青森県内に展開した臨時観測点で観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震の地震動

片岡俊一¹⁾

1)正会員 弘前大学大学院理工学研究科、准教授 博士（工学）
e-mail: kataoka@hirosaki-u.ac.jp

要約

著者らは各々特定の目的をもって青森県内に臨時地震観測点を展開している。2011 年東北地方太平洋沖地震の際には、4 地域にあった 6 台の強震計で地震動記録が得られた。それらの記録は、最も大きい最大加速度が 167cm/s^2 、計測震度相当値で 5.0 とそれほど強いものではなかった。しかしながら、各地域毎に異なる様相を示す記録が得られ、設置目的にかなうものであった。本報告では、東北地方太平洋沖地震の記録を紹介するとともに、著者らが推定した観測地点の地下構造や、観測目的に関連した事項を記す。

キーワード： 臨時観測、K-NET、KiK-net、サイト増幅特性、青森県

1. はじめに

地震動を観測することは地震工学の基礎と言えよう。観測される地震動は、震源特性、伝播特性、サイト増幅特性の重畳の結果であるが、このうちサイト増幅特性がもっともバリエーションが広いと考えられており、様々な地点で地震動を観測し、それを解釈することはサイト増幅特性のケーススタディとして意義があると考えている。

我々は、青森県内各所で半恒久的な観測点と観測期間を明確に設定した臨時観測点を展開して、強震観測を実施している。半恒久的な観測点は弘前市と青森市にある弘前大学のキャンパスに設置してある。臨時観測点は、その折々に目的をもって展開している。2011 年東北地方太平洋沖地震の際には、図 1 に示す 4 地域に観測網を展開していた。図の(a)が東通村小田野沢地区であり、以下(b)～(d)はそれぞれ、東北町、青森市、弘前市である。各々の地域の観測状況については、サイト増幅特性に着目した発表事例¹⁾もあるが、青森県内における地震動はそれほど強いものではなかった²⁾ことから、2011 年東北地方太平洋沖地震の記録という観点からの紹介はない。そこで、本報告でこの地震の記録を紹介することとする。

2. 東通村小田野沢

2.1 観測概要

東通村小田野沢に設置されている K-NET 南通 (AOM007) は気象庁が震度を発表する観測点であるが、しばしば周辺よりも高い震度になることがある。この高い震度が集落住民の体感と異なっている

図1 2011年東北地方太平洋沖地震の際に、臨時観測を実施していた地域（図中の(a)~(d)）と推定断層面と震央（星印）。

ことが、平成22年（2010年）1月24日に青森県東方沖で起きた地震（マグニチュード4.5）を題材に新聞に取り上げられた³⁾。この地点は気象庁が発表する際には東通村小田野沢となっている。この地震の際の東通村小田野沢の震度は4と発表されているが、住民の体感はそれほど強くはなかったとされている。公表されている地下構造⁴⁾によれば、インピーダンス比が非常に小さな境界があることから、地震動が大きく増幅されることは想像に難くなく、震度が大きくなることに関しては納得できるものである。つまり、K-NETで観測された地震動は局地的な影響を受けている可能性があるため、K-NET南通で観測される地震動を分析するとともに、周辺に臨時地震観測点を設置し、K-NET南通の記録と対比することを考えた。なお、K-NET南通は2014年9月5日に移設されているので、ここで紹介することは全て旧観測点に関するものである。

具体的には、村役場にも相談し、図2に示すようにHOIKとJMSYという観測点を設けた。HOIK

図2 東通村小田野沢地区の臨時地震観測点とK-NET南通の位置

は K-NET と同様に谷間に位置し、住家がある地域に比べるとやや標高が低い。HOIK の標高は 8m 程度であり、K-NET の位置の標高は 10m とされている。公表されている土質柱状図では K-NET の表層は有機質土となっている⁴⁾が、HOIK も K-NET と同様に周辺は湿地に多い植物が繁茂している。一方、JMSY は集落より標高の高い位置にある（標高は 26m）。

HOIK では、一階建て建物（保育園舎）の犬走りに強震計を設置した。建物の影響や犬走りが地盤と緊結しているのかという疑問点はあったが、積雪寒冷地に冬を越して設置することと電源供給の問題に加えて、周辺地盤は有機質土であり、そこに適切な地震計基礎を設けることなどの得失を考え、この地点とした。強震計は東京測振製の CV-374 を用いた。この強震計は、フルスケール 2000cm/s^2 、分解能 24bit である。また、GPS 信号による時計校正機能を有していることから、これを利用した。ただし、結果的には本震以降の記録についてのみ時計校正が機能していた。サンプリング振動数は 100Hz とした。

