



震源断層近傍の長周期地震動評価のための特性化震源モデルの拡張

—2016 年熊本地震 (Mw 7.0) の断層近傍地震動による検証—

入倉孝次郎¹⁾、倉橋 奨²⁾

1) 正会員 愛知工業大学、客員教授 理博

e-mail : irikura@geor.or.jp

2) 正会員 愛知工業大学、講師 博士 (工学)

e-mail : susumu@aitech.ac.jp

要 約

2016年熊本地震の本震 (Mj 7.3, Mw 7.0) により、日奈久断層帯北部および布田川断層帯に沿って、地表地震断層の出現が確認された。この地震の震源断層近傍で、防災科学技術研究所の強震動観測網 (KiK-net, K-NET) および気象庁・自治体震度計観測網によって多くの強震記録が得られた。特に、地表地震断層から約1kmの西原村役場や2km以内に位置する益城町役場の自治体震度観測点で貴重な強震動(加速度)が観測され、2回積分によりフリング・ステップを有する長周期地震動が確認された。これらの極近傍の長周期地震動は、従来の強震動生成域 (SMGA) に加えて地表近傍に長周期地震動生成域(LMGA)を想定する特性化震源モデルの拡張による強震動シミュレーションで再現可能なことが分かった。

キーワード： 強震動、長周期地震動、強震動生成域、長周期地震動生成域

1. はじめに

2016年熊本地震の一連の活動 (4月14日最大前震、4月16日本震) は、日奈久断層帯北部および布田川断層帯を含む長さ約50 kmにわたった (地震調査委員会, 2016)。この一連の地震で、倒壊家屋や家具の下敷き、土砂崩れなどにより熊本県で死者総計50人 (直接死) の大被害が引き起こされた。全壊家屋は8,000棟を超え、そのうち2,700棟余が益城町に集中している。益城町の被害は地表地震断層の周辺部に集中しているようにみえる。しかしながら、断層のずれにより建物の変形や傾斜は生じるが家屋の全壊には至らない。益城町で多くの建物に甚大な被害がでたのは、この地域に存在する軟弱な表層地盤で地震動が増幅されたためと考えられる (久田、2017; 後藤・他、2017)。断層近傍の被害について詳細な議論を行うには、震源断層から生成される地震動が地盤構造でどのように増幅されるか定量的な議論が必要である。

この地震の震源断層近傍で、防災科学技術研究所の強震動観測網 (KiK-net, K-NET) および気象庁・自治体震度計観測網によって多くの強震記録が得られた。強震波形記録を用いた震源インバージョン解析がいくつかのグループでなされ精度良いすべり分布が得られている (例えば、Asano and Iwata, 2016; Kubo et al., 2016a,b; Yoshida et al., 2017)。断層面は余震の震源分布や地表地震断層などに基づき、一枚セグメントや複数のセグメントを設定してなされているが、主要なすべり部分はほぼ一致した結果が得

られている。波形インバージョンの結果からSomerville et al.(1999)の規範により推定された震源断層の長さは42-56km、断層幅は18-20kmである。一方、地表踏査で確認された地表地震断層は日奈久断層帯北部および布田川断層帯に沿って、総計で約34kmである(Shirahama et al., 2016)。震源断層の長さとは地表地震断層の長さの違いがなぜ生じたのかは、地表踏査に加えて広域の3次元的地質構造の調査により検証が必要であろう。

地表地震断層の極近傍に設置されていた自治体の震度情報ネットワークの2観測点[西原村小森(93048)と益城町堂園(93051)]で貴重な加速度記録が得られ、2回積分によりフリリング・ステップを有する長周期地震動が確認された。地表断層に最も近い断層距離約1kmの西原村小森(93048)では、最大変位に関して水平成分は東に約2 m、上下成分は約2 mの沈下、次に近い断層距離約 2 km の益城町堂園(93051)では、最大変位に関して、水平成分は東に約1.2 m、北に0.5 m、上下成分は下に0.7 mが得られている(岩田, 2017)。

Irikura et al. (2017) は、本震の強震動を再現するために、強震動記録を用いた波形インバージョンによるすべり分布を参考に、強震動生成のための2つの断層震源モデルを検討している。Yoshida et al. (2016) は、複数のセグメントを設定して波形インバージョンにより断層すべり分布を推定し、一方、久保・他(2016)は、単純化された1セグメントを設定して波形インバージョンにより断層すべり分布を推定している。前者に対しては、3つの強震動生成域(Strong Motion Generation Area: SMGA)からなるモデル(モデルA)が構築され、後者からは1つのSMGAからなるモデル(モデルB)が最適震源モデルとして決められた。モデルBのSMGAはモデルAの3つのSMGAのほぼ中央部に位置している。これらのSMGAは深さ3 kmより深い地震発生層の内部に位置している。

