土木学会東日本大震災被害調査団
緊急地震被害調査報告書

第 4 章
地震及び地震動の特性

執筆担当

後藤　浩之（京都大学防災研究所）

４．地震及び地震動の特性

４．１　地震の概要

４．１．１　本震（3/11）の概要

東日本大震災を引き起こした本地震は 3 月 11 日 14 時 46 分に三陸沖を震源として発生し，気象庁により「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake)」と命名されている [1]．この地震のマグニチュードは気象庁により Mw9.0 と発表された [2]が，これは 1900 年以降に我が国で発生した地震では最大の，世界でみても 1960 年チリ地震，1964 年アラスカ地震，2004 年スマトラ島沖地震に次ぐ４番目の大きさの地震である [3]．図 4.1.1-1 は本震後 1 日間で発生した地震の震源分布 [4]である．一般に，本震後 1 日間で発生した地震の震源分布は本震で破壊した震源断層を概ね包括するとされる [5]ため，本地震の震源断層が岩手県沖から茨城県沖までのおよそ 500km の長さに及ぶこと，断層が東から西に向かって深くなる傾斜であることが示唆される．また，併せて気象庁と防災科学技術研究所で求められた地震のメカニズム解（CMT 解）[6][7]を示しているが，両メカニズム解ともに西北西−東南東方向に圧縮軸を持つ低角の逆断層型地震であったことを表している．このため，本地震は北米プレートと太平洋プレートとのプレート境界で発生した地震であると考えられる（図 4.1.1-2）．なお，本地震に伴って東日本の広い範囲で地殻変動が観測され，国土地理院の電子基準点牡鹿では東南東方向へ 540cm，沈下 107cm 移動したことが報告されている [9]（図 4.1.1-3）．

地震調査研究推進本部によると，宮城県の沖合が震源域となる宮城県沖地震は 2011 年 1 月時点で 30 年以内に発生する確率が 99%と予測されていた [10]．今回の地震では，宮城県沖地震の想定震源域だけではなく，三陸沖南部海溝寄り，福島県沖，茨城県沖の領域にまでも震源の破壊が進展したと考えられている [11]．このため，1978 年の宮城沖地震よりもマグニチュードの大きな地震となり，広い範囲で強い地震動を観測した．

本地震では宮城県栗原市築館で震度 7 を観測し，また宮城県，福島県，茨城県，栃木県の広い範囲で震度 6 強を観測している（図 4.1.1-4，表 4.1.1-1）．1995 年兵庫県南部地震で震度 7 が適用されて以降，1996 年 10 月から利用されている計測震度で震度 7 が実際に発表されたのは 2004 年新潟県中越地震の川口町に続いて２例目である．ただし，前回川口町の震度は通信の問題により気象庁から当初配信された震度情報で伝えられなかったことから，地震後の震度情報で震度 7 が伝えられたのは今回が始めてである．震度分布を見ると，震源断層からの距離に従って一様に震度が小さくなるのではなく，宮城県に震度の大きな地域と福島県から茨城県にかけて震度の大きな地域とが見られる．これは，震源断層が一様に破壊したのではなく複数のアスペリティを持つように破壊したために，地震動の大きいところや小さいところがあったのではないかと予想される．

気象庁の遠地波形の分析によると，本地震は３つの破壊が連続して発生したと考えられるよう

である[2]．また，報告されている震源過程によると，概ね震源付近に大きな滑りの領域が推定されていることは共通しており[12)13)14)15)16)]，さらに南側に大きな滑りの領域が推定されているものもある[14]．防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET，KiK-net）で公開されている本震の波形には複数のフェーズが見られること[15]や２つの波群が見えることが報告されており[19]，このことからも複数の破壊が生じていたことが示唆される．図 4.1.1-5 は，気象庁の CMT 解の断層走向方向におよそ平行に並ぶ防災科学技術研究所 KiK-net 観測点を選択し，その地中記録（EW 成分）の Envelope 波形を並べたものである．まず，IWTH05 で最も早い時刻に観測されるようなフェーズが，およそ 50 秒の間をおいて２つ認められる．この２つのフェーズは 北方向，南方向へ伝播するにつれて減衰し，福島県以南では顕著でなくなる．一方，その２つのフェーズとは独立に TCGH13 あたりで最も早い時刻に観測され，北へと伝播する別のフェーズも確認できる．つまり，断層の破壊に伴って少なくとも顕著な破壊が３つ発生し，そのうち始めの２つは岩手県から宮城県にかけて寄与し，３つ目の破壊が栃木県，茨城県から関東地方にかけて寄与したと考えられる．

以上の特徴を反映した震源モデルは複数報告されている[17)18)]．鈴木他によって報告されている震源モデル[17]（図 4.1.1-6）は破壊開始から 20 秒間のすべりは小さく，20-50 秒で破壊開始点の東の浅部の領域から北東に向かって大きなすべりの断層破壊が進展し，破壊開始から 60-80 秒には 20-50 秒の破壊が開始した領域付近で再び大きなすべりが見られる．これはそれぞれ先に述べた１つ目と２つ目の破壊に対応する．その後，主要な破壊が南西に向かって伝播し，100-110 秒には福島沖から茨城沖にかけての領域でやや大きなすべりが見られる．これが３つ目の破壊に対応すると考えられる．また，最終すべり量分布を見ると震源より東側，すなわち浅い領域で大きなすべりが認められる．一方，Asano and Iwata は強震動生成領域の位置[18]（図 4.1.1-7）として，震源より陸域に近い領域に２つ（S1，S2），福島県から茨城県にかけての地下に１つ（S3）を推定している．これらは，先に述べたような波形に見られる３つのフェーズの特徴と調和的である．なお，S1 および S2 の応力降下量は 30MPa 程度であるが，S3 は 5MPa 程度と相対的に低いことが特徴である．

以上の２モデルは，震源より東側の浅い領域ですべり量が大きいとするモデルと震源より西側の深い領域で強震動が生成されたとするモデルであり，一見矛盾しているようである．しかし，震源モデルを構築する上で利用した手法が異なるということに加え，対応する地震波形の周期帯域が前者は 8-50 秒，後者は 0.2-20 秒である．すなわち，図 4.1.1-6 は長周期成分の生成に関与し，図 4.1.1-7 は短周期成分の生成に関与した領域を示していると解釈することができる．これは，震源より深い領域で短周期成分を含む地震動が生成されたこと，また海溝に近い震源より浅い領域で時間をかけてすべりが成長したことを示唆している．

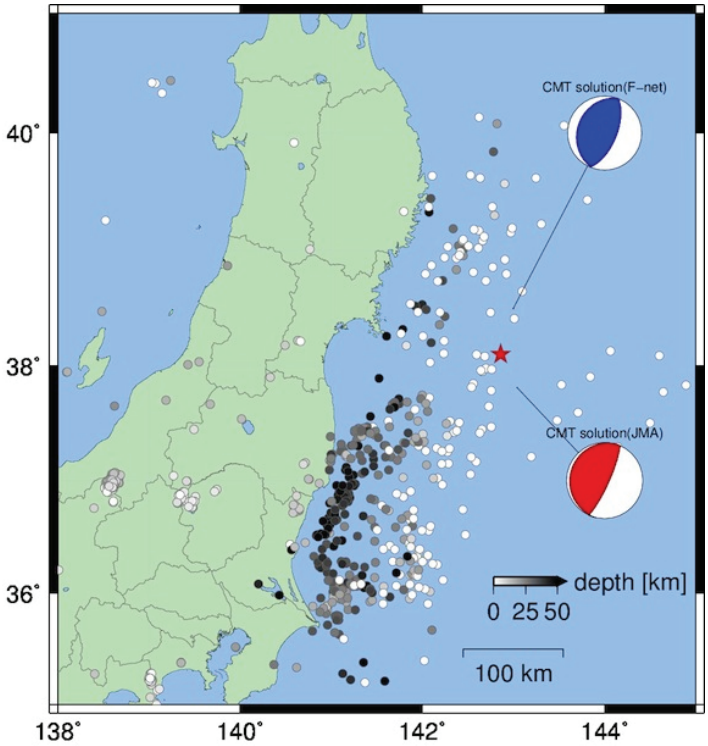


図 4.1.1-1　本震後１日間に発生した地震の震源分布（気象庁一元化検証値データ [4]），およびメカニズム解 [6)7)]

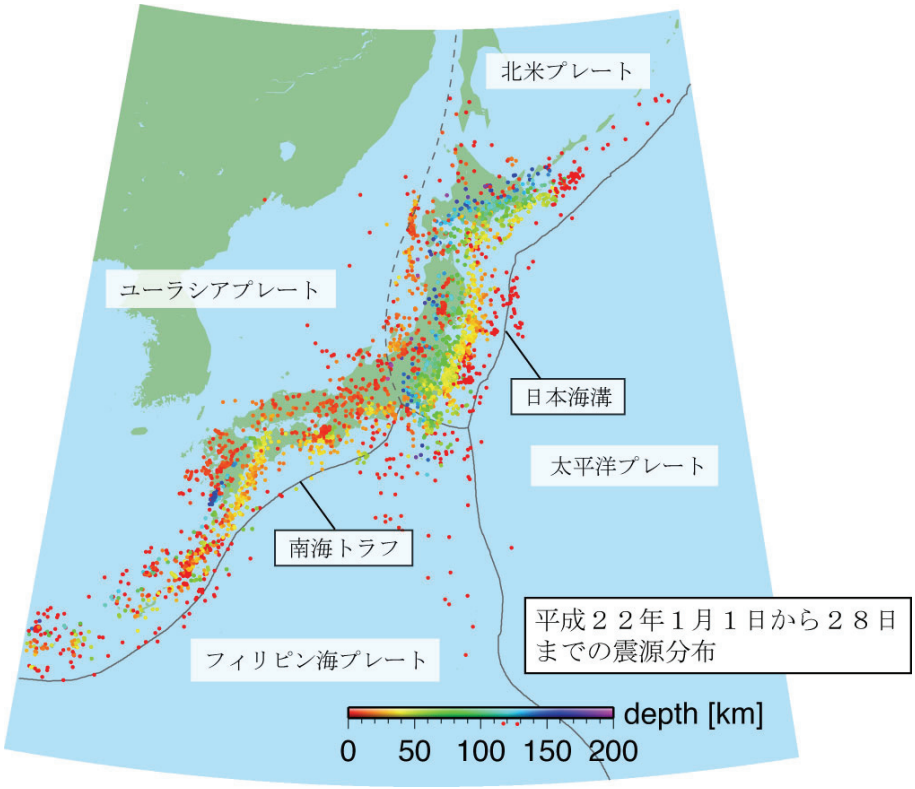


図 4.1.1-2　日本周辺のプレートと地震活動 [8)]

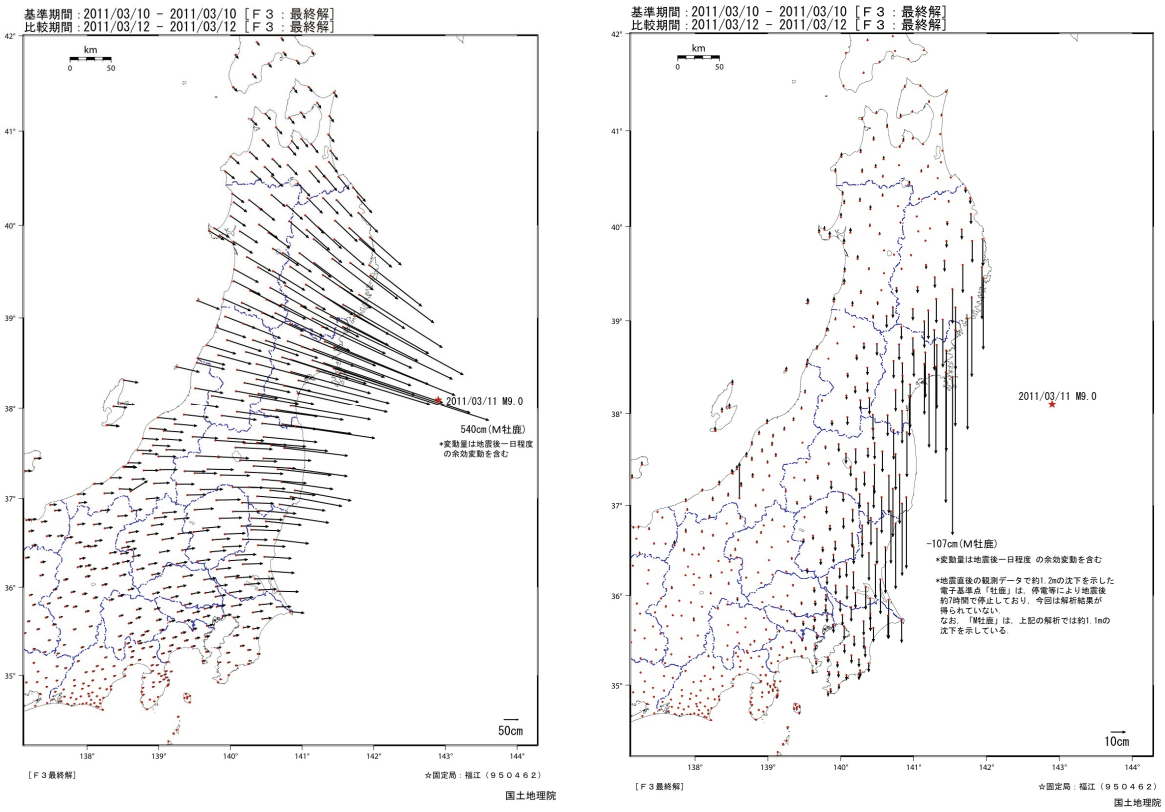


図 4.1.1-3　電子基準点で観測された本震に伴う地殻変動[9]（左　水平方向，右　上下方向）

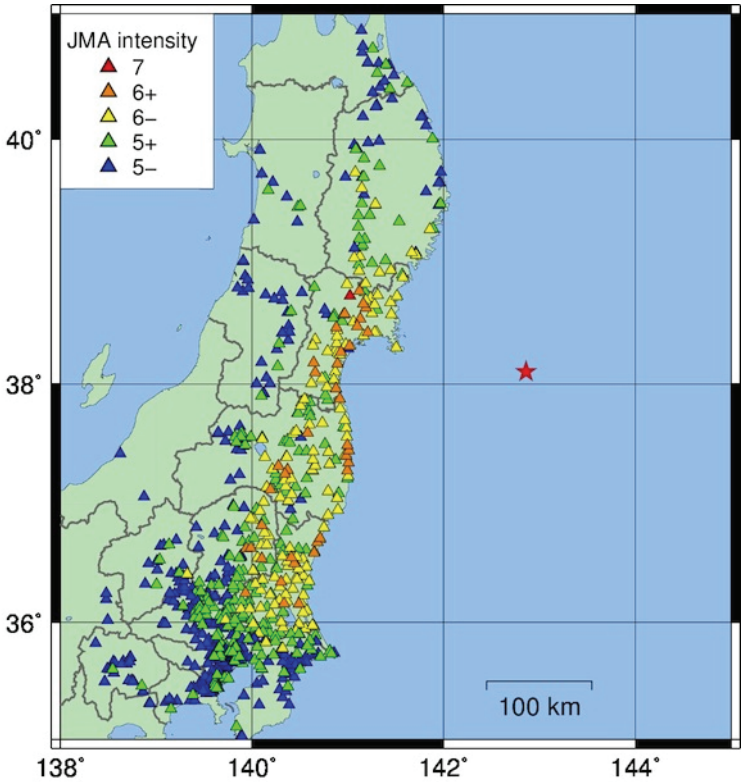


図 4.1.1-4　震度分布（震度５弱以上）

表 4.1.1-1　震度７および震度６強を観測した震度観測点

震度７	宮城県　栗原市築館
震度６強	宮城県　涌谷町新町，登米市米山町，登米市南方町，大崎市古川三日町，大崎市古川北町，大崎市鹿島台，名取市増田，蔵王町円田，山元町浅生原，仙台宮城野区苦竹，塩竈市旭町，東松島市矢本，大衡村大衡，栗原市若柳，宮城川崎町前川 福島県　白河市新白河，須賀川市岩瀬支所，須賀川市八幡町，二本松市針道，鏡石町不時沼，楢葉町北田，富岡町本岡，大熊町下野上，双葉町新山，浪江町幾世橋，新地町谷地小屋 茨城県　日立市助川小学校，笠間市中央，筑西市舟生，鉾田市当間，日立市十王町友部，高萩市本町，常陸大宮市北町，那珂市瓜連，小美玉市上玉里 栃木県　大田原市湯津上，宇都宮市白沢町，真岡市石島，高根沢町石末，市貝町市塙

