

地表地震断層近傍における永久変位を含む長周期成分の 地震動評価のための震源モデルの設定方法

CHARACTERIZED FAULT MODEL FOR PREDICTION OF LONG-PERIOD GROUND MOTIONS CONTAINING PERMANENT DISPLACEMENT IN THE NEAR-FAULT REGION

田中信也*1, 金田惇平*1, 引間和人*2, 久田嘉章*3

Shinya TANAKA, Junpei KANEDA, Kazuhito HIKIMA, Yoshiaki HISADA

We propose a new procedure for evaluating the parameters of characterized fault model for predicting long-period ground motions containing permanent displacement in the near-fault region. We recommend the Yoffe-type slip velocity functions modified by Tinti et al. (2005) for shallower region than the seismogenic layer after examining the source fault models based on the waveform inversion. The strong ground motions in the near-fault region of the 2016 Kumamoto earthquake was simulated by the theoretical method using the source fault models based on the new proposed procedure, and they showed a good agreement.

Keywords : Near-fault region, Seismogenic Layer, Seismic Waveform Inversion, Permanent Displacement, Strong ground motion prediction

地表地震断層近傍, 地震発生層, 震源インバージョン, 永久変位, 強震動予測

1. はじめに

2016年熊本地震本震(Mw7.0)では、布田川・日奈久断層に沿って地表地震断層が現れ、広範囲に甚大な建物被害が生じた。特に、地表地震断層の直上の建物においては、断層すべりの影響による変形や傾斜による建物被害が確認されている(例えば¹⁾)。断層すべりによる永久変位を伴うステップ関数状の地震動はフリングステップとよばれ、指向性パルスとともに地表地震断層近傍で観測される特徴的な地震動であるが、建物に及ぼす影響に関しては指向性パルスに比べ注目度が低いとされてきた²⁾。しかし、2016年熊本地震の建物被害を踏まえると、地表地震断層近傍においては、強震動に加えて永久変位を含む長周期成分の評価が必要と考えられる。一般的に、内陸地殻内地震を対象とした地震動評価では、地震調査研究推進本部による震源断層を特定した地震の強震動予測手法³⁾(強震動レシビ)に基づき、深さが数km~15km程度の地震発生層において震源断層モデルが設定される。しかし、地表地震断層近傍における永久変位を含む長周期成分については、地震発生層以浅の影響が大きいことが指摘されており⁴⁾、地震発生層以浅を含む震源断層モデルの設定方法に関する研究が進められている状況にある(例えば⁵⁾)。

周期1~2秒以上の強震波形の作成には理論的手法が用いられることが多い。理論的手法を用いて永久変位を含む長周期成分の評価を行う場合、断層面上のすべり速度時間関数とすべり分布を適切に設定する必要がある。すべり速度時間関数に関する研究として、

Kagawa et al. (2004)⁶⁾はアスペリティの深さによる最大すべり速度の違いについて分析を行い、アスペリティに対するすべり速度時間関数を提案している。また、引間・他(2015)⁷⁾は、2014年長野県北部の地震(Mw6.3)を対象に震源インバージョン解析を行い、震源の深部と浅部とですべり速度時間関数の形状が異なる点を指摘している。これらの知見を踏まえ、田中・他(2017)⁴⁾では、既往の震源インバージョン結果を収集し、地震発生層以浅における小断層のすべり速度時間関数をTinti et al.(2005)⁸⁾に基づく規格化Yoffe関数でモデル化した。ただし、対象は2011年福島県浜通りの地震(Mw6.6)と2014年長野県北部の地震の2地震のみである。

地震発生層以浅におけるすべり分布に関して、松島・他(2010)⁹⁾では、長大断層で発生した9つの地震を対象に、地表地震断層の最大変位量と震源断層のすべり量の関係を整理し、地表断層の最大変位量は震源断層の最大変位量に等しいか小さい場合がほとんどとしている。この知見を踏まえ、川里・他(2017)¹⁰⁾では、地震発生層内のアスペリティ部分と背景領域部分にそれぞれ対応するすべりとして、アスペリティ直上部分に大すべり域、背景領域直上部分に小すべり域を設定する方法を提案している。

本研究では、地表地震断層近傍における永久変位を含む長周期成分の地震動評価が可能な震源断層モデルの設定方法を構築することを目的とする。そのために、以下の手順で検討を行う。

・2章では、既往の震源インバージョン結果から、地震発生層以

*1 東電設計株式会社 修士(工学)

*2 東京電力ホールディングス株式会社 スペシャリスト 博士(理学)

*3 工学院大学 建築学部 まちづくり学科 教授 工博

Member, Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., M. Engineering

Member, Specialist, Tokyo Electric Power Company, Dr. Science

Member, Professor, School of Architecture, Kogakuin University, Dr. Engineering

浅における震源断層モデルの設定に必要なパラメータを求める。ひとつは地震発生層以浅に適用可能なすべり速度時間関数であり、もうひとつは地震発生層内と地震発生層以浅のすべり分布の対応関係である。

・3章では、2章の結果を用いて、強震動レシビに基づく震源断層モデルを地震発生層以浅まで拡張する。本研究では、2016年熊本地震を対象に、地震発生層以浅まで考慮した震源断層モデルを設定し、地表地震断層近傍を含む広域の観測点を対象に、理論的手法(波数積分法^{11) 12)}を用いて観測記録を再現することで、震源断層モデルの妥当性を示す。さらに、地表地震断層近傍の観測記録を再現する過程を通じて、地表地震断層近傍の地震動を評価する際に留意すべき点を明らかにする。

地震発生層以浅のパラメータを複数の震源インバージョン結果から求めるという点で川里・他(2017)¹⁰⁾とは異なる。なお、本研究における地表地震断層とは地震学的に認められる震源断層の延長が地表に達したものとしている¹³⁾。また、地表地震断層近傍とは、地表地震断層から2km程度以内の領域とする。

2. 地震発生層以浅におけるすべり速度時間関数とすべり分布

本章では、既往のインバージョン結果を収集し、地震発生層以浅におけるすべり速度時間関数と、地震発生層内と地震発生層以浅のすべり分布の関係について分析を行う。本研究では、国内外で発生した内陸地殻内地震の強震動記録を用いて解析された震源インバージョン結果を対象とし、地表地震断層が確認されており、地表付近まで断層面が設定されている表1に示す7つのモデルを選定した。選定したモデルに関して、短周期側は周期1.25~2秒までを対象としているが、周期1秒までは観測記録を概ね再現できることを、波数積分法^{11) 12)}を用いた再現解析により確認している。なお、本章の内容は、既発表論文^{20) 21) 22)}を加筆のうえまとめたものである。

(1) すべり速度時間関数

表1に示す地震の内、地表地震断層近傍の強震記録を逆解析の対象としている1992年ランダース地震(Mw7.3)、1999年集集地震(Mw7.7)、2014年長野県北部の地震、及び2016年熊本地震を対象に、田中・他(2017)⁴⁾と同様の方法で、震源インバージョン解析から得られた地震発生層以浅におけるすべり速度時間関数を、規格化 Yoffe 関数⁸⁾でモデル化する。規格化 Yoffe 関数⁸⁾は、すべり量D、最大すべり速度の時刻に関連する時間 τ_s 、及びライズタイムに関連する時間 τ_R を設定する必要がある。本研究では、すべり量は対象とした小断層の平均的なすべり量とし、 τ_s と τ_R は震源インバ

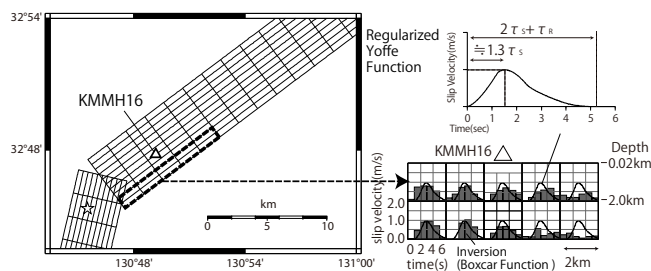


Fig.1 Modeling for slip velocity function by the Yoffe-type slip velocity functions modified by Tinti et al. (2005)⁸⁾ (example of 2016 Kumamoto earthquake)

