

2. 2 津波波源モデル・震源断層モデルの構築

2. 2. 1 歴史地震・古津波調査

2. 2. 1. 1 歴史文書・地震記録の調査

目 次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 8 ヶ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
 - 1) 平成 25 年度
 - 2) 平成 26 年度
 - 3) 平成 27 年度
 - 4) 平成 28 年度
 - 5) 平成 29 年度
 - 6) 平成 30 年度
 - 7) 平成 31 年度（令和元年度）
 - 8) 令和 2 年度
- (e) 令和 2 年度業務目的

(2) 令和 2 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の成果
 - 1) 1092 年（寛治六年八月三日）の地震津波は気象災害であった可能性の検証
 - 2) 東北沖で発生した 1983 年日本海中部地震、1983 年青森県西方沖の地震、1964 年男鹿半島沖の地震の津波断層モデルの再検証
 - 3) 日本海で発生する地震の相似則
 - 4) 20 世紀に日本海で発生した地震・津波記録の整理
- (c) 結論ならびに今後の課題
- (d) 引用文献
- (e) 成果の論文発表・口頭発表等
- (f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

(3) 8 ヶ年の成果

- (a) 業務の成果
- (b) 結論ならびに今後の課題
- (c) 引用文献

(1) 業務の内容

(a) 業務題目

2.1.1 歴史文書・地震記録の調査

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
東京大学地震研究所	教授	佐竹 健治
	特任研究員	五島 朋子
	特任研究員	Iyan E. Mulia
国立科学博物館	研究主幹	室谷 智子
地震予知総合研究振 興会	主任研究員	石辺 岳男

(c) 業務の目的

震源が知られている 20 世紀に発生した大地震（M7 クラス）の地震記録の再解析と、北海道から九州に至る日本海沿岸域での歴史資料の解析を進め、津波波源域の推定に必要な基礎資料を得る。

(d) 8 ヶ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成 25 年度：

地震カタログや地震波形記録から、1964 年新潟地震の本震・余震の震源再決定、1963 年越前岬沖、1964 年男鹿半島沖、1971 年サハリン西方沖、1983 年青森県西方沖の地震の本震・余震の震源再決定や断層パラメータ、すべり分布の推定を行った。1741 年（寛保元年）渡島大島津波について、地震歴史資料のデジタルデータ化を行い、校訂作業のための原本の収集を開始した。「古地震・津波等の史資料データベース（ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究プロジェクト）」で公開されている歴史資料に基づき、1762 年（宝暦 12 年）佐渡地震と 1802 年（享和 2 年）佐渡小木地震について、震度分布と津波被災地の推定を行った。

2) 平成 26 年度：

平成 25 年度に引き続き 20 世紀に発生した 1963 年越前岬沖、1964 年男鹿半島沖、1983 年青森県西方沖の地震に対して、地震波形記録の再解析から断層パラメータ、すべり分布の推定を行った。1964 年男鹿半島沖、1983 年青森県西方沖の地震に対して、津波波形記録の再現を試み、断層パラメータの検証を行った。1741 年（寛保元年）渡島大島津波について、新たに史料を収集し、平成 25 年度に収集した史料については、校訂作業を開始した。

3) 平成 27 年度：

平成 26 年度に引き続き、20 世紀にサハリン沖・東北沖・北陸沖で発生した地震について

て、地震記録・津波記録を用いて断層モデルの推定などの地震学的解析を実施した。また、主に山陰・九州地方を中心として、過去に発生した地震の地震・津波に関する史資料の収集や解析を実施した。さらに、平成 25 年度に収集した史料に関して、引き続き校訂作業を実施し、史料分析を行った。

4) 平成 28 年度 :

平成 27 年度までに地震学的解析を行った、サハリン沖・東北沖・北陸沖の地震の断層パラメータの検証と、1963 年越前岬沖地震と海底活断層との関係についての検証を行った。また、主に山陰・九州沖を中心として、過去に発生した地震・津波に関する波形・歴史資料の調査・収集を実施した。

5) 平成 29 年度 :

主に北海道地域を対象として、過去に日本海で発生した 1940 年積丹半島沖の地震、1993 年北海道南西沖地震における断層パラメータに関する既往研究結果を収集し、津波数値解析を実施し、津波断層モデルの検証を実施した。また、北海道沿岸に津波による影響を及ぼす可能性がある地震に関して資料を収集した。

6) 平成 30 年度 :

北海道・東北地域を対象として、過去に日本海で発生した 1940 年積丹半島沖の地震、1983 年日本海中部地震の津波波形記録を用いて、津波数値解析による断層モデルの検証を行った。

7) 平成 31 年度（令和元年度）:

日本海全域を対象として、地震・津波波形記録や史料の収集と解析を実施した。

8) 令和 2 年度 :

20 世紀以降に発生した地震について断層パラメータを整理し、それらの関係（相似則）を検討した。これまで本プロジェクトで収集した地震・津波記録を関係データベースに提供できるよう、整理・デジタル化した。

(e) 令和 2 年度業務目的

歴史資料から 1092 年（寛治六年）越後の地震津波の実態について、検証する。サブサブテーマ 2.5.1 によって得られた東北沖地域の断層モデルを用いて、日本海で発生した 1983 年日本海中部地震、1983 年青森県西方沖の地震、1964 年男鹿半島沖の地震の津波断層モデルについて再検討する。20 世紀以降に発生した地震について断層パラメータを整理し、それらの関係（相似則）を検討する。これまで本サブサブテーマで収集した地震・津波記録を関係データベースに提供できるよう、整理・デジタル化を実施する。

(2) 令和 2 年度の成果

(a) 業務の要約

1092年（寛治六年）の越後の地震津波が気象災害であった可能性について、歴史資料を用いて検証した。日本海で発生した1983年日本海中部地震、1983年青森県西方沖の地震、1964年男鹿半島沖の地震について、令和元年度にサブサブテーマ2.5.1「断層モデルの構築」によって得られた東北地域の断層モデルと津波波形インバージョンによって推定された断層モデル、本サブテーマで過去に検討を行ってきた断層モデルを用いて津波数値計算を行い、観測波形と比較することで断層モデルの検証を行った。20世紀に日本海で発生した地震について断層パラメータを整理し、相似則について検討した。日本海で発生した地震について収集した地震・津波記録を、今後の利活用のために整理・デジタル画像化を実施した。

(b) 業務の成果

1) 1092年（寛治六年八月三日）の地震津波は気象災害であった可能性の検証

『新収日本地震史料（第1巻）』（東京大学地震研究所（編）、1981¹⁾；以降、「新収」）には、1092年（ユリウス暦：1092年9月7日、グレゴリオ暦：1092年9月13日）（寛治六年八月三日）に越後で地震・津波が発生したとする史料が複数、掲載されている。『日本被害地震総覧599-2012』（宇佐美・他、2013）²⁾では、[柏崎～岩船間の沿岸、海府浦・親不知大津波におそわる。「地震」とある古記あるも、地震の状況を記した古記録未発見。疑わしい。]としている。本サブサブテーマでは、寛治六年八月三日に地震や津波があったのか否か、史資料の悉皆調査による史料学的検討を行い、この事象が大風（台風）であったと解釈する方が妥当である事を指摘する。

この事象が地震津波であったとする主たる史料として、新収に掲載されている「越後国式内神社考証」ならびに「紫雲寺新田由来記」がある。「越後国式内神社考証」は、「古代・中世の地震・噴火史料データベース」（石橋・古代中世地震史料研究会、2011）³⁾に史料等級C（明治時代以降に作成・刊行された記録・文書等。一部に理学的な調査報告書等を含んでいる。）の史料として収録されている。史料には、『（前略）寛治年間、地震大津浪ニテ、寺泊辺ヨリ角田浜新潟辺マデスベテ変地セシ砌、赤塚村民家モ、当今ノ地ニ転居シテ、船江神明ト民家ト遙ニ隔レル故、居村ノ伊邪那岐社自然鎮守神ノ如クニナリ、後吉田家ヨリ赤塚神社号ノ許可ヲ得テ氏神ト致シ候（後略）』と寛治年間に地震大津浪があった事が記述されているが、その詳細は不明であり、日付に関する記述もない。

「紫雲寺新田由来記」は、江戸時代の干拓により新田開発が進められた旧塩津潟（紫雲寺潟：現在の新潟県新発田市紫雲寺地区および胎内市塩津地区）の由来を記した史料である。新収に『海蔵寺住職快秀附記して曰く七十三代堀川院寛治六年戊辰年大津波大地震蒲原岩船陸地となる』と附記があるが、上述の史料と同様に日付に関する記述はなく、干支についても寛治六年は壬申で、戊辰は寛治二年のことである。

