

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04671

研究課題名（和文）内陸地震における長周期パルスの地震動予測手法の開発

研究課題名（英文）Development of strong motion prediction method of long-period pulses for the inland crustal earthquakes

研究代表者

倉橋 奨 (Kurahashi, Susumu)

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号：60510899

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：2016年熊本地震で観測されたような長周期パルスは、高層構造物などに大きな被害を与える。本研究は、長周期パルスの予測手法の開発のために、長周期パルスが観測された2008年Wenchuan地震の震源モデルを構築した。長周期パルスの再現には、地震発生層よりも浅部に長周期を生成する領域（Long-period generation area: LMGA）を設定することにより、観測波形が再現できることを示した。また、既往のスケーリング則との比較から、Mw8クラスの地震ではLMGAのすべり量は地震規模に依存する可能性を示唆する結果となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

長周期パルス地震動の観測記録はまだ多くないため、まずはデータの蓄積、解析結果の蓄積が大変重要である。特にM8クラスの巨大地震ではなおさらであるため、学術的意義や社会的意義はあると考えている。また、2016年熊本地震で提案された手法が、2004年Wenchuan地震でも適用可能と示唆されたこと、M8クラスのLMGAのすべり量が規模依存となる可能性があることは、今後の長周期パルスの地震動予測には重要な成果であると考えている。

研究成果の概要（英文）：Long-period pulses which like the observed record during the 2016 Kumamoto earthquake causes significant damage to high structures. I estimated a source model during the 2008 Wenchuan earthquake, in which long-period pulses were observed for development of strong motion prediction method of long-period pulses for the inland crustal earthquakes. We showed that the observed long-period pulses were reproduced by the source model which were set the long-period generation area (LMGA) above seismicgenic zone. It is suggested that the relationship between the slip in LMGA and seismic moment may have moment dependence over earthquake of Mw8 class.

研究分野：地震工学

キーワード：長周期パルス 地震動予測 Wenchuan earthquake

1. 研究開始当初の背景

2016年熊本地震では、これまで想像もされていなかった内陸地震における長周期パルス(周期約3秒)が地表地震断層近傍の観測点で観測された。この長周期パルスが、都市部の活断層による地震で生成されると、高層構造物への被害が発生し、すなわち膨大な人的被害に発展する。本研究は、内陸地震により生成される長周期パルスの予測手法の開発が目的であり、これにより、高層構造物の耐震策の提案など、被害軽減の施策が可能となる。

2. 研究の目的

以上の背景から、当初の目的は、2016年熊本地震における長周期パルスの生成メカニズムの解明とともに、地表地震断層の極近傍で観測記録が得られた2014年長野県北部の地震や2008年岩手・宮城内陸地震における長周期パルスの生成の整理や生成メカニズムの検証を実施する予定であったが、上記の地震より長周期パルスや永久変位記録が明瞭に記録され、地震規模の大きい2008年Wenchuan地震(Mw7.9)に焦点を当てることとした。大きい地震の場合のそれらの結果を踏まえて長周期パルスの予測手法の開発を行う。

3. 研究の方法

2008年Wenchuan地震の観測波形を再現する震源モデルを構築する。特に、本研究の対象となる長周期パルスが観測された観測点を主ターゲットとする。長周期パルスがターゲットのため、周波数帯域は2Hz以下とし、離散化波数法(Bouchon, 1981)と波数積分法(Hisada and Bielak, 2003)の手法を用いた。

4. 研究成果

本研究の目的は、2016年熊本地震などにみられた内陸地震により生成される長周期パルスの予測手法の開発である。その目的を達するための一つとして、長周期パルスが観測された2008年Wenchuan earthquakeにおける理論的手法による地震動シミュレーションを実施し、その震源破壊過程を特徴づけるパラメータが、地震動にどのように影響を与えているかを分析した。

(1) Wenchuan地震の概要

2008年5月12日に中国四川省にてWenchuan earthquake (Mw7.9)が発生した。この地震は、竜門山断層帯で発生したものであり、地表地震断層は約240kmにもおよぶ。また、この地震断層の南部は、Beichuan断層とPengguan断層の2つの断層が約12kmの間隔をもって平行に並んでおり、両断層とも地表変位を伴う活動があったと考えられている。地表踏査による最大地表変位は、水平動で $6.5 \pm 0.5m$ 、上下動で $4.9m \pm 0.3m$ であった(Yu et al., 2010)。図1に地表地震断層および地表踏査による水平動と上下動変位を示す。