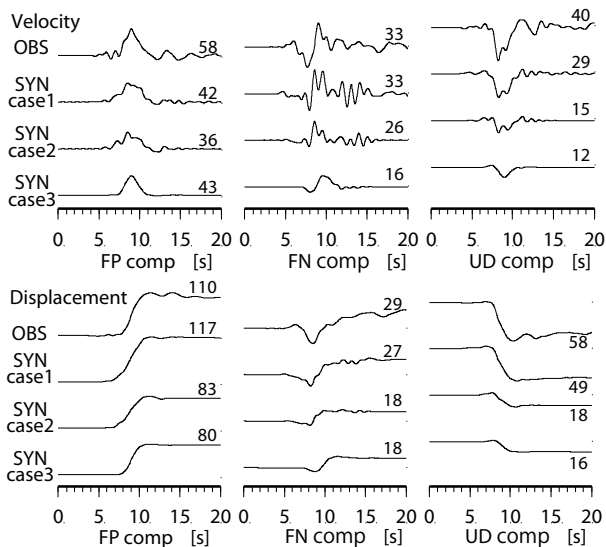


Fig.2 Observed and Synthetic over 1-s low-pass filtered velocity and displacement waveforms at KMMH16 (Maximum amplitude is shown above each waveform in cm/s for velocity and cm for displacement)

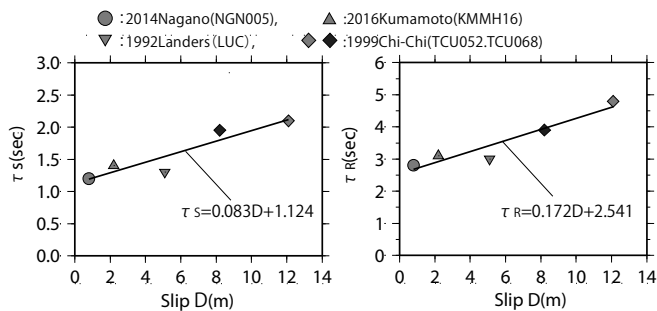


Fig.3 Relation between the slip and the parameters of the Yoffe-type slip velocity functions modified by Tinti et al. (2005)⁸⁾

Table1 Collected source fault models based on the waveform inversion of strong motion data

No	Earthquake	Slip model reference	Mw	Observation point ^{**1}			Frequency(Hz)		Green function ^{**2}
				SGM	TELE	GPS	Low	High	
1	1992 Landers	Wald and Heaton(1994) ¹⁴⁾	7.3	16	11	42	0.08	0.5	Common
2	1995 Kobe	Wald(1996) ¹⁵⁾	6.9	19	13	20	0.05	0.5	2 types
3	1999 Chi-Chi	Wu et al.(2001) ¹⁶⁾	7.7	47	—	60	0.02	0.5	3 types
4	2002 Denali	Oglesby et al.(2004) ¹⁷⁾	7.9	8	—	38	0.01	0.5	Common
5	2011 Hamadori	Hikima (2012) ¹⁸⁾	6.6	10	—	—	0.05	0.8	Individual
6	2014 Nagano	Hikima et al. (2015) ⁷⁾	6.3	12	—	—	0.05	0.8	Individual
7	2016 Kumamoto (main shock)	Hikima (2016) ¹⁹⁾	7.0	18	—	—	0.05	0.8	Individual

※1 : Number of observation points used for analysis . SGM: Strong ground motion stations, TELE : Telesismic stations, GPS : GPS stations.

※2 : Geotechnical model used for analysis. Common : Common soil profile for all stations, 2 types,3 types : 2 types or 3types of soil profile. Individual : Different soil profile for each station.

ージョン結果との対応、及び観測記録の再現性を考慮して試行錯誤的に設定する。ただし、震源インバージョン解析から得られた地震発生層以浅のすべり速度時間関数は、多くの場合小断層によってその形状は異なる。特に近傍に観測点がない小断層は、計算波形に対する寄与が小さいことから、震源インバージョン解析における感度が低く、得られたすべり速度時間関数の精度が低い可能性が考えられる。そこで、本研究では地表地震断層近傍に位置する観測点周辺の地震発生層以浅の小断層を対象に、すべり速度時間関数のモデル化を行った。

2016年熊本地震を対象としたすべり速度時間関数のモデル化の例を図1に示す。また、モデル化の妥当性を確認するために、波数積分法¹¹⁾、¹²⁾を用いてKiK-net益城(KMMH16)の地中記録の再現を行った結果を図2に示す。図2は、以下の3種類の評価結果について、周期1秒以上とした速度フィルター波と変位フィルター波を最大値で基準化し、断層平行(FP)成分、断層直交(FN)成分、上下(UD)成分として示している。まず、Case1として、引間(2016)

¹⁹⁾による断層面全体のすべり量とすべり速度時間関数を用いて評価を行った。図2からCase1は観測記録を良く再現できることがわかる。次に、KiK-net益城近傍の地震発生層以浅の小断層として、長さ約10km、地震発生層以浅として幅4kmの領域のみで評価した結果をCase2として示す。Case2は特にFP成分では寄与が大きいことから、KiK-net益城近傍の小断層の震源インバージョン解析における感度が高く、すべり速度時間関数が精度良く求まっていると考えた。そこで、KiK-net益城近傍の領域のすべり速度時間関数を、平均的なすべり量2.2m、 $\tau_s=1.4$ 秒、及び $\tau_R=3.1$ 秒とした規格化Yoffe関数で近似し、Case3として評価を行った。Case3の波形は単純化されているものの、Case2の傾向を再現できている。

他の地震についても、同様の方法でモデル化を行い、モデル化に用いたすべり量と τ_s 、及び τ_R の関係を図3に示す。すべり量が大きくなるほど、 τ_s と τ_R が大きくなる傾向が見られることから、直線で回帰した式を図3に併せて示す。ここで、Somerville et al.(1999)²⁰⁾は、既往の震源インバージョン結果から、地震モーメン

Table2 Area and slip of individual asperity

No	Earthquake	Name	Area				L (km)	W (km)	D (m)	Continuity	L _{sum} (km)	D _{ave} (m)	Ratio(s/d)			
			X1 (km)	X2 (km)	Y1 (km)	Y2 (km)							L _{sum}	D		
1	1992 Landers	s1	9.0	27.0	0.0	2.5	18.0	2.5	5.07	○	36	4.43	1.50	0.88		
		s2	30.0	48.0	0.0	2.5	18.0	2.5	3.80	○						
		d1	15.0	21.0	2.5	7.5	6.0	5.0	5.05	○	24	5.06				
		d2	24.0	36.0	2.5	15.0	12.0	12.5	5.25	○						
		d3	45.0	51.0	2.5	15.0	6.0	12.5	4.69	○						
2	1995 Kobe	s1	0.0	19.98	0.0	2.5	19.98	2.5	2.18	○	20	2.18	1.50	1.90		
		d1	6.66	19.98	2.5	20.0	13.32	17.5	1.15	○	13.3	1.15				
3	1999 Chi-Chi	s1	6.0	12.0	0.0	6.0	6.0	6.0	5.44	○	58	8.09	0.91	1.15		
		s2	24.0	38.0	2.0	6.0	14.0	4.0	6.42	○						
		s3	40.0	50.0	0.0	6.0	10.0	6.0	6.31	○						
		s4	54.0	70.0	0.0	6.0	16.0	6.0	10.01	○						
		s5	70.0	82.0	0.0	6.0	12.0	6.0	9.63	○						
		d1	6.0	30.0	6.0	12.0	24.0	6.0	5.84	○	64	7.01				
		d2	32.0	64.0	6.0	18.0	32.0	12.0	7.47	○						
		d3	50.0	66.0	20.0	32.0	16.0	12.0	7.06	×						
d4	70.0	78.0	6.0	8.0	8.0	2.0	6.63	○								
4	2002 Denali	s1	50.35	78.35	0	3.75	28.0	3.75	4.88	○ ⁽¹⁾	28 ⁽¹⁾	4.88 ⁽¹⁾	0.58	0.87		
		s2	138.35	162.35	0	3.75	24.0	3.75	4.39	○ ⁽²⁾					48 ⁽²⁾	4.67 ⁽²⁾
		s3	166.35	190.35	0	3.75	24.0	3.75	4.95	○ ⁽²⁾						
		d1	30.8	78.8	3.75	15.0	48.0	11.25	5.64	○ ⁽¹⁾	48 ⁽¹⁾	5.64 ⁽¹⁾			0.92	0.72
		d2	90.35	114.35	11.25	22.5	24.0	11.25	4.80	×						
		d3	134.35	186.35	3.75	18.75	52.0	15.0	6.52	○ ⁽²⁾					52 ⁽²⁾	6.52 ⁽²⁾
		d4	190.35	206.35	3.75	11.25	16.0	7.5	5.13	×						
d5	214.35	226.35	3.75	11.25	12.0	7.5	4.19	×								
5	2011 Hamadori	s1	4.0	20.0	0.0	2.0	16.0	2.0	1.51	○	16	1.51	1.14	1.09		
		d1	4.0	18.0	2.0	6.0	14.0	4.0	1.38	○	14	1.38				
		d2	26.0	34.0	2.0	10.0	8.0	8.0	0.86	×						
6	2014 Nagano	s1	4.5	7.5	0.0	3.0	3.0	3.0	0.77	×	—	—	—	—		
		d1	7.5	15.0	4.5	10.5	7.5	6.0	0.63	×	—	—				
7	2016 Kumamoto (main shock)	s1	12.0	18.0	0.0	4.0	6.0	4.0	2.76	○	12	2.66	0.75	1.00		
		s2	22.0	28.0	0.0	4.0	6.0	4.0	2.57	○						
		d1	12.0	28.0	4.0	14.0	16.0	10.0	2.65	○	16	2.65				
The mean value and the standard deviation (+1 sigma)												1.00(1.41)	1.04(1.42)			

※s1, d1 : s means the region shallower than the seismogenic layer, d means the seismogenic layer.