両モデルとも、シミュレーション波形と観測波形は、地表断層に近いが2km以上離れたKiK-net益城(KMMH16)やK-NET熊本(KMM005)を含む観測点でよく一致している。図1にモデルBを用いて評価されたシミュレーション波形と観測記録の速度波形の比較が示す。しかしながら、後に示すように、SMGAモデルは地表断層により近い(2km以下)西原村役場や益城町役場の観測点で得られたフリリング・ステップをもつ長周期地震動は再現できない。

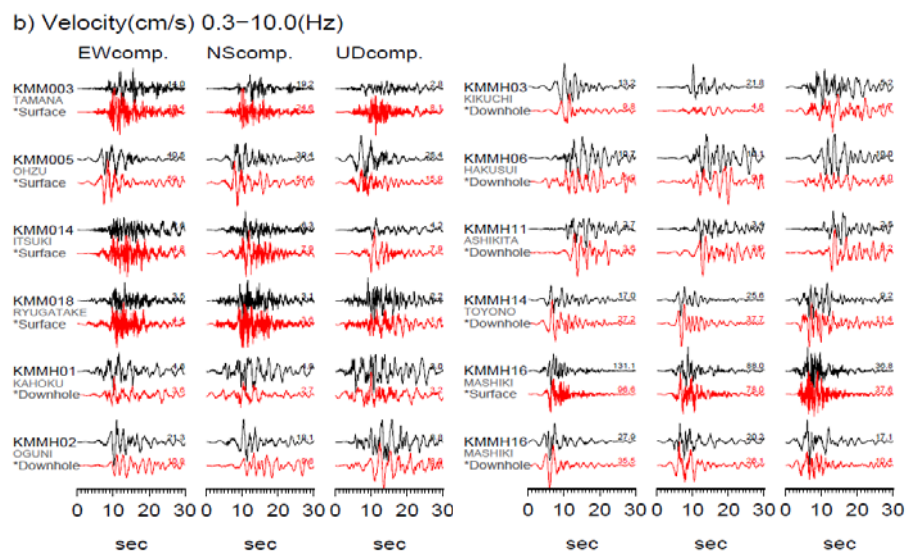


図1 2016年熊本地震(Mw 7.0)の強震動について、特性化震源モデルによるシミュレーション波形(赤線)と観測記録(黒線)の比較(Irikura et al., 2017)。単1のSMGAからなるモデル(モデルB)。シミュレーションは経験的グリーン関数法を用いてなされた。

地表断層近傍のフリリング・ステップを有する長周期地震動は、Hisada and Bielak (2003)により生成のメカニズムおよびこれまでの大地震における観測例について詳細な議論がなされている。断層近傍の長周期地震動の評価には、断層すべり分布とグリーン関数の動的な項(遠地項)だけでなく静的な項を計算

する必要がある。動的な項は距離とともに $1/r$ で減衰するのに対し、静的な項は $1/r^2$ で減衰するので、断層から離れた地点の地震動はほとんど影響を受けない。フリング・ステップを有する長周期地震動は、顕著な地表地震断層が現れた1992年Landers地震や1999年Chi-chi地震の断層近傍の強震動観測点で記録されている。2016年熊本地震は日奈久・布田川断層帯で約34kmにわたって地表断層が現れ、最大で2.2 mの断層ずれが観察されている。この地表地震断層の極近傍に位置する西原村小森や益城町堂園の観測点で記録されたフリング・ステップをもつ長周期地震動はHisada and Bielak(2003)により指摘されたグリーン関数の静的項の影響を受けたものと考えられる。

地表地震断層の近傍域の強震動を予測するには、従来のSMGAsからなる特性化震源モデルに加えて、フリング・ステップを有する長周期地震動も含むように特性化震源モデルの拡張が必要である。

2. 拡張特性化震源モデルと長周期地震動のシミュレーション

ここでは地表地震断層近傍の長周期地震動の評価を検討する。2016年熊本地震の本震（4月16日1時25分）の断層すべり分布を推定するため、Kubo et al.(2016)は、地震断層に関する観測情報にできる限り忠実に曲面断層面を設定して、強震波形記録を用いて震源破壊過程のインバージョンを行った。結果として得られた断層すべり分布が図2に示される。