この地震の断層周辺には、the National Strong Motion Observation Network System of China (NSMONS, Li et al., 2008)による地震観測点があり、図2に示すように震源近傍における強震動が観測されている。このうちBeichuan断層の極近傍に設置されていた051MZQ観測点では、周期約2秒で最大速度130cm/sの長周期速度パルスが観測されており、変位は100cmにも達する。また、Pengguan断層の極近傍に設置されていた051SFB観測点でも最大速度80cm/s、変位は90cmにも達する大振幅速度パルスと永久変位が観測されている。

このような震源近傍点における長周期速度パルスと永久変位成分を持つ地震動は、2016年熊本地震でも観測されており、波形インバージョンやフォワードモデリングなどによりその地震動の生成メカニズムの解明が試みられている(例えば、Asano and Iwata, 2021; Tanaka et al., 2018)。その中で、Irikura et al.(2019)は、観測波形の再現する震源モデルとして、断層の深部に位置し強い地震動を生成する領域、すなわち強震動生成域(Strong motion generation area: SMGA)のみならず、地震発生層以浅において長周期の地震動を生成する領域、すなわちLong-period generation area(LMGA)を提案しており、このLMGAにより震源極近傍で観測された長周期速度パルスおよび永久変位が再現可能であることを提案した。一方で、SMGAとLMGAの震源モデルによる事例が少ないため、多くの事例で検証する必要がある。2008年Wenchuan地震はその一つの事例であるため、本研究で対象として理論的手法である波数積分法と離散化波数法を用いて観測波形を再現する震源モデルの構築を試みた。

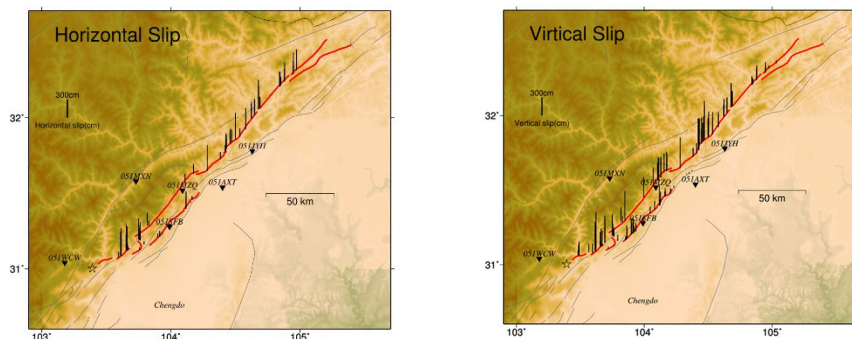


図1 2008年Wenchuan地震で活動した断層および水平動(左)と上下動(右)の地表変位量

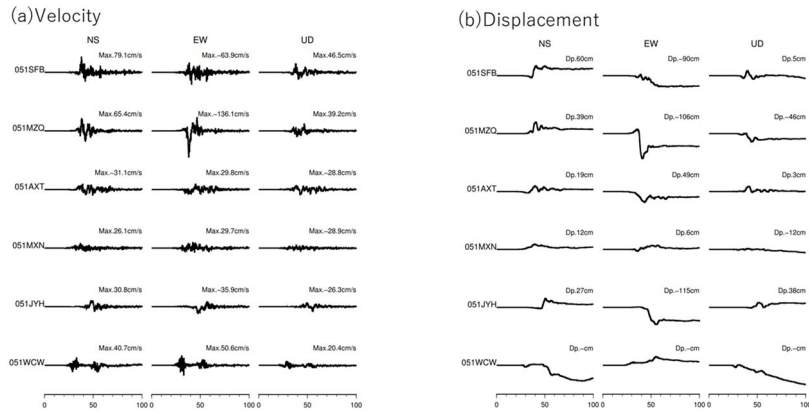


図2 2008年Wenchuan地震の断層近傍点の速度波形(左)と変位波形(右)

(2) 想定断層面の設定

解析に用いる断層面は次のように設定した。本地震の主断層であるBeichuan断層とPengguan断層の走向は、地表地震断層に沿って221度、傾斜角はYui et al.(2009)による余震分布を参考にBeichuan断層は62.4度、Pengguan断層の浅部は62.4度、深部は26.6度とした。設定した想定断層面を図2に示す。一次元地下構造モデルは、Harzell et al.(2013)による波形シミュレーションで使用された地下構造モデルを使用した。

