

2019年山形県沖の地震の震源のモデル化と 強震動シミュレーション

池田 隆明¹・倉橋 奨²・宮腰 研³・染井 一寛⁴

¹正会員 長岡技術科学大学教授 大学院工学研究科原子力システム安全工学専攻
(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

E-mail: ikeda@vos.nagaokaut.ac.jp

²正会員 愛知工業大学准教授 工学部土木工学科 (〒470-0392 愛知県豊田市八草町八千草1247)

E-mail: susumu@aitech.ac.jp

³地域地盤環境研究所グループリーダー (〒540-0008 大阪府大阪市中央区大手前2-1-2)

E-mail: ken@geor.or.jp

⁴地域地盤環境研究所研究員 (〒540-0008 大阪府大阪市中央区大手前2-1-2)

E-mail: somei@geor.or.jp

2019年6月18日に山形県と新潟県の県境の沖合を震源とするMj6.7の地震が発生し、震源近傍の村上市府屋では震度6強の強い揺れを観測された。震源は日本海東縁ひずみ集中帯と呼ばれる地域に位置しており、大きなひずみが蓄積されることから過去に規模の大きい地震が複数発生しており、今後も規模の大きい地震の発生が危惧される。そこで、経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングにより、当該地震の震源モデルを構築し、周辺の地震観測記録のシミュレーションを行うとともに、既往の震源のモデル化手法との比較を行った。

Key Words : 2019 off the Yamagata prefecture earthquake, empirical Green's function method, source characterization, strong motion generation area

1. はじめに

2019年6月18日22時22分頃、山形県と新潟県の県境付近の沖合約14kmでマグニチュードMj6.7の地震が発生した(以下、本地震、もしくは山形県沖の地震と呼ぶ)。この地震では新潟県下越地方の村上市府屋で震度6強(計測震度6.1)の揺れが観測された。震度6強が観測されたのは2018年北海道胆振東部地震以来である¹⁾。

本地震は北海道沖から新潟県沖にかけての日本海東縁部に広がる「日本海東縁ひずみ集中帯」で発生した地震である。この地域では、蓄積される大きなひずみのため、東西に幅を持った南北方向に延びる帯状の活断層・活しゅう曲帯が何条か形成されていることが知られており、過去に規模の大きい地震が複数発生している^{2,3,4)}。1964年新潟地震(Mj7.5)も本地震の震央の南側で発生している。本地震の発震機構は西北西-東南東方向に圧力軸を持つ逆断層型であり、これも日本海東縁ひずみ集中帯で発生する地震のメカニズムと整合する⁵⁾。

前述の通り、本地震では村上市府屋で震度6強の揺れ

が観測された他、震度6弱が鶴岡市温海川、震度5強が鶴岡市温海、鶴岡市道田町、震度5弱を村上市寒川、村上市岩船駅前、他4地点で観測するなど震源周辺で強い揺れを観測した。震度6強を観測した村上市府屋の三成分最大加速度は1191.3cm/s²であり1Gを超えている。それ以外にも鶴岡市温海川で750.3cm/s²、K-NET寒川(NIG006)で653.4cm/s²と500cm/s²を超える最大加速度が観測されている。一方、本地震による被害は比較的軽微で、半壊および一部損壊家屋がそれぞれ36棟、1,245棟発生したが、全壊家屋は0棟であった⁶⁾。土木施設の被害も国道345号線の弘法トンネル坑口付近での落石を含め5か所であった⁷⁾。

日本海東縁ひずみ集中帯は過去に規模の大きい地震が発生している地域であり、今後も秋田県沖や佐渡島北方沖を震源とするM7.5~7.8程度の地震の発生が危惧されている。そのため、日本海東縁ひずみ集中帯で発生する地震に対する強震動予測手法の高度化および既往の震源のモデル化手法の適用性を検討することは重要と考えられる。

そこで本稿では、2019年山形県沖の地震の震源モデルを経験的グリーン関数法⁸⁾を用いたフォワードモデリング⁹⁾により構築し、震源モデルの震源特性について既往の震源のモデル化手法¹⁰⁾との比較を行う。

2. 地震の概要と震源近傍の地震動

(1) 概要

表-1 に 2019 年山形県沖の地震の概要、図-1 に本震の震源と JMA のメカニズム解¹¹⁾、および本震後 24 時間以内に発生した余震の震源分布を示す。震源分布に用いた震源情報は DD 法による再設定値である。余震の震源は北東-南西に分布していることがわかる。長さは約 20km 程度である。本震の震央は余震分布の中央ではなく東側に寄っている。地震発生当初、断層面の傾斜方向がはっきりしなかったが、余震の深さ分布から判断すると東側傾斜と考えられる。余震分布は CMT 解の走向(26 度)に比べて若干東側に傾いているように見えるが、同じ深度を有する余震分布に限定するとほぼ走向方向と整合している。余震活動は活発ではなく、6 月 20 日以降では、震度 1 以上を観測した地震は 1 日に 2 回以下である。

表-1 2019年山形県沖の地震の概要

発生日時	2019年6月18日22時22分19.9秒
震央	38°36.4'N 139°28.7' E
深さ	14km
マグニチュード	M_j 6.7, M_w 6.42 ¹¹⁾
地震モーメント	5.41×10^{18} N·m
STR/DIP/RAK	26/27/86

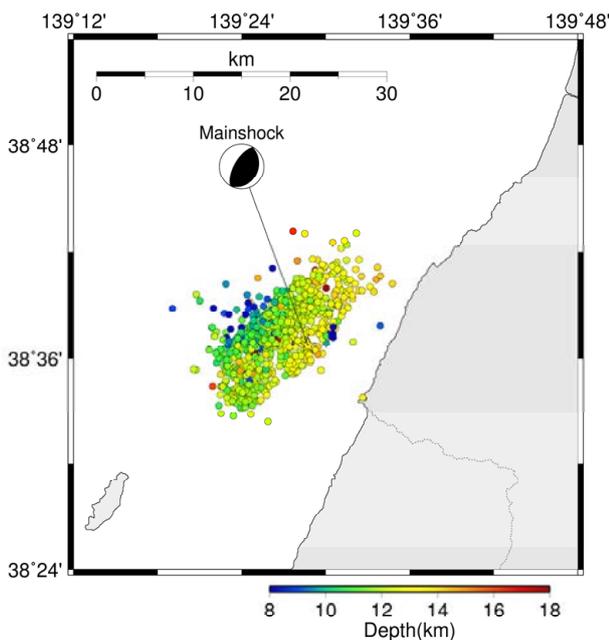


図-1 2019年山形県沖の地震の震源とメカニズム解¹¹⁾、および24時間以内に発生した余震の震源分布

(2) 震源近傍の地震動とその特徴

本地震における震源近傍を含む広域の地震動記録が防災科学技術研究所の強震観測網 (K-NET, KiK-net)¹²⁾、気象庁および自治体の強震観測網¹³⁾で得られている。図-2に本震の震央位置と周辺の地震観測地点、および想定断層面を示す。