JMSY では屋外に適切な場所がないことから、1 階建て建物（事務施設）の室内に強震計を設置した。用いた強震計はフルスケール 2000cm/s^2 、分解能 24bit の性能を有する東京測振製の CV-373 である。この強震計はインターネット等のネットワーク上にある時刻サーバーを利用して、内部時計を校正する機能を有しているが、今回の観測では単独であることからこの機能は利用できない。結局、時刻校正は実施していない。また、電源供給がなくなると内蔵メモリに保存している以前の地震動記録を含めて全てが消えてしまうという仕様となっている。サンプリング振動数は 100Hz とした。

観測期間は、当初 2010 年 4 月から 1 年間としていたが、初期不良などがあり 2 地点で記録が取れるようになったのが 2010 年 9 月からであったこと、2011 年東北地方太平洋沖地震が起きたことから 1 年延長し 2012 年 3 月までとした。JMSY では、建物の増改築による停電および震災に伴う停電により欠測期間が長く、本震記録も残っていない。結局、K-NET を含めた 3 地点で共通して観測された地震は 25 個であった。

臨時観測点の近傍で微動アレー探査を行い、地下構造を推定した⁵⁾。一辺約 10m の正三角形の頂点と重心に微動計を設置し、200Hz サンプリングで 200 秒間の微動を 3 回計測した。位相速度は SPAC 法で求め、逆解析は GPL 形式のフリーソフトウェアである SWAMI^{6) 7)}を用いた。逆解析に当たって必要な初期モデルは、柱状図などが得られなかったために、次のように求めた。まず、微動の H/V スペクトル比からピーク振動数を求めた。次いで、分散曲線の高振動数側の漸近値を表層の S 波速度と仮定し、二層構造の地盤構造を仮定し、前述のピーク振動数と速度から仮想の表層層厚を求めた。逆

図3 東通村小田野沢地区の臨時地震観測点の S 波速度分布の推定値

解析にあたっては、最表層のみ層厚を 2m とし、それ以深は層厚 3m の層に分割し、各層の S 波速度を推定した。図 3 に HOIK と JMSY において推定した S 波速度分布を示すが、人工的に区分した厚さ 3m の層毎に速度が変化していることが分かる。

十分な精度の初期モデルとなっていないために、逆解析で得られた地下構造については更なる検討が必要と思われるが、周辺環境を含めて判断すると、HOIK は K-NET と同様な軟弱地盤であると考えられる。一方、JMSY は比較的硬質な地盤であると判断できよう。

図 3 には K-NET の推定 S 波速度分布⁹⁾も併せて示してある。K-NET 南通の公表地下構造⁴⁾は、地表から深さ 5m までは S 波速度 80m/s であり、それ以深の S 波速度は 480m/s である。この構造から算出される一次卓越振動数は 4Hz となり、観測される地震動の卓越振動数（約 2Hz）を説明することができない⁹⁾。そこで、地下構造推定のために直線上のアレーを展開し、人工的な振動を起こしてレイリー波の位相速度を求めた。その結果、実測値の高振動数側の漸近値は公表値の最表層の S 波速度とほぼ同じであった。そこで、公表値の表層層厚が 5m を 9m と変化させたモデルを提案している。この地下構造は微動の水平動と上下動との比もよく説明する。図 3 にはこのモデルが記載されている。

2.2 2011 年東北地方太平洋沖地震の際の地震記録

2011 年東北地方太平洋沖地震の際の HOIK における記録を図 4 に示す。参考のために、図には隣接している K-NET の記録も示してある。前述のように、HOIK の強震計は時刻校正機能を有しているものの、この時点ではそれが有効に稼働しておらず、不適切な時刻となっていた。そこで、図の作成にあたっては、速度波形の類似性から時刻差を読み取り、その分を補正してある。図を見ると、波形の包絡形は HOIK と K-NET で異なり、振幅は K-NET の方が倍近く大きいことが分かる。しかしながら、計測震度（相当値）は両者とも 5.0 であり、最大速度にすると HOIK が 15.7cm/s、K-NET が 17.2cm/s と K-NET がやや大きいだけである。

HOIK における記録全長から求めた減衰定数を 5%とした速度応答スペクトルを図 5 に示す。応答スペクトルでは、0.5～0.6 秒付近の卓越が目立ち、振幅は EW 成分がやや大きく、卓越周期では 100cm/s 弱となっている。