本研究では、はじめに、SMGAのみで観測波形がどの程度再現できるかを検討する。対象とする観測点は、震源極近傍の西原村小森（93048）、益城町堂園（93051）、KiK-net益城（KMMH16）に断層周辺の6観測点を加えた9観測点とした。なお、KiK-net観測点は地中記録を、その他の観測点は地表記録を用いた。Kubo et al.(2016)を参考に、2つのSMGAからなる震源モデルを設定する。シミュレーションに必要なグリーン関数の計算は、地盤構造モデルとしてJ-SHISのV2モデル、すべり時間速度関数としてSmoothed ramp関数を、周波数範囲を0.05 – 1 Hz に設定し、離散化波数法（Bouchon,1981）を用いてなされた。SMGAの面積やすべり速度時間関数のパラメータは観測記録と合成波形が一致するように求めた。

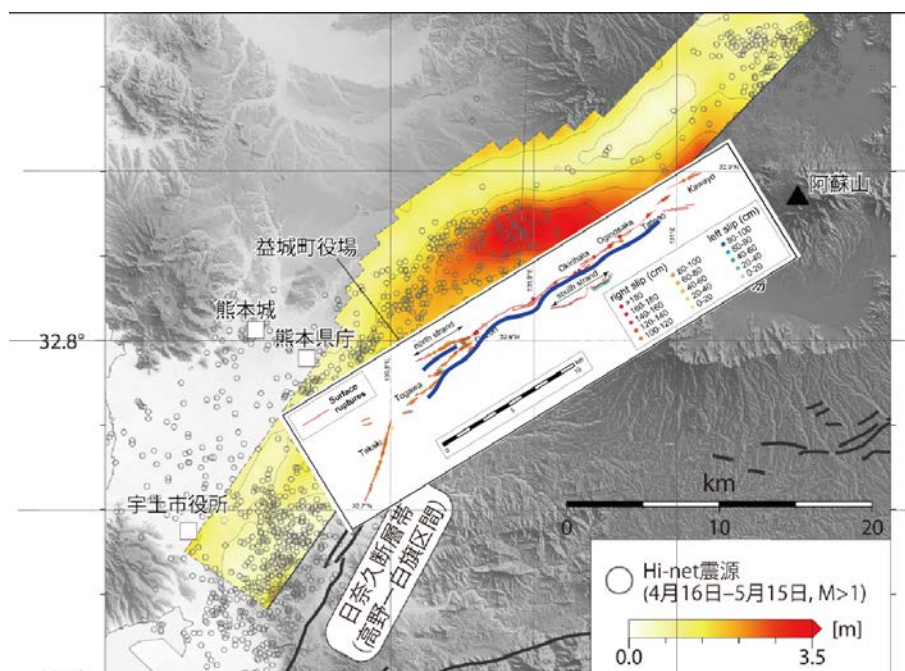


図2 Kubo et al. (2016)による強震動記録を用いた震源インバージョンによる断層すべり分布。インバージョンのための震源断層面の形状は地表地震断層の分布に合わせて曲面断層面が設定された。

図3に構築されたSMGAの特性化震源モデルが示され、図4で計算されたシミュレーション波形（速度）と観測記録が比較される。表1に構築したSMGAの特性化震源モデルの緒元が示される。図4では、各観

測点に観測記録（黒線）とシミュレーション波形（赤線）に加え、SMGA1からの寄与、SMGA2からの寄与が示される。図4の左側に示される断層面の北東側に位置する観測点 (KMMH03,KMMH05, KMMH06)の合成波形はSMGA1の寄与が大きく、図4の右側に示される西側の観測点(JMANIS, KMMH14, KMM003)の合成波形はSMGA2の寄与が大きい。これらの最適モデルに対する合成波形は単純化された地下構造モデルを用いているので、経験的グリーン関数法を用いた合成波形（図1参照）に比べると一致度は低い、観測記録によく一致している。図5には、断層極近傍の3観測点[93048(西原村小森)、93051(益城町宮園)、KMMH16[KiK-net益城]]における合成波形（速度）と観測記録の比較が示される。観測記録は地表断層から2 km 以上離れているKMMH16ではSMGAモデルからの合成波形でほぼ再現されるが、より近い93051や93048では観測に見られる長周期地震動は合成波形で再現できない。

