり小さいスペクトルとなっている。

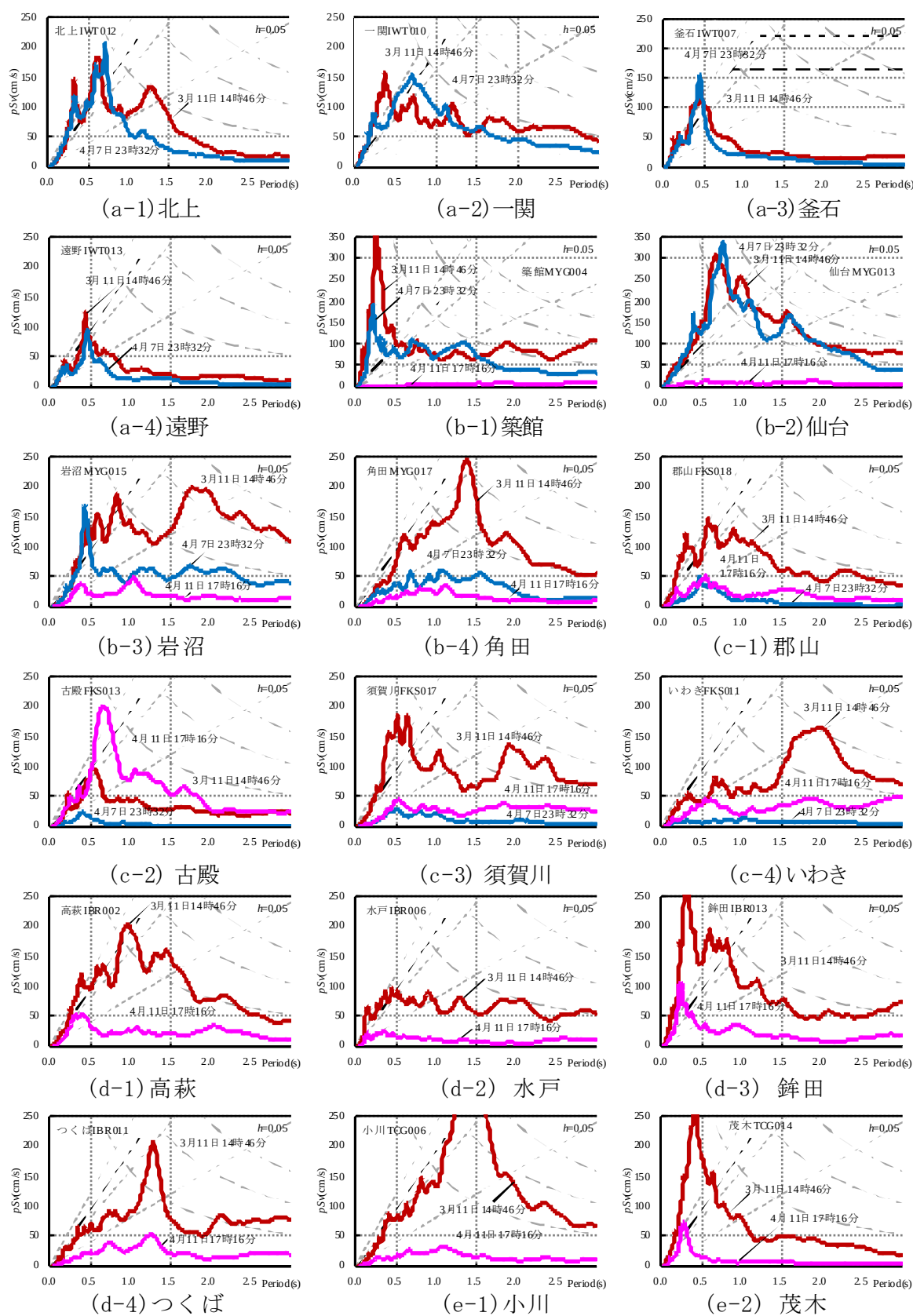


図 4-18 擬似速度応答スペクトル ($h=0.05$) : 本震と余震の比較

(3) K-NET 観測点の状況

本節の最後に、観測記録の特徴等を把握する上で参考とするため、いくつかの K-NET 観測点の状況等を簡単に示す。

a) K-NET 築館 (写真 4-1)

K-NET 築館の観測点は、栗原文化会館の南側駐車場の南、高さ約 3m の段差の上に、段差から約 5m 南に設置されている（高さ、距離は目視による）。状況から判断すると、地形による加速度の増幅も考えられる。



(a) 設置場所 (写真中央段差上の林の中)

(b) 地震計 (左側に約 3m の段差あり)

写真 4-1 K-NET 築館

b) K-NET 仙台 (写真 4-2)

K-NET 仙台の地震計は、仙台市宮城野消防署の駐車場内に設置されている。周辺には段差や斜面はなく、地震計は平坦な場所にある。駐車場や地震計周辺には亀裂が見られ、液状化による噴砂の跡のようなものがあつた。一部の建物では仕上げの軽微な損傷があつたが、周辺の大多数の建物には特に被害がないように見えた。



(a) 地震計 (噴砂の跡)

(b) 駐車場の亀裂と噴砂の跡

写真 4-2 K-NET 仙台

c) K-NET 郡山 (写真 4-3)

郡山市内、開成山総合運動公園に設置されている。脇の道路よりも低い位置で、周囲には小屋や樹木、電柱などがある。

d) K-NET 須賀川 (写真 4-4)

K-NET 須賀川の地震計は、市役所から約 500m 離れた須賀川市八幡山の斎場付近に駐車場の隅に設置されている。駐車場の中央付近には亀裂が入っており、道路の向かいにある墓地では墓石が転倒していた。なお、この周辺の建築物には大きな構造的被害は確認されなかった。



写真 4-3 K-NET 郡山



写真 4-4 K-NET 須賀川

e) K-NET 鉾田 (写真 4-5)

鉾田総合公園内に設置されている。地震計の前面には花壇があり、後ろ側には段差がある。

なお、気象庁は、震度観測点「鉾田市当間」として使われている本 K-NET 鉾田の観測点について、「震度が周辺に比べ過大に観測されていると判断された観測点」として、「震度計の設置状況には異常が認められないため、震度観測自体は正常に行われている」が、「地域代表性という観点から、(中略)地震情報への活用を停止」した⁴⁻²¹⁾。



(a) 前面



(b) 背面

写真 4-5 K-NET 鉾田

謝 辞 本 4.3 節では(独)防災科学技術研究所の K-NET の観測記録等を使用させていただきました。関係各位に謝意を表します。

4.4 建築研究所強震観測ネットワークなどの強震記録

4.4.1 建築研究所強震観測ネットワークの記録(建物基礎と地盤)

建築研究所では、主に建物を対象とした強震観測ネットワークを全国に展開している。東北地方太平洋沖地震の本震では、北海道から関西にかけての 54 の観測地点で強震記録が得られている。得られた強震記録の最大加速度を、震央から近い順に表 4-2 に、観測地点の位置を図 4-19 及び図 4-20 に示す。表 4-2 の計測震度は、地盤上に加速度計があればその記録を、ない場合は地盤に最も近い加速度計の記録から算出している。ここで、地盤上の加速度記録以外で算出した値については、アンダーラインを付して区別している。なお、本節では代表的な地点の波形を提示しているが、その他も、前震と余震も含めてウェブ⁴⁻²²⁾で参照できる

ここでは、仙台第 2 合同庁舎地下 2 階、東北大学人間環境系建物 1 階、宮古市庁舎地表、いわき市庁舎地下 1 階、及び建築研究所地表で得られた加速度波形と減衰定数 5% の疑似速度応答スペクトルを図 4-21 から図 4-25 に示す。

図 4-21 の仙台第 2 合同庁舎は仙台市青葉区にあり、ここで紹介する建築研究所の強震観測地点の中では震源から最も近い。地下 1 階の最大加速度は 259 cm/s^2 で、加速度波形には 50 秒ほどの時間差で到来するふたつの大きな波群が表れている。疑似速度応答スペクトルをみると、水平の 074° 方向(北から東まわりに 074° の方位方向)と直交する 164° 方向で違いがみられ、0.8 秒より短い周期成分では 164° 方向が、2.5 秒より長い周期成分では 074° 方向の応答が大きく、特に 074° 方向の 3 秒のピークの応答値は 100 cm/s に達している。

図 4-22 の東北大学人間環境系建物は、東北大学の青葉山キャンパスにあり、仙台第 2 合同庁舎の 3 km ほど西方になる。加速度波形の包絡形などの特徴は仙台第 2 合同庁舎のものと共通しているが、最大加速度は 333 cm/s^2 とこの建物で得られた記録の方が大きい。疑似速度応答スペクトルに着目すると、1 秒前後のピークが特徴的で、応答速度は 170 cm/s を超えている。また 282° 方向の周期 3 秒のピークは、仙台第 2 合同庁舎と共通の特徴である。

図 4-23 の宮古市庁舎は、宮古湾に流れ込む閉伊川の川沿い、河口から 1 km ほどの位置にある。東北地方太平洋沖地震では、津波により建物 2 階まで浸水した。加速度記録の最大値は 174 cm/s^2 、計測震度で 4.8 と地震動としては相対的に小さい。疑似速度応答スペクトルは 1.2 秒前後に 70 cm/s を超える山があるが、他の周期領域の応答は大きくはない。

図 4-24 のいわき市庁舎は、JR 常磐線いわき駅の南西約 1 km に位置する。地下 1 階で得られた記録の最大加速度は 176 cm/s^2 と宮古市庁舎と大差ないが、計測震度は 5.3 と大きくなっている。疑似速度応答スペクトルは、0.8 秒から 3 秒にかけての広い周期領域で、 80 cm/s から 100 cm/s の速度応答値を示している。

図 4-25 の建築研究所は、茨城県つくば市の北部に位置する。地表の記録の最大加速度は 279 cm/s^2 、計測震度は 5.3 となっている。疑似速度応答スペクトルの形状は比較的起伏があり、0.5 秒から 0.6 秒、1.3 秒、そして 3 秒にピークを有する。

表 4-2 強震記録一覧(1/4)

記号	観測地点	Δ (km)	I_{JMA}	設置 方位	位置	最大加速度 (cm/s ²)			備考
						H1	H2	V	
SND	仙台第2合同庁舎	175	5.2	074°	B2F*	163	259	147	
					15F	361	346	543	
THU	東北大学人間環境系建物	177	5.6	192°	01F*	333	330	257	
					09F	908	728	640	
MYK	宮古市庁舎	188	4.8	167°	01F	138	122	277	
					07F	246	197	359	
					GL*	174	174	240	
IWK	いわき市庁舎	210	5.3	180°	B1F*	175	176	147	
					09F	579	449	260	
TRO	鶴岡合同庁舎	275	3.9	182°	01F*	34	36	14	
					04F	37	39	15	
HCN2	八戸市庁舎別館(免震)	292	5.2	164°	GL*	286	210	61	
					G30	86	89	49	地中 30 m
					G105	36	46	32	地中 105 m
					10F	120	123	206	
					01F	91	122	73	
					B1F	100	104	58	
HCN	八戸市庁舎本館	292	4.6	164°	B1F*	97	110	55	
					06F	348	335	78	
AKT	秋田県庁	299	4.3	087°	08F	175	192	44	
					B1F*	50	47	24	
ANX	建築研究所	330	5.3	180°	A01*	279	227	248	地表
					A89	142	153	102	地中 89 m
					BFE	194	191	136	新館
					8FE	597	506	344	新館
					MBC	203	206	152	研究本館
					M8C	682	585	311	研究本館
BRI	建築研究所地震観測研修棟	330	5.4	180°	01F*	281	273	165	
TKC	つくば市庁舎(免震)	334	5.2	004°	B1F*	327	233	122	
					01F	92	76	198	
					06F	126	91	243	
NIG	新潟市庁舎分館	335	3.9	061°	B1F*	28	40	14	
					07F	39	55	14	
HRH	弘前法務合同庁舎	346	3.4	195°	01F*	28	25	15	
TUS	東京理科大学野田キャンパス	357	5.1	000°	01F*	269	263	151	
YCY	八千代市庁舎新館	361	5.3	302°	B1F	140	135	92	
					GL*	312	306	171	
					07F	486	359	145	
NIT	日本工業大学	362	5.1	288°	GL*	230	197	79	
					01F	150	119	63	
					06F	283	322	131	

注) Δ : 震央距離, I_{JMA} : 計測震度(*印のセンサーの3成分の加速度記録から気象庁の方法で算出。なお、地盤上の記録からの算定でない場合はアンダーラインを付している。), 設置方位: 北から東回りに測った方位, H1, H2, V: 水平1(設置方位), 水平2(設置方位に直交)及び鉛直方向の最大加速度

表 4-2 強震記録一覧(2/4)

記号	観測地点	Δ (km)	I_{JMA}	設置 方位	位置	最大加速度 (cm/s ²)			備考
						H1	H2	V	
MST	三郷市庁舎	367	4.9	258°	01F	72	104	71	
					GL*	130	127	73	
					07F	219	190	106	
FNB	船橋市総合教育センタ ー	368	4.7	357°	01F	144	147	63	
					GL*	133	145	105	
					08F	359	339	141	
CHB	千葉第二地方合同庁舎	369	4.9	346°	B1F	152	122	51	
					08F	375	283	117	
					GL*	168	175	100	
ICK	市川市行徳図書館	375	5.2	321°	01F*	164	163	71	
					02F	178	186	80	
					05F	240	300	104	
EDG	江戸川区庁舎	377	4.8	003°	01F*	112	112	69	
					05F	256	299	77	
ADC	足立地方合同庁舎	377	4.8	012°	01F*	118	103	71	
					04F	266	146	95	
SIT2	さいたま新都心合同庁 舎 2 号館(超高層)	378	4.4	340°	B3F*	74	63	42	
					10FS	119	138	62	
					27FS	248	503	107	
SITA	さいたま新都心合同庁 舎 厚生棟	378	4.5	313°	01F*	90	105	47	
TDS	戸田市庁舎	380	5.0	354°	GL*	203	206	53	
					B1F	140	173	65	
					08F	425	531	160	
AKB	北区赤羽会館	380	4.6	354°	B1F*	85	139	59	
					06F	180	250	86	
SMD	墨田区庁舎(超高層)	380	4.3	000°	20F	385	290	81	
					08F	263	197	46	
					B1F*	69	66	34	
NMW	国立西洋美術館(免震)	382	4.8	218°	GL*	265	194	150	
					B1FW	100	79	84	
					01FW	76	89	87	
					04F	100	77	90	
UTK	東京大学工学部 11 号館	383	4.7	348°	7FN	181	212	58	
					7FS	201	360	160	
					01F	73	151	49	
					GL*	197	218	79	
TKD	コーシャタワー佃(超 高層)	385	4.4	180°	01F*	87	98	41	
					18F	118	141	64	
					37F	162	198	108	

注) Δ : 震央距離, I_{JMA} : 計測震度(*印のセンサーの3成分の加速度記録から気象庁の方法で算出。なお、地盤上の記録からの算定でない場合はアンダーラインを付している。), 設置方位: 北から東回りに測った方位, H1, H2, V: 水平 1(設置方位), 水平 2(設置方位に直交)及び鉛直方向の最大加速度

表 4-2 強震記録一覧 (3/4)