図 4 2011 年東北地方太平洋沖地震の小田野沢地区における地震動記録

図5 HOIK 観測点で得られた 2011 年東北地方太平洋沖地震の記録から算出した速度応答スペクトル（減衰定数 5%）

振動数域での HOIK と K-NET との違いを詳細に検討するために、初動から 163.84 秒を取り出してフーリエスペクトルを求めた。結果を図 6 に示す。観測される地震動は震源特性、伝播特性、サイト増幅特性が全て含まれているが、ここで比較している 2 地点間の距離は震源からの距離に比べて十分に小さいので、両者のスペクトルの違いはサイト特性の違いと考えている。水平動に着目すると、スペクトルの卓越振動数は 2Hz よりやや低い振動数である。卓越振動数より低い振動数ではスペクトル振幅に大きな違いはない。これは上下動でも同じである。卓越振動数より振動数が高くなると、2 地点ともに振幅は小さくなり、二次のピークは見られない。スペクトル振幅が小さくなる度合いは HOIK の方が大きいように見える。例えば、卓越振動数付近では 2 地点のスペクトル振幅は同程度であったが、6 から 8Hz では K-NET の水平動の振幅は HOIK の倍程度ある。HOIK のスペクトル振幅が K-NET に比べて高振動数成分で小さいことが、地盤の影響かあるいは設置条件の影響かは不明であるが、高振動成分の違いにより 2 地点の加速度振幅が異なっていたことが推察される。

K-NET の水平動スペクトルは 2Hz 付近のピークが二つになっている。文献 5)によると、この地点の

図6 小田野沢地区で観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震のフーリエスペクトル

記録には常に、このように2つのピークが表れる。地震動記録を N60E とその直交成分に変換するとピークが1つになることから、観測地点に依存した方位特性があるものと考えている。

2.3 K-NETの震動特性

周辺震度観測点に比べて大きな震度が観測される K-NET 南通では、どの程度震度が増幅されるのか、硬質地盤と考えられる JMSY と計測震度相当値を比較したものが図7である。ここでは、参考のために HOIK も加え、3 地点で比較可能な 25 地震の記録をプロットしてある。用いた地震の震央分布を図8に示す。2011 年東北地方太平洋沖地震以降地震活動が広い範囲で活発化しており、太平洋沿岸の地震が多いものの、それ以外の地域で発生した地震も含まれている。ただし、JMSY において観測できなかったことから、2011 年東北地方太平洋沖地震の結果は含まれていない。マグニチュードの範囲は 3.5 から 7.3 となっている。

3 地点の震度（相当値）を比較した図7から、K-NET は JMSY に比べて平均で 0.8 大きな計測震度

図7 東通村小田野沢地区の地震観測点で得られた計測震度相当値の比較

図8 小田野沢地区の震度の比較に用いた地震の震央位置（丸印）と2011年東北地方太平洋沖地震の震央位置（星印）

となっていることが分かる。JMSYは集落からはずれており、住民の体感と同じであるとは言い切れないが、同じ集落内の比較的狭い範囲でも場所によってはこの程度の違いがあることが分かった。一方、K-NETとHOIKはほぼ同等の計測震度である。地下構造や2011年東北地方太平洋沖地震の応答スペクトルおよびフーリエスペクトルも含めて考えると、K-NETとHOIKはほぼ同様の震動特性と考えられ、小田野沢地区にはK-NET南通のほかにもそれと同等の揺れとなっている場所があることになる。但し、図2で分かるように、K-NETやHOIKの周辺には住家がない。

文献1)では、K-NET南通で観測された地震動の最大速度と卓越振動数との関係を検討し、最大速度が大きくなるに従って、卓越振動数が低下することを指摘している。ただし、大振幅の記録はそれほど得られておらず、卓越振動数が低下したことを明確に示すには、2011年東北地方太平洋沖地震の一連の記録だけでは不十分であった。そもそも、これまでにK-NET南通で観測された最大速度のうちで最も大きなものは、2003年十勝沖地震の最大余震の際に得られており、それに続くものは2003年十勝沖地震の本震である。HOIKにおいても、卓越振動数の振幅依存性は見られたが、データ数が十分ではないためここでは示さない。

