

地震動による被害からみた 2011 年東北地方太平洋沖地震の特徴

Characteristics of Ground Motions during
the 2011 Off the Pacific Coast of Thohoku Earthquake

盛川 仁

Hitoshi MORIKAWA

東京工業大学 大学院総合理工学研究科

Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

概 要

2011年3月11日14時46分に三陸沖を震源とするマグニチュード9.0の地震が発生した。気象庁により、この地震は「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」と命名されるとともに、この地震によって発生した災害は「東日本大震災」と命名された。被害は主として津波と原子力発電所の事故によるものである。その一方で地震動や液状化などにより河川堤防などの土構造物、新幹線高架橋などの土木構造物や家屋なども甚大な被害を受けている。被害のタイプや被災地域は極めて広範にわたるため、もとより全てを網羅することは叶わないが、本稿では地震動による被害を概観しながら地震動の特徴について述べる。

キーワード：2011年東北地方太平洋沖地震，地震動，震度，被害

1. はじめに

本稿はこれまでに筆者が多くの共同研究者らとともに2011年東北地方太平洋沖地震の地震動やそれによる被害について調査してきた内容を整理してまとめたものです。したがって、本稿に含まれる内容は筆者ひとりの手によるものではなく、共同研究者による極めて多くの貢献によるものである、というとても重要な点を一番最初に強調しつつお断りしたいと思います。特に京都大学防災研究所の後藤浩之博士、東京工業大学大学院理工学研究科の高橋章浩博士、弘前大学大学院理工学研究科の片岡俊一博士による多くの成果が含まれています。本稿のもととなった内容は参考文献をご参照ください[1-7]。

本稿では、最初に東北地方太平洋沖地震を概説し、ついで地震動の特徴を述べます。その後、地震動が引き起こした被害をまとめることで、地震動の特徴を示すことを試みます。しかし、地震発生後1年以上経過した現在においても、被害の全貌を俯瞰することは決して容易ではありません。地震があまりにも巨大であったために、被災地域も被害のタイプも広範にわたり、簡単に一言で特徴を示すことなど到底できません。そのため、これを簡潔にまとめることは筆者の能力をはるかに超えており、どうしても個別の事象について述べることになってしまいます。

それでも少しでも全体が俯瞰できるように、各種機関において整理され、公表されている被害の統計的な情報を整理することでその大きさ及び空間分布を伝えたいと思います。さらに、個別の事象については、筆者が共同研究者らとともに地震直後に行った被害調査の一部を示しながら、そのとき、その場所でのどのような地震動であったのか、という非常にローカルな現象について、被害から推定される特徴を可能な範囲で述べます。

2. 地震の概要

3月11日14時46分に三陸沖を震源とした「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)」が発生しました。この地震のマグニチュードはMw9.0であり¹、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4番目の規模の地震でした。

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ています。地震調査研究推進本部は、2011年1月時点で30年以内に宮城県沖でその地域最大規模の地震が発生す

¹Mwはモーメントマグニチュードの意で、地震が放出したエネルギーと直接関係のある物理量です

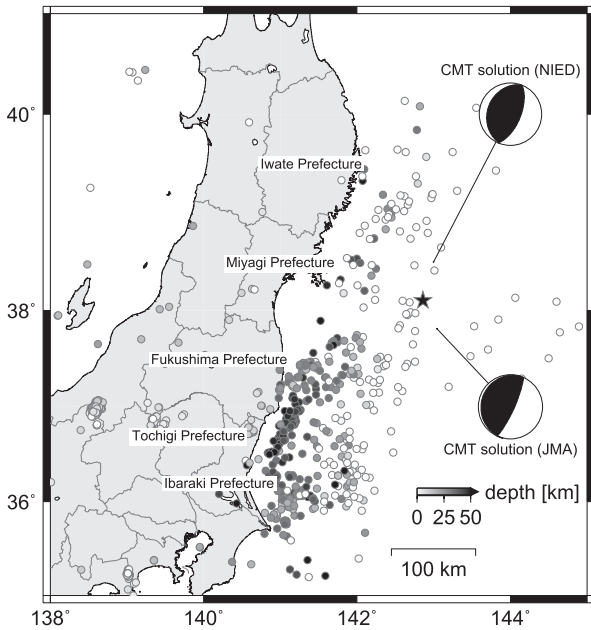


図1 本震発生後 24 時間の余震の震源位置の分布。CMT 解は気象庁と防災科学技術研究所 (F-net) による。

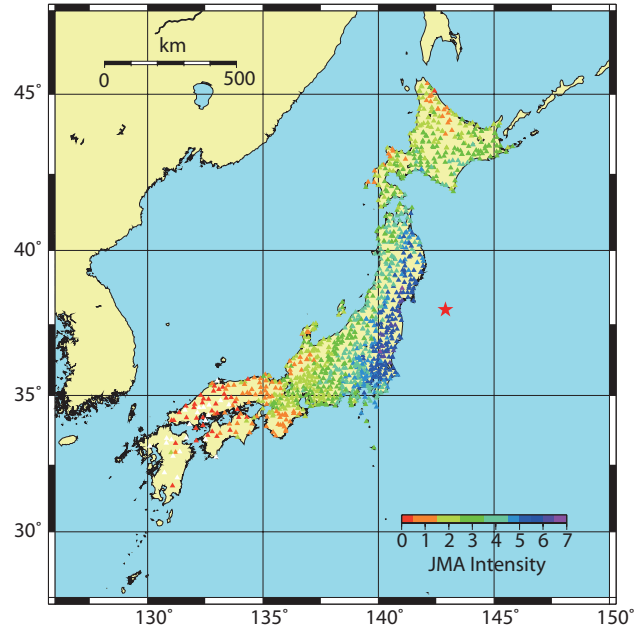


図2 本震による震度分布

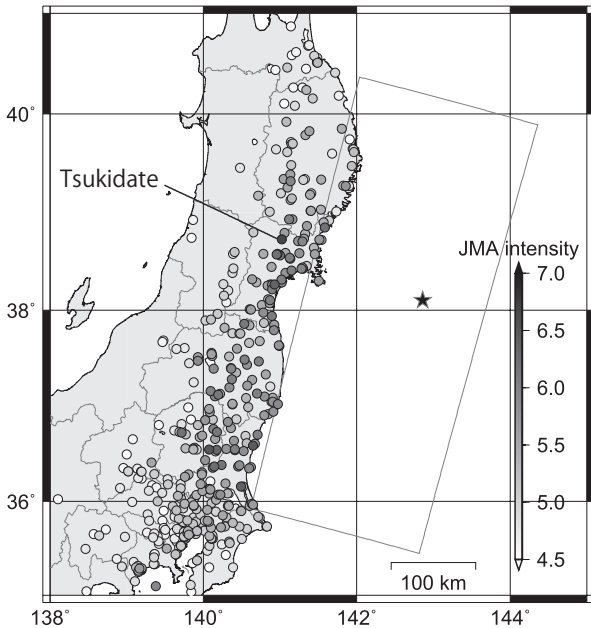


図3 震度 5 以上を記録した地点の分布。四角い枠は震源断層のうち、最大加速度 (PGA) が大きかった上位 10 地点の加速度と計測震度。

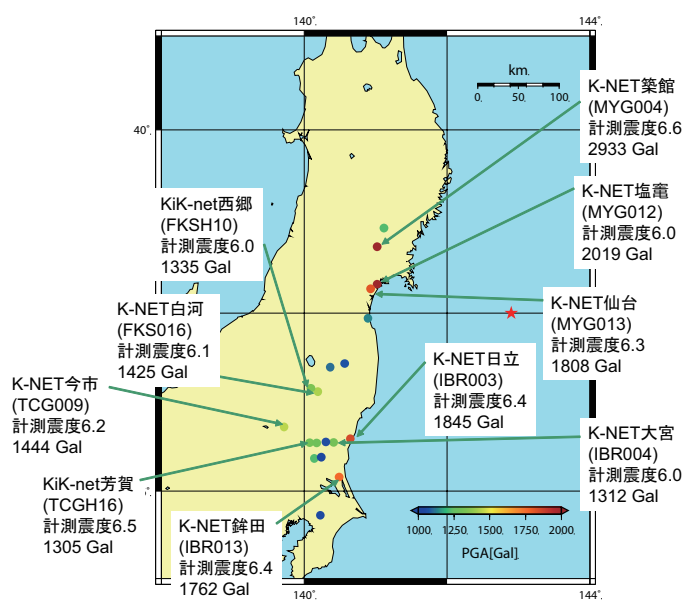


図4 防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net による観測記録のうち、最大加速度 (PGA) が大きかった上位 10 地点の加速度と計測震度。

る確率を 99%と予測していました。しかしながら、2011 年 3 月 11 日の地震では想定震源域に留まらず、三陸沖中部から南へ三陸沖南部海溝寄り、福島県沖、茨城県沖に至る南北 500km、東西 200km にも及ぶ範囲で断層が破壊したと考えられています [8]。