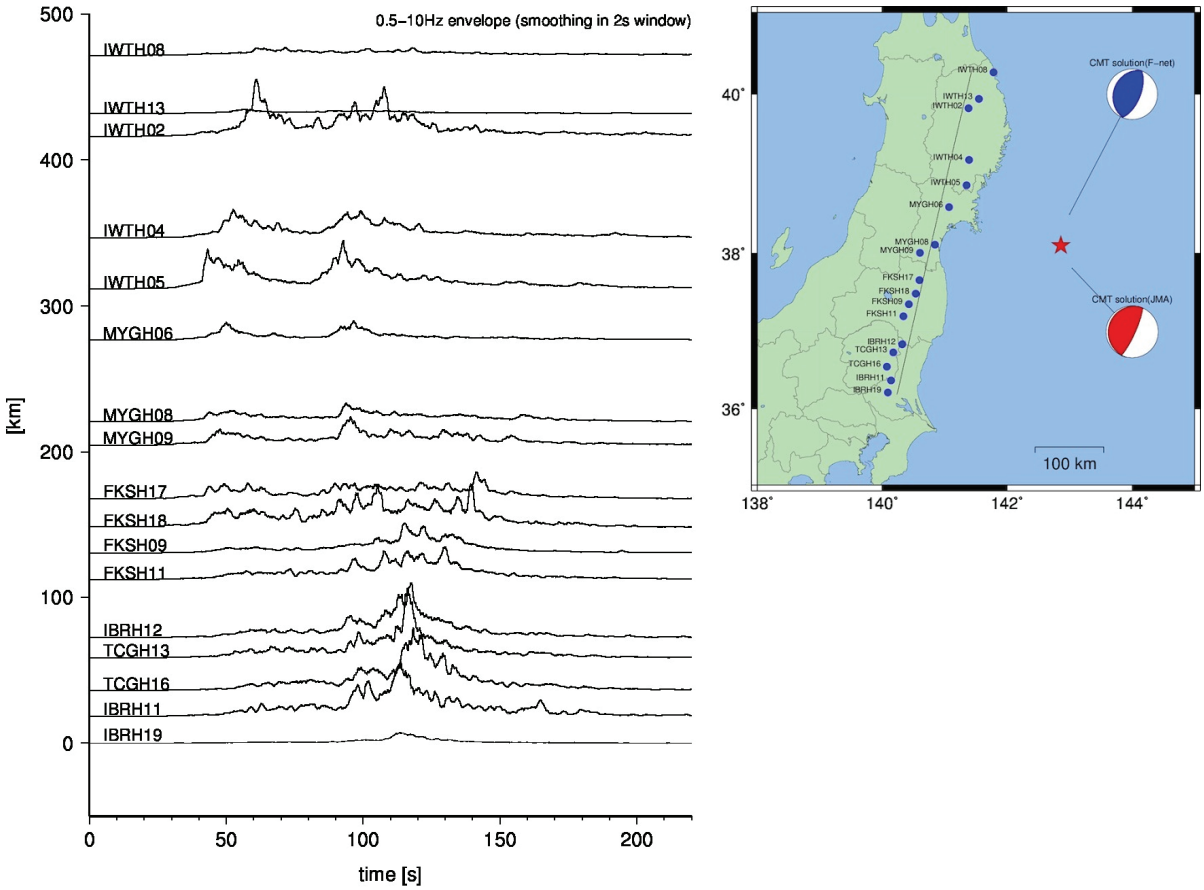


図 4.1.1-5　KiK-net 地中記録 EW 成分の Envelope 波形

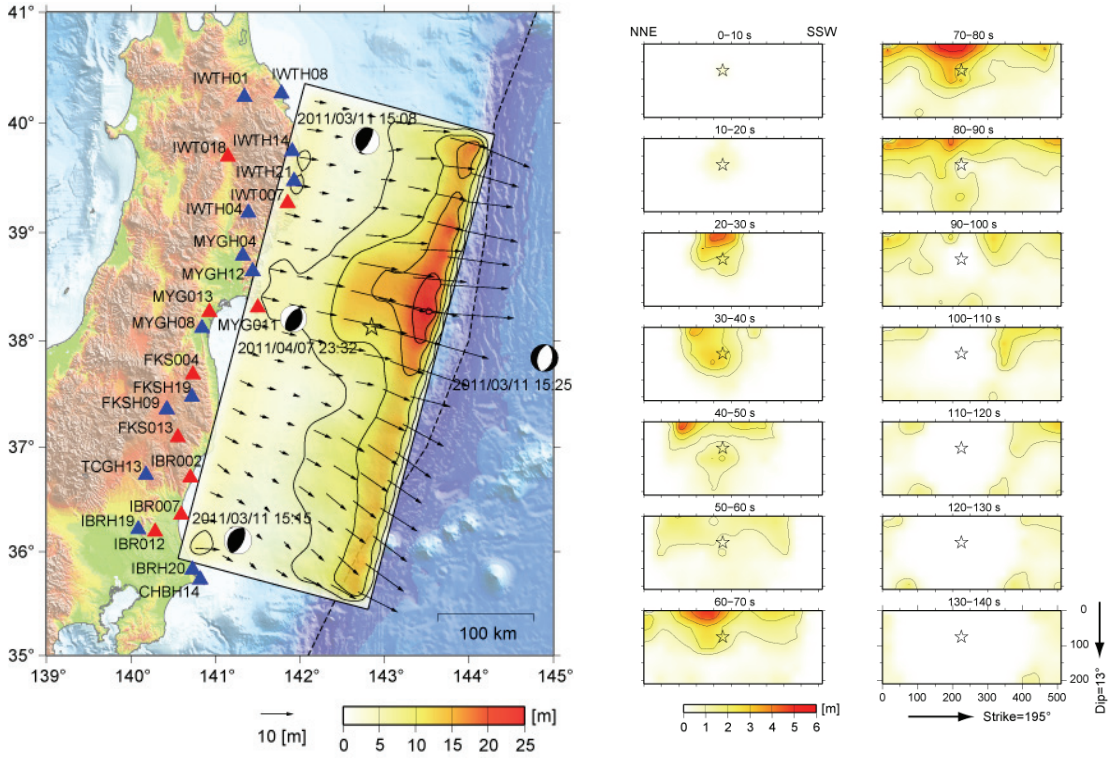


図 4.1.1-6　鈴木他による震源過程 [17)]

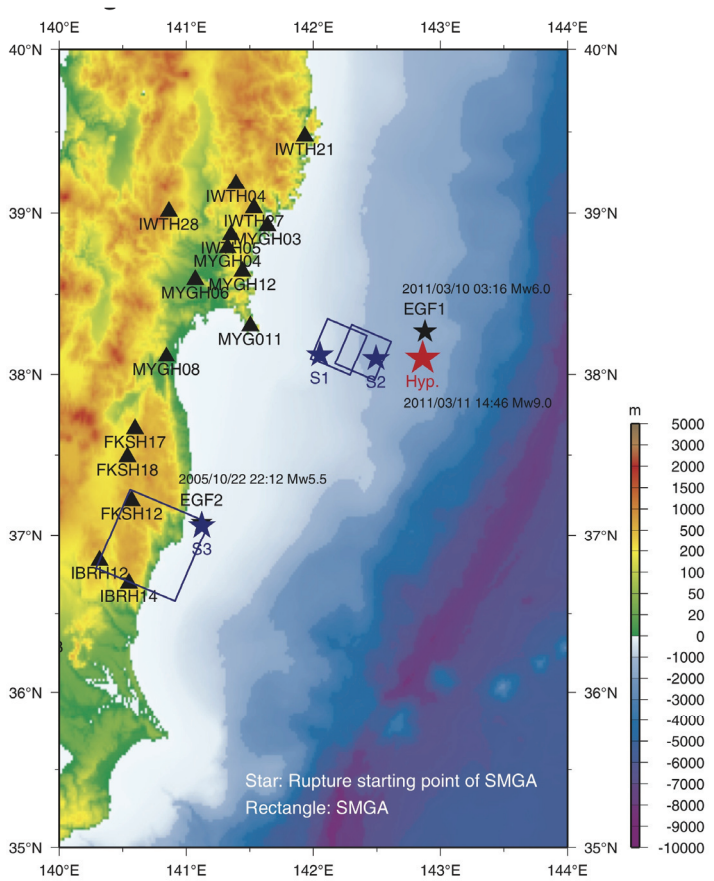


図 4.1.1-7　Asano and Iwata よる強震動生成領域の推定位置 [18)]

４．１．２　余震および関連する地震活動

３月１１日の本震以降，本震の震源域と考えられる太平洋側の領域で余震が発生しているのみならず，東日本から中日本にかけての広い範囲で地震活動が活発化している．この一連の地震活動について，気象庁は本震の余震活動と定義している [20]．一方，防災科学技術研究所では地震活動の活発化という表現を使用している [21]．図 4.1.2-1 は 3/9 に発生した三陸沖の地震より前２週間の地震の震源分布，図 4.1.2-2 は地震本震以降２週間以内に発生した地震の震源分布を示している．両図の比較のみから正確な議論をすることはできないが，本震の震源域以外の例えば内陸部で本震以降に新たに震源がクラスター状に分布する箇所が幾つか認められる．このように規模の大きな地震が発生した場合の過去の事例を整理すると本震の震源域以外での地震活動が活発になることもあるようである [23]．

図 4.1.2-3 に示すのは，気象庁から発表された４月１１日までのマグニチュード７以上の余震，また図 4.1.2-4 に示すのは，本震以降に４月１１日までに震度６強以上の震度が観測された地震である．本震が発生した３月１１日には，岩手県沖，茨城県沖，三陸沖でそれぞれ Mw7.4，Mw7.7，Mw7.5 の地震が発生し，概ね先の２つの地震は本震の震源域で発生した余震であると考えられるが，三陸沖の地震は正断層型のメカニズムであり，太平洋プレート内で発生したと考えられる．その後，３月１２日未明には長野県北部を震源とする Mw6.3 の地震が発生し，長野県栄村北信で震度６強が観測された．４日後の３月１５日には静岡県東部を震源とする地震が発生し，富士宮市野中と富士宮市弓沢町で震度６強が観測された．また，およそ１ヶ月が経過した４月７日には宮城県沖を震源とする地震が発生し，仙台宮城野区苦竹，栗原市若柳，栗原市築館で震度６強が観測された．４月１１日には福島県浜通りを震源とする地震が発生し，鉾田市当間，いわき市錦町，古殿町松川，中島村滑津で震度６弱が観測された．なお，この福島県の地震は内陸で発生した正断層型の地震で，井戸沢断層として知られていた断層の最も西側のトレースに沿って地表断層が表れたことが報告されている [22]．

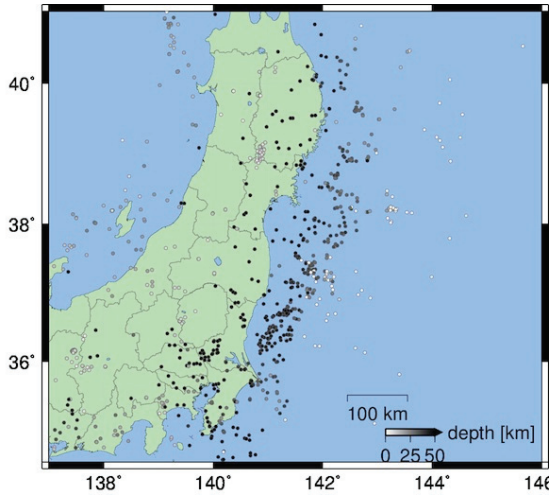


図 4.1.2-1　2/23-3/8 に発生した地震の

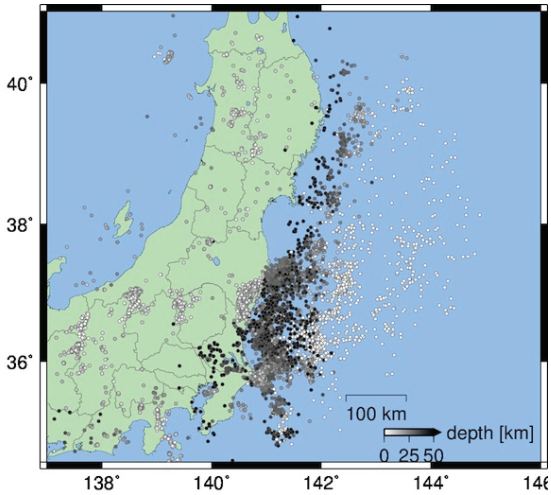


図 4.1.2-2　3/11-3/24 に発生した地震の

震源分布（気象庁一元化検証値データ [4]）

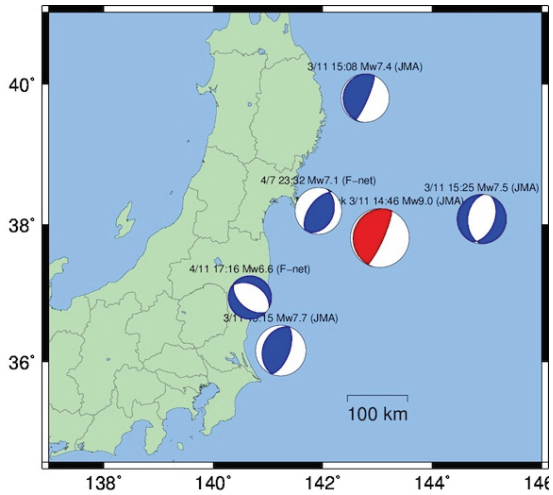


図 4.1.2-3　3/11-4/11 に発生した
マグニチュード 7 以上の地震の
メカニズム解 [6)7)]

震源分布（気象庁一元化検証値データ [4]）

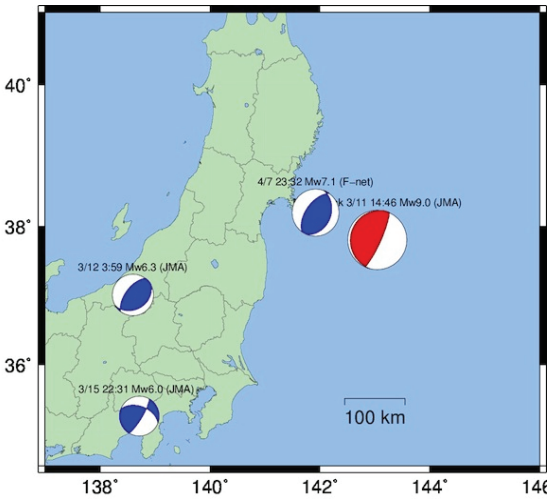


図 4.1.2-4　3/11-4/11 に発生し，
震度 6 強以上を観測した地震の
メカニズム解 [6)7)]

４．２　地震動の特徴

４．２．１　本震の地震動の概要

本地震では，防災科学技術研究所の K-NET，KiK-net，東京大学地震研究所，産業総合技術研究所，港湾空港技術研究所などによって東日本で観測された地震動が公開されている．図 4.2.1-1，4.2.1-2 は本地震で観測された各地の最大水平加速度，および最大水平速度を表している．先述した震度分布と同様に，震源断層があると考えられる太平洋側から一様に値が小さくなるのではなく，宮城県，および栃木県から茨城県にかけての 2 地域で大きな最大加速度値が観測されている．これは先述したように破壊過程が一様でないことも影響していると考えられる．また，宮城県北部で大きな最大速度が観測されていることが認められる．

図 4.2.1-3 に観測された地震動から計算した計測震度分布（震度 5 弱以上）を示し，その上位 8 記録を表 4.2.1-1 に示す．K-NET 築館および KiK-net 芳賀で震度 7 に相当する計測震度 6.5 以上が観測されている．なお，気象庁により発表される震度情報は気象庁直轄の観測点，自治体震度計，防災科学技術研究所 K-NET 観測点で記録された計測震度のみを対象とするため，KiK-net 芳賀の記録は震度 7 相当と表現される．この計測震度分布においても，最大水平加速度分布に見られたように，宮城県，および栃木県から茨城県にかけての 2 地域で大きな値を示す領域が認められる．

また気象庁の発表によると，いわき市小名浜では震度 4 以上を観測した時間が約 190 秒に達するなど東北から関東地方にかけて複数の地点で震度 4 以上が長い時間観測されたことが報告されている [27)]（表 4.2.1-2）．ただし，この震度値は 10 秒間の記録に対して計測震度を算出したものであり，実際の計測震度とは一致しない．一例として，K-NET 仙台（MYG013）で観測された地震