3. 東北町

3.1 観測概要

東北町がある上北地域の強震観測点を図9に示すが、青森県が設置した震度情報ネットワークの観測点はあるもののK-NET観測網の空白地域となっていることが分かる。そこで、K-NET観測点の空白を埋める観測を考えていたところ、中学校の教材として利用できるのであれば設置しても良いとの承諾を頂き、東北町立東北東中学校（当時、現在は閉校）に臨時観測点を設置した。図9にあるように、設置した観測点（THKH）は、K-NET六ヶ所（AOM009）、野辺地（AOM010）、三沢（AOM011）の中間に位置し、自治体震度計や気象庁震度計ともやや離れており、観測網の充実に有益であると思われる。なお、図中に丸印で示した“LG or JMA”は、Local Government（自治体）あるいは気象庁の意味で、図中のうち気象庁の観測点はAOM009と重なっている地点のみである。

この観測点では、屋外に適切な場所がないことから一階建て建物の室内の床の上に強震計を設置し

図9 東北町に設置した臨時観測点（THKH）および周辺の強震観測点の位置と2011年東北地方太平洋沖地震の際の震度。丸印のうちAOM009と重なっている地点がJMAの観測点。

た。用いた強震計は Kinemetrics 社製の Altus Etna である。この強震計は、フルスケール 2000cm/s^2 、分解能 24bit である。また、GPS 信号による時計校正機能を有していることから、GPS アンテナを窓際に設置して、この機能を利用した。GPS 信号は問題なく受信出来ていた。サンプリング振動数は 100Hz とした。

観測期間は、2010 年 7 月から 2012 年 3 月までである。2011 年東北地方太平洋沖地震の前震である 3 月 9 日の地震以前は 6 地震しか記録が得られなかったが、それ以降は地震活動が活発化したことに加え、トリガーレベルを 2cm/s^2 としていた為か、62 個の地震記録が得られている。

3.2 2011 年東北地方太平洋沖地震の際の地震記録

2011 年東北地方太平洋沖地震の際には、510 秒間の記録が得られた。初動から 240 秒間の記録を図 10 に示す。この記録から算出した計測震度相当値は 4.5 となる。記録全長から求めた減衰定数を 5% とした速度応答スペクトルを図 11 に示す。短周期領域では 0.3 秒付近に水平動のピークが見られるが、概して長周期領域が優勢であり、NS 成分では周期 4 秒付近で速度応答が約 80cm/s となっている。

4. 青森市

4.1 観測概要

1968 年十勝沖地震の際に運輸省港湾技術研究所（当時）の青森港湾観測点で観測された地震動は長周期成分に富んだものであったが、卓越した周期は青森平野の地下構造に起因していると考えられている⁹⁾。長周期ゆえに波長も長くなるので、近接した地点では同様の地震動になると思われるが、約 1km しか離れていない青森港湾観測点と K-NET 青森の卓越周期が異なることが指摘されている¹⁰⁾。その原因を調べるためには、波動伝播が分かるような観測が必要と考え、既存の観測点の間を埋めるように図 12 に示す NJNE と TBK という観測点を設けた。既存観測点は図に示すよう気象庁（図中の JMA）、K-NET 青森（図中の AOM020）および港湾空港技術研究所の強震観測網（港湾地域強震観測）の青森港湾観測点（KWN）である。

NJNE は弘前大学の青森キャンパス内にある。この観測点では、建物から 1m ほど離れた地盤を 20cm ほど掘り、コンクリートブロックを置いて地震計の基礎とした。ブロックの下や埋め戻しに使った土にはセメントを混ぜて、周辺の地盤との一体化を図った。用いた強震計は Kinemetrics 社製の Altus K2 である。この強震計のフルスケール 2000cm/s^2 、分解能は 24bit である。また、GPS 信号による時計校正機能を有していることから、GPS アンテナ用のポールを立てて、アンテナを緊結して利用している。サンプリング振動数は 100Hz とした。この観測点は、2010 年 5 月に設置して以来、何度か電源の問題

図 10 2011 年東北地方太平洋沖地震の際の東北町の THKH 観測点で得られた地震動記録

図 11 THKH 観測点で得られた 2011 年東北地方太平洋沖地震の記録から算出した速度応答スペクトル（減衰定数 5%）

で欠測となることがあったが、現在まで観測を継続している。

TBK は 2006 年から 2008 年にかけて臨時観測を行った観測点である¹¹⁾。既存観測点および上述の NJNE の位置から、この位置に強震計を設置することが望ましいと考え、再度依頼した。しかしながら、屋外に適切な場所がないことから三階建て建物の一階の室内の床上に強震計を設置した。用いた強震計は Kinemetrics 社製の Altus Etna である。この強震計は、フルスケール 2000cm/s²、分解能 24bit である。また、GPS 信号による時計校正機能を有していることから、GPS アンテナを窓際に設置して、この機能を利用した。GPS 信号は問題なく受信出来ていた。サンプリング振動数は 100Hz とした。観測期間は、2010 年 5 月から 2013 年 3 月までである。