図-2に示す地震観測地点のうち、震源に近いK-NET温海 (YMT004)、村上市府屋 (65101)、K-NET寒川 (NIG006)、温海川 (47241) で観測された地震動の加速度および速度波形、加速度応答スペクトルを図-3に示す。加速度波形には初動5秒の平均値を補正量とした基線補正が施されている。また、速度波形は基線補正後の加速度波形に0.1Hz~10.0Hzのバンドパスフィルターを作用させた後、フーリエ積分により算出した。各観測地点で観測開始時間が異なるため、図-3の時間軸の始点は22時22分10秒に統一している。加速度応答スペクトルの計算に用いた減衰定数は5%である。

震源に最も近い観測地点はYMT004である。この地点での水平最大加速度は 633cm/s^2 である。加速度時刻歴波形には高振動数成分の卓越が確認される。この様子は加速度応答スペクトルにも見られ、0.2秒以下の短周期領域での卓越が見られる。そのため、最大加速度は大きい最大速度は20cm/s以下である。

震度6強が観測された府屋では1Gを超える最大水平加速度が観測されている。YMT004の加速度時刻歴波形に比べると周期が長い成分が含まれていることが確認される。加速度応答スペクトルも0.7秒までの周期帯において大きい振幅を有する。比較的長い周期での振幅が大きいため、最大速度も大きくEW成分では50cm/sを超える。

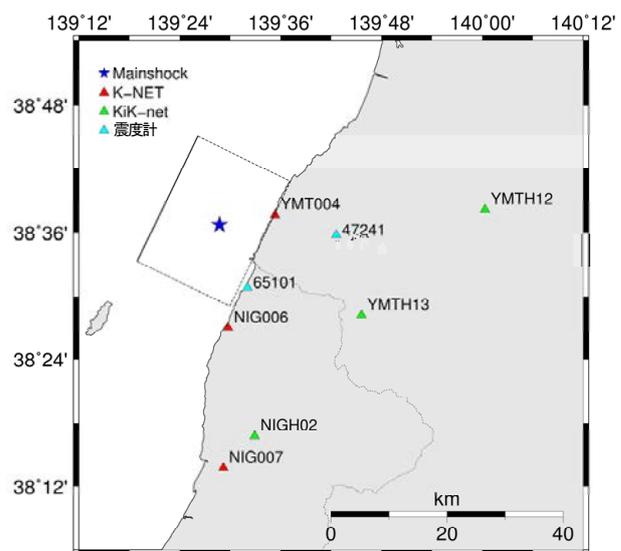


図-2 2019年山形県沖の地震の震央と想定断層面、および震源近傍の地震観測地点

NIG006はYMT004や府屋に比べ震源から距離があるため最大加速度、最大速度、加速度応答スペクトルとも小さい。また、約8秒間継続する主要動部の後に後続波が確認される。震源に近いYMT004や府屋では後続波が確認されていないため、この後続波はNIG006周辺の地盤構造の影響と考えられる。

温海川はNIG006よりも距離が離れているが、観測記録の特徴は府屋に似ている。加速度時刻歴波形にはやや長周期成分の波形が確認され、加速度応答スペクトルにも0.2~0.6秒の範囲での卓越が見られる。

3. 震源のモデル化

(1) 概要

2019年山形県沖の地震に対して釜江・入倉の提案手法⁸⁾に従い、経験的グリーン関数法 (Empirical Green's function method, 以下、EGFMと呼ぶ)⁹⁾によるフォワードモデリング手法を用いて震源のモデル化を実施する。この方法は、波形インバージョン結果等を参考に断層面上のすべり量の大きい場所に強震動生成域 (Strong Motion Generation Area, 以下、SMGAと呼ぶ) を配置し、EGFM

により地震観測地点の地震動を合成し、合成地震動と観測地震動との一致度からSMGAの数量、位置、サイズ、応力降下量などの震源パラメータを定量化するものである。SMGAは矩形とし、かつすべり量も均一な単純なモデル化ながら、SMGAを複数配置することにより震源破壊の不均一性を考慮することができ、M7クラスの内陸地殻内地震の不均一震源モデルとしてその有効性が確認されている^{14), 15)}。断層面のSMGA以外の領域 (背景領域) から地震動を生成するが、震源近傍域の強震動への寄与度が低いことから¹⁵⁾、強震動はSMGAのみから生成されると考え背景領域は考慮しない。

合成地震動との比較にはKiK-net朝日・新潟 (NIGH02)、KiK-net立川 (YMT12)、KiK-net朝日・山形 (YMT13)、NIG006、YMT004、47241の6地点の観測記録を使用した。KiK-netの観測記録は地盤の非線形特性の影響を受けにくい地中観測記録とした。K-NETおよび気象庁の観測記録は地表の地震動であり強震時には表層地盤の非線形特性の影響を受けやすい。EGFMでは経験的グリーン関数イベントに用いる小地震時の地盤の非線形状態で大地震時の地震動を評価することから、合成地震動は観測地震動に比べ振幅を大きめに評価し、かつ短周期成分が卓越することが知られている¹⁵⁾。前述

