

2016年熊本地震の震源近傍の被害調査と 震源のモデル化

池田 隆明¹・小長井一男²・清田 隆³

¹正会員 長岡技術科学大学 教授 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

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

²フェロー会員 横浜国立大学 教授 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ケ谷区常盤台79-1)

E-mail:konagai@ynu.ac.jp

³会員 東京大学 生産技術研究所 准教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:kiyota@iis.u-tokyo.ac.jp

2016年熊本地震では2日間の間に震度7の地震が2度発生するという特徴的な地震であった。地震の活動域は熊本県熊本地方から阿蘇地域、そして大分県別府地域に広範囲に拡大した。最初の震度7の地震(Mj6.5)は日奈久断層、二番目の地震(Mj7.3)は布田川断層が起震断層と考えられ、ほぼ従来指摘されていた活断層に沿って地表変位が確認された。震源近傍では強震動と断層変位に伴う地盤変形に起因すると考えられる構造物の被害を確認した。またMj7.3の地震を対象に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震源モデルの構築を試みた。

Key Words : 2016 Kumamoto earthquake, empirical Green's function method, source model, strong motion generation area, damage investigation, surface rupture

1. はじめに

2016年4月14日21時26分頃、熊本県熊本地方を震源とするMj6.5の地震が発生した。震源深さは11kmと浅いため、震源近傍では強い地震動が生成され、熊本県益城町では2011年東北地方太平洋沖地震以来5年ぶりに震度7が観測されるとともに、震源近傍の4つの自治体で震度6強を観測した¹⁾。この地震の約28時間後の4月16日1時25分頃、震源の近傍で再びMj7.3の地震が発生した。震源近傍では再び激しい揺れが生じ、益城町では再び震度7が計測された。益城町の東隣の西原村でも震度7が観測されるとともに、Mj6.5の地震を上回る8つの自治体で震度6強を観測した。規模が大きい地震が近接、かつ連続して発生したため、二つの地震により死者75名(震災関連死を除く)、住家の全壊8,147棟、半壊29,008棟という甚大な被害が発生した²⁾。気象庁は「平成28年(2016年)熊本地震」は4月14日21時26分以降に発生した熊本県を中心とする一連の地震活動を指す³⁾として、最も規模の大きいMj7.3の地震が本震、Mj6.5の地震はその前震との考え方を示している。そのため、本報告でもそれぞれを前震、本震と呼ぶ。

前震と本震の震源は極めて近いが、CMT解や余震分

布から、前震は日奈久断層帯、本震は布田川断層帯の一部が起震断層であると考えられている。また、二つの地震は震源深さが浅いことから、地表断層が確認されており、益城町堂園では2m以上の右横ずれが確認されている⁴⁾。

地震調査研究推進本部の活断層評価によると⁵⁾、日奈久断層帯は益城町付近から芦北町を経て八代海南部に至る延長約81kmの断層帯である。過去の活動時期から、延長約16kmの高野一白旗区間、長さ約40kmの日奈久区間、そして長さ約30kmの八代海区間の3つに区分されている。前震は最も東側に位置する高野一白旗区間が活動したと考えられており、想定された地震規模のM6.8は前震の地震規模(Mj6.5)より若干大きめである。布田川断層帯は阿蘇外輪山から宇土半島の先端に至る活断層帯で、概ね東北東-西南西方向に延び、前長は約64km以上の可能性がある。日奈久断層帯と同様に延長約29kmと推定される布田川区間、長さ約20kmの宇土区間、長さ約27km以上の可能性がある宇土半島北岸区間の3つに区分される。本震は最も東側に位置する布田川区間が活動したと考えられており、想定された地震規模のM7は本震の地震規模(Mj7.3)より若干小さめである。

震源近傍の地震動が防災科学技術研究所の強震観測網

K-NETおよびKiK-net⁶⁾、および自治体の震度計⁷⁾で観測されている。本震に限定すると、震源ごく近傍のKiK-net益城 (KMMH16) では地表で1Gを超える最大加速度が観測されている。

筆者らは本震直後の4月16-17日、および4月22-24日にかけて、本震を引き起こしたと考えられる布田川断層に沿った地域を中心に被害調査を行い、地震動と断層変位に起因する被害を確認した。

本稿では、特に被害が大きかった西原村の県道28号線に沿った地域の被害調査結果を示すとともに、内陸地殻内地震を対象とした強震動予測の精度向上を目的に経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリング⁸⁾⁹⁾により震源モデルの構築を試みたので併せて報告する。

2. 地震の概要

図-1に2016年熊本地震および平成28年8月31日までに震度4以上が観測された余震の震央分布を示す。当初熊本地方で発生した地震活動は布田川断層の走向方向に沿って徐々に東側に進み、大分県の別府-万年山断層帯まで拡大している。表-1に本震の概要を示す。

複数の断層が連続して活動したと考えられることから、余震活動は活発で、1995年以降に発生した地震の中で最も余震活動が活発であった2004年新潟県中越地震を上回る¹¹⁾。

