日本地震工学会論文集　第19巻，第5号(特集号)，2019

2016 年熊本地震における KiK-net 益城と益城町下陳の地震動と建物被害の違いの原因について

田中信也[1)]，金田惇平[2)]，中村航[3)]，久田嘉章[4)]

1) 正会員　東電設計株式会社，修士（工学）
e-mail : s.tanaka＠tepsco.co.jp
2) 非会員　東電設計株式会社，修士（工学）
e-mail : junpei-kaneda＠tepsco.co.jp
3) 非会員　工学院大学大学院 修士課程
e-mail : dm17050＠ns.kogakuin.ac.jp
4) 正会員 工学院大学 建築学部 まちづくり学科，教授　工博
e-mail : hisada＠cc.kogakuin.ac.jp

要　約

2016年熊本地震では，地表地震断層から2km程度に位置する益城町中心部において多くの建物被害が確認された．一方，益城町中心部から東に約3km離れた益城町下陳では，地表地震断層直上に位置するものの倒壊した住宅はなく，建物被害の性状は地点によって異なる．本報では，理論的手法に基づく地震動評価を行い，地表地震断層と評価地点の位置関係の違いが益城町中心部と下陳の地震動特性に与える影響を明らかにした．また，益城町中心部と下陳において推定した地震動と建物被害の関係が定性的に対応することを示した．

キーワード：　震源近傍，すべり速度時間関数，震源インバージョン，強震動予測

1. はじめに

2016年熊本地震では地表地震断層近傍において多くの建物被害が確認された．地表地震断層から2km程度に位置する益城町宮園など益城町中心部では倒壊率が非常に大きいことが指摘されている[例えば1)]．倒壊率が大きい南北幅が数100m以内，東西に数kmの地域を「震災の帯」とよび，その中心に地表地震断層が存在することから，地表地震断層の活動が建物被害に影響している可能性が高いとする知見もある[2)]．しかし，筆者らの調査によれば，地表地震断層直上において揺れによる顕著な建物被害が確認できない場合も多い[3)]．例えば，益城町中心部から東に3km離れた益城町下陳（以下，下陳）は，地表地震断層直上に位置するものの，倒壊率は0とされており[3)]，益城町中心部の建物被害の性状とは異なる．建物被害の性状が益城町中心部と異なる原因について，田中ら[4)]による余震観測では，下陳の地震動は，益城町中心部に近いKiK-net益城の地震動よりも小さく，地盤増幅特性の違いが建物被害に影響していると指摘した．また，元木ら[5)]も，益城町中心部と下陳の木造家屋の全壊率の違いを，G.L.-200m以浅の地盤の増幅率で定性的に説明できるとしている．一方，田中ら[6)]は，KiK-net益城と西原村の観測記録を再現可能な特性化震源モデルを構築しており，分析の過程で地表地震断層から2km程度以内の地震動については，観測点の地表地震断層からの距離によって，地震動の特性が大きく異なることを指摘している．

このように，地表地震断層近傍における被害の性状は地点により異なり，その要因について明らかにされたとは言い難い．したがって，地震あるいは地点ごとに地表地震断層近傍における建物被害とその成因について分析を行い，知見を蓄積していくことは重要と考える．本研究では，KiK-net益城と下陳の余震観測記録を用いて地表における地震動を評価可能な地盤モデルを設定し，田中ら[6]を基本とした特性化震源モデルを用いて，理論的手法に基づく地震動評価[7), 8)]を行い，益城町中心部と下陳の建物被害の違いの原因について分析を行う．なお，本論文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する[9].

2. 対象地点と建物被害の概要

本研究では，地表地震断層近傍の地点として，益城町中心部と下陳を対象とする．益城町中心部に関しては，本震以外にも多くの観測記録が得られているKiK-net益城を対象とする．図1に対象とした2地点の位置関係を示す．KiK-net益城は，主断層である布田川断層から2km程度離れた位置にあるが，分岐断層である木山断層の近傍に位置する．下陳はKiK-net益城から東に3km程度離れており，布田川断層の直上に位置している．

益城町中心部については，既往の文献に示される建物被害の概要を以下に示す．境ら[10]によれば益城町宮園における木造建物の全壊率は44.4%と非常に高いが，KiK-net益城周辺における木造住宅の全壊率は6.3%であった．KiK-net益城周辺を含む益城町市街地において，倒壊した建物は約84%が東西方向に倒壊しており，これは断層の走向に近い方向である．なお，観測記録から算定される計測震度は益城町宮園で7（6.77），KiK-net益城で6強（6.49）である．

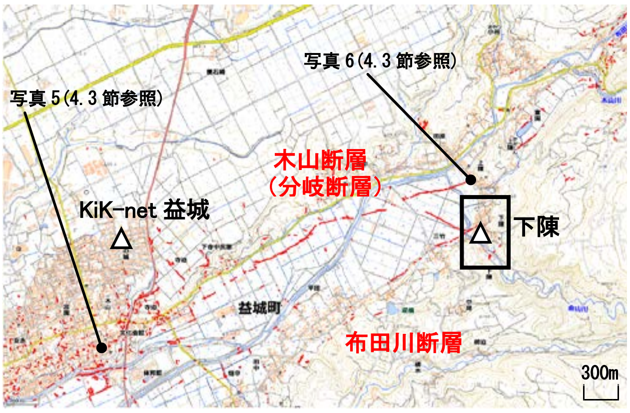


図 1　KiK-net 益城と下陳（地理院地図に加筆）

写真 1　傾斜判定[13)]の住宅

写真 2　倒壊した土蔵

写真 3　山門の移動

写真 4　倒壊を免れた納屋

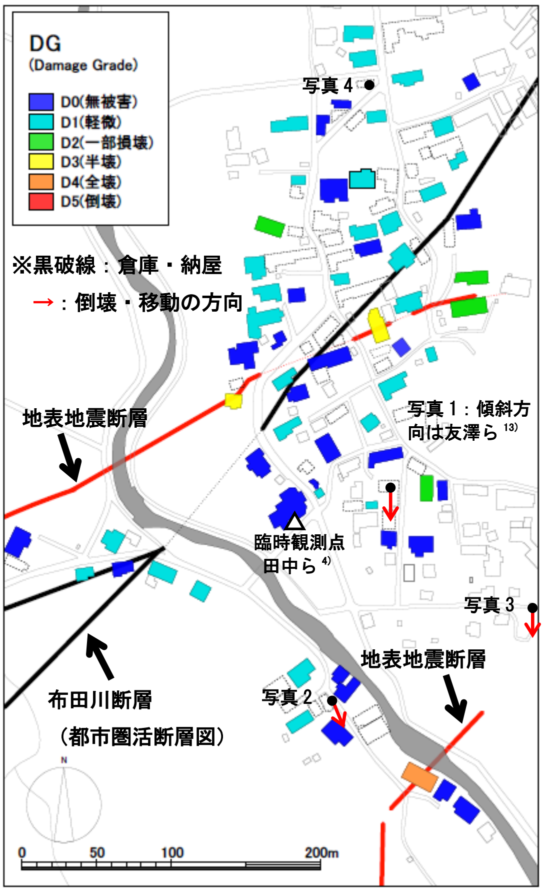


図 2　下陳における建物被害分布

益城町下陳に関しては，筆者等が，2016年4月23日～4月24日[4]，及び2016年5月7日～8日[11]，2017年7月23日，及び2017年10月27日により建物被害調査を実施した．主な調査項目は概観目視にて建築年，建物用途，構造種別，階数，基礎・屋根形式，被害度，地表地震断層との位置関係等を記録し，住民のヒアリングや室内調査も一部実施した．築年の分類は，新しい（10年以内），古い（10年～30年），非常に古い（30年以上）としている．被害度は岡田・高井の被害チャート[12]により，D0（無被害），D1（軽微），D2（一部損壊），D3（半壊），D4（全壊），D5（一部倒壊），D6（完全倒壊）の7段階で判定した．図2に下陳の建物被害の分布を示す．倉庫や納屋を除く65棟の建物の内，全壊率は2%（D4が1棟），倒壊率は0%と極めて低い．さらに，D4と判定した建物は地表地震断層の直上に位置しており，断層変位による被害であった．これらの全壊率から，震度は5強～6弱と推定される．なお，友澤ら[13]の調査結果によれば，傾斜・倒壊の判定がされている住宅が1棟あり，その傾斜方向を図2に，地震後の状況を写真1に示す．また，住宅以外の被害として，土蔵の倒壊と山門の移動被害が確認されており，その倒壊，移動方向を図2に，被害の様子を写真2～3に示す．いずれも南～南東方向に倒壊，あるいは移動しており，これは断層に直交する方向である．一方で，この地域での本震時の地震動が小さいと推測される例として，耐力が低いにもかかわらず倒壊しなかった納屋を写真4に示す．

3. 地表地震断層近傍を含む広域の観測記録の再現

3.1 検討方針

本研究では，益城町下陳における2016年熊本地震本震時の地震動を推定し，KiK-net益城との違いについて検討を行うとともに，建物被害との関係について考察を行う．平行成層地盤を対象とした理論地震動の計算法として波数積分法[7,8]を用いる．なお，ここで用いる計算法[7,8]の妥当性に関しては，地震発生層以浅を含む震源モデルを用いた観測記録の再現計算により検証されている[例えば14]．2016年熊本地震本震時の地震動を再現，あるいは下陳のように観測記録がない地点の地震動を予測する場合，適切な地下構造モデルと震源断層モデルの設定が重要と考える．そこで，KiK-net益城については，2016年熊本地震本震記録を用いて浅部の地盤同定を行う．また，下陳については，田中ら[4]による臨時余震観測で得られた記録を用いて地下構造モデルの妥当性を確認する．一方，震源モデルに関しては，田中ら[6]を基本として，KiK-net益城の地中記録や西原村など，地表地震断層極近傍を含む広域の本震記録が再現可能な震源断層モデルを構築する．