表1 強震動生成域（SMGA1、SMGA2）の震源パラメータ

	SMGA1	SMGA2
走向/傾斜/すべり角	235° / 65° / -145°	215° / 74° / -180°
地震モーメント	$1.44 \times 10^{19} \text{Nm}$	$7.49 \times 10^{18} \text{Nm}$
Lx×Lw	12km×8km	9km×13km
ライズタイム	1.6sec	1.6sec
ラグタイム	0.0sec	3.0sec
破壊速度	2.8km/s	2.8km/s

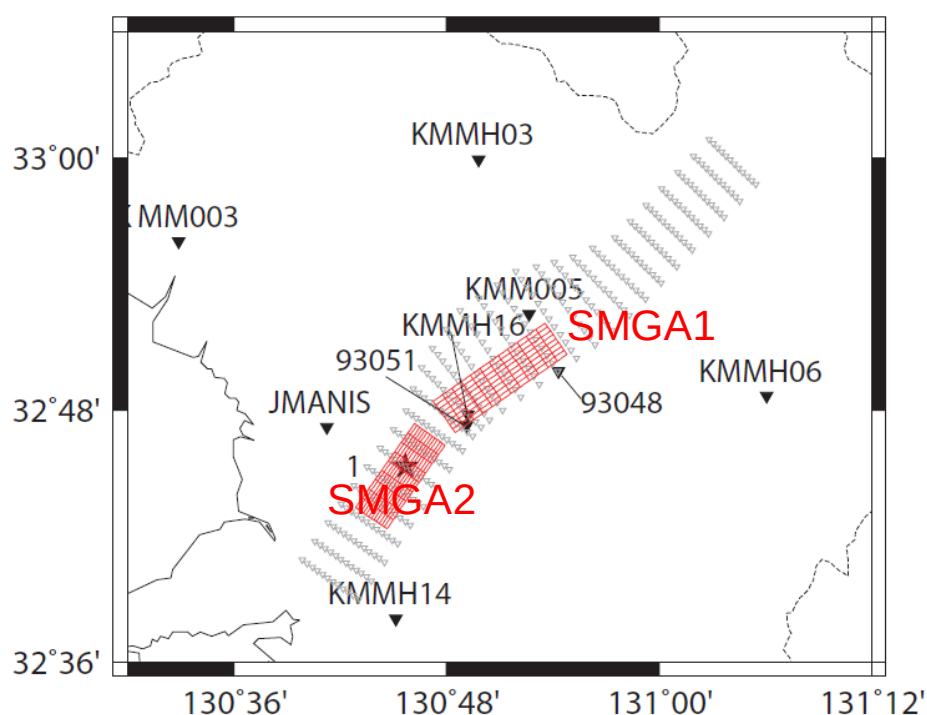


図3 Kubo et al. (2016) の断層すべり分布を参考に設定された特性化震源モデル。合成波形と観測記録の比較による最適化モデルは2つのSMGA（赤い長方形で示されるSMGA1とSMGA2）からなる。▼は解析に使用した観測点を示す。背景の灰色の△は、Kubo et al. (2016)の小断層の中心点を示す。