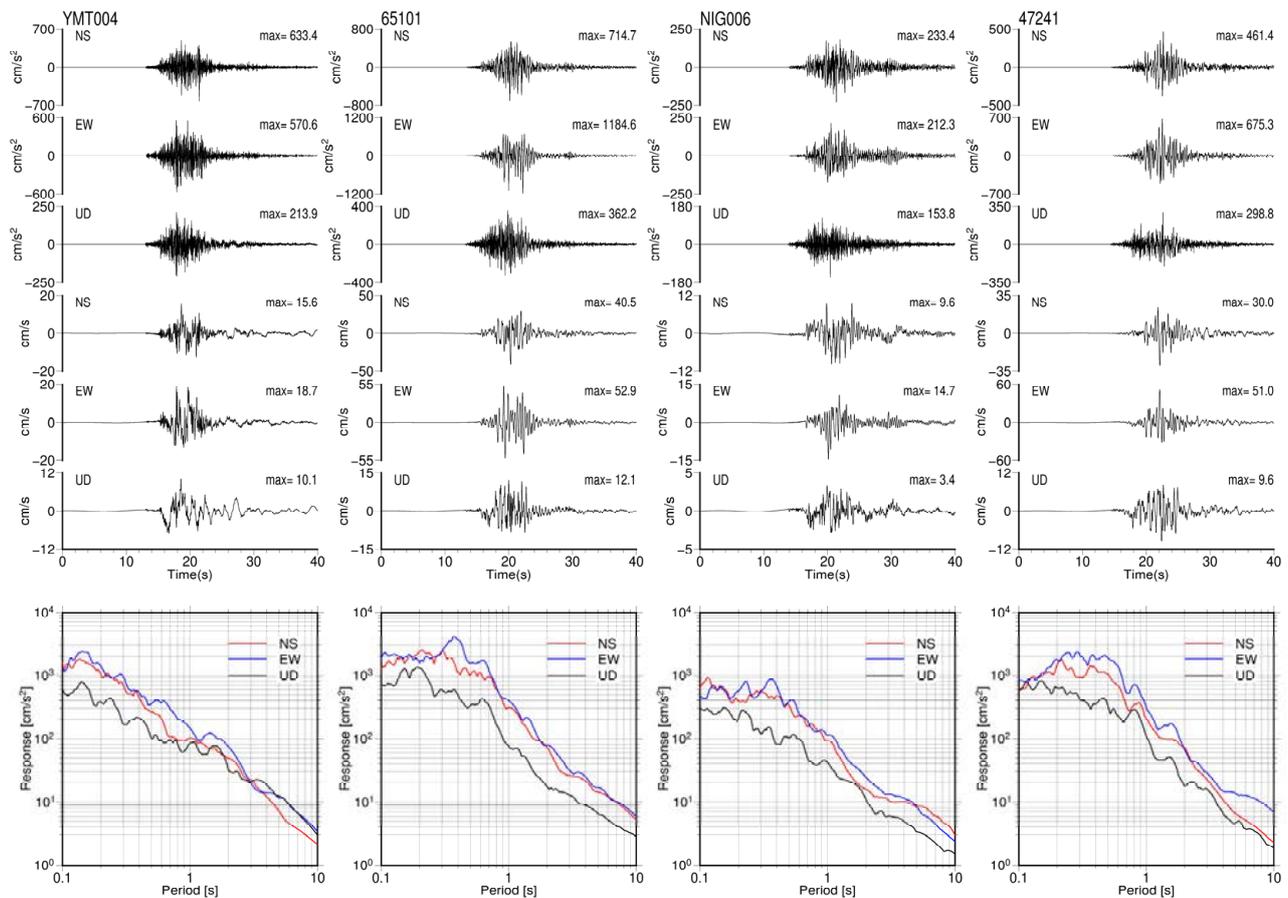


図-3 震源近傍の地震観測地点で観測された時刻歴波形と加速度応答スペクトル ($\eta=0.05$)

の通りYMT004の地盤は硬質であるが、NIG006はN値が50を超える基盤はG.L.-17mのため、表層地盤の非線形性の影響を受ける可能性がある。47241は地震計設置地点の地盤条件が明らかになっていないが、現地調査によると地震計は山の斜面を切り開いた地点に設置されているため非線形の影響を受ける可能性がある。図-2に各観測地点の位置を示す。

(2) 断層面の設定

本検討では、気象庁の震源過程解析に用いられた断層面¹¹⁾に基づき断層面を設定した。断層面の諸元は断層面基準点が38.5554N, 139.3152E, 走向26度, 傾斜27度の東傾斜の断層面を設定した。断層の上面深さは8.7kmとした。図-2に設定した想定断層面を示す。断層面のサイズは24km×20kmとしているが、前述のように背景領域からの地震動生成を考慮していないため、断層面の大きさは震源のモデル化に影響を与えない。

(3) 経験的グリーン関数イベントに用いる小地震の選定と震源パラメータの設定

EGFMは、予測対象の大地震と経験的グリーン関数イベントとして用いる小地震（以下、要素地震と呼ぶ）の地震の相似則と震源スペクトルの相似則に基づき、大地震動を要素地震動の線形な重ね合わせで表現する。そのため、EGFMの推定精度は要素地震の選定、および要素地震の震源パラメータの設定精度に影響を受ける。

図-4に想定断層面が含まれる北緯38.5度～38.7度、東経139.3度～139.6度の範囲に震央を有した地震のうち、マグニチュードがMj3.5～Mj4.5の範囲にある地震の震源分布を示す。条件に該当する地震は7地震である。表-2に7地震の諸元を示す。本震の震源近傍に震源を持つ地震はEQ02とEQ06である。後述するが、要素地震の震源パラメータを求める際には地震モーメントが必要となるが、これらの7地震のうちにF-net¹⁶⁾のメカニズム解が得られているのは、EQ06とEQ07の二つとなる。二つの地震のメカニズム解を図-4中に示す。本震のメカニズム解に近いのはEQ07であるが、震央位置および震源深さとも本震と異なることから、本検討ではEQ06を要素地震とする。

次に、要素地震の面積および応力降下量を設定する。二つのパラメータは要素地震のコーナー振動数より式(1)、式(2)に示すBruneの式^{17), 18)}および円形クラックの式¹⁹⁾から評価する。

$$r_a = \frac{2.34 \cdot \beta}{2 \cdot \pi \cdot f_{ca}} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_a = \frac{7}{16} \frac{M_{0a}}{r_a^3} \quad (2)$$

ここで、 r_a は要素地震を円形とみなした場合の見かけの半径(km)、 f_{ca} は要素地震のコーナー振動数(Hz)、 β は当該地点の岩盤のせん断波速度(km/s)、 $\Delta\sigma_a$ と M_{0a} は要素地震の応力降下量(MPa)と地震モーメント(N·m)である。本検討では $\beta=3.5$ km/sとした。

コーナー振動数は三宅ら²⁰⁾によるSource Spectral Ratio Fitting Method（以下、SSRF法）により評価する。SSRF法は同一地点で観測された大地震動と小地震動の観測震源スペクトル比にBruneの ω^2 スペクトルに基づく大地震と小地震の震源スペクトル比関数（式(3)）をフィッティングさせ大地震と小地震の地震モーメントの比、および大地震と小地震のコーナー振動数を求め、そこから波形合成の重ね合わせ数 N と大地震と小地震の応力降下量の比 C を評価する方法である。