3.2 地下構造モデル

KiK-net益城の建物被害の原因については，浅部の地盤増幅特性の影響が指摘されていることから，2016年熊本地震本震記録の地表／地中スペクトル比から，遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて地中観測点以浅の速度構造およびQ値を同定した．層厚はPS検層結果で固定する．また，S波速度の異方性が指摘されている[15]ことから，成分別に地盤同定を行った．表1，及び図3に得られた地下構造モデルを示す．周期1秒における減衰は水平方向で10～20%となった．ターゲットスペクトル比及びGAにより同定した地下構造モデルから求めた理論スペクトル比を図4に，地中記録から推定した地表の擬似速度応答スペクトルを図5に示す．同定したモデルで観測記録の傾向を概ね再現できることが確認できる．なお，図4に示す観測記録のNS成分とEW成分の伝達関数には違いが見られることから，地下構造の不整形性の影響が示唆される．したがって，KiK-net益城において，1次元地下構造モデルで地震動評価を行うことには課題がある．本研究の主たる目的は，KiK-net益城と下陳での2016年熊本地震本震時の相対的な地震動の違いについて議論を行うことであり，ここではNS成分とEW成分を同定されたそれぞれの地下構造モデルを用いて地震動評価を行うこととした．ただし，地下構造の不整形性の影響を十分に考慮できていない点には注意が必要である．なお，地盤同定した範囲よりも深い領域についてはJ-SHISの深部地盤モデル（藤原ら[16]）を用いる．ただし，地中地震計設置レベルG.L.-252mを含む層の地盤物性は，J-SHIS[16]の地盤モデル（S波速度2100m/s）ではなく，PS検層結果を採用した．そのため，地中地震計設置レベルG.L.-252m付近のS波速度が2700m/sとJ-SHIS[16]の地盤モデルよりも大きい値が設定され，後述するJ-SHIS[16]の地盤物性を基本とした下陳とGL-250m～GL-1000m程度のやや深い構造でも違いが出ている．この違いが地震動評価結果に与える影響については4.1節で確認を行う．また，地中地震計設置レベルの

S波速度は，本研究で用いたPS検層結果より小さい値であることを示唆する知見もある[17] ことから，初期モデルをPS検層結果から変更した場合の影響については4.2節で議論を行う．

一方，下陳では本震記録が得られていないことから，J-SHISの深部地盤モデル（藤原ら[16]）を基本として，余震記録を再現することで地下構造の妥当性を確認する．下陳における臨時余震観測[4]で記録が得られた余震の震央分布を図6に，下陳におけるJ-SHISの深部地盤モデル[16]（ここでは地盤モデルS1とよぶ）を表2に示す．地盤モデルS1を用いた波数積分法[7, 8]による計算結果と観測記録の比較の一例を図7に示す. ここで, 余震の地震モーメントとメカニズム解についてはF-net[18]の諸元を用いている. 図7から，EW成分とUD成分に関しては，観測記録をある程度再現できているが，NS成分に関しては再現性が悪いことがわかる．ここで，G.L.-60m程度以浅に関しては，元木ら[15]による微動アレイ観測に基づく地下構造モデルが得られており，地表から約50mはS波速度約400m/sの層が求められており，その下にS波速度

表1　PS検層と2016年熊本地震本震記録から同定したKiK-net益城の地盤モデル

層 No.	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m³)	NS 方向 Vs (m/s)	NS 方向 ho —	NS 方向 n —	EW 方向 Vs (m/s)	EW 方向 ho —	EW 方向 n —	UD 方向 Vp (m/s)	UD 方向 ho —	UD 方向 n —
1	0	3	1.22	31	0.13	0.78	47	0.20	0.40	87	0.20	0.70
2	3	12	1.37	232			223			416		
3	15	18	1.82	155	0.11	0.73	356	0.05	0.70	598	0.20	0.70
4	33	8	1.82	145			352			1427		
5	41	28	2.06	239			396			1975		
6	69	32	2.15	301			334			2204		
7	101	32	2.26	772	0.10	0.66	1190	0.02	0.50	2889	0.20	0.70
8	133	10	2.26	387			563			2856		
9	143	26	2.26	1185			1294			2940		
10	169	32	2.15	441			875			2244		
11	201	33	2.15	829			1519			2503		
12	234	18	2.58	2700			2700			5000		
13	252	∞										

注1）減衰定数hは振動数依存性を考慮し$h(f)=h_o \cdot f^{-n}$仮定．物性値を元に3層に分け探索範囲をそれぞれ$0<h_o≦1$，$0<n≦1$とする．
注2）太線は地震計が設置されている深さを示す.

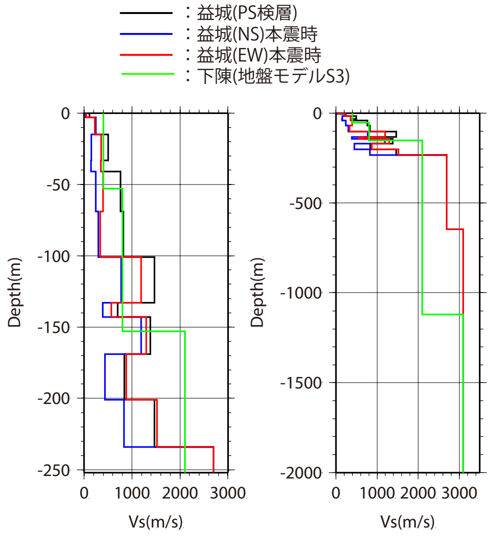


図 3　地下構造モデルの比較

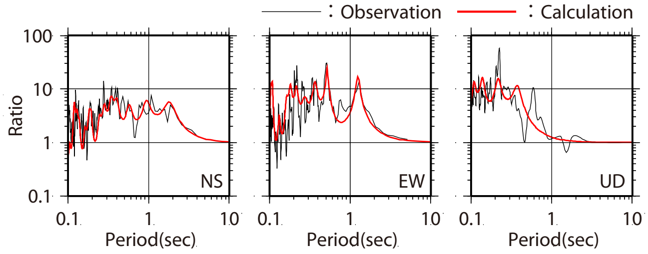


図 4　KiK-net 益城の 2016 年熊本地震本震時の伝達関数（地表／地中）

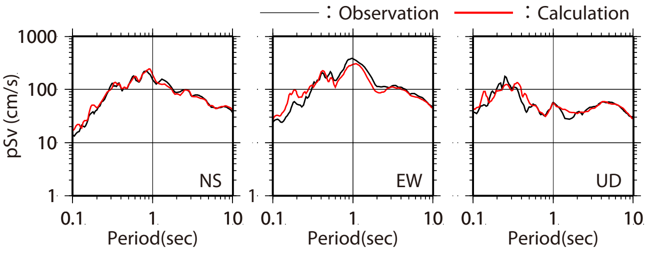


図 5　KiK-net 益城の 2016 年熊本地震本震時の擬似速度応答スペクトル（減衰 5%）

約800m/sの層が設定されている．この知見に基づき設定した地下構造モデル（ここでは地盤モデルS2とよぶ）を表3に示す．地盤モデルS2を用いた波数積分法[7), 8)]による計算結果と観測記録の比較を図8に示す．図8から，NS成分の再現性が向上していることがわかる．ただし，依然として観測記録をやや過小評価することから，表4に示すようにより深部の速度構造についても影響を確認した．見直したモデル（ここでは地盤モデルS3とよぶ）を用いた波数積分法[7), 8)]による計算結果と観測記録の比較を図9に示す．図9から，NS成分が過小評価となる傾向は大きくは変わらないものの，全体的な再現性はよいことが確認できる．なお，他の余震でも概ね同様の傾向となることを確認している．以上のように，J-SHISの深部地盤モデル[16)]を基本とした地下構造モデルを用いることで，余震記録の速度波形やフーリエスペクトルは概ね再現できるものの，EW成分の再現性に比べると，NS成分はやや再現性が悪い．この原因としては，KiK-net益城と同様に地下構造の不整形性が考えられる．また，下陳ではKiK-net益城と異なり，PS検層に基づく速度構造が得られていないことから，KiK-net益城よりも地下構造モデルの不確実性が大きいと考えられる．さらに，下陳では本震時の地盤の非線形性の影響を考慮できていない．このような下陳における地下構造モデルの不確実性が地震動評価結果と結論に与える影響については，4.2節で議論を行う．

KiK-net益城と下陳以外の他の観測点については，J-SHIS[16)]の地下構造モデルを用いて地震動評価を行う．なお，その際に，KiK-netにおけるPS検層結果に基づく浅部の地下構造モデルは使用しない．

表2　下陳における地盤モデルS1（J-SHISの深部地盤モデル（藤原ら[16)]））

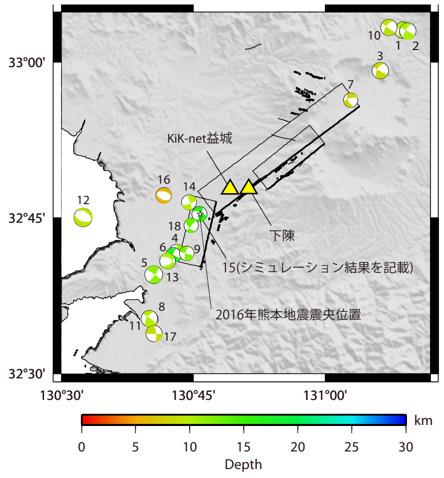
層 No.	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m^3)	Vp (m/s)	Qp —	Vs (m/s)	Qs —
1	0	166	2.15	2500.0	150	1100.0	150
2	166	525	2.40	4000.0	200	2100.0	200
3	691	1431	2.60	5500.0	300	3100.0	200
4	2122	5000	2.70	5700.0	300	3300.0	300
5	7122	∞	2.75	6000.0	300	3400.0	300