一方、同時代史料である「扶桑略記」には『寛治六年壬申（中略）八月三日甲寅、大風、諸國洪水。高潮之間、民烟田畠多以成海。百姓死亡、不可稱計。伊勢太神宮寶殿一字、并四面廊等、皆為大風顛倒』とあり、大風（台風）により、伊勢神宮を始めとする諸国で洪水や高潮が発生した記述はあるが、地震津波に関する記述は見当たらない。また、「勘仲記」（鎌倉時代後期の公卿藤原兼仲による日記）の弘安十年二月三日ノ条には、『寛治六年八月五日（中略）親定朝臣言上云、今月四日、二宮禰宜等書状云、為今朝大風、太神宮西宝殿

傾倒、其角瑞垣同傾倒、自余御門殿舎等傾倚 四面玉垣荒垣等並損、又豊受宮外幣殿、瑞垣御門、四御門並齋王御輿宿、庁舎等皆傾倒者』とあり、同様に大風による被害記述に限られる。更に『十三日祭主親定言上 去四日大風太神宮西賓殿豊受宮東西賓殿傾倒』（「十三代要略」）と、こちらも大風の記述に留まる。

八月から九月にかけては一年を通じて最も台風の発生数ならびに上陸数が多い時期にあたり、死者・行方不明者数 5,000 名以上の甚大な被害を生じた 1959 年（昭和 34 年）台風 15 号（伊勢湾台風）は 9 月 26 日夕刻に紀伊半島先端に上陸後、本州中部を縦断し富山～新潟県沖へと抜けていった（図 1）。寛治六年八月三日の事象が地震津波であれば、何らかの震動（揺れ）やそれによる被害に関する記述が期待されるが、そういった記述が残されていない事から、この事象が地震であったとする明確な根拠はない。残存する史料が限られているが、これらの検討によれば、寛治六年八月三日の越後における事象は地震津波ではなく、むしろ伊勢神宮を始めとする諸国に被害を及ぼした大風（台風）による大波（高潮）であった可能性が高いと結論付けられる。

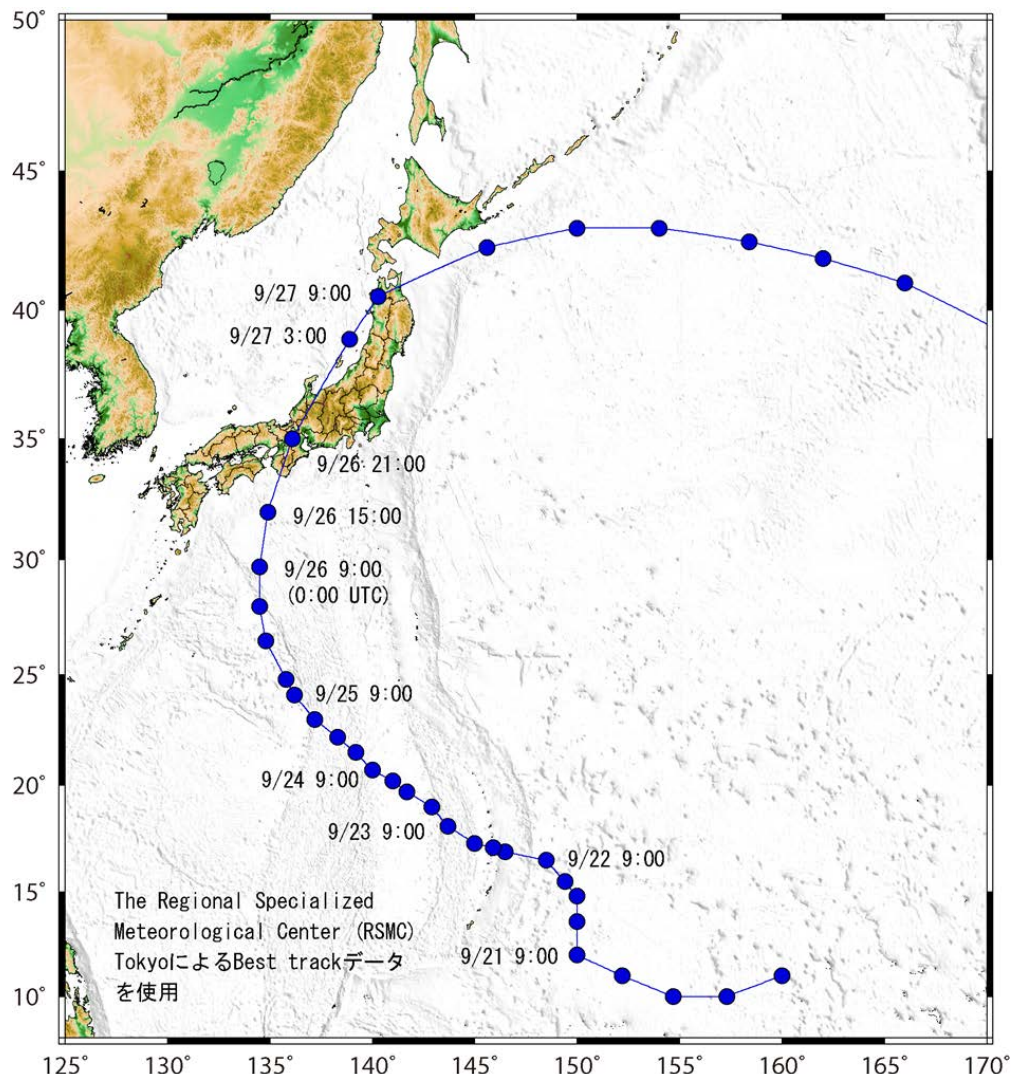


図 1 1959 年（昭和 34 年）台風 15 号（伊勢湾台風）の進路。The Regional Specialized Meteorological Center Tokyo による Best track データを使用し、時刻は日本標準時（GMT+9）により示す。

2) 東北沖で発生した 1983 年日本海中部地震、1983 年青森県西方沖の地震、1964 年男鹿半島沖の地震の津波断層モデルの再検証

日本海沿岸域に津波被害をもたらした 1983 年日本海中部地震、1983 年青森県西方沖の地震、1964 年男鹿半島沖の地震について、断層モデルの検証を行った。津波波形インバージョンや遠地地震波形インバージョンによって得られている断層モデルなどに加え、サブサブテーマ 2.5.1「断層モデルの構築」で得られた東北地域の断層モデルから、各地震を引き起こした可能性が考えられる断層モデルを設定した。サブサブテーマ 2.5.1「断層モデルの構築」では各断層のすべり量は与えられていないため、震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）⁴⁾における「(ア) 過去の地震記録や調査結果などの諸知見を吟味・判断して震源断層モデルを設定する場合」の手法（以下、「レシピ (ア)」という）によってすべり量を算定した。この「レシピ (ア)」の手法では、地震モーメント (M_0) と断層面積 (S) について、 $M_0=7.5 \times 10^{18} (\text{N} \cdot \text{m})$ (M_w 6.5 程度) を境に二つの異なる関係式（スケーリング則）が与えられていた。ところが、 M_w 7.4 以上の大きな地震については、 M_0 と S との関係がこれらの式から外れることが指摘された (Murotani et al., 2015)⁵⁾ ため、平成 28 年度に改訂された「レシピ (ア)」では、 $M_0 \geq 1.8 \times 10^{20} (\text{N} \cdot \text{m})$ においてさらに別の関係式を使う、すなわち地震規模によって 3 段階に変化するスケーリング則が導入された。この場合、第 3 ステージにおいて同じ M_0 に対して第 2 ステージと比べて断層面積が大きくなるため、すべり量は小さくなる。本サブサブテーマでは平成 30 年度まで 2 段階のスケーリング則を用いてきたが、大きな M_0 に対してはすべり量が大きめになり、計算された津波の振幅も大きくなる傾向があった。ここでは、3 ステージによる「レシピ (ア)」によるすべり量を用いて津波を計算した。

津波計算には、断層パラメータから Okada (1985)⁶⁾ によって計算した海底地殻変動を初期条件とし、分散を考慮しない非線形長波式の大規模並列計算コード JAGURS⁷⁾ を用いた。1983 年日本海中部地震に対して使用する海底地形は、日本周辺の観測点には日本水路協会による JTOPO30 と M7000 シリーズから作成した 15 秒 (約 450 m) メッシュのグリッドデータを、ロシア周辺の観測点に対しては国際水路機関 (International Hydrographic Organization) と国際連合教育科学文化機関・政府間海洋学委員会 (UNESCO-Intergovernmental Oceanographic Commission) との共同プロジェクトで作成された全世界の海底地形図 GEBCO2019 (15 秒メッシュ) のグリッドデータを用いた。1983 年青森県西方沖の地震と 1964 年男鹿半島沖の地震に対しては、JTOPO30 と M7000 シリーズから作成した 5 秒 (約 150 m) メッシュのグリッドデータを用いた。

各地震に対して異なる断層モデルを用いて津波波形を計算し、観測波形との比較を行った。以下、各地震についての結果をまとめる。

a) 1983 年日本海中部地震 (M_j 7.7)