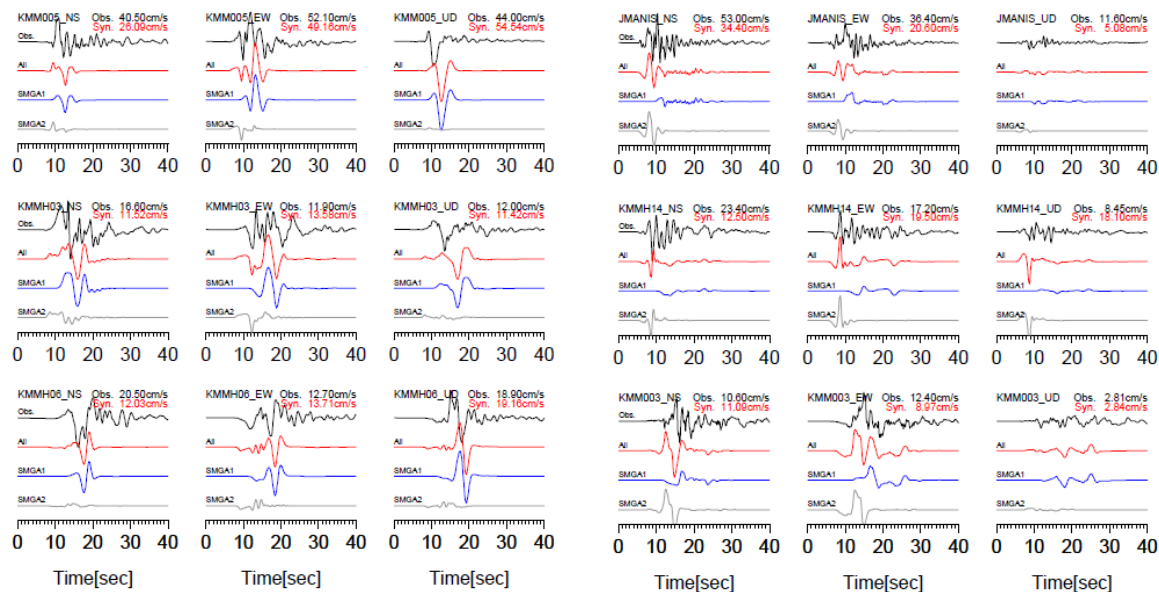


図4 図3に示されるSMGAモデルを用いて計算された合成速度波形(赤)と観測速度記録(黒)との比較。地震断層からやや離れた6観測点での検討結果。各観測点に観測記録、合成波形、SMGA1からの寄与(青)、SMGA2からの寄与(灰)が示される。対象周波数は0.05–1Hz。

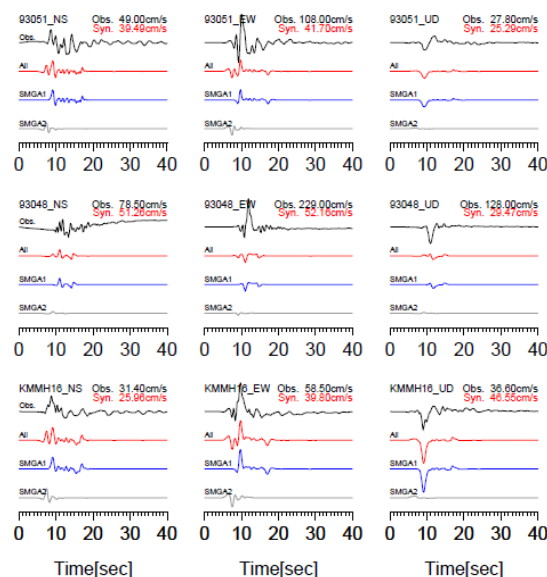


図5 図3に示されるSMGAモデルを用いて計算された地表断層の極近傍の観測点(93051、93048、KMMH16)での合成速度波形(赤)と観測速度記録(黒)の比較。対象周波数0.05–1Hz。各観測点で、観測記録(黒)、合成波形(赤)、SMGA1からの寄与(青)、SMGA2からの寄与(灰色)が示される。

そこで、断層近傍観測点に見られるフリリング・ステップを有する長周期地震動を再現するために、図6に示されるように地表断層の直下の地表と地震発生層上端の間に長周期地震動生成域(Long-period Motion Generation Area: LMGA)を設定し、地震動シミュレーションを試みる。ここで、シミュレーションには、Hisada and Bielak (2003)により開発された断層ずれによる平行層構造中の極近傍地震動の計算が可能な波数積分法を用いる。同様の研究はすでに金田・他(2017)や田中・他(2017)により、1999年Chi-chi地震や2016年熊本地震の断層近傍域の長周期地震動を対象としてなされている。

Kubo et al.(2016)による震源インバージョン解析で得られたすべり速度時間関数の分布は、地震発生層

内に位置するSMGAに対応する領域でKostrov型（立ち上がりが衝撃波でピーク値から緩やかに減衰する）の形状を示すが、地表断層の直下の領域でsmoothed ramp型の形状を示す。ここではLMGAから生成されるすべり速度時間関数はmodified ramp functionsを仮定する。LMGAの位置、面積、最大すべり、すべり継続時間は93048（西原村小森）や93051（益城町堂園）でのシミュレーション結果と観測記録の比較により推定される。

LMGAモデルの例が図6に青い長方形（LMGA1とLMGA2）で示される。ここでは、断層極近傍の3観測点[93048(西原村小森)、93051(益城町宮園)、KMMH16(KiK-net益城)]のフリリング・ステップを有する長周期地震動が再現するために、2つのLMGAが設定された。LMGA1とLMGA2の震源パラメータは表2に示される。断層すべり量は、LMGA1、LMGA2共に4mを仮定している。このLMGAモデルを用いて合成された長周期地震動（速度と変位）と観測波形の比較が図7で示される。LMGA1は93048（西原村小森）の長周期地震動の再現に必要で、LMGA2は93051(益城町宮園)とKMMH16(KiK-net益城)の長周期地震動の再現に必要とされる。