2011 年 3 月 11 日の本震後、24 時間の余震の震源分布と本震の震源メカニズム解 (CMT 解) を図 1 に示します [8]。余震の震央分布は断層面にほぼ対応していると考えられ、東側は浅く、西へ向って低角で深くなっていることがわかります。これは、この地震がプレート境界において発生したものであることを示しています。また、CMT 解からは西北西-東南東方向に圧縮軸をもつ低角の逆断層型の震源であることがわかります。

このように非常に広い範囲で断層が動いたため、大きな被害をだした 1978 年宮城県沖地震と比べてもケタ違いに大きい規模の地震となり、広い範囲で強い地震動が観測されました。実際、2011 年東北地方太平洋沖地震による地震動は中国・四国~九州地方のごく一部を除く日本のほぼ全域で有感、東北地方から関東地方の大部分を含む極めて広い範囲で震度 5 弱以上を記録しています [9]。図 2 に防災科学

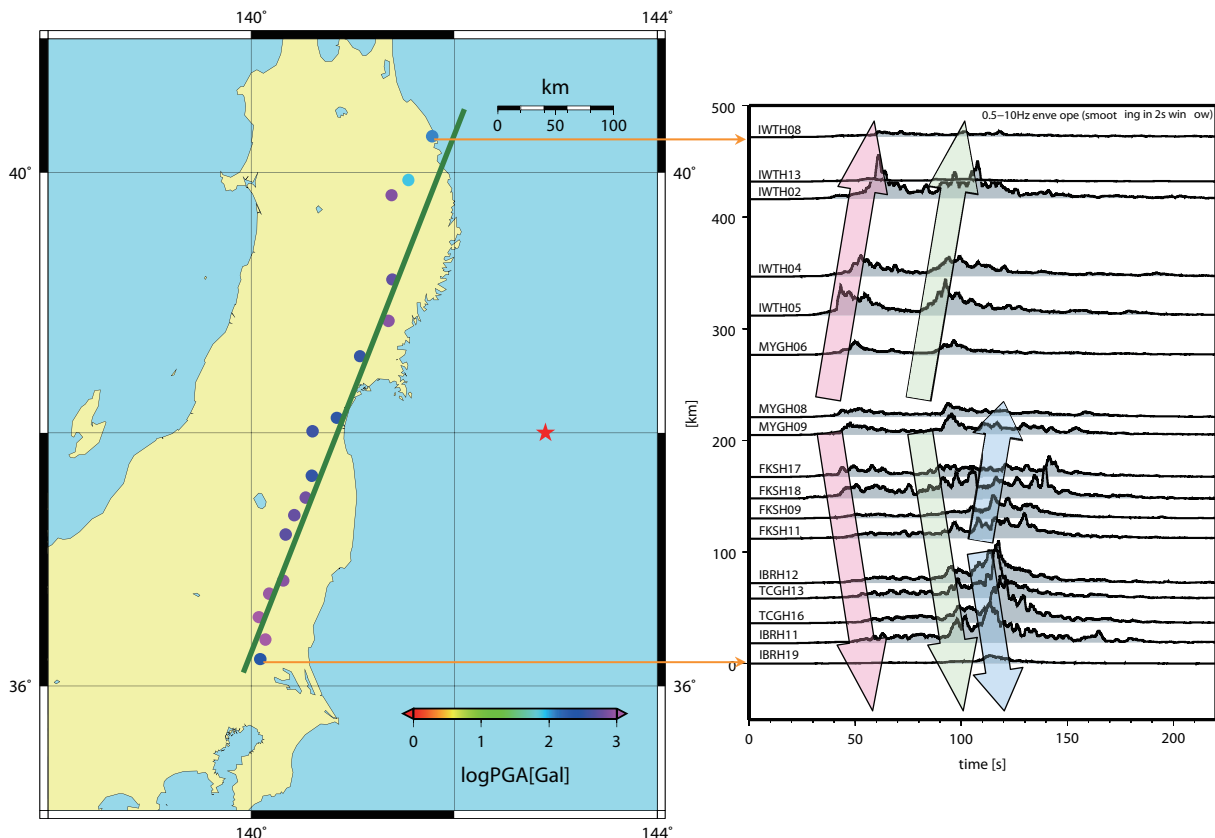


図5 KiK-net 観測点で得られたポアホール底面での加速度記録の包絡形状。観測点は断層面とほぼ平行で、記録は東西 (EW) 成分 (すなわちほぼ断層直交方向) を示している。左図の加速度の値は地表面での PGA で、スケールは対数である。

技術研究所の K-NET システムによって観測された加速度記録から計測震度を計算したものを示します。また、宮城県栗原市において震度 7、宮城県から栃木県に至る太平洋側の多くの地域で震度 6 強が記録されたことから、極めて大きな地震であったことが理解されるでしょう。

図 2 に示す震度分布はちょっと見にくいので東北地方において震度 5 以上を記録した地点を図 3 に示します。この図を見ると、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ます。防災科学技術研究所の強震動観測ネットワークである K-NET および KiK-net 観測点で得られた本震の加速度記録のうち最大加速度 (PGA) が大きかった上位 10 地点を図 4 に示します。PGA が大きい地点も震度分布と同様に宮城県と福島県～茨城県に位置しているように見えます。

その原因として、震源断層が一様に破壊したのではないことが考えられ、例えば、気象庁が遠地の地震動記録を用いて分析した結果では、3 つの破壊が連続して発生したと報告されています [10]。図 5 に KiK-net のポアホール底面の地震計によって記録された加速度波形の包絡線を示しています。包絡線の計算には 0.5–10Hz の成分をバンドパスフィルタで取り出した後、Hilbert 変換を用いて包絡線を求め、さらに 2 秒の時間窓で平滑化しています。

図中には解釈をしやすいように 3 つの矢印を入れています。発震と同時に震央から伝播していく波群がみられ、さらにその数十秒後にほぼ同じ場所から別の波群が伝播しています。さらに、福島県沖を起点とする 3 つめの波群も見られます。この 3 つめの波群は、茨城県付近では 2 つめの波群とほぼ同時に到達しており福島県～茨城県の県境付近では大きな振幅となっています。

このように、震源断層上での破壊の進展の不均質性が特定の地域で大きな地震動を記録した原因のひとつであると考えられます。最近のより詳細な研究では、5 つ程度の大きな破壊を仮定しているものもありますが [11]、大筋では上のような解釈で本質ははずしていないと考えられます。

3 月 11 日の本震以降、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ました。本震が発生した 3 月 11 日にはマグニチュード 7 以上の余震が 3 回発生し、さらに 4 月 7 日には最大震度 6 強の地震 (M7.1) が宮城県沖で、4 月 11 日には最大震度 6 弱の地震 (M7.0) が福島県浜通りで発生しています。余震以外にも、本震との直接的な関係が証明されているわけではありませんが、誘発地震と考えられる地震も発生しています。本震の翌 12 日には長野県と新潟県県境付近で M6.7 の地震 (最大震度 6 強)、さらに 15 日には静岡県東部を震源とする M6.4 の地震 (最大震度 6 強) などが発生しています。

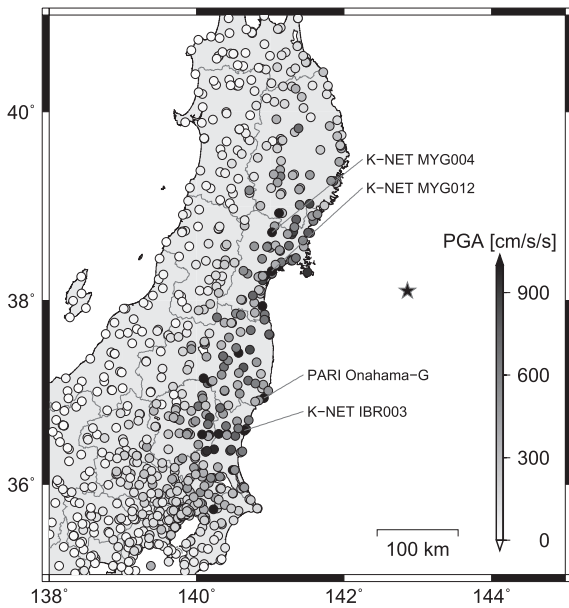


図6 水平成分の最大加速度の分布

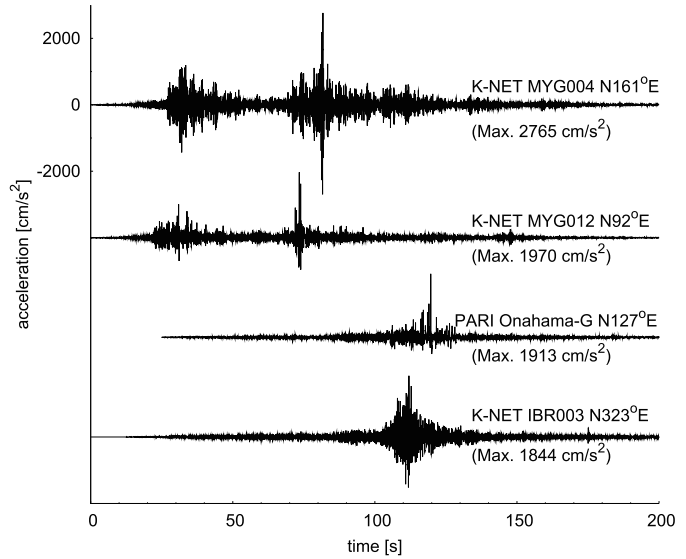


図7 PGA が大きい4地点の加速度波形(最大値が大きい成分)