1983 年日本海中部地震については、平成 30 年度に、津波波形を用いたインバージョン解析による Satake (1989)⁸⁾、近地地震波形と経験的グリーン関数を用いたインバージョン解析による Fukuyama and Irikura (1986)⁹⁾ の断層モデルに加えて、「日本海における大規模地震に関する調査検討会」(以下、「日本海検討会」)¹⁰⁾ が 1983 年日本海中部地震に相当する海底断層としている F24 断層を対象として、津波解析を実施した。日本国内で津波

波形が記録された杓形、石狩、岩内、江差、吉岡、酒田、柏崎、富山の 8 点に加えて、ロシアの Vladivostok、Posyet、Nakhodka、Rudnaya Pristan の 4 点に対して津波数値計算を行い（図 2）、観測波形と計算波形との比較を行った。その結果、初動の押し引きの違いや津波到達時刻の差などから、Satake (1989)⁸⁾ モデルが最も観測波形の再現性が良かったが、ロシアの観測点周辺の海底地形データは JTOPO30 による 30 秒メッシュを使用していたため、Nakhodka や Posyet の検潮所付近の地形が再現できていなかったため、波形の再現性も低く、さらなる検証が必要であった。

今年度は、ロシア周辺の新たな 15 秒メッシュの地形データを用いて、Satake (1989)⁸⁾ の津波波形インバージョンモデルと、その周囲においてサブサブテーマ 2.5.1「断層モデルの構築」により得られた MMS01、MMS02、MMS03、MMS04、MGM01 の組み合わせで 2 通りの連動モデル「MMS01+MMS04+MGM01」と「MMS01+MMS04+MGM01+MMS02+MMS03」を設定し（図 2）、津波数値計算を行った。「MMS01+MMS04+MGM01」モデルは、Satake(1989)⁸⁾ による断層モデルとほぼ同じ位置となった。表 1 に各断層パラメータを示す。

各モデルによる海底地殻変動を図 3 に、観測波形と計算波形の比較を図 4 にそれぞれ示す。「MMS01+MMS04+MGM01」のすべり量の推定に、「レシピ (ア)」によるすべり量を適用した結果は、Satake (1989)⁸⁾ による結果とほぼ同じとなり、観測波形をよく再現した。「MMS01+MMS04+MGM01+MMS02+MMS03」モデルは、MMS02 と MMS03 の断層の影響により、北側の観測点（Rudnaya Pristan、吉岡、江差など）で、第 1 波の到達時刻、極性（上げ波・下げ波）、振幅が観測波形と合わない。そのため、1983 年日本海中部は、「MMS01+MMS04+MGM01」の海域活断層によって引き起こされた可能性が考えられる。

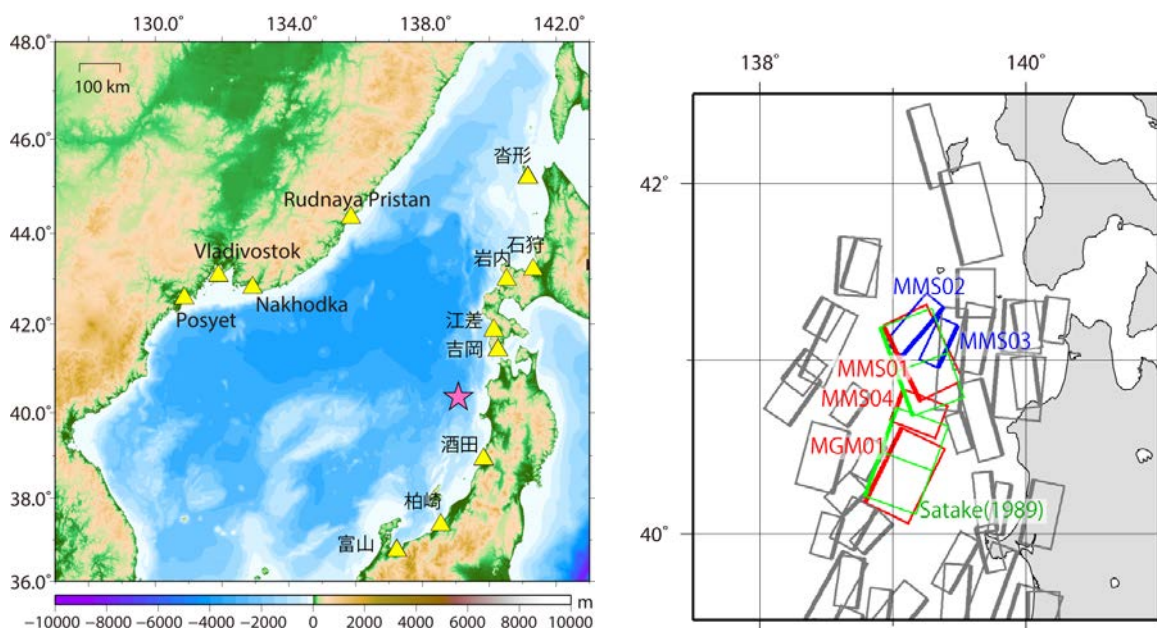


図 2 (左) 津波波形を計算した観測点 (三角) と (右) 1983 年日本海中部地震を起こした可能性が考えられる MMS01、MMS02、MMS03、MMS04、MGM01、Satake (1989)⁸⁾ の断層位置。星印は気象庁による 1983 年日本海中部地震の震央を示す。

表 1 津波数値計算を行った各断層モデルのパラメータ

モデル	断層長 (km)	断層幅 (km)	上端深さ (km)	走向 (°)	傾斜角 (°)	すべり角 (°)	すべり量 (m)
MMS01	53.2	33.4		334.0	25.0	69.0	3.09
MMS04	21.8	33.1	0.0	21.0	25.0	89.0	1.98
MGM01	53.2	33.8		26.0	25.0	69.0	3.12
MMS01	53.2	33.4		334.0	25.0	69.0	3.37
MMS04	21.8	33.1		21.0	25.0	89.0	2.15
MGM01	53.2	33.8	0.0	26.0	25.0	69.0	3.39
MMS02	40.6	18.2		220.0	40.0	130.0	2.18
MMS03	29.7	18.0		205.0	45.0	108.0	1.85
Satake (1989)	30.0	40.0	1.0	340.0	30.0	90.0	1.8*
	30.0	40.0		340.0	30.0	90.0	2.2*
	30.0	40.0		20.0	30.0	90.0	3.9*
	30.0	40.0		20.0	30.0	90.0	2.0*

*津波波形インバージョンによって得られたすべり量

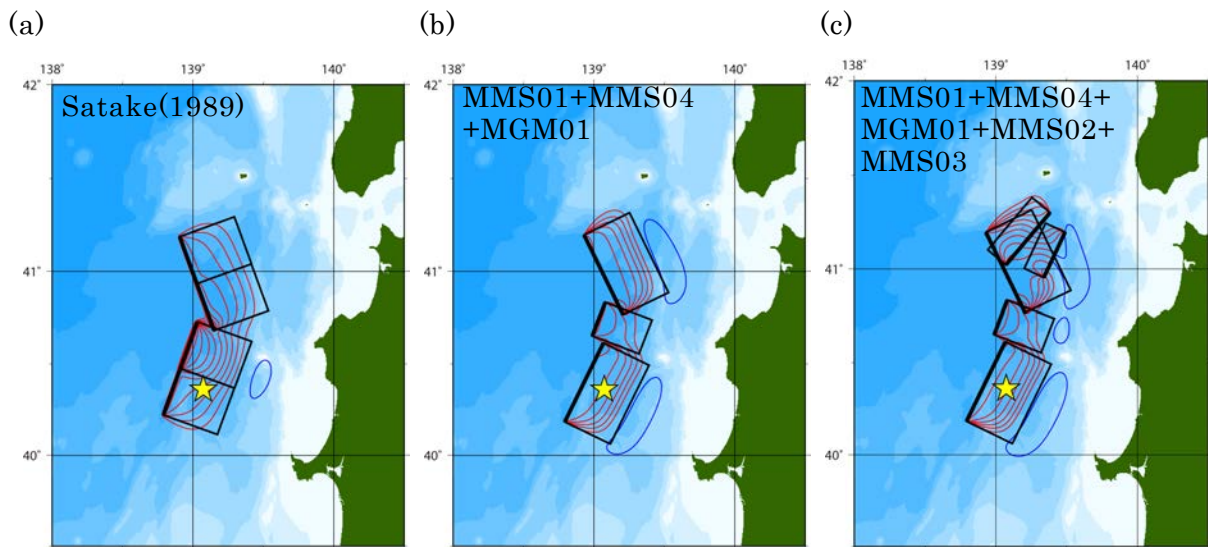


図 3 (a) Satake (1989)、(b) MMS01+MMS04+MGM01、(c) MMS01+MMS04+MGM01+MMS02+MMS03 モデルによって計算された海底地殻変動。黒矩形は断層面、黒太線は断層上端の位置をそれぞれ示す。赤は隆起、青は沈降を表す。コンター間隔は 20 cm。星印は気象庁による 1983 年日本海中部地震の震央を示す。

