

## スペクトル分離で求めた震源特性とサイト特性、およびその考察

京都大学防災研究所 川瀬 博  
京都大学工学研究科建築学専攻博士課程 仲野健一  
(安藤・間技術研究所社会人ドクター)

本稿では K-NET、KiK-net、および JMA 震度計ネットワークによって観測された強震データをもとに、一連の熊本地震のうち、4月14日の前(まえ)本震・4月16日の後(あと)本震、およびそれらの余震 23 地震(前本震の余震 9、後本震の余震 14) に対して仲野・他(2014、2015)のスペクトル分離法に従ってスペクトル分離を行い、その震源スペクトルと一部のサイト特性を得たので、その概要をまとめた。

### 1. スペクトル分離インバージョン

スペクトル分離インバージョンとは、地震波形のフーリエスペクトルを求め、その特性が震源・伝播経路・サイト増幅の3つのファクターの積で表わされるものと仮定して、数量化理論 I 類に基づく最小自乗法でそれぞれのファクター(寄与)を分離する方法である。詳細については仲野・他(2014、2015)、およびその先行論文である川瀬・松尾(2004、2004)を参照されたい。ここでは、既存のデータベースに新たに今回の 2016/04/14 の前本震およびそれ以後の地震動 25 波の S 波部(マグニチュードにより 5 秒間から 15 秒間を切り出したもの)の 3 成分の波形を用いてスペクトル分離解析を行った。ただし水平 2 成分については RMS(自乗和平方根)を用いている。データは非線形サイト特性が生じた観測波の震源スペクトルに対する影響を避けるため最大加速度  $PGA \leq 200\text{gal}$  のもののみを用いることとし、ノイズの多い記録を除くため  $M_{JMA} \geq 4.5$ 、震源距離  $\leq 200\text{km}$  でデータを選択した。以下に用いた地震の諸元を示す。発震時とマグニチュード、震源深さは Hi-net の一元化震源データを参照している。また震源スペクトルからコーナー振動数を同定する際に用いた地震モーメント  $M_0$  は F-net の CMT 解を用いている。

なお、表 1 の後半 3 列は分離した震源スペクトルから得たコーナー振動数  $f_c$ 、高域遮断振動数  $f_{max}$ 、およびそのコーナー振動数から Brune の式で換算した応力降下量  $\Delta\sigma$  の推定値(0.1MPa 単位すなわち bar 単位)を表わしている。その換算の際の震源域の S 波速度は 3.6km/s としている。

表1 用いた強震動データの諸元と分離で得た応力降下量

Date and time	Mjma	Depth(km)	M <sub>0</sub> (10 <sup>-7</sup> Nm)	f <sub>c</sub> (Hz)	f <sub>max</sub> (Hz)	Δσ(0.1MPa)
201604142126	6.5	11	1.74E+25	0.19	20.5	22.1
201604142142	4.9	11	3.55E+23	0.47	45.4	6.8
201604142207	5.8	8	1.27E+24	0.38	22.4	12.9
201604142222	4.6	12	1.26E+23	0.69	22.5	7.7
201604142238	5.0	11	2.42E+23	0.66	27.8	12.9
201604142343	5.1	14	2.71E+23	0.69	31	16.5
201604150003	6.4	7	1.06E+25	0.17	15.4	9.6
201604150034	4.5	13	8.67E+22	0.81	19.1	8.5
201604150153	4.8	12	1.08E+23	0.79	18.3	9.9
201604150510	4.6	10	5.58E+22	1.04	40.6	11.6
201604160125	7.3	12	4.42E+26	0.06	22.5	17.7
201604160130	5.3	11	1.41E+24	0.33	23.6	9.4
201604160144	5.4	15	2E+24	0.29	25.8	9.0
201604160146	5.9	11	1.12E+25	0.16	18.6	8.5
201604160156	4.6	12	1.26E+23	0.57	21.4	4.3
201604160204	4.9	12	3.55E+23	0.4	28.6	4.2
201604160303	5.9	7	1.81E+24	0.24	25.2	4.6
201604160355	5.8	11	2.24E+24	0.25	31.2	6.5
201604160711	5.4	6	5.95E+23	0.24	19.6	1.5
201604160723	4.8	12	1.01E+23	0.73	21.3	7.3
201604160948	5.4	16	6.15E+23	0.5	30.8	14.2
201604161602	5.4	12	5.83E+23	0.48	29.1	11.9
201604182042	5.8	9	7.94E+24	0.13	22.9	3.2
201604191752	5.5	10	1.01E+24	0.35	24.4	8.0
201604192047	5.0	11	2.13E+23	0.61	29.1	9.0

## 2. 前本震・後本震の分離した震源スペクトル

上記のデータを追加した強震動データセットと仲野・他（2014、2015）のスペクトル分離手法により、前本震・後本震およびそれらの余震の震源スペクトルを分離した。加速度波形から直接得られた前本震と後本震の加速度震源スペクトルを図1(a)(b)に、それを変位震源スペクトルに換算しそれから Brune の $\omega^{-2}$ モデル（1970）で同定した震源スペクトルと比較したものを図2(a)(b)に示す。表1に示したように、前本震のコーナー周波数は0.19Hz、

後本震のコーナー周波数は 0.06Hz と得られた。図から両者とも $\omega^{-2}$ モデルで 0.16Hz から 20Hz までの全体は概ねよく説明できているが、後本震の 0.8Hz 以下の低振動数領域では、同定した $\omega^{-2}$ モデルを上回る傾向にあり、これはおそらく震源破壊過程の不均質（アスペリティまたは強震動生成域の存在）を反映しているものと思われる。