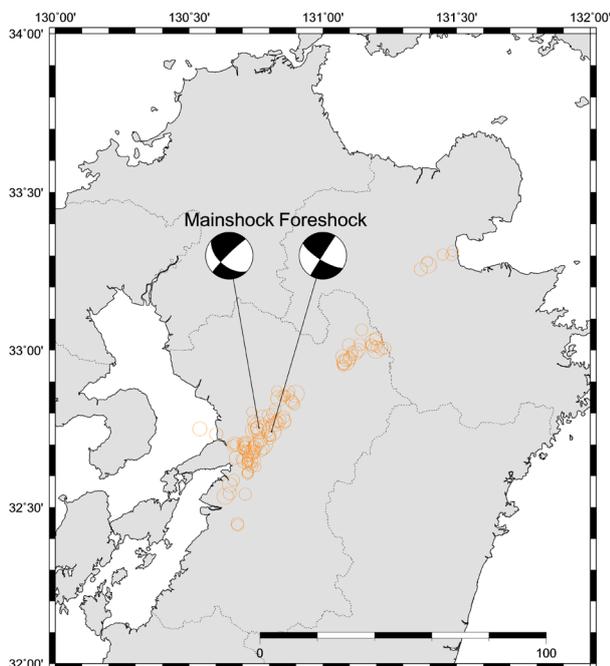


図-1 2016年熊本地震の本震および前震の震央とメカニズム解、および2016年8月31日までに発生した震度4以上の地震の震央分布

表-1 2016年熊本地震の概要

発生日時	2016年4月16日 01時25分5.4秒
震央	32°45.2'N 130°45.7' E
深さ	12km
マグニチュード	Mj7.3, Mw7.1 ¹⁰⁾
地震モーメント ¹⁰⁾	4.42×10 ¹⁹ Nm
STR/DIP/RAK ¹⁰⁾	131;226/53;84/-7;-142

表-2 被害を受けた道路橋梁の諸元

橋梁名称	構造形式	橋長(m)	径間
大切畑大橋	連続鈹桁橋	265	5
桑鶴大橋	斜張橋	160	2
扇の坂橋	連続鈹桁橋	128	4
俵山大橋	連続鈹桁橋	140	3

3. 県道28号線沿いの被害状況

県道28号線は、熊本市西区小島下町と阿蘇郡高森町を結ぶ主要地方道である。このうち、西原村内では布田川断層に沿うように位置しており、沿線の道路橋梁、道路トンネル等の道路構造物や道路盛土、斜面、アースダム等に地震動と地盤変位によると考えられる被害が生じた。本報告では、紙面の関係上、道路橋梁4橋の代表的な被害について報告する。図-2に県道28号線と布田川断層¹²⁾¹³⁾の位置関係、および被害箇所を示す。また、表-2に対象とした道路橋梁の諸元を示す。

(1) 大切畑大橋

大切畑大橋は橋長265mの5径間連続鈹桁橋であり、平面的には北側にやや膨らんだ緩やかな曲線形状をしている。橋桁が全体的に橋軸直交方向（北方向）に移動した。支承にはゴム支承が使用されているが、両端とも支承は上部もしくは下部で破断し、橋桁が台座から落下していたが、橋軸直交方向への変位は橋台と橋桁との間に設置された落橋防止ケーブル（片側10本の計20本のうち西端の1本のみ破断）によって抑制されていた。落橋防止ケーブルは橋桁の橋軸方向の変位抑制を目的としているが、橋軸直交方向の変位制御にも寄与したと考えられる。

両端とも橋桁は橋台に衝突しているが、特に東端の程度が激しい。P2橋脚（西から2本目）の基部には、橋軸直交方向の曲げひび割れが生じていたことから¹⁴⁾、地震動により橋梁には橋軸直交方向の力が作用したと考えられる。なお、大切畑大橋の南側斜面には大規模崩壊が生じているが、橋梁被害との関係は不明である。写真-1、写真-2に大切畑大橋の両端の橋台および支承の被害状況を示す。