動の速度波形（EW 成分）を，2005 年宮城沖地震，および 2008 年岩手・宮城内陸地震と比較して図 4.2.1-4 に示す．内陸型の地震であった 2008 年の地震や，同じプレート境界で発生した 2005 年の地震と比較しても，本地震で観測された地震動の継続時間が非常に長いことがわかる．このように振幅の大きな揺れが長い時間継続したことは本地震動の重要な特徴のひとつである．

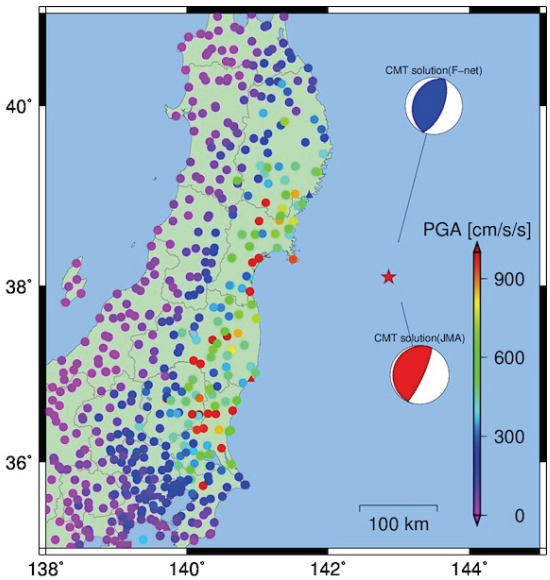


図 4.2.1-1　最大水平加速度分布 [24)25)26)]

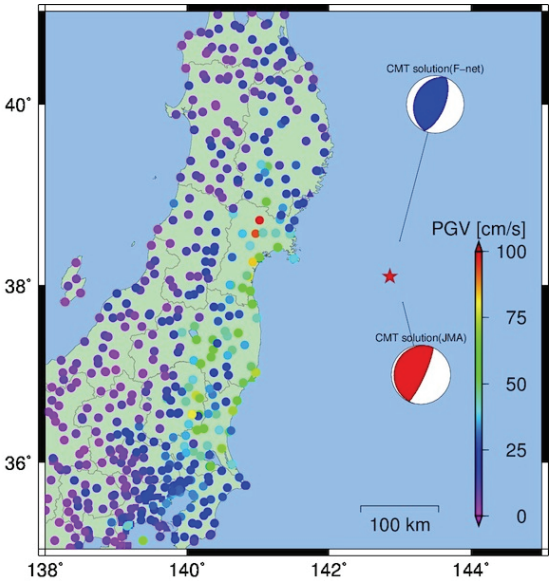


図 4.2.1-2　最大水平速度分布 [24)25)26)]

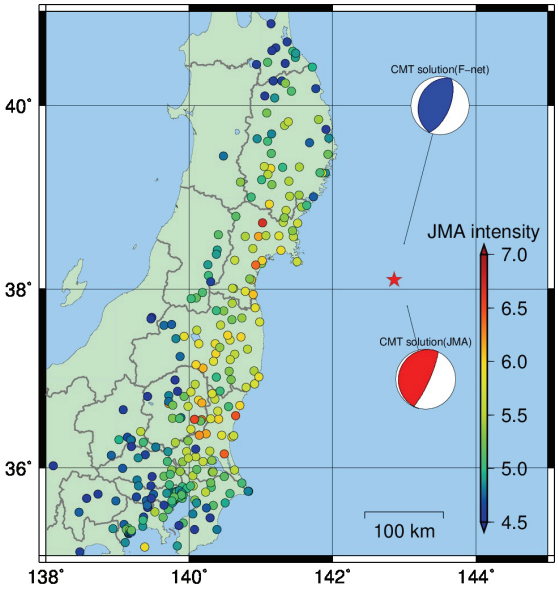


図 4.2.1-3　計測震度分布（計測震度 4.5 以上）[24)25)26)]

表 4.2.1-1　計測震度上位８記録

計測震度	観測点
6.67	K-NET 築館（MYG004）
6.51	KiK-net 芳賀（TCGH16）
6.46	K-NET 日立（IBR003）
6.41	K-NET 鉾田（IBR013）
6.38	K-NET 仙台（MYG013）
6.34	K-NET 茂木（TCG014）
6.24	KiK-net 岩瀬（IBRH11）
6.20	K-NET 今市（TCG009）

表 4.2.1-2　震度４以上継続時間の長い記録 [27)]

震度４以上の継続時間	観測点
約 190 秒	いわき市小名浜（小名浜特別地域気象観測所）
約 180 秒	五戸町古舘
約 170 秒	仙台宮城野区五輪(仙台管区気象台)
約 160 秒	盛岡市山王町(盛岡地方気象台)
約 160 秒	大船渡市大船渡町(大船渡特別地域気象観測所)
約 160 秒	石巻市泉町(石巻特別地域気象観測所)
約 150 秒	福島市松木町（福島地方気象台）

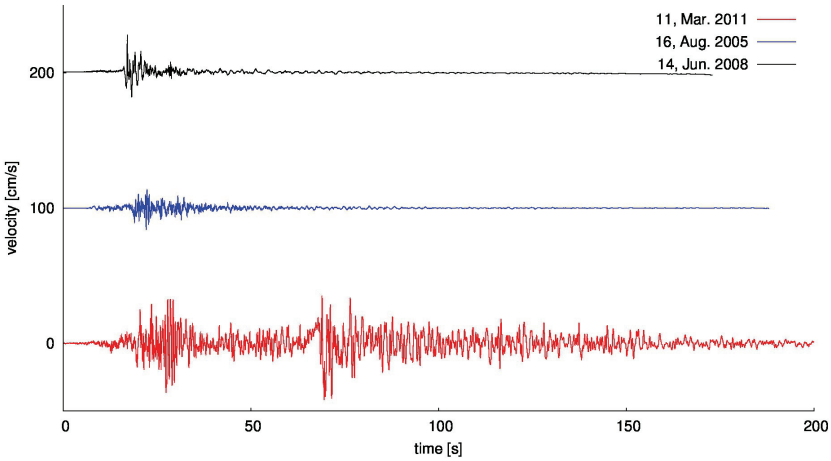


図 4.2.1-4　K-NET 仙台における，2005 年宮城沖地震，2008 年岩手・宮城内陸地震と本地震との速度波形（EW 成分）の比較

４．２．２　最大水平加速度および計測震度上位の地震動と K-NET 築館観測点

本地震では，最大水平加速度値が 980cm/s^2 を越える地震記録が 18 記録観測されている．表 4.2.2-1 はそのうち最大水平加速度の上位８記録を示したものである（図 4.2.2-1）．K-NET 築館では重力加速度のおよそ３倍，K-NET 塩竈ではおよそ２倍の最大水平加速度値が観測されている．最大水

平加速度の上位４記録（K-NET 築館，K-NET 塩竈，小名浜事-G，K-NET 日立）について，速度波形を図 4.2.2-2 に比較して示す．宮城県内の K-NET 築館，および K-NET 塩竈の記録には，先述した１つ目と２つ目の破壊によるフェーズが認められ，２つ目のフェーズの振幅の方が１つ目より大きい．一方，福島県から茨城県にかけて位置する小名浜事-G と K-NET 日立の記録には明瞭なフェーズが１つのみ認められるが，これは３つ目の破壊の寄与によるものと考えられる．また，その疑似速度応答スペクトルを 1995 年兵庫県南部地震の神戸海洋気象台（JMA Kobe），JR 鷹取（JR Takatori）の記録と比較して図 4.2.2-3 に示す．本地震の最大水平加速度上位の記録は 0.1-0.5 秒の短周期側にピークをもっており，JR Takatori のピークに相当する 1-2 秒の周期帯域での応答値は JR Takatori の 1/4 程度である．このようなスペクトル特性は構造物への影響が大きい周期帯（1-2 秒）のレベルが小さいため，構造物に対する影響が小さいと予想される．図 4.2.2-4，および図 4.2.2-5 に道路橋示方書で規定されているレベル２地震動（タイプ１，タイプ２）[28]との加速度応答スペクトルの比較を示す．0.5 秒より短い周期で設計地震動を越える応答が得られているが，1 秒付近の応答は設計地震動を大きく下回る地震動である．

また，本地震で震度 7 および震度 7 相当の地震動を観測した K-NET 築館と KiK-net 芳賀の記録についても同様に速度波形の比較を図 4.2.2-6 に，疑似速度応答スペクトルの比較を図 4.2.2-7 に示す．なお，1995 年兵庫県南部地震で震度 7 の震災の帯に位置する JR 鷹取の記録，2004 年新潟県中越地震で震度 7 を観測した川口町の記録，震度 7 相当の地震動を観測した K-NET 小千谷（NIG019）の記録，および 2007 年新潟県中越沖地震で震度 7 相当の地震動を観測した柏崎刈羽原子力発電所 1 号機地表観測点（TEPCO KKZ1）の記録も併せて図 4.2.2-7 に示している．これらは今まで観測された震度 7 相当の地震動である．過去の震度 7 相当のスペクトルと比較しても，本地震の両記録は短周期側（0.5 秒以下）にピークを有するスペクトル特性であることが認められる．

最大水平加速度値が最も大きく，かつ震度 7 を観測した K-NET 築館の周辺を 2011 年 4 月 2 日に現地を調査したところ，図 4.2.2-8 に示す調査ルート上でマークで示す箇所のみで地震動の影響が認められた．見かけた被害は，ブロック塀の転倒（写真 4.2.2-1），外壁の剥離（写真 4.2.2-2），外壁の剥離と窓ガラスの割れ（写真 4.2.2-3），柱の被りコンクリートの亀裂（写真 4.2.2-4），マンホール周辺を補修した跡（写真 4.2.2-5），道路の陥没（写真 4.2.2-6，写真 4.2.2-7），窓ガラスの割れ（写真 4.2.2-8）である．公共の建物は，栗原市役所で役所まわりの地盤が沈下（写真 4.2.2-9），およびエントランスホールの柱の外壁が剥離している．また，栗原市築館農村環境改善センター周囲の地盤の盛り上がりが見られたが（写真 4.2.2-10），栗原文化会館，および築館総合支所には被害は見られなかった．

なお気象庁では，改定した「気象庁震度階級関連解説表」の運用を平成 21 年 3 月 31 日より開始している[29]．この中で震度 7 は，耐震性が高い木造建物（住宅）に対して「壁などのひび割れ・亀裂が多くなる．まれに傾くことがある」，耐震性が高い RC 造建物に対して「壁，梁（はり），柱などの部材に，ひび割れ・亀裂がさらに多くなる．1 階あるいは中間階が変形し，まれに傾くものがある」，地盤の状況として「大きな地割れが生じることがある」，斜面等の状況について「が

け崩れが多発し，大規模な地すべりや山体の崩壊が発生することがある」と解説している．以上に述べた築館の被害状況と比較して，今後検討を進める必要があると考えられる．

表 4.2.2-1　最大水平加速度上位８記録の観測点

最大水平加速度 (cm/s^2)	観測点
2765	K-NET 築館（MYG004）
1970	K-NET 塩竈（MYG012）
1913	港湾地域強震観測 小名浜事-G
1844	K-NET 日立（IBR003）
1807	K-NET 仙台（MYG013）
1614	K-NET 鉾田（IBR013）
1425	K-NET 今市（TCG009）
1425	K-NET 白河（FKS016）