3. 地震動の概要

図6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, 気象庁によって観測された各地の最大水平加速度を表しています。先述した震度分布と同様に, 宮城県, および栃木県から茨城県にかけての2地域で大きな最大加速度値が観測されていることがわかります。

本震では, 図6からも読み取れるように, 水平最大加速度が $980 \text{ cm/s}^2 (= 1 \text{ G})$ を超えた記録が18地点で得られています。最大加速度値の上位4地点, すなわちK-NET 築館(MYG004), K-NET 塩釜(MYG012), 港湾地域強震観測小名浜事-G(PARI Onahama-G), K-NET 日立(IBR003)で得られた記録を図7に示します。これらの観測点の位置は図6に示されています。宮城県内の2地点の記録には, 大震幅の区間が2つ認められ, 震源断層における最初の2回の破壊に対応するものと考えられます。一方, 震央の南側に位置する小名浜事-GとK-NET 日立的記録には大震幅の区間は1つだけしか見られません。これは3つ目の破壊に対応するものと考えられます。

本震後の3月中にこれらの大きな加速度を記録した観測点のうちK-NET 築館およびK-NET 日立周辺の被害調査を行いました。構造物の完全な倒壊のような甚大な被害の割合は極めて低く, 軽微な被害にとどまっていました。

図8にK-NETおよびKiK-netの観測記録のうち3成分合成の最大加速度が大きいものから10地点を選んで大きい方の水平動成分の加速度応答スペクトルをまとめて示しました。これらの10観測点は図4に示したものです。図中には, 1995年兵庫県南部地震の際にJR 鷹取駅で得られた記録²から求められた加速度応答スペクトルと, 道路橋示方書に示されているレベル2の設計用地震動用応答スペクトル(Type IとType II) [12]をあわせて示しています³。この図を見るとわかるように, 極めて大きな加速度を記録した地点では, 短周期領域に大きなピークがあって, 1秒よりも長周期側の応答スペクトルの値はあまり大きくないことがわかります。0.1~0.5秒程度の短周期領域では設計用のレベル2地震動を大きく上回っている一方で⁴, 1秒よりも長い周期領域ではレベル2地震動を大きく下回っています。鷹取駅の記録のピークである1~2秒程度の範囲では本震の記録は鷹取駅の記録に比べて1/2~1/10程度の応答振幅にすぎません。

大きな地震では長周期成分が卓越する, というのは地震学における常識と言っても過言ではないと思いますが, 大方の予想に反して非常に短周期がリッチな周波数特性の記録が得られています。そのため, 最大加速度が非常に大きかったにも拘らず構造物に対する影響はそれほど大きなものではなかったのではないかと予想されます。

²震度7と判定されたエリア内で得られた記録です。周辺では木造建造物の甚大な被害がみられました。

³Type IIの設計用地震動が兵庫県南部地震の際に得られた記録の包絡形状によって定められているため鷹取駅での応答スペクトルと非常によい対応を示しています。

⁴なかでもMYG004(築館)の応答スペクトルは突出して大きな応答振幅です。

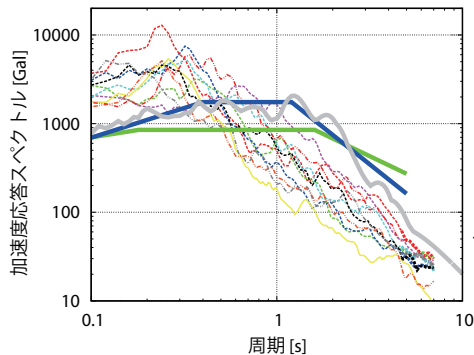


図8 PGA が大きい 10 地点の加速度応答スペクトル (応答が大きい成分)。太曲線は 1995 年兵庫県南部地震の際の JR 鷹取駅の記録。また、2 本の太折れ線は道路橋示方書のレベル 2 の設計用地震動。

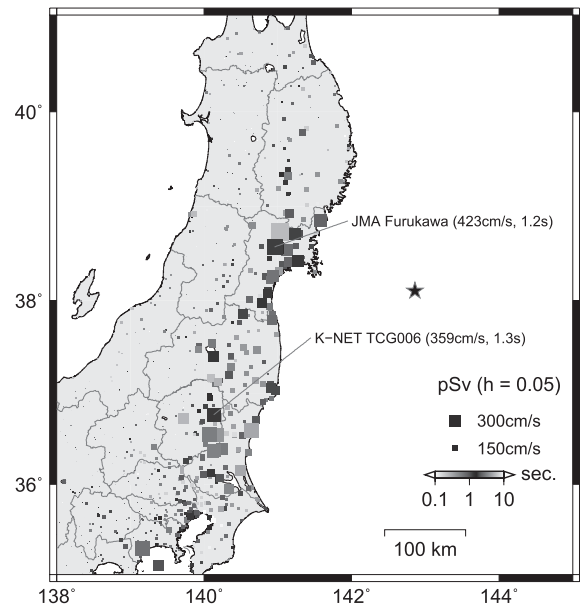


図9 疑似速度応答スペクトルの最大値と最大値を与える周期の分布。最大値はプロットの大きさで、周期はプロットの濃淡で表わしている。周期は 1.0 ~ 2.0 秒が最も濃い。

地震動による被害は地震動の周期特性と密接な関係があると考えられます。そこで、疑似速度応答スペクトルの最大値と最大値を与える周期の分布を図9に示します。この図では大きなプロットほど応答のピークの値が大きく、色が濃いプロットほどピーク周期が1~2秒に近いことを表わしています。上のような考察によって、この周期帯域に大きなエネルギーを持つ地震動が木造構造物などの被害の多寡に関係していると考えられるからです。図からわかるとおり、1~2秒程度に疑似速度応答スペクトルの大きなピークを持つ観測点は JMA 古川と K-NET TCG006 (小川) であることがわかります。

これら2地点の疑似速度応答スペクトルを鷹取駅の記録と共に図10に示します。いずれの記録も1~2秒付近にピークをもち、そのピークの値は鷹取駅の記録に非常に近いことがわかります。TCG006周辺の被害状況については筆者が自身で十分な調査をしていませんので、現時点ではなにも述べることができません。しかし、1~2秒の応答に着目して TCG006 (小川) 周辺の被害調査を行った岡本・鎌田 [13]によると、地震計を含む地区の被害は全壊1戸を含む全半壊率はそれなりに大きかったということです⁵。また、JMA 古川の周辺では木造家屋の倒壊などの甚大な被害が多く見られました。古川は震度7を記録した K-NET 築館から南にわずか20 kmほどしか離れていませんが、それにもかかわらず地震動特性に大きな違いがあり、その結果として、被害にも大きな違いが出ていることがわかります。

図9の関東地方のプロットを見るとピークの値はそれほど大きくはないのですが、色の濃いプロットが多数あることがわかります。これは、関東平野が非常に厚い堆積層によって構成されていること、液状化によって地盤が非線形挙動を示したことにより長周期成分の地震動が卓越したことなどの理由が考えられます。

先に述べた通り、震源断層は500 x 200 kmという大きなものでしたが、破壊伝播速度をおよそ3 km/sとすると破壊が端から端まで達するのに単純計算で500/3 ≈ 170秒はかかることとなります⁶。液状化現象は振動の繰り返し回数に大きな影響をうける、と考えられています。したがって、この本震のように断層の破壊が長く継続するような地震の場合、非常に大きな振幅で長い時間揺すられることになり液状化しやすくなります。図11には東京湾周辺の K-NET 観測点で得られた記録を示しています。K-NET CHB008 (浦安) では50 cm/s²以上の大きな加速度が1分近くも継続しています。また、K-NET CHB024 (稲毛) では記録の100秒のあたりで突然周波数特性が変わって長周期が卓越する震動になっています。しかも、長周期成分が卓越している記録のなかのところどころスパイク状の波形が見えます。これは液状化地盤に特有の現象であると考えられ、この観測地点で液状化が発生したものと考えられます⁷。

⁵統計的な有意性などについての今後の研究が待たれるところです。

⁶もちろん断層の破壊はそんなに単純な話ではありません。とはいえ、断層の破壊には160秒ほどを要したという研究結果もあります。

⁷このような現象をサイクリックモビリティと言います。震動により間隙水圧が上昇して砂の粒子が地下水の中で自由に動けるようになると液状化状態になります。しかし、砂粒は常に自由に動いているわけではなく、それ自体が有限の体積を持つ