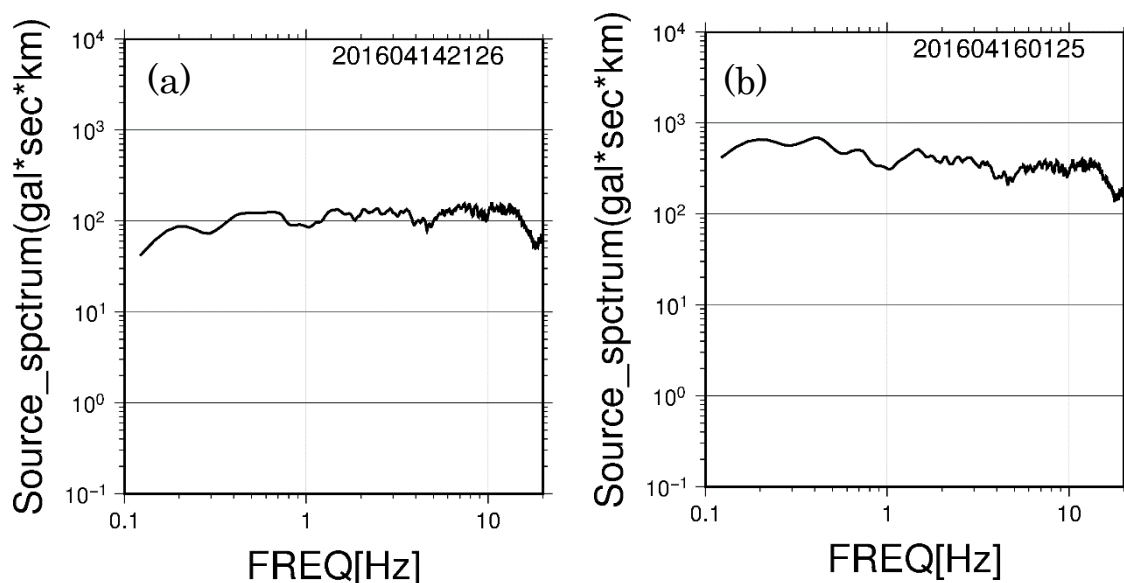


図1 前本震(4/14 21:26)と後本震(4/16 01:25)の加速度震源スペクトル

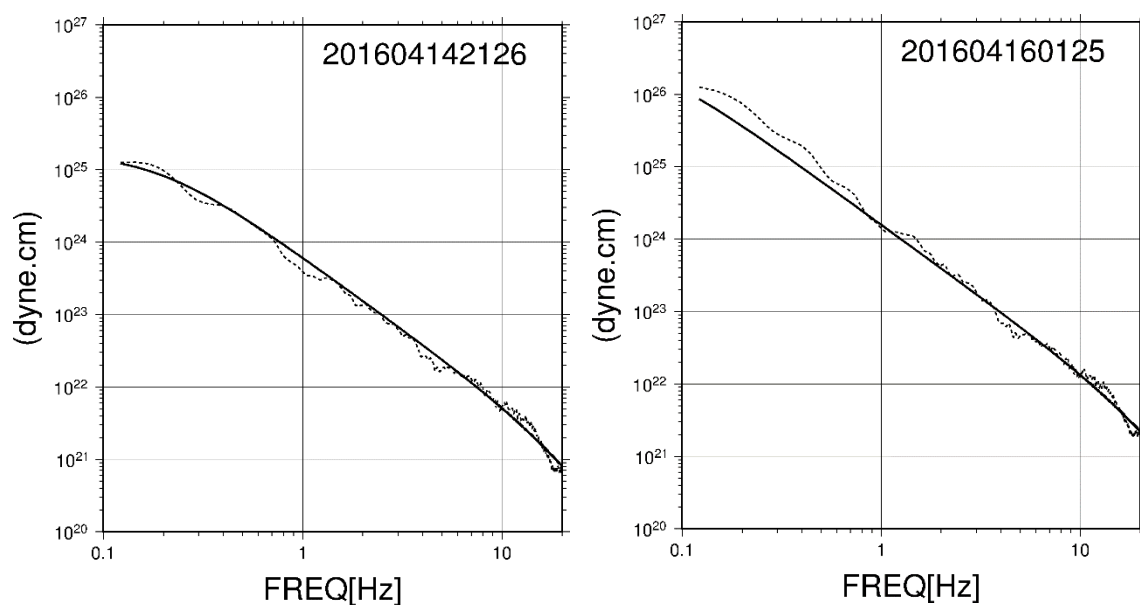


図2 前本震(4/14 21:26)と後本震(4/16 01:25)の変位震源スペクトル（点線）と CMT 解の地震モーメントから同定した $\omega^{-2}$ モデルの震源スペクトル（実線）との比較

### 3. Brune の応力降下量の同定結果と短周期レベル

表 1 の最右列に記載した前本震・後本震 (×)、およびそれらの余震 (△) の推定応力降下量をそれぞれの地震モーメントの関数として図 3 に示す。なお○は仲野・他 (2015) で求めた 1996 年から 2011 年までの内陸地殻内地震の応力降下量である。この図から、今回の二つの本震の応力降下量レベルは過去の 15 年間に発生した内陸地震の M6 クラスの地震としてはほぼ下限値のラインに近く、決して地震として特異に硬い地震＝短周期を多く放出した地震であるとは言えないことがわかった。またその余震の応力降下量はいずれも 2 つの本震の応力降下量を下回っており、仲野・他 (2015) で指摘した本震—余震シーケンスの傾向を再現している。全地震の対数平均は 8 bar±1.8 倍/1.8 分の 1 で、過去の地震の平均とほぼ変わりが無い。

