



宮古を襲う黒い津波(宮古市撮影/筆者提供)

はじめに

2024年の新年は、「令和6年能登半島地震」による大災害で明けてしまった。多くの場面で、東日本大震災と重なるところが多く、大変に苦しい状況である。被災地の皆さんにお見舞い申し上げるとともに、できる限りの支援ができればと思っている。災害はいつも突然で、しかも新しい姿を見せつけるが、今回も驚きの連続である。日本海での活断層により、最大クラスの直下型地震の発生、さらに、断層の一部が海域に拡大したために津波が発生し、一時期には大津波警報が発表された。陸域では、地すべり、液状化そして火災が連鎖していった。今もつて、影響や被害の全貌は見えていないが、東日本大震災での経験や教訓がそこまで届いていたのか？ これから提供できる情報や支援として何があるのか？ を考え、そして行動していきたい。

広域に甚大で複合的な被害を出した東日本大震災から13年を迎えた。当時は、まだ春には早く寒さが残る東北地方を中心に、3分以上も揺れ続けた巨大地震が発生し、となつて生じた津波が各地に来襲した。津波常襲地域といわれる三陸海岸を含む東北地方太平洋沖沿岸では、想定をはるかに上回る複合的な災害を受けて、特に当時の津波対策である防災施設や警報と避難の課題などが整理・検証され、この悲劇を繰り返さないため現在までさまざまな地震および津波対策が検討・実施されている。

これらは、事前対策の強化と発生後のリスク回避体制、

1. M9 地震と巨大津波の発生

東北地方太平洋沖での地震活動

東日本大震災の震源は宮城県沖であり、事前に想定されていた地震（宮城県単独型と運動型）のわずか沖に位置していた。しかし、地震の規模ははるかに大きく、地震発生時の断層破壊は3分以上続き、初動は福島県、宮城県、岩手

そして回復力を高める取り組みに整理できる。その考え方の基礎は2段階の津波レベル（レベル1と2）の設定であり、津波総合対策（ハード・ソフト対策）の中でそれぞれの役割整理ができたと考える。これらの考えは、南海トラフ・首都直下地震などの今後の地震津波対策に生かされ、特に事前復興の計画の中で実践されていかなければならない。その一方で、13年が経過し、当時の経験や得られた教訓さえも日常生活の中で薄れていっているという感がある。震災の風化が呼ばれる中で、一定の意識はあるものの事前の備えなどがおろそかになつて現状があるのではないかと思われる。

東日本大震災から13年 津波災害と防災について

いまむら ふみひこ
東北大学災害科学国際研究所 今村文彦氏

2024年の元日、令和6年能登半島地震が発生。東日本大震災を体験した私たちは、大規模な地震がいつでも起り得ることを改めて思い返しました。

東日本大震災から13年の歳月が経ち、これまでにあの悲劇からどのような課題や教訓を明らかにし、どのような対策や備えが検討され、実施してきたのか。そして今回の能登半島地震の特徴は、地震、津波工学、津波防災学研究の第一人者として、また東北大学災害科学国際研究所のリーダー、復興庁復興推進委員会メンバーとして、東日本大震災についてあらゆる面からの科学的考察・検証と論説・発表を続けてきた筆者が、現時点の最新情報を整理・報告します。

県沿岸が中心であったが、さらに、北は青森県、南は茨城県、千葉県方向にも強い揺れが広がった。

2011年3月当時の主な断層活動の範囲は、南北約500km東西約200kmにわたり、断層のすべり量は最大で30mを超えたと推定された。これによる海底変動が海面の変化をもたらし、巨大な津波が発生した。過去、この日本海溝沿いの地域は、三陸沖、宮城県沖、福島県沖、海溝沿い(沈み込み帯)など、個別地域でそれぞれ固有な地震および津波が発生し、その状況が評価されていたが、今回、一気に連動し超巨大地震が発生したことになる。地震の規模はマグニチュード(以下M)9・0であり、わが国で最大の規模であり、世界的に見ても4番目の大ささとなった。