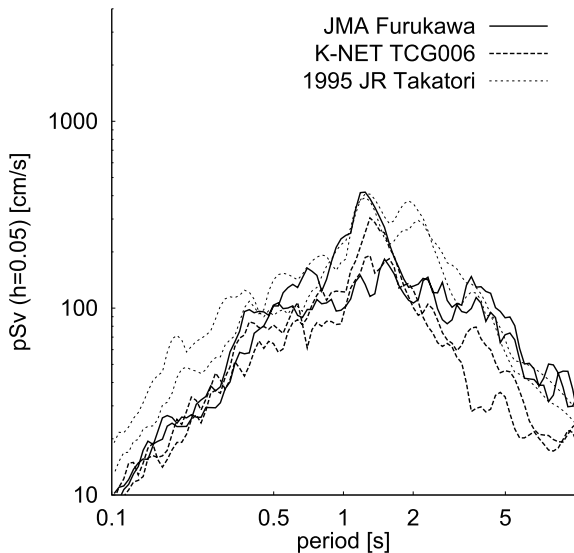


図10 疑似速度応答スペクトルの比較

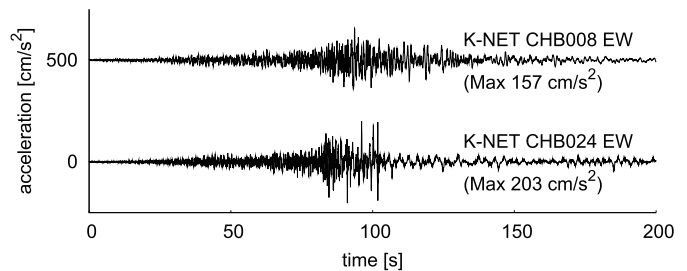


図11 東京湾周辺での加速度記録の例 (上: CHB008(浦安), 下: CHB024(稲毛))

表1 都県別の被災建築物応急危険度判定結果

	危険 (赤)	要注意 (黄)	調査済 (緑)	計
岩手県	168	445	459	1,072
宮城県	5,088	7,511	37,968	50,567
福島県	3,299	6,675	5,765	15,739
茨城県	1,561	4,684	9,618	15,863
栃木県	676	1,845	2,658	5,179
群馬県	30	61	19	110
埼玉県	0	42	83	125
千葉県	677	1,625	3,213	5,515
東京都	59	137	252	448
神奈川県	14	81	446	541

表2 国管理河川における被災箇所数 (堤防・護岸のみ, 2011年5月6日現在)

	水系	総数	緊急復旧	堤防延長 (km)
東北地方	馬淵川	7	0	19
	阿武隈川 *1	123	6	222
	名取川 *2	32	0	35
	北上川 *3	521	11	472
	鳴瀬川 *4	300	9	152
	(小計)	983	26	900
関東地方	久慈川	100	11	85
	荒川	5	0	302
	那珂川	110	7	115
	利根川 *5	540	30	1,435
	(小計)	755	48	1,937
	(合計)	1,738	74	2,837

*1 阿武隈川, 白石川など

*2 名取川, 広瀬川など

*3 北上川, 旧北上川, 江合川, 新江合川, 磐井川など

*4 鳴瀬川, 鞍坪川, 多田川, 吉田川など

*5 利根川, 江戸川, 鬼怒川, 小貝川, 霞ヶ浦, 渡良瀬川など

4. 地震動による被害

4.1 被害の概要

東北地方太平洋沖地震による被害の全容を的確にまとめることは、地震後1年を経過した今日であっても容易なことではなく、どう考えても筆者の能力をはるかに超えています。したがって、各機関において整理・公表されている被害の統計的な情報を整理することで、地震動および地震動による被害の大きさの片鱗を伝えることができると考えています。その後、地震直後に調査を行って得られた個別の被害事例について列挙しておきたいと思います。

被災建築物応急危険度判定の結果は、地震動によってどのような被害があったかを広域的に知るためにある程度有用であると考えられます。応急危険度判定は対象建物が危険であるかどうかを判定することが目的ですから、構造物の被災程度と必ずしも一致するものではありません。対象構造物が無被害であっても周辺構造物の影響によってなんらかの危険が予想される場合には危険と判定されることも少なくありません。従って判定結果の多寡が被害の多寡を表しているわけではないものの、被害との相関は

ているため、それらが移動中に互いに突然噛み合っ力を伝えることができるようになることがあります。このようなときに、加速度波形はスパイク状のピークを示すのです。

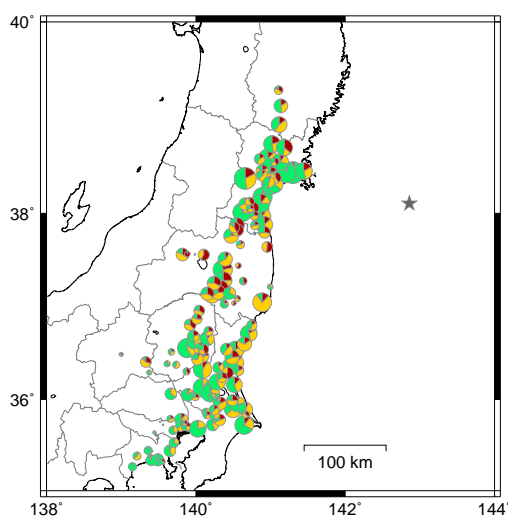


図12 市町村別の被災建築物応急危険度判定結果

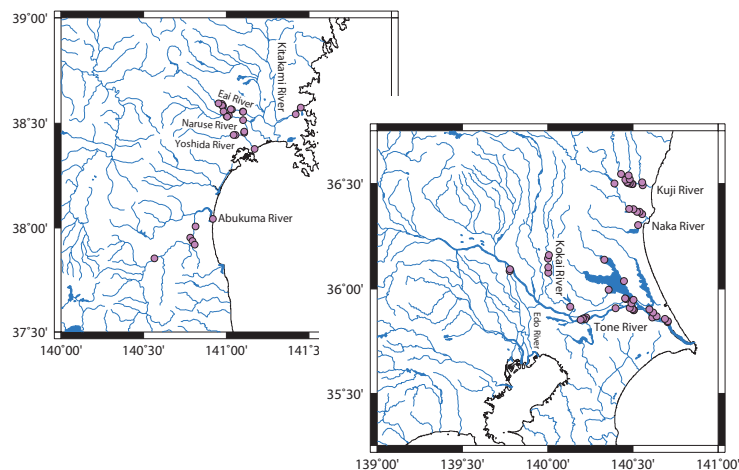


図13 国管理河川において堤防の緊急復旧が実施された箇所(左：東北地方, 右：関東地方)

ある程度期待できると考えています。

地震直後から、表1に示す10都県149市町村において延べ8,489人の応急危険度判定士によって95,159件の判定が実施されました[14]。図12に市町村ごとの危険度判定結果を示します。これらの判定結果は津波による被害か地震動による被害か、の区別はされていません。市町村の役場の位置に調査結果がプロットされており、円の大きさは調査件数、円内の赤、黄、緑の各色はそれぞれ危険、要注意、調査済の割合を示しています。調査地域が必ずしも一様ではありませんが、福島県～栃木県北部の内陸部、茨城県の北部が相対的に被害が大きかったように見えます。また、これまでに示した震度や最大加速度の分布と比較することで、被害の傾向と、震度や最大加速度といった比較的良好に利用される地震動指標の空間分布の関係が必ずしも単純な関係で結び付けられるものではないこともわかつて思います。

河川については、東北地方及び関東地方の太平洋側広範囲において、河川施設(主に堤防)が多数被災しました。国管理河川における堤防・護岸の被災箇所数のまとめたものを表2に示します[15]。表中、緊急復旧の列は、緊急復旧工事实施箇所(水門等を除けば、東北地方で29箇所、関東地方で23箇所)と関東地方における大規模な被災箇所(25箇所)を合わせた箇所数となっています[16,17]。これらは、クラックが計画高水位より深い地点まで達しているところや、沈下により計画高水位よりも堤防高が低くなってしまった箇所、夏場の出水期に備えて復旧工事を実施した箇所であり、延長にして関東地方で21 km程度、東北地方で12 km程度でした。

被災箇所数を堤防延長で割って、単位延長あたりの被災箇所数を計算すると、最も多いのが鳴瀬川水系で2弱/km、名取川、北上川、久慈川、那珂川の各水系で1前後/kmとなっています。被災箇所の多くは大きな崩壊等を伴わないものですが、箇所数がいかに膨大であるか、がこの数字からもよく理解されます。国管理河川において堤防の緊急復旧が実施された箇所を図13に示します。被災箇所は東北地方では宮城県北部の大崎平野(鳴瀬川と江合川の氾濫によって形成された沖積平野)、関東地方では久慈川、那珂川、利根川の下流域に集中しています。地震直後の被害調査の際に見た限りでは、河川堤防の大規模な被害の多くは噴砂の発生状況から堤防の基礎地盤の液状化が原因と考えられます。ただし、堤防構築時に軟弱基礎地盤が沈下したため、堤体自体が液状化したと判断される事例も散見されました。