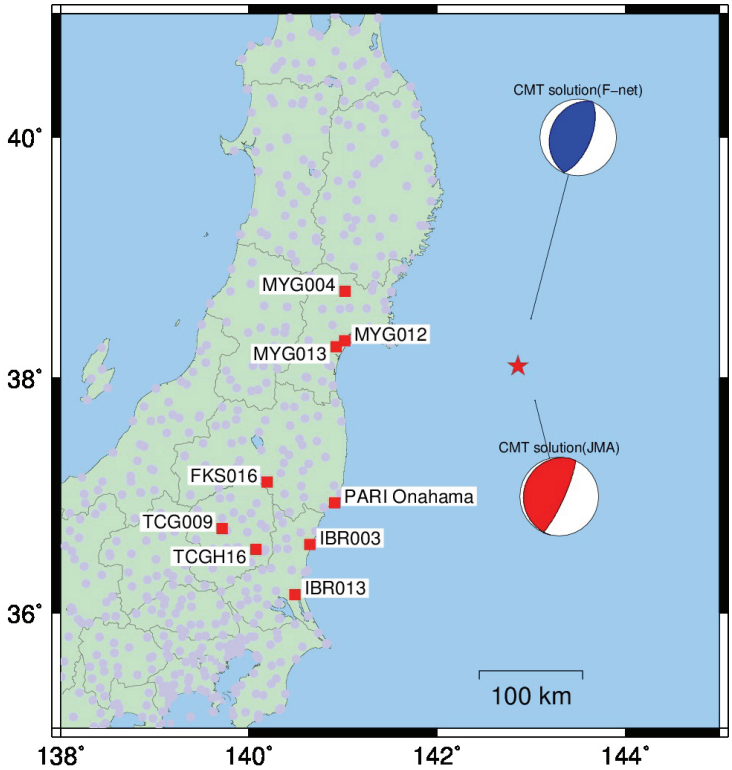


図 4.2.2-1　最大水平加速度上位８記録の観測点および KiK-net 芳賀（TCGH16）の位置

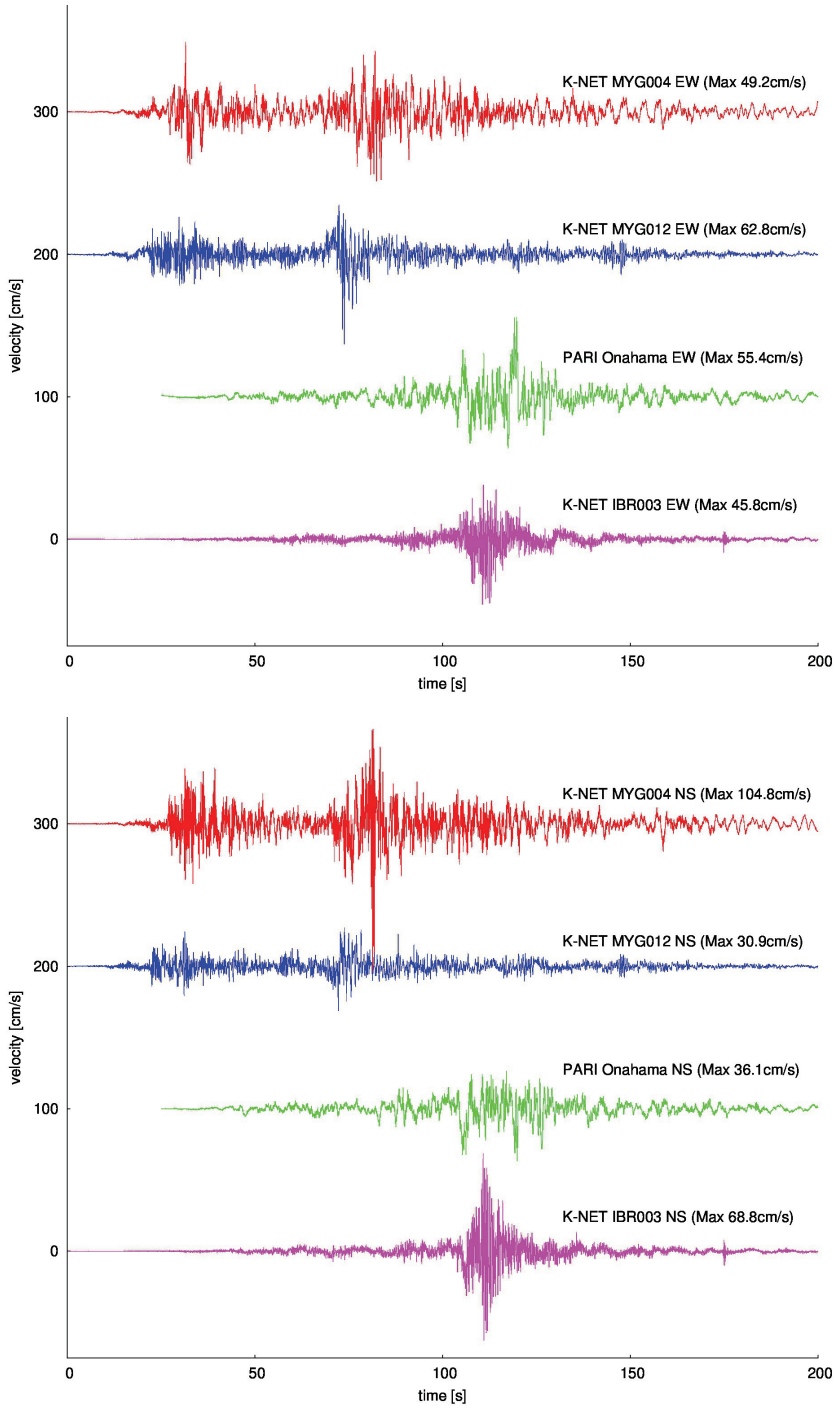


図 4.2.2-2　最大水平加速度上位 4 記録の速度波形の比較（上　EW 成分，下　NS 成分）

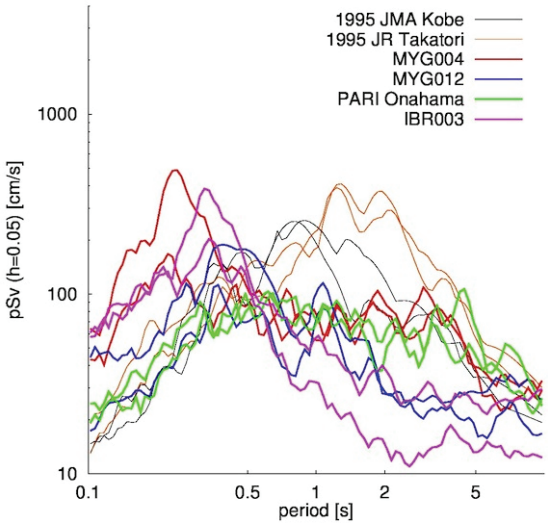


図 4.2.2-3　最大水平加速度上位４記録と兵庫県南部地震の記録との
疑似速度応答スペクトルの比較

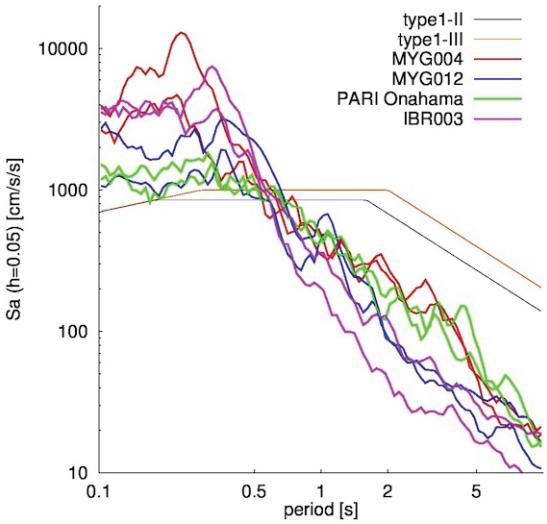


図 4.2.2-4　最大水平加速度上位４記録と
道路橋示方書レベル２地震動タイプ１
（海溝型地震　発生頻度が低いプレート境界
に生じる海洋性の大規模な地震）[28)]との比較

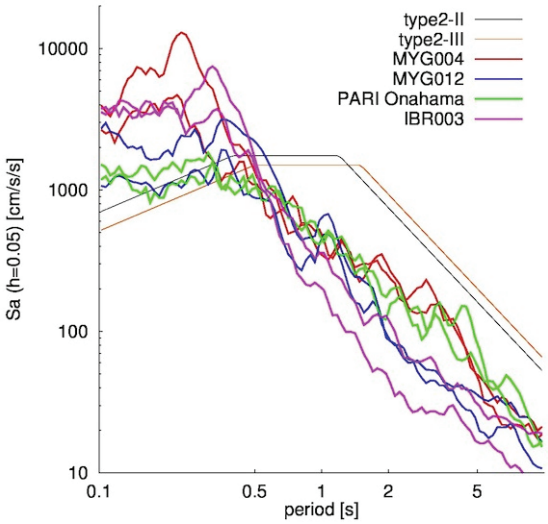


図 4.2.2-5　最大水平加速度上位４記録と
道路橋示方書レベル２地震動タイプ２
（内陸直下型地震　発生頻度が極めて低いマ
グニチュード７級の内陸直下型地震）[28)]との比
較

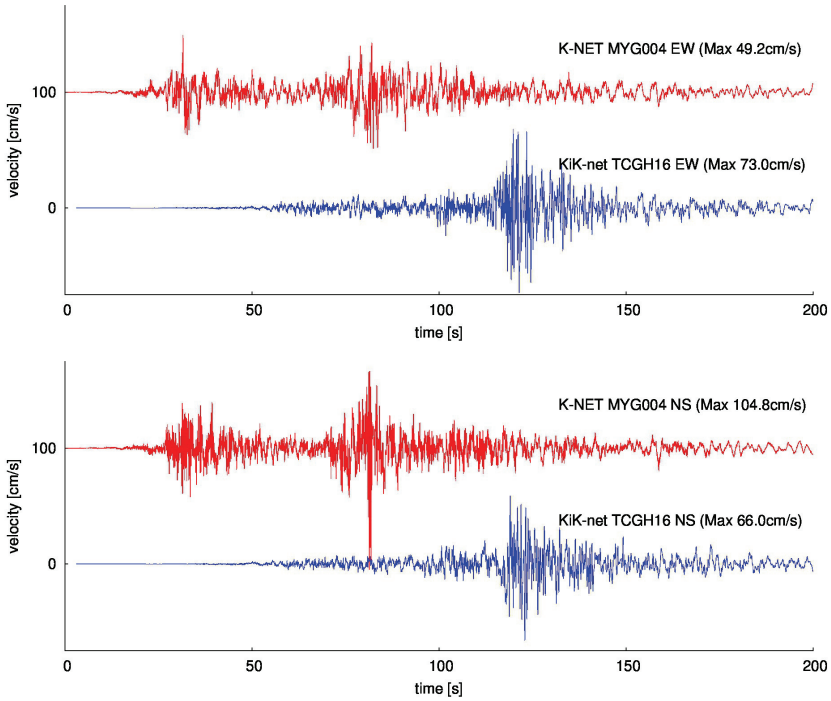


図 4.2.2-6　K-NET 築館（MYG004），KiK-net 芳賀（TCGH16）の速度波形の比較（上　EW 成分，下　NS 成分）

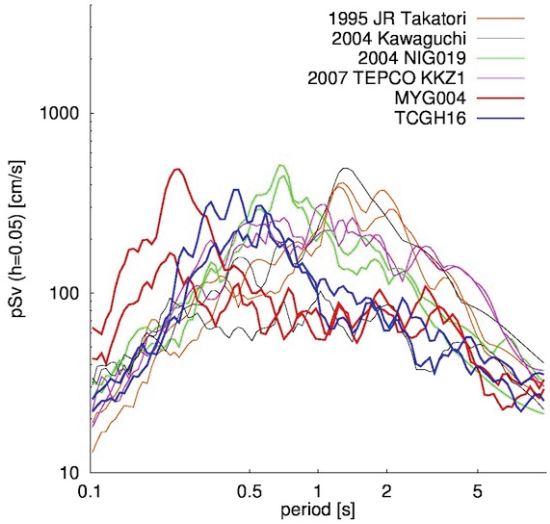


図 4.2.2-7　K-NET 築館（MYG004），KiK-net 芳賀（TCGH16）と過去に観測された震度 7 相当の記録との疑似速度応答スペクトルの比較

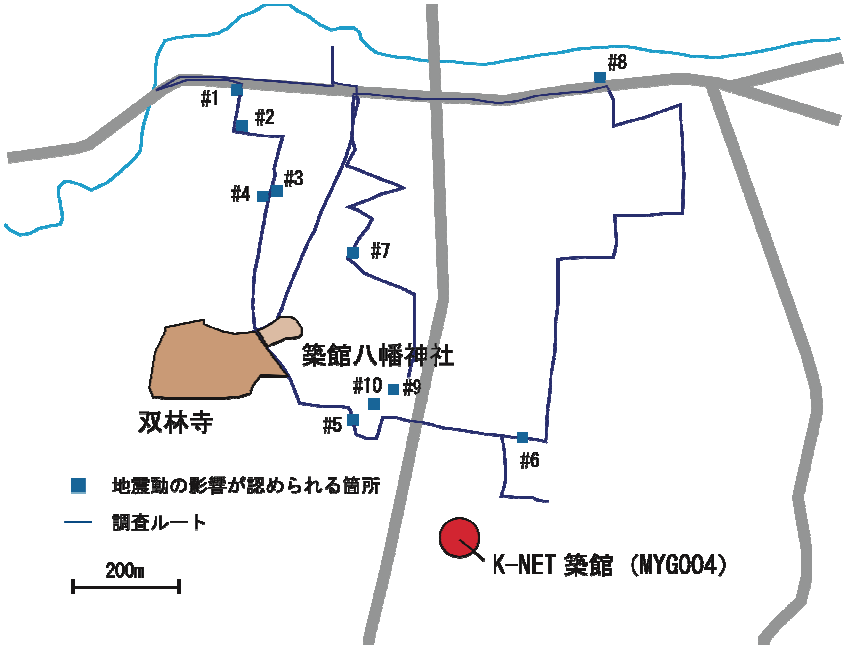


図 4.2.2-8　築館市街地で地震動の影響が認められた箇所（番号は以下写真と対応する）

写真 4.2.2-1　ブロック塀の転倒
（#1　築館薬師 3-6）

写真 4.2.2-2　外壁の剥離
（#2　築館薬師 3-7-8）

写真 4.2.2-3　外壁の剥離と窓ガラスの割れ
（#3　築館薬師 4-3-14）

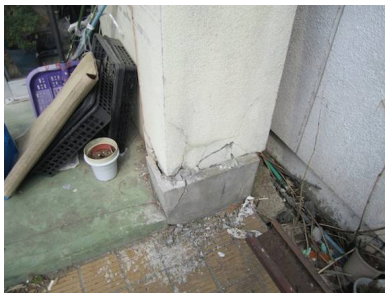


写真 4.2.2-4　柱の被りコンクリートに亀裂
（#4　築館薬師 3-34-1 の南）

写真 4.2.2-5　マンホール周辺を補修した跡
（#5　築館薬師 1 丁目）

写真 4.2.2-6　道路の陥没
（#6　築館高田 2-2-3 北側）

写真 4.2.2-7　道路の陥没
（#7　築館薬師 4-2-1 東側）

写真 4.2.2-8　窓ガラスの割れ
（#8　築館伊豆 1-12-38）

写真 4.2.2-9　栗原市役所まわりの地盤の沈下
（#9　築館薬師 1-7-1）

写真 4.2.2-10　農村環境改善センター周囲の地盤の盛り上がり
（#10　築館薬師 1-7-1）

４．２．３　疑似速度応答スペクトルにおいて主要な地震動と K-NET 古川観測点

図 4.2.3-1 は観測された地震動の疑似速度応答スペクトル（EW 成分）を計算し，そのピーク値，およびピーク周期をプロットしたものである．ピーク周期が 1 秒程度かつピーク値が 200cm/s 程度の地震動が，宮城県から福島県にかけての沿岸で観測されている．また，K-NET 古川（MYG006）ではピーク周期 1.5 秒，ピーク値 270cm/s と大きな地震動が観測されている．一方，岩手県ではピーク周期にばらつきはあるものの，おおむねピーク値が 100cm/s 程度かそれを下回る程度の地震動である．また，栃木県から茨城県にかけてピーク値が 200cm/s を越える地震動を観測しているが，そのピーク周期は 0.5 秒より小さい値である．

疑似速度応答スペクトルの値が大きい観測点として宮城県内の K-NET 古川（MYG006），K-NET 石巻（MYG010），K-NET 仙台（MYG013）を選択し（図 4.2.3-2），その速度波形を図 4.2.3-3 に，疑似速度応答スペクトルを図 4.2.3-4 に示す．K-NET 築館等，他の宮城県内の記録と同様に２つのフェーズが明瞭に認められ，概ね２つめのフェーズの振幅の方が大きい．また，スペクトルを比較した限りでは，K-NET 仙台は JMA Kobe の地震動と似たスペクトル特性を持つこと，K-NET 石巻は 0.5-1.0 秒の周期帯のレベルが大きく落ちるものの 1-2 秒の周期帯で JR Takatori の地震動に迫るレベルのスペクトル特性を持つこと，また K-NET 古川も 1-2 秒の周期帯で JR Takatori の地震動

に迫るレベルのスペクトル特性を持つことがわかる．K-NET 石巻周辺は津波による被害が顕著であるため，地震動による被害の様子を直接伺うことはできないが，K-NET 古川周辺と K-NET 仙台周辺では地震動による建物の崩壊など被害が報告されている [30)31)32)]．また，福島県以南でピーク値が 200cm/s を越える KiK-net 岩瀬（IBRH11）, K-NET 今市（TCG009）, KiK-net 馬頭（TCGH13），KiK-net 芳賀（TCGH16）についても（図 4.2.3-2）同様に速度波形の比較を図 4.2.3-5 に，疑似速度応答スペクトルを比較して図 4.2.3-6 に示す．K-NET 日立等の福島県より南側の記録に特徴的な，１つの明瞭なフェーズが認められる．そのスペクトル特性は最大加速度上位記録と同様に，JMA Kobe や JR Takatori と比べて短周期側にピークがある．この地域で報告されている地震動の被害も軽微であるが [33)], これは短周期側にピークをもつスペクトル特性に対応すると考えられる．なお，K-NET 古川（MYG006），K-NET 石巻（MYG010），K-NET 仙台（MYG013）の記録と道路橋示方書で規定されているレベル２地震動との加速度応答スペクトルの比較を図 4.2.2-7，および図 4.2.2-8 に示す．タイプ１地震動と周期２秒まで同等の応答であること，タイプ２地震動と比較しても MYG0013 は１秒付近まで，MYG006 も設計地震動に迫るレベルの記録であることが認められる．

このため，K-NET 古川周辺の被害調査を３月 14 日，29 日，31 日，４月７日の計４日間実施している．図 4.2.3-9 に調査したルートとルート上に見られた倒壊家屋，大きな損傷を受けた家屋，マンホールの浮き上がり，噴砂の痕跡の位置を示す．また，代表的な地点の写真を写真 4.2.3-1～4.2.3-9 に示す．液状化による噴砂，マンホールの浮き上がりなどが主に古川駅西側の駅前大通で見られ，その西側に位置する古川中里，古川南町，古川荒川小金町などで木造家屋の被害が認められた．なお，写真 4.2.3-8，4.2.3-9 に示す傾いたアパート周囲では噴砂が認められた．また，気象庁古川観測点の南西およそ 200m の地点に瑞川寺（古川三日町２－２－２）が位置する．瑞川寺の墓地では多くの墓石の被害が見られた．墓地南側半分の墓石を１）竿石の転倒，２）竿石の移動もしくは竿石以外の灯籠などの転倒，３）無被害の３つに分類すると，３５０基のうち１）１９３基，２）６４基，３）９３基であった．従来の枠組みで転倒率を算出すれば 55%であるが，転倒した竿石には心棒のあるものも見られるため，無被害の墓石には耐震化されたものが少なからずあると考えられる．以上のような被害の様子から，K-NET 古川周辺ではやや被害が少ないが南側で被害が集中し，その地域の中に気象庁古川観測点が位置しているのではないかと推察される．