本震時に青森市は停電となり、しばらくの間停電が続いた。臨時観測点のうち、NJNE は内蔵バッテリーで本震および当日 21 時までの余震を記録できたが、TBK ではバッテリーをつなぎ忘れたため、本震を含め、商用電源が復帰した翌日まで記録を得ることが出来なかった。

4.2 2011 年東北地方太平洋沖地震の際の地震記録

2011 年東北地方太平洋沖地震の際には、NJNE で 510 秒間の記録が得られた。初動から 240 秒間の記

図 12 青森市内の強震観測点と臨時観測点の位置

録を図 13 に示す。この記録から算出した計測震度相当値は 4.1 となる。既存観測点の計測震度もほぼ同じ値となっている。波形は主要動付近でも、振動周期が見て取れるように長周期が卓越している。記録全長から求めた減衰定数を 5% とした速度応答スペクトルを図 14 に示す。周期 3 秒が卓越し、応答速度は 60cm/s となっている。この応答値は、震源断層により近い図 11 に示した THKH の応答値に比べてやや小さい程度である。また、短周期では卓越が見られないのは、青森市内の観測点で共通している事象である。

4.3 青森市中心部の地震動の相互比較

臨時観測の目的は、長周期域において既存観測点とスペクトル振幅が異なることを確認することであった。そこで、観測された地震動のうち水平成分のベクトルスペクトル¹²⁾および K-NET のスペクトルを基準としたスペクトル比を図 15 に示す。ここで、ベクトルスペクトルとしたのは、各観測点で卓

図 13 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に青森市の NJNE 観測点で観測された加速度記録

図 14 NJNE 観測点で得られた 2011 年東北地方太平洋沖地震の記録から算出した速度応答スペクトル（減衰定数 5%）

越振動方向が異なっていたためである。ここでは、比較のために、TBK で観測できた 3 月 9 日 11:47 に宮城県沖で発生した地震の際の記録も図に示してある。ただし、KWN ではこの地震記録は得られていない。図から東北地方太平洋沖地震では 0.3Hz~0.4Hz が、3 月 9 日の地震では 0.5Hz が卓越しているが、詳細にみると各観測点によって振幅が異なっている。地震計の特性が影響している可能性も考えられるが、0.1Hz 以下では 4 地点の記録のスペクトル振幅はほぼ同じでとなるため、地震計の特性によって振幅が異なっていることは考えにくい。スペクトル比を見ると 0.1Hz 以下のばらつきに比べて 0.1Hz から 1Hz の間の変化が大きいことが分かる。地震毎に 1Hz 以下の振幅の大きさを見ると、東北地方太平洋沖地震では概ね KWN が大きく、3 月 9 日の地震では TBK の振幅が全般的に大きいことが分かる。両者は比較した観測点のなかでは最も海側に位置する。文献 10) では KWN と K-NET との違いを指摘したが、臨時観測により数 km の範囲であっても長周期帯域（低振動数帯域）の振幅が場所によって異なることが確認された。

港湾地域強震観測の青森港湾観測点（本報告では KWN）では、トリガーレベルが大きいために、なかなか地震記録が得られない。そこで、KWN の強震計の横に、トリガーレベルを低くした強震計を設置し、2012 年 4 月から 2013 年 3 月まで臨時観測を行った。その結果、港湾地域強震観測の青森港湾

図 15 青森市内の 5 地点で観測された地震動の水平成分ベクトルフーリエスペクトル。
左：東北地方太平洋沖地震、右：3 月 9 日に宮城県沖で起きた地震。

観測点で得られた2つの地震¹³⁾、つまり2012年5月24日に青森県東方沖で起きた地震(マグニチュード、6.1) および2012年12月7日に三陸沖で起きた地震(マグニチュード7.3)を含み、12の地震記録が得られた。やや長周期帯域において上下動を比較した範囲では、上述したような観測点毎の違いが表れていたため、今後、これらの記録を利用して観測点毎の違いを詳細に検討する予定である。