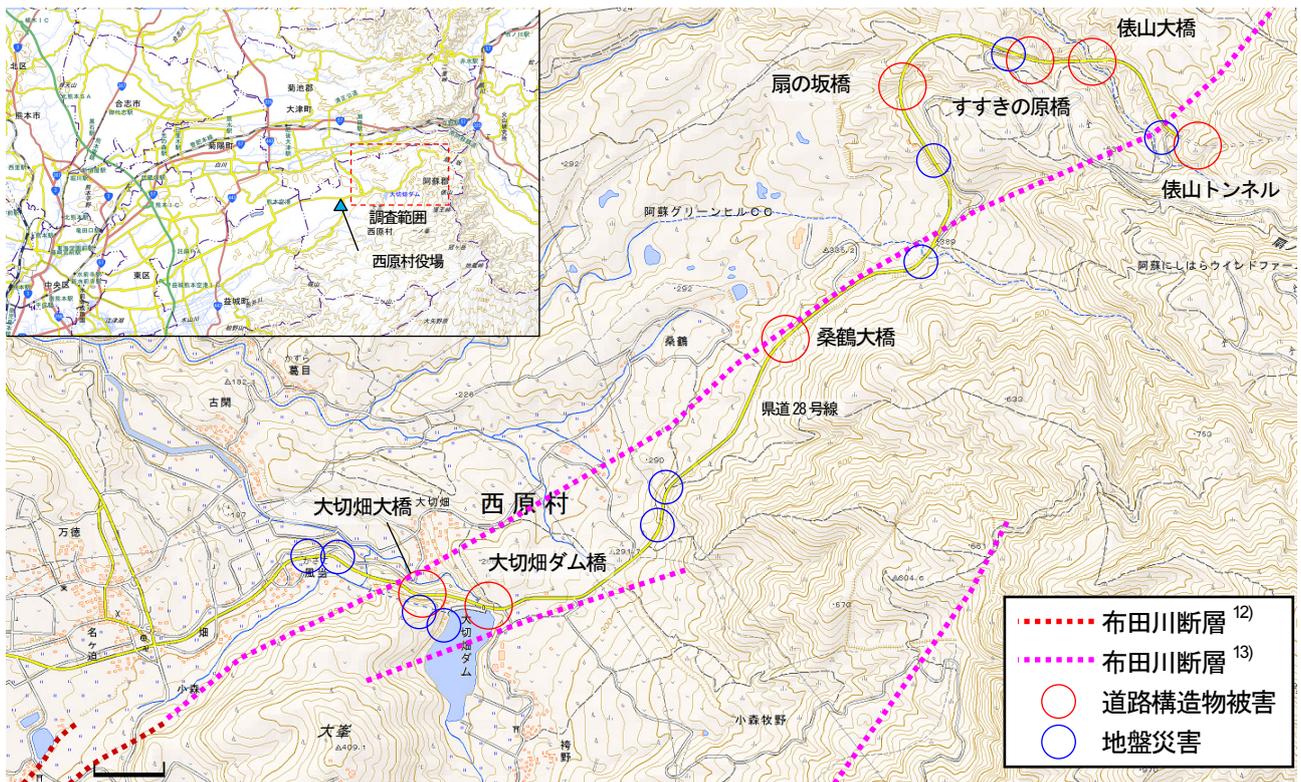


図-2 熊本県西原村内の県道 28 号と布田川断層との位置関係、および被害地点（国土地理院の電子地形図・電子国土 web を加筆修正）

(2)桑鶴大橋

桑鶴大橋は橋長160mの2径間斜張橋であり、大切畑大橋と同様に平面的には北西方向に膨らんだ曲線形状をしている（写真-3）。大切畑大橋と同様に橋桁が橋軸直交方向（北西方向）に移動していた。橋桁が北西方向に移動したことにより、当初均等であった主塔と橋桁との間隔は北西方向が狭く、南東方向は広がっている。北西方向の照明柱はケーブルに接触した痕跡が見られた。橋桁が北西方向に移動によりケーブルがと照明柱が近接し、さらに地震時にケーブルが大きく揺れたことが想定される。支承部の被害は南西端と北東端では異なる。南西端は橋桁が橋軸方向に引っ張られており、橋台と橋桁を連結する部材が引き抜かれている。一方、北東端では橋桁が橋台に激しく衝突し、その後橋桁は北西方向に移動したと考えられ、最終的にはRC製の横方向移動制限装置（ストッパー）に衝突して停止している。そのため、支承の被害も甚大で、北東端に設置されたピン支承は大きな被害を受けている。主塔と橋桁の固定部にもボルトの破断といった被害が見られた。吉見らは桑鶴大橋の下には右横ずれのセンスを持つ地表断層を確認しており、橋台と主塔との間に変位が生じた可能性を指摘している

15),16)

写真-3に南西方向から見た桑鶴大橋の全景を、写真-4に北東端の橋台および支承の被害状況を示す。

(3)扇の坂橋

扇の坂橋は橋長128mの4径間の連続鉸桁橋である。線形は西方向にわずかに膨らんだ曲線橋である。橋桁は橋軸直行方向に変位しているが、大切畑大橋や桑鶴大橋では橋桁が同一方向に移動していたのに対し、扇の坂橋は調査範囲に架設された6つの橋梁の中では唯一橋桁が時計回りに回転していた。支承は両端ともゴム支承であり、南端では橋桁がストッパーに衝突していた。

(4)俵山大橋

俵山大橋は橋長140mの3径間の連続鉸桁橋で、平面的には南西方向に延びる直線形状をしている。この橋は調査範囲に架設された橋の中で最も被害が大きかった。

西端では、橋台背面の土砂は大きく崩落し、橋台背面が現れている。橋台と橋桁は激しく衝突した痕跡が見られ、ゴム支承には残留変形が残っている。橋台前面の地盤は陥没し、基礎（深礎杭）の頭部が露出するとともに、橋台には鉛直方向のひび割れが見られる。



写真-1 大切畑大橋西端の被害状況。橋桁の橋軸直交方向への移動と支承からの落下、ゴム支承の破断等の被害が見られる (32°50'33"N, 130°55'38"E)