記号	観測地点	Δ (km)	I_{JMA}	設置 方位	位置	最大加速度 (cm/s ²)			備考
						H1	H2	V	
CGC	中央合同庁舎 6号館 (超高層)	386	4.4	208°	01F*	90	86	45	
					20B	208	148	173	B 棟 20F
					19C	179	133	130	C 棟 19F
CG2	中央合同庁舎 2号館 (超高層)	386	4.2	208°	B4F*	75	71	49	
					13F	137	113	72	
					21F	121	131	104	
CG3	中央合同庁舎 3号館 (免震)	386	4.5	208°	B2F*	104	91	58	
					B1F	55	41	62	
					12F	94	82	104	
NDLA	国立国会図書館新館	387	4.5	354°	B8F	61	88	53	
					B4F	68	101	56	
					01F*	76	104	84	
					04F	125	192	94	
NDLG	国立国会図書館地盤	387	5.0	354°	G35	72	71	51	
					G24	95	116	54	
					GL*	224	201	93	
NDLM	国立国会図書館本館	387	4.5	354°	01S*	70	94	60	
					17S	458	489	111	
NKN	東京法務局中野出張所	390	4.8	359°	06F	172	375	56	
					01F*	126	158	54	
TUF	東京海洋大学品川国際交流会館	390	5.0	000°	01F	174	169	60	
					GL*	181	189	71	
					07F	316	223	66	
KDI	国土交通大学校	401	4.6	090°	03F	129	329	55	
					01F	110	136	53	
					GL*	167	143	50	
KWS	川崎南労働基準監督署	401	4.7	045°	01F*	107	77	30	
					02F	133	123	49	
					07F	366	304	76	
NGN	長野県庁	444	2.7	157°	B1F*	8	7	8	
					11F	35	27	9	
HKD	北海道開発局函館開発建設部	447	3.5	180°	GL*	25	28	13	
HRO	広尾町役場	466	2.7	140°	01F*	17	20	8	
YMN	山梨県庁(免震)	468	3.9	006°	B1F	47	39	18	
					GL*	51	44	20	
					01F	37	52	20	
					08F	41	51	25	
SMS	静岡県下田総合庁舎	517	2.9	225°	GL*	12	19	10	
SMZ	清水合同庁舎	520	4.2	165°	01F*	28	40	15	
					11F	81	56	18	

注) Δ : 震央距離, I_{JMA} : 計測震度 (*印のセンサーの 3 成分の加速度記録から気象庁の方法で算出。なお、地盤上の記録からの算定でない場合はアンダーラインを付している。), 設置方位: 北から東回りに測った方位, H1, H2, V: 水平 1 (設置方位), 水平 2 (設置方位に直交) 及び鉛直方向の最大加速度

表 4-2 強震記録一覧(4/4)

記号	観測地点	Δ (km)	I_{JMA}	設置 方位	位置	最大加速度 (cm/s ²)			備考
						H1	H2	V	
KSO	長野県木曽合同庁舎	524	2.6	292°	B1F*	9	10	8	
					6F	32	31	10	
KGC	釧路合同庁舎(免震)	558	2.6	167°	GL*	12	14	6	
					G10	10	10	4	
					G34	5	5	3	
					B1F	8	12	4	
					01F	10	16	6	
					09F	16	19	12	
HKU	北海道大学工学部	567	2.7	172°	GL*	10	9	5	
NGY	名古屋合同庁舎1号館	623	<u>3.1</u> [#]	174°	GL*	8	15	-	
					B2F	9	14	7	
					12F	25	46	7	
MTS	三重県松阪庁舎	688	2.3	216°	07F	16	8	4	
					01F*	6	5	3	
MIZ	舞鶴市庁舎	726	0.9	085°	01F	1	2	2	
					05F*	1	1	2	
OSK	大阪合同庁舎3号館(超高層)	759	2.9	189°	18F	65	38	7	
					B3F*	11	9	5	
SKS	大阪府咲洲庁舎(超高層)	770	3.0	229°	01F*	35	33	80	
					18F	41	38	61	
					38F	85	57	18	
					52FN	127	88	13	
					52FS	129	85	12	

注) Δ : 震央距離, I_{JMA} : 計測震度(*印のセンサーの3成分の加速度記録から気象庁の方法で算出。なお、地盤上の記録からの算定でない場合はアンダーラインを付している。), 設置方位: 北から東回りに測った方位, H1, H2, V: 水平1(設置方位), 水平2(設置方位に直交)及び鉛直方向の最大加速度

[#] 上下(V)成分のセンサー異常(無信号)のため、水平2成分の加速度記録から算出

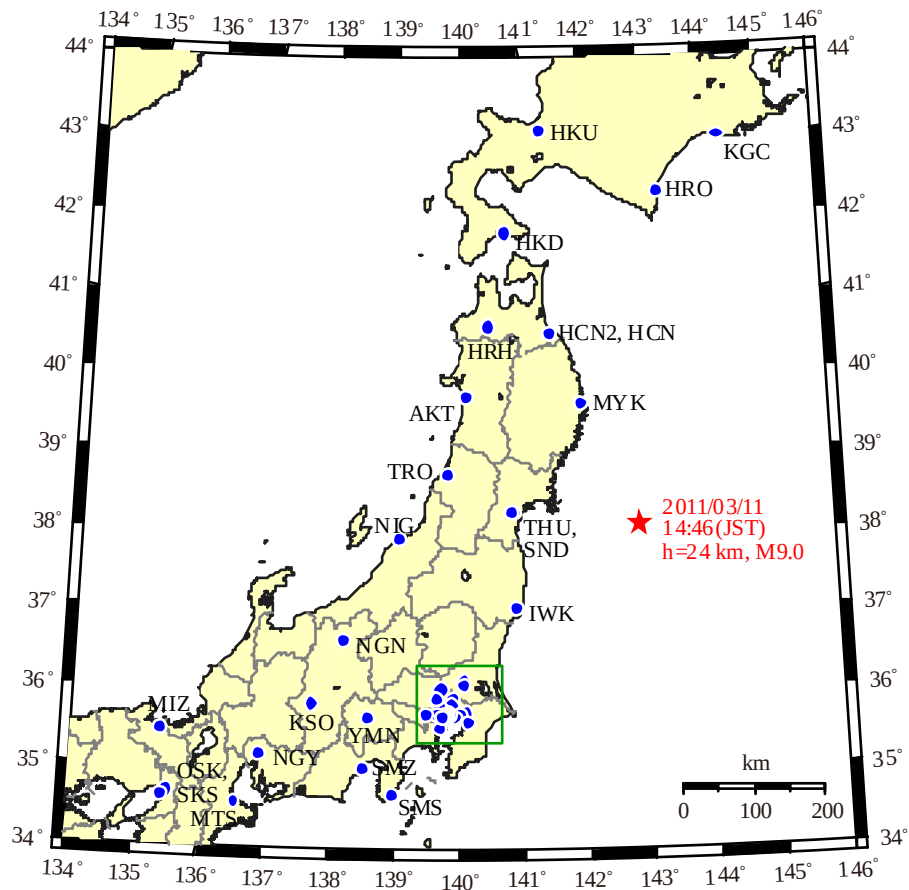


図 4-19 震央位置(★)と記録が得られた強震観測地点(●)

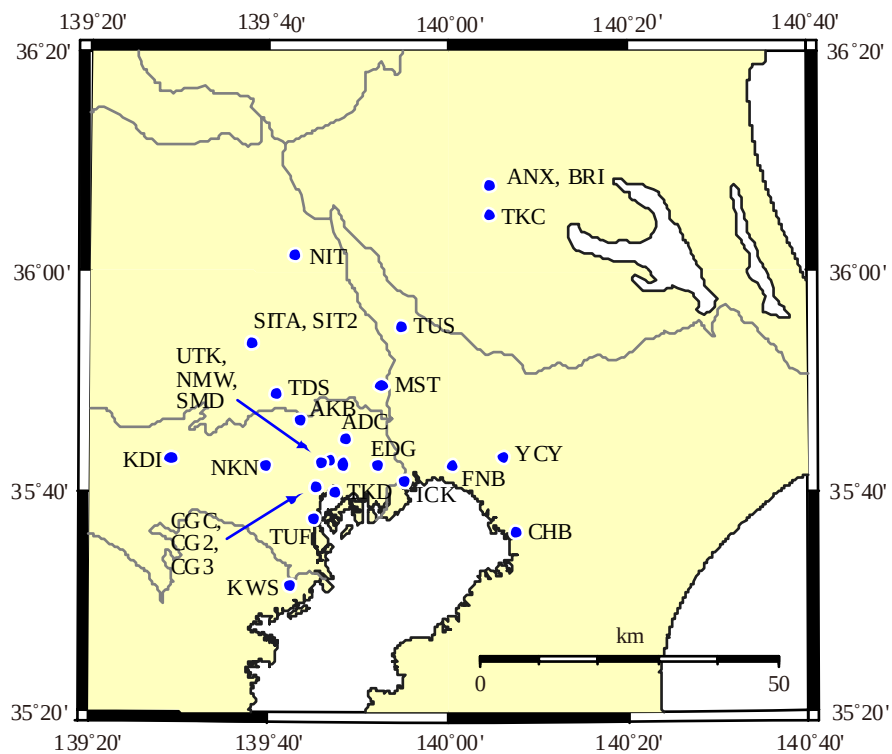


図 4-20 関東地方の観測地点(図 4-19 の緑色の四角の部分)