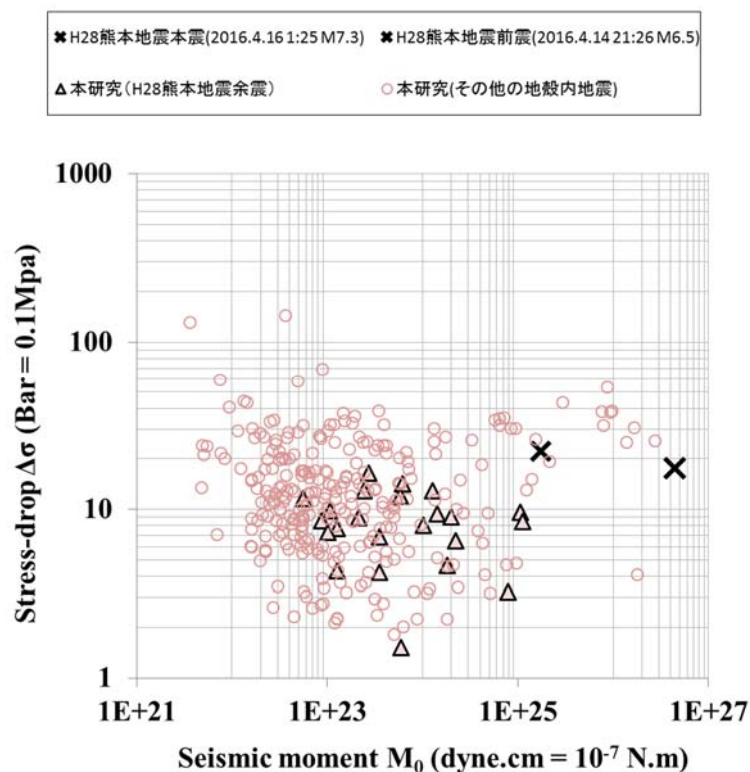


図 3 地震モーメントと求められた Brune の応力降下量との関係

次に同定した $\omega^{-2}$ モデルから求められる加速度スペクトルの短周期レベル A を同様に地震モーメントの関数として図 4 に示す。用いている震源スペクトルモデルはシングルパラメーターモデルなので短周期レベルと応力降下量とは 1 : 1 に対応するが、既往研究との比較のために短周期レベルとしても表示している。図から、既に図 3 で見たように、今回の地震の短周期レベルは過去の M6 以上クラスのそれのほぼ下限値となっており、2011 年の

福島県浜通りの地震に比べても小さめとなっていること、しかしその余震はほぼ過去の同クラスの地震と同じレベルとなっていること、これら余震は既従回帰式の佐藤（2003）および仲野・他（2015）とよく対応しているが、本震2つはマグニチュードの大きな記録の回帰式である壇・他（2001）や佐藤（2010）とは有意な差がある（下回る）ことがわかる。

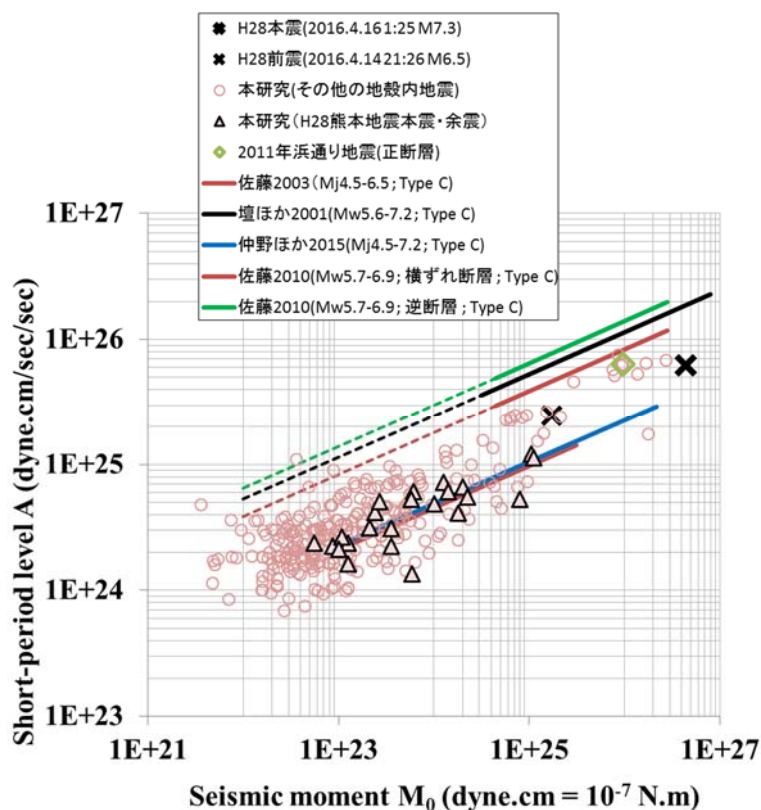


図4 加速度震源スペクトルから求めた短周期レベル A と既往の回帰結果との比較

#### 4. 熊本県益城町での観測記録から分離したサイト特性

図5には益城町辻の城の KiK-net 観測点 KMMH16 の地震基盤からのサイト増幅特性を示す。今回のインバージョンと既往の1996年から2011年のデータによるインバージョン解析の結果は、1Hz付近を除き、ほぼ一致している。1Hzから5Hzで10倍程度の増幅があることがわかる。このサイトの最表層のS波速度は150m/s~250m/sと推定されるので、3.45km/sの地震基盤からの増幅度としては通常の想定範囲内にあると言える。また本震のデータを用いたサイト特性の抽出（観測スペクトルを震源スペクトル×伝播経路特性で割り込んだもの）ではピーク振動数は3Hzにシフトし、1Hzにも顕著なピークが生じていることがわかる。この1Hzのピークについてはその原因は現時点では明確でなく、詳細な検