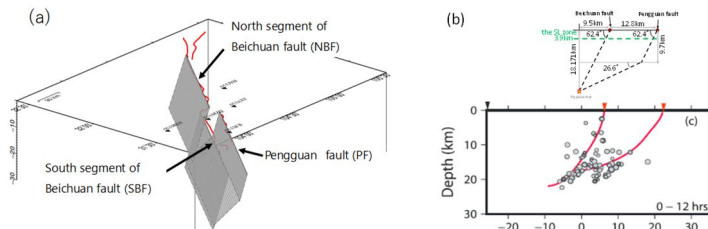


図3 解析に用いた想定断層面のMapview(左)と横断方向図(右)

(3) 解析概要

2016年熊本地震において震源近傍で観測された長周期速度パルスと永久変位の再現を試みたIrikura et al.(2019)では、SMGAとLMGAが提案されているが、これらの特徴として地震発生層内にあるSMGAのすべり速度時間関数は中村・宮武(2000)に代表されるKostrov形の関数を、地震発生層より上のweak shallow layer(SL) zone内にあるLMGAは、smoothed ramp関数を適用することで再現が可能であったことである。本研究でもこの考え方を踏襲した。図4にIrikura et al.(2019)で提案されたSMGAとLMGAの模式図を示す。

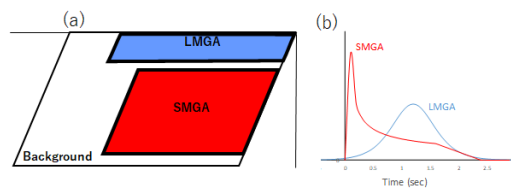


図4 Irikura et al.(2019)におけるSMGAとLMGAの模式図

以上を踏まえ、以下手順で震源モデルの構築を行った。

地表地震断層より離れた観測点における広帯域強震動記録を対象としてSMGAの震源モデル化を実施。解析方法は、離散化波数法(Bouchon, 1981)と使用する。また、すべり速度時間関数は、Kostrov型関数である中村・宮武(2000)を使用する。

地表地震断層近傍の観測点で観測された長周期速度パルスおよび永久変位の観測記録を対象として、LMGAの震源モデルを実施。解析方法は、波数積分法(Hisada and Bielak, 2003)を使用する。また、すべり速度時間関数は、smoothed ramp関数を使用する。

離散的にしか存在しない地震観測から求められたLMGAを、InSARによる空間的な永久変位(Feng et al., 2017)を参考に、LMGAの長さを調整する。

なお、解析では、Guzman and Hartzell(2020)による波形インバージョンから推定されたすべり量分布を参考とした。



#### (4) 震源モデル

##### SMGA の震源モデル

離散化波数法にて SMGA の震源モデル化をするにあたり、小断層は 2 km 四方と設定し、SMGA の大きさ、位置、ライズタイム、破壊伝播速度、すべり量のパラメータの最適値を、観測波形と計算波形の比較から求めた。最適な SMGA の震源モデルを図 5 (左) に示す。図 5 上の背景図は、Guzman and Hartzell (2020) のすべり量分布である。観測波形を再現するための SMGA として、5 つの SMGA が設定された。図 5 (右) に観測波形と各 SMGA からの計算波形と全 SMGA からの波形を足し合わせた計算波形の比較を示す。地表地震断層からやや離れている 051WCW、051AXT、051JYH、051MXN 観測点の観測波形は、おおむね再現できている。一方で、地表地震断層近傍の 051MZQ、051SFB を対象とした計算波形は、観測波形よりも大きく過小評価されており、観測波形の再現に至っていないことがわかる。