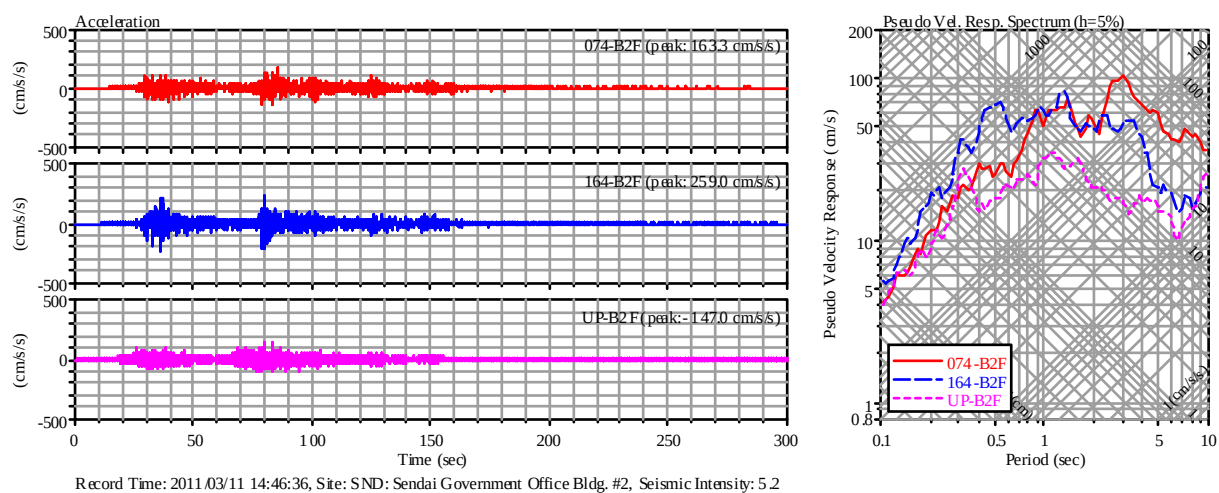


図 4-21 仙台第 2 合同庁舎 (SND) 地下 2 階 (B2F) の強震記録

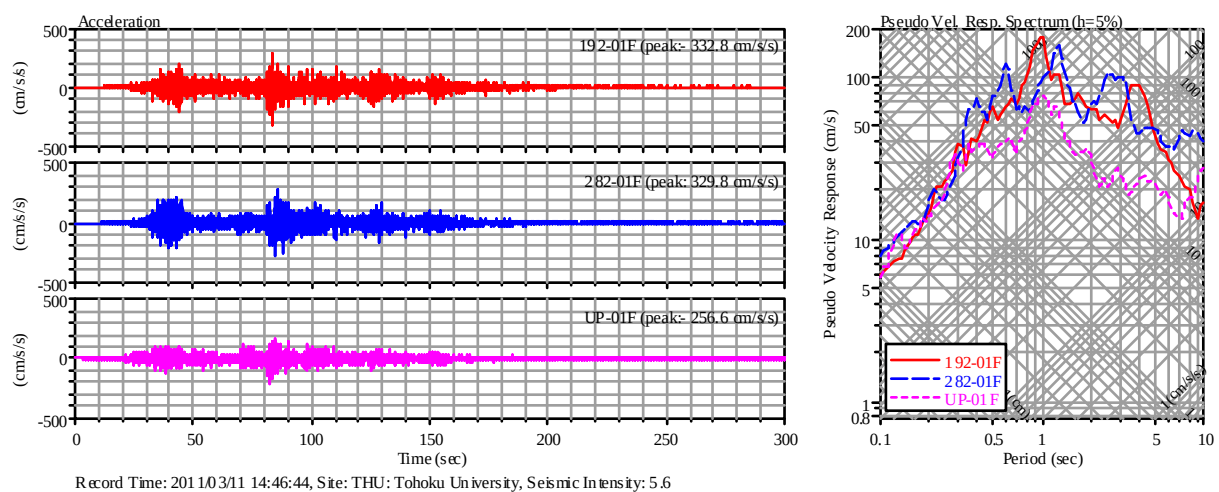


図 4-22 東北大学工学部人間環境系建物 (THU) 1 階 (01F) の強震記録

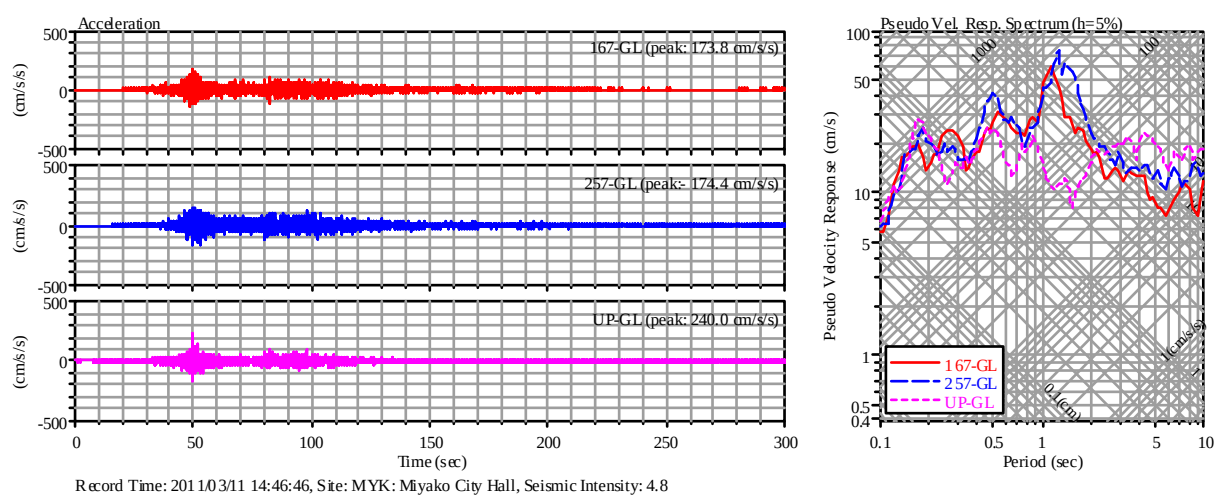


図 4-23 宮古市庁舎 (MYK) 地表 (GL) の強震記録

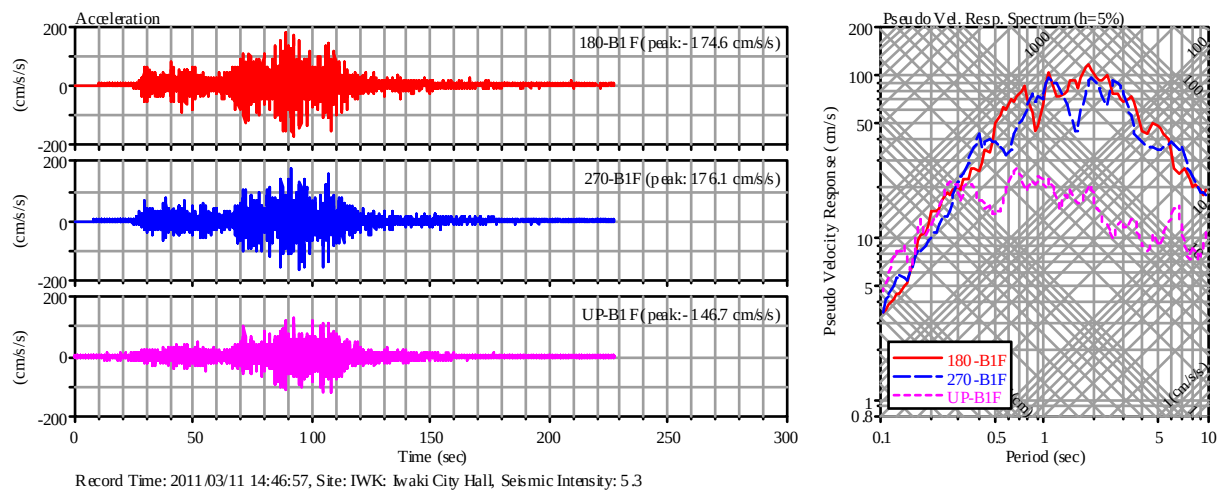


図 4-24 いわき市庁舎 (IWK) 地下 1 階 (B1F) の強震記録

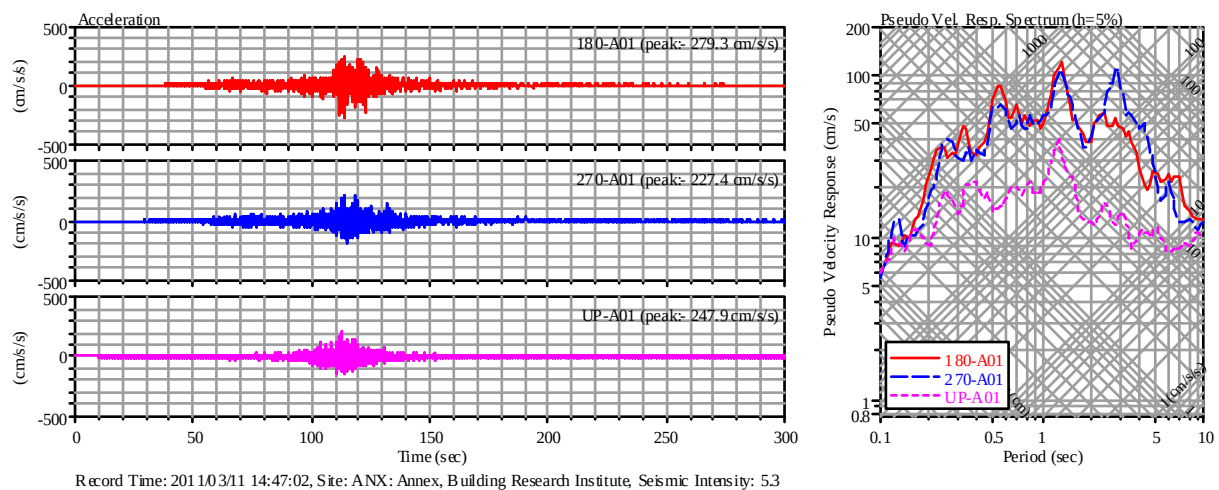


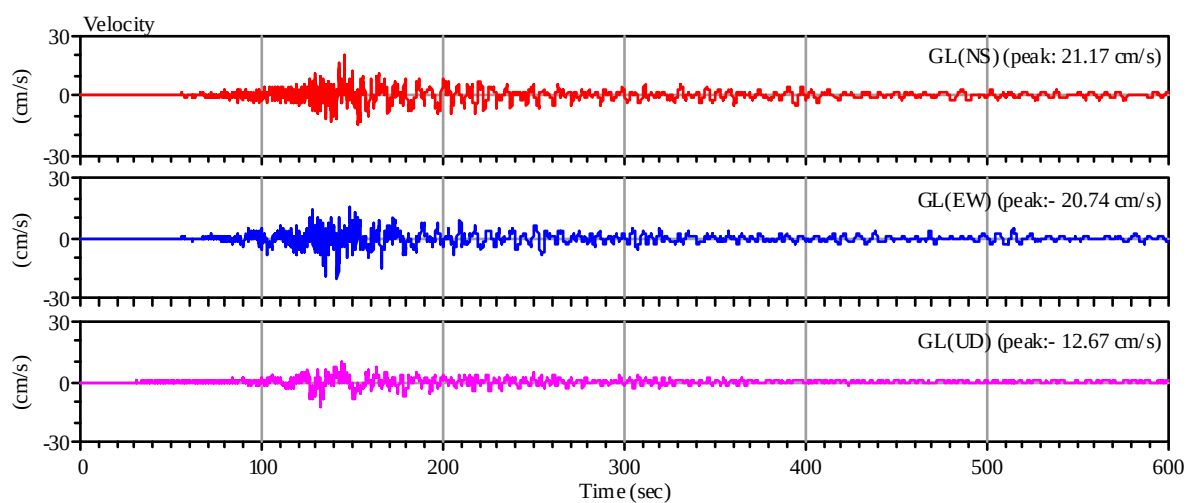
図 4-25 建築研究所 (ANX) 地表 (A01) の強震記録

4.4.2 建築研究所強震観測ネットワークの記録(長周期地震動)

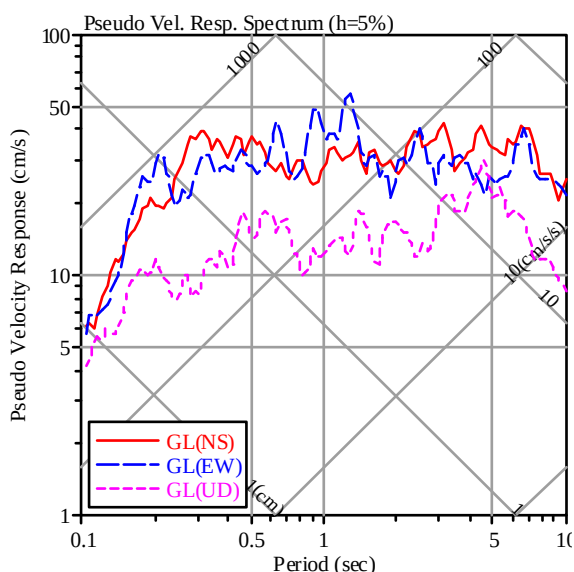
東京などの大規模な沖積平野では、長周期地震動の増幅が大きな問題となる。ここでは建築研究所強震観測ネットワークの記録から、長周期地震動について考察する。

(1) 国立国会図書館地盤の強震記録

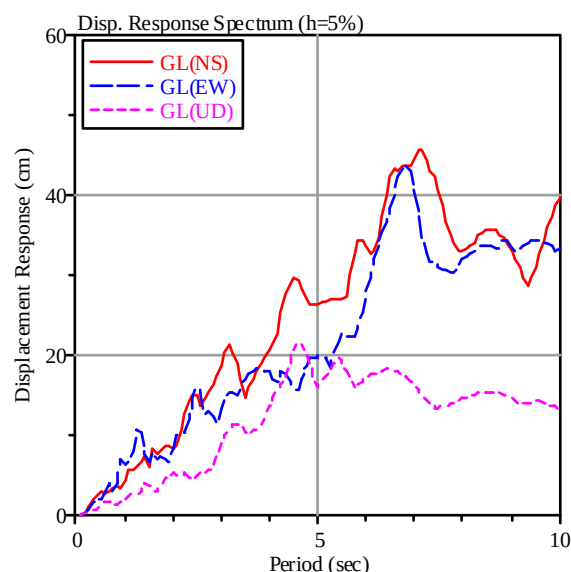
国立国会図書館は東京都千代田区永田町にあり、建築研究所は本館建物、新館建物、及び敷地地盤上の3系列の強震観測を行っている。このうち、地表で得られた加速度記録を積分して得られた速度記録と、減衰定数5%の疑似速度応答スペクトル及び変位応答スペクトルを図4-26に示す。なお、加速度記録から速度への変換は、カットオフ振動数0.1Hzのハイパスフィルターと高速フーリエ変換を用いた積分による。また、強震計の設置方位は、観測対象の建物の軸に合わせてあるため観測地点ごとに異なるが、ここではNS方向とEW方向に変換して示している。図4-26の速度波形をみると、激しい揺れが100秒ほど続き、その後長周期成分を主体とした地震波が到来し、600秒以上揺れが継続している。疑似速度応答スペクトルは、1.2秒辺りに卓越があるものの、0.5秒から8秒の周期領域で概ね平坦な形状をしている。変位応答スペクトルは、長周期構造物の応答変位を知る上で有用であり、この場合、7秒程度の固有周期をもつ構造物の変位応答が特に大きかったと考えられる。



(a) 速度波形



(b) 疑似速度応答スペクトル (h=5%)

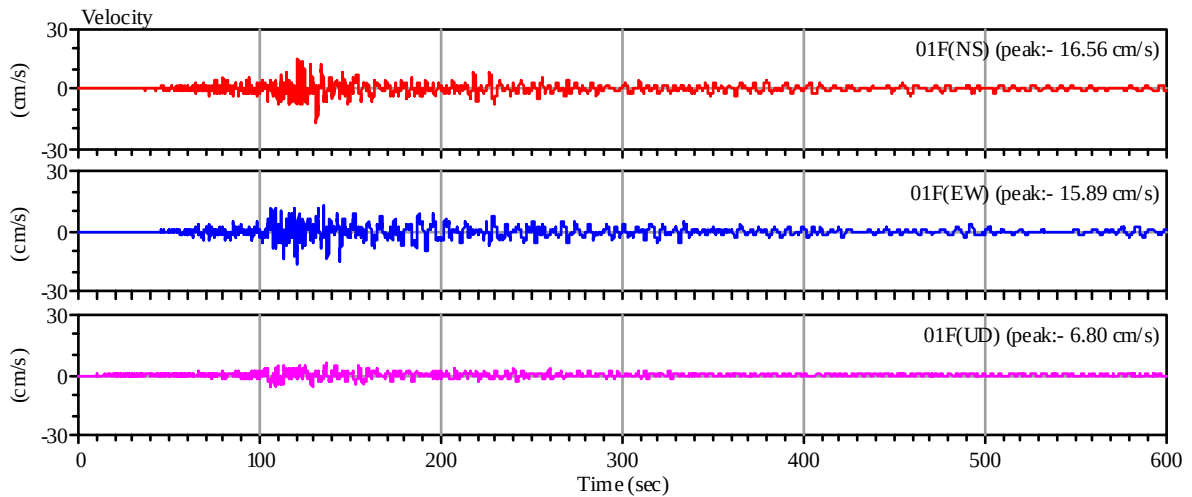


(c) 変位応答スペクトル (h=5%)

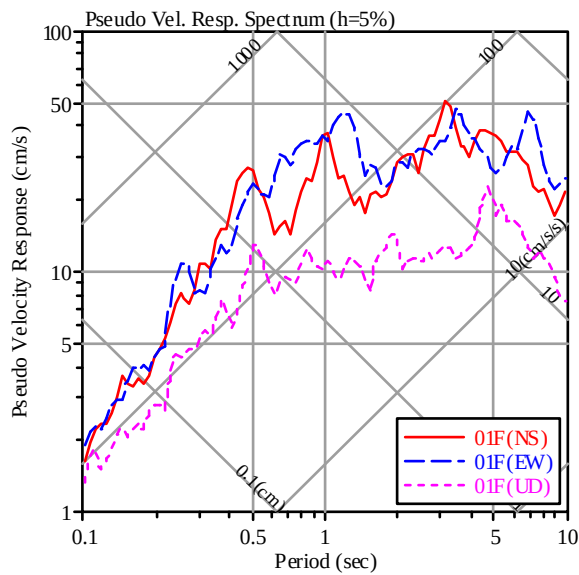
図 4-26 国立国会図書館地盤 (NDLG) 地表 (GL) の速度記録と応答スペクトル

(2) コーシャタワー佃の強震記録

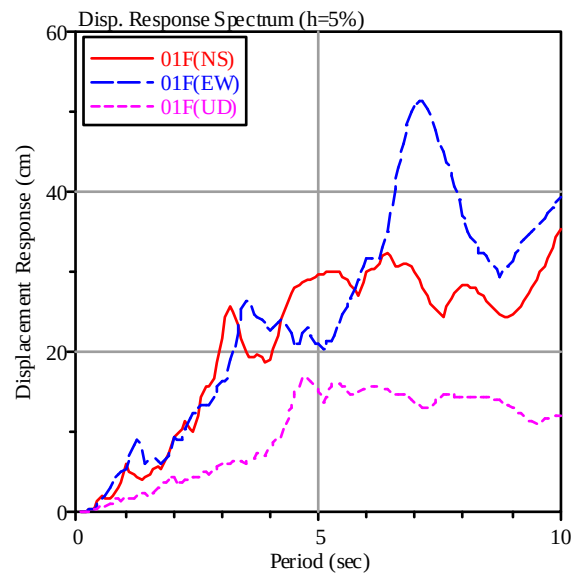
もう一例、東京湾岸の観測事例として、東京都中央区にあるコーシャタワー佃の1階で得られた速度波形と応答スペクトルを図 4-27 に示す。速度波形の特徴は、国立国会図書館の速度波形と共通しており、長周期地震動が長く継続している。疑似速度応答スペクトルは、やはり比較的平坦な形状であるが、1秒から1.2秒、2.5秒から3秒、そして7秒辺りにピークが表れる。変位応答スペクトルをみると、同様に7秒に大きな応答が表れているが、EW方向だけであり、長周期地震動に強い方向性が表れていると考えられる。



(a) 速度波形



(b) 疑似速度応答スペクトル (h=5%)

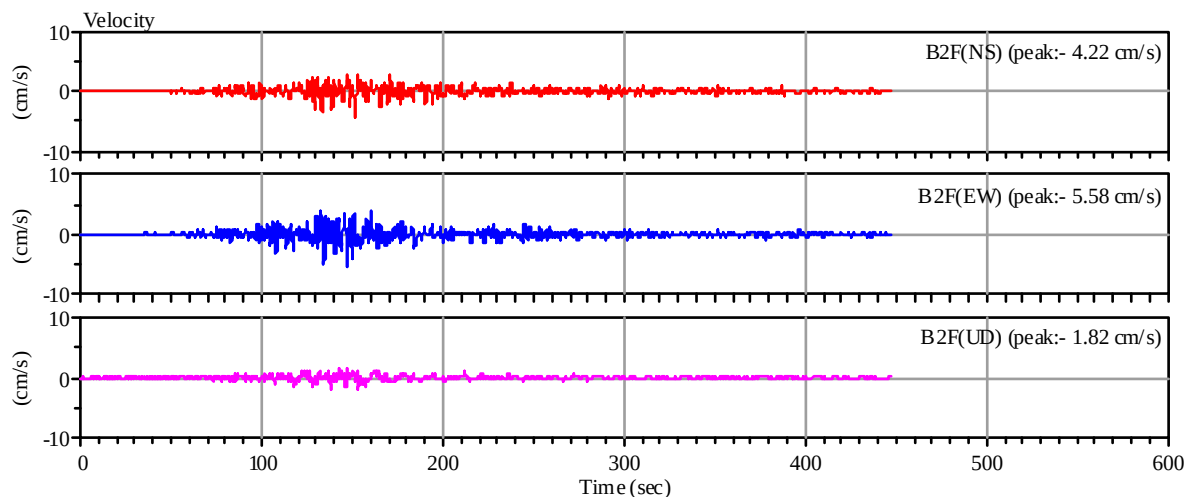


(c) 変位応答スペクトル (h=5%)

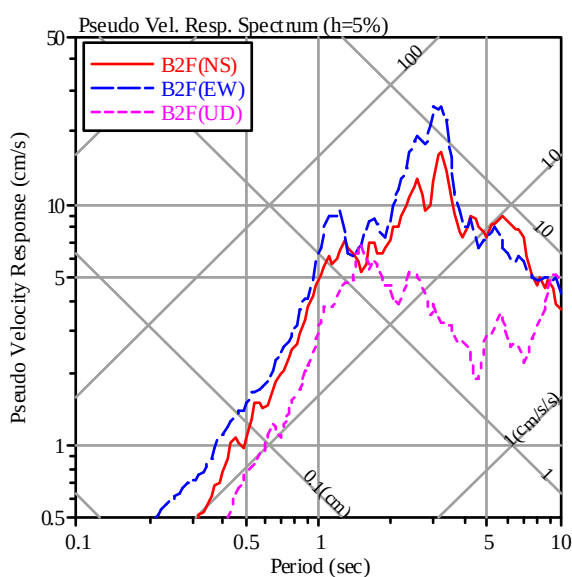
図 4-27 コーシャタワー佃 (TKD) 1 階 (01F) の速度記録と応答スペクトル