X1, X2, Y1, Y2 : Position of the corner of the asperity, L : Length of asperity, W : Width of asperity, D : slip of asperity.

L_{sum} : Total length of asperity(only continuous with the region shallower than the seismogenic layer and the seismogenic layer)

D_{ave} : Average value of slip in the asperity(only continuous with the region shallower than the seismogenic layer and the seismogenic layer)

Ratio : The ratio of the region shallower than the seismogenic layer to the seismogenic layer.

Continuity : If the asperity located in the region shallower than the seismogenic layer and the asperity located in the seismogenic layer are in contact, ○.

トとライズタイムの関係式を提案している。2016年熊本地震に適用すると、ライズタイムは1.5秒程度となり、仮にすべり速度時間関数を三角形関数とした場合、最大すべり速度の時刻は0.75秒程度となる。したがって、本研究で得られた回帰式に基づくすべり速度時間関数は、Somerville et al.(1999)²³⁾よりも緩やかに立ち上がる幅広の関数となることわかる。

なお、一般的に、震源インバージョン解析では数kmの長さ及び幅を持つ小断層を点震源で近似しているために、得られるすべり速度時間関数が純粋なすべり速度を表現することにはならない。ただし、永久変位や周期1~2秒程度以上の長周期成分の評価を目的とする場合、近似的にすべり速度時間関数と見なして大きな問題がないことを確認している。

(2) 地震発生層内と地震発生層以浅のすべり量の関係

前節で示したすべり速度時間関数に関する回帰式を用いるためには、地震発生層以浅のすべり量を設定する必要がある。Kagawa et al.(2004)⁶⁾では、既往の震源インバージョン結果から、深さ5kmを境界として、浅部と深部でそれぞれSomerville et al.(1999)²³⁾の方法に基づきアスペリティを抽出している。本研究では、Kagawa et al.(2004)⁶⁾と同様に、収集した表1に示す震源インバージョン結果から、地震発生層以浅と地震発生層内でそれぞれアスペリティを抽出し、その形状とすべり量について分析を行う。

抽出したアスペリティの形状とすべり量を表2に示す。ここでは、

地震発生層以浅と地震発生層内で連続している(アスペリティが接している)アスペリティに着目し、その長さとしべり量の関係を比較する。なお、ここでは長さ方向で一部が接している場合でも連続していると見なしている。表2に示すように、連続しているアスペリティの長さとしべり量は、地震発生層内と地震発生層以浅とで比較するとほぼ1となり、同程度となることわかる。この結果を踏まえると、地震発生層以浅と地震発生層内のアスペリティの長さとしべり量に大きな違いはないと考えられる。これは、松島・他(2010)⁹⁾による知見と概ね調和的と考えられる。なお、Kagawa et al.(2004)⁶⁾に基づき境界とする深さを約5kmとした場合でも、深部~浅部にかけて連続するアスペリティのすべり量の比率の平均値はほぼ1となることを確認している。

3. 2016年熊本地震を対象とした震源断層モデルの設定

本章では、2016年熊本地震を対象として、2章で整理した地震発生層内と地震発生層以浅のパラメータの関係を用いて、強震動レシピに基づく震源断層モデルを地震発生層以浅に拡張する。さらに、地表地震断層近傍において波数積分法^{11), 12)}による地震動評価を行い、設定した震源断層モデルの妥当性を確認する。

(1) 震源断層モデルの設定

まず、地震発生層内は、強震動レシピ³⁾に基づき震源断層モデルを設定する。地震発生層上端深さは余震分布²⁴⁾を参考に3kmと仮

Table3 Source parameters of constructed characterized source model

	Parameters	Model-01 (Basic model)	Model-02	Model-03
the Seismogenic Layer	Size (Length×Width)	32km×20km(Futagawa) 12km×20km(Hinagu)		Same as the left column and 13km×10km(Idenoguchi)
	Strike	233° (Futagawa), 193° (Hinagu)		Same as the left column and 231° (Idenoguchi)
	Dip	75° (Futagawa), 78° (Hinagu)		Same as the left column and 65° (Idenoguchi)
	Rake	-160°		Same as the left column and -110° (Idenoguchi)
	Moment	3.1×10 ¹⁹ Nm		4.0×10 ¹⁹ Nm
Shallower Region than the Seismogenic Layer	Slip	Recipe×1.0	Recipe×1.4(asperity)	Recipe×1.0
	Rake	-160°	-135°	-160°
	Slip velocity function	the regularized Yoffe $\tau_S=1.4s, \tau_R=3.1s$	the regularized Yoffe $\tau_S=0.7s, \tau_R=1.6s$	the regularized Yoffe $\tau_S=1.4s, \tau_R=3.1s$

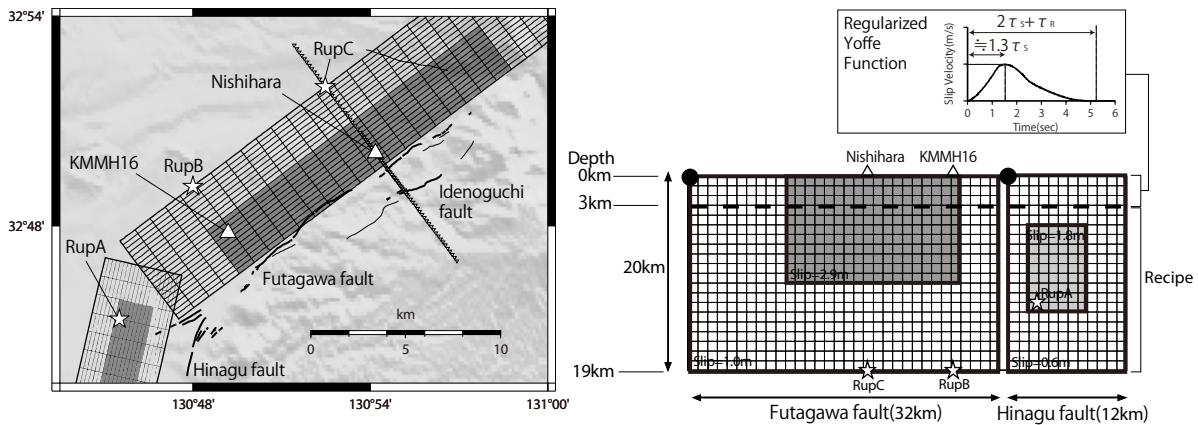


Fig.4 Characterized source model (Model-01) with elevation²⁶⁾, rupture starting point(☆), active faults²⁷⁾ (bold line : active fault trace, thin line : active faults estimated), strong motion stations(△), and points orthogonal to Futagawa fault through Nishihara Village(▽)

定する。地震発生層下端深さは引間 (2016) 19) を参考に 19km とし、巨視的断層面の形状とアスペリティ位置についても引間 (2016) 19) を参考に設定する。すべり速度時間関数は、強震動レシビ 3) に基づき中村・宮武 (2000) 25) による関数を用いる。

次に、2章(2)の結果を用いて、地震発生層内に設定した上記の震源断層モデルを地震発生層以浅に拡張する。拡張方法を以下に示す。

地震発生層以浅のすべり分布について、地表断層地震(断層破壊が地表に及ぶ地震)を想定する場合、地震発生層内のアスペリティと同じ長さ及びすべり量を持つアスペリティを地震発生層以浅に設定し、その他の領域は背景領域と同じすべり量を設定する。これは、川里・他 (2017)10) の考え方とほぼ同様である。地中断層地震(断層破壊が地表に及ばない地震、あるいは地表の変位が小さい場合)を想定する場合、背景領域と同じすべり量を地震発生層以浅全面に設定する。ここでは、北側の布田川断層については地表断層地震を、南側の日奈久断層については地中地震断層を仮定する。地震発生層以浅のすべり速度時間関数は、規格化 Yoffe 関数 8) を用いることとし、 τ_s と τ_R は2章(1)で求めた回帰式を用いる。