表3　下陳における地盤モデルS2（S1から元木ら[15)]を参考に浅部を見直したモデル）

層 No.	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m^3)	Vp (m/s)	Qp —	Vs (m/s)	Qs —
1	0	53	1.85	1700.0	60	400.0	60
2	53	100	2.00	2200.0	100	800.0	100
3	153	538	2.40	4000.0	200	2100.0	200
4	691	1431	2.60	5500.0	200	3100.0	200
5	2122	5000	2.70	5700.0	300	3300.0	300
6	7122	∞	2.75	6000.0	300	3400.0	300

表4　下陳における地盤モデルS3
（S2から余震記録の速度波形の再現性を考慮して深部を見直したモデル）

層 No.	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m^3)	Vp (m/s)	Qp —	Vs (m/s)	Qs —
1	0	53	1.85	1700.0	60	400.0	60
2	53	100	2.00	2200.0	100	800.0	100
3	153	969	2.40	4000.0	200	2100.0	200
4	1122	1000	2.60	5500.0	200	3100.0	200
5	2122	5000	2.70	5700.0	300	3300.0	300
6	7122	∞	2.75	6000.0	300	3400.0	300



注）余震のメカニズム解は F-net[18] による.

図 6　下陣で観測された余震の分布 [4]

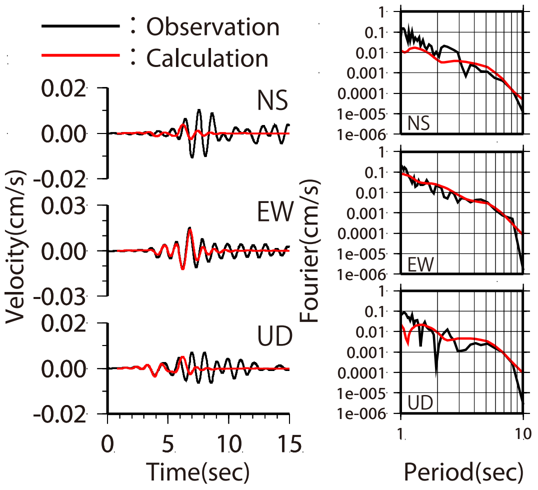


図 7　下陣における観測記録の再現例
（周期 1～10 秒を対象，地盤モデル S1）
[No. 15(2016/4/30 03:59 (M3. 9)]

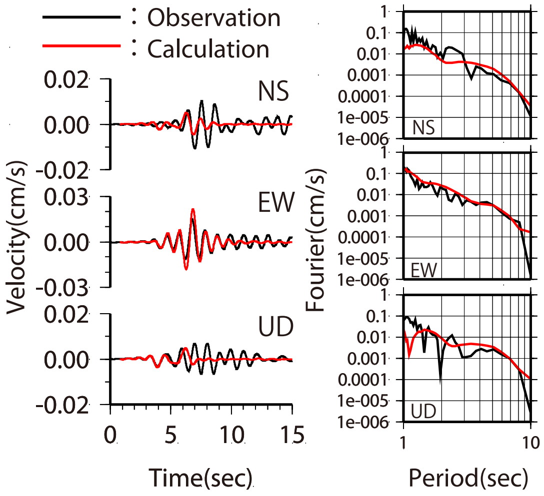


図 8　下陣における観測記録の再現例
（周期 1～10 秒を対象，地盤モデル S2）
[No. 15(2016/4/30 03:59 (M3. 9)]

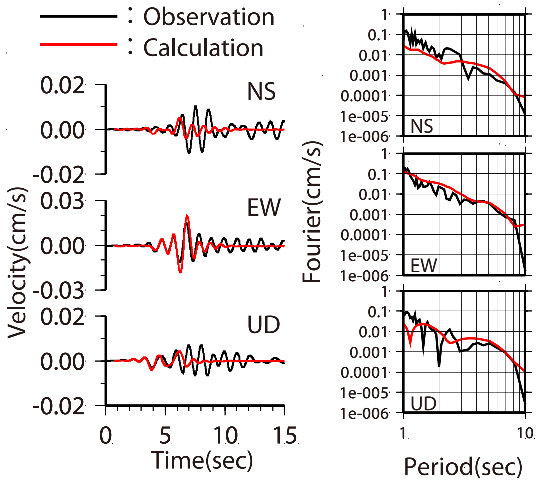


図 9　下陣における観測記録の再現例
（周期 1～10 秒を対象，地盤モデル S3）
[No. 15(2016/4/30 03:59 (M3. 9)]

3. 3 震源断層モデル

震源断層モデルは，地表地震断層近傍における永久変位を含む広域の観測記録を説明できる必要がある．既往の震源インバージョン結果を用いることも考えられるが，建物被害に影響する周期1秒まで対象としているモデルは少ない．そこで，田中ら[6]を基本として，強震動レシピ[19]を地震発生層以浅まで拡張した震源断層モデルを設定する．設定した震源断層モデルの主な諸元を表5に，断層面と対象地点との位置関係を図10に示す．また，設定方法を以下に述べる．

地震発生層内（3km～19kmを仮定）は，強震動レシピ[19]に基づき設定する．最も影響が大きい布田川断層の巨視的面は引間[20]と同様であり，アスペリティの位置は引間[20]による震源インバージョン結果において大きなすべり量が得られている位置に設定した．出ノ口断層に関しては，巨視的断層面は，Himematsu and Furuya[21]を参照する．ただし，Himematsu and Furuya[21]で示される断層位置の座標は，小数点第二位までのため，図10に示す地表地震断層の位置と整合するように断層面の位置を調整した．また，地震発生層内のすべり速度時間関数は，強震動レシピに基づき中村・宮武[22]による関数を用いる．

次に，地震発生層内に設定した震源断層モデルを地震発生層以浅（0km～3km）に拡張する．地震発生層以浅のすべり分布は，地表断層地震を想定する場合（ここでは布田川断層が相当），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用いた．地中断層地震を想定する場合，あるいは地表地震断層近傍における永久変位が小さいと仮定する場合（ここでは日奈久断層と出ノ口断層が相当），地震発生層以浅は背景領域と同じすべり量を用いる．地震発生層以浅のすべり速度時間関数は，規格化Yoffe関数[23]を用いることとし，関数の設定に必要となるパラメータτ_Sとτ_Rは，布田川断層におけるアスペリティのすべり量と田中ら[6]による回帰式に基づき，τ_Sを1.4秒，τ_Rを3.1秒とした．

以上の震源断層モデルの設定は，田中ら[6]の震源断層モデルと同様である．ただし，本検討では，建物被害と地震動の関係について議論を行うことから，KiK-net益城における周期1秒付近の再現性を重視し，より小さいアスペリティ（表5及び図10では小アスペリティと記載する）をKiK-net益城近傍の深部に追加した．すべり速度時間関数の立ち上がり時間に関して，引間[20]の結果では，破壊開始点付近の立ち上がり時間は1～2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を表5に示すように，0.7秒あるいは1.8秒遅らせるように設定した．1.8秒は，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．すべりの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，他の地震にも適用する過程で検証を行う必要があると考えている．

表 5　震源断層モデルの震源パラメータ

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">項目</th><th>布田川断層</th><th>日奈久断層</th><th>出ノ口断層</th></tr>
<tr><td rowspan="5">巨視的断層
パラメータ</td><td colspan="2">断層面
(長さ×幅)</td><td>32km×20km</td><td>12km×20km</td><td>13km×10km</td></tr>
<tr><td colspan="2">走向</td><td>233°</td><td>193°</td><td>231°</td></tr>
<tr><td colspan="2">傾斜角</td><td>75°</td><td>78°</td><td>65°</td></tr>
<tr><td colspan="2">すべり角</td><td>-160°
（小アスペリティのみ-180°）</td><td>-160°</td><td>-110°</td></tr>
<tr><td colspan="2">地震モーメント</td><td colspan="3">4.0×10^19Nm（地震発生層内）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">微視的断層
パラメータ</td><td rowspan="2">すべり
速度時間
関数</td><td>地震発生層
以浅</td><td colspan="3">規格化Yoffe関数：τ_S=1.4s，τ_R=3.1s
立ち上がり時間：0秒</td></tr>
<tr><td>地震発生層
内</td><td>中村・宮武（2000）[22]
立ち上がり時間：1.8秒
（小アスペリティのみ0.7秒）</td><td colspan="2">中村・宮武（2000）[22]
立ち上がり時間：1.8秒</td></tr>
</table>