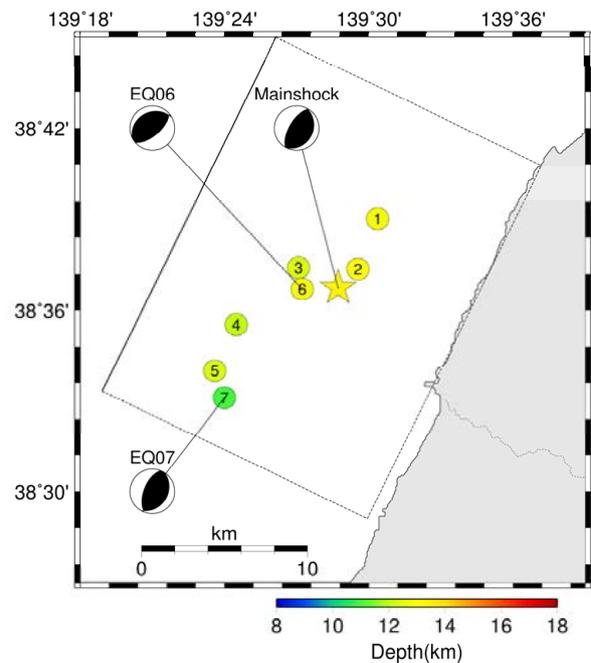


図-4 2019年山形県沖の地震の震源近傍で発生したMj3.5～4.5の地震の震源分布

表-2 2019年山形県沖の地震の震源近傍で発生したMj3.5～4.5の地震の諸元

EQ	Date & Time	Mj	Epicenter	Depth(km)
01	2019/06/18 22:26	3.8	139.506152E, 38.650407N	12.829
02	2019/06/18 22:27	4.0	139.492546E, 38.622847N	13.055
03	2019/06/18 22:37	3.8	139.451302E, 38.623617N	12.486
04	2019/06/18 22:41	4.1	139.408122E, 38.592301N	12.058
05	2019/06/19 00:57	4.2	139.393213E, 38.566699N	12.460
06	2019/06/21 05:33	4.0	139.453923E, 38.611804N	12.845
07	2019/07/11 16:04	4.2	139.400000E, 38.551670N	11.0

$$SSRF(f) = \frac{M_{0M}}{M_{0m}} \frac{1 + \left(\frac{f}{f_{cm}}\right)^2}{1 + \left(\frac{f}{f_{cM}}\right)^2} \quad (3)$$

$SSRF(f)$ が震源スペクトル比関数、 f は振動数(Hz)、 M_{0M} と M_{0m} は大地震と小地震の地震モーメント、 f_{cM} と f_{cm} は大地震と小地震のコーナー振動数(Hz)である。

この震源スペクトル比関数を大地震と小地震の観測震源スペクトル比にフィッティングさせ、 f_{cM} と f_{cm} を評価する。なお、小地震の長周期成分を高精度に計測することが難しいため、本検討では式(3)の M_{0M}/M_{0m} はパラメータとせず大地震と小地震の地震モーメントの比で拘束する。本検討では M_{0M} は気象庁のCMT解、 M_{0m} はF-netの値を使用した。

観測震源スペクトル比の算出では、長周期側の精度を確保するため広帯域地震計STS-2で得られた3成分の速度波形を使用する¹⁶⁾。東日本地域では日本列島の中央部に火山フロントが位置しており、それを挟んでQ値構造が異なることが知られている²¹⁾。そのため、観測震源スペクトル比は火山フロントよりも西側の観測点での記録を使用する。本検討ではSBT(新発田)、ADM(赤泊)、KZK(柏崎)、WJM(輪島)、GJM(五城目)、OOW(大鰐)、KSK(川崎)の7地点を選定した。なお、SBTとADMは地震計の最大振幅を超えたため強震計VSE-355G3の速度波形を使用した。図-5に各観測地点の位置を示す。

時間領域の解析区間はS波部分までとし、本検討では一律30秒とした。観測震源スペクトル比を計算する前に中心振動数の20%の幅の平滑化を行った。伝播経路の補正は幾何減衰と媒質のQ値($Q(f)=166f^{0.76}$)²²⁾による減衰を考慮した。なお、大地震と小地震の震源が近いこと、使用するQ値特性が観測震源スペクトル比に及ぼす影響は小さい。

観測震源スペクトル比と震源スペクトル比関数のフィッティング範囲は観測震源スペクトル比の有効振動数帯域を考慮して設定した。本検討では広帯域地震計STS-2で観測された地震動を使用しており、その有効振動数帯が0.01Hz~10Hzであることから、フィッティングの上限振動数を10Hzとした。また、高域遮断振動数 f_{max} ²³⁾を考慮した場合、観測震源スペクトル比は大地震の f_{max} よりもやや低い振動数から低下し始めるため、 f_{max} の影響が小さい振動数領域でフィッティングを行う必要がある。

本地震および要素地震の f_{max} については明らかにされていないため、鶴来・他(2017)²⁴⁾で示されたデータに基づき f_{max} を推定する。鶴来・他(2017)の付表1~付表4に示された宮城県北部、岩手県南部地域、福島県浜通