ここで、すべり速度時間関数の立ち上がり時間に関して、引間 (2016) 19) による震源インバージョン結果では、破壊開始点付近の立ち上がり時間は約2秒遅れている。この結果を踏まえ、地震発生層内のすべりの立ち上がり時間は1.8秒遅らせるように設定した。これは、すべり速度時間関数の最大すべり速度に達する時間が地震発生層内と地震発生層以浅でほぼ同時刻となる保守的な設定である。立ち上がり時間の違いは破壊や破壊伝播速度の不均質性に起因していると考えられ、今後、検討例を蓄積する必要があると考えている。

設定した震源断層モデルをここでは基本震源モデルと位置付け、Model-01 とよぶ。諸元を表3に、断層面を図4に示す。

(2) 基本震源モデルを用いた地表断層近傍における地震動評価

地表地震断層近傍に位置する KiK-net 益城 (KMMH16) の地中観測点と西原村(西原村役場)を対象に、波数積分法 11)・12) に基づく地震動評価を行うことで、前章で設定した基本震源モデルである Model-01 の妥当性を検証する。なお、断層上端(ほぼ地表地震断層位置に相当する)からの最短距離は KiK-net 益城で約 2.1km、西原村で約 0.8km となる。評価に用いる水平成層速度構造モデルは、防災科学技術研究所 J-SHIS の深部地盤モデル(藤原・他 (2012) 28)) から各観測点直下の速度構造を抽出し設定した。なお、熊本地震の破壊形式に関しては、宮武(2016)29)や Kobayashi et al.(2017)30) により断層深部からの指向性効果の影響が指摘されている。また、Kubo et al.(2016) 31) によれば、破壊は深さ 10~15km で北東に向かった後に地表に向かったとされている。これらの知見を踏まえ、ここでは 2016 年熊本地震の震源位置(図4中の RupA)と各観測点の深部(図4中の RupB 及び RupC)に破壊開始点を設定する。

対象周期 1 秒以上とした観測記録と評価結果の比較を図5に示す。KiK-net 益城では観測記録を概ね再現できる。また、破壊開始点を観測点の深部に設定した場合、指向性効果により地震発生層内からの地震動が大きくなる傾向が確認できる。しかし、西原村では指向性効果を考慮しても観測記録に対して明らかに過小評価となる。

そこで、地震発生層以浅の小断層のみの結果を Shallow、地震発生層内の小断層のみの結果を Deep として図5に示す。断層平行成分の速度や変位に関しては地震発生層以浅の寄与が比較的大きく、

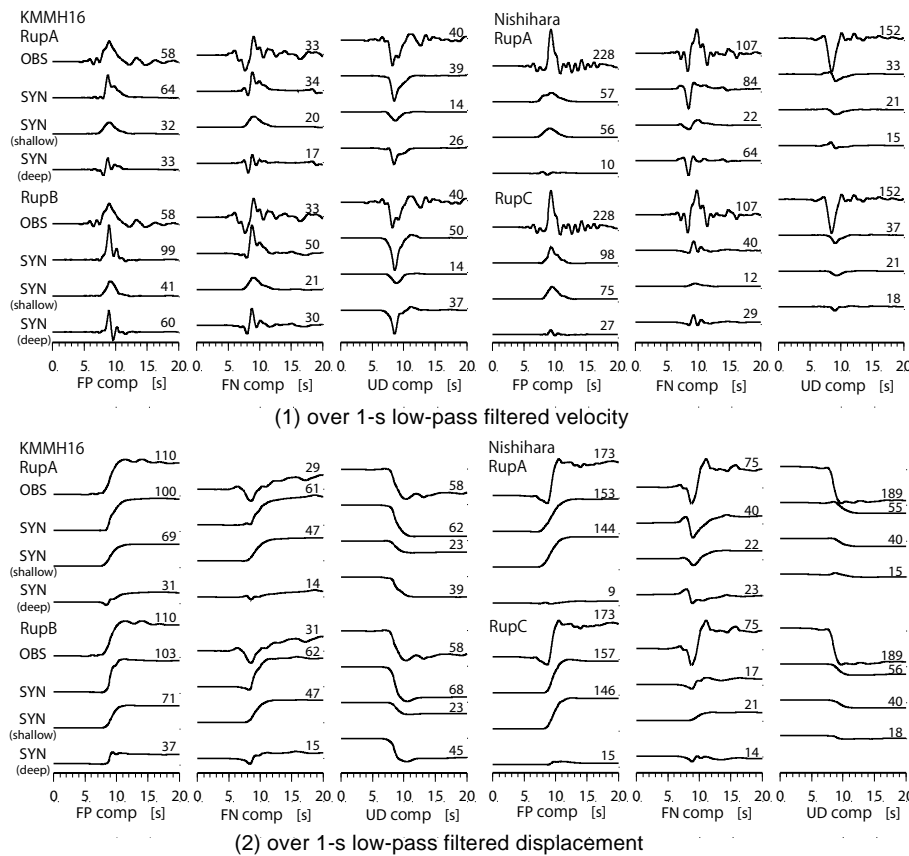


Fig.5 Observed and synthetic waveforms for Model-01 (Maximum amplitude is shown above each waveform in cm/s for velocity and cm for displacement)

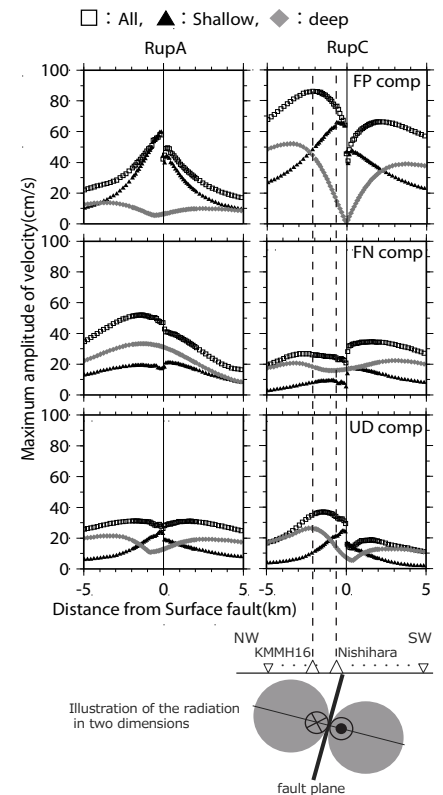


Fig.6 The distribution of maximum amplitude of velocity at points orthogonal to Futagawa fault through Nishihara Village

KiK-net 益城よりも西原村の方が大きい。一方、地震発生層内からの地震動は、KiK-net 益城よりも西原村の方が小さい。

この原因について、西原村を含む断層直交方向に仮定の観測点を連続的に設定し評価を行った。ただし、この検討では布田川断層のみを考慮し、半無限一様地盤とした。最大速度の分布を図6に示す。地震発生層以浅からの地震動は地表地震断層に近いほど大きい。一方、地震発生層内からの地震動について、断層平行成分は地表地震断層から1km以内では非常に小さい。これは図6下部の概念図に示すように、S波の放射特性の節になるためと考えられる。断層深部からの指向性効果は確認できるものの、地表地震断層から1km程度以内では振幅の絶対値が小さいことから、ここで設定した巨視的断層面では、指向性効果を考慮しても地震発生層内の地震動で西原村の観測記録を再現することは難しいと考えられる。

一方、図6下部の概念図から、西原村に非常に近い地震発生層以浅からの地震動に関しては、S波の放射特性の節にあたらぬと考えられる。川里・他(2017)¹⁰⁾の考え方をういて、震源断層モデルを設定した納所・他(2017)³²⁾では西原村の観測記録を再現できている。納所・他(2017)³²⁾では地震発生層以浅の寄与が支配的であり、そのすべり量は4mとModel-01よりも大きい。また、すべり角は -125° と正断層成分が多く、すべり速度時間関数についても最大すべり速度の時刻は約1.2秒と、Model-01の約1.8秒(=1.3 τ_s)より短い。このように、地震発生層以浅のパラメータを見直すことで観測記録を再現できる可能性がある。