討が必要である。3Hz へのピークのシフトは S 波速度が地盤の非線形化によって 60%に低下したと考えれば説明できる。

次に、KiK-net 益城の前本震・後本震の非線形サイト特性と JMA が公開した熊本県自治体震度計のうち益城町役場と西原村役場に置かれていたものの非線形サイト特性と比較する。なおこれらの地点での余震データも他の自治体震度計のデータも JMA によって回収されているものと推察されるが、平成 28 年 5 月 17 日時点では未だ公開されていない。図 6 の(a)が KMMH16 の地震基盤からのサイト特性で、インバージョンと後本震の結果は図 5 と同じである。同(b)は益城町役場のもの、同(c)は西原村役場のものである。

この図から、まず前本震では KiK-net 益城のサイト特性が最も大きく、0.3Hz から 5Hz の広い範囲で 10 倍を超える増幅があったこと、そのピークレベルは 60 倍近くに達することを示している。弱震動の平均結果であるインバージョン解析と比較しても、その周波数範囲で 2～4 倍の増幅率となっている。なおこの非線形サイト特性には震源の影響として、強震動生成域と発震点との距離の違いや破壊の進行に伴うディレクティビティの影響が含まれているので、これを地盤増幅特性としてのみ解釈することは間違っている可能性があることに注意されたい。益城町役場の前震のサイト特性は 2Hz に 40 倍に達する顕著なピークがあるが、その直後の 3Hz では大きな谷を形成している。一方西原村役場では 0.8Hz～5Hz にかけて 10 倍以上のサイト特性が得られているが、ピークレベルはヒゲ状のものを除くと 30 倍ほどで、3 地点の中では最も小さい。

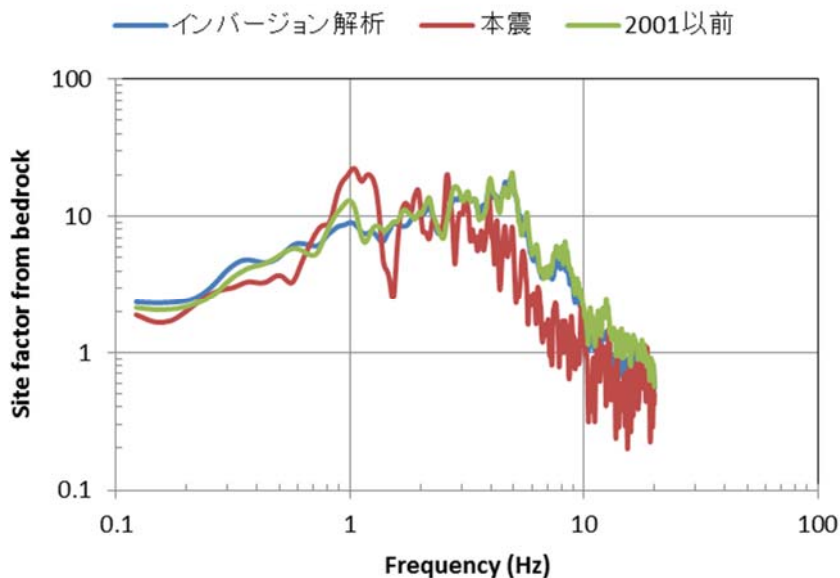
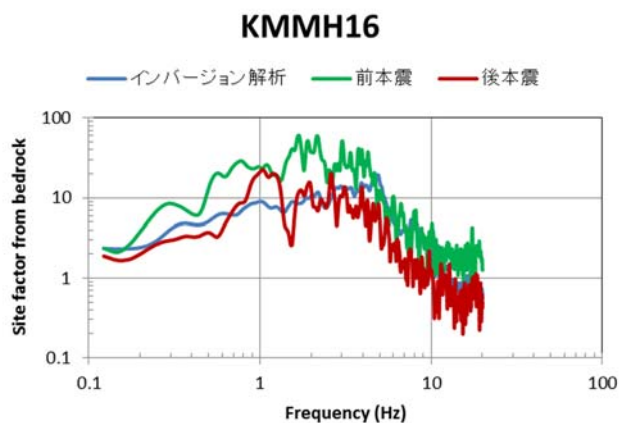
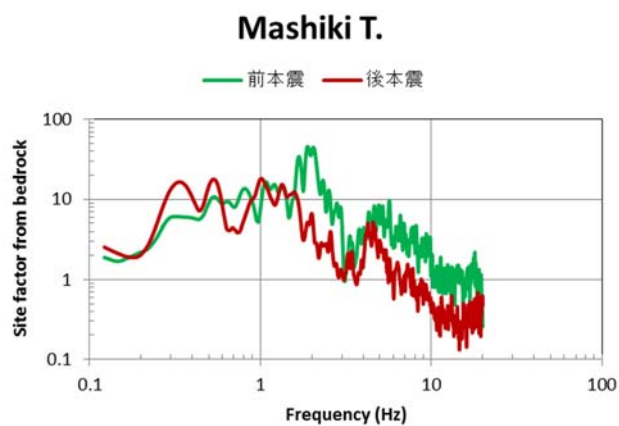