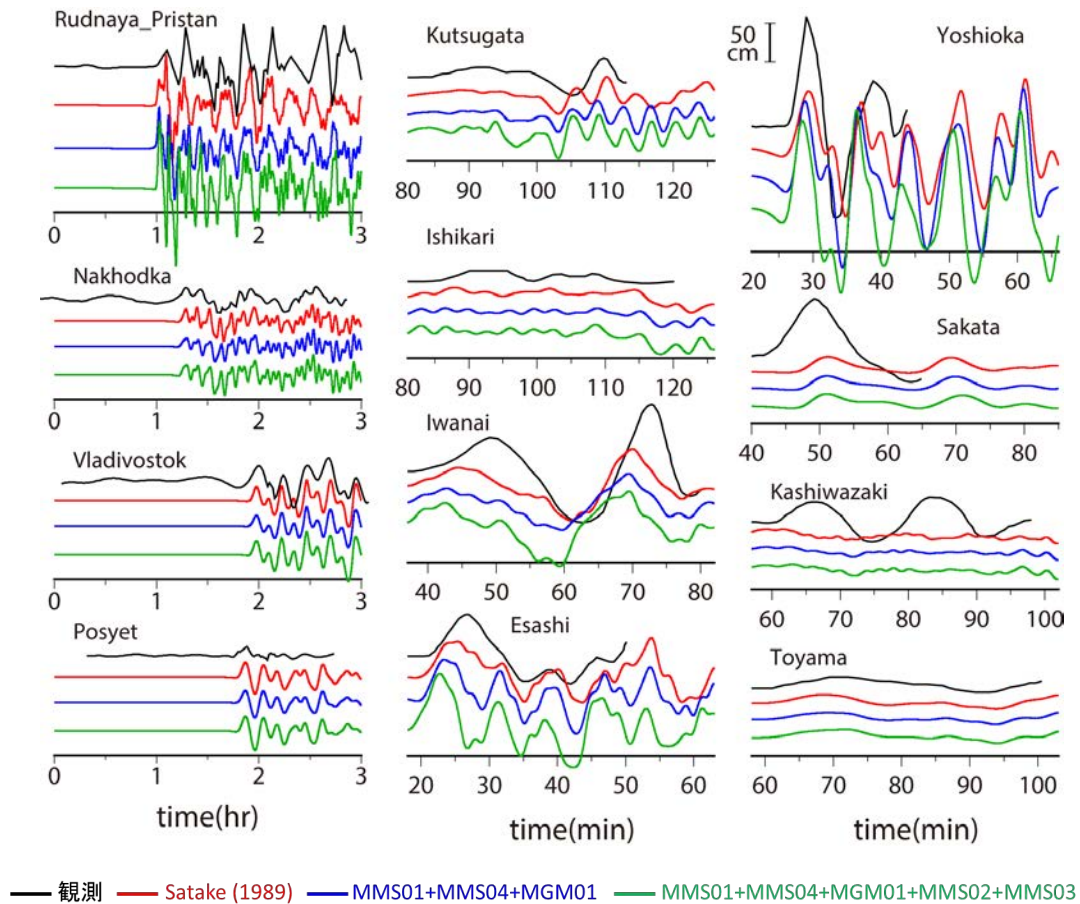


図4 津波観測波形と Satake (1989) モデル、MMS01+MMS04+MGM01 モデル、MMS01+MMS04+MGM01+MMS02+MMS03 モデルから計算した津波波形の比較。時間軸は地震発生時刻を 0 とした。ロシアの時刻精度が不明のため、計算波形の初動に観測波形の初動を合わせた。

b) 1983 年青森県西方沖の地震 (Mjma 7.1)

1983 年青森県西方沖の地震については、平成 26 年度までに、遠地地震波形インバージョンを行って得られた不均質すべりモデルや震源域周辺の「日本海検討会」モデル¹⁰⁾ から津波数値計算を行い、断層パラメータの妥当性を検討してきた。しかし、計算波形の振幅が観測波形よりもかなり小さい、津波到達時刻が合わない、など再現性が低い観測点が多かったため、平成 28 年度までに、試行錯誤的に最適となるような断層モデルの検討を行ってきた。その結果は、遠地地震波形インバージョンによる断層パラメータに対して、振幅が観測波形を再現できるようにすべり量を調整した一様すべりモデルが最適となった。

この地震の震源域には、これまで活断層は設定されていなかったが、令和元年度にサブサブテーマ 2.5.1 により震源付近に MMS02 モデルが設定された (図 5)。不均質すべりモデルや一様すべりモデルに加えて MMS02 モデルを対象として、日本国内で津波波形が記録された稚内、仙法志、石狩、岩内、江差、吉岡、深浦、能代、船川、栗島、岩船、両津、直江津の 13 点 (図 5) に対して津波数値計算を行い、観測波形と計算波形との比較を行った。各断層パラメータを表 2 に示す。また、各モデルによる海底地殻変動を図 6 に、観測波形と計算波形の比較を図 7 にそれぞれ示す。

MMS02 は、遠地地震波形インバージョンによるモデル（東傾斜）と傾斜方向が異なる（西傾斜）ため、深浦で大きく初動が異なる。しかし、それ以外には大きな違いは見られず、観測波形を比較的再現できており、MMS02 が本地震を起こした可能性は考えられる。この地震は 1983 年日本海中部地震の余震になるが、本震は東傾斜である。MMS02 は、本震を起こしたと考えられる断層（MMS01）と交差するような断層であるため、余震として MMS02 が活動することはあり得ると思われる。遠地地震波形インバージョンからは東傾斜か西傾斜かを特定することはできず、余震活動が比較的東傾斜の面で起こっていることから、東傾斜の面を採用して津波計算を行ったが、余震活動は日本海中部地震の余震であると思われるため、さらなる議論は青森県西方沖の地震の近地地震波形を用いた検討を行う必要があるであろう。

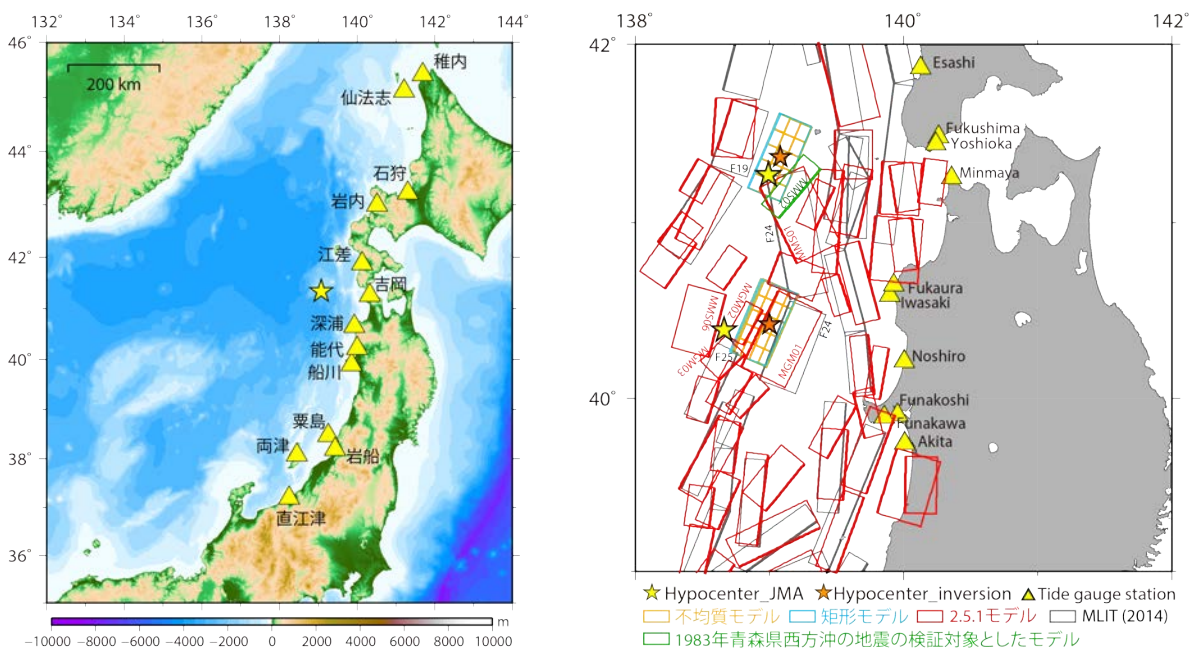


図 5 (左) 津波波形を計算した観測点の分布 (三角) と (右) 1983 年青森県西方沖の地震を起こした可能性が考えられる MMS02 (緑) と遠地地震波形インバージョンによる不均質すべりモデル (オレンジ)、それを参考に振幅が観測波形を再現できるように調整した矩形一様すべりモデル (水色) の断層位置。黄色星印は気象庁による 1983 年青森県西方沖の地震の震央を示す。オレンジ星印は、波形インバージョンで使用した震央の位置を示す。