5. 弘前市

5.1 観測概要

弘前市中心部には、比較的狭い範囲に気象庁、K-NET 弘前 (AOM016) および建築研究所の強震観測網の観測点 (観測点コード HRH) があるが、計測される震度には違いがあり、標高が最も低い K-NET 観測点の震度が常に大きい¹⁴⁾。市域の東側は標高が低く、軟弱な地盤である。K-NET の東側には、住宅地が広がっており、地震動がどのようになるか興味深く思っていたところ、町内会の協力を得て、臨時観測点 (JOTO) を設けることができた¹⁵⁾。観測点の位置を図 16 に示すが、HRU は我々が弘前大学構内に設置した観測点である。

JOTO での観測は2008年4月から開始した。設置当初は、Kinemetrics 社製の Altus Etna を設置していたが、これを2010年5月に上述の TBK に移設し、代わりに応用地震計測製の E-catcher を設置した。その後、THKH での観測終了にともない、THKH に設置していた Altus Etna を移設して現在に至っている。強震計の設置場所は天候と電源の利用を考え、RC 2階建て建物に隣接する植え込み内とし、NJNE と同様に臨時のコンクリート基礎を用意した。道路際であるが、鉛直方向のトリガーレベルだけを40cm/s²と高くすることで、誤作動を防いでいる。また、Altus Etna にはGPS信号による時刻校正機能があることから、Altus Etna を設置している時には時刻校正を行っていた。ただし、E-catcher 単独では時刻校正はできないので、2011年東北地方太平洋沖地震の際には正確な時刻情報はない。

HRU は弘前大学地震火山観測所であり、強震計は地震計用基礎上に設置されている。この地点では、1983年日本海中部地震の記録が得られており、それ以降観測の中断があったが、2002年から強震計

図 16 弘前市内の臨時観測点および周辺の震度観測点の位置と2011年東北地方太平洋沖地震の際の震度。丸印のうちJMAのみがJMAの観測点。

を入れ替えて観測を再開した。用いている強震計は Kinemetrics 社製の SSA-16 である。フルスケールは 1000cm/s^2 であり、分解能は 16bit である。この地震計は単独では時刻構成ができないので、時刻校正は実施していない。

本震時に弘前市は停電となり、翌日まで停電が続いた。我々の 2 観測点のうち、HRU は内蔵バッテリーで本震を記録できたが、JOTO では元来補助バッテリーがないため、初動から 100 秒程度の記録を得て収録が終了している。

5.2 2011 年東北地方太平洋沖地震の際の地震記録

2011 年東北地方太平洋沖地震の際には、HRU では途中中断があったものの 600 秒間の記録が得られた。初動から 270 秒間の記録を図 17 に示す。この記録から算出した計測震度相当値は 3.4 となる。図を見ると図の 120 秒程度から水平動では見かけ周期 4 秒の成分が読み取れるようになる。また、振幅が小さくならない。記録全長から求めた減衰定数を 5% とした速度応答スペクトルを図 18 に示す。周期 3 秒～5 秒が卓越し、応答速度の最大は EW 成分で 30cm/s となっている。

周辺の観測点の記録と比較できるように、主要動付近をやや拡大して観測記録を図 19 に示す。JOTO での観測記録は前述のように、停電のために途中で終わっている。K-NET では水平動が急に大きくなる図中の 60 秒から、既に見かけ周期 4 秒程度の成分が優勢である。HRU でも卓越したこの周期成分の原因については、今後検討する予定である。

5.3 弘前周辺の計測震度と表層 30m の平均 S 波速度との関係

図 16 を見ると、弘前市周辺には自治体震度計が比較的密に配置されており、今回の地震では東側あるいは北側の観測点の震度が大きいように見える。北側の観測点は標高が低くなることから、地盤が軟弱になった影響と考えられる。著者らは青森県内の殆どの強震観測点において微動アレー観測を行い、表層 30m の平均 S 波速度 (V_{s30}) を長尾・紺野の方法¹⁶⁾によって推定しているので、図 16 に示した地点の計測震度 (図中、最南端の大鰐町を除く) と V_{s30} との関係を探ってみた。なお、文献 16) では、 V_{s30} が 300m/s 程度までの地盤を対象に検討しており、今回の結果の一部はその範囲を逸脱している。しかしながら、関東地域での検討結果¹⁷⁾を踏まえ、外挿は可能と判断している。

我々が推定している表層 30m の平均 S 波速度と観測された計測震度 (相当値) との関係を図 20 に示す。横軸の V_{s30} を対数としているが、 V_{s30} が 200m/s を下回る軟弱な地盤で計測震度が大きく、 V_{s30} が 400m/s 程度以上の観測点では計測震度が小さいことが分かる。その中間ではばらつきが見られるが、右下がりの傾向は強い。 V_{s30} が中間的な値でばらつく理由としては、層構造の影響が考えられ