(3) 修正した震源モデルに基づく広域の地震動評価

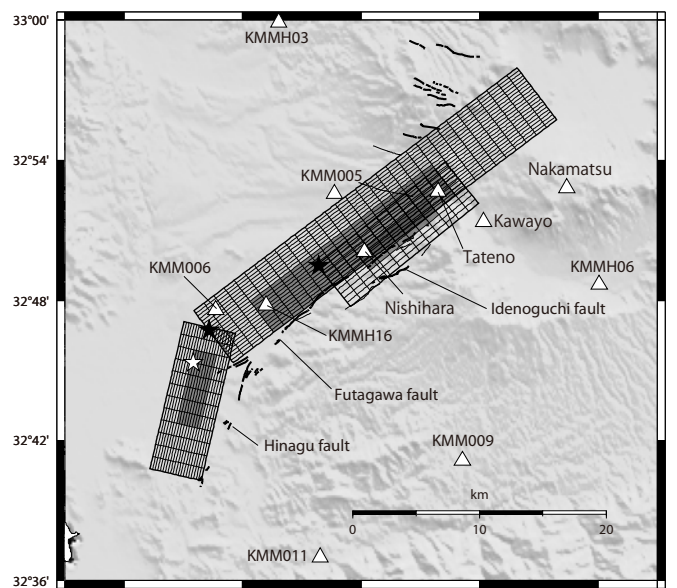
基本震源モデル(Model-01)を用いた検討結果を踏まえると、西原村の観測記録を再現する方法は2つあると考える。ひとつは、寄与が大きい地震発生層以浅を対象に、地震動が大きくなるようにパラメータを修正する方法である。もうひとつは、巨視的断層面を見直し、地震発生層内の寄与を大きくする方法である。西原村の近傍においては、布田川断層以外に出ノ口断層が確認されており、出ノ口断層を考慮した震源インバージョン結果も報告されている^{30), 33)}。出ノ口断層の地表地震断層と西原村の距離は2~3km程度離れていることから放射特性の節にはあたらぬと考えられる。

以上の点を踏まえ、基本震源モデルを修正した2種類の震源モデルを設定する。地震発生層以浅のパラメータを修正したモデルをModel-02とし、出ノ口断層を考慮したモデルをModel-03とよぶ。

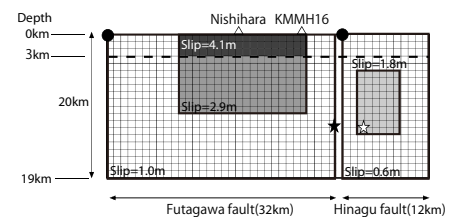
Model-02は、布田川断層地震発生層以浅のアスペリティを対象にパラメータを修正した。すべり量は、2章(2)における検討から得られたばらつき(表2参照)を参考に、Model-01の1.4倍となる4.1mとし、すべり角は正断層成分を考慮した -135° 、すべり速度時間関数は τ_s 、 τ_R ともにModel-01の半分とした。これらのパラメータは、納所・他(2017)³²⁾と概ね同等と考えられる。

Model-03の出ノ口断層の巨視的断層面は、Himematsu and Furuya(2006)³³⁾を参考に設定した。断層面積が大きくなるため、結果的にすべり量とアスペリティ面積はModel-01よりもやや大きくなる。なお、出ノ口断層の破壊伝播速度は試行錯誤的に3.0km/sと強震動レシビよりも大きい値を設定した。引間(2016)¹⁹⁾によれば、設定した出ノ口断層付近で局所的に3.2km/s程度の破壊伝播速度であった可能性を指摘しており、本研究でもこれに近い値が得られている。設定した修正モデルの諸元を表3に、断層面を図7に示す。

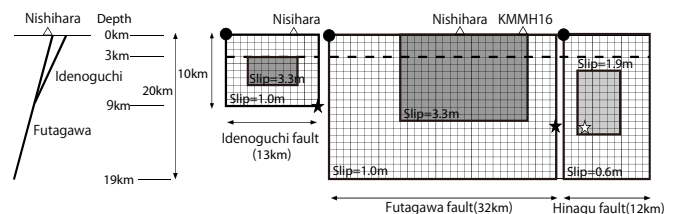
広域の観測点を対象とした観測記録と波数積分法^{11), 12)}に基づく地震動評価結果の比較を図8に示す。KiK-net 益城(KMMH16)と西原村に加え、地表地震断層近傍に位置する立野、さらに観測記録から永久変位が算定可能なKMM005, KMM006, 及び南阿蘇村河陽については周期1秒以上を対象とし、その他の観測点については周期1秒~20秒を対象として評価を行った。ただし、南阿蘇村河陽については、震度計の設置環境が不適切とされている³⁴⁾。また、KiK-net 観測点については地中記録を用いている。西原村では、やや過小評価ではあるが、Model-02, Model-03のいずれも観測記録の再現性が向上している。一方、KiK-net 益城に関しては、Model-02は過大評価となる。その他の観測点に関して、地表地震断層からやや離れた南阿蘇村中松やKMMH03の一部の成分でやや過大評価となるが、全体的には良く再現できている。このように、基本震源モデルを修正した震源モデルにより、地表地震断層近傍の永久変位を含む広域の観測記録を概ね再現できることを確認した。



(1) Location of characterized source model (Model-03)



(2) Slip distributions for Model-02



(3) Slip distributions for Model-03

Fig.7 Characterized source model (Model-02 and Model-03) with elevation²⁶⁾, active faults²⁷⁾ (bold lines: active fault traces, thin lines: estimated active faults), triangles: strong motion stations

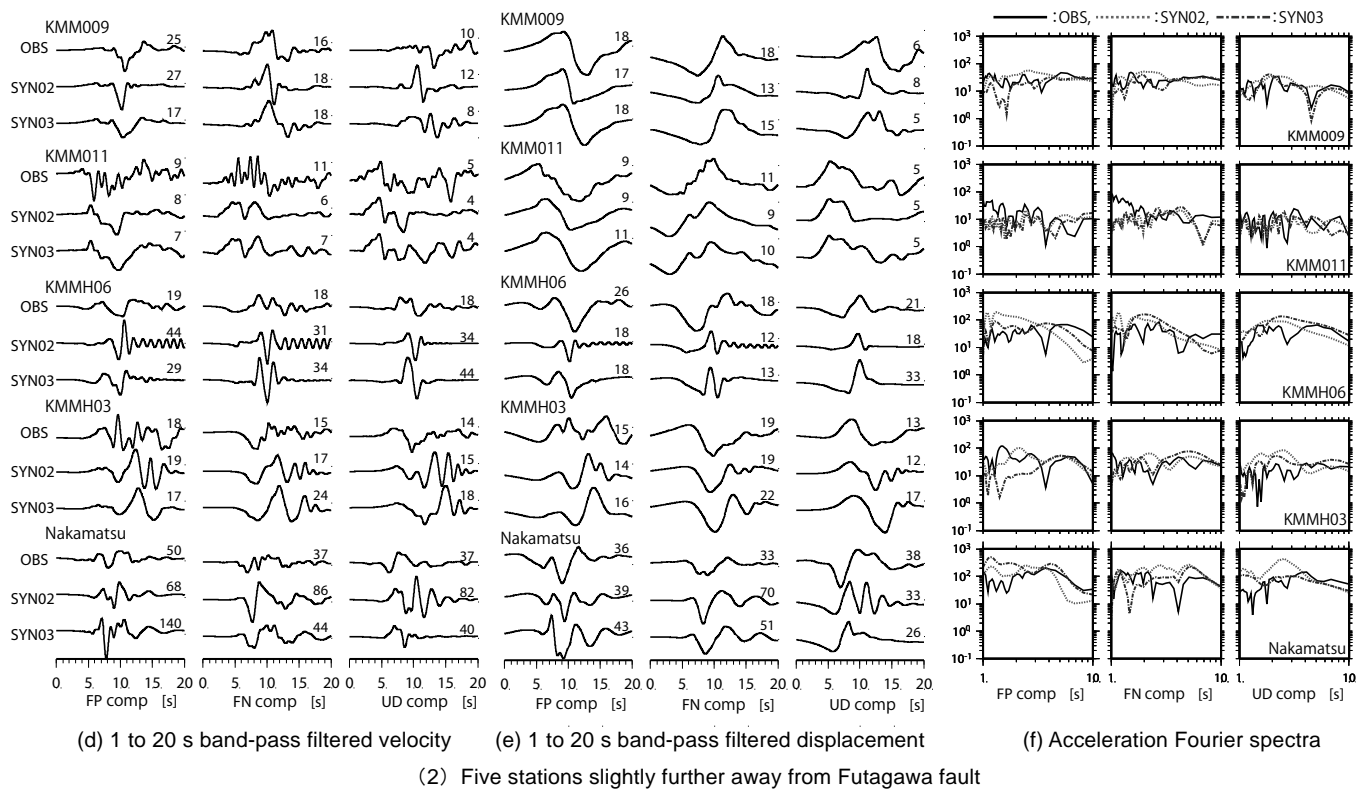
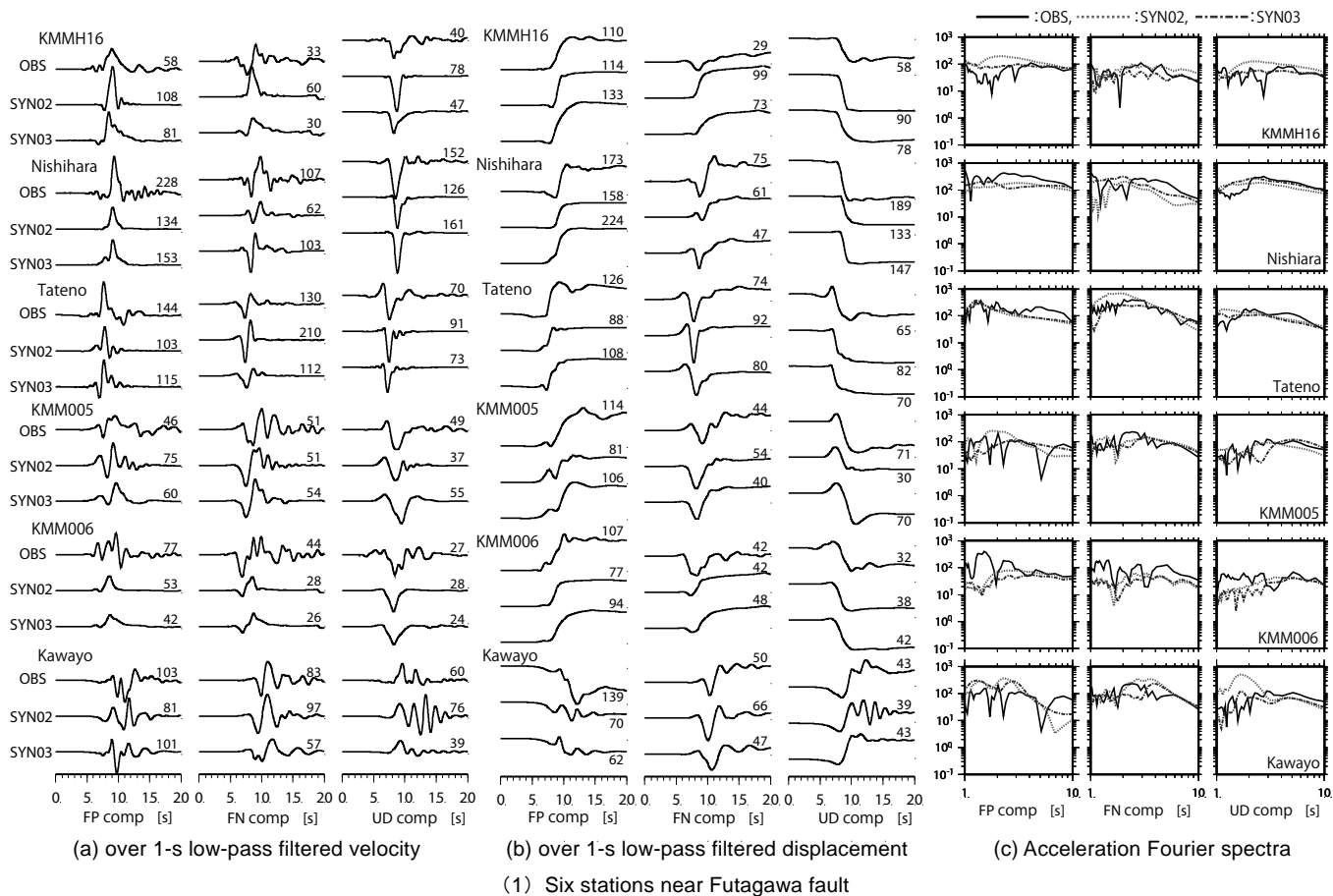