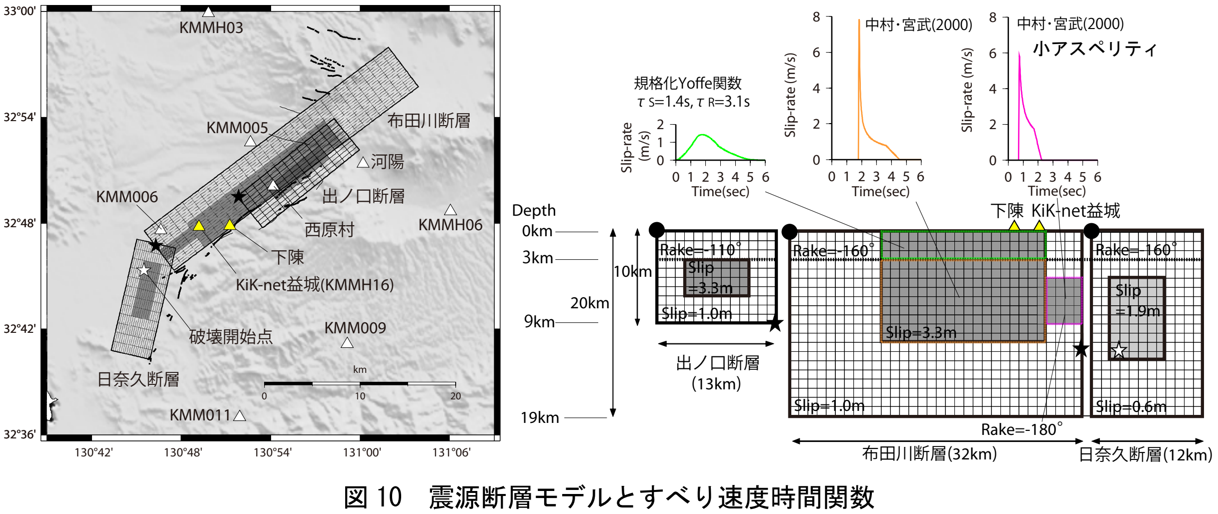
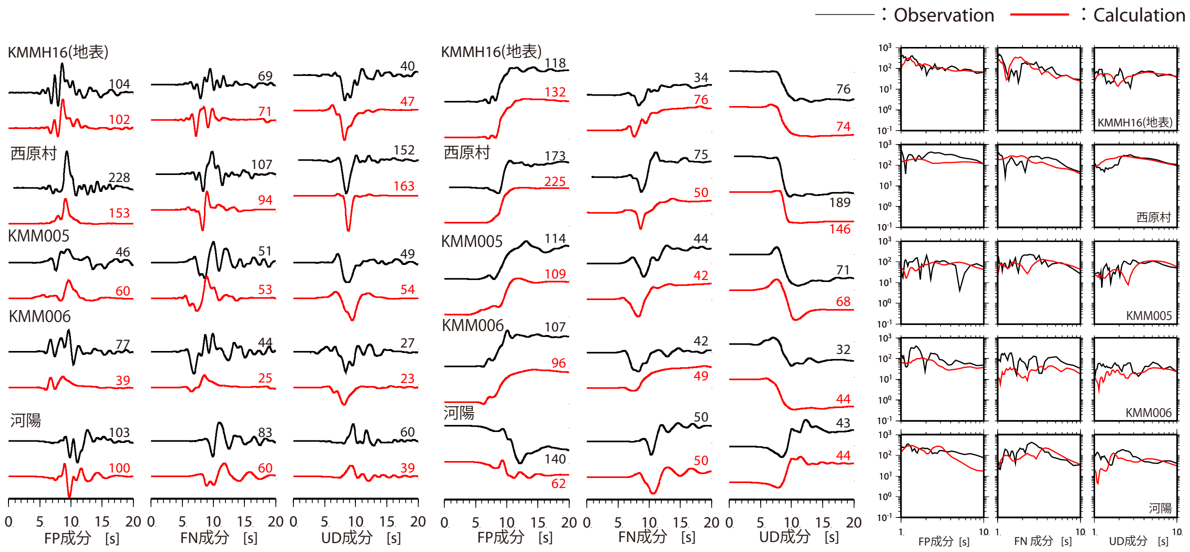


図 10　震源断層モデルとすべり速度時間関数

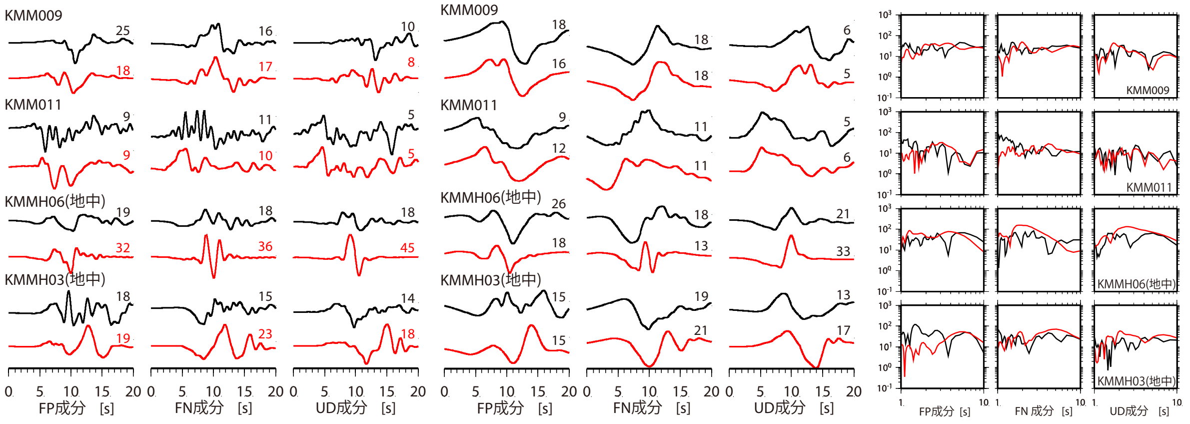
3.4 地震動評価結果

3.2節に示した水平成層地盤モデルを用いて波数積分法[7), 8)]により計算した理論グリーン関数と，3.3節に示した震源断層モデルを用いて，2016年熊本地震本震時の地震動を計算する．計算結果と観測記録の比較を図11に示す．ここでは，断層平行（FP）成分，断層直交（FN）成分，UD成分の順で示している．地表地震断層に近い観測点では周期1秒以上を対象に計算を行い，永久変位について比較を行っている．その他の観測点は周期1秒～20秒を対象とした．

KiK-net益城の地表記録は，FN成分の最大変位がやや過大評価ではあるが，速度波形における特徴的なパルスの形状や，変位波形及びフーリエスペクトルの形状が概ね再現できている．また，地表地震断層に近い観測点でも西原村のFP成分における最大速度や，河陽のFP成分における最大変位など，一部の成分で計算結果と観測記録との乖離が大きいものの，速度波形，変位波形及びフーリエスペクトルの形状は概ね再現できていると考える．一方，地表地震断層からやや離れたKMMH03とKMMH06の一部の成分では計算結果と観測記録との乖離が大きく，速度波形の形状についても地表地震断層近傍の観測点に



（1）地表地震断層近傍の観測点（周期 1 秒以上を対象としたバンドパスフィルター波を記載）



（2）地表地震断層から離れた観測点（周期 1 秒～20 秒を対象としたバンドパスフィルター波を記載）

図 11　2016 年熊本地震本震を対象とした波数積分法による再現結果
（左から，速度波形，変位波形，フーリエ振幅スペクトル．図中の数値は最大値を示す．）

比べると再現性がやや悪い．一部の観測点あるいは成分で再現性が悪い原因としては，本検討ではKiK-net益城以外の地点では地盤モデルのチューニングを行っていないことと，震源断層モデルのアスペリティの形状が単純なため，指向性効果の影響が大きいことが考えられ，これらの点は今後改良の余地があると考えている．なお，ここでの地震動評価では評価点毎に異なる地盤モデルを用いて計算を行っていることから，特に地震発生層以浅では震源断層モデルの地震モーメントに違いが生じることになるが，再現性がやや悪い観測点は地表地震断層から距離が離れていることから影響は小さいと考えられる．

以上のように，一部の観測点あるいは成分で課題があるものの，下陳周辺の地表地震断層近傍を含む観測点の記録を概ね再現できることを確認した．

4. 2016年熊本地震本震時の下陳における地震動の推定と建物被害との関係に関する考察

4.1 下陳における地震動の推定と建物被害との関係

前章の検討から，地表地震断層の記録を説明可能な震源断層モデルが構築できたと考える．そこで，本章では，下陳の本震時の地震動を波数積分法[7), 8)]により推定し，KiK-net益城の地震動と比較するとともに，建物被害との関係について考察を行う．下陳の地震動評価結果について，計測震度の比較を表6に，波形とフーリエ振幅スペクトルを図12に示す．観測記録の周期1秒以上のバンドパスフィルター波形を用いて算定したKiK-net益城の計測震度は6強（6.14）となり，計算結果である6弱（5.84）はやや小さいものの，速度波形，変位波形の特徴，及びフーリエ振幅スペクトルは概ね再現できている．一方，下陳の計測震度は5強（5.46）となり，KiK-net益城よりも小さい．

この違いについて，まず，地盤増幅特性の影響について確認を行うために，評価位置はKiK-net益城とし，地盤モデルのみを下陳として計算を行った．計算結果を表6及び図12に併せて示す．計測震度は6弱（5.67）と低減することから，地盤増幅特性の影響が確認できる．なお，この計算結果の妥当性について，田中ら[4)]による余震観測記録の平均的なフーリエ振幅スペクトル比（下陳／KiK-net益城）を用いて，KiK-net益城の観測記録を補正した結果と比較している．ここで，余震記録のフーリエ振幅スペクトル比は地盤の違いだけでなく，震源に対する観測点の位置の違いの影響を含んでいる．ただし，図6に示すように，対象とした余震は2016年熊本地震本震に比べて観測点から離れた位置で発生していることから，震源に対する観測点の位置の違いの影響は小さいと仮定して比較を行っている．さらに，フーリエ振幅スペクトル比の計算時には，実体波の幾何減衰1/X（Xは震源距離）に基づく距離補正を行うことで，観測点間で震源距離が異なる影響を考慮している．図12から，最大速度振幅については違いが大きい成分もあるものの，フーリエスペクトルと計測震度［6弱（5.53）］は，前述の計算結果と概ね対応していることが確認できる．