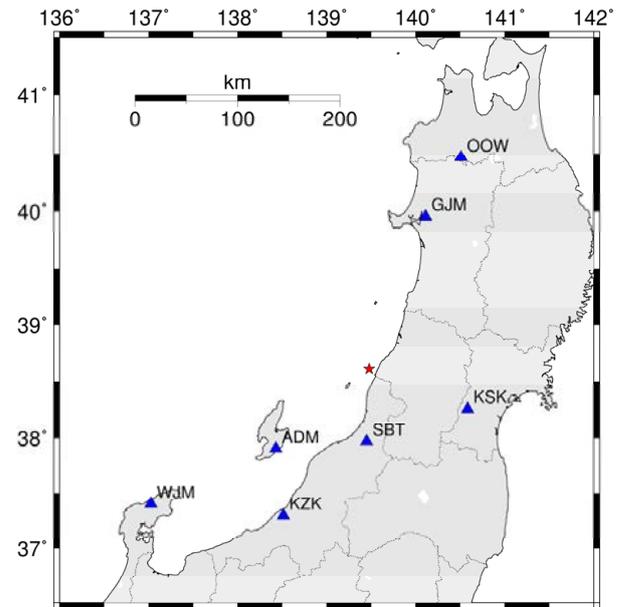


図-5 要素地震のパラメータ評価に用いる観測震源スペクトル比を求める地震観測地点

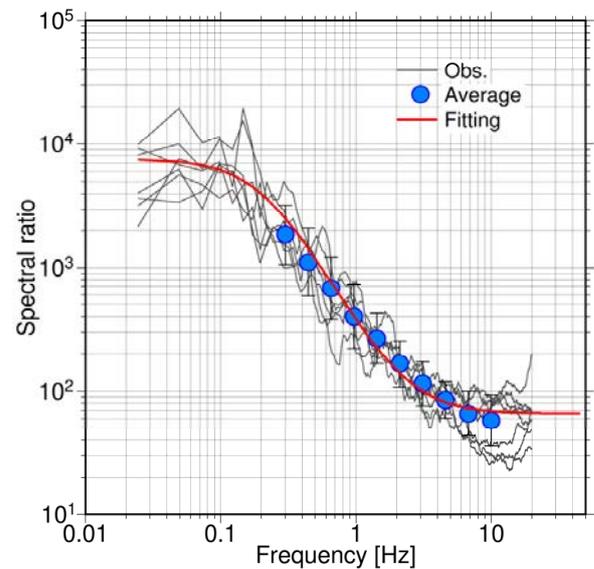


図-6 観測震源スペクトル比と震源スペクトル比関数とのフィッティング状況

表-3 経験的グリーン関数イベントとして用いる地震の諸元

発生日時	2019年6月21日5時33分23.3秒
震央	38.611804N, 139.453923E
深さ	12.845km
マグニチュード	$M_f 4.0, M_w 3.8$
地震モーメント ¹⁰⁾	5.46×10^{14} N·m
STR/DIP/RAK ¹⁰⁾	243; 49/27; 63/103; 83
コーナー振動数	2.24Hz
応力降下量	1.21MPa
面積	1.06km ²

り地域、静岡県東部地域、熊本県地域で発生した地震の M_0 と f_{max} の関係について、 $M_0 \leq 10^{16.5} \text{Nm}$ と $M_0 > 10^{16.5} \text{Nm}$ に分けて最小二乗法で直線回帰すると式(4)と式(5)が得られる。

$$\log f_{max} = -0.0450 \times \log M_0 + 1.8780 \quad (4)$$

$$\log f_{max} = -0.0924 \times \log M_0 + 2.6801 \quad (5)$$

本地震の地震モーメントから f_{max} を算出すると $f_{max} = 8.9 \text{Hz}$ となる。そのため、本検討におけるフィッティングの上限振動数 10Hz は妥当と考えられる。

フィッティングの下限振動数は地震動のS/N比および震源変位スペクトルのフラットレベルの振動数範囲から 0.3Hz とした。

図-6に7地点の観測震源スペクトル比と震源スペクトル比関数のフィッティング結果を示す。要素地震のコーナー振動数は 2.24Hz と評価された。表-3にコーナー振動数から算出した要素地震の面積と応力降下量を示す。

(4) 震源のモデル化

本地震の震源破壊過程が報告されている。図-7に気象庁がK-NET, KiK-netおよび気象庁震度計による近地強震波形を用いた波形インバージョン解析結果(断層面のすべり分布)を示す¹¹⁾。対象とした振動数範囲は $0.05 \text{Hz} - 0.2 \text{Hz}$ であり長周期を対象としている。破壊開始点の北側で破壊開始点よりやや浅い部分に大きなすべり領域が確認される。

本検討では図-7に示すすべり分布を参考に破壊開始点の北側で破壊開始点よりもやや浅い部分に周辺にSMGAを1つ配置した初期モデルを作成した。次に、EGFMにより6地点の地震動を合成し観測地震動と合成地震動の時刻歴波形および擬似速度応答スペクトル ($h=0.05$, 以下、速度応答スペクトル), 継続時間や包絡形状が一致するようにSMGAの位置, 大きさ, 破壊開始点を変更する。

図-8に設定した震源モデルを示す。SMGAは正方形で、震源の北側の浅い部分に設置した。SMGAの破壊開始点は震源に最も近い場所に設置し、同心円状に破壊が広がると仮定した。表-4に強震動生成域の諸元を示す。

図-9に前述の6地点における観測地震動とEGFMにより評価した合成地震動(加速度波形, 速度波形, 変位波形)の比較(NS成分)を示す。また、図-10に速度応答スペクトルと加速度フーリエスペクトル(以下、フーリエスペクトル)を比較して示す。速度応答スペクトルも応答スペクトルと同様に減衰定数は $h=0.05$ である。波形合成における有効振動数帯は、要素地震のS/N比や変位スペクトルのフラットレベルを検討し $0.3 \text{Hz} \sim 10 \text{Hz}$ (0.1

秒 ~ 3.3 秒)とした。なお、観測地震動にも同様のバンドパスフィルターを作用させている。

図-9からわかるように、いずれの地点の観測地震動においても断層破壊の指向性効果で現れるような特徴的な波形は見られない。そのため、時刻歴波形の振幅, 継続時間, 包絡形状, そして速度応答スペクトルの一致度に着目する。

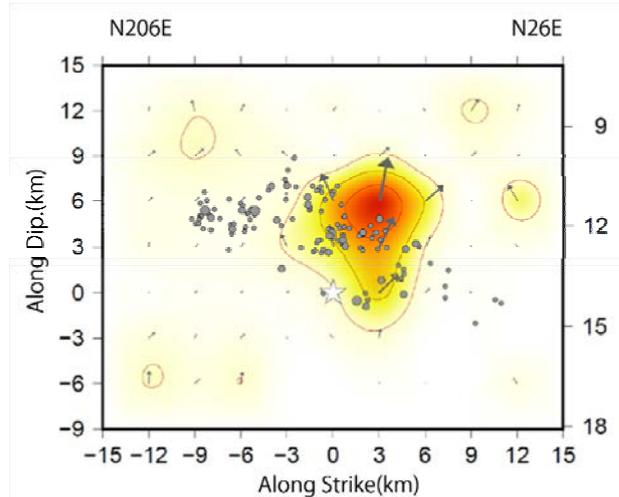


図-7 波形インバージョン解析による断層面のすべり分布¹¹⁾

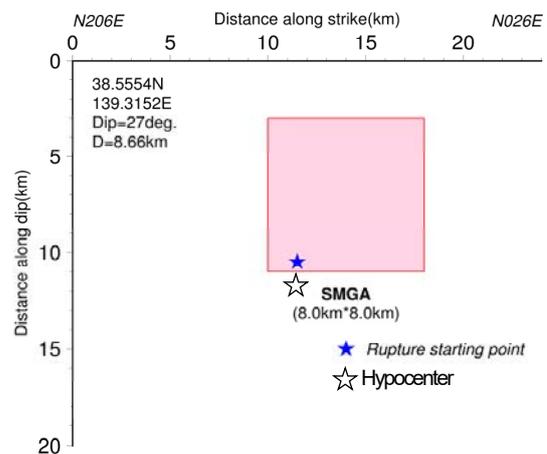


図-8 経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングにより評価した震源モデル

表-4 震源モデルの強震動生成域の諸元

		SMGA
面積	km ²	64 (8.0km×8.0km)
重ね合わせ数		8×8×8
地震モーメント	N·m	2.80×10 ¹⁸
上端深さ	km	10.02
応力降下量	MPa	12.1
破壊伝播速度	km/s	2.7
ライズタイム	s	0.6