Fig.8 Observed and Synthetic waveforms and acceleration Fourier spectra for Model-02(SYN02) and Model-03(SYN03) (Maximum amplitude is shown above each waveform in cm/s for velocity and cm for displacement)

一方、KMM009やKMM011におけるUD成分の後続波形(15秒付近)に関しては、Model-02ではほとんど振幅がないのに対して、Model-03は出ノ口断層の寄与により、観測の傾向が定性的に再現できており、モデルの違いがあらわれている。そこで、最後に2つの震源断層モデルのいずれか妥当か考察を行う。まず、Model-02で設定した地震発生層以浅における4.1mというすべり量は、活断層調査結果³⁹⁾から確認できる水平方向の最大値2.2mよりも有意に大きい。次に、すべり速度時間関数に関して、 τ_s の0.7秒は2章(1)で示した過去の地震からモデル化される値よりも明らかに短い。さらに、波数積分法^{11), 12)}により求めた最終的な変位の面的分布を図9に示す。この評価では定性的な傾向を比較することを目的として半無限一様地盤を仮定する。ここでは、布田川断層と出ノ口断層の地表断層に挟まれた領域(図9中のArea-F)に着目する。合成開口レーダーによる2016年熊本地震前後の地表変動³³⁾によればUD成分は沈降となるが、Model-02は隆起している。一方、Model-03では沈降する傾向が再現できる。また、NS成分に関しても、Model-02ではこの領域が最大の変位になるのに対して、Model-03では周辺よりやや小さくなっており、観測の傾向を定性的に再現できている。

以上の比較から、Model-03がより現実に近いモデルと考えられる。Model-03は、出ノ口断層の破壊伝播速度を修正しているものの、強震動レシビ³⁾を基本に、本研究の成果を用いて地震発生層以浅に拡張したモデルであり、出ノ口断層を考慮した正確な巨視的断層面が設定できれば、地表地震断層近傍の永久変位を含む広域の観測記録をある程度予測することが可能であることを示している。また、出ノ口断層を考慮していないModel-01が西原村において過小評価となることは、地表地震断層近傍における地震動評価では、巨視的断層面の設定が非常に重要であり、評価地点に最も近い断層を考慮したとしても放射特性の影響により振幅がほとんど出ない場合もあり得ることを示している。

一方、地震の発生前に巨視的断層面を正確に設定することは一般的には難しい。本研究で設定したModel-02は地震発生層以浅からの地震動が大きくなるため、KiK-net益城のように一部の地点、周期で過大評価となる場合もあるが、全体的には観測記録を再現できる。地震発生層以浅におけるすべり速度関数のモデル化に用いたデータが十分とは言えない現状を踏まえると、地震発生層以浅のパラメータを修正したモデルによる評価を行うことも有効と考えられる。

4. まとめ

既往の震源インバージョン結果から、地震発生層以浅における震源断層モデルの設定に必要なパラメータを求め、強震動レシビ³⁾に基づく震源断層モデルを地震発生層以浅に拡張する方法を提案した。また、2016年熊本地震を対象に、提案した方法を用いて震源断層モデルを設定し、理論的手法^{11), 12)}により断層変位を含む長周期成分を再現することでその妥当性を示した。

- (1) 震源インバージョン解析に基づく震源断層モデルの地震発生層以浅の小断層を対象に、すべり速度時間関数を規格化Yoffe関数でモデル化し、すべり量と τ_s 及び τ_r の関係を求めた。また、地震発生層以浅と地震発生層内でそれぞれアスペリティを抽出した。地震発生層以浅と地震発生層内のアスペリティの長さとするべり量の比率は平均的にはほぼ1となる。
- (2) 2016年熊本地震を対象に、(1)の関係をを用いて、強震動レシビ³⁾を地震発生層以浅に拡張した基本震源モデルを設定し、KiK-net益城と西原村を対象に波数積分法^{11), 12)}を用いて周期1秒以上の長周期成分を評価した。KiK-net益城の観測記録は良く再現できるものの、西原村では過小評価となる。西原村が過小評価となる原因として、地表地震断層から1km程度以内と非常に近いことから、地震発生層内からの地震動がS波の放射特性の節となるために、非常に小さいことが挙げられる。