図 17 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に弘前市の HRU 観測点で観測された加速度記録

図 18 HRU 観測点で得られた 2011 年東北地方太平洋沖地震の記録から算出した速度応答スペクトル（減衰定数 5%）

図 19 弘前市周辺の地震動記録の比較

るが確認していない。右下がりの傾向が見られるので、このデータで回帰式を求めると次式となった。ここで、 SI は計測震度である。

$$SI = 7.24 - 1.46 \log(Vs30) \quad (1)$$

平均 S 波速度が異なるが基盤における最大速度が同一である状況を考えると、 $Vs30$ と最大速度の増幅度との関係式^{例えは 18)}および最大速度から計測震度に変換する式¹⁹⁾を組み合わせることにより式(1)と類似の形式のものが得られる。例えば、文献 15) と 16) に提案されているものを利用すると、右辺第 2 項の係数は 1.2 となる。今回の例では 1.46 であり、既往文献から算出されるものよりもやや大きいことになる。

図 20 地震観測点の表層 30m の平均 S 波速度と観測された計測震度との関係

6. まとめ

青森県内の東通村小田野沢、東北町、青森市、弘前市で著者らが実施していた臨時観測で得られた 2011 年東北地方太平洋沖地震の記録を紹介した。各地域でそれぞれ特有の目的を持ち臨時観測を行っている最中に記録されたものである。青森県内では、2011 年東北地方太平洋沖地震の際に地震動による被害はほとんどなく、それほど強い揺れではなかった。しかしながら、その時点で終了していた過去の臨時観測の例を含めて考えると、東北地方太平洋沖地震以前は、得られる地震記録の数はそれほど多くなく、この地震以降に観測数が急増した。つまり実測に基づく種々の検討を行うためには、本震記録を含め東北地方太平洋沖地震以降の記録は貴重なものである。大半の観測点は観測を終了しており、新たに地震動記録が得られることはないが、当初目的を果たすだけでなく、地盤震動特性や地下構造推定などに有効に利用したいと考えている。

謝辞

ここで報告した臨時観測に用いた強震計は著者が所有しているものだけではなく、弘前大学地震火山観測所、東京工業大学、あるいは日本建築学会から借用したものもある。また、気象庁および防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net の観測記録を利用している。一部の図の作成には、GMT²⁰⁾を利用した。強震記録のフォーマット変換および計測震度の算出に当たっては建築研究所の鹿嶋俊英氏が作成した ViewWave²¹⁾を利用した。査読者の意見は原稿の質を高めるのに有り難かった。記して関係者各位に感謝の意を表わす。

付録

臨時観測点の位置などを以下に示す。

付表 臨時観測点の位置など

市町村名	観測点コード	緯度	経度	標高	観測期間		地震計		備考
					開始	終了	機種名	所有者	
東通村	HOIK	41.2302	141.3972	8	2010/09	2012/03	CV374	A	観測地震数: 75(前: 6、後: 69)
	JMSY	41.2226	141.3898	26	2010/04	2012/03	CV373	A	観測地震数: 39(前: 7、後: 32)
東北町	THKH	40.7796	141.2773	62	2010/07	2012/03	Altus Etna	C	観測地震数: 65(前: 3、後: 62)
青森市	NJNE	40.8198	140.7605	2	2010/05	継続中	Altus K2	C	
	TBK	40.8273	140.7586	1	2010/05	2013/03	Altus Etna	B	
弘前市	HRU	40.5882	140.4741	50	2002/12	継続中	SSA-16	A	
	JOTO	40.6047	140.5178	29	2008/04	継続中	E-Catcher	A	設置時および現在の地震計はAltus Etna

注: 地震計所有者の略号は次の意味。A: 著者ら, B: 弘前大学地震火山観測所, C: 東京工業大学
備考にある観測地震数の前、後は2011年東北地方太平洋沖地震の前と以降を意味する。