しかし，推定した下陳の計測震度［5強（5.46）］は，地盤モデルのみを下陳とした上記の結果よりもさらに小さい．この原因に関して，図12のフーリエスペクトルを見ると，FP成分の周期1～2秒の振幅が，評価位置を下陳とした場合に他の評価結果よりも有意に小さくなっていることがわかる．これは，田中ら[6)]で指摘されているように，下陳のような横ずれ断層の地表地震断層のほぼ直上では，放射特性の節にあたるために，地震発生層内からのFP成分の地震動がほとんど出ないことが原因と考えられる．したがって，下陳の2016年熊本地震本震時の地震動がKiK-net益城よりも小さくなる原因としては，地盤増幅特性に加えて，震源の影響，すなわち，震源断層と評価地点の位置関係の違いが考えられる．

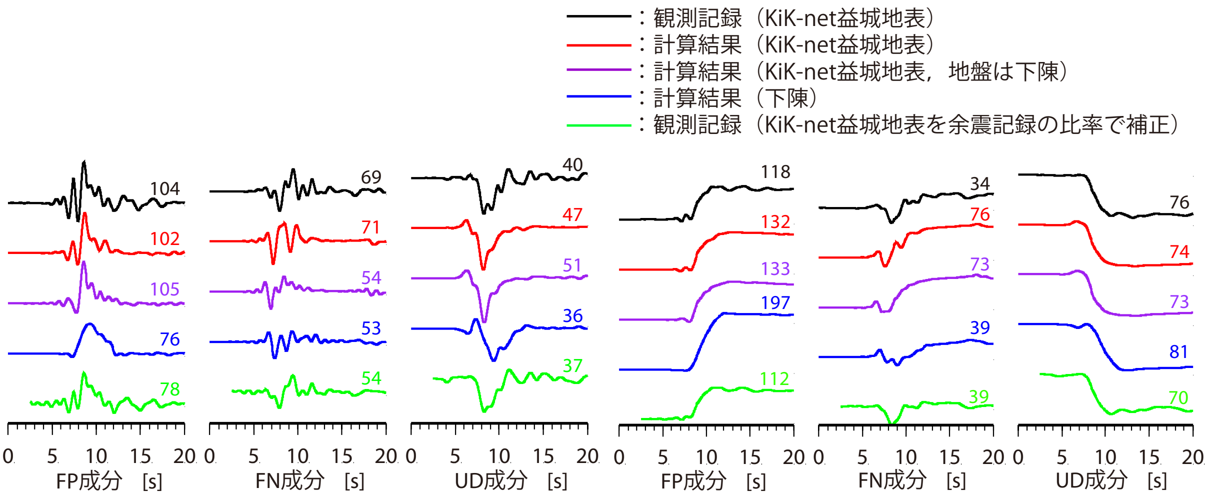
一方，FN成分に関しては，周期1.5秒付近で下陳の評価結果がKiK-net益城の評価結果や観測記録を上回っている．下陳の建物被害に関して，前述のFP成分の周期1～2秒が非常に小さいことと併せて，山門の移動や倉庫の倒壊がFN成分に近い方向となっていることは，今回得られた地震動評価結果と調和的と考えられる．ただし，倒壊や移動を生じた建物は，いずれも住宅ではない点には注意が必要と考える．

最後に，本検討では，下陳を上盤側として評価したが，仮に下陳を下盤側として評価すると計測震度は，5強（5.46）となる．当然のことながら，永久変位の方向は異なるものの，地震動レベルや永久変位の絶対値は大きく変わらないことを確認している．また，前述のG.L.-250m～G.L.-1000m程度のやや深い構造で，KiK-net益城と下陳の差異が大きい点について，G.L.-252m以深の下陳の構造をKiK-net益城と同様にした場合，計測震度は5強（5.40）となり，結果に大きな影響を与えないことを確認している．

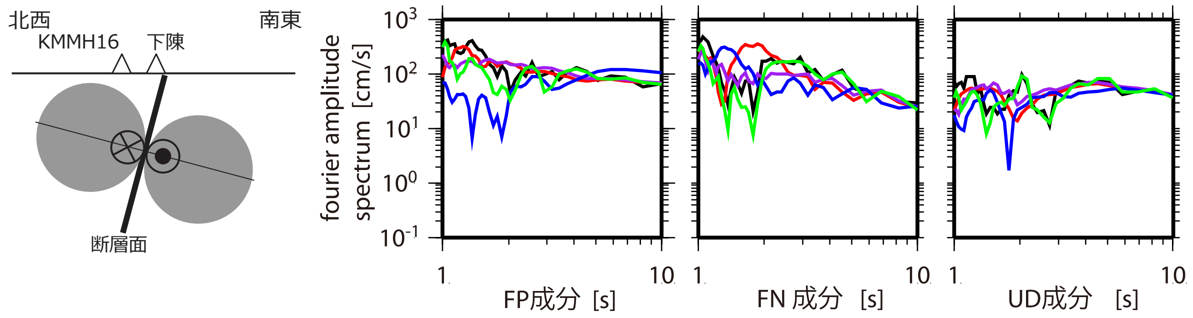
表 6　2016 年熊本地震本震時の計測震度の関係

位置	KiK-net益城					下陣（上盤）	下陣（下盤）
地盤	KiK-net益城			下陣			
手法	観測記録	観測記録（周期1秒以上）	波数積分	波数積分	余震記録の比率で補正	波数積分	波数積分
計測震度	6 強（6.49）	6 強（6.14）	6 弱（5.84）	6 弱（5.67）	6 弱（5.53）	5 強※（5.46）	5 強（5.44）

※GL-252m以深をKiK-net益城と同様の地盤モデルとした場合，震度は5強（5.40）となる．



（1）速度波形（数値は最大値［cm/s］）　（2）変位波形（数値は最大値［cm］）



（3）フーリエ振幅スペクトルと S 波の放射特性

図12　KiK-net益城と下陣の波数積分法による計算結果の比較（周期1秒以上を対象）

4.2 地下構造モデルの不確実性に関する検討

前節の計算結果に関して，KiK-net 益城及び下陳の地下構造モデルについては，3 章で述べたように不確実性がある．4.1 節でも一部の影響について示したが，ここでは地震動評価に用いる地下構造モデルの違いが地震動評価結果に与える影響について，より詳細に議論を行う．

KiK-net 益城の地下構造については，Hayashida et al.[17] により，地中地震計設置レベルの S 波速度に関して，PS 検層結果より小さい可能性が示唆されている．ここでは，Hayashida et al.[17] による速度構造を初期モデルとして，遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて地中観測点以浅の速度構造および Q 値を同定した．表 7，及び図 13 に得られた地下構造モデルを示す．ターゲットスペクトル比及び GA により同定した地下構造モデルから求めた理論スペクトル比を図 14 に，地中記録から推定した地表の擬似速度応答スペクトルを図 15 に示す．減衰に関して，浅い層よりも深い層が大きくなる傾向にあるものの，初期モデルを変更した場合でも，同定した地下構造モデルで観測記録を概ね再現できることが確認できる．同定した地下構造モデルと波数積分法[7),8)]により推定した 2016 年熊本地震本震時の地震動を図 16 に示す．4.1 節の計算結果よりも最大速度が大きくなっており，計測震度は 6 弱（5.90）とやや大きい値となるものの，フーリエ振幅スペクトルは観測記録を概ね再現できている．したがって，2016 年熊本地震本震時の地中観測点以浅の地盤増幅特性を表現できる地下構造モデルが設定されていれば，地震動の計算結果に与える影響は小さいと考えられる．

下陳に関しては，3 章において 3 種類の地下構造モデルを設定したことから，これらの地下構造モデルを用いて波数積分法[7),8)]により 2016 年熊本地震本震時の地震動を推定する．ただし，これらの地下構造モデルでは，2016 年熊本地震本震時の地盤の非線形性を考慮できない．下陳では PS 検層結果など地下構造に関する情報が少なく，本研究では周期 1 秒よりも長周期成分のみを評価の対象としているため，入力地震動に対する地盤の非線形性を厳密に評価することが難しい．ここでは，栗田[24] により評価された KiK-net 益城における 2016 年熊本地震本震時の剛性低下率を踏まえ，表 4 に示す地盤モデル S3 の 1 層（S 波速度 400m/s）の剛性低下率を 0.4 として，下陳における地盤の非線形性の影響を確認する．下陳における 2016 年熊本地震本震時の地震動の推定結果を表 8 及び図 17 に示す．地盤モデル S1，地盤モデル S2，及び地盤モデル S3 を用いた計算結果の違いに関して，地盤モデル S1 を用いた場合の計測震度がやや小さいものの，その他の違いは比較的小さい．一方，地盤の非線形性を考慮した場合には，計測震度が大きくなることがわかる．ただし，FP 成分の周期 1～2 秒のフーリエ振幅スペクトルが，KiK-net 益城の観測記録よりも小さくなる傾向は変わらないことから，FP 成分の周期 1～2 秒に関しては前節で述べた震源の影響が支配的であることが確認できる．

以上の検討結果を踏まえると，下陳の地下構造モデルについては課題が残されており，地盤増幅特性の影響をより定量的に評価を行うためには今後の調査，分析が必要と考えられる．ただし，地下構造モデルの不確実性を踏まえた上でも，FP 成分の周期 1～2 秒の地震動に関して前節で述べた震源の影響が支配的であることは，本検討結果から確認できる．