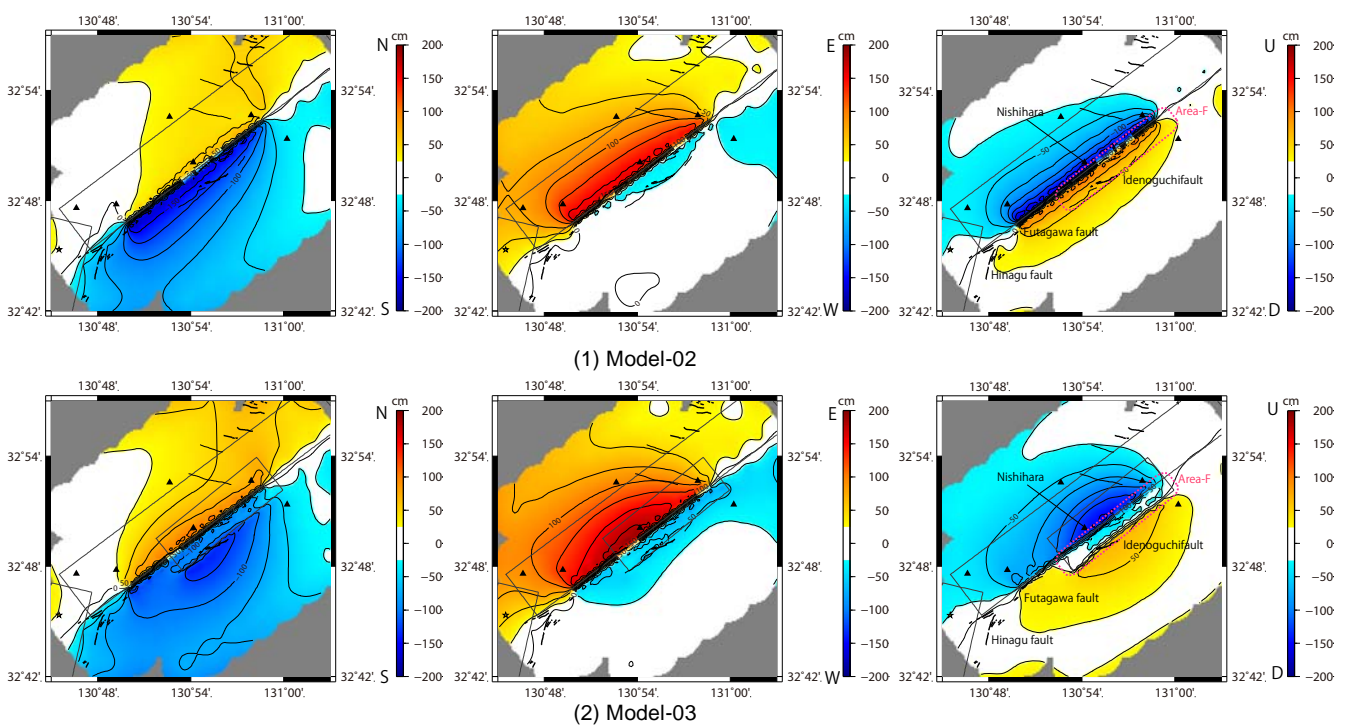


Fig.9 Synthetic permanent displacement distributions(NS component(left), EW component (center), UD component (right))

- (3) (2) の結果を踏まえ、2 種類の修正震源モデルを設定した。ひとつは地震発生層以浅のパラメータを修正したモデル、もうひとつは出ノ口断層を考慮したモデルである。いずれの修正震源モデルでも地表地震断層近傍の永久変位を含む広域の観測記録を全体的には概ね再現できる。
- (4) 既往の断層変位や合成開口レーダーによる 2016 年熊本地震前後の地表変動との比較からは、出ノ口断層を考慮した修正震源モデルがより現実に近いモデルと考えられる。このことと、出ノ口断層を考慮していない基本震源モデルによる評価が西原村において過小評価となったことは、地表地震断層近傍における地震動評価においては、巨視的断層面の設定が非常に重要であることを意味している。

以上より、正確な巨視的断層面が設定できれば、強震動レシピに基づく地震発生内の震源断層モデルを、本研究で示した方法で地震発生層以浅に拡張することで、地表地震断層近傍の永久変位を含む広域の観測記録をある程度予測可能であることを示した。

ただし、本研究で示した方法を地震動評価に用いるにあたっては、以下の点に注意が必要と考えられる。

- (1) 震源インバージョン解析や、理論的手法に基づく地震動評価を行うにあたっては、地下構造モデル(あるいはグリーン関数)の精度が非常に重要である。本研究において、震源インバージョン結果から求めたすべり速度時間関数に関するパラメータと、そのすべり速度時間関数を用いた地震動評価結果は、地下構造モデルが正しいことを前提としている。
- (2) 本研究で示した方法では、地震発生層内に関しては、強震動レシピを用いて震源断層モデルを設定する。これは、一般的な地震動評価において用いられている震源モデルとの連続性を考慮したためである。結果的に、地震発生層上端深さを境界として、異なる形状のすべり速度時間関数を用いることとなる。一方、Kagawa et al.(2004)⁹⁾では、深さ 5km を境界にアスペリティや応力降下量を分類している。すべり速度時間関数の設定に関して、特定の深さですべり速度時間関数の形状が大きく変わる点とその深さの設定、及びすべりの立ち上がり時間の設定の妥当性については、今後、本研究で示した方法を他の地震に適用する過程で検証していきたいと考えている。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP16K06586 の助成を受けたものです。防災科学技術研究所、気象庁、及び熊本県による地震記録を使用させて頂きました。立野の地震記録は、九州旅客鉄道株式会社よりご提供頂きました。Prof. P. Martin Mai(SRCMOD)による震源情報を使用させて頂きました。原子力規制庁の呉長江博士には 1999 年 Chi-Chi 地震の震源逆解析結果をご提供頂きました。図の作成にあたっては GMT を使用しました。本論文を完成させるにあたり、2 名の査読者から貴重なご意見と適切なご助言をいただきました。ここに記してお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Hisada, Y. et al.: Strong Ground Motions and Damage Investigation of Buildings near the Surface Faulting of the 2016 Kumamoto Earthquake in Japan, 16th World Conference on Earthquake

- Engineering. Santiago, Paper No. 5001, 2017. 1
- 2) Jonathan P. Stewart et al.: Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design, Pacific Earthquake Engineering Research Center Report, 2001. 9
- 3) 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」), 2016-12-09.
入手先 http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdf, (参照 2018-03-18) .
- 4) Tanaka, S. et al.: Slip Velocity Time Function for Shallower Region than the Seismogenic Layer Based on Source Fault Models, Journal of JAEE, Vol.17, No.5, pp. 1-20, 2017. 11 (in Japanese)
田中信也ほか2名: 震源インバージョン結果に基づく地震発生層以浅におけるすべり速度時間関数の評価, 日本地震工学論文集, 第 17 巻, 第 5 号, pp. 1-20, 2017. 11
- 5) Irikura, K., and S. Kurahashi: Near-field long-period strong ground motion during the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake, IAG-IASPI, S07-8, 2017. 8
- 6) Kagawa, T. et al.: Differences in ground motion and fault rupture process between the surface and buried rupture earthquakes, Earth Planets Space, 56, pp. 3-14, 2004. 6
- 7) Hikima, K. et al.: Source process of the 2014 Nagano-Ken Hokubu Earthquake(Mj6.7) ~ Analysis using the near-field Broadband Waveforms in the source region ~ , Fall meeting of 2015 Seismological Society of Japan, S15-14, 2015. 9 (in Japanese)
引間和人ほか2名: 2014 年長野県北部の地震 (Mj6.7) の震源過程~震源近傍の広帯域地震波形を考慮した解析~, 日本地震学会講演予稿集 2015 年度秋季大会, S15-14, 2015. 9
- 8) Tinti, E. et al.: A Kinematic Source-Time Function Compatible with Earthquake Dynamics, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 95, No. 4, pp. 1211-1223, 2005. 8
- 9) Matsushima, S. et al.: Scaling relations of earthquakes on active mega-fault systems, Geophysical Bulletin of Hokkaido University, No. 73, pp. 117-127, 2010. 3 (in Japanese)
松島信一ほか4名: 内陸地殻内の長大断層で発生する地震に関するスケールリング則, 北海道大学地球物理学研究報告, 73, pp. 117-127, 2010. 3
- 10) Kawasato, K. et al.: Source model for prediction of ground motions and permanent displacements close to the surface fault trace, Part1: Approach to source model, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structural and Construction Engineering II, pp. 227-228, 2017. 8 (in Japanese)
川里健ほか4名: 地表地震断層極近傍における地震動および永久変位の評価のための震源モデルの設定 その 1 震源モデルの考え方, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 227-228, 2017. 8
- 11) Architectural Institute of Japan (AIJ): Earthquake Ground Motion ~Phenomenon and Theory~, pp.84-102, 2005. (in Japanese)
日本建築学会: 地盤震動 一現象と理論一, pp. 84-102, 2005.
- 12) Hisada, Y.: Efficient Methods for Computing Green's Functions and Normal Mode Solutions for Layered Half-Spaces, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.501, pp. 49-56, 1997. 11 (in Japanese)
久田嘉章: 成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法, 日本建築学会構造系論文集, 第 501 号, pp. 49-56, 1997. 11
- 13) The Research Group for Active Faults of Japan: Active Faults in Japan sheet maps and inventories, University of Tokyo Press, 1991. (in Japanese)
活断層研究会: 新編日本の活断層一分布と資料一, 東京大学出版会, 1991
- 14) Wald, D. J., and T. H. Heaton: Spatial and Temporal Distribution of Slip for the 1992 Landers, California, Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.84, No.3, pp. 668-691, 1994. 6
- 15) Wald, D. J: Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, J. Phys. Earth, Vol. 44, No. 5, pp. 489-503, 1996. 1
- 16) Wu, C. J. et al.: Source process of the Chi-Chi earthquake: A joint inversion of strong motion data and global positioning system data with a multifault model, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 91, No. 5, pp. 1128-1143, 2001. 10