表 2 津波数値計算を行った各断層モデルのパラメータ

モデル	断層長 (km)	断層幅 (km)	上端深さ (km)	走向 (°)	傾斜角 (°)	すべり角 (°)	すべり量 (m)
MMS02	40.6	18.2	0.0	220	40	130	1.2
Seismic inversion model	50.0	30.0	1.8	23	43	85	ave. 0.5
Model 1*	50.0	30.0	0.3	23	43	85	0.73

*地震波解析から得られた断層モデルを参考に、振幅を再現できるように調整したモデル

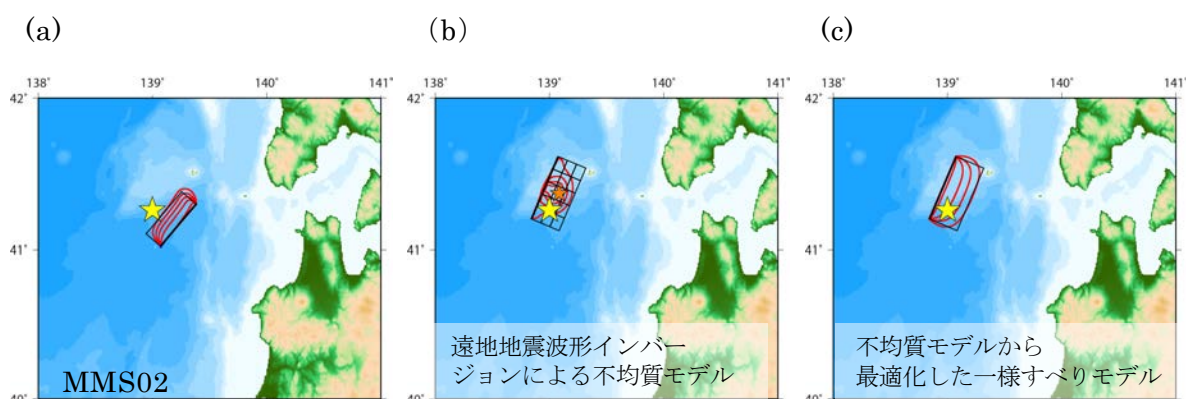


図 6 (a)MMS02 モデル、(b)遠地地震波形インバージョンによる不均質モデル、(c) 不均質モデルから最適化した一様すべりモデルによって計算された海底上下変動。黒矩形は断層面、黒太線は断層上端をそれぞれ示す。赤は隆起、青は沈降を表す。コンター間隔は 10 cm。星印は気象庁による 1983 年青森県西方沖の地震の震央を示す。

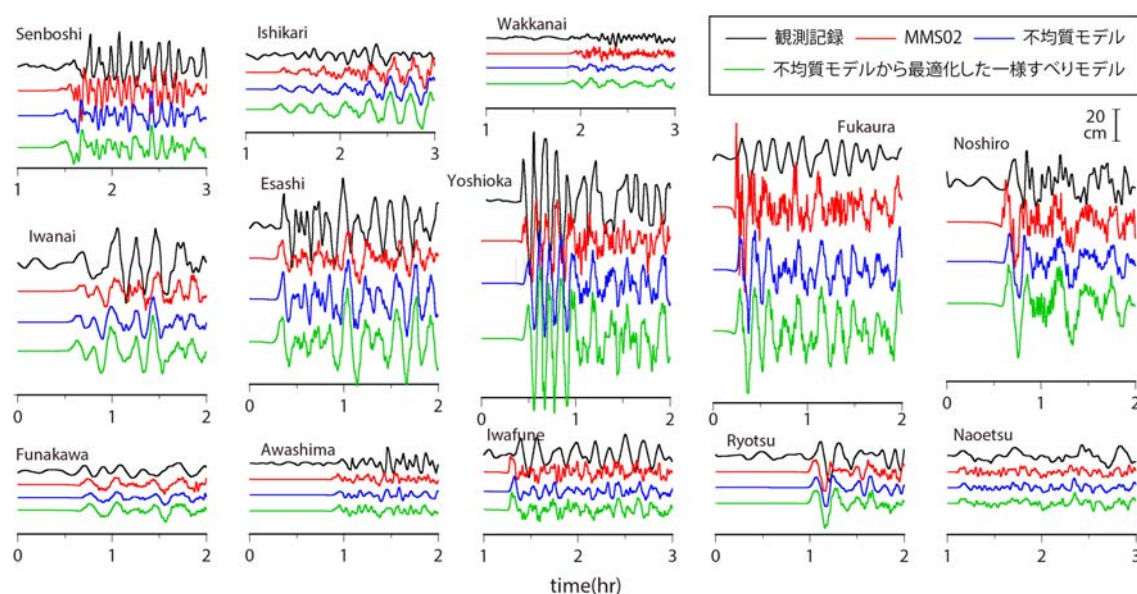


図 7 津波観測波形と MMS02 モデル、遠地地震波形インバージョンモデル（不均質モデル）、不均質モデルから最適化した一様すべりモデルから計算した津波波形の比較。時間軸は地震発生時刻を 0 とした。

c) 1964 年男鹿半島沖の地震 (Mjma 6.9)

1964 年男鹿半島沖の地震についても、平成 26 年度までに、遠地地震波形インバージョンを行い、得られた不均質すべりモデルや震源域周辺の「日本海検討会」モデル¹⁰⁾ から津波数値計算を行い、断層パラメータの妥当性を検討してきた。しかし、計算波形の振幅が観測波形よりもかなり小さい、津波到達時刻が合わない、など再現性が低い観測点が多かったため、平成 28 年度までに、試行錯誤的に最適となるような断層モデルの検討を行ってきた。その結果は、1983 年青森県西方沖の地震と同様、遠地地震波形インバージョンに

よる断層パラメータに対して、振幅が観測波形を再現できるようにすべり量を調整した一様すべりモデルが、最適となった。

この地震の震源域には、これまで活断層は設定されていなかったが、平成 31 年度（令和元年度）にサブサブテーマ 2.5.1 により震源付近に MGM02、MGM03、MMS06 のモデルが設定された（図 8）。不均質すべりモデルや一様すべりモデルに加えて MGM02、MGM03、MMS06 の各モデルを対象として、日本国内で津波波形が記録された江差、福島、岩崎、船越、船川、秋田、下瀬、新潟の 8 点（図 8）に対して津波数値計算を行い、観測波形と計算波形との比較を行った。各断層パラメータを表 3 に示す。また、各モデルによる海底地殻変動を図 9 に、観測波形と計算波形の比較を図 10 にそれぞれ示す。

MGM02、MGM03 は、遠地地震波形インバージョンによるモデル（東傾斜）と傾斜方向が異なる（西傾斜）が、計算された津波波形には大きな違いは見られない。MGM02、MGM03 からの津波波形は、一部の観測点で振幅は少し小さいが、遠地地震波形インバージョンよりは振幅が大きく、観測波形を比較的再現できている。MMS06 は断層サイズとすべり量が大きく計算波形の振幅が大きすぎるため、MGM02 もしくは MGM03 が単独で本地震を起こした可能性が考えられる。