表7　Hayashida et al.[17] のモデルと2016年熊本地震本震記録から同定したKiK-net益城の地盤モデル

層 No.	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m³)	NS 方向 Vs (m/s)	NS 方向 ho —	NS 方向 n —	EW 方向 Vs (m/s)	EW 方向 ho —	EW 方向 n —	UD 方向 Vp (m/s)	UD 方向 ho —	UD 方向 n —
1	0	3	1.22	56	0.17	0.26	41	0.07	0.38	262	0.36	0.98
2	3	6	1.37	74			101			202		
3	9	6	1.37	340			373			280		
4	15	18	1.82	338			622			791		
5	33	8	2.06	223			270			1132		
6	41	28	2.15	290			619			1578		
7	69	32	2.26	324	0.07	0.95	712	0.02	0.22	1230	0.21	0.93
8	101	32	2.26	456			782			1432		
9	133	10	2.26	391			579			2929		
10	143	26	2.15	579			785			1839		
11	169	32	2.15	397			535			1446		
12	201	33	2.15	1251			1288			2215		
13	234	18	2.15	764	0.27	0.75	872	0.47	0.15	2368	0.38	0.7
14	252	∞	2.15	1425			1459			2490		

注1）減衰定数hは振動数依存性を考慮し$h(f)=h_o \cdot f^{-n}$仮定．を物性値を元に3層に分け探索範囲をそれぞれ$0<h_o\leqq 1$，$0<n\leqq 1$とする．
注2）太線は地震計が設置されている深さを示す．

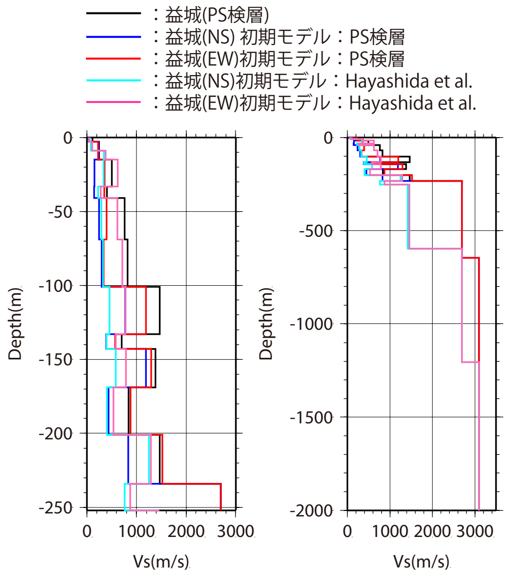


図 13　異なる初期モデルで作成した
地下構造モデルの比較

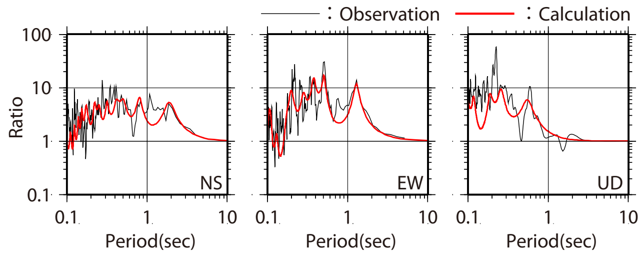


図 14　KiK-net 益城の伝達関数（地表／地中）の比較
（Hayashida et al.[17] を初期モデルとした場合）

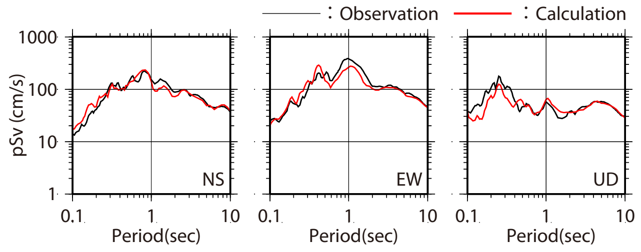
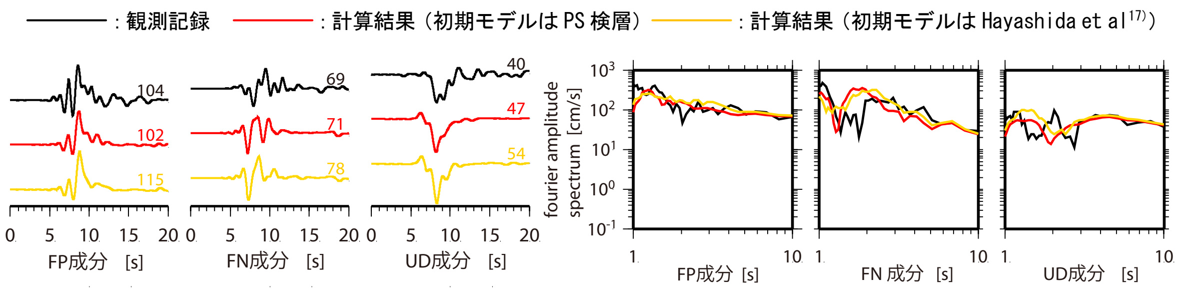


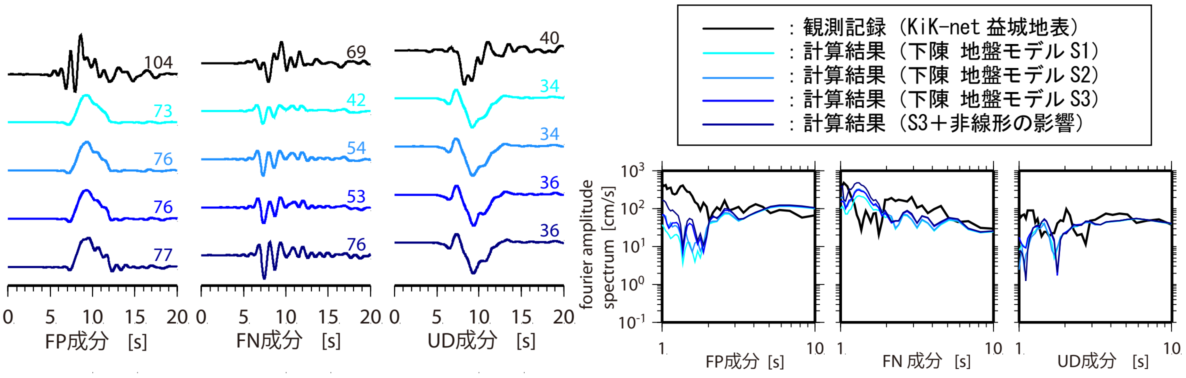
図 15　KiK-net 益城の地表記録の再現（減衰 5%）
（Hayashida et al.[17] を初期モデルとした場合）



（1）速度波形（数値は最大値［cm/s］）　　（2）フーリエ振幅スペクトル
図16　KiK-net益城の地盤モデルが2016年熊本地震本震の計算結果に与える影響

表8　下陳の地盤モデルの設定が計算結果（計測震度）に与える影響

位置	下陳（上盤）			
地盤	下陳 地盤モデル S1	下陳 地盤モデル S2	下陳 地盤モデル S3	下陳 地盤モデルS3 非線形の影響 （1層の剛性低下率0.4）
手法	波数積分			
計測 震度	5 強 （5.22）	6 弱 （5.51）	5 強 （5.46）	6 弱 （5.85）



（1）速度波形（数値は最大値［cm/s］）　　（2）フーリエ振幅スペクトル

図17　下陳の地盤モデルが計算結果に与える影響

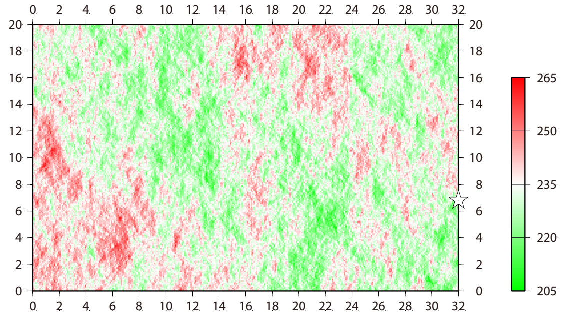
4.3 震源断層内の走向，傾斜角，すべり角の不均質性と分岐断層の影響

4.1 節及び 4.2 節では，地表地震断層直上近傍に位置する下陳で，放射特性の影響により FP 成分が小さくなることを述べた．ただし，これは震源断層の形状が整形であることを前提としたものであり，実際の震源断層内の走向，傾斜角，及びすべり角が震源断層内で一様とは考え難い．また，2 章で述べたように，対象地点の周辺には主断層である布田川断層以外に，分岐断層である木山断層も確認されており，その影響が考えられる．そこで，本節では，断層形状や分岐断層の影響について確認を行う．

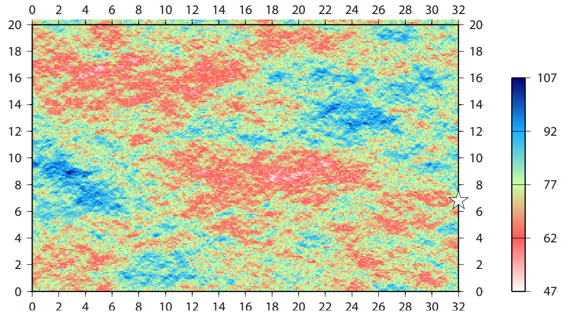
震源断層内の走向，傾斜角，すべり角の不均質性に関して，SCEC Broadband Platform[25]におけるGraves and Pitarkaの方法[26), 27), 28)]を用いて，布田川断層を対象に，小断層毎に異なる走向と傾斜角をもつ震源断層モデルを10ケース設定し，下陳を対象に地震動の計算を行った．震源断層モデルの一例を図18に示す．ここでは，対象観測点周辺の小断層の影響についてより詳細に検討を行うため，小断層の大きさ0.1km×0.1kmと前節までの検討よりも細かく分割する．各小断層を構成する4つの端点の内，北東下端の点を基準（座標と深さを前節から変更しない）として，小断層毎に異なる走向と傾斜角を与えることで影響を確認する．下陳における地震動の計算結果を図19に示す．ここではKiK-net益城の観測記録と比較している．走向と傾斜角の不均質性を考慮した場合，FP成分とUD成分の永久変位のばらつきが大きい．これは，下陳周辺の小断層の走向や傾斜角の値によっては，下陳と小断層の位置関係が上盤から下盤に変わる等の変化が見られるためと考えられる．ただし，FP成分の周期1～2秒のフーリエ振幅は，走向と傾斜角の不均質性を考慮することにより大きくなる傾向が見られるものの，KiK-net益城の観測記録に比べると小さいことがわかる．