- 17)Oglesby, D. D. et al.: Inverse kinematic and forward dynamic models of the 2002 Denali fault earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America, Alaska*, Vol. 94, No. 6, pp. 214-233, 2004. 12
- 18)Hikima, K.: Rupture Process of the April 11, 2011 Fukushima Hamadori Earth quake(Mj7.0) : Two Fault Planes Inferred from Strong Motion and Relocated Aftershocks , *Zishin*, Vol. 64, No. 4, pp. 243-256, 2012. 6 (in Japanese)
引間和人: 2011年4月11日福島県浜通りの地震(MJ7.0)の震源過程, 地震2, 第64巻, pp. 243-256, 2012. 6
- 19)Hikima, K.: Source rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake and its foreshock estimated from strong-motion waveforms, *JAEE annual meeting 2016*, P 4-11, 2016. 9 (in Japanese)
引間和人: 強震波形を用いた2016年熊本地震の本震・前震の震源過程解析, 日本地震工学会第12回年次大会梗概集, P 4-17, 2016.9
- 20)Kaneda, J. et al.: Estimation of Slip Velocity Function for the Region Shallower than Seismogenic Layer, Part1: Study on slip velocity functions of the 1999 Chi-Chi Earthquake, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structural and Construction Engineering II*, pp. 293-294, 2017. 8 (in Japanese)
金田惇平ほか3名: 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 291-292, 2017. 8
- 21)Tanaka, S. et al.: Estimation of Slip Velocity Function for the Region Shallower than Seismogenic Layer, Part2: An Approximate Expression of Slip Velocity Function Based on the Regularized Yoffe Function, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structural and Construction Engineering II*, pp. 295-296, 2017. 8 (in Japanese)
田中信也ほか3名: 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 293-294, 2017. 8
- 22)Tanaka, S. et al.: Characterized fault model for prediction of long-period ground motions containing permanent displacement in the near-fault are, *JAEE annual meeting 2017*, P1-1, 2017. 11(in Japanese)
田中信也ほか3名: 地表地震断層近傍における断層変位を含む長周期成分の地震動評価のための震源モデルの設定, 日本地震工学会第13回年次大会梗概集, P 1-1, 2017. 11
- 23)Somerville, P. G. et al.: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seismological Research Letters*, 70, pp. 59-80, 1999. 1
- 24)Kato, A. et al.: Foreshock migration preceding the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake, Japan, *Geophysical Research Letters*, Volume 43, Issue 17, pages 8945-8953, 2016. 9
- 25)Nakamura, H. and T. Miyatake: An Approximate Expression of slip Velocity Time Function for Simulation of Near-field Strong Ground Motion, *Zishin*, Vol. 53, No. 1, pp. 1-9, 2000. 3 (in Japanese)
中村洋光, 宮武 隆: 断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, 地震 第2輯, 第53巻, 第1号, pp. 1-9, 2000. 3
- 26)Geographical Survey Institute: Digital map 50m grid (elevation), Japan-III, CD-ROM version, 1997. (in Japanese)
国土地理院: 数値地図 50m メッシュ(標高), 日本-III, CD-ROM 版, 1997.
- 27)Nakata, T. and T. Imaizumi: Digital active fault map of Japan, University of Tokyo press, 2002. (in Japanese)
中田高, 今泉俊文: 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 2002.
- 28)Fujiwara, H. et al.: Some Improvements of Seismic Hazard Assessment based on the 2011 Tohoku Earthquake, *Technical Note of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention*, No. 379, 2012. 12 (in Japanese)
藤原広行ほか15名: 東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第379号, 2012. 12
- 29)Miyatake, T.: A consideration on the strong fault parallel pulse at Mashiki, Fall meeting of 2016 Seismological Society of Japan, S21-P05, 2016. 10 (in Japanese)
宮武 隆: 2016年熊本地震での益城町の強い断層平行地動について, 日本地震学会講演予稿集2016年度秋季大会, S21-P05, 2016. 10
- 30)Kobayashi, H. et al.: Rupture processes of the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Causes for extreme ground motions, *Geophys. Res. Lett.*, 44, pp. 6002-6010, 2017. 6
- 31)Kubo, H. et al.: Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong-motion waveforms, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68:161, doi:10.1186/s40623-016-0536-8, 2016. 10
- 32)Nohsho, M. et al.: Source model for prediction of ground motions and permanent displacements close to the surface fault trace, Part 2: Simulation of long period components of the main-shock of 2016 Kumamoto earthquakes by wave number integration method, *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structural and Construction Engineering II*, pp. 229-230, 2017. 8 (in Japanese)
納所昌広ほか6名: 地表地震断層極近傍における地震動および永久変位の評価のための震源モデルの設定 その2 波数積分法による2016年熊本地震本震の長周期成分の再現解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp. 229-230, 2017. 8
- 33)Himematsu, Y. and M. Furuya: Fault source model for the 2016 Kumamoto earthquake sequence based on ALOS-2/PALSAR-2 pixel-offset data: evidence for dynamic slip partitioning, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68:196, doi:10.1186/s40623-016-0545-7, 2016. 10
- 34)気象庁: 震度観測点の設置状況の点検結果, 2016-04-28. 入手先 http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/oshirase/2016/20160428setchi_jokyo.pdf, (参照 2018-03-18) .
- 35)Shirahama, Y. et al.: Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth Planets Space*, Vol. 68:191, doi:10.1186/s40623-016-0559-1, 2016. 11

CHARACTERIZED FAULT MODEL FOR PREDICTION OF LONG-PERIOD GROUND MOTIONS CONTAINING PERMANENT DISPLACEMENT IN THE NEAR-FAULT REGION

Shinya TANAKA^{*1}, *Junpei KANEDA*^{*1}, *Kazuhito HIKIMA*^{*2}, *Yoshiaki HISADA*^{*3}

^{*1} Member, Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., M. Engineering

^{*2} Member, Specialist, Tokyo Electric Power Company, Dr. Science

^{*3} Member, Professor, School of Architecture, Kogakuin University, Dr. Engineering

We propose a new procedure for evaluating the parameters of characterized fault model for predicting long-period ground motions containing permanent displacement in the near-fault region. First, we collected source fault models based on the waveform inversion of strong motion data. The slip velocity function in the region shallower than seismogenic layer is approximated as the regularized Yoffe-type slip velocity functions by Tinti et al. (2005). We evaluate the relation of the slip and the parameters of the regularized Yoffe function. Similarly, we compare the asperities in seismogenic layer with the asperities in the region shallower than seismogenic layer. The slip and the length of the asperities in seismogenic layer are as much as that in the region shallower than seismogenic layer.

Next, we construct a characterized source model (Model-01) for the 2016 Kumamoto earthquake based on strong ground motion prediction method by the Headquarters for Earthquake Research Promotion (hereinafter called "Recipe"). Besides, we expand the Recipe based on the above mentioned results for shallower region than the seismogenic layer. We recommend the regularized Yoffe-type slip velocity functions for shallower region than the seismogenic layer. We simulate observation records at KMMH16 (KiK-net Mashiki) and Nishihara village using this source fault models by the theoretical method in the period over 1s. Model-01 underestimate the observation waveforms of velocity and displacement at Nishihara village. The radiation amplitude patterns of S-waves from the seismogenic layer are small in the near-fault region (<1km), that is one of the reasons for the underestimate.

Finally, we construct two source models, Model-02 with large slip and short slip duration for shallower region than the seismogenic layer and Model-03 with the additional fault plane. The additional fault plane in Model-03 is Idenoguchi fault with large rupture velocity. By and large, synthetic waveforms produced with these two models waveforms are in much closer agreement with observed waveforms. On the other hand, the slip on the asperity for shallower region than the seismogenic layer (=4.1m) of Model-02 is larger than the maximum slip of surface ruptures based on the survey by Shirahama et al. (2016) (=2.2m). In addition, the displacement in the region between Futagawa fault and Idenoguchi fault calculated by Model-02 is uplift. In contrast, the displacement based on ALOS-2/PALSAR-2 by Himematsu and Furuya (2016) is sedimentation in the region. These are a significant difference. Considering these results, we conclude that the Model-03 can describe the actual phenomenon best. This result suggests that geometric shape of the source fault model is important for predicting long-period ground motions containing permanent displacement in the near-fault region.