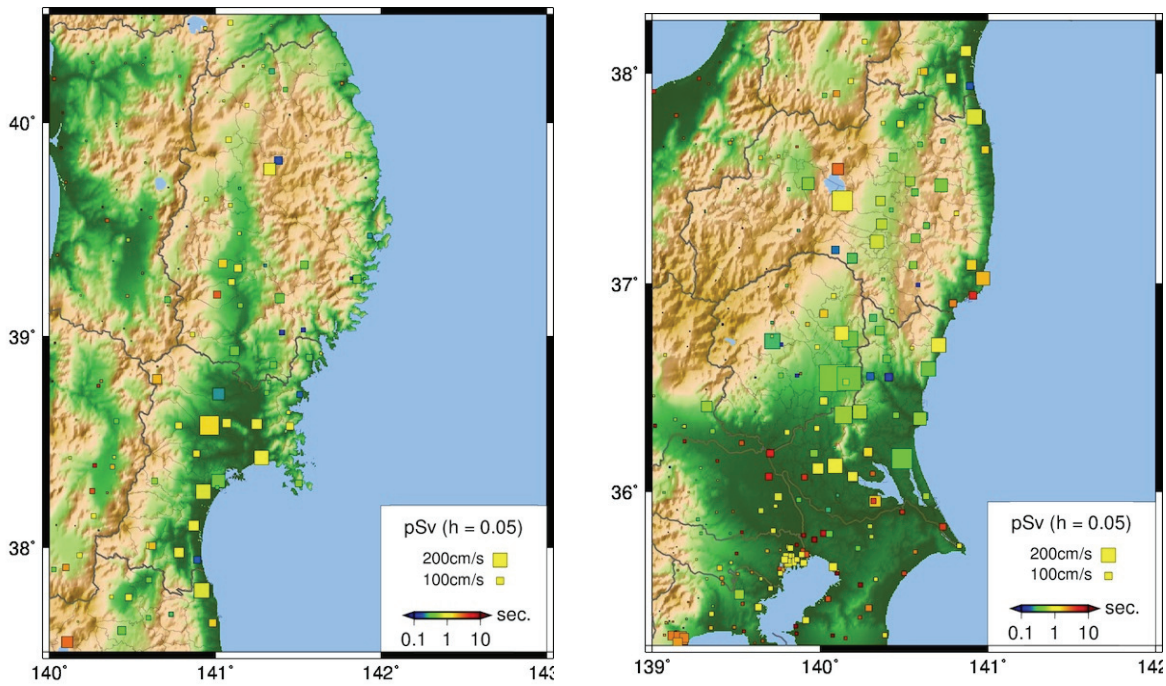


図 4.2.3-1　疑似速度応答スペクトル（EW 成分）のピーク値・ピーク周期分布

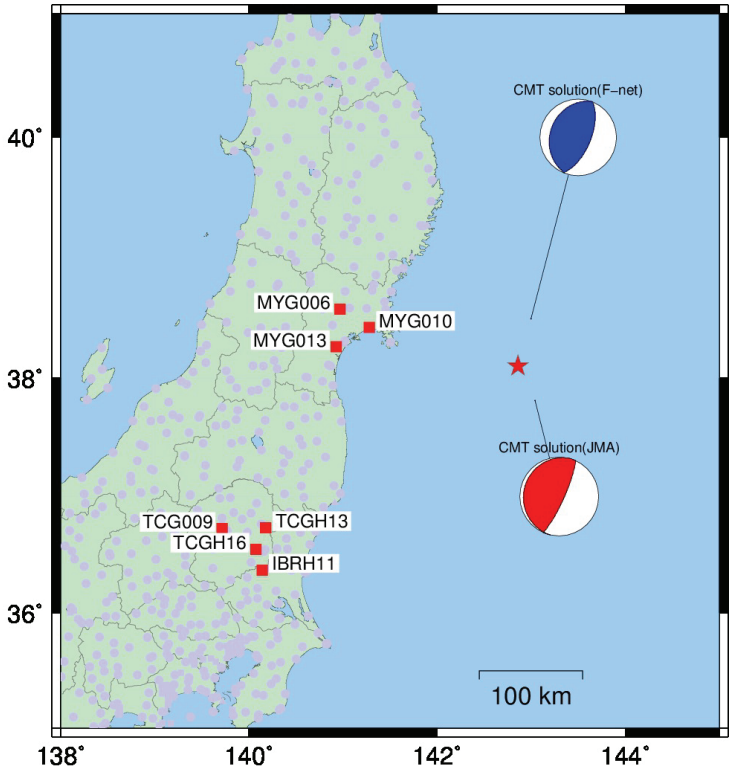


図 4.2.3-2　疑似速度応答スペクトルのピーク値が大きな観測点の位置

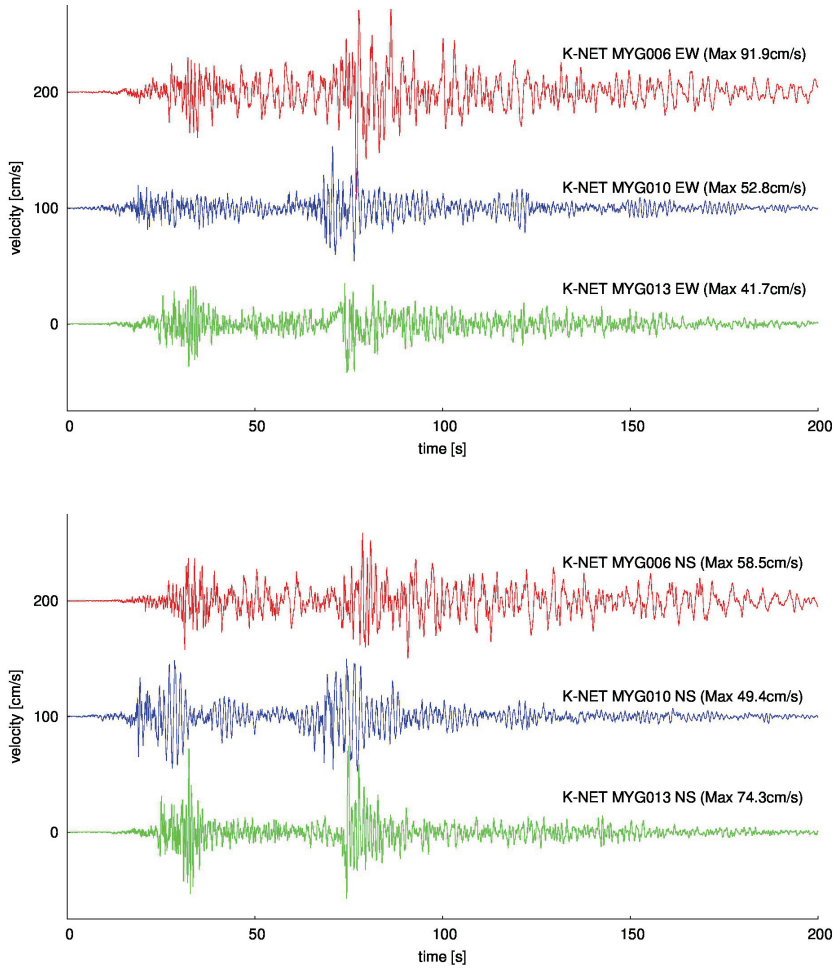


図 4.2.3-3　K-NET 古川（MYG006），K-NET 石巻（MYG010），K-NET 仙台（MYG013）の速度波形の比較（上　EW 成分，下　NS 成分）

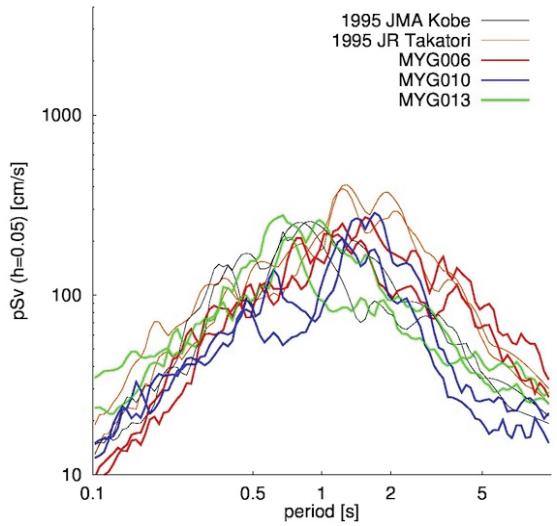


図 4.2.3-4　K-NET 古川（MYG006），K-NET 石巻（MYG010），K-NET 仙台（MYG013）の疑似速度応答スペクトルの比較

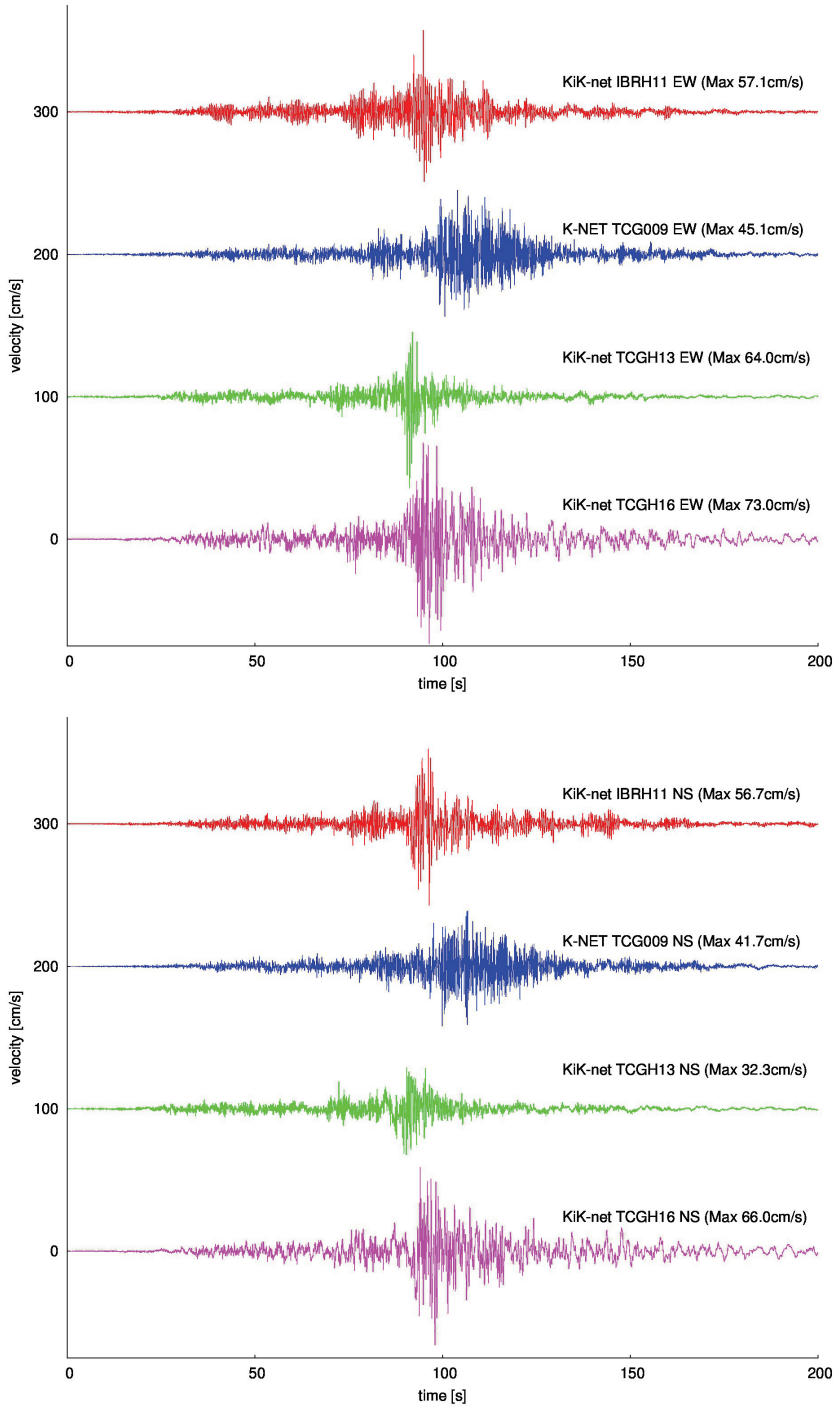


図 4.2.3-5　KiK-net 岩瀬（IBRH11），K-NET 今市（TCG009），KiK-net 馬頭（TCGH13），KiK-net 芳賀（TCGH16）の速度波形の比較（上　EW 成分，下　NS 成分）

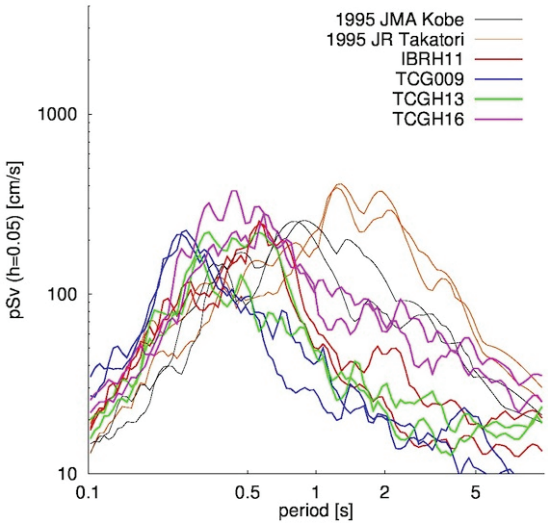


図 4.2.3-6　KiK-net 岩瀬（IBRH11），K-NET 今市（TCG009），KiK-net 馬頭（TCGH13），KiK-net 芳賀（TCGH16）の疑似速度応答スペクトルの比較

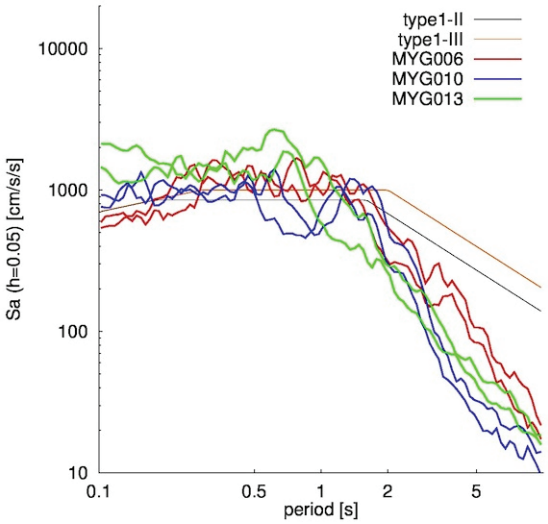


図 4.2.3-7　K-NET 古川（MYG006），K-NET 石巻（MYG010），K-NET 仙台（MYG013）と道路橋示方書レベル２地震動タイプ１（海溝型地震）との比較

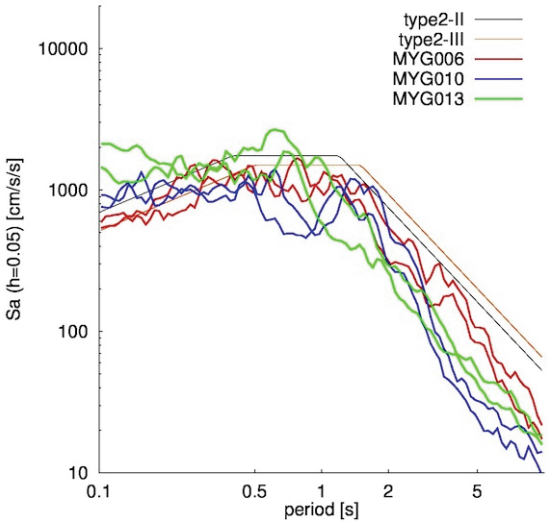


図 4.2.3-8　K-NET 古川（MYG006），K-NET 石巻（MYG010），K-NET 仙台（MYG013）と道路橋示方書レベル２地震動タイプ２（内陸直下型地震）との比較