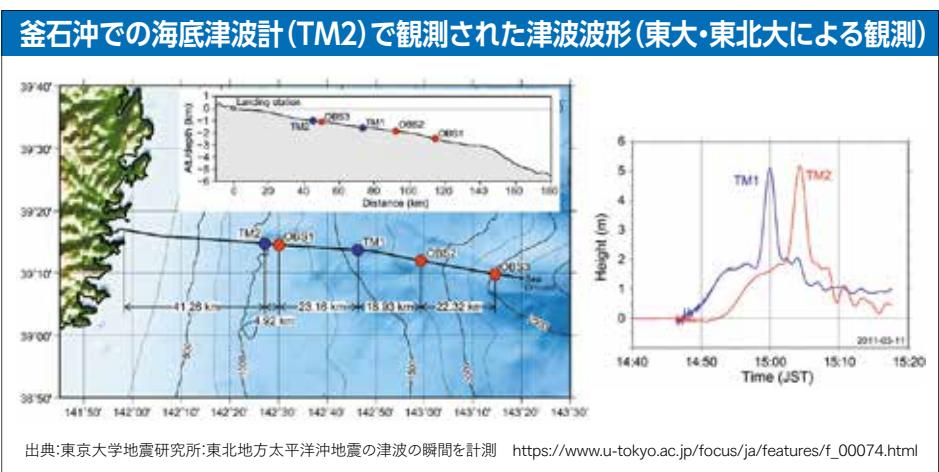
現在の余震の分布も、東北・関東地方での東日本太平洋沖の広範囲に至っており、本震で放出できなかつた分に加えて、プレート間での力のバランスが崩れ、新たに誘発された地震もある。2021年2月13日の深夜に福島県沖でM7・3、3月20日夕方に宮城県沖でM6・9の余震が発生し、この時には津波注意報も発表された。さらに、2022年3月16日のM7・4の余震での影響は大きく、新幹線の脱線、家屋や建物の被害も報告されている。

巨大津波の発生

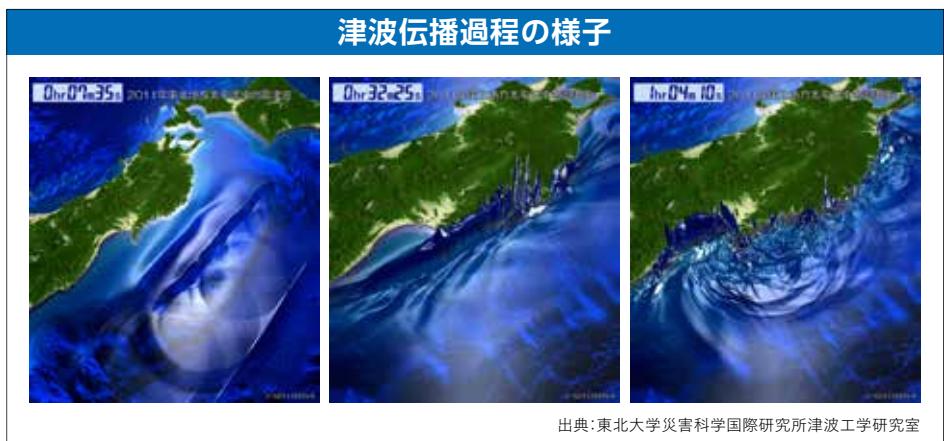
M9の地震による広域で複雑な断層破壊が海底の変位を

30分で沿岸に到達した。過去においても、複雑な海岸線形状を持つ三陸沿岸では津波の波高増幅がみられ、地形的に津波リスクの大きな場所になる。一方、仙台湾、福島県沿岸では直線状海岸であり三陸沿岸と比べて大きな津波の来

【図1】



【図2】



襲は記録に残されてはいなかつたが、今回、津波の発生域(波源)は、南側に広がっていたために、この地域にも大きな津波が到達している。さらに、石巻市や東松島市などは牡鹿半島の背後に位置していたため自然の堤防機能により、三陸沖で発生した従来の津波は防げたが、今日は仙台湾の南側から侵入し、直接この地域を襲つたことになる。浅海域になるにつれ津波の伝播する速度は遅くなるが、一方で津波が持つ流速は増加する。そのため、破壊力が増し被害が増大することになる。特に仙台湾では、波が壁のようになつて来襲する波状性段波(短い長さの波の連なり)が観測されている。そこで発生した津波が地盤よりも上昇すると、それが押し波となつて陸上または河川を遡上^{そじよう}していった。砂州や防潮堤を越えて陸上に遡上した津波もある