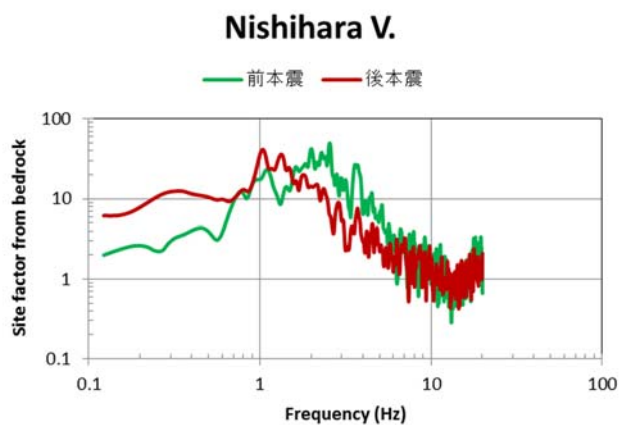
図 5 KiK-net 益城(KMMH16)における分離した地震基盤からのサイト特性（弱震の平均値と 4 月 16 日の後本震のみ）



(a) KiK-net 益城



(b) 益城町役場



(c) 西原村役場

図6 KiK-net 益城および自治体震度計による益城町役場・西原村役場データの観測波を震源スペクトル×伝播経路特性で求めた基盤波スペクトルで割込んだ非線形サイト特性

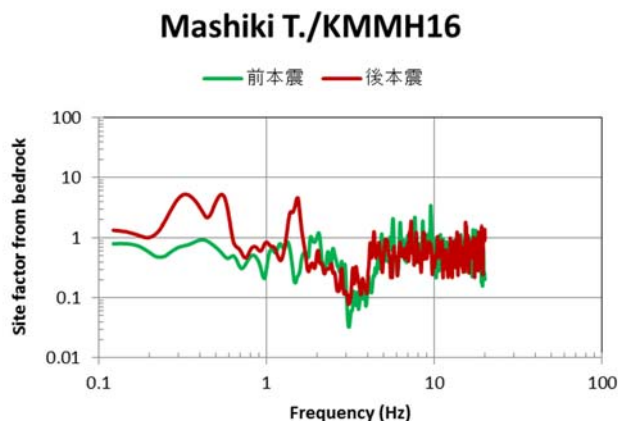


図7 益城町役場のサイト特性をKiK-net 益城(KMMH16)のサイト特性で割り込んだスペクトル比

一方、後本震のサイト特性は3地点とも前本震のサイト特性よりも小さめとなっており、西原村役場だけが1Hzで40倍の増幅となっている。後本震の場合には西原村役場と益城町役場のどちらも1Hz以下の低振動数域で前本震よりも大きな増幅率となっていることが注目される。これが観測波から計算された大きな永久変位（後述）を生じせしめた波形であることを反映しているものと推察される。同じ長周期成分でも益城町役場の方は0.3Hz以下では小さい値に収斂している。西原村役場の1Hzのピークは前本震に見られる3Hzのピークが地盤の非線形性によってそこまで低下したと解釈できなくもないが、3地点共通に1Hzのピークが後本震に見られることから、それを震源由来と考えた方が妥当と思われる。後本震のサイト特性で益城町役場とKMMH16とを比較すると、0.3Hzから0.7Hzの低振動数域では上述のように益城町役場の方が大きくなっているが、高振動数域では益城町役場の前本震にも見られた3Hzの谷が後本震にも見られており、益城町役場の方が小さめとなっている。

それを明瞭に見るために益城町役場のサイト特性をKMMH16で割り込んだスペクトル比を見てみると（図7）、前本震では3Hzで深い（0.1倍の）谷となっている以外はほぼ1となっており、両者の地盤増幅特性に大きな違いがないことがわかる。一方、後本震では上述の低振動数域で約8倍の差が生じているほか、1.5Hzで約4倍のピークがあるが、これはKMMH16の谷から生じているもので、益城町役場のサイト由来ではないと考えられる。図7に示した後地震のスペクトル比には3Hz付近に前本震と同様の谷が生じており、それから推察すると、1Hz以下の低振動数成分以外に益城町役場とKMMH16の構造物破壊能を説明する手立ては考えられず、従ってこのスペクトル比は川瀬・他（京大防災研サイト、2016）の仮説をサポートしていると言える。



## 5. 加速度波形と速度波形の比較

最後に、わずか 600m ほどしか離れていない KiK-net 益城 KMMH16 と益城町役場での観測波形を比較しておく。図 8 には前本震、図 9 には後本震の加速度波形を比較して示す。図から明らかなように益城町役場の波形は KiK-net 益城に見られるリップル状の短周期(高周波数)成分が見られず、のっぺりとした波形となっていることがわかる。しかし最大加速度を示した EW 成分では、最大加速度に達するまでの波形はリップル状のパルスを除けば非常によく類似していることがわかる。なお KiK-net 益城の上下動成分は益城町役場のそれとは大きく異なっており、前本震では水平動には対応するパルスのない時間に孤立した 3 波のパルスが出現しており、後本震では全体に振幅が倍以上となっている。この大きな違いについては現時点では考えられる原因が見当たらない。