鉄道については、JR東日本が公表している被害を表3にまとめました[18,19]。在来線については津波をうけた7線区の被害は含まれていません。在来線と新幹線の被害項目については必ずしも同一項目で整理されているわけではありませんが、対応すると思われるものを筆者がまとめて一覧表としています。新幹線ではそのほとんどが電化柱の損傷や架線の断線、変電設備の故障といった電気設備に関わる被害であり、高架橋や橋脚の損傷などの土木構造物の被害は仙台駅以北に限られていました。ただし、被害箇所数をもっとも多かったのは福島～仙台間で約390箇所あり、全体の約1/3を占めています。

一方、在来線では軌道変状などの土木構造物の被害も少なくなく、新幹線とは異なる被害の傾向を示していることがわかります。また、線区ごとの被害箇所数は東北本線で約1,700箇所、常磐線(津波による被害区間および福島第一原子力発電所の30km圏内の区間を除く)で約1,280箇所あり、これら2線区だけで在来線の被害の7割近くを占めており、被害の発生箇所も広域にわたっています。

高速道路等では、20路線、延べ870 kmの区間において交通の支障となる被害が確認されています[20]。

表3 3月11日の本震によるJR東日本の被害(いずれも概数)

	在来線	新幹線
軌道変状	2,200	20
電化柱の折損・傾斜・ひび割れ	1,150	540
防音壁の落下・傾斜・剥離	-	10
道床碎石流出	220	-
乗降場変状	220	-
盛土・切土等土工設備の変状	170	-
信号・通信設備の故障	130	-
橋梁・高架橋の損傷	120	130
駅舎の損傷	80	5
トンネルの損傷・ トンネル内の軌道損傷	30	2
変電設備の故障	30	10
落石	20	-
乗換こ線橋等停車場設備の損傷	20	-
架線の切断	10	470
	4,400	1,200

表4 高速道路の主な被害の内容

被害内容	箇所数など	備考
道路本体・路面の崩壊	2箇所	
道路本体の大規模クラック	13箇所	
路面の陥没	23箇所	最大 30 cm
2cm以上の路面の段差	174箇所	最大 100 cm
橋梁支承部の損傷	3橋 5支承	
橋梁ジョイント部の損傷	46橋 56箇所	



図14 堤体の液状化により沈下した堤防(洶沼川左岸 8.0k 付近。茨城県東茨城郡茨城町下石崎)



図15 江合橋左岸下流側の堤防盛土の被害



図16 鹿島臨海鉄道(北浦湖畔駅-大洋駅間)の盛土部の被害

被災した高速道路は、北は岩手県から南は千葉県にまで及んでいます。主な被害として発表されているものを表4に整理しました。表に示した項目のうち、被災箇所がすべてわかるものは「道路本体・路面の崩壊」と「道路本体の大規模クラック」の2項目でした。前者は水戸-那珂(常磐道上り線)、矢吹-須賀川(東北道下り線)の2箇所、後者の13箇所はすべて白河-本宮間(東北道)にありました。

4.2 個別の被害について

個別の被害状況を詳細に述べることはもとより無理な話ですので、筆者がこれまでに共同研究者とともに調査した被害の一部についてまとめることで、地震動の特徴を理解するための一助としたいと思います。

(a) 霞ヶ浦(洶沼川)堤防の被害

河川堤防の大規模な被害は、多くの場合、堤防下部の基礎地盤が液状化することによって生じていますが、堤防本体が液状化する場合も決して少なくありませんでした。後者については、基礎地盤が粘土等の液状化しない軟弱地盤で構成されている場合に堤防構築によって堤防直下の基礎地盤が大きく沈下し、堤防下部が液状化しやすい状態になっていることがあります。洶沼川の干拓地を取り囲むように構築された堤防では1m以上の沈下とともに大きな開口部を伴う縦断クラックが多数発生しました(図14)。基礎地盤には10m程の厚さの粘土地盤があり、基礎地盤が液状化するような状況ではなかったことから、堤体の液状化が主たる被災原因と考えられます。

(b) 江合橋の被害

江合川にかかる県道1号線の橋梁である江合橋の周辺では堤防の被害が多く見られました。図15は江合橋左岸下流側の堤防の様子です。堤防は側方に大きく変形するとともに大きな沈下を生じており、その結果、堤防天端部に設けられた路面には多数のクラックが発生し、不同沈下を生じていました。地震発生時に信号待ちをしていたと思われる車両は、不同沈下によって移動ができなくなってしまい、乗り捨ててある状態でした。基礎地盤は砂質シルトや粘土で主に構成されていて、細粒分を多く含む噴砂が



図 17 鹿島臨海鉄道（貨物線，神奈川市内）の被害



図 18 ひたちなか海浜鉄道湊線（金山駅-中根駅間）の線路変状



図 19 栗原市築館における被害の様子。



図 20 白河市内での埋設管の埋め戻し土の液状化による被害。奥の住家は大きく傾斜している。



図 21 日立市内の海岸近くの墓地における墓石の転倒。海岸線に平行に並んでいる墓石はほとんどが転倒している。奥の住家の棟瓦が落下しているが、周囲の住家に大きな被害は見られない。



図 22 K-NET 銚田観測点の様子。奥の住家の屋根にブルーシートがかけられているのが見える。

クラック内に見られたことから、堤体や砂質シルト層の液状化が堤防大変形の要因の一つであったと考えられます。

(c) 鹿島臨海鉄道の被害

鹿島臨海鉄道は多くの箇所では被害を受けましたが、もっとも大きな被害を受けたのは、北浦湖畔駅-大洋駅間の山間部を通過する区間および、神奈川市内を通る貨物線区間でした。前者については、谷部を通過する区間の盛土が大きく崩壊した（図 16）。崩壊部の周辺は水が多く出ており、この谷部を走る水脈の影響があったのではないかと、この話を復旧工事の現場で聞きました⁸。一方、貨物線の被災箇所は勾配がほとんどない平坦な場所でした。線路が大きく曲がっている箇所が多数ありましたが（図 17）、周辺地盤を見ると、西側の公園の池（湖）に向かって地盤が大きく移動しており、これが線路の変状に影響を与えたものと考えられます。

(d) ひたちなか海浜鉄道

ひたちなか市の勝田駅から那珂湊駅を経て阿字ヶ浦駅を結ぶひたちなか海浜鉄道湊線は地震から 4 ヶ月以上経過した 7 月 23 日ようやく全区間の営業運転が再開しました。沿線の多くの箇所では被害を受けていましたが、図 18 にその一例として金山駅-中根駅間の線路変状を示します。図 18 は那珂川の支流である中丸川に沿って平行に発達した河岸段丘にはさまれた谷部の中丸川に沿って走る区間です。この区間では多くの場所で線路の大きな変状が見られました。周辺地盤にはまったく変状が見られず、振動によってパラスト（砕石）や線路が大きく揺られて変形したものと考えられます。周辺の地形から地震動が増幅されやすいなどの影響も考えられます。

(e) 最大加速度が大きかった地域の被害

観測された地震動の最大水平加速度が最も大きく、かつ震度 7 を観測した栗原市築館の市街地では、軽微な被害がわずかに確認されたただけでした（図 19）。築館の K-NET 観測点（MYG004）で記録された最大化速度は 3 成分合成値で 2933 Gal でほぼ 3 G でした。築館地域で見られた被害は、ブロック塀の転倒、民家の外壁の剥離、窓ガラスの割れ、被りコンクリートの亀裂、道路の陥没などでした。公共構造物で

⁸細かい調査をするよりも復旧が最優先であったので原因がどの程度解明されているのかははっきりしません。



図 23 登米市佐沼における被害の例



図 24 大崎市古川における被害の例



図 25 仙台市宮城野区における被害の例



図 26 神栖市掘割川周辺の液状化による被害



図 27 香取市佐原の河川の液状化による被害



図 28 那珂川河口付近の護岸の崩壊

は、栗原市役所において建物まわりの地盤の沈下、エンロランスホールの柱の外壁の剥離がみられましたが、栗原文化会館、築館総合支所などには外観からは被害は見られませんでした。

福島県白河市では K-NET 観測点において大きな地震動 (3 成分合成の最大加速度で 1425Gal, 震度 6 強) が記録されていますが、その加速度から一般に想像されるような甚大かつ広域的な被害は見られませんでした。もちろん、瓦屋根のずれなどの軽微な被害は市内のいたるところで見られ、局所的には重大な被害も生じています。たとえば、古い木造住家の崩壊や落石による道路閉塞などです。しかし、新耐震設計基準以前に建てられたと思われる古い住家についても外観からは重大な被害を受けたと判断されるものはごく少数でした。また、下水管などの埋め戻し土の液状化なども局所的には見られました (図 20)⁹。