写真-2 大切畑大橋東端の被害状況。橋桁の橋台への衝突、橋軸直交方向への移動と支承からの落下、ゴム支承の破断等の被害が見られる (32°50'32"N, 130°55'47"E)



写真-3 南西方向から見た桑鶴大橋の全景。橋桁は写真左方向に大きく変位 (32°51'04"N, 130°56'43"E)



写真-4 桑鶴大橋北東端の被害状況。橋桁の橋台への衝突と軸直交方向への変位等の被害が見られる (32°51'07"N, 130°56'48"E)



写真-5 俵山大橋西端の橋台の被害状況。橋台全面の地盤は崩落し、基礎頭部が露出 (32°51'48"N, 130°57'47"E)



写真-6 俵山大橋の鋼製桁の座屈被害状況 (32°51'46"N, 130°57'37"E)

東端でも橋台と橋桁は激しく衝突した痕跡が残っている。橋台のパラペット部は橋桁によって押しされ、基部が破壊され、橋台上部は地盤にめりこみ、背後の地盤との間に段差が生じている。西端は橋軸直行方向の変位が見られなかったが、東端では北側への変位が見られる。

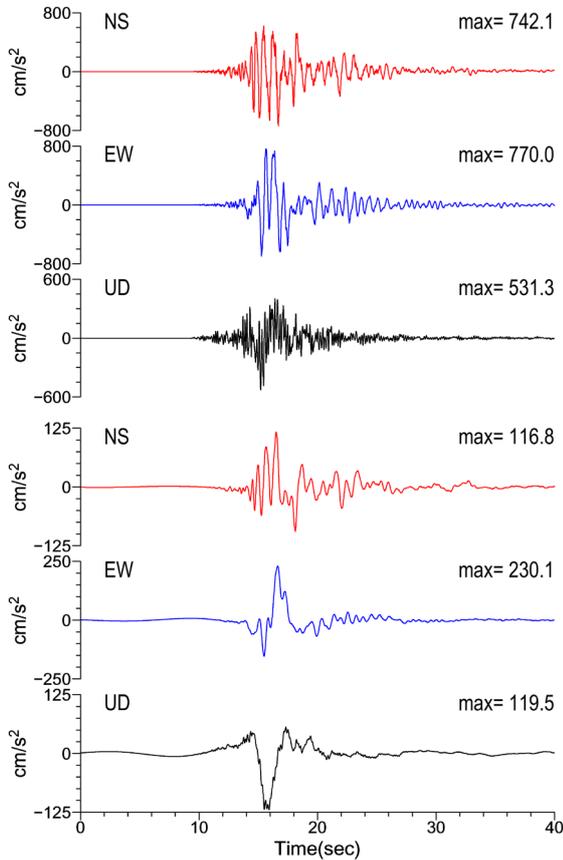


図-3 熊本県西原村役場で観測された本震地震動の時刻歴波形

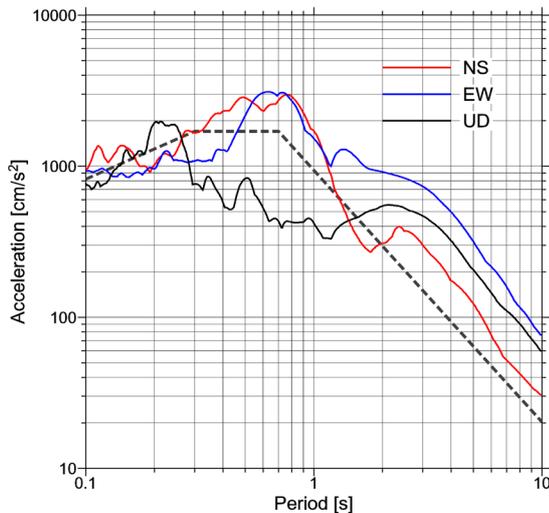


図-4 熊本県西原村で観測された本震地震動の加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) と設計応答スペクトル

両端の橋台の被害から、橋桁は震動によって橋台に衝突したのではなく、両方の橋台が谷側に移動し、橋桁自体が圧縮されたと考えられる。この仮定は、橋桁自体が座屈していることから妥当と考えられる。

吉見らは俵山大橋の下に南西方向から北東方向に浅い角度で交差する右横ずれのセンスの地表断層を確認しており、断層変位により両端の橋台が谷側に移動したことを指摘している¹⁵⁾¹⁶⁾。

写真-5に俵山大橋西端の被害状況、写真-6に鋼製橋桁の座屈被害状況を示す。

(5)近傍の地震動観測記録

県道28号線沿いに位置する西原村役場には熊本県の震度計が設置されており、本震と前震の地震動が記録されている⁷⁾。図-3、図-4に本震の時刻歴波形と加速度応答スペクトル ($\tau=0.05$) を示す。速度の時刻歴波形は加速度時刻歴に0.1~10.0Hzのバンドパスフィルターを作用させ、フーリエ積分により算出した。