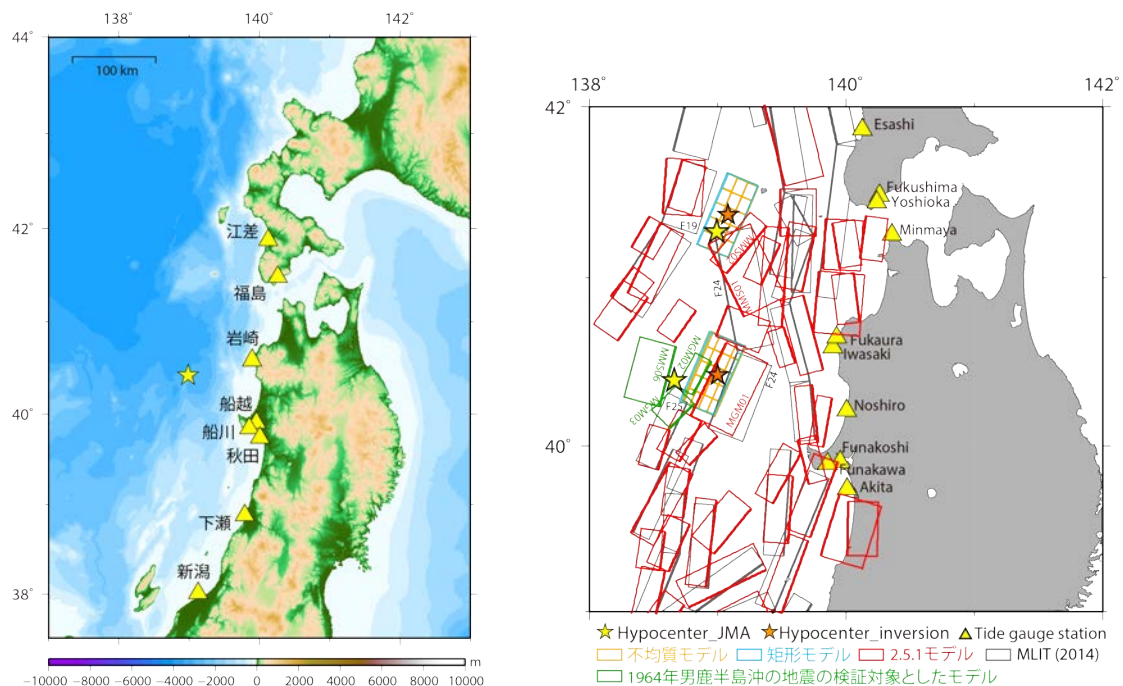


図 8 （左）津波波形を計算した観測点の分布（三角）と（右）1964 年男鹿半島沖の地震を起こした可能性が考えられる MGM02、MGM03、MMS06（緑）と遠地地震波形インバージョンによる不均質すべりモデル（オレンジ）、それを参考に振幅が観測波形を再現できるように調整した矩形一様すべりモデル（水色）の断層位置。黄色星印は気象庁による 1964 年男鹿半島沖の地震の震央を示す。オレンジ星印は、波形インバージョンで使用した震央の位置を示す。

表 3 津波数値計算を行った各断層モデルのパラメータ

モデル	断層長 (km)	断層幅 (km)	上端深さ (km)	走向 (°)	傾斜角 (°)	すべり角 (°)	すべり量 (m)
MGM02	25.2	18.3	0.0	209	50	101	0.75
MGM03	22.8	22.1	0.0	225	40	140	0.82
MMS06	41.1	28.2	0.0	195	30	100	1.88
Seismic inversion model	50.0	40.0	0.8	24	53	71	ave. 0.2
Model 1*	50.0	40.0	0.8	24	53	71	0.44

*地震波解析から得られた断層モデルを参考に、振幅を再現できるように調整したモデル

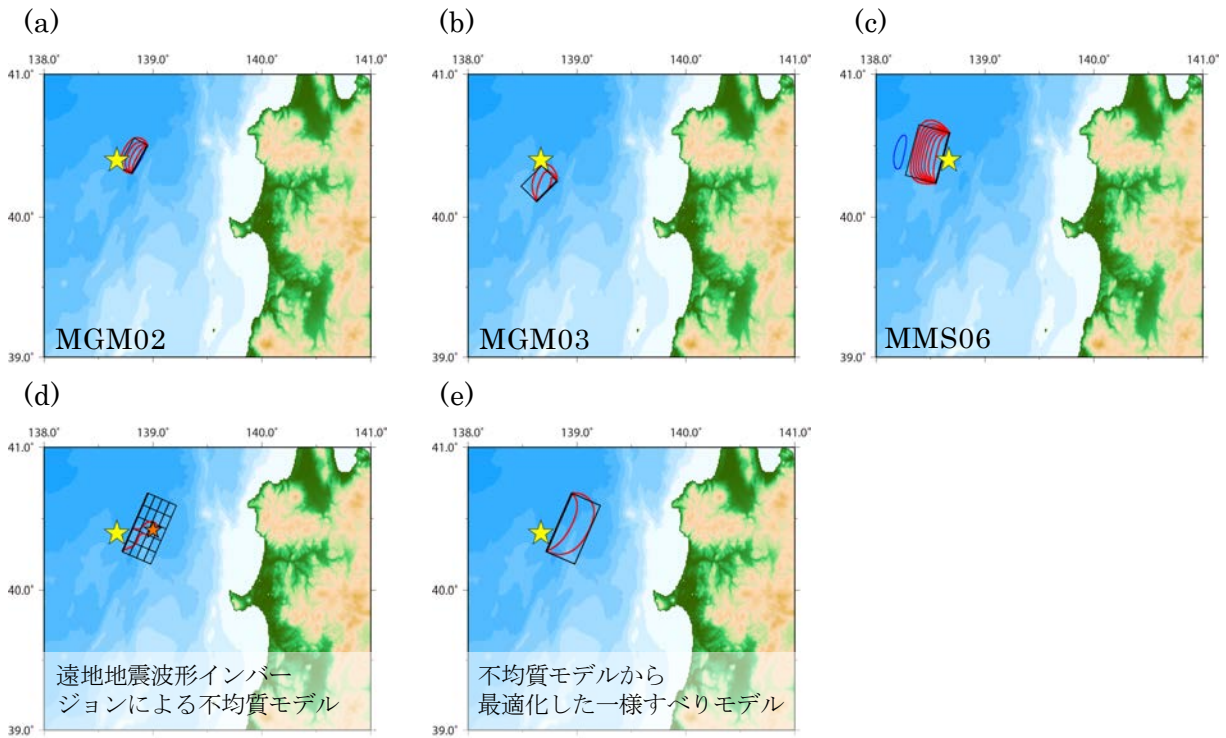


図 9 (a) MGM02 モデル、(b) MGM03 モデル、(c) MMS06 モデル、(d) 遠地地震波形インバージョンによる不均質モデル、(e) 不均質モデルから最適化した一様すべりモデルによって計算された海底上下変動。黒矩形は断層面、黒太線は断層上端をそれぞれ示す。赤は隆起、青は沈降を表す。コンター間隔は 10 cm。星印は気象庁による 1964 年男鹿半島沖の地震の震央を示す。

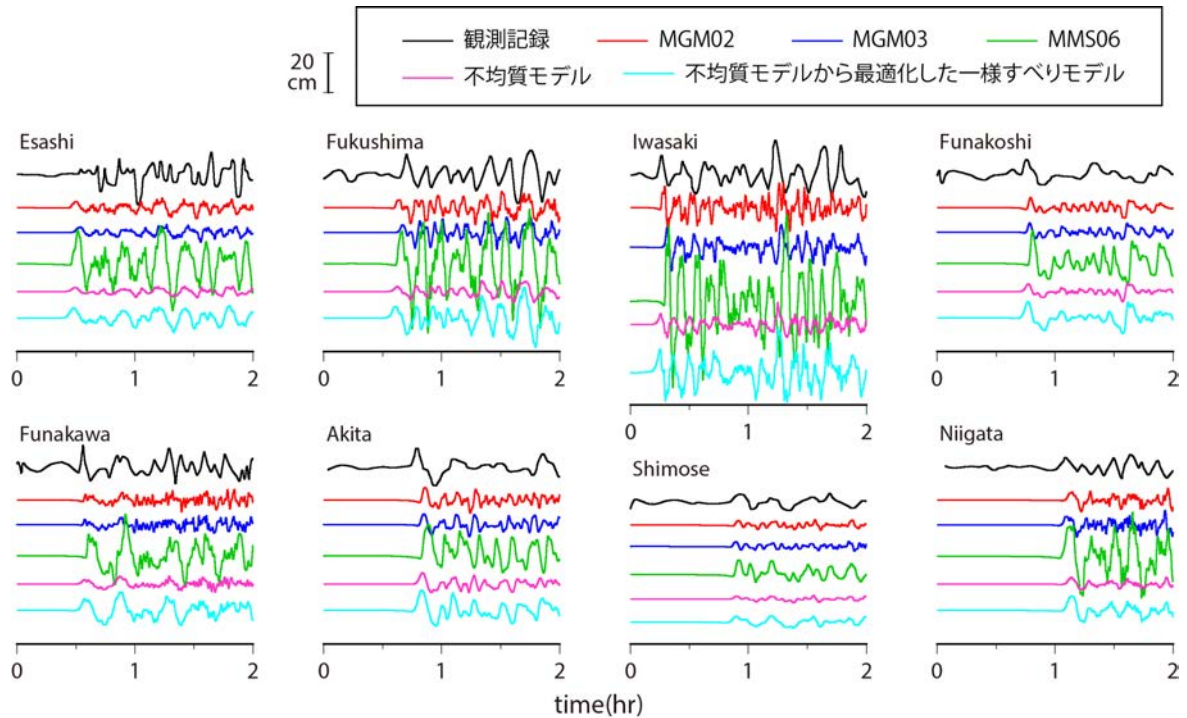


図 10 津波観測波形と MGM02 モデル、MGM03 モデル、MMS06 モデル、遠地地震波形インバージョンモデル（不均質モデル）、不均質モデルから最適化した一様すべりモデルから計算した津波波形の比較。時間軸は地震発生時刻を 0 とした。