茨城県日立市の K-NET 日立観測点では三成分合成の最大加速度が 1845 Gal, 震度 6 強という大きな地震動を記録しました。日立駅周辺では建造物の非構造部材 (壁や瓦) の落下やブロック塀の転倒などが見られましたが、倒壊などの重大な被害は目に付きませんでした。常磐線よりも海側は海岸に向かってほぼ平坦であるものの、海岸部分で数十メートルの絶壁となっています。日立駅近くの墓地では墓石の大きな被害は見られなかったものの、海岸の絶壁上の墓地では海岸線に平行に並んでいる墓石がほとんど全部転倒していました。これは地震動が地形に大きく影響を受けたことが原因ではないか、と考えられます。ただし、周囲の木造住家には瓦のずれなどの軽微な被害が見られたものの、大きな被害はありませんでした (図 21)。

茨城県銚田市の K-NET 銚田でも最大加速度 1762 Gal, 震度 6 強が記録されています。地震計は 1m あまりの盛土の上に設置されており、周囲の木造建築は棟瓦の一部がずれている程度の被害でした (図 22)。

(f) 建造物の被害が多く見られた地域

登米市迫町の佐沼地域は、震度 7 を記録した築館より東へ 16 km ほどの場所にあります。この地域では、周辺地域に比べて家屋被害、道路被害等が顕著でした。特に迫川の右岸に沿った西佐沼の佐沼大通り商店街辺りや、小金丁地区で家屋被害が集中しており (図 23)、その一方で左岸には被害が見られませんでした。また、家屋被害の顕著な地区より西の中江地区では、マンホールの浮き上がりや、建物周辺の地盤の沈下といった液状化による被害も見られました。

大崎市古川地区は、築館の南 18 km ほどに位置し、佐沼の南西約 24 km にあります。古川は佐沼とならんで地震動による被害が局所的に見られた地域の一つです。倒壊家屋や、大きな損傷を受けた住家、液状化によるマンホールの浮き上がり、噴砂の痕跡などが随所で確認されました (図 24)。液状化による

⁹ただし、阿武隈川の旧市街地の対岸 (左岸側) では大規模な斜面崩壊などの被害があったということです。



図 29 東京都町田市のスーパーマーケットの立体駐車場の進入路の崩壊

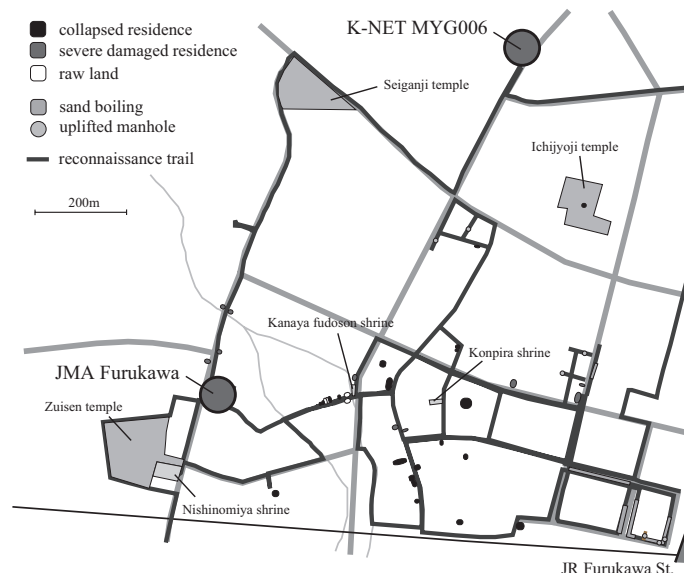


図 30 宮城県大崎市古川地区における被害

被害は古川駅西側の駅前大通りで主として見られ、その西側の古川中里、古川南町、古川荒川小金町などでは木造住家の被害が多数見られました。なお、大きな被害を受けた構造物の多くは新耐震設計規準以前に建てられたと思われる古いものでした。

仙台市宮城野区苦竹地域は、1978年宮城県沖地震で中層建物の被害が集中して発生した地域です。2011年のこの地震では数は少ないものの、RC造2階建て建物の崩壊し、RC柱のせん断破壊などの被害が確認されました(図 25)。この地域の北側には防災科学技術研究所 K-NET 仙台観測点が位置し、観測された地震動は兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の地震動に似たスペクトル特性を持つものでした。

(g) 利根川流域の液状化による被害

利根川の下流域および霞ヶ浦、北浦の周辺ではいたるところで液状化による被害が見られました。利根川左岸の鹿嶋市の広域浄水場(鱈川浄水場)では、施設の地盤のほとんどが液状化し、地下に埋設されている多くの管路が大きな被害を受けていました。また、浄水場の周辺、特に神栖市の掘割川の周辺では広い範囲で液状化による電柱や住家などの傾斜が多数見られました(図 26)。

神栖市より利根川のやや上流の右岸側に位置する千葉県香取市佐原では市内を流れる河川のほぼ全域で噴砂によって河床が埋まっており、護岸も大きく破壊されていました(図 27)。液状化による構造物の被害はさまざまところで見られ、被害が集中している場所があったりするものの、その全容については筆者はいまだに十分な情報を持っていません。

(h) 那珂川河口付近の被害

那珂川の河口付近では大規模な液状化と液状化が原因と考えられる護岸や盛土、住家の被害が見られました。護岸の被害には、構築時期が異なると思われる護岸構造物のうち特定の構造物が被災している場合があり、護岸の構造様式が被害に影響を与えている可能性を示唆しています(図 28)。また、液状化は堤内地に少し入った部分の住宅地に広く見られました。また、那珂川の河口からやや上流の河川敷でも液状化による被害が見られ、特に勝田橋の取り付け部分では液状化によって盛土が大きく崩壊していました。

(i) 東京都内での被害

東京都内でも多くの被害が出ていますが、なかでも、地震直後のはやい段階で報道されていた被害には千代田区九段下の九段会館における天井の落下、および町田市のスーパーマーケットにおける立体駐車場の取り付け部分の崩壊がありました。構造部材の崩壊という観点からは後者のほうが重大な被害であったと考えられますが、いずれの場所も死傷者があったという意味で非常に重大な被害であったといえます。町田市での被害状況は図 29 に示すとおりです。隣接するホームセンターにも同様の立体駐車場があり(図 29 の向かって右側)、その立体駐車場にある消火器の格納箱が転倒または大きく移動していました。ただ、消火器が大きく移動していたのは図 29 に見られる被害のあった近くに限定されているこ

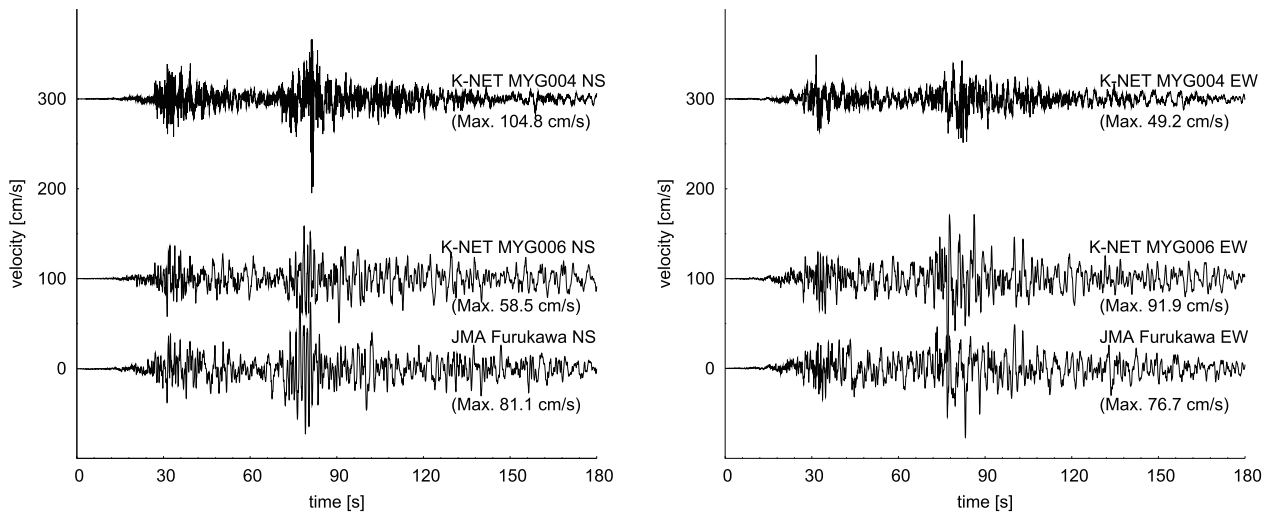


図 31 築館 (MYG004) と古川地区における本震の記録。左が南北 (NS) 成分，右が東西 (EW) 成分。

と、複雑な地形をならして整地していると考えられることなどから、被害のあった周辺のみ局所的に地震動が非常に大きかった可能性も否定できません。慎重な検討が必要だと思われます。