最大加速度は770 cm/s^2 であり、近年発生した内陸地殻内地震での地震動に比べると極めて大きいものではないが、最大速度は230 cm/s に達している。また、速度波形には速度波形には3秒程度の卓越が確認される。

図-4には道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁷⁾に規定されたタイプ2地震を想定したレベル2地震動の設計応答スペクトルを破線で示す。設計応答スペクトルは地域別補正係数 $c_z=0.85$ が考慮されている。本震記録の応答スペクトルはほぼ全ての周期帯において設計応答スペクトルを上回っている。そのため、被害を受けた橋梁には、設計レベルを超えた地震荷重が作用したと推測される。

4. 震源の破壊過程

震源近傍の構造物被害および地震観測記録から2016年熊本地震・本震の震源特性を明らかにすることは、今後の内陸地殻内地震を対象とした地震災害軽減を考える上で重要である。

2016年熊本地震・本震の震源破壊過程が複数の研究者により報告されている。ここでは、周辺のK-NET, KiK-netにより得られた近地強震記録を用いた波形イメージングによる野津¹⁸⁾, Asano and Iwata¹⁹⁾, 大久保・他²⁰⁾の結果について比較する。

震源の破壊は北東方向に伝播したとする結果は共通であり、震源の北東側にすべり量が多い範囲が確認される。一方、浅い領域のすべり量の評価については研究者により解析結果が異なる。野津の解析結果ではすべり量が多い範囲は浅い領域には見られないが、大久保・他の解析結果では、深い領域で大きくすべった後にすべり

の大きい領域は浅い部分にも広がっている。Asano and Iwataの解析結果は震源の北西側とともに震源のほぼ直前にすべり量が大きい範囲が見られる。図-5にそれぞれの最終すべり量分布を比較して示す。野津の解析結果については左右を反転させている。

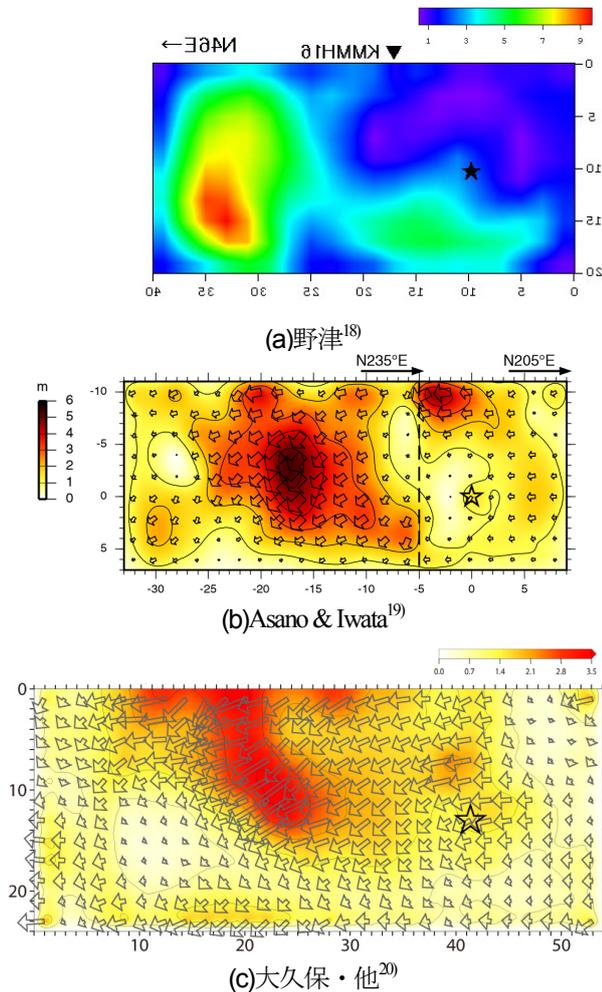


図-5 波形インバージョン解析による2016年熊本地震・本震の最終すべり分布の比較。

5. 震源のモデル化

2016年熊本地震・本震に対して釜江・入倉のモデル化手法⁹⁾に従い、経験的グリーン関数法によるフォワードモデリング手法を用い震源のモデル化を行う。震源の不均一性は均質な矩形の強震動生成域 (SMGA: Strong Motion Generation Area) を断層面上に配置して考慮する。この手法はM7クラスの国内外で発生した内陸地殻内地震の不均一震源モデルに適用され、有効性が確認されている⁹⁾。

SMGAを複数配置することにより、各観測地点で得られた特徴的な地震動を再現することができるが、将来の地震動予測問題への適用を考えると、出来るだけ単純な

モデル化が要求されることから、本検討では出来るだけ単純なモデル化を目指す。なお、強震動はSMGAのみから生成されると考え、SMGA以外の背景領域は考慮しない。

合成地震動との比較には、震源に近いK-NET山鹿 (KMM002)、K-NET大津 (KMM005)、K-NET矢部 (KMM009)、KiK-net益城 (KMMH16) の観測地震動 (KiK-netは地中地震動) を使用した。図-6に各観測地点の位置を示す。