同様に，走向と傾斜角の不均質性に加えてGraves and Pitarkaの方法[26), 27), 28)]に基づきすべり角に不均質性を考慮した場合についても地震動の計算を行った．震源断層モデルの一例を図18に，計算結果を図19に示す．永久変位のばらつきはより大きくなるものの，FP成分のフーリエスペクトルの周期1～2秒がKiK-net益城の観測記録を上回ることはないことが確認できる．

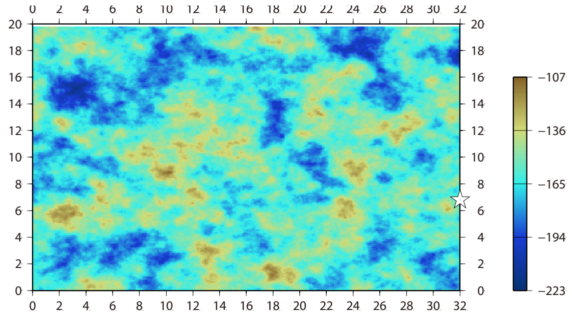
以上の結果を踏まえると，震源断層内の走向，傾斜角，すべり角の不均質性を考慮した場合でも，下陳の建物被害に影響する周期1～2秒程度の地震動が前節の評価結果，あるいはKiK-net益城における本震記録よりも有意に大きくなることはないと考えられる．



（1）走向のばらつき

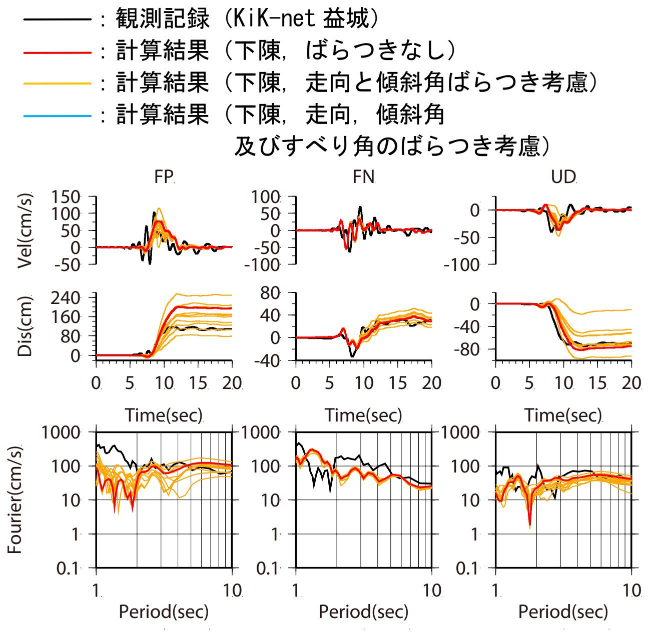


（2）傾斜角のばらつき

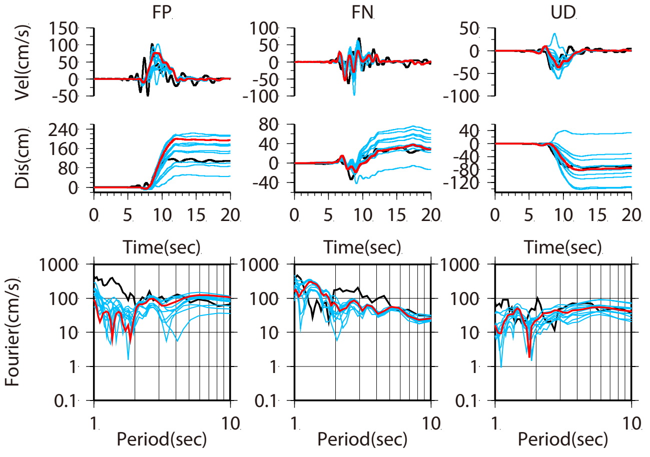


（3）すべり角のばらつき

図 18　Graves and Pitarka[26), 27), 28)]に基づく布田川断層における断層形状及びすべり角のばらつきを考慮した震源断層モデルの設定例



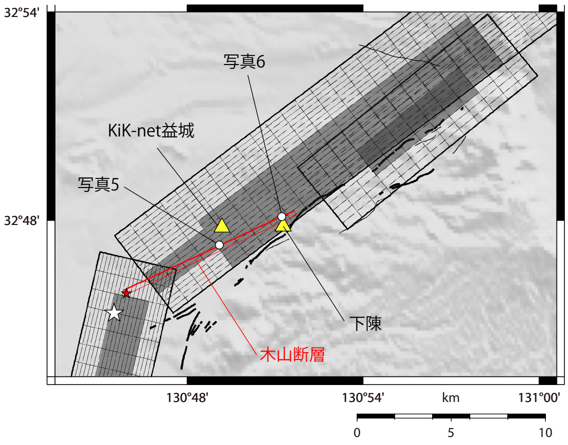
（1）走向と傾斜角の影響



（2）走向，傾斜角及びすべり角の影響

図 19　下陳における断層形状の影響

一方，益城町中心部では木山断層と呼ばれる分岐断層が確認されており，建物被害に影響した可能性がある．そこで，図 20 に示すように，国土地理院の知見[29]に基づき震源断層面を設定し KiK-net 益城及び下陳の地震動評価を行った．木山断層は地表近くで布田川断層から北に分岐した副断層とされていることから，地震発生層以浅に北傾斜 85° の断層面を設定した．国土地理院の知見[29]に基づき，断層長さは 10km，すべり量は一律 0.4m とし設定した．写真 5 に示すように，筆者らの調査結果でも設定した断層面の近傍に設定したすべり量に近い地表断層変位（約 0.2m）を確認している．なお，この設定では木山断層は益城町中心部だけでなく下陳にも近いことになるが，既往の調査結果[30]や写真 6 に示すように，下陳の北に位置する上陳地区で地表断層変位と被害が確認されている．なお，写真 5 と写真 6 については，図 1 に地表地震断層の位置と併せて示す．すべり速度時間関数は規格化 Yoffe 関数[23]を用いており，関数の設定に必要となる τ_S と τ_R は，設定したすべり量と田中ら[6]による回帰式に基づき，τ_S を 1.2 秒，τ_R を 2.6 秒とした．地震動評価結果を図 20 に示す．木山断層の有無による地震動評価結果の違いは小さく，下陳にも KiK-net 益城と同程度の寄与があることから，木山断層が益城町中心部と下陳の建物被害の違いの原因とは考えにくい．



（1）震源断層モデルの設定

写真 5　益城町中心部における木山断層の変位

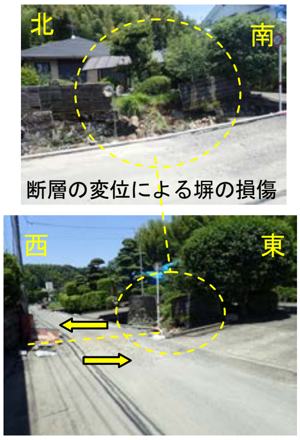
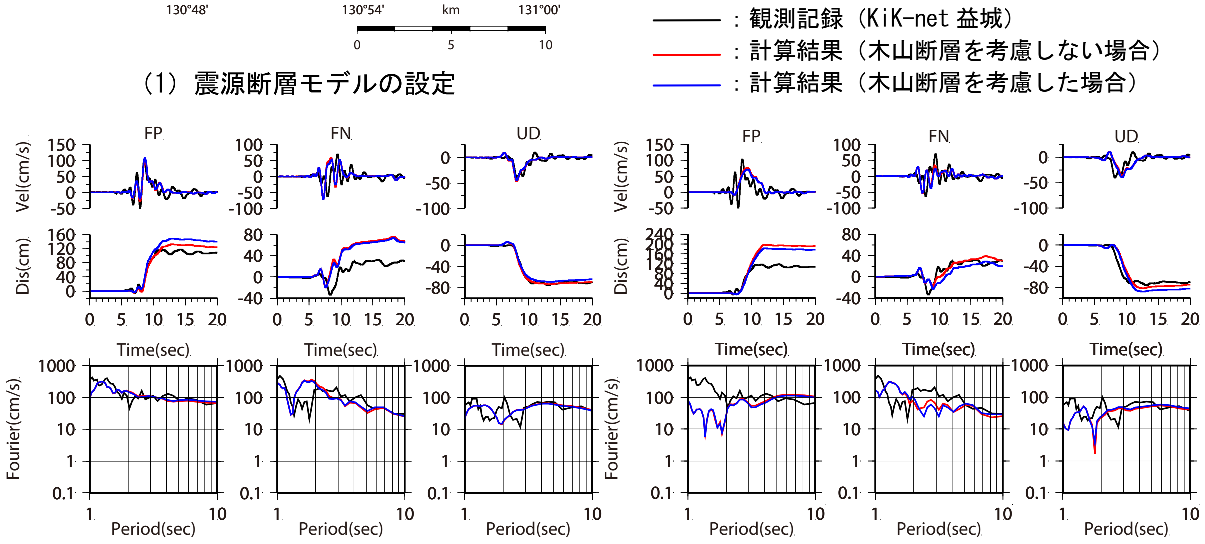