5. 局所的な地震動の不均一性

本震による被害に関しては津波による被害と原子力発電所の事故について話題にのぼることが多いような印象がありますが、これは単にマスコミの興味があたかも社会の興味であるかのようにすり替えられているだけであり、マスコミが興味を持たない部分において非常に多くの被害が埋もれてしまっているように感じられます。そのような被害の例として、地震動によってもっとも大きな被害を受けた地域のひとつである宮城県大崎市古川地区における被害をあげることができるでしょう。図 30 は古川における被害の概要を示しています。全数調査によるものではありませんが、地震直後に筆者とその共同研究者によって詳細に調査をした結果で、全体の被害分布の傾向はある程度示していると思われる。この図からわかるとおり、被害は明らかに南側に偏っていることがわかります。特に、図中の南側の中央部では全壊している古い木造住戸が数多くありました。もちろん、建造物の耐震性が十分出なかったために倒壊したことは間違いはありません(図 24)。しかし、古川よりももっと大きな加速度を記録した他の場所にも同様な古い建造物は多くあって、かつそれらが古川でみられたように際立って目立つような被害を受けていないことを考慮すると、相対的に古川は建造物にとって厳しい地震動であった、と推察されます。

古川では K-NET MYG006 および JMA 古川という二つの観測点で本震の記録が得られています。図 30 からわかるとおり、二つの観測点は互いに 2 km も離れていません。そして、MYG006 はあまり被害がみられなかった場所にあり、JMA 古川は木造住家の被害が多く見られた地域に非常に近接しています。これらの観測点で得られた加速度記録(水平動成分)を一階積分して速度波形としたものを図 31 に示します。図中には参考のために震度 7 を記録した築館(K-NET MYG004)の記録もあわせて示しています。

一見して、築館(MYG004)の記録は短周期成分が卓越していることがわかります。また、古川における二つの記録は非常によく似た波形であることもわかります。これは二つの観測点が非常に近いことを考えれば至極まっとうなことであると言えるでしょう。しかし、詳細に見てみると主要動部分の周波数特性が異なるように見えます。

図 32 にこれらの記録の疑似速度応答スペクトルを示します。既に図 8 や図 11 において見てきたように、築館(MYG004)は短周期成分が非常に卓越しているのに対して古川の記録は 1~2 秒の成分が著しく卓越しています。K-NET MYG006 と JMA 古川は時系列波形はあまり大きな違いがあるようには見えませんが、応答スペクトルで比較してみると MYG006 に比べて JMA 古川のほうが 1~2 秒の周期帯のピークは明らかに大きいことがわかります。このわずかな周期特性の違いが被害の多寡と関係があったかどうかはまだ今後の検討を要しますが、2 km 足らずしか離れていない 2 地点でこれだけ顕著な地震動の違いがある、ということは空間的に広がりを持つ建造物の耐震設計の際の入力地震動を考える際には大きな問題となると考えられます。

そこでこのような地震動の空間的な変動がどのようなものであるかを明らかにするために、筆者は多くの共同研究者とともに、古川においてこれまでにない超高密度地震観測網の設置を 2011 年 9 月より開

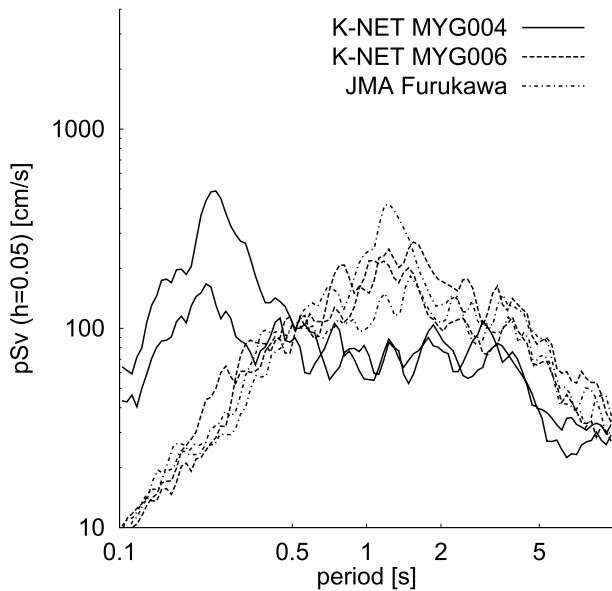


図32 築館 (MYG004) と古川地区における本震の疑似速度応答スペクトルの比較

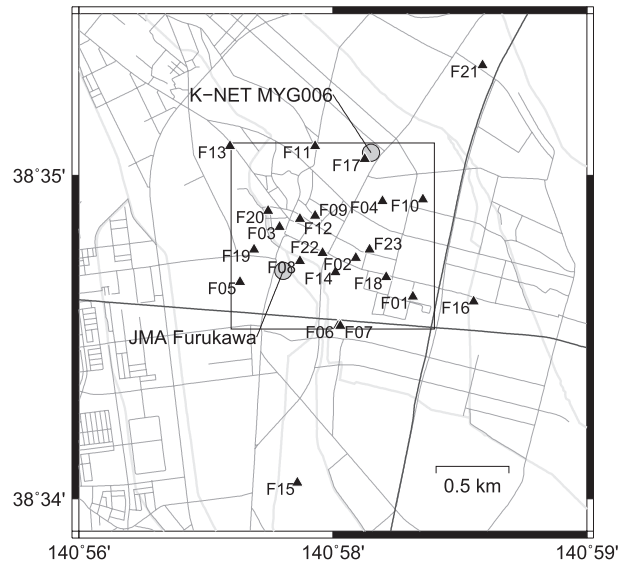


図33 古川地区に設置した超高密度地震観測網 (2012年2月末時点での設置箇所)

始しました。本稿執筆時点 (2012年3月末) で、2 x 3 km ほどのエリアに 23ヶ所の観測点を設置しています。ひとつの地震計がカバーするエリアの平均的な広さは 0.25 km² ほどであり、これまで高密度と呼ばれていた地震観測網に比べて一桁程度密度の高い観測網を構築しています¹⁰。図33に古川における観測地点を示します。図中の内側の枠は、だいたい図30のエリアに対応しています。

観測ははじまったばかりですが、頻繁に余震が起こるため、震度3程度の地震が月に1回ほど、震度2程度の地震が週に1回ほどの頻度で発生しています¹¹。

2012年の正月早々、1月1日に鳥島近海の非常に深い場所で発生した地震の記録を一例として図34に示します。震源が深いため、地震波はほぼ真下から到来しているのではないかと予想されます。しかし、ほとんどの地震計は互いに 200 ~ 300 m 程度しか離れていないにもかかわらず、走時は場所によって異なっているように見えますし、後続波の位相も場所によってずいぶん異なっていることがわかります¹²。

地震ごとに震度を調べてみると場所によって常に大きめの値をとる場所、常に小さめの値をとる場所というようにある程度一定の傾向を持つことがわかりました。イベントにもよりますが、計測震度の違いは最大で 0.6 ほどもある場合があります。つまりわずかに 2 x 3 km 程度の範囲で気象庁震度階が 1 も異なる場合が少なくない、ということです。

そこで、それぞれの地震のイベントごとに各地点の震度の偏差値を求め、すべてのイベントについてその偏差値の平均値を求めて場所による揺れやすさの違いを描いてみたのが図35です。この図の範囲は図33の内側の枠におおよそ対応しています。この図の50のコンターライン (色が薄いところ) がこのエリア内でほぼ平均的な揺れ方をしている場所で、50よりも小さい値をとっている北の方は揺れ方が小さめで、市役所のあるあたり (F03) は特にゆれにくい場所 (標準偏差分ほど小さい) であることがわかります。一方、南側は相対的によくゆれるようで、偏差値が 50 よりも大きくなっています。

震度と被害の相関を単純に議論することはできませんが、揺れやすいところの方が被害が大きい傾向がある、ということと言えるかもしれません。このような地震動の局所的な違いがどのような物理的要因によって発生するのか、という問題はこれまでも長い間議論されてきました。もちろん、地盤構造が違う、ということがその主たる原因であることには間違いがありません。しかし、どのように地盤構造が違うとどのような地震動の違いとなるのか、ということについては、古川の例のように非常に狭い範囲で大きく地震動が異なる場合、これまでの知見だけでは定性的にある程度は説明できたとしても、定

¹⁰たとえば、横浜市の高密度地震観測網は世界でも類を見ない高密度観測ネットワークですが、それでも 2 km² 程度の密度です。ですから、横浜市の地震観測ネットワークでは、地震観測点間の距離が古川にもともとおかれていた 2ヶ所の地震計の距離とだいたい同じくらいということになります。

¹¹これは通常地震観測では考えられない頻度です。例えば、有感地震が比較的少ない関西地方であれば、古川において1ヶ月ほどで観測されるのと同じくらいの数の地震動記録を得るためには1年近くかかるのではないのでしょうか。