(1)断層面の設定

震源破壊過程を引用した3つの研究においても、本震断層面の与え方は異なる。野津は一枚の平面的な断層面を用いているのに対し、Asano & Iwataは走向が異なる2枚の断層面を用いている。大久保・他は実際の断層形状に従い、局所的な断層面を設定している。前述のように本検討では単純なモデル化を目指すため、野津が用いた断層面を参考に、余震の震源分布、F-netのメカニズム解等に基づき一枚の平面的な断層面を検討した。その結果、断層面基準点の位置は32.9902N, 131.1359E, 走向226度、傾斜65度の断層面を設定した。図-6に設定した断層面を示す。断層面のサイズは48km×24kmとしているが、本検討では強震動はSMGAからのみ生成されるとし、SMGA以外の背景領域からの地震動生成は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。

(2)経験的グリーン関数の設定

経験的グリーン関数は本震発生前の4月15日15時27分頃に発生した余震 (Mj4.2) の記録を使用した。図-6に余震の震央位置を、表-3に震源パラメータを示す。面積、応力降下量は、KiK-net菊池 (KMMH03)、KiK-net白水 (KMMH06)、KiK-net三角 (KMMH07)、KiK-net豊野 (KMMH14)、KiK-net益城 (KMMH16)の5地点の観測記録から震源変位スペクトルを算出し、Andrewsの方法²¹⁾により求めたコーナー周波数 ($f_c=1.93\text{Hz}$: 5地点の平均) から、Bruneの式²²⁾²³⁾と円形クラックの式²⁴⁾からそれぞれ評価した。基盤のせん断波速度は3.5kmとした。

5地点での記録から震源パラメータを評価したのは、各観測記録に含まれるディレクティビティやラディエーションパターンの影響を可能な限り小さくするためである。震源変位スペクトルの算定においては、幾何減衰と媒質のQ値 ($Q=104f^{0.67}$)²⁵⁾による減衰の補正を行った。地震動には長周期側有効周期を考慮して0.2~10.0Hzのバンドパスフィルターを適用した。ライズタイムは0.6秒、破壊速度は2.7km/s、せん断波速度は3.5km/sと仮定した。地震モーメントはF-netの値を使用した。

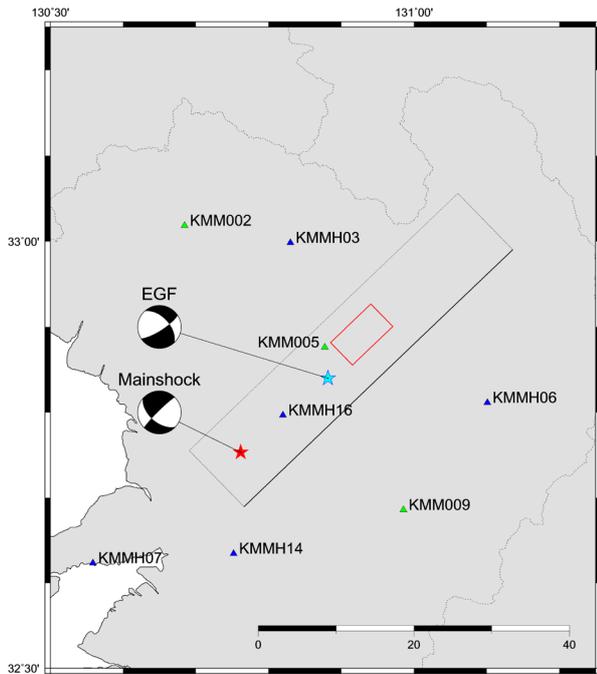


図-6 経験的グリーン関数として使用する地震の震央位置と想定断層面

表-3 余震の諸元

発生日時	2016/04/15 15:27:51.7	
M_{MM}	4.2	
震源位置	32.8400N, 130.8817E	
震源深さ	km	12.0
面積	km ²	1.44
地震モーメント	Nm	1.91×10^{15}
応力降下量	MPa	2.7

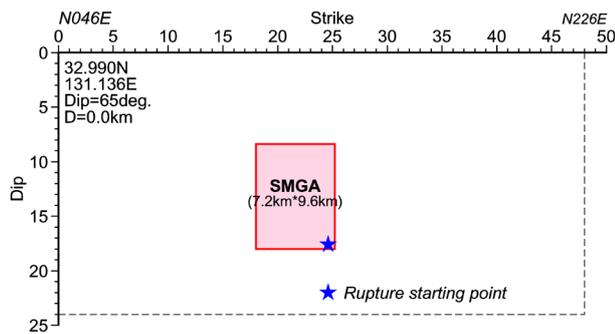


図-7 経験的グリーン関数法を用いたフォワードモデリングにより評価した最適震源モデル

表-4 最適震源モデルの強震動生成域の諸元

面積	km ²	69.12 (7.2km x 9.6km)
重ね合わせ数		6 x 8 x 6.93
上端深さ	km	8.4
応力降下量	MPa	10.8
破壊伝播速度	km/s	2.5
ライズタイム	s	0.6