(3) 名古屋合同庁舎 1 号館の強震記録

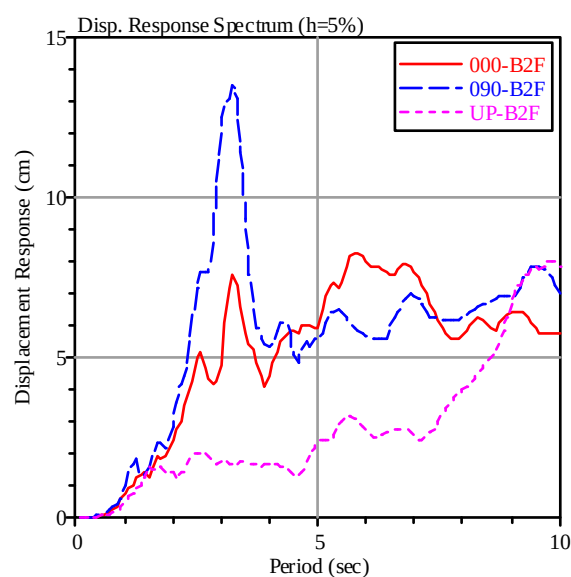
名古屋合同庁舎 1 号館は、名古屋市中区の官庁街に立地する。名古屋合同庁舎 1 号館では地表にも加速度計が設置されているが、現在上下成分が不調であるため地下 2 階の記録をみる。図 4-28 にここで得られた強震記録の速度波形と応答スペクトルを示す。速度波形上には、大きな振幅の長周期地震動は明瞭には観察できない。疑似速度応答スペクトルや変位応答スペクトルをみると、3 秒に大きなピークを有する形状となっており、深い地下構造の影響が表れているが、応答振幅は小さい。



(a) 速度波形



(b) 疑似速度応答スペクトル (h=5%)

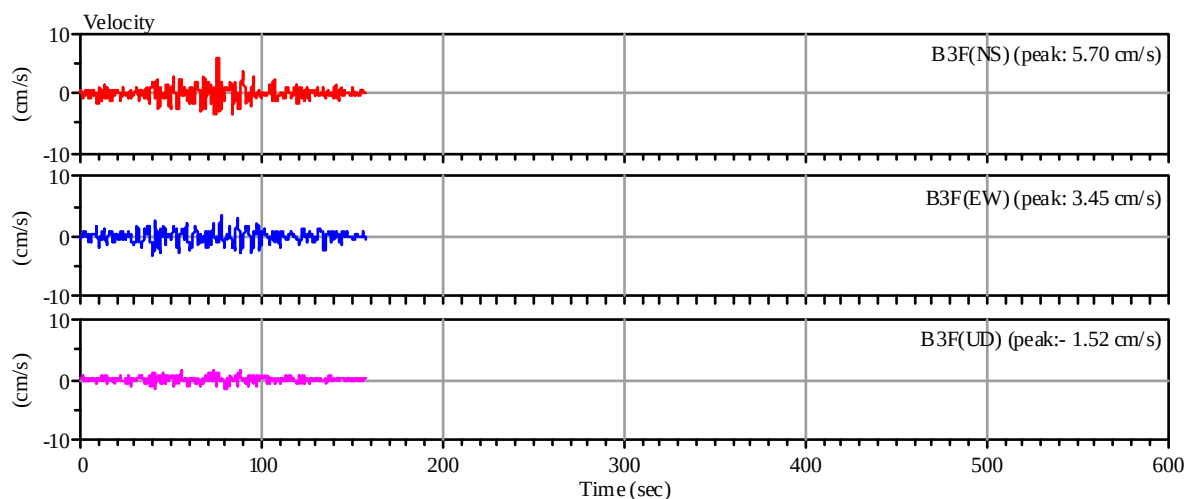


(c) 変位応答スペクトル (h=5%)

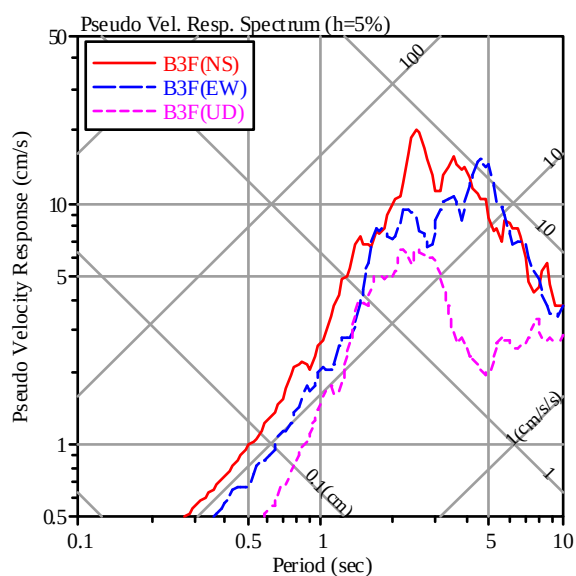
図 4.28 名古屋合同庁舎 1 号館 (NGY) 地下 2 階 (B2F) の速度記録と応答スペクトル

(4) 大阪合同庁舎 3 号館の強震記録

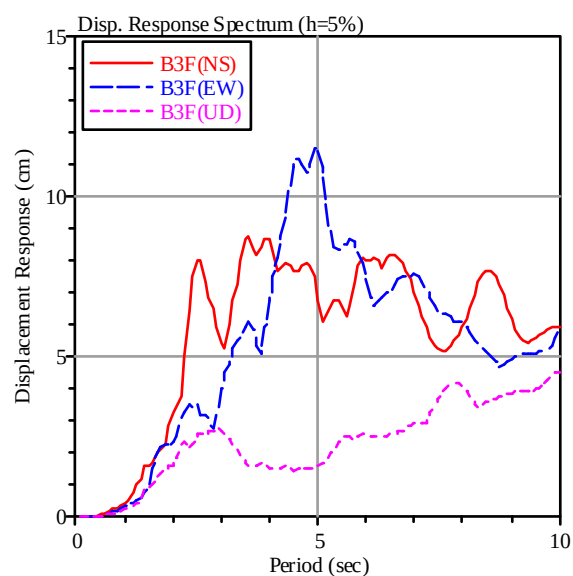
大阪市中央区に建つ大阪合同庁舎 3 号館の地下 3 階で観測された強震記録の速度波形と応答スペクトルを図 4-29 に示す。強震計の制約で十分な記録時間が確保できていないが、応答スペクトルから地震動の周期特性を検討する。NS 方向で 2.5 秒と 3.6 秒辺りに卓越があり、また EW 方向では 4.5 秒から 5 秒に大きな応答が観察できる。



(a) 速度波形



(b) 疑似速度応答スペクトル (h=5%)

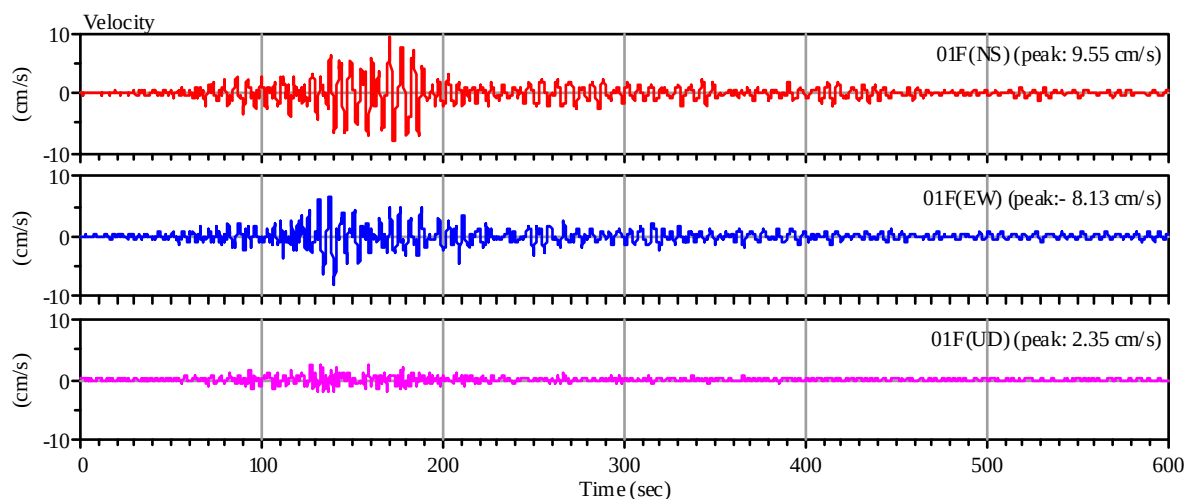


(c) 変位応答スペクトル (h=5%)

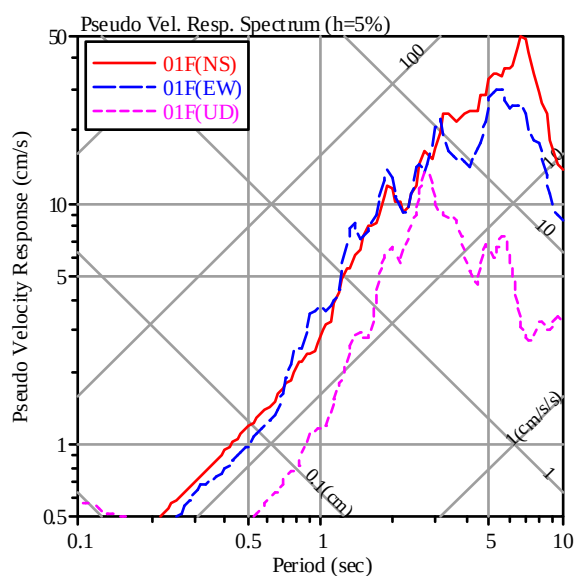
図 4-29 大阪合同庁舎 3 号館 (OSK) 地下 3 階 (B3F) の速度記録と応答スペクトル

(5) 大阪府咲洲庁舎の強震記録

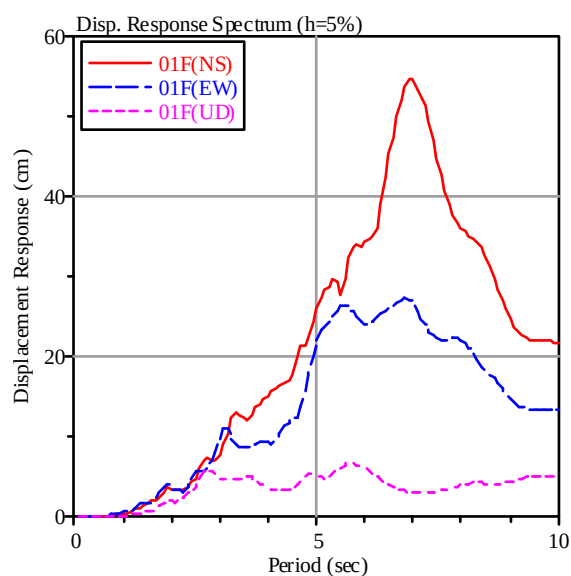
大阪市住之江区にある大阪府咲洲庁舎で得られた強震記録の速度波形と応答スペクトルを図 4-30 に示す。最大 10 cm/s ほどの比較的大きな揺れが 80 秒ほど続き、その後も長周期の地震動が 400 秒以上にわたって継続している。疑似速度応答スペクトルや変位応答スペクトルをみると、NS 方向の 7 秒の応答が際立っており、東京湾岸と大差ない応答値となっている。



(a) 速度波形



(b) 疑似速度応答スペクトル (h=5%)



(c) 変位応答スペクトル (h=5%)

図 4-30 大阪府咲洲庁舎 (SKS) 1 階 (01F) の速度記録と応答スペクトル

4.4.3 建築研究所強震観測ネットワークの記録(建物の地震応答)

建築研究所の強震観測ネットワークでは、46の建物の地震時の挙動が観測された。このうち、6棟が免震建物、7棟が超高層建物である。また、4棟の建物は今回の地震で、強震記録から判別できるほどの損傷を受けている。以下に特徴的な観測事例を紹介する。

(1) 東北大学人間環境系建物の強震記録

建物が損傷を受け、建物の動特性が変化した例として、東北大学の人間環境系建物を取り上げる。この建物は、東北大学青葉山キャンパスにあり、1978年より建物の1階と9階で強震観測を行っている。1978年宮城県沖地震で得られた著名な東北大学の記録もこの建物で観測されたものである。東北地方太平洋沖地震で得られた、(a) N192° E方向の加速度記録、(b) N282° E方向の加速度記録、(c) N192° E方向の建物変位(9階の1階に対する相対変位)、(d) N282° E方向の建物変位、及び(e) 10秒ごとに算出した建物の1次固有振動数⁴⁻²³⁾を、図4-31に示す。N192° E方向は北から東回りに192°の方位を表し、建物の短辺方向に対応する。

図4-31 (a)及び (b)は濃い太線が1階(01F)の、明るい細線が9階(09F)の加速度を表し、1階の最大加速度は両方向とも 330 cm/s^2 を超えている。また9階の最大加速度は1階の2~3倍となり、N192° E方向では 900 cm/s^2 を超えている。加速度波形には、40秒辺りと80秒過ぎに振幅の大きなふたつの波群がみられ、ふたつ目の波群の応答加速度がより大きくなっている。図4-31(e)の1次固有振動数の変化をみると、N192° E方向、N282° E方向共、地震動の初期の時間では1.5 Hz程度の値を示しているが、40秒から50秒にかけての最初の波群で1.0 Hz位に低下し、80秒から100秒のふたつめ目の波群で更に0.7 Hz から0.8 Hz 程度に落ちている。

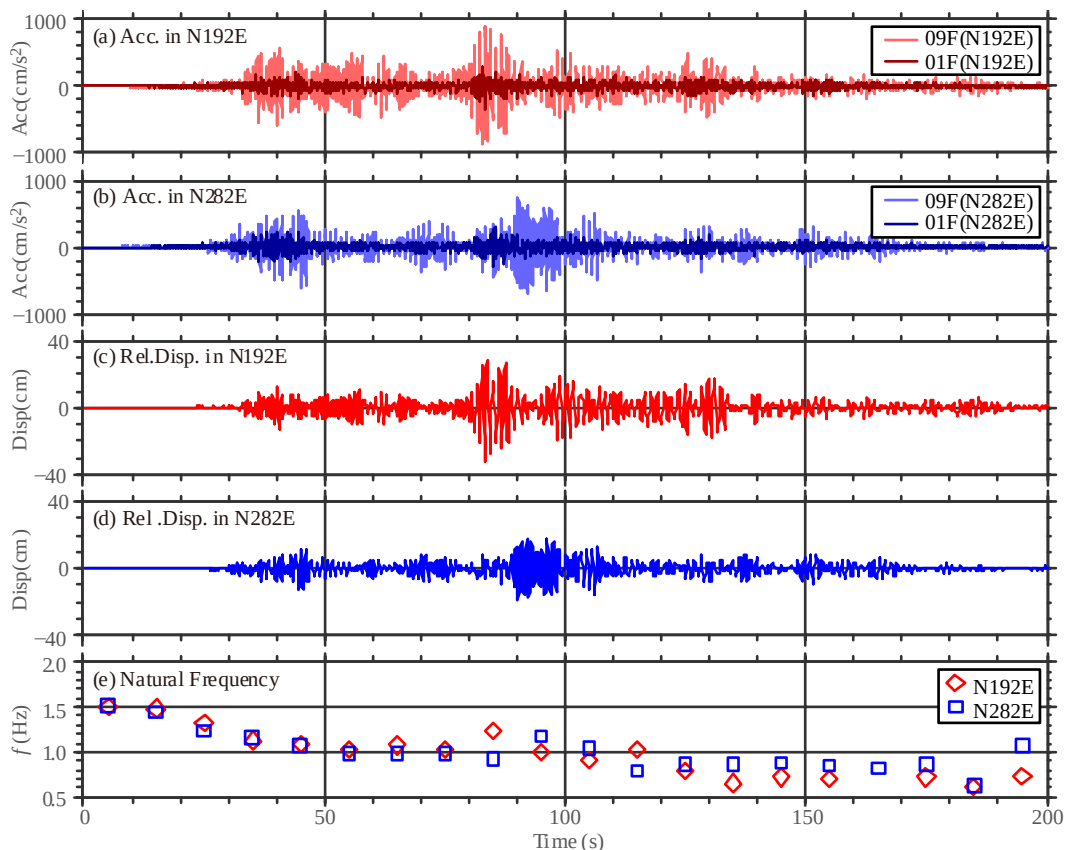
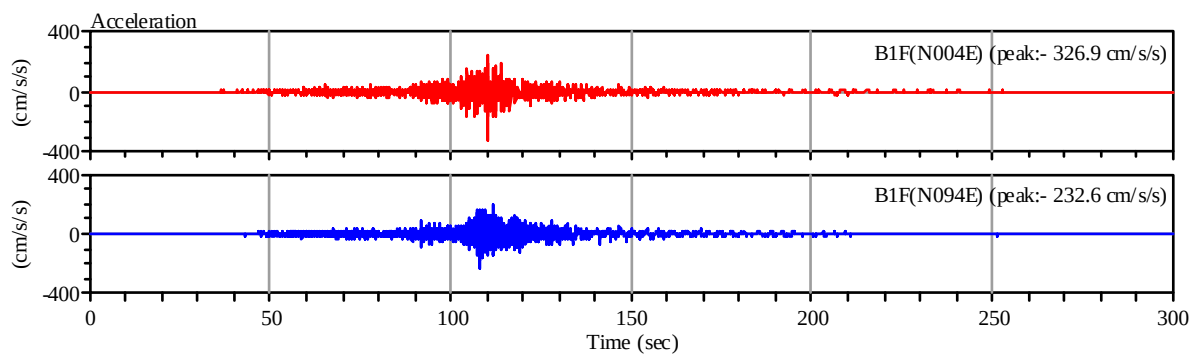