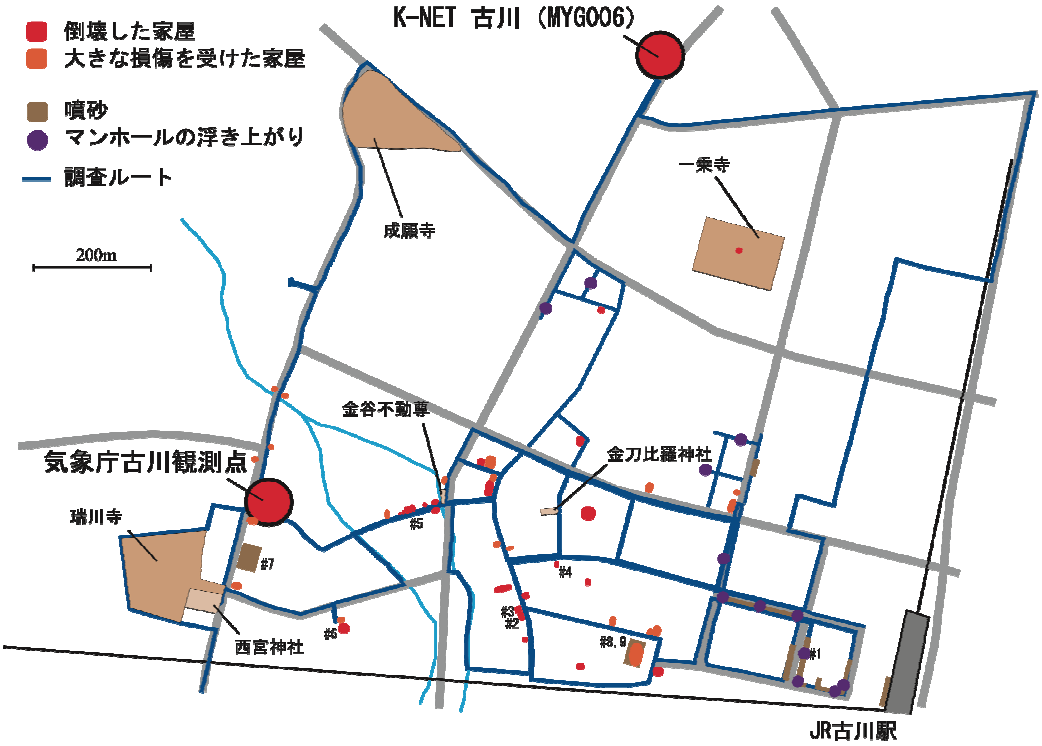


図 4.2.3-9　古川市街地で認められた被害箇所

（盛川・高橋による調査結果[30]も含む）（番号は以下写真と対応する）

写真 4.2.3-1　マンホールの浮き上がり 90cm

（#1　古川駅前大通 1-5-35）

写真 4.2.3-2　木造家屋の被害

（#2　古川中里 1-11）

写真 4.2.3-3　木造家屋の被害

（#3　古川中里 1-11）

写真 4.2.3-4　鉄骨造店舗の被害

（#4　古川中里 1-9）

写真 4.2.3-5　木造家屋の被害

（#5　古川荒川小金町 2）

写真 4.2.3-6　木造家屋の被害

（#6　古川南町 1-6）

写真 4.2.3-7　駐車場に見られる噴砂跡
（#7　古川三日町 2-3-45）

写真 4.2.3-8　傾いたアパート
（#8　古川中里 1-10）

写真 4.2.3-9　傾いたアパート
（#9　古川中里 1-10）

４．２．４　岩手県内陸部の地震動

岩手県内の地震動は，先述したように宮城県北部より全体として地震動レベルは低いと考えられる．しかしながら，新幹線高架橋被害[34)]や４月７日の余震により道路盛土被害が発生[35)]するなど，岩手県内陸部の北上盆地でいくつか地震動による被害が報告されている．岩手県内陸部の観測点として，K-NET 石鳥谷（IWT014），K-NET 北上（IWT012），K-NET 相去（IWT026），K-NET 水沢（IWT011），K-NET 一関（IWT010）を取り上げる（図 4.2.4-1）．これらは北から順に北上盆地内に位置する観測点であり，全て北上川の右岸に設置されている．図 4.2.4-2 に速度波形の比較を示す．なお，横軸に示す時間はプロットしている波形間で同じ時刻を規準としているため，相対的な到達時を比較することができる．５つの観測点全ての波形において宮城県以北で特徴的な２つの顕著なフェーズが認められ，このフェーズの到達時はいずれも南から北に向かって遅れる傾向にある．また，K-NET 北上では NS 成分で 40cm/s を越える最大速度が観測されている．

図 4.2.4-3 はそれぞれの記録の疑似速度応答スペクトルを比較したものである．0.5 秒付近にピークをもつ記録，1-2 秒付近にピークをもつ記録，またその両方のピークを持つ記録が得られているが，いずれの記録も JMA Kobe や JR Takatori に迫るレベルの応答ではなく，K-NET 北上が 0.6 秒付近でやや高い応答を示している程度である．ただし，観測点が右岸に偏っていることも踏まえると，実際に被害箇所の地震動として適切かどうかについては検討が必要である．

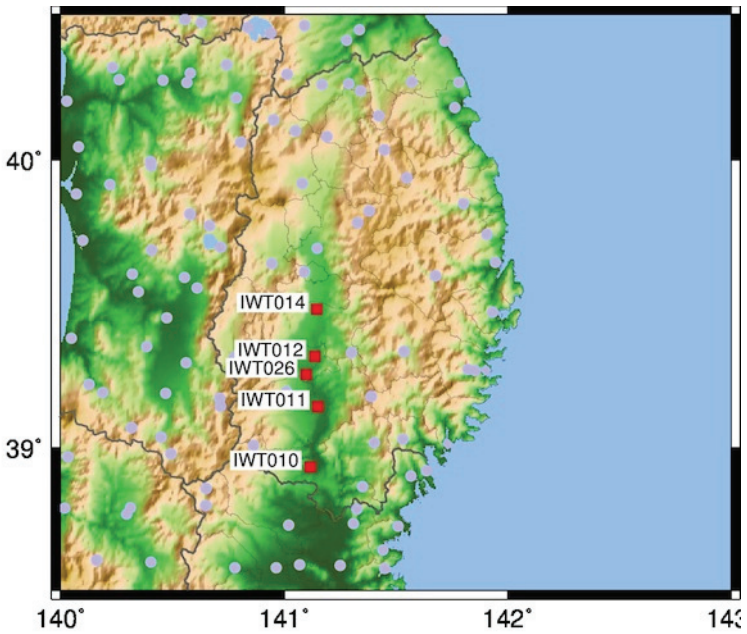
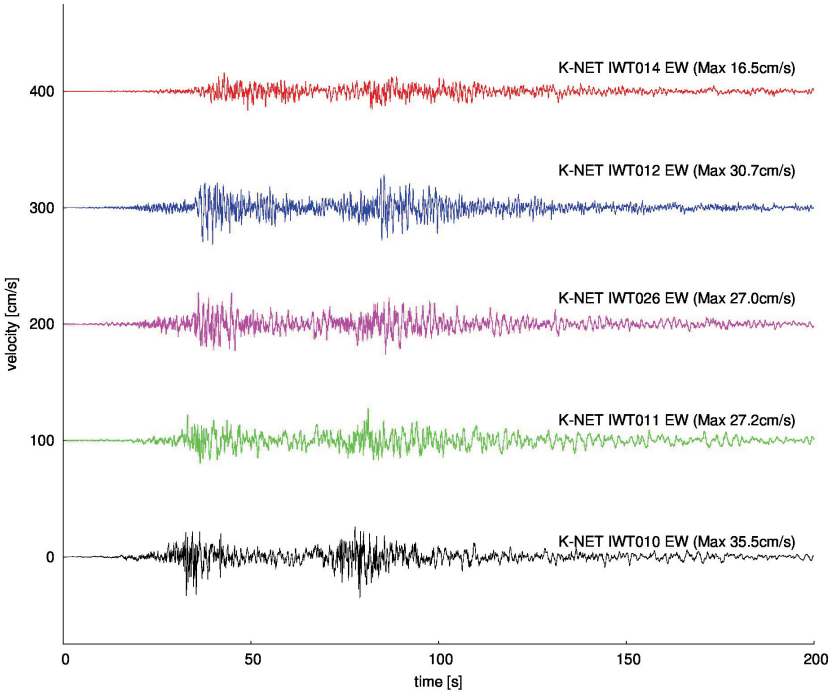


図 4.2.4-1　岩手県内陸部の地震観測点位置



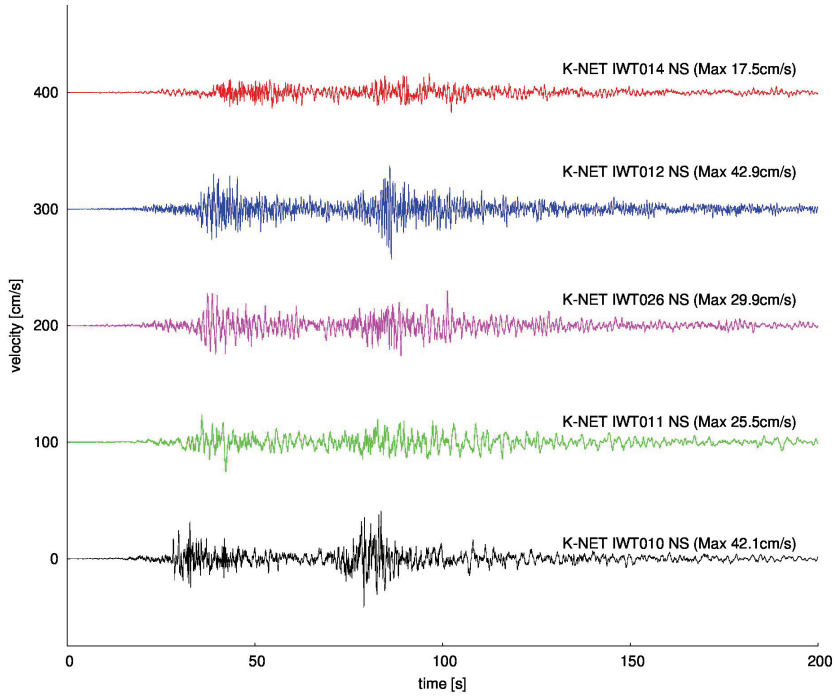


図 4.2.4-2　K-NET 石鳥谷（IWT014），K-NET 北上（IWT012），K-NET 相去（IWT026），K-NET 水沢（IWT011），K-NET 一関（IWT010）の速度波形の比較（上　EW 成分，下　NS 成分）

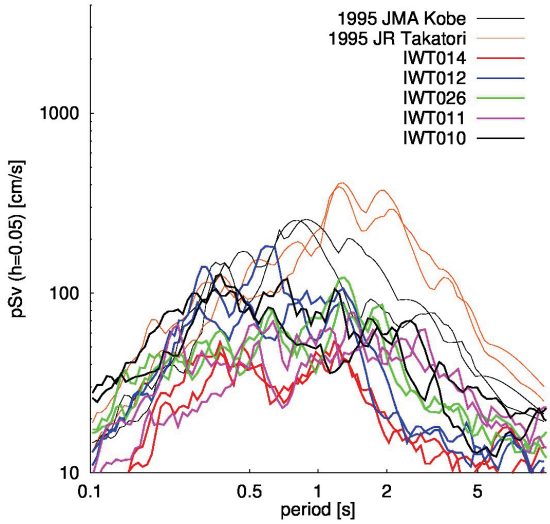


図 4.2.4-3　岩手県内陸部記録の疑似速度応答スペクトルの比較

４．２．５　東京湾岸の地震動

本地震では震源断層からある程度離れている東京湾岸で大規模な液状化被害[36]，ならびに首都高速湾岸線の被害[37]などが発生した．東京湾岸に位置する地震観測点は図 4.2.5-1 に示すように主に K-NET 稲毛（CHB024），K-NET 浦安（CHB008），K-NET 宇喜田（TKY026），K-NET 砂町（TKY013），K-NET 八枝（TKY018），K-NET 辰巳（TKY017），K-NET 東雲（TKY016），および産総研お台場

観測点（AIST）である．特に，K-NET 浦安から K-NET 東雲までの距離はおよそ 2km であり，密に地震観測されている地域でもある．図 4.2.5-2 はこれらの速度波形を並べたものであるが，K-NET 浦安から K-NET 東雲の波形は概ね似ている．なお，いずれの記録も最大速度値は 30cm/s 前後である．

図 4.2.5-3 は東京湾岸の記録と道路橋示方書レベル２地震動タイプ１との加速度応答スペクトルを比較したものである．観測された応答値は長周期帯域も含めて，全周期帯域で設計地震動レベルを下回っている．また，併せて 2003 年十勝沖地震の K-NET 苫小牧（HKD129）のスペクトルも示している．2003 年十勝沖地震では苫小牧において石油タンク内液体のスロッシング現象が生じて火災被害が発生したため，長周期地震動による影響として注目されたものである．概ね，本地震の東京湾岸の記録の応答の方が K-NET 苫小牧の記録を上回るが，5 秒付近で K-NET 苫小牧の方が大きな応答を示している．図 4.2.5-4 は同様に速度応答スペクトルで比較したものである．加速度応答スペクトルで見られる特徴とほぼ同様で，短周期側は本地震の応答の方が大きく，5 秒付近で K-NET 苫小牧が上回る．ところが，それより長い 10 秒から 20 秒の応答を見ると，本地震の東京湾岸記録と K-NET 苫小牧とはほぼ同等である．

また，K-NET 浦安（CHB008）と K-NET 稲毛（CHB024）の加速度波形を図 4.2.5-5 に示す．K-NET 浦安の波形と比較して，K-NET 稲毛の加速度記録には 100 秒付近を境として振幅の減少，短周期成分の減少，およびスパイク状のフェーズの励起がみられる．この特徴は，液状化によるものと考えられる．

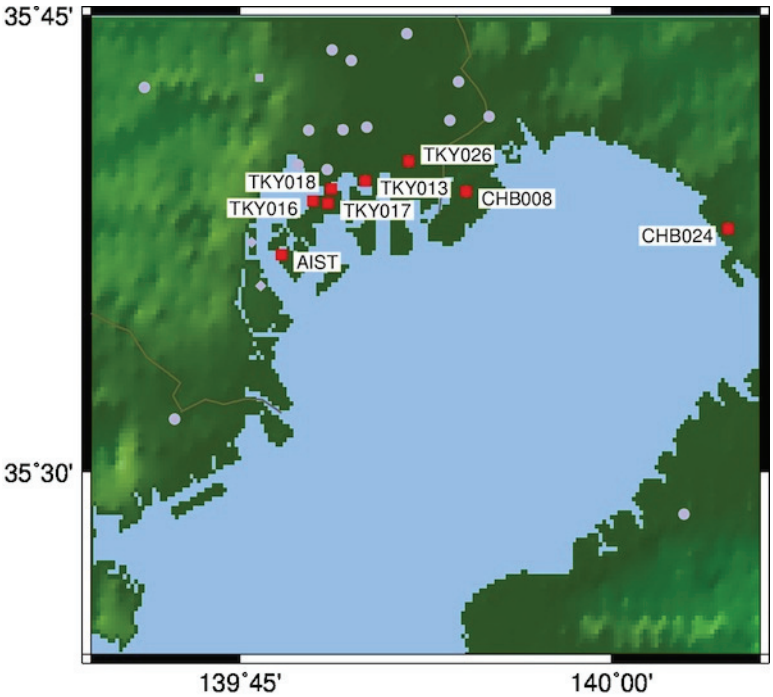
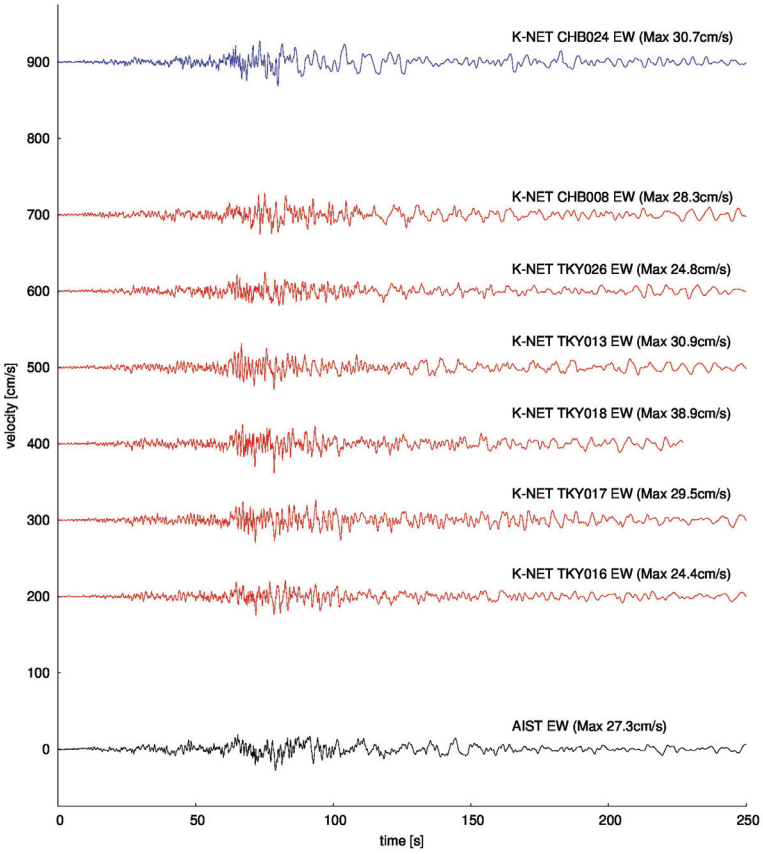