¹²地震計の番号は設置順につけているため、地震計の番号が近いからといって物理的に近い距離に地震計がおかれているわけではないことに注意してください。

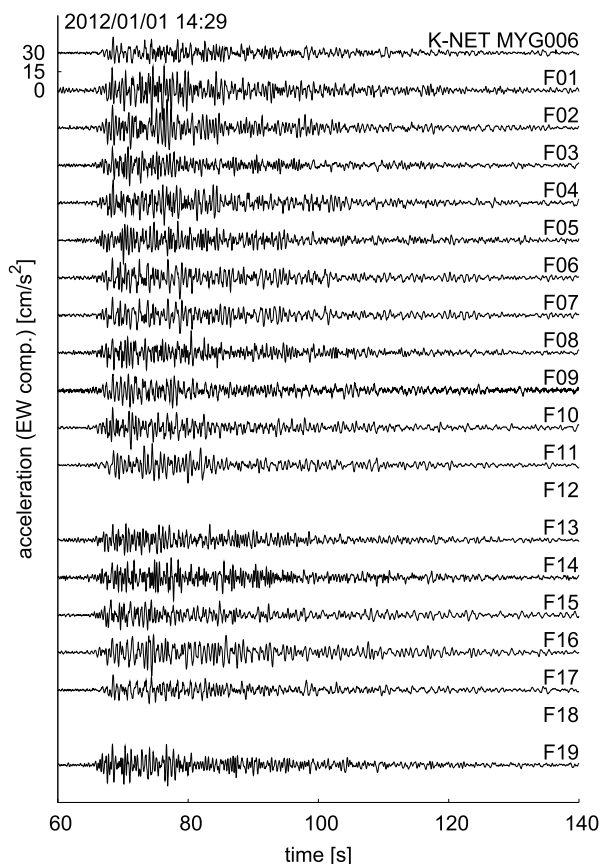


図 34 古川地区における兆候密度地震観測網による記録の例 (2012 年 1 月 1 日の鳥島近海の地震)

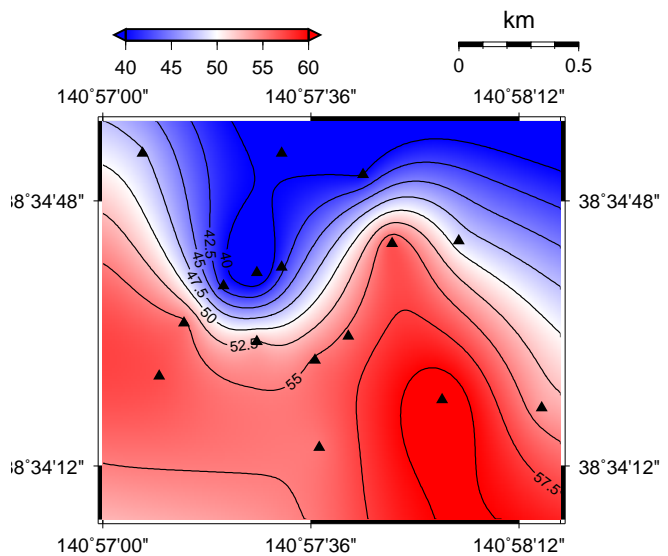


図 35 古川地区のゆれやすさマップ。震度の偏差値をコンターで表現したもの。南側が相対的に震度が大きく、北側は相対的に震度が小さい。色の薄い部分はほぼ平均的な揺れ方に相当する。

量的に厳密な説明をすることはまだまだ難しそうである，と考えざるを得ません。

6. おわりに

本稿では，2011 年東北地方太平洋沖地震の特徴と地震動およびそれによる被害について概観しました。あまりにも大きな地震であったためにその全容を理解するまでにはまだまだ多くの時間が必要です。しかし，この地震によって失われた多くのものを無駄にしないで将来の地震防災へ役立てるためにも地震と地震動，そして被害の理解にむけてたゆまぬ努力を続ける必要があると思います。

また，本稿で述べたように，非常に局所的な超高密度地震観測網による観測結果から，東北～関東地方という大きなスケールでの地震動の不均一性だけでなく，古川地区のように非常に小さなスケールでの地震動の不均一性についても，検討を進めていく必要がある，ということが明らかとなりました。

今後は，これまでの課題に加えて，この地震によって新たに認知された新しい課題についても検討を行っていきたいと考えています。

謝辞

冒頭に述べた通り，本稿は本震直後の調査をともしたり，あるいは共に議論を行ってきた共同研究者との成果が多く含まれています。特に京都大学防災研究所の後藤浩之博士，東京工業大学大学院理工学研究科の高橋章浩博士，弘前大学大学院理工学研究科の片岡俊一博士の貢献なくして本稿はありえませんでした。

さらに，K-NET TCG006 (小川) の地震動の特徴に着目し，被害調査にいち早く向かわれた神戸大学大学院工学研究科の鎌田泰子博士には TCG006 の周辺の被害状況について詳しい情報をいただきました。これらの方々以外にも，個別の名前を挙げることはいたしません，地震後の被害調査やその後の検討，さらに古川での高密度地震観測では様々な形で多くの方々のお世話になっています。被災直後の本当にたいへんな時にも調査にご協力くださった方もたくさんおられます。被災された方々に心からのお見舞いを申し上げますとともに，すべての方々に深く感謝いたします。

なお，本稿の執筆にあたり，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，気象庁によって観測された記録を使わせていただきました。これ

ら各機関の日頃の不断の努力によって世界最大級の地震の本震を日本全国で驚くべき密度で記録に残すことができました。その努力に深い敬意を表すとともにその記録を広く公開していただいていることに感謝します。

参考文献

- [1] 高橋章浩・盛川仁：2011年東北地方太平洋沖地震における堤防の被害について，地震工学研究レポート，No. 118，東京工業大学地震工学研究グループ，pp.49-52，2011.
- [2] 盛川仁・後藤浩之：地震動と地震動による被害の特徴，震災特集 東日本大震災 土木学会東日本大震災特別委員会総合調査団調査速報会報告，土木学会誌，Vol. 96, No. 6, pp.6-8, 2011.
- [3] 後藤浩之・高橋良和・鎌田泰子・高橋章浩・盛川仁：地震動による地盤と構造物の被害，自然災害科学，Vol. 30, No. 1, pp.49-53, 2011.
- [4] 後藤浩之・高橋良和・片岡俊一・盛川仁：地震動と地震動による被害状況，特集 東日本大震災～津波と地震動による被害～，土木学会誌，Vol. 96, No. 8, pp.10-14, 2011.
- [5] Goto, H., and Morikawa, H., “Ground motion characteristics during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake,” *Soil and Foundation*, 2012 (submitted).
- [6] Morikawa, H., Goto, H., Inatani, M., Ogura, Y., Tokue, S., Zhang, X.-R., Iwasaki, M., Araki, M., and Sawada, S., “Preliminary analysis of very dense seismic-array-observation data in Furukawa, Miyagi, Japan,” *Proc. of Joint Conference for 8th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering*, March 6-8, 2012, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2012
- [7] Goto, H., Morikawa, H., Inatani, M., Ogura, Y., Tokue, S., Zhang, X.-R., Iwasaki, M., Araki, M., Sawada, S., and Zerva, A., “Very dense seismic array observation in Furukawa District, Japan,” *Seismological Research Letters*, 2012 (submitted).
- [8] Hirose, F., Miyaoka, K., Hayashimoto, N., Yamazaki, T. and Nakamura, M., “Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) —Seismicity: Foreshocks, Mainshock, Aftershocks, and Induced Activity—,” *Earth Planets Space*, **63**, pp.513-518, 2011.
- [9] Hoshiya, M., Iwakiri, K., Hayashimoto, N., Shimoyama, T., Hirano, K., Yamada, Y., Ishigaki, Y. and Kikuta, H., “Outline of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw9.0) —Earthquake Early Warning and Observed Seismic Intensity—,” *Earth Planets Space*, **63**, pp.541-545, 2011.
- [10] 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年
- [11] 釜江克宏・川辺秀憲：2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の震源のモデル化(強震動生成域)(第1報)，<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/eq/tohoku1/Tohoku-ver1-rev20110601.pdf>，2011年4月26日(2012年3月27日アクセス)
- [12] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002年
- [13] 岡本篤興、鎌田泰子：東北地方太平洋沖地震における1-2秒が卓越した地震動と建物被害との関係，土木学会関西支部年次学術講演会，2012(投稿中)
- [14] 国土交通省：東日本大震災(第70報)，2011年5月23日
- [15] 国土交通省：東日本大震災(第59報)，2011年5月6日
- [16] 国土交通省東北地方整備局河川部河川工事課：緊急的な災害復旧の概要について(第3報)，2011年4月19日
- [17] 国土交通省関東地方整備局河川部：(2011年)東北地方太平洋沖地震による河川被災状況(関東)(第4報)，2011年4月28日

- [18] JR 東日本：東北新幹線の地上設備の主な被害と復旧状況，<http://www.jreast.co.jp/press/earthquake/>，(2011年4月17日アクセス)
- [19] JR 東日本：在来線の地上設備の主な被害と復旧状況，<http://www.jreast.co.jp/press/earthquake/>，(2011年4月17日アクセス)
- [20] 東日本高速道路株式会社：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，http://www.e-nexco.co.jp/pressroom/data_room/regular_mtg/h23/0324/，(2011年4月10日アクセス)