震源のモデル化では、波形インバージョンの結果を参考に、震源周辺のすべり量の大きい場所にSMGAを一つ配置した初期モデルを作成し、合成波形と観測波形の一致度に基づきSMGAの位置や大きさ、破壊開始点を調整する。対象とした地震観測地点は前述の4地点である。

図-7に定量化した最適震源モデルを示す。SMGAのサイズは7.2km x 9.6kmであり、震源の東側の深い部分に配置した。破壊開始点は破壊開始点はSMGAの西下隅に設定し、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-8にKMM002, KMMH05, KMM009, KMMH16の4地点における観測波形と経験的グリーン関数法から評価した合成波形との比較を示す。想定断層面の直上に位置するKMM005, およびKMMH16では、観測波形の主要動に見られる断層破壊の指向性効果によるパルス状の波形が再現できている。走向の直交方向に位置するKMM002およびKMMH09には背景領域を考慮していないため主要動部の継続時間はやや短い、波形の形状に限定するとはほぼ再現できている。一方いずれの観測地点においても最大値の再現は不十分であり、SMGAを1つとしたこと、経験的グリーン関数として用いる要素地震の選定方法等に課題があると考えられる。

6. まとめ

2016年熊本地震の本震の発生直後に震源近傍域を対象に被害調査を行い、地震動と地盤変位によると考えられる被害を確認した。また、震源近傍を含む周辺域で観測された地震動記録を用い、当該地震の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、震源周辺に一つの強震動生成域を有する震源モデルを構築した。構築した震源モデルにより観測波形の形状は再現することができるが、振幅などについては精度向上の余地が残されており、震源モデルについては継続した検討を行う予定である。

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、気象庁ならびに熊本県の地震動記録、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。産業技術総合研究所の吉見雅行博士からは活断層ならびに地表断層に関する貴重な情報・助言をいただきました。本研究の一部は科研費基盤研究(C)15K06204（研究代表者：池田隆明）の助成を受けて実施しました。最後に記して謝意を表します。