表2 長周期地震動生成域（LMGA1、LMGA2）の震源パラメータ

	LMGA1	LMGA2
走向/傾斜/すべり角	235° / 65° / -150°	235° / 65° / -150°
地震モーメント	$2.62 \times 10^{18} \text{Nm}$	$1.87 \times 10^{18} \text{Nm}$
Lx×Lw	7km×3km	5km×3km
ライズタイム	2.5sec	2.5sec
ラグタイム	3.0sec	5.5sec
破壊速度	2.8km/s	2.8km/s

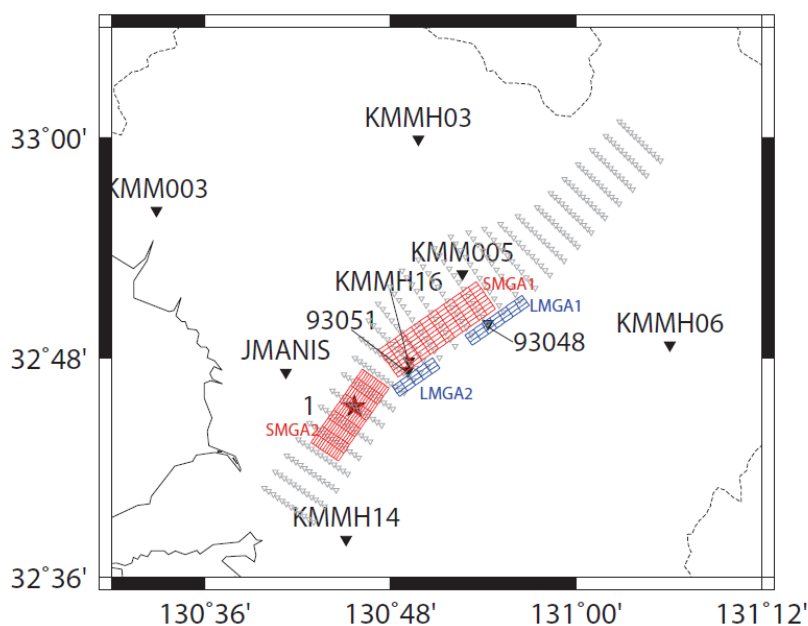


図6 LMGAモデル（2つの青い長方形、LMGA1とLMGA2）。SMGAは2つの赤い長方形（SMGA1とSMGA2）で示される。▼は解析に用いられた観測点を示す。背景の灰色の△は、Kubo et al. (2016)の小断層の中心点を示す。

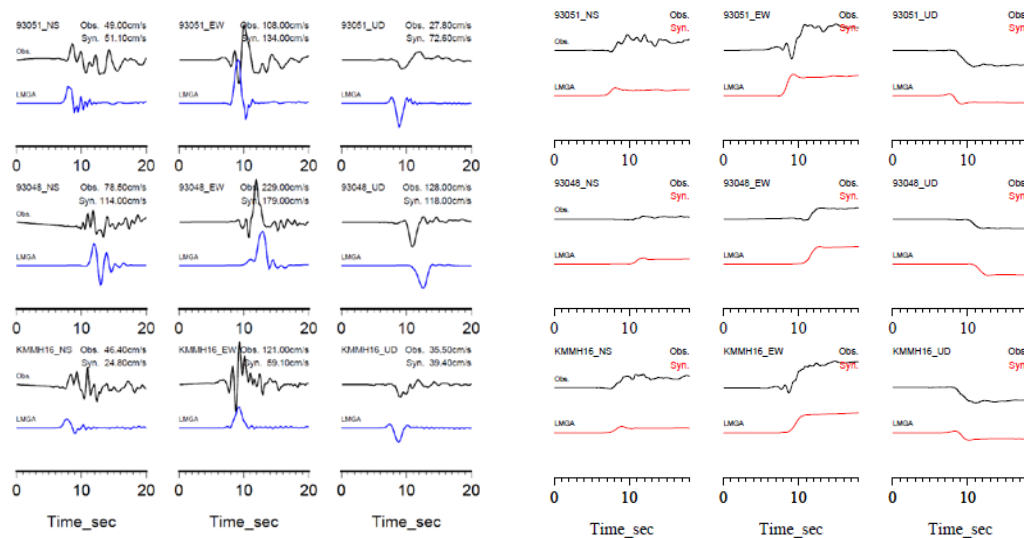


図7 LMGAモデルによるシミュレーション波形と観測記録の比較。2つ震源極近傍観測点(93051と93048とKMMH16)における3成分の速度波形(観測が黒線、合成が青線)が左図、3成分の変位波形(観測が黒線、合成が赤線)で示される。対象周波数は0.05-1Hz。