図 4.2.5-1　東京湾岸の地震観測点の位置



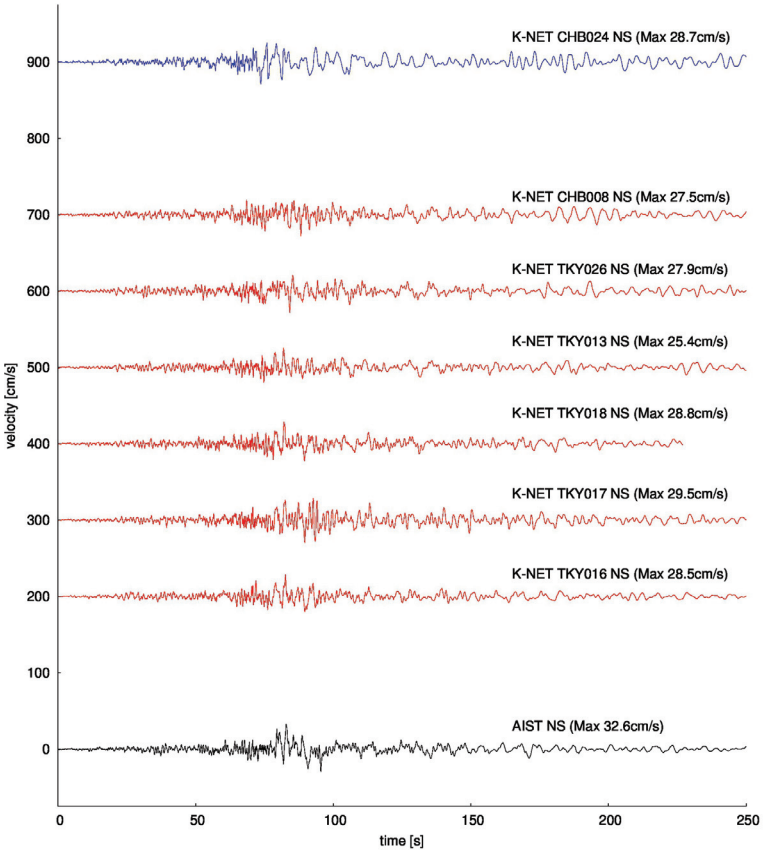


図 4.2.5-2　東京湾岸で観測された記録の速度波形の比較

（上　EW 成分，下　NS 成分）

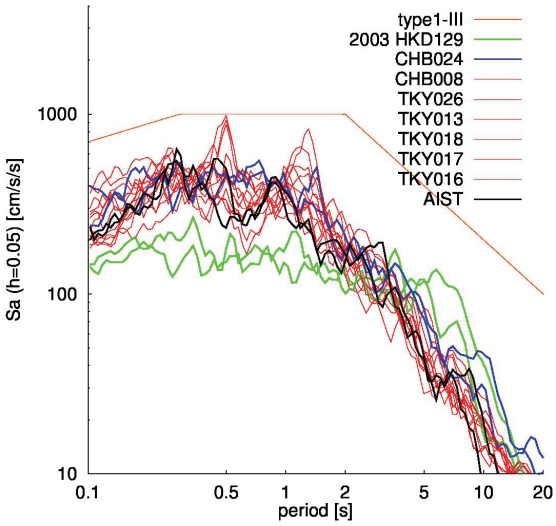


図 4.2.5-3　東京湾岸観測記録，
2003 年十勝沖地震 K-NET 苫小牧（HKD129），
道路橋示方書レベル２地震動タイプ１の
加速度応答スペクトルの比較

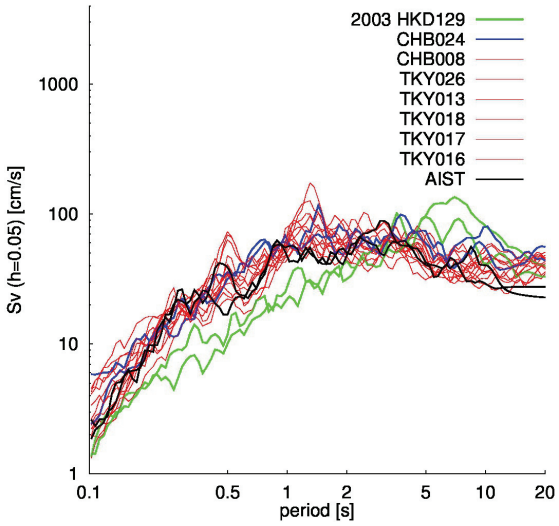


図 4.2.5-4　東京湾岸観測記録
と 2003 年十勝沖地震 K-NET 苫小牧(HKD129)
との速度応答スペクトルの比較

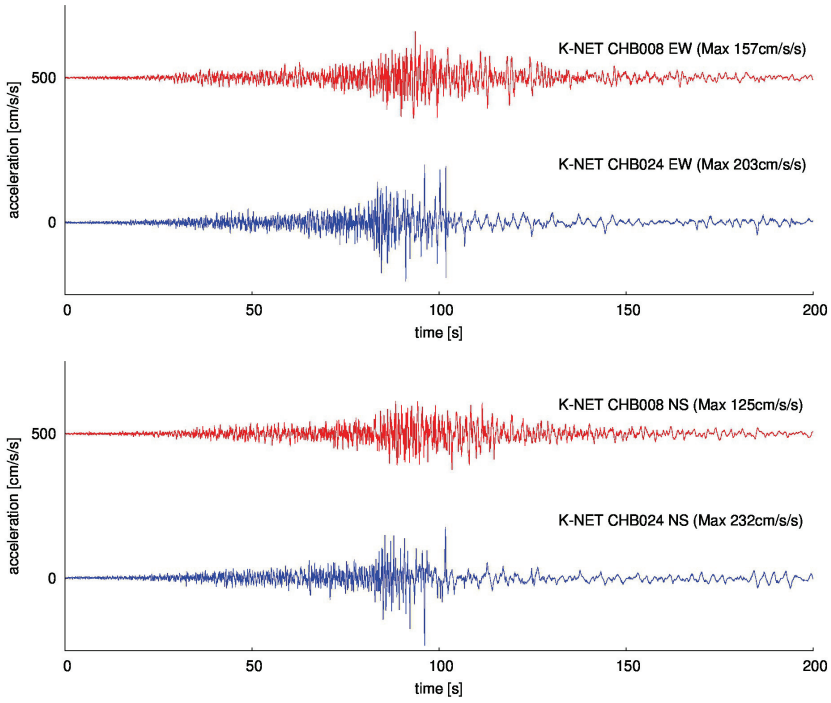


図 4.2.5-5　K-NET 浦安（CHB008）と K-NET 稲毛（CHB024）の加速度波形の比較
（上　EW 成分，下　NS 成分）

４．２．６　茨城県から千葉県にかけての沿岸の地震動

茨城県から千葉県にかけての沿岸部では，液状化による被害[38)]や高速道路盛土の被害が報告さ

れている[39]ため，水戸周辺，および銚子周辺の地震動について取り上げる．図 4.2.6-1 は水戸周辺および銚子周辺に位置する観測点の分布を示している．ここでは，水戸周辺の記録として K-NET 那珂湊（IBR007），KiK-net ひたちなか（IBRH18），K-NET 水戸（IBR006）を選択し，また銚子周辺の記録として K-NET 鹿嶋（IBR018），K-NET 佐原（CHB004），KiK-net 波崎２（IBRH20），K-NET 銚子（CHB005），KiK-net 銚子中（CHBH14）を選択する．

図 4.2.6-2 は水戸周辺の記録を速度波形で比較したものである．空間距離の近い K-NET 那珂湊（IBR007）と KiK-net ひたちなか（IBRH18）は，K-NET 那珂湊の方が振幅は若干大きいがフェーズの特徴はよく似ている．図 4.2.6-3，および図 4.2.6-4 はそれぞれ疑似速度応答スペクトル，および速度応答スペクトルで比較したものである．いずれの記録も疑似速度応答スペクトルのピーク周期は１秒より短周期側であることと，特徴的な点として K-NET 水戸のスペクトルは短周期側から長周期側までの広い周期帯域において速度応答スペクトルでみてフラットな形状である．なお，2003 年十勝沖地震 K-NET 苫小牧の記録と比較すると，５秒付近の応答は本地震の記録の方が小さい応答である．

図 4.2.6-5 は鹿嶋から銚子にかけて速度波形を比較して示したものである．K-NET 銚子，KiK-net 銚子中の波形より K-NET 鹿嶋（IBR018），K-NET 佐原（CHB004），KiK-net 波崎２（IBRH20）の方が振幅が大きく数秒周期の揺れが明瞭に確認できる．この数秒周期の揺れは最大速度を与える 75 秒付近のフェーズよりも前から認められることから，液状化による影響ではなく柔らかい地盤構造の影響によるものと考えられる．図 4.2.6-6 は速度応答スペクトルの比較を示したものであるが，K-NET 鹿嶋，K-NET 佐原，KiK-net 波崎２では４秒付近にやや大きな応答が認められる．

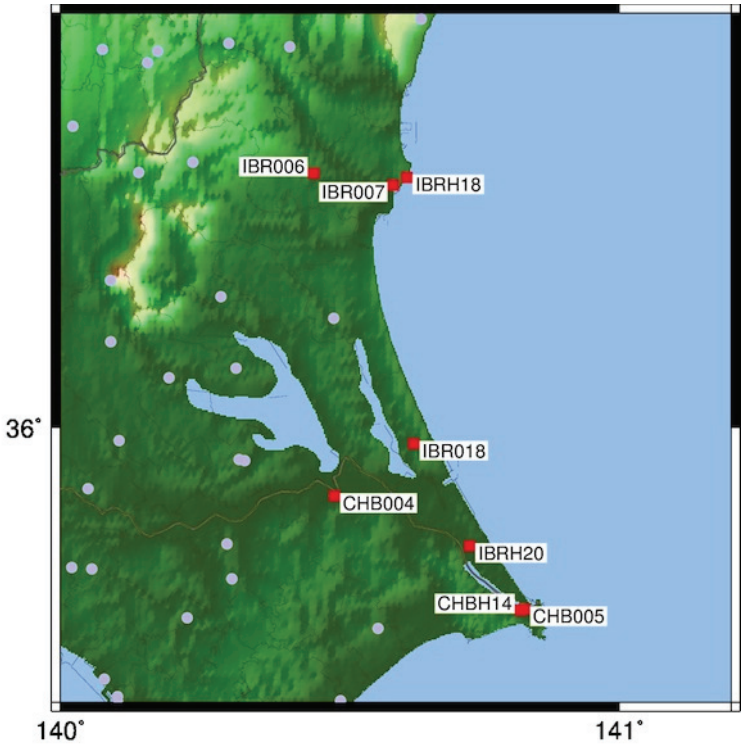


図 4.2.6-1　茨城県から千葉県沿岸の地震観測点の位置

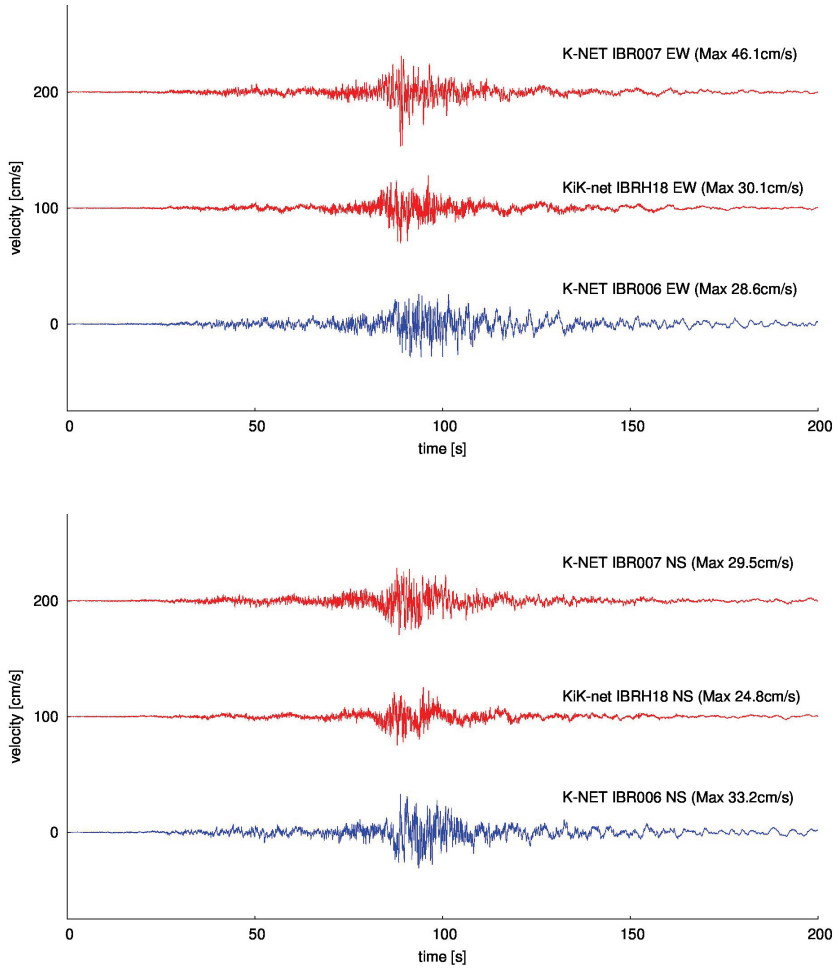


図 4.2.6-2　K-NET 那珂湊（IBR007），KiK-net ひたちなか（IBRH18），K-NET 水戸（IBR006）の速度波形の比較（上　EW 成分，下　NS 成分）

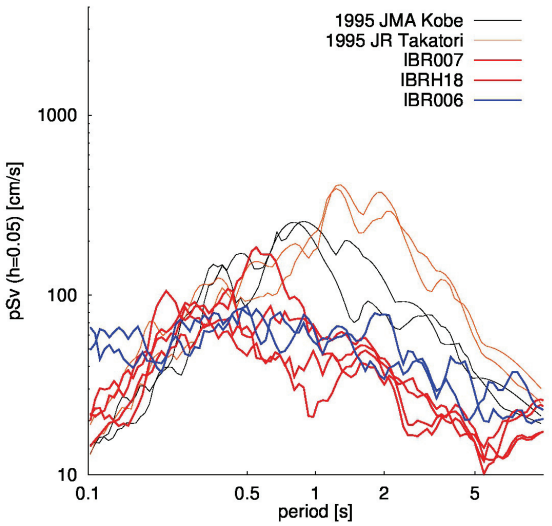


図 4.2.6-3　水戸周辺記録の疑似速度応答スペクトルの比較

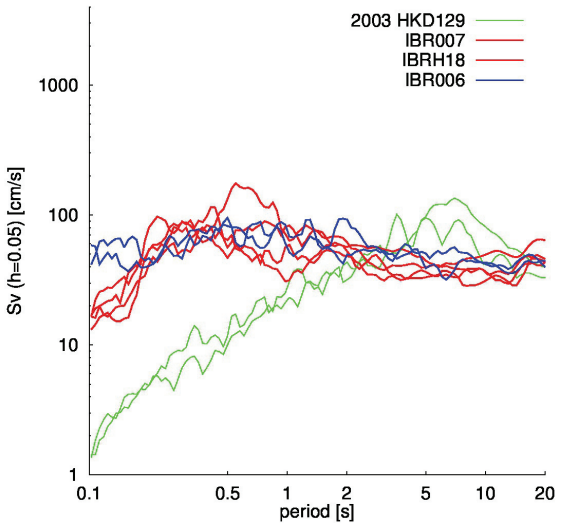


図 4.2.6-4　水戸周辺記録の速度応答スペクトルの比較

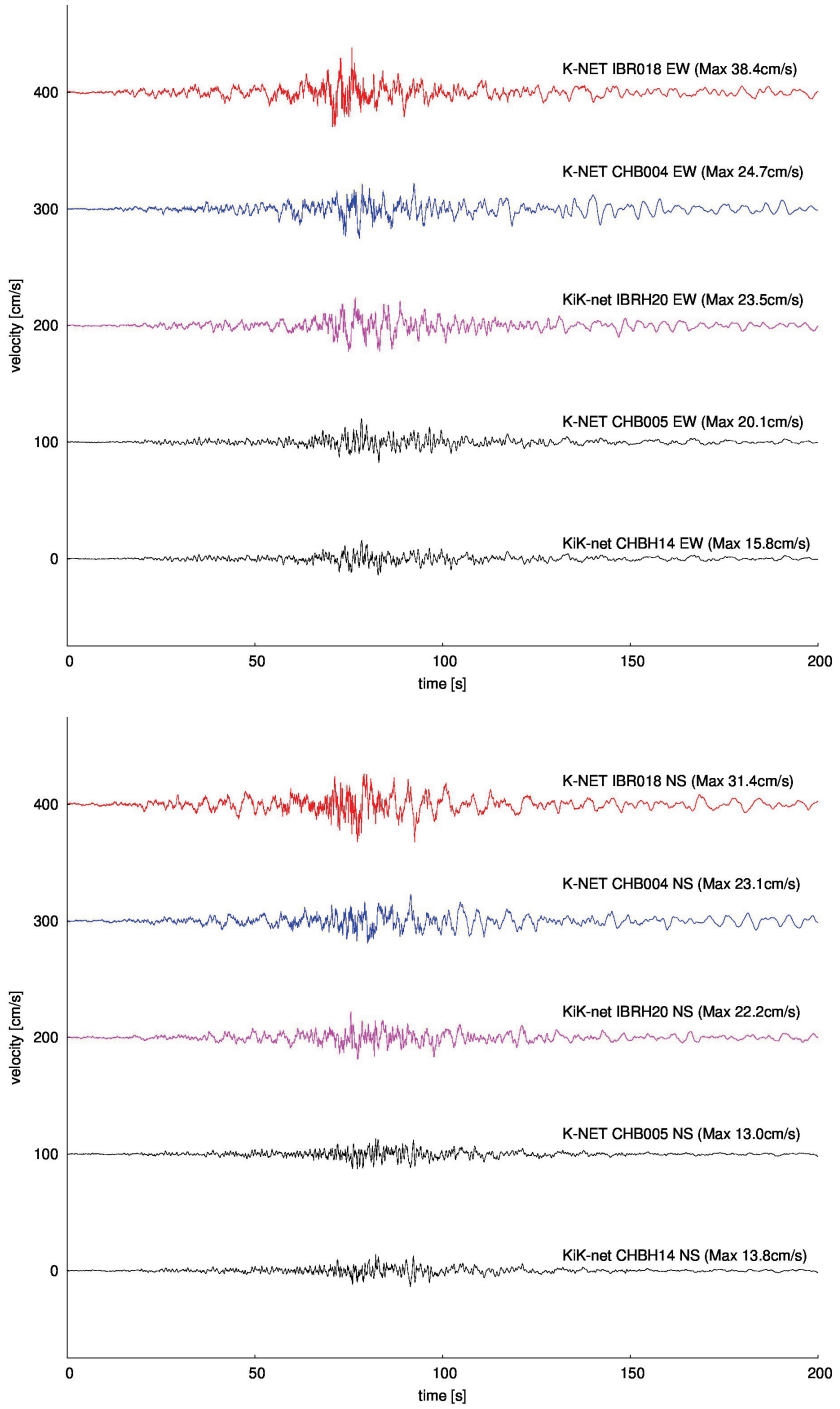


図 4.2.6-5　K-NET 鹿嶋（IBR018），K-NET 佐原（CHB004），KiK-net 波崎２（IBRH20），K-NET 銚子（CHB005），KiK-net 銚子中（CHBH14）の速度波形の比較
（上　EW 成分，下　NS 成分）