が、河川や運河に沿つて浸入した津波もあり、さまざまな報告や映像からスピーディーな情報が得られている。これまでに記録されてきたことが、河川を遡上していった(今村2020)。河川を遡上し内陸50kmを超える地点まで津波が到達していたことも報告されている。今までの、常

津波は深海から浅海を経由して沿岸域に達していった。

巨大津波の伝播・遡上——沿岸域での挙動

としては、宮城・福島県沖での海底変化(断層のすべり量)が大きいことが示唆されている。深い海域で大きな海底変化が生じると、それだけ大きな規模の津波が発生することになる。実際、各地で津波が観測されているが【図1】に示されたように海域で6m程度(釜石沖での海底津波計)、沿岸で10m以上の規模がリアルタイムで記録されていった。

特に今回観測された津波波形を利用した断層運動の推定(例えは、杉野ら2013・藤井・佐竹2011・東北大學2011:Satake,k., et al. 2013)が行われているが、特徴としては(1)段階的に各セグメント(断層)で破壊が生じたことと(2)震源付近で初期の津波が発生し、その後に海溝沿いに移動していること(3)宮城・福島県沖での海底変化が大きいこと、しかも(4)日本海溝沿いの値が大きいこと(これは超大すべり域と呼ばれる)が示されている。当時、沿岸での駆逐記録だけでなく、沖合のGPS波浪計や釜石沖での海底津波計での詳細な記録により、複雑な津波発生の過程がわかるようになり、将来の南海トラフなど地震と津波の評価に参考されている。

識では考えられない範囲であった。やがて、内陸への遡上が終わるとその後、逆に海域へ「戻り流れ」となって逆流する。陸上部での地形勾配が大きいと、重力の斜面分力も加わり、戻り流れは加速されて大きな流速が生じ、海岸線などで浸食などがみられ、特に、陸前高田市の松原海岸では、大部分の砂浜海岸が消失してしまった。

2. 広域での複合災害

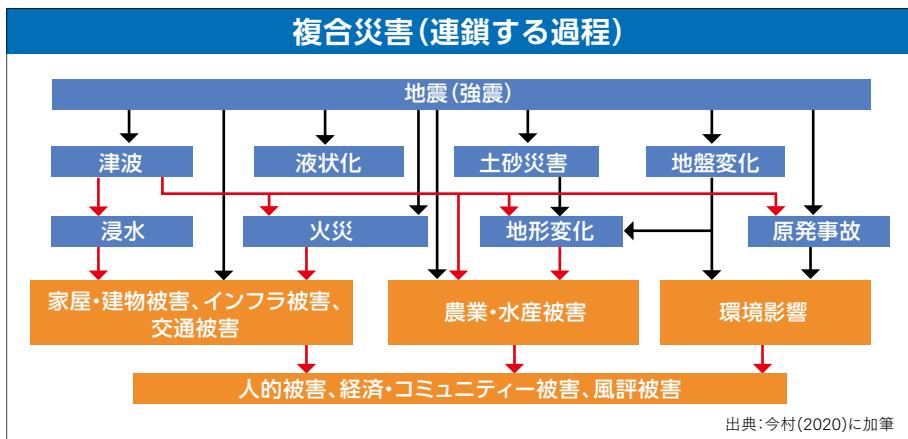
被害が連鎖していく

地震や津波などのハザードに関しては、強震動の後に、リアルタイム観測波形や沿岸での津波痕跡データなどがよる地形変化などの挙動も広く把握でき、今後の防災対策に有益な情報となつた。さらに、さまざまなハザードにより発生した被害については、人的被害、家屋・建物被害、沿岸構造物・インフラ被害などに加えて、沖合での養殖筏、船舶などの漂流、さらには、可燃物の流出と火災、道路・鉄道(車両も含む)など交通網への障害・被害、そして、原子力・火力発電所など施設への影響が報告され、その中には従来にない規模のものもあつた。現在想定されていた複合的な津波被害のほとんどのパターンが発生したと考えられる。