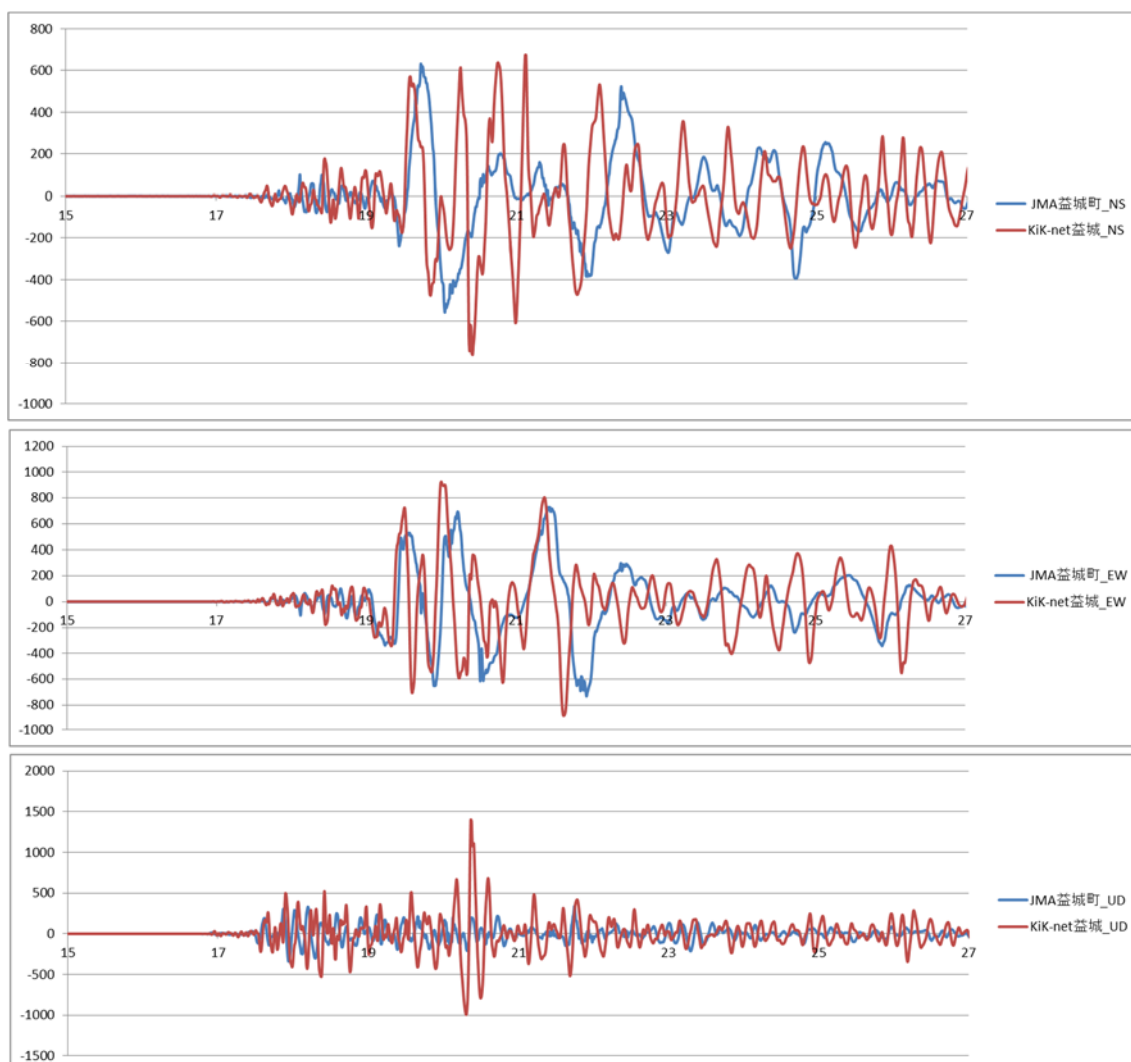


図 8 前本震での JMA 益城町役場 (—) と KiK-net 益城 (—) の加速度波形の比較 (時間ずれ修正済み; フィルターなし)