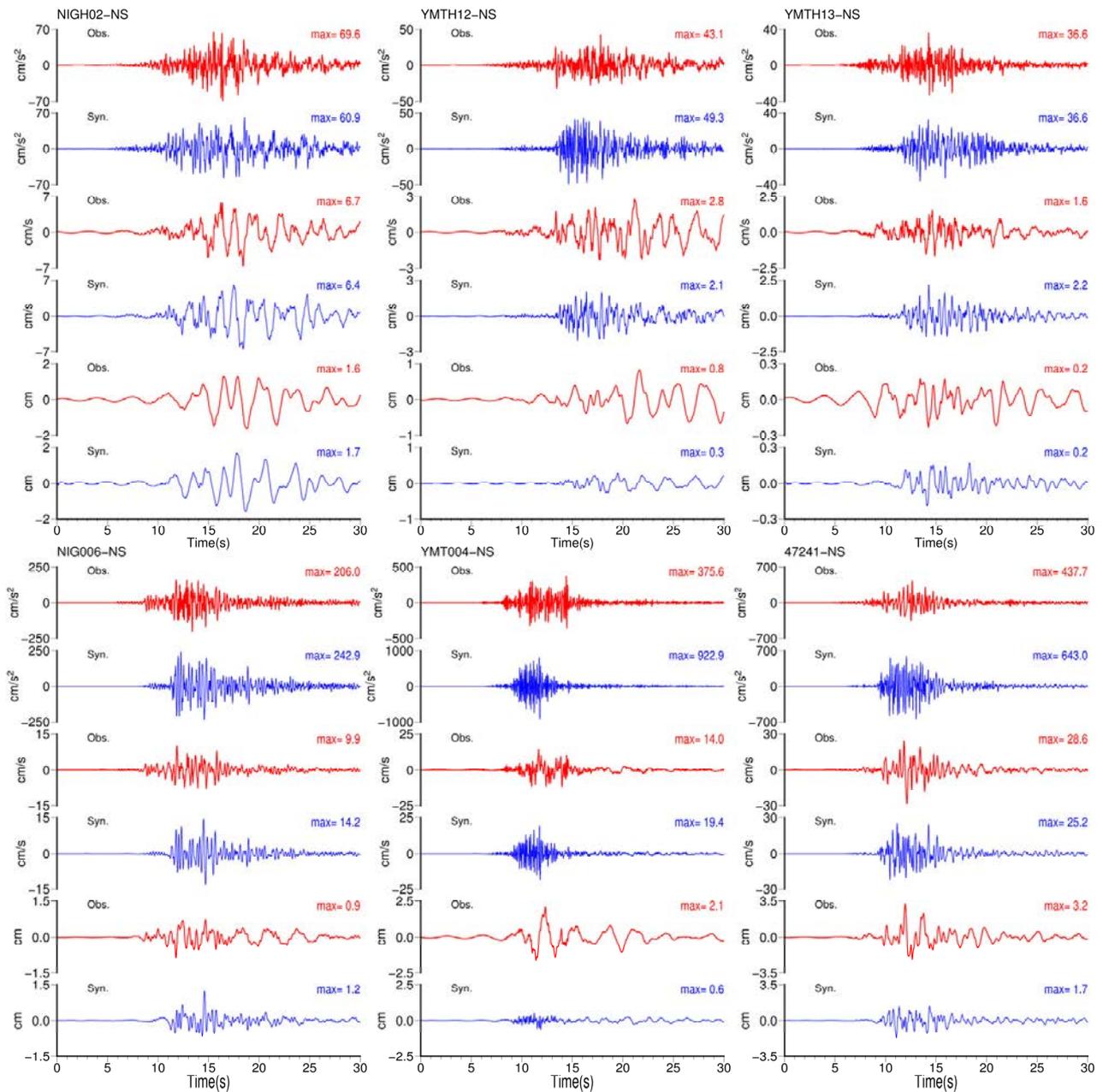


図-9 観測地震動と合成地震動の時刻歴波形の比較 (赤線：観測，青線：合成)

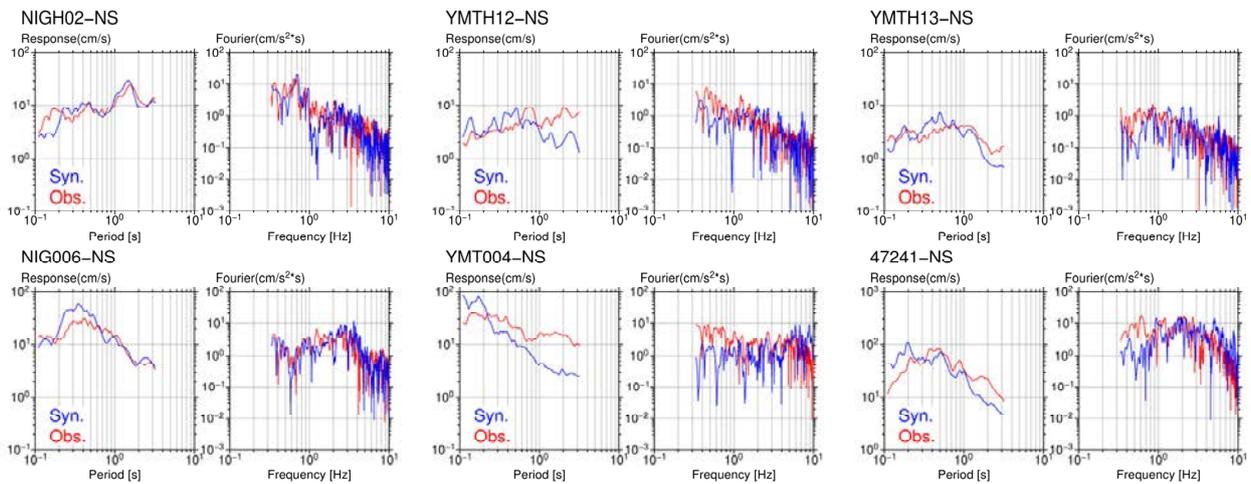


図-10 観測地震動と合成地震動の擬似速度応答スペクトル ($t=0.05$) と加速度フーリエスペクトルの比較 (赤線：観測，青線：合成)