複合的なハザードによる連鎖的な災害は極めて複雑で

よる被害は過去の事例にも見られたが、流れ・波力が増すことによる漂流物発生と被害や地形変化などは、非常に規模の大きい東日本大震災で初めて記録され整理された。

【図3】



【表1】

津波被害の誘因、素因、影響・直接被害例		
誘因	素因	影響・直接被害事例
浸水・冠水	海底・沿岸地形、可燃物、土地利用形態、防護レベル、避難意識	人的被害(主に溺死、凍死、津波肺)、海水植物枯、農業被害、津波火災の発生(電線・バッテリーなどによる発火)、環境・生態破壊
流れ・波力 (掃流力)	沿岸地形、土砂・堆積物、漂流物、インフラ、土地利用形態	家屋・施設被害、インフラ被害、建物・構造物への浸水・冠水、浸食・堆積(地形変化)、水産被害、環境・生態破壊(アマモなど)

出典:筆者作成

あり【図3】に示されたような過程の理解と定量化が必要である。この状況は「令和6年能登半島地震」でも見られた。【図3】の中で青色がハザードなどの誘因および素因であり、オレンジ色が被害である。今後も複合災害は進化し続け、その発生から拡大の過程は連鎖により複雑化していくと考えるため、東日本大震災で得られたこのような知見は非常に重要である。なぜならば、地震そのものは抑止できないが、次への連鎖が拡大しないように対応すれば、被害は軽減できるはずである。

巨大津波による被害

当時の映像や動画で記録された巨大津波の姿は恐怖の極みであった。特に被害の様相はわれわれの想像を超えて甚大であり複雑であった。津波被害は一般に誘因・素因として分類ができ、これにより今後の効果的な対策や対応に役立つものと考える。

一般に、誘因は災害(被害や影響)を引き起こす自然力(ハザードなどの外力)を示し、素因は地形・地盤条件など地球表面の性質にかかる自然素因と、人口・建物・施設など人間・社会にかかる社会的素因とに分類される。【表1】にまとめたように津波の場合は、誘因は浸水・冠水、流れ・波力になり、素因は海底・陸上地形、土地利用形態、防護施設などがある。海水の浸水に著に見られた。海底に堆積された泥や砂などが陸域に流れ込んだためである。黒い津波の場合には、泥の混入による粘性が生まれ、波先端の勾配が大きくなることによる波力の増加が報告されている。さらには、泥水を飲み込んでしまったために気管を閉塞させる、あるいは、乾燥後の粉塵の混入(吸引)による津波肺などが、連鎖して生じたと考えられる。今後も発生の可能性のある津波被害であり、対策が求められている。

黒い津波の記録

過去に報告がほとんどなかつた津波被害としては「黒い津波」がある。東日本大震災では【扉写真】(4ページ)にあるような黒い津波の映像が残され、関連した建物被害や健康被害などが報告され、特に、沿岸中心地域で顕著に見られた。海底に堆積された泥や砂などが陸域に流れ込んだためである。黒い津波の場合には、泥の混入による粘性が生まれ、波先端の勾配が大きくなることによる波力の増加が報告されている。さらには、泥水を飲み込んでしまったために気管を閉塞させる、あるいは、乾燥後の粉塵の混入(吸引)による津波肺などが、連鎖して生じたと考えられる。今後も発生の可能性のある津波被害であり、対策が求められている。

3. 当時の課題と

今後の防災対応に向けて

当時の津波警報の課題

わが国の津波警報システムは1999年に量的警報システムに切り替えられ、短時間(3程度)に、各地での津波の到達時間や波高を

発表できる世界でもトップレベルのシステムである。当時も各地避難に充てられる時間を最大限確保するため、地震データに基づき迅速に解析され、第1報は地震発生3分後に発表（津波波高は、宮城県6m、岩手県・福島県各3m）された。しかし、推定された津波波高は実際の1/10程度の過少な評価であり、津波警報第1報では、技術的な限界から地震マグニチュードは7・9と過小評価されたことがその原因であった。その後、潮位計（172カ所）、GPS波浪計（港湾局・12カ所）、海底水圧計（12カ所）を使って、速やかにリアルタイムで津波監視が開始されていた。この結果、地震発生28分後にGPS波浪計データに基づき警報が更新され、より適切な警報（津波波高最大10m以上との予想）に更新されていった。しかしながら、地震発生から時間が経過してしまった。一方で、地震発生から時間が経過してしまった。地震発生3分後に発表した地震規模が過小評価であり、そのため岩手県や福島県に発表した「予想される津波の高さ3m」が避難の遅れにつながった例があつたと考えられている。特に、岩手県の三陸沿岸部では高さ5m以上の防潮堤などが整備されていたからである。