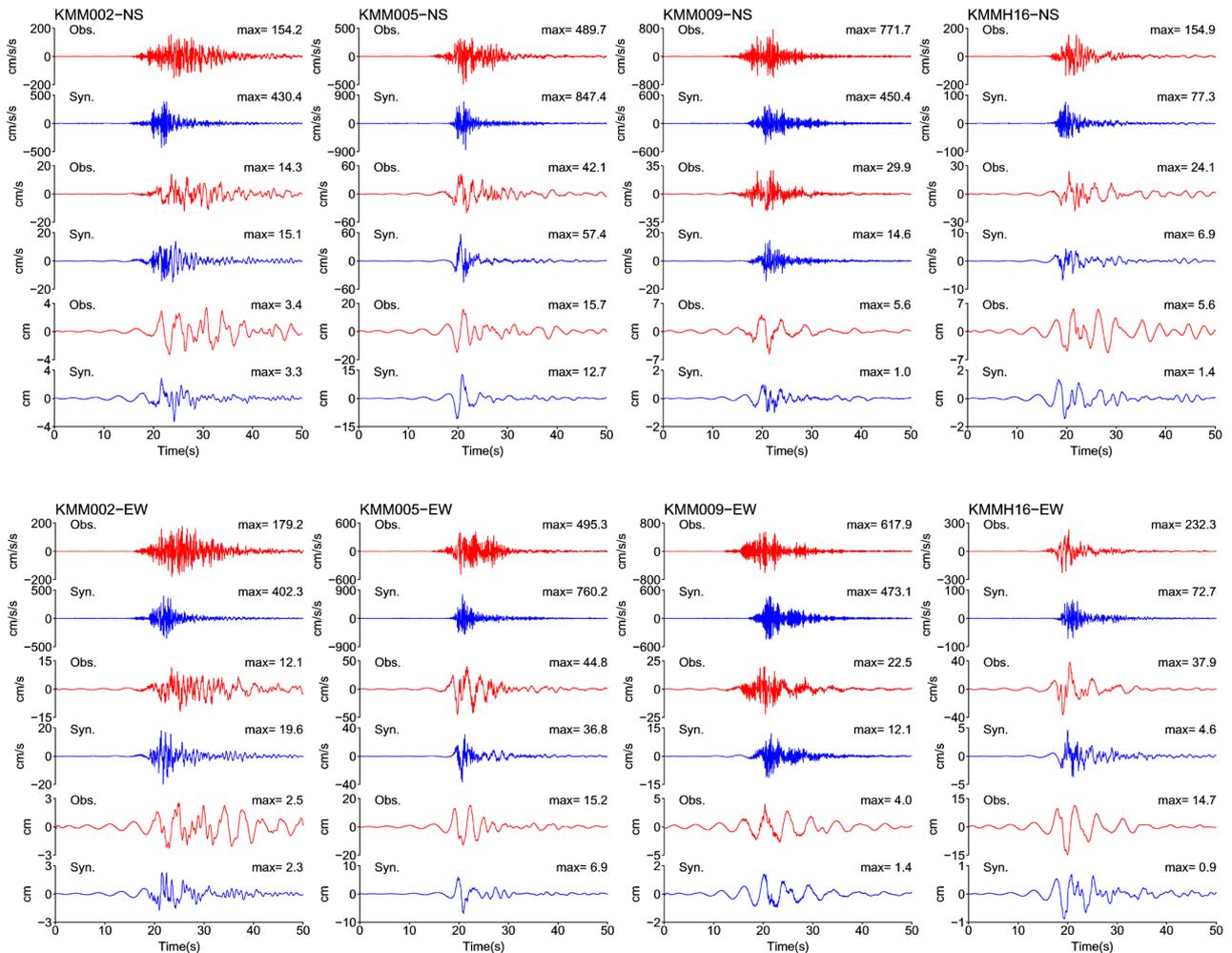


図-8 観測波形と経験的グリーン関数法から評価した合成波形との比較

参考文献

- 1) 気象庁：震度データベース,
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php> (2016.09.01 閲覧)
- 2) 総務省消防庁：熊本県熊本地方を震源とする地震(第74報),
<http://www.fdma.go.jp/bn/2016/detail/960.html>
(2016.09.01 閲覧)
- 3) 気象庁：「平成28年(2016年)熊本地震」について(第23報), 報道発表資料, 平成28年4月21日10時30分,
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1604/21a/201604211030.html> (2016.09.01 閲覧)
- 4) 産業技術総合研究所・地質調査総合センター：「第四報」緊急現地調査報告[2016年5月13日],
<https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/kumamoto2016/kumamoto20160513-1.html> (2016.09.01 閲覧)
- 5) 地震調査研究推進本部・地震調査委員会：布田川断層帯・日奈久断層帯,
http://www.jishin.go.jp/main/yosokuchizu/katsudanso/f093_futagawa_hinagu.htm (2016.09.01 閲覧)
- 6) 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/>
(2016.09.01 閲覧)
- 7) 気象庁・熊本県：強震波形(熊本県熊本地方の地震),
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/index.html> (2016.09.01 閲覧)
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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> (2016.09.01 閲覧)
- 11) 気象庁：「平成 28 年（2016 年）熊本地震」について（第 42 報），報道発表資料，平成 28 年 8 月 31 日 21 時 45 分，
<http://www.jma.go.jp/jma/press/1608/31a/201608312145.html> (2016.09.01 閲覧)
 - 12) 国土地理院：都市圏活断層図・熊本，
http://www.gsi.go.jp/bousaichiri/11_kyusyu.html (2016.09.01 閲覧)
 - 13) 産業総合技術研究所：活断層データベース，
https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.htm (2016.09.01 閲覧)
 - 14) 佐藤京：私信
 - 15) 吉見雅行：私信
 - 16) Shirahama et al.: Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth, Planets and Space*, Featured article on 2016 Kumamoto earthquake (投稿中) .
 - 17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.
 - 18) 野津厚：2016 年熊本地震（本震）の震源モデル（暫定版），http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bst/taisin/research_jpn/research_jpn_2016/jr_46.html (2016.08.05 閲覧)
 - 19) Asano, K. and T. Iwata: Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, *Earth Planets Space*, 68:147, doi:10.1186/s40623-016-0519-9, 2016.
 - 20) 久保久彦，鈴木亘，青井真，，関口春子：近地強震記録を用いた平成 28 年（2016 年）熊本地震（4 月 16 日 1 時 25 分、M7.3）の震源インバージョン解析（2016/8/9 再改訂版），http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/Kumamoto_20160416/inversion/ (2016.09.01 閲覧)
 - 21) Andrews, D. J.: Rupture velocity of plane strain shear cracks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 81, pp.5679-5687, 1976.
 - 22) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
 - 23) Brune, J. N.: Correction, *Journal of geophysical research*, Vol.76, p.5002, 1971.
 - 24) 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*, Volume 241, Issue 1226, pp. 376-396, 1957.
 - 25) 加藤研一：K-NET 強震記録に基づく 1997 年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価，日本建築学会構造系論文集，第 543 号，pp.61-68, 2001.

(2016.9.2 受付)

DAMAGE INVESTIGATION AND SOURCE CHARACTERIZATION OF THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Takaaki IKEDA, Kazuo KONAGAI and Takashi KIYOTA

Approximately 28 hours later of the Mw6.2 earthquake which occurred at Kumamoto region on 14th April 2016, an intense earthquake with Mw7.0 hit the affected areas again, and JMA seismic intensity of 7 was observed. It is considered from a CMT solution and after-shock distribution that the mainshock of Mw7.0 was caused by ruptures of Futagawa fault. Strong ground motions were generated near source area and caused severe damage to many structures. The authors conducted a damage investigation along the Futagawa fault. Furthermore, we make a preliminary source model by the empirical Green's function method using forward modeling procedure. This paper reports structural aspects of the damage observed along the surface rupture of Futagawa fault in Nishihara village and characterized source model of the Kumamoto earthquake.