短周期も含む広帯域の地震動の合成のためには、従来の強震動生成域 (SMGAs)と新しく定義された長周期地震動生成域 (LMGAs) からの地震動の重ね合わせが必要となる。図6に赤い長方形で示される2つのSMGAと青い長方形で示される2つのLMGAを同時に考慮した広帯域の合成地震動は観測記録によく一致する(図8参照)。実際には、LMGA1とLMGA2の間をつないだ広領域LMGAを想定しても、ここで計算される長周期地震動は $1/r^2$ で減衰するので、93048(西原村小森)と93051(益城町宮園)の合成波形は大きくは変化しない。将来の地表地震断層を伴う大規模地震に対して断層近傍の長周期地震動を予測するには、事前の調査で得られた活断層のどこにLMGAを設定するべきか、今後さらなる検討が必要とされている。

ここでLMGAに設定した断層すべり4 mは地表地震断層の調査結果の最大断層すべり2.2 mに比べ大きすぎる。ただし、LMGAの極表層(数百m)での断層すべりを約2 mと小さくして、その下で約2 kmの深さまで最大すべりを4 mとするLMGAモデルを仮定しても震源極近傍観測点(93051と93048)の合成波形への影響は極めてわずかでほぼ同じフリリング・ステップが計算される。

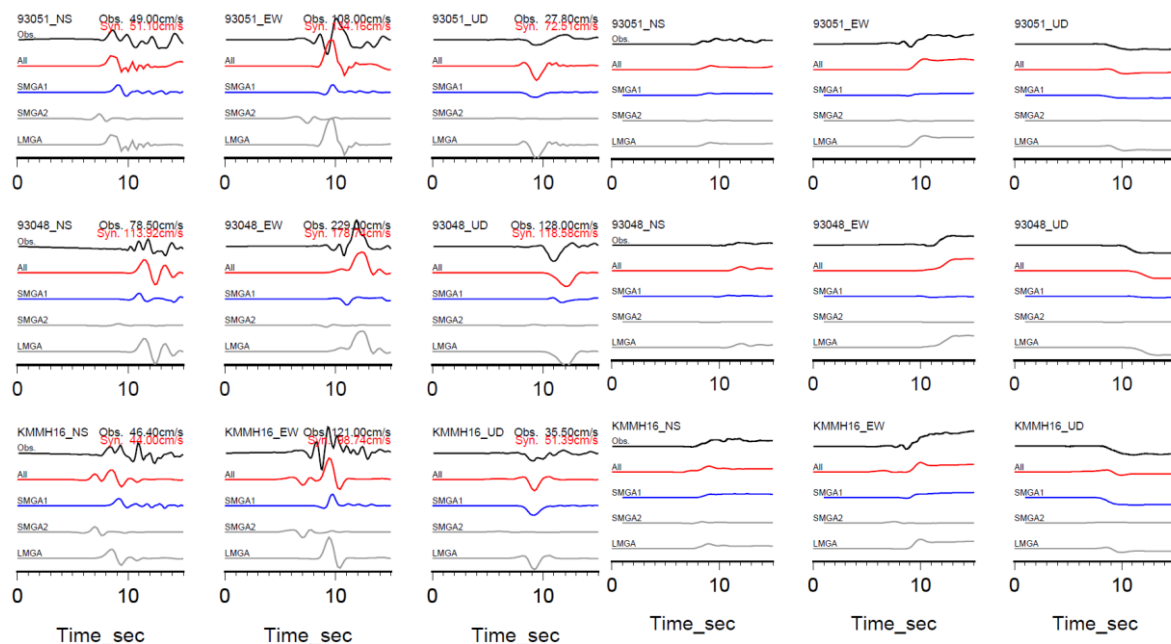


図8 LMGA+SMGAモデルから生成されるシミュレーション波形と観測記録の比較。3つ震源極近傍観測点（93051と93048とKMMH16）における3成分の速度波形が左図、3成分の変位波形が右図に示される。各成分に上から観測（黒）、合成（赤）、SMGA1の寄与（青）、SMGA2の寄与（灰）、および LMGAからの寄与（灰）が示される。