これに必要な観測網として、地震後に防災科学技術研究所は、【図4】に示されたように地震計と水圧（津波）計が一体となつた観測装置を海底ケーブルで接続し、これを日本海溝から千島海溝海域に至る東日本太平洋沖に設置し、リアルタイムに24時間連続で観測データ取得を開始している。観測装置は150カ所に設置し、ケーブル全長は約5500kmになる。海溝型地震や直後の津波を直接的に検知し、迅速かつ確実な情報伝達により被害の軽減や避難行動などの防災対策に貢献することが期待される。

これに必要な観測網として、地震後に防災科学技術研究所は、【図4】に示されたように地震計と水圧（津波）計が一体となつた観測装置を海底ケーブルで接続し、これを日本海溝から千島海溝海域に至る東日本太平洋沖に設置し、リアルタイムに24時間連続で観測データ取得を開始している。観測装置は150カ所に設置し、ケーブル全長は約5500kmになる。海溝型地震や直後の津波を直接的に検知し、迅速かつ確実な情報伝達により被害の軽減や避難行動などの防災対策に貢献することが期待される。

これに必要な観測網として、地震後に防災科学技術研究所は、【図4】に示されたように地震計と水圧（津波）計が一体となつた観測装置を海底ケーブルで接続し、これを日本海溝から千島海溝海域に至る東日本太平洋沖に設置し、リアルタイムに24時間連続で観測データ取得を開始している。観測装置は150カ所に設置し、ケーブル全長は約5500kmになる。海溝型地震や直後の津波を直接的に検知し、迅速かつ確実な情報伝達により被害の軽減や避難行動などの防災対策に貢献することが期待される。

* tFISH / (Tsunami Forecasting based on Inversion for initial sea-Surface Height) G. (気象研究所が開発)

東日本大震災ではリアルタイム観測の重要性が再認識され、岩手県の三陸沿岸部では高さ5m以上の防潮堤などが整備されていたからである。

リアルタイム観測と予測技術の向上

東日本大震災ではリアルタイム観測の重要性が再認識

域が必ずしも一致せず、南海トラフ沿いに比べて地震発生の仕方が多様である。地震が発生すると、プレート境界周辺における応力の変化やすべりの進行などにより、地震が発生した周辺でさらに大きな地震が続いて発生する可能性があり、過去にモーメントマグニチュード（M_w）*7クラスの地震が発生した後、数日程度の短い期間をおいて、さらに大きなM_w 8クラス以上の大規模な地震が続いて発生する事例なども2例であるが確認されている。

東日本大震災による地震および津波の発生域の北側では、震災後にさらに科学的な調査や分析がなされ、地震の長期発生評価やこの地域での最大クラス地震による被害想定も行われている。沿岸地域での津波堆積物の資料から、

約300～400年間隔で、甚大な被害を及ぼすような津波が発生していることが明らかとなっており、いずれの領域においても最大クラスの津波の発生が切迫している状況にあると考えられている。

東日本大震災の被害を繰り返さないために、具体的な被害を算定して、被害の規模などを明らかにすることにより、防災対策の必要性を住民に周知すること、地域における防災対策の立案、施策の推進に活用されている。

* M_w / 地震でずれ動いた部分の面積×ずれた量×岩石の硬さをもとに計算したマグニチュード。

日本海溝・千島海溝周辺での地震・津波への備え



出典：国立研究開発法人 防災科学技術研究所 海底地震津波観測網／日本海溝海底地震津波観測網:S-net「観測網の全体概要」
<https://www.seafloor.bosai.go.jp/S-net/>

後発地震注意報の運用開始

先ほど紹介したように、日本海溝・千島海溝沿いの領域で規模の大きな地震が発生すると、その地震の影響を受けて新たな大規模地震が発生する可能性が相対的に高まると考えられている。このため、2022年12月から北海道の根室沖から東北地方の三陸沖の巨大地震の想定震源域および想定震源域に影響を与える外側のエリアで