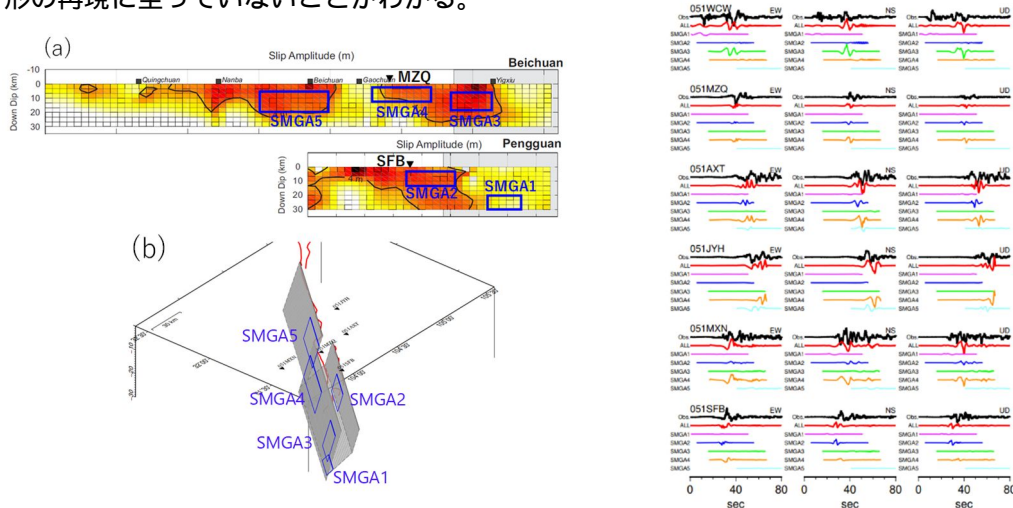


図 5 SMGA 震源モデル (左上) と SMGA 震源モデルの Mapview (左下) と観測速度波形と計算波形の比較 (右)。観測波形と計算波形の図には、各 SMGA からの寄与も記載している。

##### SMGA + LMGA の震源モデル

次に、地表地震断層の極近傍の 051MZQ と 051SFB 観測点の観測波形の再現のため、地震発生層よりも浅部に LMGA を設定して解析を行った。波数積分法にて LMGA の震源モデル化をするにあたり、小断層は 2 km 四方と設定し、LMGA の大きさ、位置、ライズタイム、破壊伝播速度、すべり量のパラメータの最適値を、観測波形と計算波形の比較から求めた。最適な SMGA の震源モデルを図 6 (左) に示す。観測波形を再現するための LMGA として、Beichuan 断層と Pengguan 断層に 1 つずつ、合計 2 つの LMGA が設定された。それぞれ、051MZQ と 051SFB 観測点の観測波形を再現するための LMGA である。図 6 (右) に観測波形と SMGA と LMGA からの計算波形と全パッチからの計算波形を足し合わせた計算波形の比較を示す。051MZQ、051SFB の速度パルスおよび永久変位ともよく観測波形を再現できていることが確認できる。

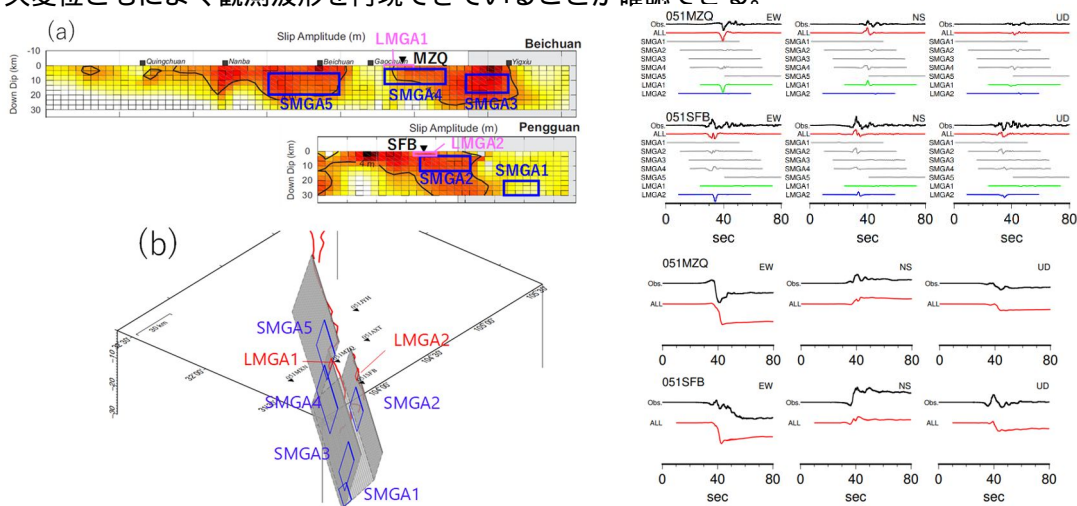


図 6 SMGA+LMGA 震源モデル (左上) と SMGA+LMGA 震源モデルの Mapview (左下) と観測速度波形と計算波形の比較 (右上) と観測変位波形と計算波形の比較 (右下)。