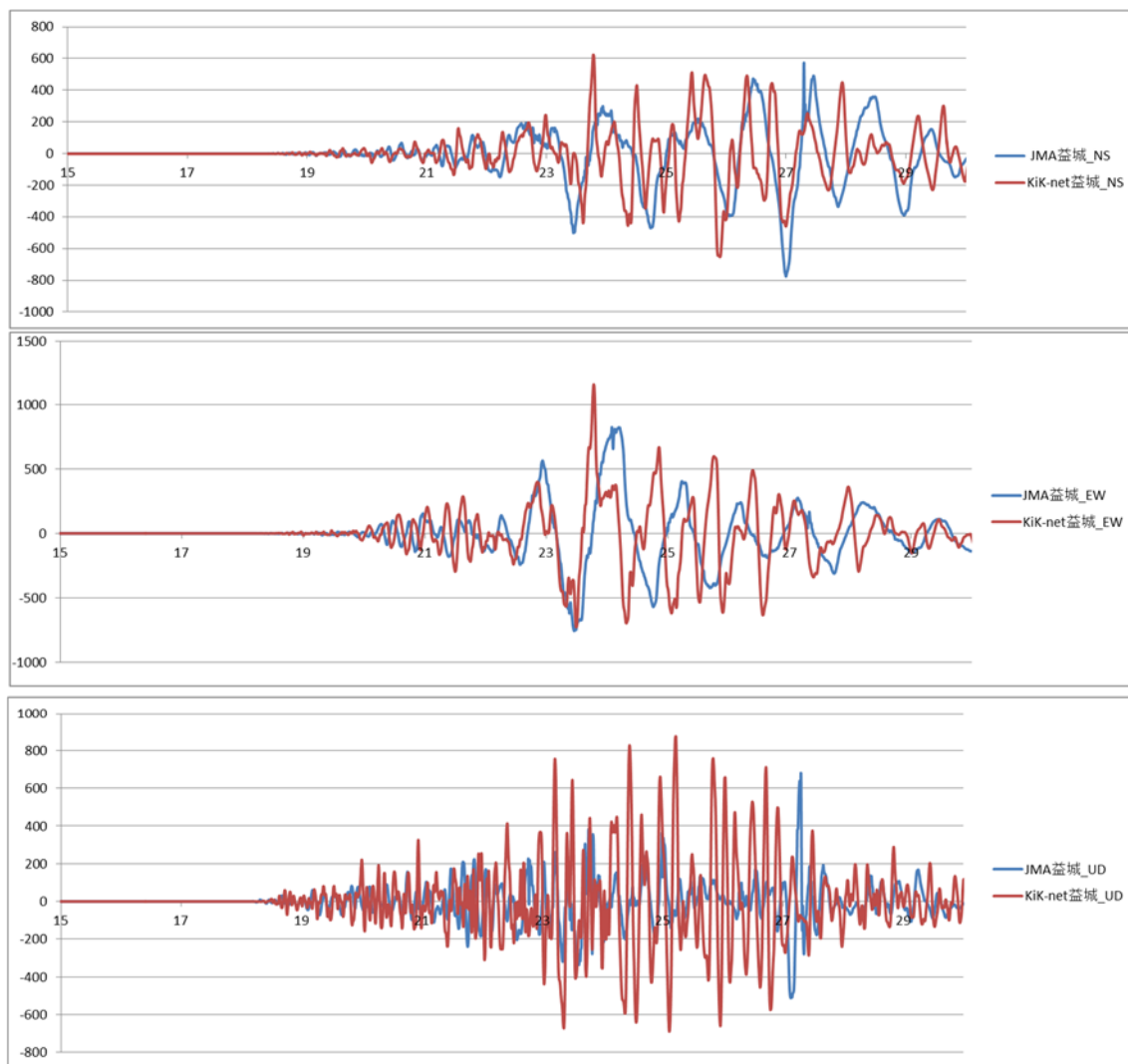


図9 後本震での JMA 益城町役場 (—) と KiK-net 益城 (—) の加速度波形の比較 (時間ずれ修正済み; フィルターなし)

京都大学防災研究所の岩田知孝教授は益城町役場の波形を積分して、その速度波形と変位波形を求めているが(防災研究所地震災害研究部門強震動研究分野の HP: <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/topics/masaki-nishihara0428ver2.pdf>)、同じ方法で KiK-net 益城の速度波形も計算されていたので、両者の速度波形を上記の加速度波形と同じように時間軸を合わせて図化していただいた。岩田教授から入手した速度波形の比較結果を図10に示す。

この図から、速度波形で見ても EW 成分最大値に達するまでは両者はよく類似しており、最大値のところ約 0.5 秒の時間遅れが生じていること、マイナスのピークからゼロになって以降、再びゼロになるまでプラスが続く時間が KiK-net 益城よりも長いことが主たる違いであると指摘できる。後者は、図7に示した大きな長周期サイト特性、および岩田教授の

HP に示されている大きな観測永久変位を生成した主因であるといえる。

一方、断層直交成分に近い NS 成分には、神戸で観測されたような顕著なアスペリティパルスは見出せず、後半の 2 波分以外の速度波形は、振幅に若干の違いはあるものの、相互によく似た波形となっており、図 9 の加速度波形（最上部が NS 成分であることに注意）の類似性と（当然のことながら）対応している。