M_W 7・0以上の地震(先発地震)が発生した場合に、「北海道・三陸沖後発地震注意情報」を発表する運用が始まっている。

気象庁において一定精度のM_Wを推定(地震発生後15分～2時間程度)し、「北海道・三陸沖後発地震注意情報の発表基準を満たす先発地震であると判断でき次第、内閣府・気象庁合同記者会見が開かれる。合同記者会見では、気象庁から「北海道・三陸沖後発地震注意情報の発表と解説」が行われ、その後に内閣府から「当該情報を受けてとるべき防災対応の呼びかけ」が行われる。

「北海道・三陸沖後発地震注意情報」は、極めて不確実性が高い情報であるため、それに応じた防災対応は大変難しいという背景がある。この情報を受け取った場合には、留意事項を考慮した上で、必要な防災対応をとることが重要になる。なお、日頃からの地震への備えを徹底しておくことが最も重要であることは言つまでもない。以下のHPを参照やれたい。

気象庁「北海道・三陸沖後発地震注意情報」の発表基準と情報発表の流れ
https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/neeq/info_criterion.html

3・11伝承ロード推進機構の発足 —教訓を伝承していく—

東日本大震災の被災地では、震災遺構や伝承施設などが整備されており、ぜひ訪問・観察し、現場で当時の実態と地域住民の経験を知ついただきたい。東日本大震災の被災地

にある震災伝承施設は、複数の県にまたがる広大なエリアに数多く点在し、限られた時間で巡るとは容易ではない。そのため、目的や時間に応じて効率的に施設を訪問・観察できるように、伝承施設情報を分類整理して提供し、案内マップや標識を設置しネットワーク化することが必要である。こうした中、国土交通省東北地方整備局が中心となり「震災伝承ネットワーク協議会」(以下、協議会)が設立され、さらに一般財団法人である「3・11伝承ロード推進機構」(以下、機構)が2019年8月に生まれた。被災の実態や教訓を学ぶための遺構や展示施設が数多くあり、その施設を協議会が「震災伝承施設」として登録し、マップや案内標識の整備などによりネットワーク化を図っている。その施設やネットワークを基盤にして、防災や減災、津波などに関する「学び」や「備え」についてさまざまな取り組みや事業を機構が中核となり実施している。

機構では、伝承ロードマップ【図5】を作成して連携を図ることとともに、学習・研修旅行の支援、各種啓発イベント企画、映像アーカイブ事業などをを行っている。広域で複合的な大災害となつた東日本大震災の被災状況や体験、当時の緊急対応、そして現在も続いている復旧・復興の活動を、国内外に伝え後世に残していくことは非常に大切である。

今後も増え続ける災害に対応するためには、東日本大震災での教訓を整理し、伝承することが不可欠であり、実際の各被災地での活動を現場で残していく震災遺構や伝承施設の役割は大変に大きいと考える。



東北大震災科学国際研究所
今村文彦

東北大震災科学国際研究所前所長 津波工学研究分野教授
東北大震災科学国際研究所博士後期課程修了。東北大震災科学国際研究所附属災害制御研究センター助教授、教授を経て、2014年より
震災復興構想会議検討部会、中央防災会議東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会などのメンバー、現在、復興庁復興推進委員会委員長、一般財団法人3・11伝承ロード推進機構代表理事、土木学会副会長などを務める。
NHK放送文化賞(2014年)、文部科学大臣表彰科学技術振興部門(2015年)、青森県知事賞(2016年)、防災功労者内閣総理大臣表彰(2016年)

(参考文献)
・今村文彦(2020)、潮流する津波一河川津波のメカニズム・脅威と防災ー、成山堂書店

・杉野英治ら(2013)、原子力サイトにおける2011東北地震津波の検証、日本地震工学論文集 第13巻、第20号 特集(2013), pp.2-21

・東北大モデル(2011)、vers.1.1,2011,東北地方太平洋沖地震を対象とした津波ハザードマップへの実施 http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/Jevents/Itohoku_2011/model/dcrc_ver1.1_11107.pdf

・藤井雄士郎・佐竹健治(2011)、NO1-1年08月11日東北地方太平洋沖地震の津波波源 http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_ja.html

・Satoh,K.,et al. (2013) Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku Earthquake as inferred from tsunami waveform data, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.103, pp.1 473-1492

【図5】