## 最適震源モデル

SMGA + LMGA の震源モデルでは、きわめて限られた場所に設置された地震観測点で得られた観測波形を再現する震源モデルであった。そこで、面的な観測結果が再現できる震源モデルに拡張するため、InSAR の空間的な永久変位を再現するように LMGA を再設定する。InSAR による永久変位は、Feng et al. (2017) を用いた。図 7 に、Feng et al. (2017) の永久変位と、SMGA + LMGA の震源モデルから Okada (2003) により計算した永久変位と、Feng et al. (2017) の永久変位に近似するように LMGA の長さを調整した震源モデルから Okada (2003) により計算した永久変位の結果を示す。SMGA + LMGA の震源モデルでは、Feng et al. (2017) の永久変位では地表地震断層に沿った地点の永久変位が過小評価されていたため、Feng et al. (2017) の永久変位に近似するように LMGA を地表地震断層に沿って長くすることで、永久変位の再現性がよくなった。これによる観測波形の再現性が極めて悪くなることはないことを確認していることから、このモデルを最適モデルとして採用することとした。

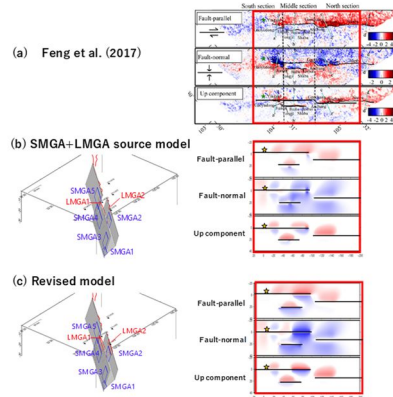


図 7 InSAR による空間変位分布 (Feng et al., 2017) (上) と SMGA + LMGA の震源モデルから計算された空間変位分布 (中) と最適震源モデルから計算された空間変位分布 (下)

### (5) スケーリング則との比較

最後に、既往の地震と本地震との関係性を把握するため、既往のスケーリング則との比較を行った。図 8 の藤堂他 (2023) による地震モーメントと断層面積  $S$  と SMGA の面積  $S_{SMGA}$  との関係図に、本地震の結果を付記した図面を示す。本地震における SMGA の面積は既往のスケーリングと概ね一致していることが確認できた。

また、図 9 には、Miyakoshi et al. (2020) による地震モーメントと LMGA のすべり量との比較図に、本研究で推定された LMGA のすべり量をプロットした図を示す。図の赤線は断層面の平均すべり量と地震モーメントとのスケーリング則、赤点線は平均すべり量の 2 倍のスケーリング則である。これまでの既往の地震の LMGA では、断層面の平均すべり量の 2 倍と地震モーメントとの関係が概ね一致していたが、本研究では、その関係よりは小さい値となっている。地震規模が大きい場合、LMGA のすべり量が頭打ちになる可能性を示唆していると考えられる。

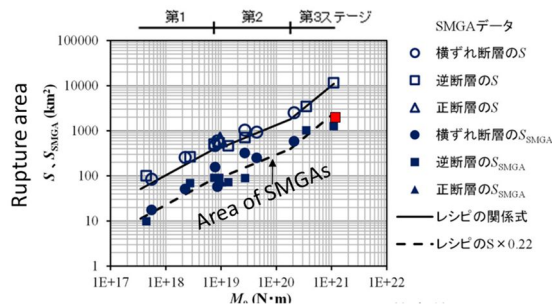


図 8 藤堂他 (2023) による地震モーメントと破壊面積および SMGA 面積のスケーリング則。本研究結果 (赤四角) を加筆した。

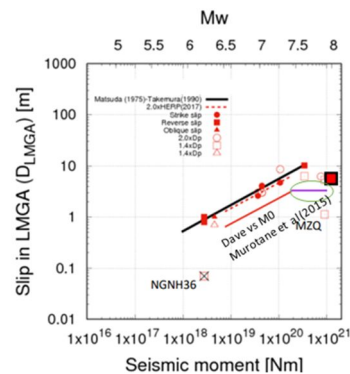


図 9 Miyakoshi et al. (2021) による地震モーメントと LMGA のすべり量のスケーリング則。本研究結果 (赤四角) を加筆した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 倉橋奨・入倉孝次郎
2. 発表標題 2008Wenchuan Earthquakeの地表断層近傍における長周期速度パルスの生成
3. 学会等名 日本地震学会 秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Susumu Kurahashi and Kojiro Irikura
2. 発表標題 Near-source Ground Motions During the 2008 Wenchuan Earthquake
3. 学会等名 Future directions Physics-based ground-motion modeling Seismological Society of America (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------