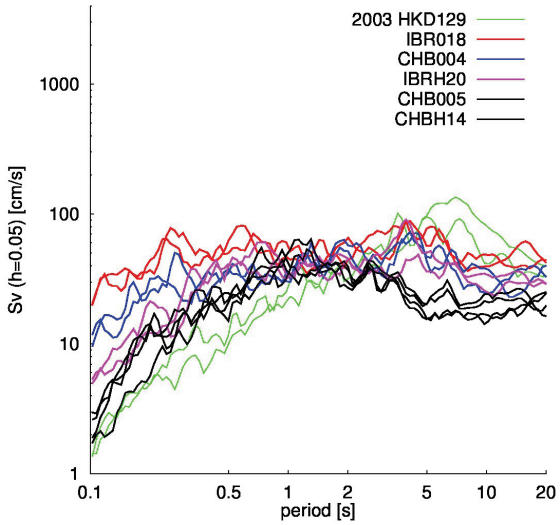


図 4.2.6-6　銚子周辺記録と 2003 年十勝沖地震 K-NET 苫小牧（HKD129）
との速度応答スペクトルの比較

４．２．７　余震（4/7）の地震動

先述したように，本地震ではマグニチュード７クラスの余震が複数発生している．その内，４月７日に宮城県沖で発生した地震の地震動について概説する．本余震は本震の震央よりも陸側を震央とする地震で，その震源深さはプレート境界面より深く，震源メカニズム解 [7]はプレート境界面より高角の断層面を示唆している．また，地震時の永久変位の発生方向から東落ちの断層面であることが示唆されている [40]．このため，本余震はプレート境界型ではなく太平洋プレート内部で発生したスラブ内地震と考えられている．

図 4.2.7-1 に震度分布を，図 4.2.7-2 に疑似速度応答スペクトルのピーク値・ピーク周期分布を示す．宮城県を中心に岩手県にかけて震度６弱以上の地震動が観測され，宮城県北部の平野部で疑似速度応答スペクトルのピーク値の大きな地震動が観測されている．図 4.2.7-3 は，K-NET 築館（MYG004），K-NET 仙台（MYG013），K-NET 古川（MYG006）で観測された本震と本余震の速度波形を比較したものである．最大値で比較すると本震の方がやや大きいが，本震の１つ目のフェーズと比較すると余震の振幅はほぼ同等であることがわかる．

図 4.2.7-4，および 4.2.7-5 はそれぞれ K-NET 古川，K-NET 仙台において観測された本震と余震との疑似速度応答スペクトルを比較したものである．K-NET 古川では１秒より短周期側で本震と同じレベルの応答が，K-NET 仙台では２秒付近まで本震と同じレベルの応答であることが認められる．すなわち，４月７日に発生した余震の地震動は，スペクトルでみると観測点によっては１～２秒までの短周期側でそのレベルが本震の地震動と同等である．また，ここで比較した記録は先述したように地震動による被害が報告されている地域であることからも，無視できるような地震動ではないと考えられる．

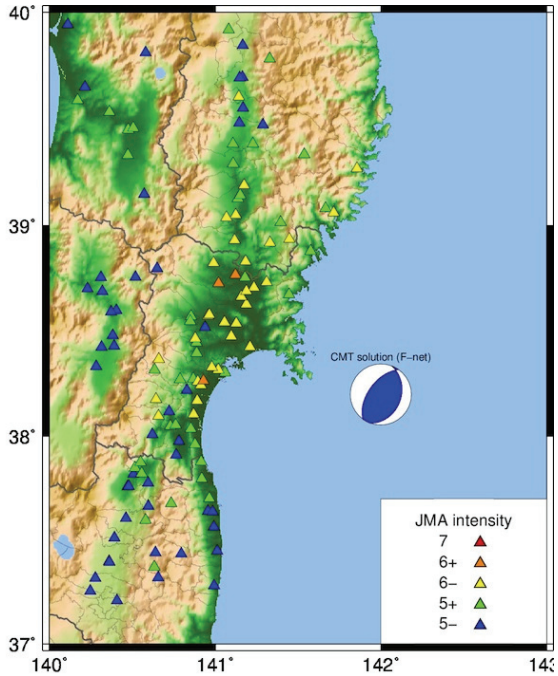


図 4.2.7-1　震度分布

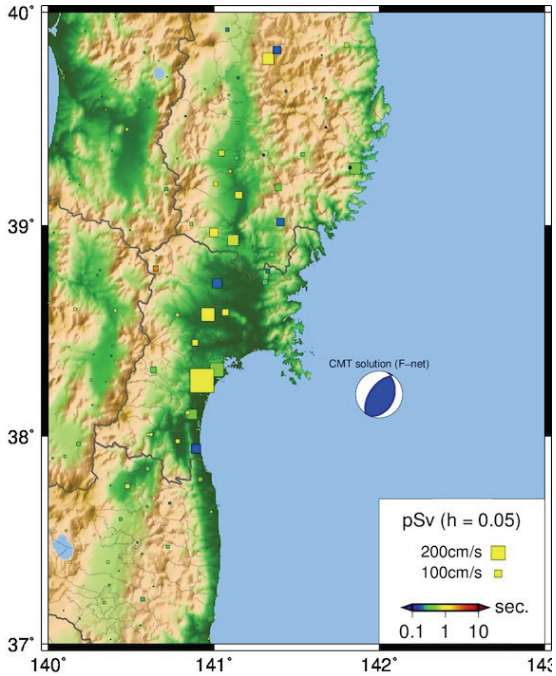


図 4.2.7-2　疑似速度応答スペクトル（EW 成分）のピーク値・ピーク周期分布 [24)]

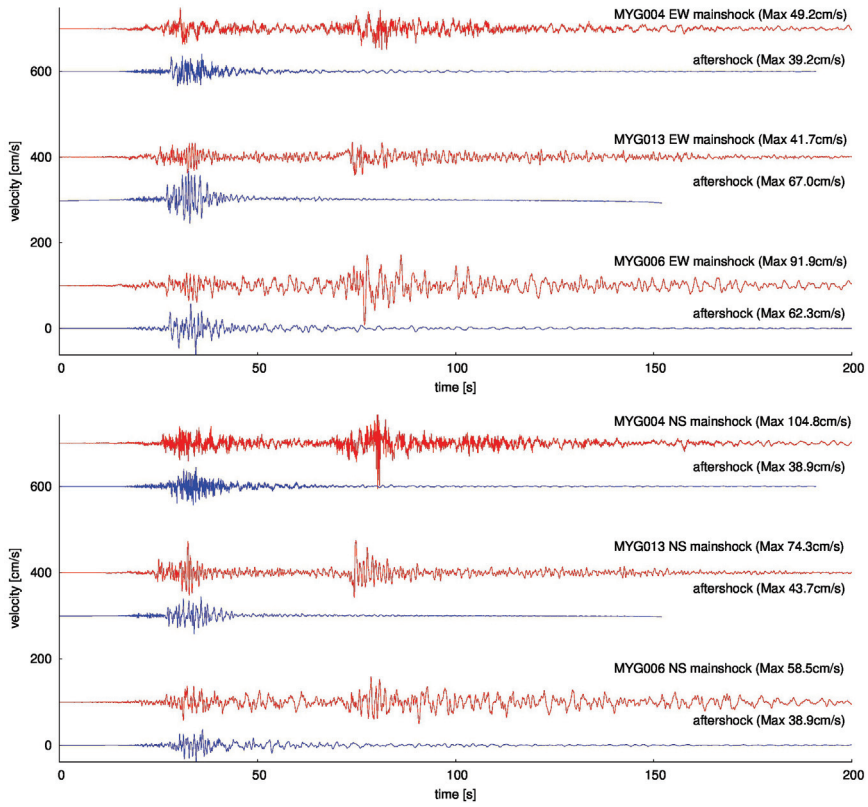


図 4.2.7-3　K-NET 築館（MYG004），K-NET 仙台（MYG013），K-NET 古川（MYG006）における本震と余震（4/7）の速度波形の比較（上　EW 成分，下　NS 成分）

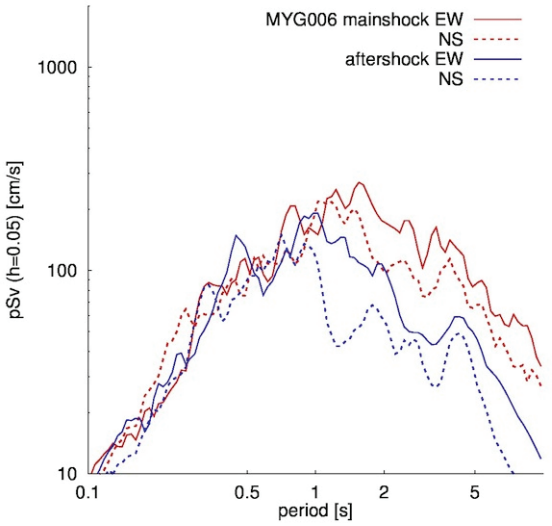


図 4.2.7-4　K-NET 古川（MYG006）における
本震と余震（4/7）の
疑似速度応答スペクトルの比較

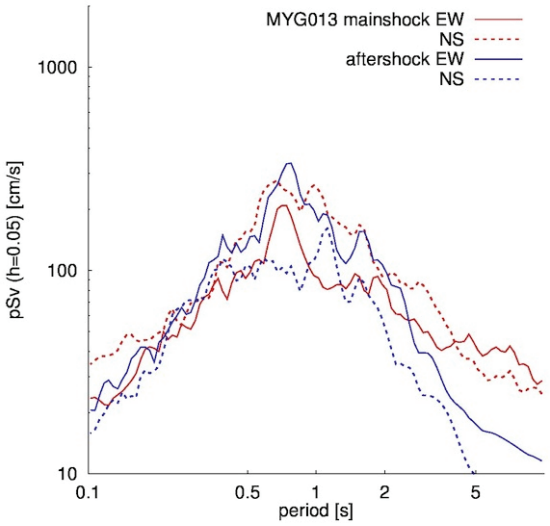


図 4.2.7-5　K-NET 仙台（MYG013）における
本震と余震（4/7）の
疑似速度応答スペクトルの比較

謝辞

防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET，KiK-net），東京大学地震研究所，産業総合技術研究所，港湾空港技術研究所の記録を利用させていただきました．気象庁より発表された震度情報を利用させて頂きました．記して感謝致します．また，調査団の皆様および以下の皆様のご協力のもとには成し得ませんでした．記して感謝致します．

（敬称略）

澤田純男，岩田知孝，古川愛子，浅野公之（以上，京都大学）

盛川仁，高橋章浩（以上，東京工業大学）

福島康宏（エイト日本技術開発）

北佐枝子（東北大学）

鈴木亘（防災科学技術研究所）

参考文献

1)　気象庁　平成 23 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃の三陸沖の地震について（第 2 報），2011

2)　気象庁　「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」の地震について（第 15 報），2011

3)　USGS　Largest Earthquakes in the World Since 1900

4)　気象庁，防災科学技術研究所 Hi-net　気象庁一元化検証値データ

5)　宇津徳治，吉井敏尅，嶋悦三，山科健一郎　*地震の辞典 第 2 版*，pp.166-174，2001

6)　気象庁　気象庁の発震機構解（速報値）

7)　防災科学技術研究所 F-net　地震のメカニズム情報

8)　澤田純男，後藤浩之　地震動予測の現状，土木学会誌，Vol.95，No.11，pp.14-17，2010

9) 国土地理院　平成 23 年 3 月の地殻変動について
10) 地震調査研究推進本部　海溝型地震の長期評価
11) 地震調査研究推進本部　平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震の評価
12) USGS　Finite Fault Model,　Updated Result of the Mar 11, 2011 Mw 9.0 Earthquake Offshore Honshu,　Japan,　2011
13) 名古屋大学地震火山・防災研究センター　NGY 地震学ノート No. 36，2011
14) 八木勇治，西村直樹　2011 年 3 月 11 日東北一太平洋沿岸地震（暫定 Ver2），2011
15) 防災科学技術研究所　平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による強震動，2011
16) 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−，平成２３年（２０１１年）東北地方太平洋沖地震の評価，地震調査推進本部
17) 鈴木亘，青井真，関口春子　近地強震記録を用いた 2011 年 03 月 11 日東北地方太平洋沖地震の震源インバージョン解析，2011
18) Asano, K. and Iwata, T.　Analysis of strong ground motion record from the 2011 off pacific coast of Tohoku, Japan earthquake, SSA 2011 Annual Meeting, 2011.
19) 京都大学防災研究所強震動研究分野　2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震の東日本太平洋沿岸における地震動について，2011
20) 気象庁　「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震」について（第 38 報），2011
21) 防災科学技術研究所　東北地方太平洋沖地震以降の茨城県北部・福島県東部の地震活動，2011
22) 石山達也，佐藤比呂志，加藤直子，八木浩司，宮城豊彦，今泉俊文　2011 年 4 月 11 日の福島県浜通りの地震に伴う地表地震断層について
23) 東京大学地震研究所　2011 年 東北地方太平洋沖地震，2011
24) 防災科学技術研究所　強震観測網（K-NET，KiK-net）
25) 東京大学地震研究所　2011 年 3 月東北地方太平洋沖地震，2011
26) 港湾空港技術研究所　港湾地域強震観測
27) 気象庁　平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震時に震度計で観測した各地の揺れの状況について，2011
28) 日本道路協会　道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002
29) 気象庁　気象庁震度階級関連解説表，2009
30) 盛川仁　2011 年東北地方太平洋沖地震被害調査報告，2011
31) 後藤浩之　平成２３年（2011 年）東北地方太平洋沖地震 地震動に関する被害調査報告，2011
32) 源栄正人　2011 年東北地方太平洋沖地震 -地震被害調査速報-，2011
33) 境有紀　2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と被害調査速報，2011
34) 高橋良和　新幹線高架橋被害調査報告
35) NEXCO 東日本　宮城県沖を震源とする地震に伴う高速道路の状況について

36) 地盤工学会　東北地方太平洋沖地震の災害調査情報
37) 首都高速道路株式会社　東北地方太平洋沖地震による影響及び対応について
38) 鍬田泰子，片桐信　東北地方太平洋沖地震における水道施設被害調査報告
39) NEXCO 東日本　東北地方太平洋沖地震による高速道路の被害と復旧状況について
40) 東北大学大学院理学研究科 地震・噴火予知研究観測センター　2011 年 3 月 11 日 東北地方太平洋沖地震（M9.0）の特集