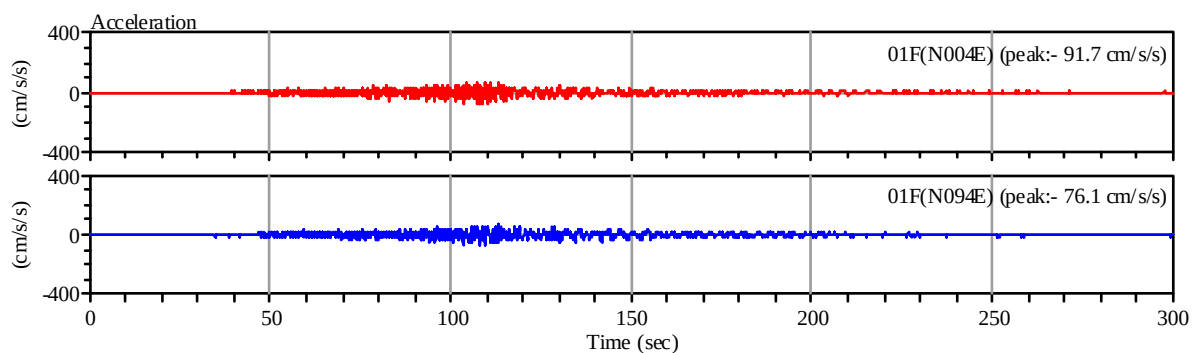
図 4-31 東北大学人間環境系建物(THU)の加速度記録、建物変位と固有振動数の同定結果

(2) つくば市庁舎の強震記録

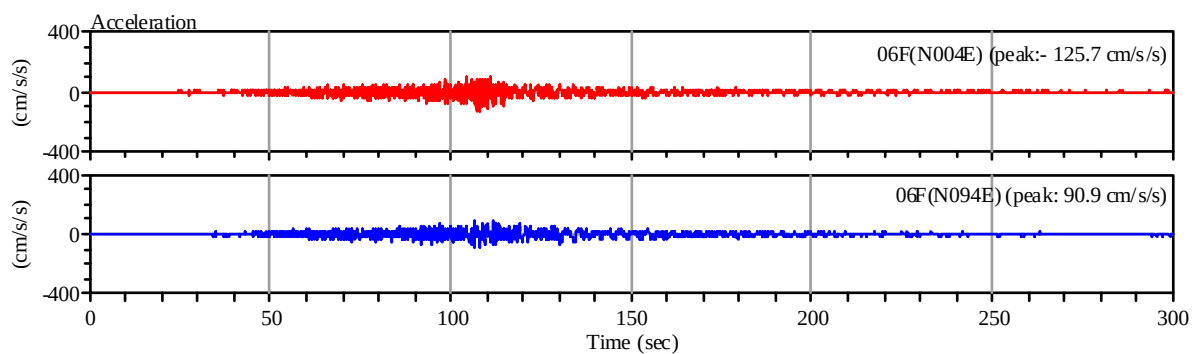
つくば市庁舎は 2010 年 3 月に竣工した、7 階建の免震建物である。図 4-32 につくば市庁舎で得られた加速度記録を示す。上段(a)が免震ピット内 (B1F)、中段(b)が 1 階、下段(c)が 6 階で得られた水平 2 成分の加速度記録である。免震ピットで 233 cm/s^2 から 327 cm/s^2 であった最大加速度は免震層の直上に当たる 1 階では 76 cm/s^2 から 92 cm/s^2 と 3 割以下に低減され、建物内の増幅も小さく抑えられている。免震装置の効果が強震記録に明瞭にあらわれていると指摘できる。



(a) 免震ピット (B1F)



(b) 1 階 (01F)



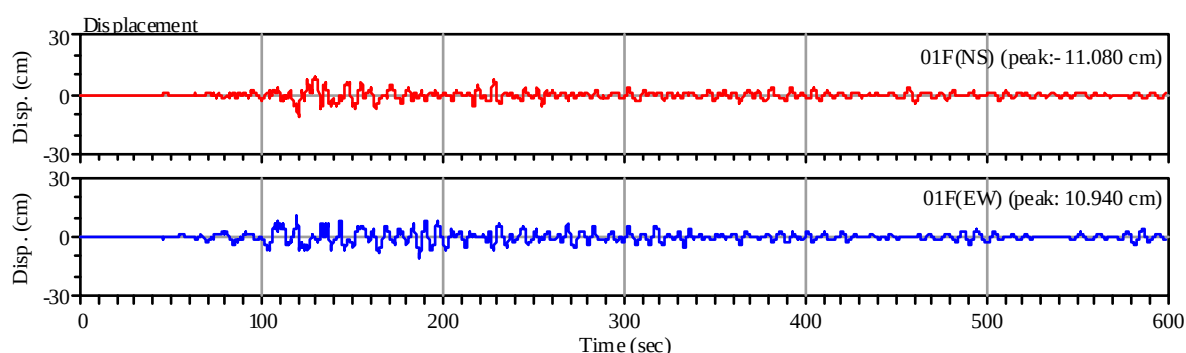
(c) 6 階 (06F)

図 4-32 つくば市庁舎 (TKC) の加速度記録

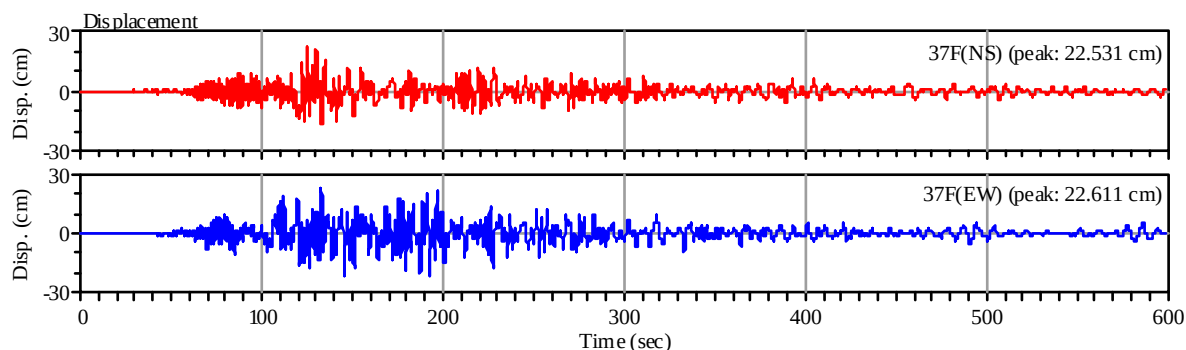
(3) コーシャタワー佃の強震記録

前節で述べた東京湾岸に建つコーシャタワー佃の地震時の応答をみる。コーシャタワー佃は 37 階建ての集合住宅であり、建物の 1 階、18 階、及び 37 階に加速度計が設置されている。この 1 階 (01F) と 37 階 (37F) で得られた強震記録を積分して得られた変位波形と、37 階の変位から 1 階の変位を引いた建物変位を図 4-33 に示す。加速度から変位への変換方法は、前節の速度への変換と同様である。

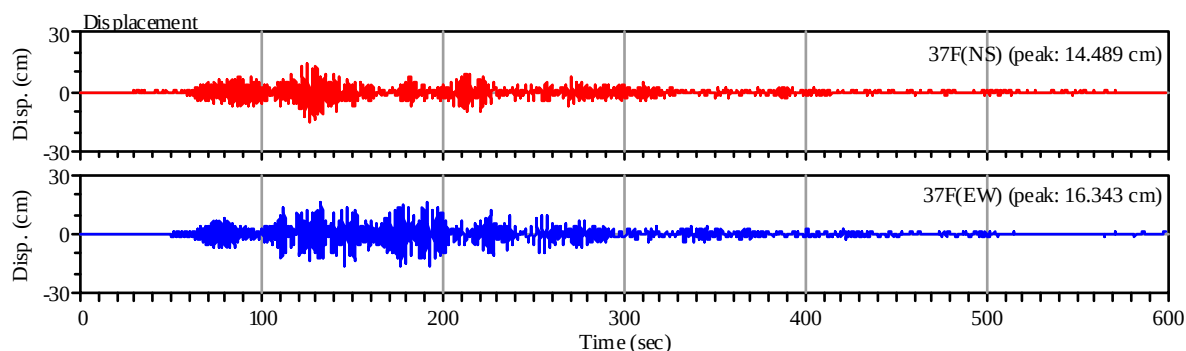
建物頂部 (37 階) の最大変位は 23 cm ほどになり、1 階の最大変位の 2 倍となっている。10 cm を超えるような大きな揺れは 100 秒以上続き、振幅は小さくなって 600 秒以上揺れ続けていることが変位波形からはよくわかる。ただし、後半の揺れは地震動自体の変位によるもので、図 4-33 (c) からわかるように、建物の応答はほぼ収まっている。建物変位の最大値は、16 cm ほどであった。



(a) 1 階 (01F) の変位



(b) 37 階 (37F) の変位



(c) 建物変位 (37F の 01F に対する相対変位)

図 4-33 コーシャタワー佃 (TKD) の変位波形

4.4.4 その他の長周期建物の強震記録

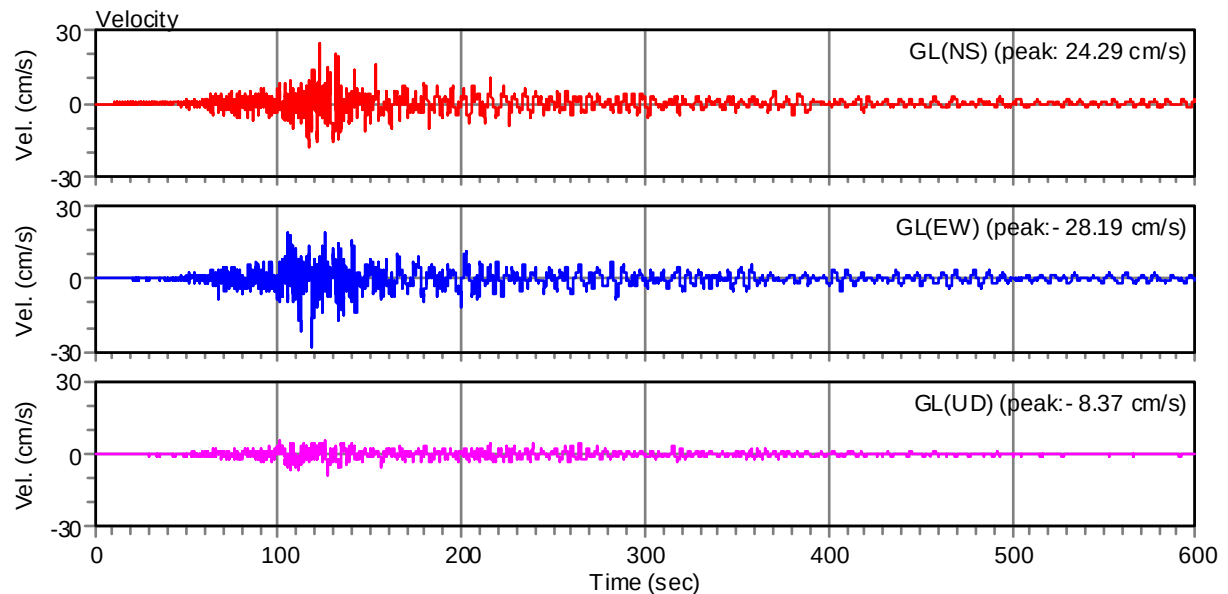
国土交通省による建築基準整備促進補助事業の一環として、平成 22 年度より超高層建物 4 棟及び免震建物 2 棟の強震観測が実施されている。ここでは建物への有効入力評価と長周期地震動入力下における長周期建物の地震応答性状の把握を主な目的としている。これら 6 棟の建物で得られた強震記録の最大加速度を表 4-3 に示す。いずれの建物においても、地盤上 GL と建物最下階での同時観測を実施している。ただし、鉄骨造の NHSK では敷地の制約から地盤上に地震計を設置することが困難であったため、超高層建物とは基礎が独立した隣接する低層建物の最下階を地盤上に代わる観測点としている。また、東京都においては、中央区及び江東区の比較的近接した範囲において、それぞれ構造の異なる建物 3 棟 (NHRS, NHST 及び NBSN) を観測建物として選定している。表に示される通り、これら 3 棟においては、最下階の位置すなわち基礎構造が異なることにも着目したい。なお、免震建物 NBSN は、4F 直下の M4F に免震材料が配置された中間階免震であり、NBOS は、B1F の柱頭に免震材料が配置されたレトロフィット免震である。

表 4-3 強震観測記録一覧(建築基準整備促進補助事業)

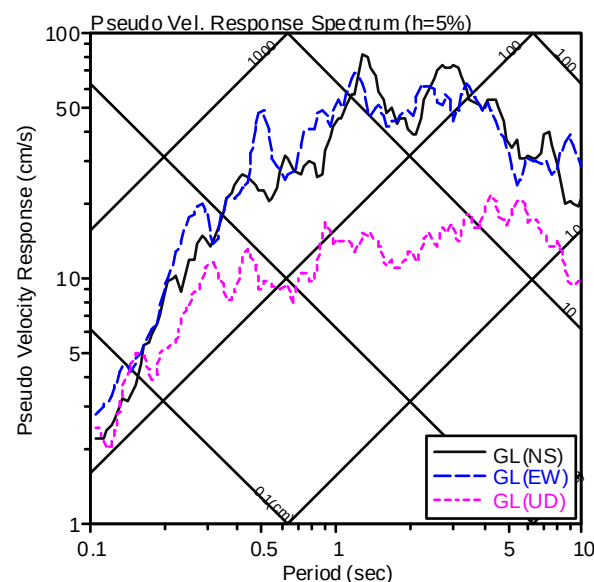
記号	観測地点	構造	設置方位	位置	最大加速度 (cm/s ²)		
					H1	H2	V
NHRS	東京都江東区	RC 造	352°	32F	249	283	193
				B1F	63	69	39
			000°	GL	113	134	85
NHRH	名古屋市千種区	RC 造	000°	25F	41	49	7
				1F	15	15	7
				GL	15	16	8
NHSK	東京都千代田区	鉄骨造	290°	32F	191	179	90
				16F	141	117	63
				B2F	67	52	58
				1F (低層棟)	76	63	80
NHST	東京都中央区	鉄骨造	050°	33F	163	146	107
				15F	130	161	80
				B4F	53	50	52
				GL	146	149	82
NBSN	東京都江東区	免震	039°	36F	92	116	95
				4F	75	100	47
				M4F	109	129	43
				1F	85	114	40
				GL	173	177	153
NBOS	大阪市中心区	免震	000°	8F	13	11	4
				1F	13	10	4
				B1F	11	9	4
				GL	11	10	5