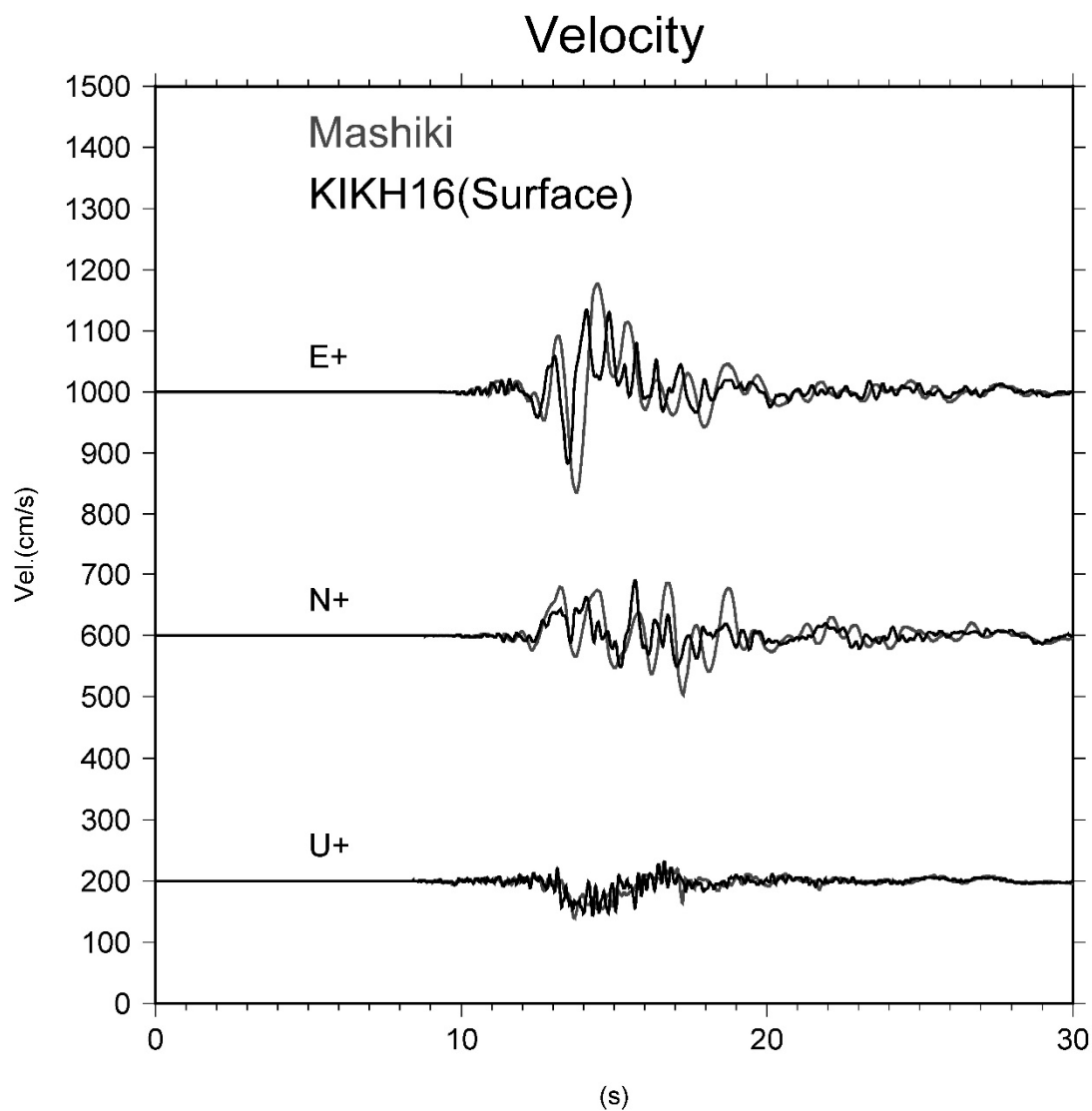


図 10 KiK-net 益城（太線）と益城町役場（細線）の速度波形の比較  
（京大防災研 岩田知孝教授 作図）

## 6. まとめ

本報告では、多数の観測点データを用いたスペクトル分離解析により、震源スペクトルおよび被害中心域での観測地点のサイト特性を抽出し、その結果について考察を加えた。

震源スペクトルからは、今回の4月14日の前本震も4月16日の後本震も Brune の応力降下量で見ると通常の地震の範囲内であり、日本の M6 クラスの下限値に近い「柔らかい地震」であったこと、余震の応力降下量も日本の内陸地殻内地震（うちの中小地震）の平均的な値を示していることがわかった。

益城町被害中心部と西原村の3地点でのサイト特性については、前本震のサイト特性の方が後本震のそれよりも大きいこと、本震で断層運動に伴う永久変位が確認された益城町役場と西原町役場の観測点では 1Hz 以下のサイト特性が相当大きくなっていることがわかった。しかし KMMH16 と益城町役場の比較からは、両者にはその永久変位を生成するための低振動数域のパワーの違い以外に大きな違いは見出せず、両地点周辺の被害レベルの差異は、断層運動に伴う長周期成分とそれによる地盤変状の影響が大きいという仮説をサポートする結果となった。

以上

## 謝辞

K-NET・KiK-net の記録は防災科学技術研究所が公開しているもので、JMA 震度計ネットワークの記録は気象庁が公開しているものである。また熊本県の震度計データは気象庁が熊本県から入手して公開しているものである。速度波形の比較は京都大学防災研究所の岩田知孝教授作成のものである。関係各位のご尽力に深く感謝の意を表する。

## 参考文献（初出順）

- 【1】川瀬博, 松尾秀典: K-NET, KiK-Net, JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第1号, 33-52, 2004.2.
- 【2】川瀬博, 松尾秀典: K-NET, KiK-Net, JMA 震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性と S 波速度構造との対応, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第4号, 126-145, 2004.9.
- 【3】仲野健一, 川瀬博, 松島信一: スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究, その1 フーリエスペクトル・応答スペクトルから分離した平均特性, 日本地震工学会論文集, 第14巻, No. 2, 67-83, 2014.5.
- 【4】仲野健一, 川瀬博, 松島信一: スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究, その2 分離した特性に対する詳細分析, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第1号, 38-59, 2015.2.
- 【5】Brune, J.N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75, Issue 26, 4997-5009, 1970 (correction, *ibid*, 1971, 76, 5002).
- 【6】佐藤智美: 中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深さ依存性及び地域性に関する研究, 土木学会地震工学論文集, CD-ROM, No. 48, 2003.

2016/05/14 川瀬・仲野

スペクトル分離で求めた震源特性とサイト特性 v1.0

- 【7】 壇一男、渡辺基史、佐藤俊明、石井透：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 545 号、51-62、2001.
- 【8】 佐藤智美：逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則、日本建築学会構造系論文集、第 75 巻、第 651 号、923-932、2010.