KiK-netの観測地点であるNIGH02, YMTH13では合成地震動の時刻歴波形の振幅, 継続時間, 包絡形状は観測地震動の特徴をほぼ再現できている. 速度応答スペクトルについても同様である. YMTH12では最大加速度, 最大速度は再現できているが, S波の初動部の包絡形状が異なる. 観測地震動はNIGH02やYMTH13と同様に紡錘形に近い包絡形状を有するが, 合成地震動にはS波到達後約6秒程度大きい振幅が継続される. また, 速度応答スペクトルの比較からわかるように, 1秒以上の長周期成分を大きめに評価しており, その結果として変位波形も大きめの評価になっている.

NIG006は0.2秒~0.6秒の短周期領域において合成地震動が観測地震動を若干大きめに評価している. 前述のとおり当該地点のN値が50以上の地盤, いわゆる工学的基盤の深度はG.L.-17mであり, 表層地盤はN値が20程度の砂層, 礫層から構成されており, 地震時に表層地盤が非線形化した影響が表れたと考えられる. しかし, 地表の最大速度は200cm/s程度であったことから考えると, 非線形化の程度は小さく, 合成地震動と観測地震動との差が小さかったと考えられる.

YMT004と47241は比較的強い地震動が観測されており, 表層地盤の特性にもよるが非線形化の程度はNIG006より強かったと推測される. そのため, 速度応答スペクトルからわかるように短周期領域が大きめに評価され, 合成加速度は観測値の1.5倍以上となっている. YMT004はG.L.-3mに工学的基盤が表れるため, 地表付近に薄く堆積する砂質土層が非線形化したと考えられる. 一方, YMT004の合成地震動の継続時間は観測地震動の継続時間に比べて短いことがわかる. この影響は表層地盤の非線形化では説明できない. 要素地震動の精度の再検討を含め, YMT004の観測地震動の継続時間を再現するためのSMGAの検討が必要と考えられる.

観測地震動との再現性を向上させるためにはさらなる

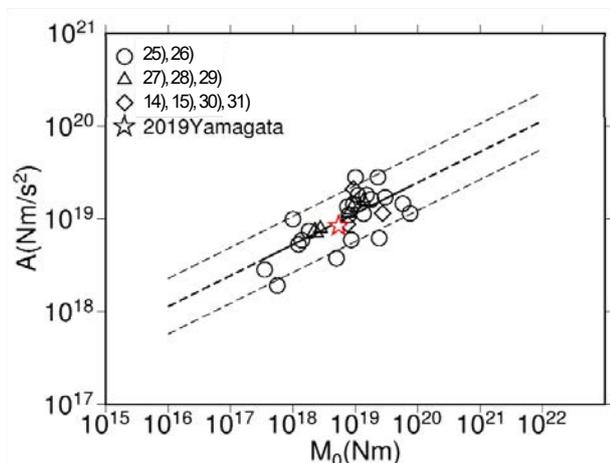


図-11 地震モーメント (M_0) と加速度震源スペクトルの短周期レベル (A) との関係

震源モデルの高精度化が必要であるが, 提案した震源モデルは震源近傍の観測地震動を概ね再現できると考えられる.

構築した震源モデルの震源パラメータを震源断層を特定した強震動予測手法 (以下, レシピ)¹⁰⁾に基づく評価値と比較する. 比較するパラメータは, 地震モーメントと加速度震源スペクトルのレベル (以下, 短周期レベル) である. なお, レシピにおけるアスペリティとSMGAは等価と考える. レシピでは式(6)に示す壇ら²⁹⁾のスケーリング則により地震モーメントから短周期レベルを評価する.

$$A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3} \quad (6)$$

A は短周期レベル ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}^2$), M_0 は地震モーメント ($\text{N}\cdot\text{m}$) を示す. 図-11にスケーリング則を示す. 図中の細い破線はスケーリング則の0.5倍と2.0倍を示す.

震源モデルの短周期レベルは式(7)²⁹⁾から評価する.

$$A = 4\pi \cdot r_{SMGA} \cdot \Delta\sigma_{SMGA} \cdot \beta^2 \quad (7)$$

r_{SMGA} はSMGAを円形とした時の半径 (km), $\Delta\sigma_{SMGA}$ はSMGAの応力降下量 (MPa), β は震源域における岩盤のS波速度で, 本検討では $\beta=3.5\text{km/s}$ とした. 図-11に式(5)から得られた短周期レベルと地震モーメントの関係を☆印で示す. 図中には参考として他の内陸地殻内地震のフォワードモデリングから算出された短周期レベル^{14), 15), 25), 26), 27), 28), 29), 30), 31)}を併せて示す. 図からわかるように本検討で構築した震源モデルの短周期レベルは既往のスケーリング則と一致している.

5. まとめ

2019年山形県沖の地震 ($M_j6.7$) を対象に震源近傍を含む周辺域で観測された地震動記録を用い, 震源モデルを経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングにより評価し, 震源の北側のやや浅い部分に一つのSMGAを配置した震源モデルを構築した.

本地震は日本海東縁ひずみ集中帯で発生した地震であるが, 加速度震源スペクトルの短周期レベルは既往のスケーリング則で表現できることが分かった. 今後, 観測地震動の再現性を向上させるため, 震源モデルの再調整を行う予定である.