参考文献

- 1) Kataoka Shunichi: Non-linear amplification characteristics during earthquakes at K-NET AOM007, Minamidori, 10th National Conference on Earthquake Engineering, 2014, DOI: 10.4231/D3GQ6R31X.
- 2) Goto Hiroyuki, Hata Yoshiya, Kuwata Yasuko, Yamamoto Hidekazu, Morikawa Hitoshi, and Kataoka Shunichi: Earthquake source and ground motion characteristics in eastern Japan during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Journal of JSCE, vol.1, Special Topic- 2011 Great East Japan Earthquake (Invited Paper), 2013, 329-342.
- 3) デーリー東北: 平成22年1月27日付け朝刊.
- 4) 防災科学技術研究所強震観測網 (K-NET, KiK-net) 、 <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>、2015年9月8日確認.
- 5) 渥美知宏、片岡俊一: 東通村小田野沢地区の地盤震動特性と地下構造の推定、日本地震工学会・大会-2011 梗概集、2011年、pp.480-481.
- 6) Lai C. G., and Krzysztof Wilmanski: Surface waves in geomechanics: direct and inverse modeling for soils and rocks, International center for mechanical sciences courses and lectures No.481, Springer Wien New York, 2005.
- 7) Lai, C. G. and Rix, G. J.: Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization, Report No. GIT-CEE/GEO-98-2, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, 1998, pp. 258.
- 8) 片岡俊一、高澤昌也: K-NET 南通の地下構造推定、東北地域災害科学研究、48、2012年、pp.19-22.
- 9) 鏡味洋史、太田裕、後藤典俊、塩野計司、工藤一嘉、坂尻直巳、成瀬聖慈、出原孝示、竹内文朗: やや長周期の微動観測と地震工学への適用 (3) - 1968年十勝沖地震の SMAC 型強震計記録との比較 -、地震第2輯、29、1976年、pp.147-158.
- 10) 馬場和平、片岡俊一: 1968年十勝沖地震の際に青森港湾で観測された記録の卓越周期に関する検討、日本地震工学会・大会-2012 梗概集、2012年、pp.366-367.
- 11) 片岡俊一、小岩直人: 青森市における臨時地震観測に与える建物振動の影響、東北地域災害科学研究、44、2008年、pp.63-68.
- 12) 中村晋: ベクトルスペクトルによる地震動の増幅特性評価とその適用、土木学会論文集、No.519 /I-32、1995年、pp.161-173.
- 13) 港湾地域強震観測、<http://www.eq.pari.go.jp/kyoshin/>、2015年9月8日確認.
- 14) 片岡俊一、鳴海央子: 観測記録に基づく弘前市内4地点の地震動特性の比較、第23回日本自然災害学会学術講演会梗概集、2004年、pp.49-50.
- 15) 片岡俊一、森本聡志: 臨時観測記録を含めた弘前市における地震観測記録の相互比較、日本地震工学会・大会-2009 梗概集、2009年、pp.254-255.

- 16) 長尾毅、紺野克昭：常時微動アレー観測に基づく表層地盤の平均 S 波速度推定精度に関する研究、土木学会論文集、No.696/I-58、2002 年、pp.225-235.
- 17) 紺野克昭、片岡俊一：レイリー波の位相速度から地盤の平均 S 波速度を直接推定する方法の提案、土木学会論文集、No.647/I-51、2000 年、pp.415-423.
- 18) 藤本一雄、翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係、日本地震工学会論文集、6、No.1、2006 年、pp.11-22.
- 19) 翠川三郎、藤本一雄、村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係、地域安全学会論文集、No.1、1999 年、pp.51-56.
- 20) Wessel P. and Smith W. H. F.: Free software helps map and display data, EOS Trans. AGU, vol.72, 1991, 445-446.
- 21) ViewWave Kashima's office, <http://smo.kenken.go.jp/~kashima/ja/viewwave>, 2015 年 9 月 8 日確認.
(受理：2015 年 3 月 9 日)
(掲載決定：2015 年 10 月 6 日)

Strong Ground Motions Observed at Temporal Stations in Aomori Prefecture during The 2011 Off The Pacific Coast of Tohoku Earthquake

KATAOKA Shunichi¹⁾

1) Member, Associate Professor, Hirosaki University
e-mail: kataoka@hirosaki-u.ac.jp

ABSTRACT

Author has been developing temporary strong ground motion observation site around Aomori prefecture with a specific purpose for each site. During the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake, six accelerograms were obtained in four area, those are Higashidori-mura, Tohoku-machi, Aomori city, and Hirosaki city. The maximum PGA of observed data is 168cm/s^2 , equivalent seismic intensity defined by JMA is 5.0. Though these values are not significant, obtained ground motions meet purposes. In this paper, those accelerograms are introduced and characteristics of ground motions at each site are explained with estimated ground structure.

Keywords: temporal strong motion observation, K-NET, KiK-net, site amplification characteristics, Aomori prefecture