6棟の建物のうち、最も大きな加速度が観測されたのは、NHRS(RC造)の32Fにおいてである。本建物は、表4-2中のコーシャタワー佃と同様の鉄筋コンクリート造の集合住宅であり、また建設地も近いが、図4-27との比較のため、地表面上での速度記録と応答スペクトルを図4-34に示す。

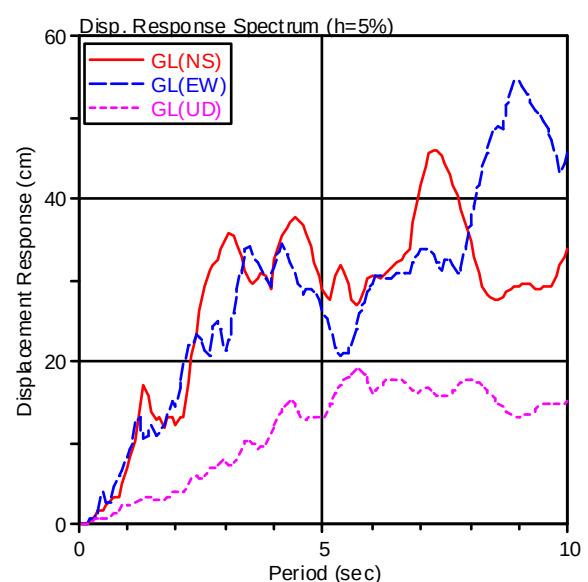
速度波形の特徴として、図4-27と同様に、長周期地震動が長く継続している様相が見て取れる。擬似速度応答スペクトルにおいては、1秒強及び3秒前後のところで、ピークがより顕著に現れているようである。変位応答スペクトルについてはNS方向において約7秒のところでピークが現れているが、EW方向では、9秒付近でピークが現れている。



(a) 速度波形



(b) 擬似速度応答スペクトル(h=5%)



(c) 変位応答スペクトル(h=5%)

図4-34 NHRS(RC造)地盤上(GL)の速度記録と応答スペクトル

図4-35は、図4-33(c)と対応させて、建物変位(32FのBIFに対する相対変位)を示している。コー

シャタワー佃と比較し、最大変位はNS方向、EW方向とも2倍以上となっている。本建物には、より大きな地震力が作用したと推定される。

東京都以外の強震観測記録として、図 4-28(c)及び図 4-29(c)と対応させて、NHRH 及び NBOS の地盤上の記録による変位応答スペクトルを、それぞれ、図 4-36 及び図 4-37 に示す。図 4-36 は名古屋市千種区の記録であるが、名古屋市中区の記録による図 4-28(c)と同様の形状となっており、周期 3 秒のところに、特徴的なピークが現れている。図 4-37 は大阪市中央区の記録であるが、大阪合同庁舎 3 号館とは同一地区であるため、図 4-29 とほとんど同じ形状となっている。すなわち、NS 方向で 2.5 秒と 3.6 秒辺りに、EW 方向で、4.5 秒から 5 秒にピークが現れている。

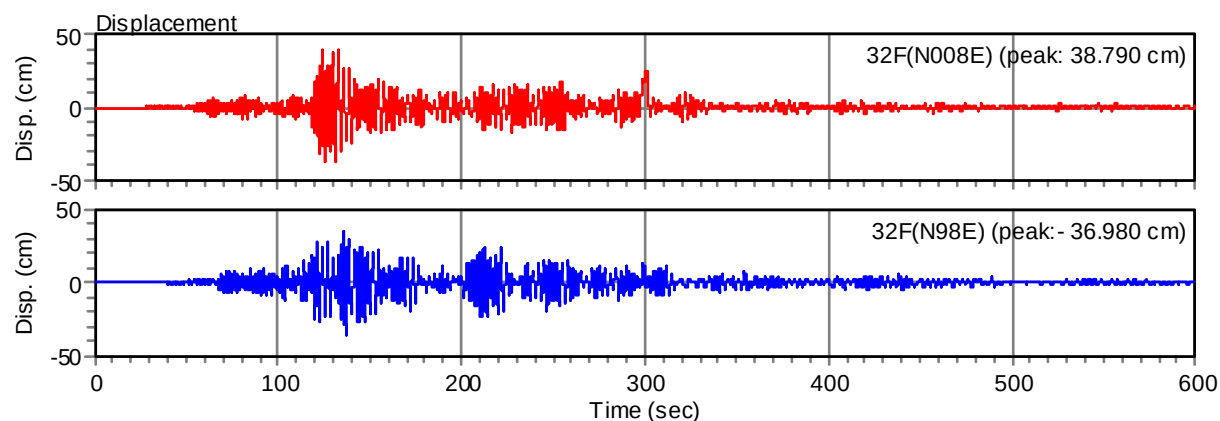


図 4-35 NHRH(RC 造)の建物変位(32F の B1F に対する相対変位)

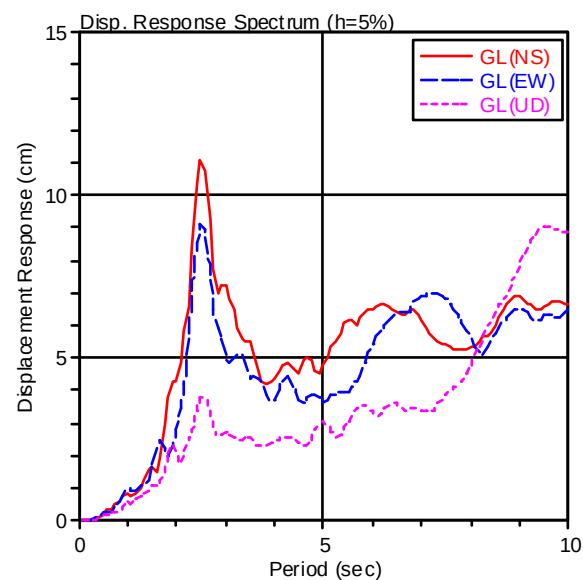


図 4-36 NHRH(名古屋)の変位応答スペクトル

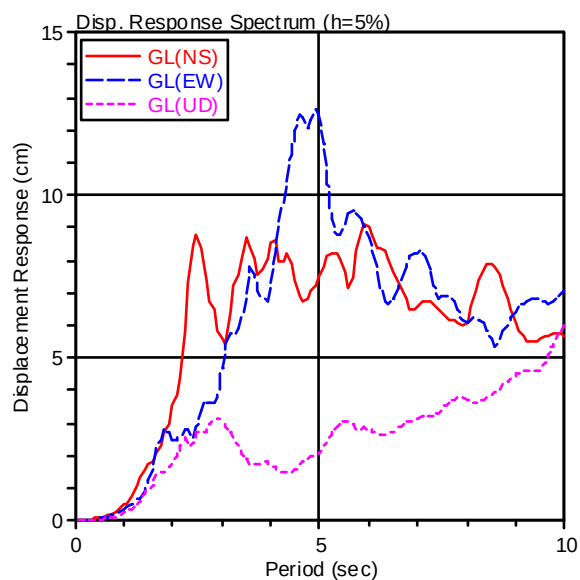


図 4-37 NBOS(大阪)の変位応答スペクトル

4.4.5 余震の強震記録

4.1.1 節で述べたように、東北地方太平洋沖地震では、大きな余震がいくつか発生している。建築研究所の強震観測ネットワークでは、それらの余震でも強震記録が得られている。ここでは余震で得られた強震記録を紹介する。取り上げる余震は表4-4に示す3つの地震である。

表 4-4 余震一覧

日時	震央	深さ	規模
2011年03月11日15時15分	茨城県沖	43 km	Mj 7.7
2011年04月07日23時32分	宮城県沖	66 km	Mj 7.1
2011年04月11日17時16分	福島県浜通り	6 km	Mj 7.0

(1) 3月11日15時15分茨城県沖の地震

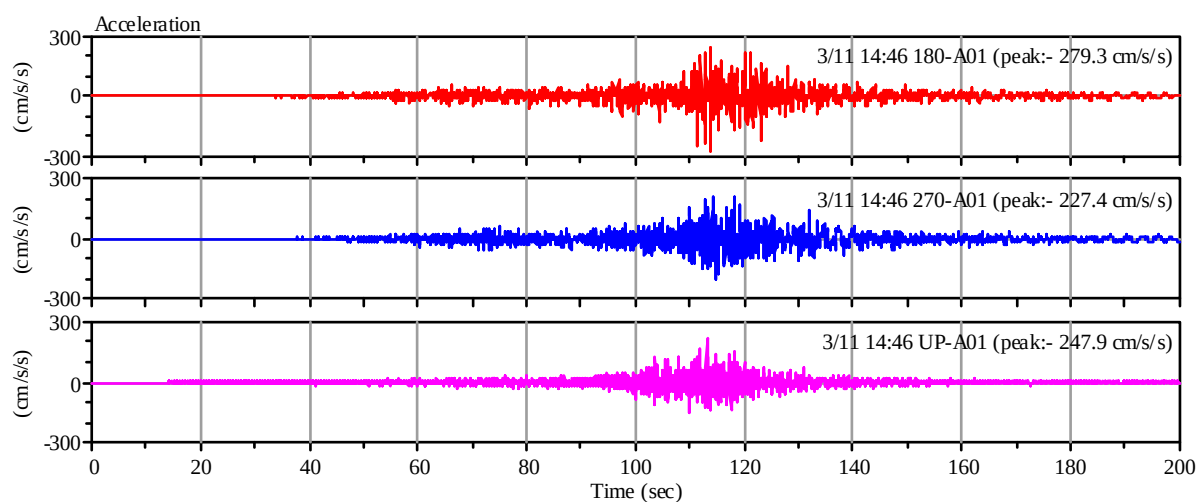
3月11日15時15分茨城県沖で発生した余震で得られた強震記録のうち、地表、あるいは建物の基礎部で震度5弱(計測震度4.5)以上のものを表4-5に示す。この余震は、本震の後30分足らずで発生し、余震発生領域の南部で発生したため、関東地方に大きな揺れをもたらした。

図4-38に建築研究所の地表(A01)で得られた加速度記録を、本震と比較して示す。(a)が本震の記録、(b)が茨城県沖の余震の記録、(c)が減衰定数5%の疑似速度応答スペクトルで、太線が本震、細線が余震を表す。余震の強震記録の最大加速度は本震の記録の1/4から2/3である。疑似速度応答スペクトルをみると、本震と余震は多峰型の似た形状を示しており、余震の応答スペクトルは本震の半分程度の値である。ただし、周期1秒辺りのN270°E方向のように、本震の応答スペクトルと同等の応答を示す周期帯域もあり、建物によっては本震と大差ない応答を示した可能性がある。

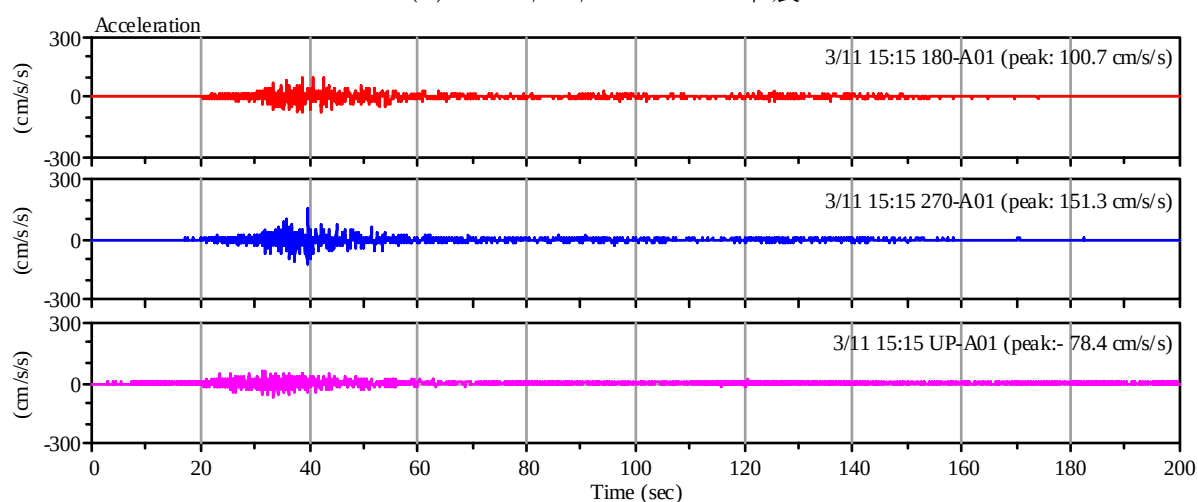
表 4-5 震度5弱以上の強震記録

記号	観測地点	Δ (km)	I_{JMA}	設置 方位	位置	最大加速度 (cm/s ²)			備考
						H1	H2	V	
BRI	建築研究所地震観測研修棟	107	4.7	180°	01F*	98	148	71	
ANX	建築研究所	107	4.7	180°	A01*	101	151	78	地表
					A89	57	70	37	地中 89 m
					BFE	75	122	53	新館
					8FE	284	570	150	新館
					MBC	82	119	69	研究本館
					M8C	447	479	106	研究本館
MST	三郷市庁舎	129	4.6	258°	01F	62	78	23	
					GL*	72	89	37	
					07F	100	104	31	
ICK	市川市行徳図書館	130	4.5	321°	01F*	82	73	28	
					02F	92	73	29	
					05F	133	127	35	

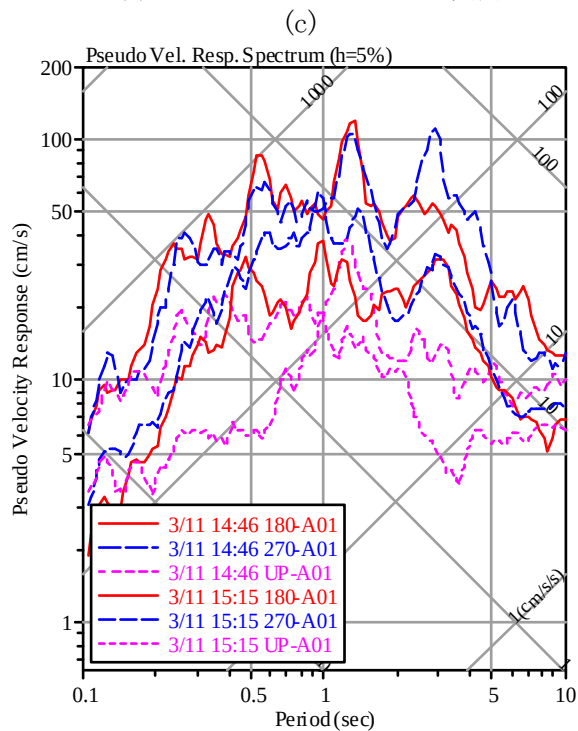
注) Δ : 震央距離, I_{JMA} : 計測震度(*印のセンサーの3成分の加速度記録から気象庁の方法で算出), 設置方位: 北から東回りに測った方位, H1, H2, V: 水平1(設置方位), 水平2(設置方位に直交)及び鉛直方向の最大加速度



(a) 2011/03/11 14:46 本震



(b) 2011/03/11 15:15 余震



(c) 疑似速度応答スペクトル (h=5%)