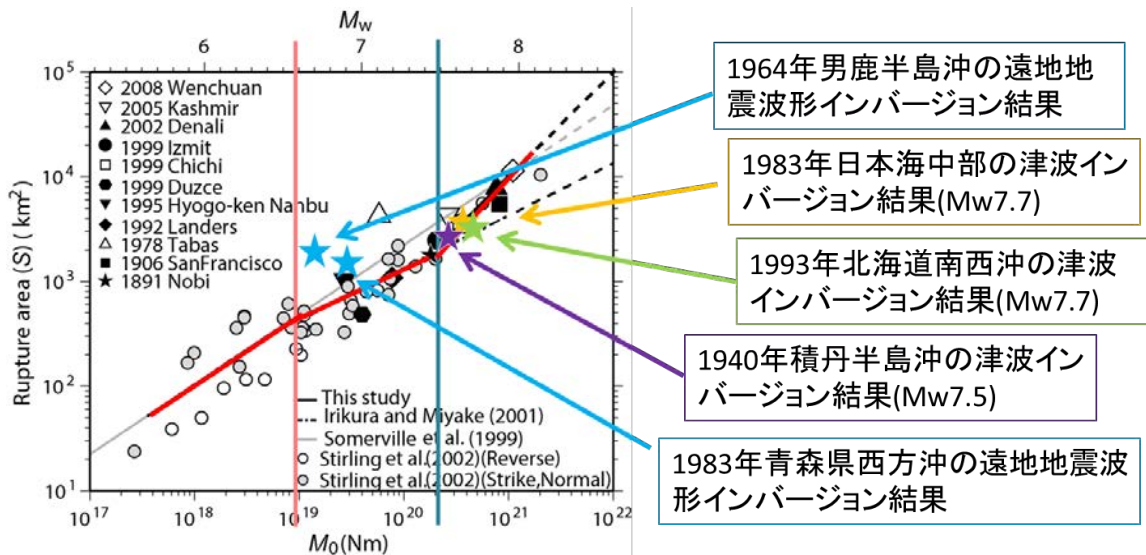


図 11 「レシピ (ア)」のスケーリング則と本サブサブテーマで検討してきた地震の関係。Murotani et al. (2015)に加筆。

3) 日本海で発生する地震の相似則

これまで本サブサブテーマで検討してきた $M \geq 7$ の地震の津波断層モデルに関しては、サブサブテーマ 2.5.1 で得られた適切な断層に対して「レシピ (ア)」の手法を適用してすべり量を求めることで、概ね地震波や津波の観測波形を説明することができた。

1964 年男鹿半島沖の地震、1983 年青森県西方沖の地震といった M7 クラスの地震に対

して、遠地波形記録を用いたインバージョンを行って得られた不均質モデルでは、津波観測波形をうまく再現できなかった。その理由としては、遠地地震波形インバージョンでは点震源で表現できる規模の地震のため、適切なすべり分布を推定することができなかったためと思われる。

これらの地震について、地震モーメント M_0 と断層面積 S の関係をプロットしてみると（図 11）、改訂された「レシピ（ア）」の 3 ステージのスケーリング則（図 11 の赤線）を適用できることが分かった。

4) 20 世紀に日本海で発生した地震・津波記録の整理

日本海周辺で発生した地震・津波について本サブサブテーマで収集した記録の整理、デジタル化を行った。顕著な地震の気象庁の観測点のすず書き記録は、最近地震調査研究推進本部のホームページから画像が公開されるようになり、誰でも利用可能となった（Furumura et al., 2020）¹¹⁾。東京大学地震研究所にも 1990 年代までの地震記象が整理、

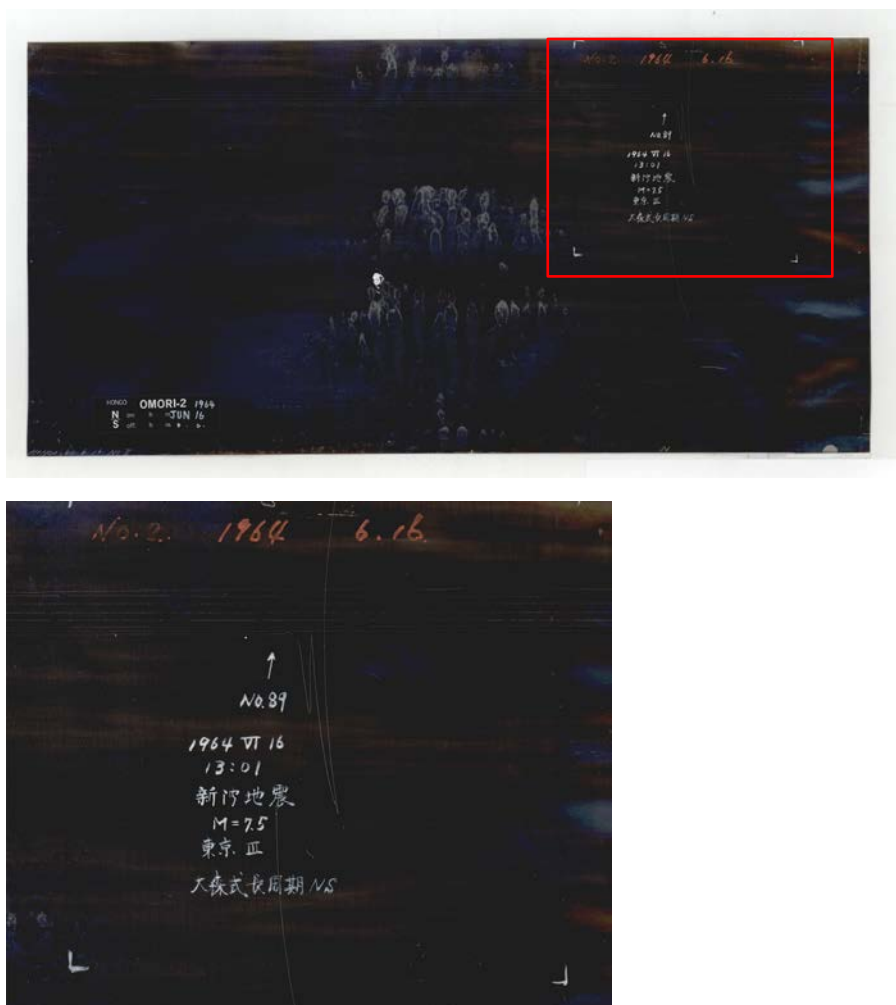


図 12 （上）1964 年新潟地震の本郷での大森式地震計（ $V=20$ 、 $T \approx 60$ s）による記録。
（下）上図の赤枠の部分拡大した記録。

保存されており (Satake et al., 2020) ¹²⁾、1927 年北丹後地震、1963 年越前岬沖の地震、1964 年新潟地震、1983 年日本海中部地震、1983 年青森県西方沖の地震、1993 年北海道南西沖地震について、良好なすす書き記録が残っている。しかし、東京大学地震研究所のすす書き記録はデジタル画像化されていなかったため、これらを今後データベースでの公開や提供など利活用しやすいよう、デジタル画像化を行った (図 12)。

また、各機関の津波 (検潮) 記録については、東京大学地震研究所によって津波波形画像データベースが公開されている (Satake et al., 2020) ¹²⁾。本サブサブテーマで新たに東京大学地震研究所の検潮記録を収集・整理を行い、日本海周辺で発生した 1963 年越前岬沖の地震、1964 年新潟地震、1983 年日本海中部地震、1983 年青森県西方沖の地震の検潮記録 (図 13) のデジタル画像化を行った。さらに、1964 年新潟地震、1983 年日本海中部地震、1993 年北海道南西沖地震後に東京大学地震研究所が行った津波被害調査の写真アルバムが残されていることが分かり、これらについてもデジタル画像化を行った (図 13)。



図 13 (左) 検潮記録のチャート紙と (右) 1964 年新潟地震の津波被害調査写真のアルバム。

(c) 結論ならびに今後の課題

1902 年 (寛治六年八月三日) の越後の地震津波が気象災害であった可能性について、歴史資料を用いて検証した。残存する史料の検討から、寛治六年八月三日の越後における事象は地震津波ではなく、むしろ伊勢神宮を始めとする諸国に被害を及ぼした大風 (台風) による大波 (高潮) であった可能性が高い可能性を示した。

日本海で発生した 1983 年日本海中部地震、1983 年青森県西方沖の地震、1964 年男鹿半島沖の地震について、令和元年度にサブサブテーマ 2.5.1 「断層モデルの構築」によって得られた東北地域の断層に「レシピ (ア)」を適用してすべり量を求めたモデルと、津波波形インバージョンによって推定された断層モデル、本サブサブテーマで過去に検討を行ってきた断層モデルを用いて津波数値計算を行い、観測波形と比較することで断層モデルの検証を行った。その結果、1983 年日本海中部地震はサブサブテーマ 2.5.1 「断層モデルの構築」による「MMS01+MMS04+MGM01」モデル、1983 年青森県西方沖の地震は「MMS02」モデル、1964 年男鹿半島沖の地震は「MGM02」もしくは「MGM03」モデルによる活動の可能性が示された。しかし、1983 年青森県西方沖の地震と 1964 年男鹿半島沖の地震については、遠地地震波形インバージョンによる結果と傾斜方向が異なるため、両地震の近