3. おわりに

これまで強震動評価のためのレシピは、強震動は地震発生層内の強震動生成域から生成されるとして評価されてきた。これは周期2秒よりも短い周期の強震動の評価には有効である。しかしながら、2016年熊本地震のように地表地震断層が出現するような規模の大きい地殻地震が発生した場合、断層極近傍域においてフリング・ステップを有する長周期地震動が生成される可能性が高い。このような長周期地震動は、地震発生層以浅に長周期地震動生成域（LMGA）を設定してHisada and Bielak (2003)で開発された理論的地震動評価法を用いて評価可能なことが明らかになった。今後地表断層の生じる可能性のある活断層地震に対して断層近傍域の強震動予測を行うには、本研究で提案された拡張特性化震源モデルを用いてフリング・ステップを含む長周期地震動の計算が必要である。

謝 辞

本論の作成に当たっては、防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netの強震記録、気象庁、熊本県自治体震度計のデータ、「地理院地図」（国土地理院）(<http://maps.gsi.go.jp>)をもとに作成した図を使用させていただきました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部：平成28年（2016年）熊本地震の評価、
http://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf、2016年
- 2) 久田嘉章：2016年熊本地震における地表地震断層の直上の建物被害と対策，日本地球惑星科学連合大会，2017年
- 3) 後藤浩之、吉見雅行、秦 吉弥：2016年熊本地震における益城町被害集中域の地震動増幅特性、日本地球惑星科学連合大会、2017年、HCG37-12
- 4) Asano, K., T. Iwata : Rupture process of the MJ 7.3 earthquake of the 2016 Kumamoto earthquake sequences,

- Earth, Planets and Space 68:147, 2016, doi:10.1186/s40623-016-0519-9.
- 5) Kubo, H., W. Suzuki, S. Aoi and H. Sekiguchi : Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong-motion waveforms, Earth, Planets and Space, 68:161, 2016, doi:10.1186/s40623-016-0536-8.
 - 6) Yoshida K., K. Miyakoshi, K. Somei and K. Irikura : Source process of the 2016 Kumamoto earthquake (Mj7.3) inferred from kinematic inversion of strong-motion records, Earth, Planets and Space, 69:64, 2017, doi: 10.1186/s40623-017-0649-8.
 - 7) Somerville, P., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. Seismological Research Letters, 70:1, 1999, pp.59-80.
 - 8) Shirahama Y., M. Yoshimi, Y. Awata, T. Maruyama, T. Azuma, Y. Miyashita, H. Mori, K. Imanishi, N. Takeda, T. Ochi, M. Otsubo, D. Asahina and A. Miyakawa : Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, , Earth, Planets and Space, 68:191, 2016, doi: 10.1186/s40623-016-0559-1.
 - 9) 岩田知孝、浅野公之、Characteristics of Near-Fault Ground Motions during the 2016 Kumamoto, Japan, Mainshock、日本地球惑星科学連合大会、2017年、SCG70-09
 - 10) Irikura K., K. Miyakoshi, K. Kamae, K. Yoshida, K. Somei, S. Kurahashi and H. Miyake : Applicability of source scaling relations for crustal earthquakes to estimation of the ground motions of the 2016 Kumamoto earthquake, Earth, Planets and Space, 69:10, 2017, 10.1186/s40623-016-0586-y.
 - 11) Yoshida K., K. Somei, K. Miyakoshi, K. Irikura and N. Inoue : Source process of the 2016 Kumamoto earthquake (MJ 7.3) inferred from kinematic inversion of the near fault strong motion. In: Proceedings of the 5th IASPEI/IAEE International Symposium Effects of surface geology on seismic motion, 2016, Taipei, P203F August 2016
 - 12) 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 (2016/5/12 改訂版) 、2016 年、
http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/Kumamoto_20160416/inversion_v2/
 - 13) Hisada, Bielak, J. : A Theoretical Method for Computing Near-Fault Strong Motions in Layered Half-Space Considering Static Offset due to Surface Faulting, with a Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity, Bull. of the Seism. Soc. of America, 2003, Vol.93, No.3, pp.1154-1168, June.
 - 14) Bouchon, M. : A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media, Bull. Seism. Soc. Am., 71, 1981, pp.959-971.
 - 15) 金田惇平、田中信也、引間和人、久田嘉章: 地震発生層以浅に適用可能なすべり速度時間関数の評価 (その1) 1999年集集地震を対象とした検討, 2017年. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.291-292.
 - 16) 田中 信也、金田惇平、引間和人、久田嘉章: 地震発生層以浅に適用可能なすべり速度時間関数の評価 その2 規格化Yoffe関数に基づく近似式, 2017年, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.293-294.