図 4-38 建築研究所地表 (A01) の強震記録

(2) 4月7日23時32分宮城県沖の地震

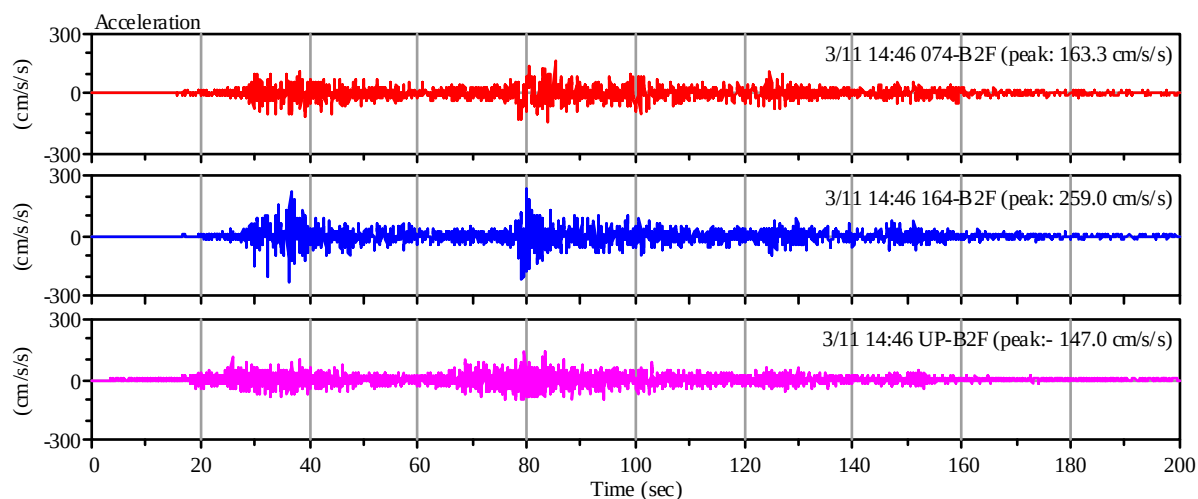
4月7日23時32分宮城県沖で発生した余震で得られた強震記録のうち、地表、あるいは建物の基礎部で震度5弱(計測震度4.5)以上のものを表4-6に示す。この余震は、宮城県を中心に大きな揺れをもたらした。

図4-39に仙台第2合同庁舎地下2階(B2F)で得られた加速度記録を、本震と比較して示す。(a)が本震の記録、(b)が宮城県沖の余震の記録、(c)が減衰定数5%の疑似速度応答スペクトルで、太線が本震、細線が余震を表す。余震の強震記録の最大加速度は、N074°E方向では本震と大差ないが、N164°E方向では3/4程度となっている。疑似速度応答スペクトルをみると、0.5秒前後の短周期領域では、余震の記録の応答が本震の記録を上回っているが、全般に本震の記録の応答が大きく、特に2秒以上の長周期成分では、大きな差が認められる。

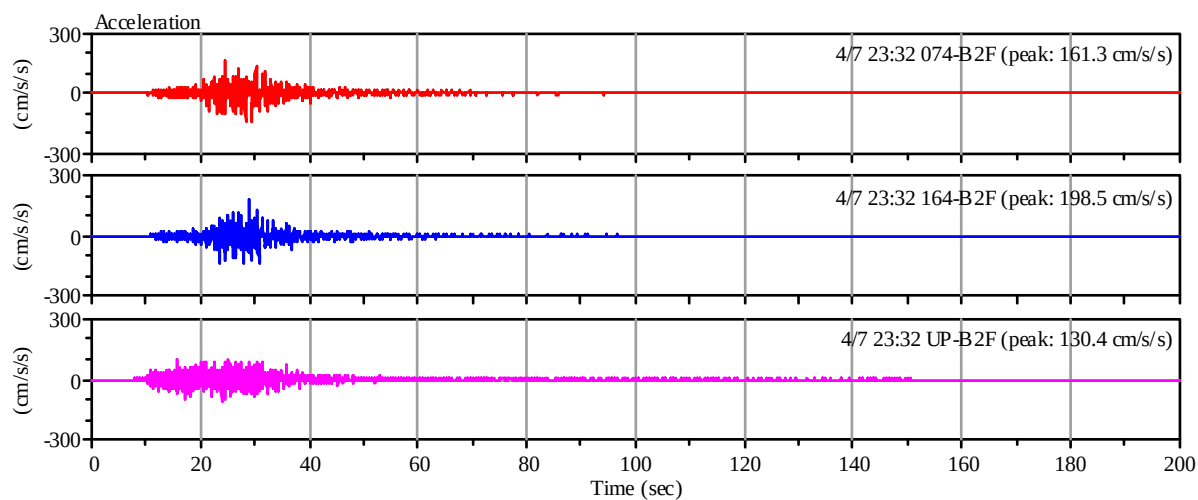
表4-6 震度5弱以上の強震記録

記号	観測地点	Δ (km)	I_{JMA}	設置 方位	位置	最大加速度 (cm/s ²)			備考
						H1	H2	V	
SND	仙台第2合同庁舎	92	4.9	074°	B2F*	161	199	130	
					15F	309	270	380	
HCN2	八戸市庁舎新館	259	4.6	164°	GL*	97	114	47	
					G30	45	48	26	
					G105	20	19	15	
					10F	77	87	109	
					01F	69	69	40	
					B1F	73	56	51	

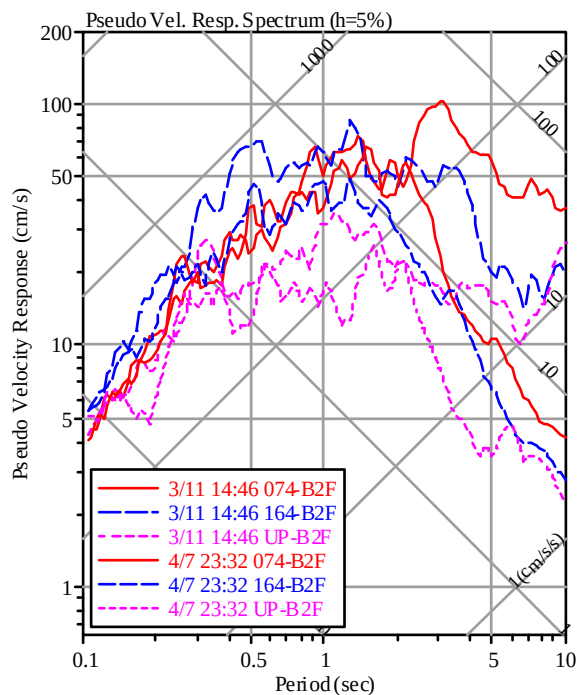
注) Δ : 震央距離, I_{JMA} : 計測震度(*印のセンサーの3成分の加速度記録から気象庁の方法で算出), 設置方位: 北から東回りに測った方位, H1, H2, V: 水平1(設置方位), 水平2(設置方位に直交)及び鉛直方向の最大加速度



(a) 2011/03/11 14:46 本震



(b) 2011/04/07 23:32 余震



(c) 疑似速度応答スペクトル (h=5%)

図 4-39 仙台第 2 合同庁舎地下 2 階 (B2F) の強震記録

(3) 4月11日17時16分福島県浜通りの地震

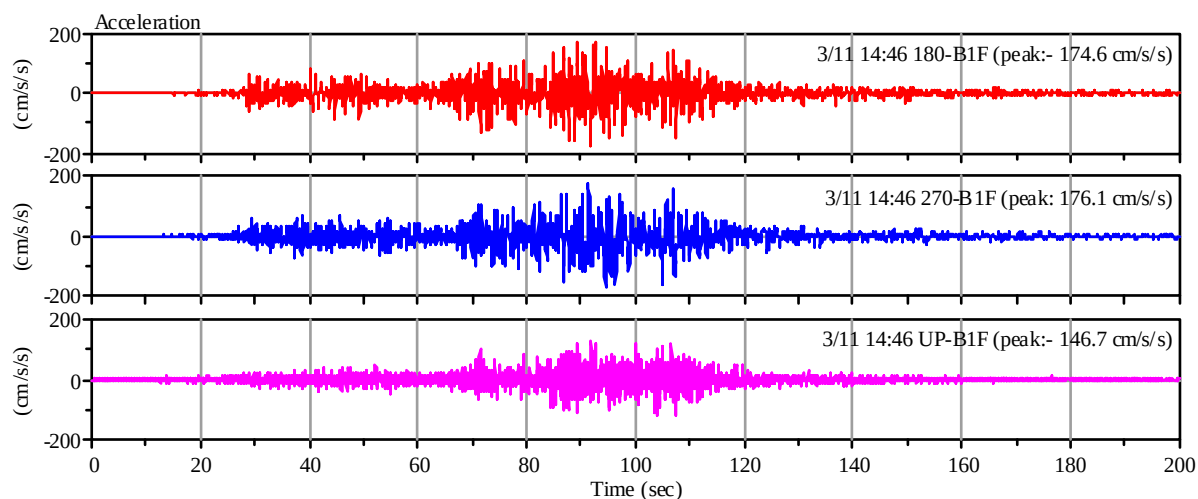
4月11日17時16分福島県浜通りで発生した余震で得られた強震記録のうち、地表、あるいは建物の基礎部で震度5弱(計測震度4.5)以上のものを表4-7に示す。この余震は、内陸部で発生したマグニチュード7.0の地震であり、周辺に大きな揺れをもたらした。

図4-40にいわき市庁舎地下1階(B1F)で得られた加速度記録を、本震と比較して示す。図4-40(a)が本震の記録、図4-40(b)が福島県浜通りの余震の記録、図4-40(c)が減衰定数5%の疑似速度応答スペクトルで、太線が本震、細線が余震を表す。余震の強震記録の最大加速度は、本震の記録と比べて1割から2割程度小さいだけである。疑似速度応答スペクトルをみると、N270°E方向の余震の記録の応答スペクトルは本震より応答は少なめではあるが、よく似た形状を示している。一方、N180°E方向では1秒から3秒の周期領域で応答スペクトルが落ち込んでおり、本震の記録との顕著な違いとなっている。

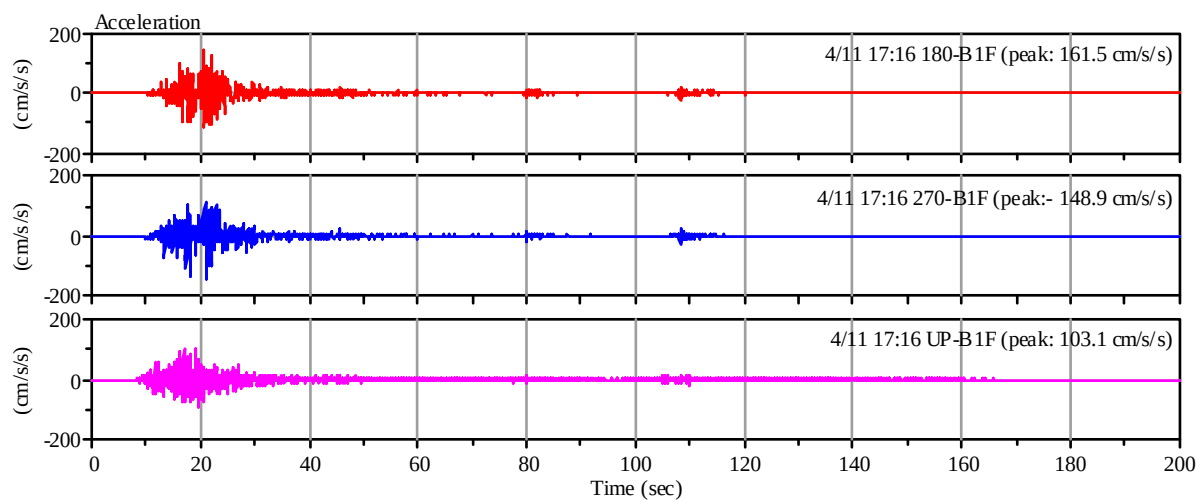
表 4-7 震度5弱以上の強震記録

記号	観測地点	Δ (km)	I_{JMA}	設置 方位	位置	最大加速度 (cm/s ²)			備考
						H1	H2	V	
IWK	いわき市庁舎	23	5.0	180°	B1F*	162	149	103	
					09F	447	395	174	
ANX	建築研究所	105	4.6	180°	A01*	118	90	59	地表
					A89	55	55	25	地中 89 m
					BFE	95	69	41	新館
					8FE	274	207	96	新館
					MBC	84	76	50	研究本館
					M8C	283	344	111	研究本館

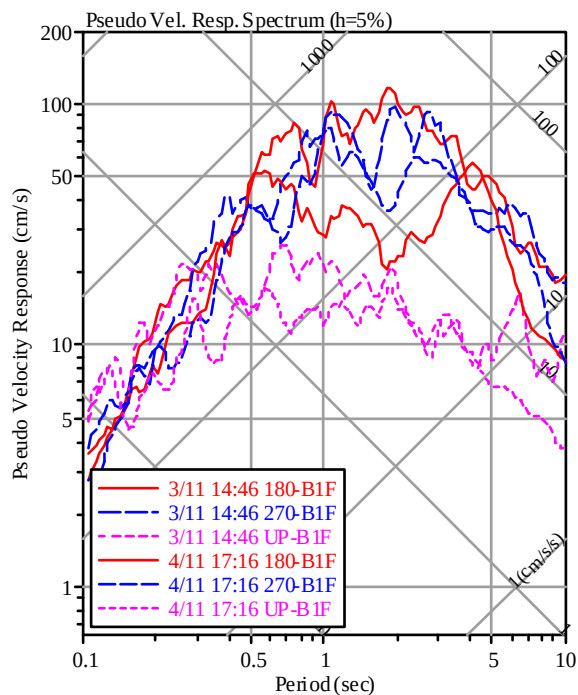
注) Δ : 震央距離, I_{JMA} : 計測震度(*印のセンサーの3成分の加速度記録から気象庁の方法で算出), 設置方位: 北から東回りに測った方位, H1, H2, V: 水平1(設置方位), 水平2(設置方位に直交)及び鉛直方向の最大加速度



(a) 2011/03/11 14:46 本震



(b) 2011/04/11 17:16 余震



(c) 疑似速度応答スペクトル (h=5%)

図 4-40 いわき市庁舎地下 1 階 (B1F) の強震記録

4.5 津波の波源モデルと最大津波波高（シミュレーション）

東北地方太平洋沖地震の津波波形インバージョンを実施し、津波波源を推定した（Fujii et al., 2011）⁴⁻²⁴⁾。使用した津波波形記録は、DART と呼ばれる米国大気海洋局（NOAA）が深海底に設置している津波計、海洋研究開発機構（JAMSTEC）と東京大学地震研究所（ERI）による日本沿岸のケーブル式海底津波計、国土交通省港湾局による GPS 波浪計と海象計（NAWPHAS）及び検潮所で観測された水位記録である（図 4-41）。

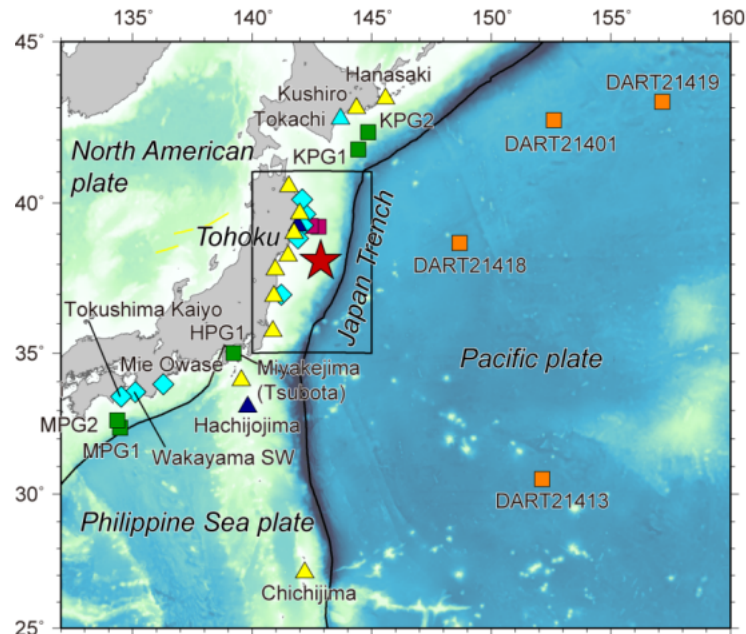


図 4-41 インバージョンに使用した観測点分布。四角は海底津波計、菱形は GPS 波浪計、三角は検潮所と海象計を示す。観測点の色は各機関に対応する（橙：米国大気海洋局、黄色：気象庁、緑：海洋研究開発機構、青：海上保安庁、水色：国交省港湾局、紫：東大地震研）。四角の領域は図 D の領域を示す。