地地震波形を用いたさらなる検討を行う必要がある。

これまで本サブサブテーマで検討してきた 20 世紀に日本海で発生した地震について、断層パラメータを整理して相似（スケーリング）則について検討した。この海域で起こる $M \geq 7$ の地震に対しては、改訂された「レシピ（ア）」の 3 ステージのスケーリング則を適用できることが分かり、適切な断層にこのスケーリング則を適用することで、日本海沿岸域での津波防災・減災に必要な断層モデルを設定できると思われる。

日本海で発生した地震について収集した地震・津波に関する記録について、今後の利活用のために整理・デジタル画像化を実施した。日本海沿岸域の地震に限らず、古い地震・津波波形記録や写真については保存のためにもデジタル画像化が必要であり、さらには波形記録を数値化することで、今後の再解析にもつながると思われる。

(d) 引用文献

- 1) 東京大学地震研究所(編):新収日本地震史料第 1 巻, 東京大学地震研究所, 193pp, 1981.
- 2) 宇佐美龍夫, 石井寿, 今村隆正, 武村雅之, 松浦律子: 日本被害地震総覧, 599-2012, 東京大学出版会, 2013.
- 3) 石橋克彦, 古代中世地震史料研究会:[古代・中世]地震・噴火史料データベース, 歴史地震, 26, pp.86, 2011.
- 4) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)(平成 29 年 4 月 27 日公表), https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/recipe.pdf, 2017.
- 5) Murotani, S., Matsushima, S., Azuma, T., Irikura, K., and Kitagawa, S.: Scaling Relations of Source Parameters of Earthquakes Occurring on Inland Crustal Mega-Fault Systems, *Pure Appl. Geophys.*, 172, 1371-1381, 2015.
- 6) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75, 1135-1154, 1985.
- 7) Baba, T., Takahashi, N., Kaneda, Y., Ando, K., Matsuoka, D., and Kato, T.: Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami, *Pure Appl. Geophys.*, doi:10.1007/s00024-015-1049-2, 2015.
- 8) Satake, K.: Inversion of tsunami waveforms for the estimation of heterogeneous fault motion of large submarine earthquakes: The 1968 Tokachi-oki and 1983 Japan Sea earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 94, 5627-5636, 1989.
- 9) Fukuyama, E. and Irikura, K.: Rupture process of the 1983 Japan Sea (Akita-oki) earthquake using a waveform inversion method, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 76, 1623-1640, 1986.
- 10) 日本海における大規模地震に関する調査検討会:日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書(平成 26 年 9 月公表), 国土交通省・文部科学省・内閣府, 470pp., 2014.
- 11) Furumura, M., K. Iwasa, Y. Suzuki, T. Demachi, T. Ishibe, and R. S. Matsu'ura: Data Retrieval System of JMA Analog Seismograms in the Headquarters for Earthquake Research Promotion of the Japanese Government, *Seismol. Res. Lett.*,

91, 1403-1412, doi: 10.1785/ 0220190303, 2020.

12) Satake K., H. Tsuruoka, S. Murotani, and K. Tsumura: Analog seismogram archives at the Earthquake Research Institute, the University of Tokyo., Seismol. Res. Lett., 91, 1384-1393, doi:10.1785/0220190281, 2020.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
日本海で発生した地震の断層モデルによる津波波形と津波痕跡高の比較（口頭発表）	室谷智子, 佐竹健治, 石辺岳男	第37回歴史地震研究会（オンライン伊賀大会）	令和2年9月27日	国内
1092年（寛治六年八月三日）の地震津波は気象災害であった可能性（ポスター発表）	五島朋子, 中村亮一, 石辺岳男, 室谷智子, 佐竹健治	日本地震学会2020年度秋季大会	令和2年10月30日	国内

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 8ヵ年の成果

(a) 業務の成果

津波波源域の推定に必要な基礎資料を得るため、震源が知られている 20 世紀に発生した大地震（M7 クラス）（図 14）の地震・津波記録の再解析と、北海道から九州に至る日本海沿岸域での歴史資料の解析を行った。

1963 年越前岬沖の地震について、遠地地震波形インバージョン・近地地震波形インバージョン解析を行ったが、断層の特定には至らなかった。1971 年サハリン西方沖の地震について、遠地地震波形インバージョンによって求めた断層モデルから津波数値計算を行ったが、津波観測波形の再現性は低かった。

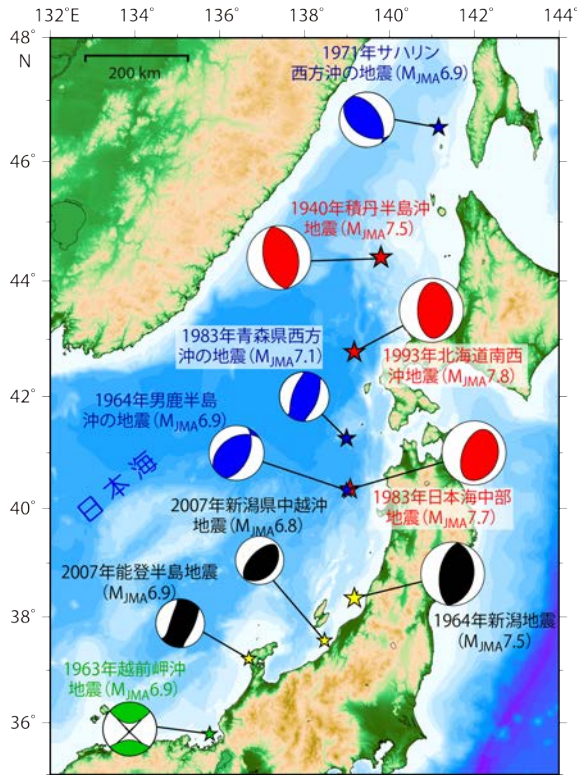


図 14 本サブサブテーマで扱った 20 世紀以降に発生した大地震。1963 年（緑）は遠地・近地地震波形解析を行った地震、1964 年、1971 年、1983 年（青）は遠地地震波形インバージョンによる断層モデルと海域活断層モデルによる検証を行った地震、1940 年、1983 年、1993 年（赤）は津波波形インバージョンによる断層モデルと海域活断層モデルによる検証を行った地震。

1940 年積丹半島沖の地震、1964 年男鹿半島沖の地震、1983 年日本海中部地震、1983 年青森県西方沖の地震、1993 年北海道南西沖地震について、サブサブテーマ 2.5.1「断層モデルの構築」によって得られた断層モデルに、震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）¹⁾における「(ア) 過去の地震記録や調査結果などの諸知見を吟味・判断して震源断層モデルを設定する場合」の手法を適用して求めたすべり量を与えた断層モデルが、津波観測波形を比較的良好に再現した。

1092 年（寛治六年）越後の地震津波、1700 年（元禄十三年）壱岐・対馬の地震、1710 年（宝永七年）の伯耆・美作の地震、1741 年（寛保元年）渡島大島津波、1762 年（宝暦十二年）佐渡地震、1802 年（享和二年）佐渡小木地震、1859 年（安政六年）石見の地震に関して歴史資料を検討し、地震像や被害域についての解析を行った。1092 年の地震津波については気象災害であった可能性を示した。

今後さらなる解析にも利用しやすいよう、本サブサブテーマで収集した日本海で発生した地震に関する地震・津波波形記録や写真の整理・デジタル化を行った。

(b) 結論ならびに今後の課題

津波波源域の推定に必要な基礎資料を得るため、震源が知られている 20 世紀に発生した大地震の地震・津波記録の再解析により、断層モデルの検証を行った。その結果、日本海で発生する $M \geq 7$ の地震に対しては、海域活断層に「レシピ (ア)」の 3 ステージのスケールリング則を適用できることが分かった。ただし、過去の $M \sim 7$ の地震の断層パラメータに関しては、近地地震波形を用いた解析による詳細な議論が必要と思われる。また、日本海沿岸域での歴史資料の解析から、歴史地震の地震像を明らかにした。1092 年（寛治六年）

越後の地震津波について気象災害であった可能性を示したが、このような地震がほかにも存在するかどうかを精査することが、該当地域でどのような被害に対応すべきかなど、今後の地震津波防災を考える上で重要である。さらに、本サブサブテーマで収集した地震・津波に関する波形記録や写真の整理・デジタル化を行った。日本海沿岸域の地震に限らず、古い地震・津波波形記録や写真については保存のためにもデジタル画像化が必要であり、さらには波形記録を数値化することで、今後の再解析にもつながると思われる。

(c) 引用文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)(平成29年4月27日公表), https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/recipe.pdf, 2017.