写真 6　下陳周辺における木山断層の変位



（2）KiK-net 益城における計算結果　　（3）下陳における計算結果

図 20　木山断層（分岐断層）が地震動評価結果に与える影響

5. まとめ

2016年熊本地震本震時における地表地震断層近傍に位置するKiK-net益城と下陳の建物被害の違いについて，数積分法[7), 8)]を用いて本震時の地震動を計算し，計算結果と建物被害との関係について検討を行った．

1）下陳において建物被害調査を行った．建物被害の関係からは，益城町下陳における2016年熊本地震の地震動は，震度6強（6.49）を記録したKiK-net益城よりも小さく，震度5強～6弱と推定される．

2）強震動レシピ[19)]を地震発生層以浅に拡張し，永久変位を含む広域の観測記録を説明可能な震源モデルを設定し，地表地震断層近傍を含む広域の観測点を対象に，波数積分法により周期1秒以上の観測記録が再現できることを示した．

3）上記の震源断層モデルを用いて下陳における2016年熊本地震本震時の地震動を計算した．計算した地震動の特徴と建物被害との関係は以下の通りである．

- 下陳の計測震度は，KiK-net益城よりも小さい．
- 地盤増幅特性の影響により下陳の地震動はKiK-net益城よりも小さくなる．
- 地表地震断層のほぼ直上に位置する下陳では，放射特性の節となり，深部からのFP成分が小さくなる．このような震源特性，すなわち，地表地震断層と観測点の位置関係による影響でも下陳の地震動はKiK-net益城よりも小さくなったと考えられる．FP成分が小さくなる傾向は，走向や傾斜角など断層形状にばらつきを持たせた場合でも同様であることを確認した．
- FN成分に関しては，周期1.5秒付近で下陳の方がやや大きくなる傾向が見られた．この傾向とFP成分が非常に小さい傾向は，山門や倉庫などの倒壊方向と調和的である．

ただし，下陳の地下構造モデルの設定には課題が残されており，地盤増幅の影響をより定量的に評価を行うためには今後の調査，分析が必要と考えられる．

謝　辞

本研究はJSPS科研費JP16K06586の助成を受けたものです．下陳における悉皆調査は村上正浩・寺本彩乃・柳田悠太郎・新藤俊弥氏(工学院大学)，鱒沢曜氏(鱒沢工学研究所)，境茂樹・森清隆・仲野健一・東條有希子氏(安藤ハザマ)，木本幸一郎氏(エス・エー・アイ構造設計)，大原美保氏(土木研究所)，小林亘氏(東京電機大学)，鈴木光氏(減災アトリエ)，の協力を頂きました．下陳における余震観測では，工藤一嘉博士(日本大学)，神野達夫博士，重藤迪子博士(九州大学大学院)，菅原正晴氏，南雲秀樹氏(東電設計)にご助力頂きました(所属はいずれも調査当時)．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．東京電力ホールディングスの引間和人博士には，2016年熊本地震の震源インバージョン結果をご提供いただきました．地図の作成にあたっては，国土地理院の地理院地図とGMTを使用しました．ここに，記してお礼を申し上げます．

参考文献

1) 建築研究所：熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会　報告書, 2016.
2) 渡辺満久，鈴木康弘，熊原康博，後藤秀昭，中田高：熊本地震に関する活断層評価と地震被害の集中，2016 年度日本地理学会秋季学術大会，100053，2016.
3) 中村航，久田嘉章：2016 年熊本地震の地表地震断層の近傍における建物被害調査，第 15 回日本地震工学シンポジウム，PS1-01-36，2018.
4) 田中信也，菅原正晴，工藤一嘉，重藤迪子，神野達夫：2016 年熊本地震の地表地震断層近傍における建物被害調査と臨時余震観測－熊本県益城町下陳地区を中心として－，日本地震工学会第 12 回年次大会梗概集，2016.
5) 元木健太郎，友澤裕介，加藤研一：益城町宮園周辺と断層極近傍における被害と地盤震動，第 44 回地盤震動シンポジウム，pp.55-64，2016.
6) 田中信也，金田惇平，引間和人，久田嘉章：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，日本建築学会構造系論文集，第 83 巻,第 752 号，pp.1525-1535，2018.

7) 日本建築学会: 地盤震動 －現象と理論－, pp.84-102, 2005.
8) 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.
9) 活断層研究会 : ２章 活断層の定義と用語, 新編日本の活断層－分布と資料－, 東京大学出版会, 1991.
10) 境有紀，汐満将史，神野達夫 : 建物被害の観点から見た地震動の性質，第 44 回地盤震動シンポジウム，pp.47-54，2016.
11) 寺本彩乃, 久田嘉章, 金田惇平:2016 年熊本地震の地表地震断層の近傍における建物被害調査報告, 日本地震工学会第 12 回年次大会梗概集，2016.
12) 岡田成幸，高井伸雄 : 地震被害調査のための建物分類と破壊パターン，日本建築学会構造系論文集, No.524， pp.65-72，1999.
13) 友澤裕介，元木健太郎，加藤研一，引田智樹，石木健士朗 : 平成 28 年（2016 年）熊本地震における墓石転倒率と木造家屋被害調査－断層極近傍と益城町宮園周辺の比較検討－，日本地震工学論文集，第 17 巻，第 4 号，pp. 62-80，2017.
14) Hisada, Y. and J. Bielak: Effects of Sedimentary Layers on Directivity Pulse and Fling Step, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1736, 2004.
15) 元木健太郎，加藤研一：2016 年熊本地震の震源近傍における S 波速度の異方性について―KiK-net の地表地中間の地震波干渉法に基づく方位による伝播速度の違い―, JpGU-AGU Joint Meeting, 2017.
16) 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.
17) Hayashida, T., M. Yamada, M. Yamada, J. Mori, Y. Fujino, H. Sakaue, S. Fukatsu, E. Nishihara, T. Ouchi and A. Fujii: Subsurface velocity structure and site amplification characteristics in Mashiki Town, Kumamoto Prefecture, Japan, inferred from microtremor and aftershock recordings of the 2016 Kumamoto earthquakes, Earth Planets and Space, Vol. 70:116, doi: 10.1186/s40623-018-0889-2, 2018.
18) 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/（参照 2019-05-22）
19) 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，入手先：http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdf,（参照 2018-08-01）.
20) 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.
21) 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.
22) 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.
23) 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.
24) 栗田哲史：KiK-net 益城における 2016 年熊本地震の記録に基づく表層地盤の非線形増幅特性，土木学会論文集 A1（構造・地震工学）, Vol.73，No.4（地震工学論文集第 36 巻）, I_74-I_82，2017.
25) SCEC Broadband Platform，http://scec.usc.edu/scecpedia/Broadband_Platform（参照 2019-02-03）.
26) Robert W. Graves and Arben Pitarka: Broadband Ground-Motion Simulation Using a Hybrid Approach, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 100, No. 5A, pp. 2095-2123, 2010.
27) Robert Graves and Arben Pitarka, Refinements to the Graves and Pitarka (2010) Broadband Ground-Motion Simulation Method, Seismological Research Letters Volume 86, Number 1 January/February ,2015.
28) Robert Graves and Arben Pitarka, Kinematic Ground-Motion Simulations on Rough Faults Including Effects of 3D Stochastic Velocity Perturbations, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 5, pp. 2136–2153, 2016.
29) 宇根寛：益城町市街地の活断層について，熊本地震からの益城町の市街地復興に向けた安全対策のあり方等に関する中間報告シンポジウム,
https://www.town.mashiki.lg.jp/kiji003308/3_308_1_up_w51axw7w.pdf（参照2019-02-03）

30) 断層帯近傍における地震動メカニズム検討小委員会：土木学会地震工学委員会，2019 年度第 1 回研究会，小委員会活動報告，
http://committees.jsce.or.jp/eec2/system/files/%E6%96%AD%E5%B1%A4%E8%BF%91%E5%82%8D%E5%9C%B0%E9%9C%87%E5%8B%95%E3%83%A1%E3%82%AB%E3%83%8B%E3%82%BA%E3%83%A0190514.pdf（参照 2019-05-22）

（受理：2019年3月12日）
（掲載決定：2019年6月13日）

Relation between Strong Ground Motions and Building Damage in KiK-net Mashiki and the Shimojin Areas during the 2016 Kumamoto Earthquake

TANAKA Shinya [1)], KANEDA Junpei [2)] , NAKAMURA Wataru [3)]
and HISADA Yoshiaki [4)]

1) Member, Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., M. Engineering
2) Tokyo Electric Power Services Co., Ltd., M. Engineering
3) Graduate school, Kogakuin Univ.
4) Member, Professor, School of Architecture, Kogakuin University, Dr. Engineering

ABSTRACT

A number of buildings were collapsed at the center of Mashiki city located about 2 km from the Surface Faults during the 2016 Kumamoto Earthquake. On the other hand, there are no collapsed houses in the Shimojin areas above the surface faulting located about 3km east from the center of Mashiki city. This paper discussed relation between strong ground motions and building damage in the center of Mashiki city and the Shimojin areas during the 2016 Kumamoto Earthquake. The estimated long-period ground motions (1s～2s) of fault parallel component in the Shimojin areas by the theoretical method are smaller than that in Mashiki city. 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. The other hand the estimated long-period ground motions (about 1.5s) of fault normal component in the Shimojin areas by the theoretical method are larger than that in Mashiki city. These trends of the estimated long-period ground motions were harmonious with building damage.

Keywords: 2016 Kumamoto earthquake, Near-Fault Region, Permanent Displacement, Building Damage