断層モデルとして、米国地質調査所（USGS）の W phase インバージョン解析によるモーメントテンソル解（震源メカニズム：走向 193°、傾斜 14°、すべり方向 81°）を参照して 40 枚の小断層面を設定した（図 4-42 参照）。各小断層の大きさは 50 km × 50 km で、断層面上端の深さは海溝軸から陸地方向の順に 0 km、12.1 km、24.2 km、36.3 km と仮定した。断層面上において、破壊が震央から同心円状に 2.0 km/s の速度で伝播するモデルとした。

各小断層から観測点までのグリーン関数を計算する際の津波の初期条件として、設定した小断層による海底地形の静的変位を Okada (1985)⁴⁻²⁵⁾の式で計算した。津波伝播を計算するため、線形長波の式を差分法で数値的に解いた（Satake, 1995）⁴⁻²⁶⁾。海底地形データとして、外洋では GEBCO_08 を 2 分間隔で再サンプリングしたデータ、日本周辺は JTOP030 の 30 秒グリッドデータを使用した。

インバージョンの結果（図 4-42 左）、最も海溝側で 30 m 以上の大きなすべりが求まった。これにより推定される海底の隆起量は約 8 m である。震源付近の三陸沖南部海溝寄りと宮城沖では 10 m を超えるすべりが、福島沖では約 4 m、茨城沖では約 2 m のすべりが推定された。三陸沖北部については、部分的に数 m のすべりが推定されている。モーメントマグニチュードは 8.9 と推定され、地震波解析等による値と調和的である。各観測点で観測された津波波形と計算波形の比較を図 4-43 に示す。

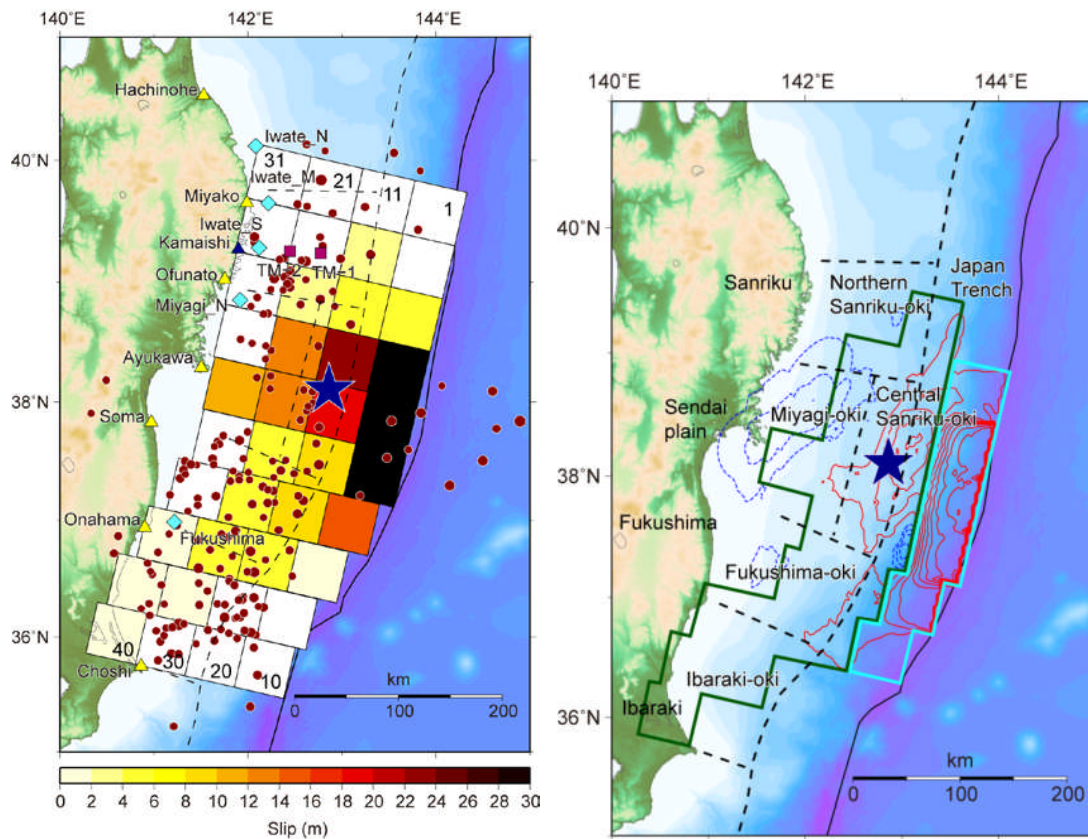


図 4-42 (左) 津波波形インバージョンで求めた断層面上のすべり分布。青星は震源、赤丸は本震後約 1 日間に発生した余震を示す (気象庁より)。(右) 計算した海底地殻変動。赤の実線は隆起 (等高線間隔 1 m)、青の破線は沈降 (0.5 m 間隔) を示す。

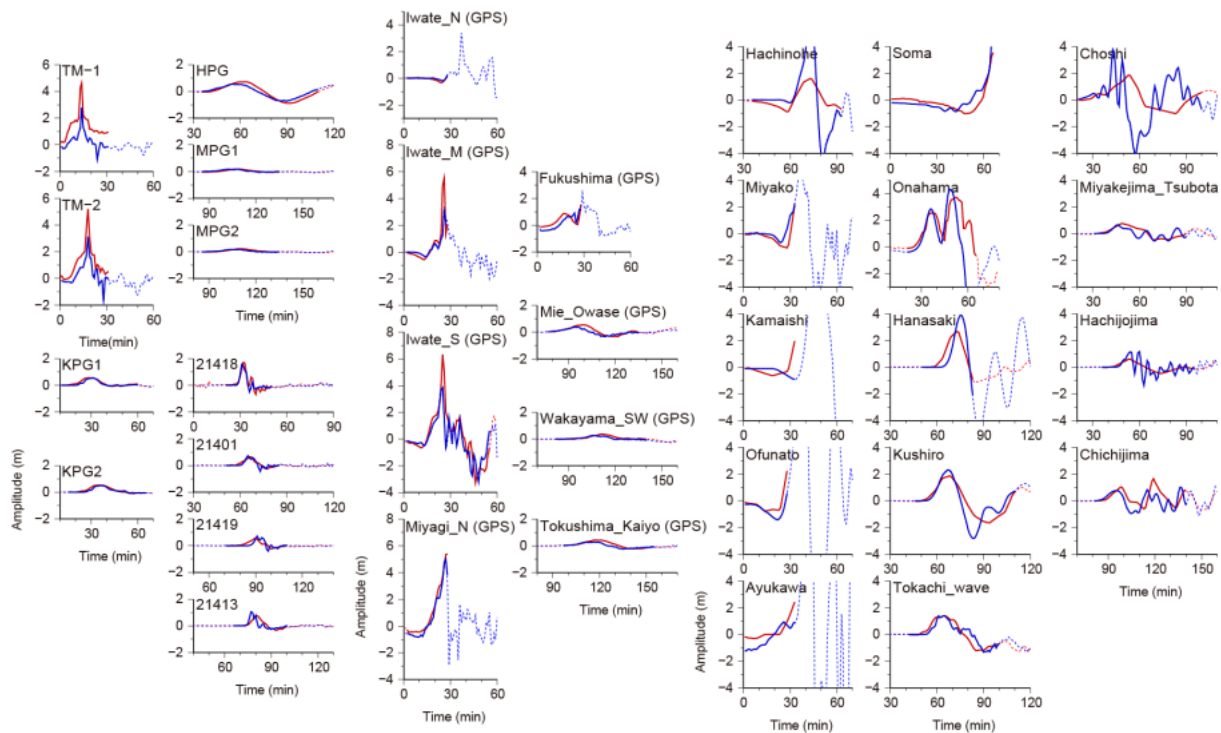


図 4-43 観測津波波形 (赤) と理論波形 (青) の比較。実線はインバージョンに使用した区間を示す。

上記の断層モデルを入力モデルとして非線形長波の式（Satake, 1995）⁴⁻²⁶⁾による津波シミュレーションを実施し、沿岸部での津波の高さを推定した（図 4-44）。岩手県南部から福島県沿岸で予測された津波の高さは概ね 5 m から 10 m で、場所によって 10 m 以上の所もある。

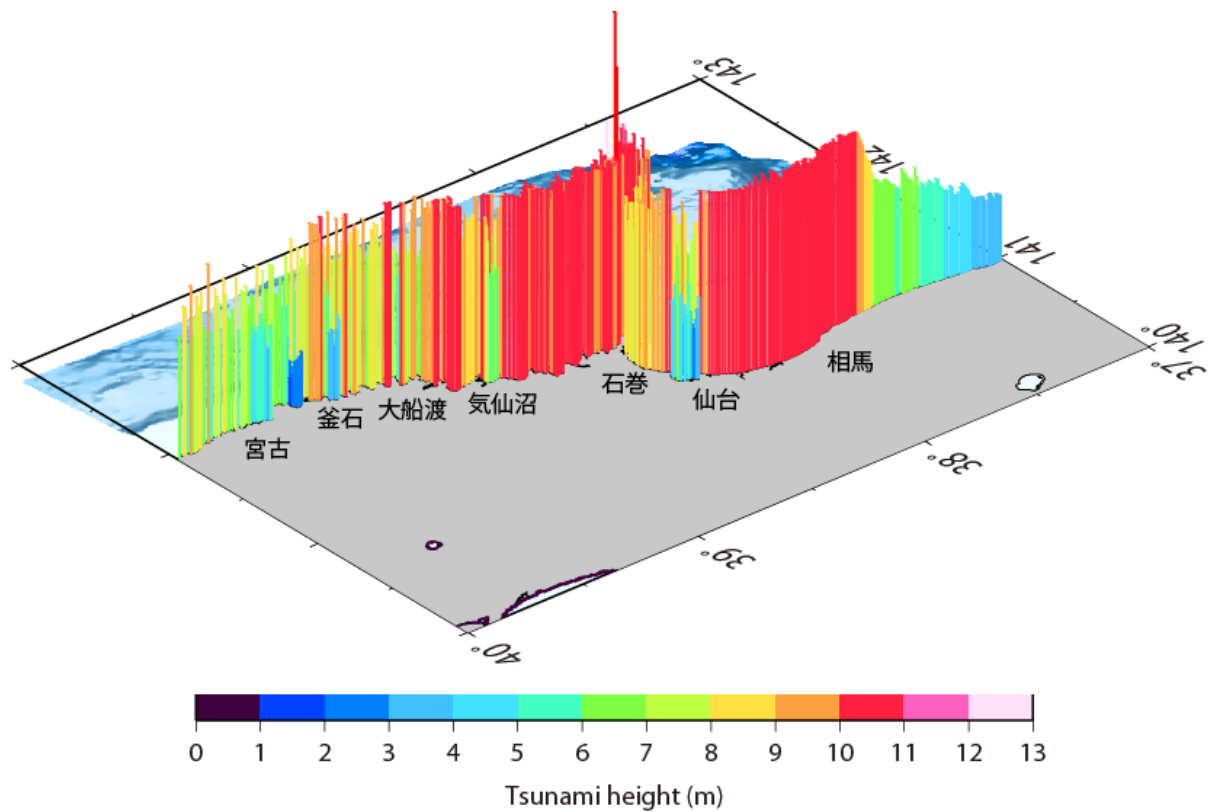


図 4-44 シミュレーションで推定された沿岸での津波の最大波高分布（岩手県南部から福島県沿岸）。

4.6 まとめ

東北地方太平洋沖地震はマグニチュード (M) 9 の巨大地震で、日本国内のみならず全世界で多くの観測データが得られており、多くの解析が行われている。それらの結果を総合すると、この地震は北米プレートと太平洋プレートの境界で発生した低角逆断層型地震である。地震断層面の大きさは 450 km x 200 km 程度であり、断層のすべり量は最大 20 m 以上である。また、どの解析からもマグニチュードは 8.9 - 9.1 がえられている。

この地震により、岩手県から千葉県にかけての広い範囲で、震度 6 弱以上の強震動が観測された。最大は宮城県栗原市の震度 7 であった。建築研究所強震観測ネットワークで観測した強震動は仙台市内の建物 1 階で最大 333 ガルで計測震度 6 弱に相当し、同一建物の 9 階では 908 ガルであった。また、この地震により大津波が生成され、東北地方から関東地方にかけて甚大な津波被害をもたらした。気象庁が観測した最大津波は三陸地方では 9 m 以上である。津波波高シミュレーションによれば、三陸地方の多くの地点で 10 m 以上の津波が押し寄せたと推定されている。この結果は、地震・津波後の現地調査による測定結果に整合的である。

参考文献/ウェブサイト

- 4-1 Historic World Earthquakes, Earthquake Hazards Program, U.S. Geological Survey (USGS), <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/historical.php>
- 4-2 気象庁: 「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」により各地で観測された震度について、<http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/30d/201103301800.html>
- 4-3 気象庁、報道発表資料「平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震」について (第 14 報)、<http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13a/kaisetsu201103130900.pdf>、2011.
- 4-4 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ、海岸工学委員会東北地方太平洋沖地震津波情報、<http://www.coastal.jp/ttjt/>、2011.
- 4-5 古川信雄、井元政二郎、関東地方におけるフィリピン海・太平洋プレートの地下境界の微細構造、地震、**43**, 413-429, 1990.
- 4-6 Dziewonski, A. M., T-A. Chou, and J. Woodhouse, Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. *J. Geophys. Res.* **86**, 2825-2852, 1981.
- 4-7 Hara, T., Measurement of duration of high-frequency energy radiation and its application to determination of magnitudes of large shallow earthquakes, *Earth Planets Space*, **59**, 227-231, 2007.
- 4-8 Fujii Y. and K. Satake, Tsunami Source of the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake Inferred from Tide Gauge and Satellite Data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **97**, S192-S207, doi:10.1785/0120050613, 2007.
- 4-9 気象庁気象研究所、「平成23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」の断層すべり分布の推定— 近地強震波形を用いた解析 —
<http://www.mri-jma.go.jp/Dep/sv/2011tohokutaiheiyu/source-process.pdf>、2011.
- 4-10 GPS (国土地理院): <http://www.gsi.go.jp/common/000060176.pdf>
- 4-11 長周期地震波形 (筑波大学) <http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~yagi-y/EQ/Tohoku/>
- 4-12 強震記録 (国立防災科学技術研究所)
http://www.bosai.go.jp/news/oshirase/20110315_01.pdf

- 4-13 短周期地震波動 (ハーバード大学) http://www.seismology.harvard.edu/research_japan.html
- 4-14 その他 : <http://supersites.earthobservations.org/sendai.php#Tue5>
- 4-15 東北地方土木地質図編纂委員会: 東北地方土木地質図解説書、1988.
- 4-16 日本の地質「東北地方」編集委員会編、日本の地質 2 東北地方、共立出版、1991.
- 4-17 小池一之、田村俊和、鎮西清高、宮城豊彦、日本の地形 3 東北、東京大学出版会、2005.
- 4-18 日本の地質「関東地方」編集委員会編、日本の地質 3 関東地方、共立出版、1986.
- 4-19 貝塚爽平、小池一之、遠藤邦彦、山崎晴雄、鈴木毅彦、日本の地形 4 関東。伊豆小笠原、東京大学出版会、2000.
- 4-20 例えば、A. K. Chopra 著、渡部丹、石山祐二 監訳 : チョプラ 構造物の動的解析 ~その基礎から応用まで~、改訂 2 版、pp. 270-275、科学技術出版、2002.
- 4-21 気象庁 : 震度観測点の地震情報への活用停止等について、2011 年 4 月 21 日
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1104/21a/201104211500.html>.
- 4-22 建築研究所の強震観測、<http://smo.kenken.go.jp/ja>
- 4-23 鹿嶋俊英, 他 : 強震観測記録から推定した建物の振動特性の特徴, 日本建築学会技術報告集, No. 22, pp. 163-166, 2005.
- 4-24 Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara and T. Kanazawa, Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan earthquake, EPS special issue, 投稿中, 2011.
- 4-25 Okada, Y., Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135-1154, 1985.
- 4-26 Satake, K., Linear and Nonlinear Computations of the 1992 Nicaragua Earthquake Tsunami, *Pure and Appl. Geophys.*, 144, 455-470, 1995.