謝辞：本研究では防災科学技術研究所の強震観測網K-NETおよびKiK-netの地震動記録と関連データ，気象庁ならびに新潟県の地震動記録，F-netのメカニズム解，気象庁の震源データを使用させていただきました。作図においては国土地理院の電子地形図・電子国土webを使用させていただきました。DD法による震源再決定結果は郭雨佳博士に提供いただきました。本研究は科研費基盤研究(B) 18H01519（研究代表者：池田隆明），平成31年度原子力施設等防災対策等委託費（内陸型地震による地震動評価手法の検討）事業による成果の一部として実施いたしました。最後に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：震度データベース，<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>（2019.9.2 閲覧）
- 2) 地震調査研究推進本部，地震調査委員会：2019年6月18日山形県沖の地震の評価，https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2019/20190618_yamagata_2.pdf（2019.9.2 閲覧）
- 3) 地震調査研究推進本部：山形県の地震活動の特徴，https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_tohoku/p06_yamagata/（2019.9.2 閲覧）
- 4) 小原一成：内陸地震の発生が相次いだひずみ集中帯の地震像を解明，地震調査研究の最前線・第1回，http://www.jishin.go.jp/main/herpnews/series/2008/0805_02.html（2019.9.2 閲覧）
- 5) 岡村行信：日本海東縁の地質構造と震源断層との関係，地質学雑誌，Vol.116, No.11, pp.582-591, 2010.
- 6) 総務省消防庁：山形県沖を震源とする地震による被害及び消防機関等の対応状況（第16報），令和元年7月31日（水）12時00分，<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/yamagataoki16.pdf>（2019.9.2 閲覧）
- 7) 新潟県：山形県沖を震源とする地震に関する情報，山形県沖の地震における村上地域振興局管内の状況 https://www.pref.niigata.lg.jp/sec/murakami_kikaku/1356921287992.html（2019.9.2 閲覧）
- 8) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium*, pp.151-156, 1986.
- 9) 釜江克宏，入倉孝次郎：1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No.500, pp.29-36, 1997.
- 10) 地震調査研究推進本部：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」），https://www.jishin.go.jp/evaluation/strong_motion/（2019.9.2 閲覧）
- 11) 気象庁：2019年6月18日山形県沖の地震，一近地強震波形による震源過程解析（暫定）一，<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/sourceprocess/event/2019061822221998near.pdf>（2019.9.2 閲覧）
- 12) 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/>（2019.9.2 閲覧）
- 13) 気象庁：強震観測データ，<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html>（2019.9.2 閲覧）
- 14) 池田隆明，釜江克宏，三輪 滋，入倉孝次郎：経験的グリーン関数法を用いた2000年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No.561, pp.37-45, 2002.
- 15) 池田隆明，釜江克宏，入倉孝次郎：経験的グリーン関数法を用いた震源のモデル化と地盤の非線形性を考慮した地震動評価，2005年福岡県西方沖の地震と2007年能登半島地震への適用，日本建築学会構造系論文集，No.665, pp.1253-1261, 2011.
- 16) 防災科学技術研究所：広帯域地震観測網，F-net，<http://www.fnet.bosai.go.jp>（2019.9.2 閲覧）
- 17) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
- 18) Brune, J. N.: Correction, *Journal of Geophysical Research*, Vol.76, p.5002, 1971.
- 19) Eshelby, J. D.: The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol.241, Issue 1226, pp.376-396, 1957.
- 20) 三宅弘恵，岩田知孝，入倉孝次郎：経験的グリーン関数法を用いた1997年3月26日（M_{JMA}6.5）及び5月13日（M_{JMA}6.3）鹿児島県北西部地震の強震動シミュレーションと震源モデル，地震，第2輯，Vol.51, No.4, pp.431-442, 1999.
- 21) 海野徳仁，長谷川昭：東北日本弧の三次元Qs構造，地震第2輯，第37巻，pp.217-228, 1984.
- 22) 佐藤智美・巽誉樹：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，67, 556, pp.15-24, 2002.
- 23) 鶴来雅人，香川敬生，岡崎敦，羽田浩二，入倉孝次郎：強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究—1995年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討—，日本地震工学会論文集，Vol.6, No.4, pp.94-112, 2006.
- 24) 鶴来雅人，田中礼司，香川敬生，入倉孝次郎：強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究（その3）—国内で発生した地殻内地震の観測記録に基づく検討—，日本地震工学会論文集，Vol.17, No.5, pp.109-132, 2017.
- 25) 壇一男，渡辺基史，佐藤俊明，石井透：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化，日本建築学会構造系論文集，No.545, pp.51-62, 2001.
- 26) 壇一男，武藤真菜美，石井やよい，阿比留哲生：内陸地震の断層タイプ別にみた各種マグニチュードの関係とそれに基づく断層モデルの設定と強震動の試算，日本建築学会構造系論文集，Vol.75, No.650, pp.741-750, 2010.
- 27) Kamae, K., Ikeda, T, and Miwa, S.: Source model composed of asperities for the 2004 Mid Niigata Prefecture, Japan, earthquake (M_{JMA}=6.8) by the forward modeling using the empirical Green's function method, *Earth Planets Space*, Vol.57, pp.533-538, 2005.
- 28) 釜江克宏，川辺秀憲：2007年新潟県中越沖地震

- (Mj6.8)の震源のモデル化と強震動シミュレーション,
<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/kenkyunaiyou.html>
(2019.9.2 閲覧)
- 29) 釜江克宏：2008 年岩手・宮城内陸地震(Mj7.2)の震源のモデル化 (暫定版) ,
<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/kenkyunaiyou.html>
(2019.9.2 閲覧)
- 30) 池田隆明, 小長井一男, 釜江克宏, 佐藤京, 高瀬裕也：2014 年長野県北部の地震の被害調査と震源のモデル化, 土木学会論文集 A1 (構造地震工学) , Vol.72, No.4, pp.I_975-I_983, 2016.
- 31) 池田隆明, 染井一寛, 倉橋奨, 宮腰研, 釜江克宏, 高瀬裕也, 小島由記子：経験的グリーン関数法を用いた 2016 年鳥取県中部の地震の震源のモデル化, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) , Vol.74, No.4, pp. I_497-I_507, 2018.

SOURCE CHARACTERIZATION AND STRONG GROUND MOTION SIMULATION OF 2019 OFF THE YAMAGATA PREFECTURE EARTHQUAKE

Takaaki IKEDA, Susumu KURAHASHI, Ken MIYAKOSHI and Kazuhiro SOMEI

A magnitude 6.7 of JMA scale earthquake occurred in off Yamagata prefecture in Japan on 18 June 2019. The fault plane was estimated to be a low angle thrust fault with the strike of NNE–SSW direction from CMT solution and after-shock distribution. Seismic intensity 6+ was observed at Fuya station of JMA which was located in near source area. Strong ground motions were generated however there were no major damage. We composed a source model by the forward modeling using empirical Green's function method. The source parameters of strong motion generation area were determined from the comparisons of the synthesized broad-band ground motions with the observed ones at several stations including near source. Resultantly, we proposed source model which has 1 strong motion generation areas. The relationship between seismic moment and short period level of acceleration source spectrum of this earthquake is expressed in a scaling law of the past study.