HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	2003年十勝沖地震の最大余震による特異な地震動特性
Author(s)	前田, 宜浩; 高井, 伸雄; 笹谷, 努
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 73, 217-227
Issue Date	2010-03-19
DOI	10.14943/gbhu.73.217
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/44476
Type	bulletin (article)
File Information	73_20_p217-227.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学地球物理学研究報告
Geophysical Bulletin of Hokkaido University, Sapporo, Japan
No. 73, March 2010, pp. 217－227

2003年十勝沖地震の最大余震による特異な地震動特性

前田　宜浩
カリフォルニア大学サンタバーバラ校
高井　伸雄・笹谷　　努
北海道大学大学院工学研究科建築都市空間デザイン専攻

(2010年1月8日受理)

Anomalous strong ground motion features of the largest aftershock of the 2003 Tokachi-oki earthquake

Takahiro MAEDA
Institute for Crustal Studies, University of California, Santa Barbara
Nobuo TAKAI and Tsutomu SASATANI
Division of Architectural and Structural Design, Graduate School of Engineering, Hokkaido University

(Received January 8, 2010)

The largest aftershock (M_W 7.3) of the 2003 Tokachi-oki earthquake (M_W 8.3) generates larger peak ground acceleration (PGA) values than the main shock in the western side of the epicenters despite their magnitude difference. We study the features of strong ground motions from the largest aftershock in detail using PGA values. Spatial distribution maps of PGA ratio between the largest aftershock and adjacent earthquake shows obvious azimuth dependency compared with the other earthquake pairs occurring around Japan. Attenuation relationship of the largest aftershock shows a large azimuth-dependent scattering at distances from 200 to 300 km compared with three smaller earthquakes occurring around the largest aftershock. Because this large scattering appears only in the largest aftershock, we conclude that the azimuth dependency is a peculiar feature of the largest aftershock. Fourier spectral ratios between the largest aftershock and adjacent earthquake at several stations show azimuth dependency at higher frequencies than 1 Hz, which is consistent with the azimuth dependency of PGA values. The azimuth dependency in high-frequency range cannot be explained simply by the source and path effects, and therefore, we make a hypothesis that the azimuth dependency is an apparent one generated by two earthquakes occurring simultaneously at different regions. Synthetic PGA distributions generated by two simultaneous events calculated by the empirical attenuation relationship are in agreement with the observed PGA distribution of the largest aftershock.

I．は　じ　め　に

2003 年十勝沖地震（M_j 8.0，M_W 8.3；以下，本震と省略する）と，その最大余震（2003 年 9 月 26 日 06 時 08 分，M_j 7.1，M_W 7.3；以下，最大余震と省略する）による最大地動加速度値（PGA 値）の空間分布を比較すると，震源の北から東側に位置する北海道東部では本震の方が最大余震よりも大きな PGA 値を記録しているのに対し，震源西側の北海道西部から東北北部にかけての地域では 2 地震による PGA 値に大きな差は見られず，最大余震の方が大きな PGA 値を記録した地点も多い（Fig. 1）．震源インバージョン解析によれば，本震の震源域は震央の北から北東に拡がっているのに対して，最大余震の震源域は本震に比べて狭い（山中，2004）ことから，2 地震の震源域の拡がりを考慮すれば Fig.1 に示した PGA 値分布の違いは定性的に説明することは可能である．しかしながら，マグニチュード 7 の最大余震によって，マグニチュード 8 の本震と同程度の地震動が広域で観測された要因を定量的に検討することは重要である．

最大余震の PGA 値分布に着目した研究は多くはないが，その特異な地震動分布の主要因がサイト特性とするものと，震源特性とするものに分かれる．片岡（2005）は，最大余震で本震

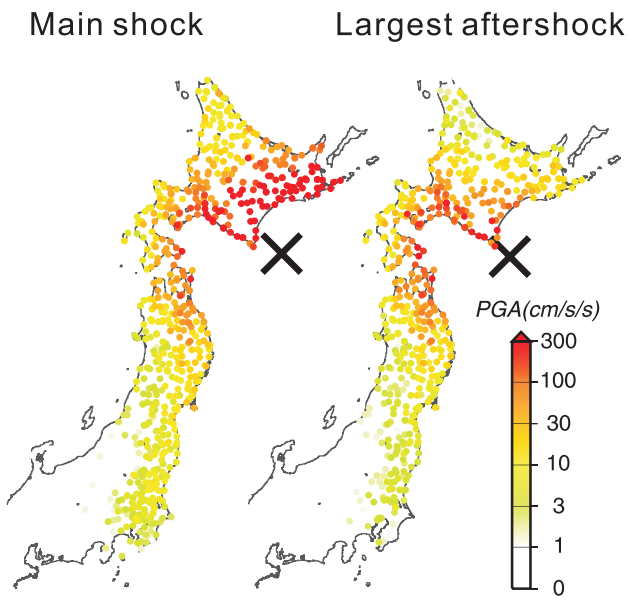

Fig. 1. Comparison of peak ground acceleration (PGA) values from (left) the 2003 Tokachi-oki earthquake (M_W 8.3) and (right) its largest aftershock (M_W 7.3). Crosses indicate the epicenters. The largest aftershock records larger PGA value than the main shock at many stations in the western side of the epicenters.

よりも大きなPGA値を観測した地点は震央の西側にのみ存在していること，そして，それらは高振動数領域のみが増幅しやすい地点であると指摘しており，サイト特性が主要因との立場である．一方でMacias et al.（2008）は，最大余震のPGA値の距離減衰関係が十勝沖の他の地震に比べてばらつきが大きいことの要因を，最大余震がプレート間地震ではなくスラブ内地震であるためであると指摘しており，震源特性が主要因との立場である．ただし，これらの研究では最大振幅値のみに着目しており，時刻歴記録を基にした議論はなされていない．前田・笹谷（2004）は，本震と最大余震では，最大振幅値だけでなく波形形状やスペクトル形状に関しても異なった方位依存性が見られ，それらは近傍で発生した小地震では見られないことから，方位依存性は主として震源特性に起因すると述べている．

本研究では，前田・笹谷（2004）による検討を踏まえ，最大余震の際に震源の西側の地域で本震に匹敵する地震動が記録された要因について検討する．そこで，まず，近接した2地震によるPGA値分布がどの程度の類似性を示すかについて，観測値と経験式に基づいて調べる．次に，最大余震の周辺で発生した地震との比較により，最大余震による地震動の特異性を指摘する．最後に，最大余震のPGA値分布を説明する仮説を提案し，それに基づいて検討を行う．

II．近接した2地震によるPGA値の空間分布

最大余震による地震動分布が特異であるかどうかを調べるために，近接して発生した2地震によるPGA値の空間分布がどの程度の類似性を示すかについて調べる．対象としたのは，根室沖，十勝沖，茨城沖，紀伊半島沖を震源とする4組8地震である（Fig. 2 a）．十勝沖のペアでは最大余震よりも小さなマグニチュードを持つ地震を用いることで，本震との比較で懸念された震源域の拡がりの影響を回避できると考えられる．マグニチュードの小さい地震のPGA値を分母とした2地震のPGA比をFig. 2 bに示す．PGA値は水平動二成分のベクトル合成値である．茨城沖のペアはマグニチュードの差が大きいためPGA比は全体的に大きくなっている．また，2地震がほぼ同じマグニチュードを持つ根室半島沖と紀伊半島沖のペアではPGA比の差は明瞭ではない．これら3組のPGA比が空間的にほぼ一様で方位依存性を示していないのに対し，十勝沖のペアではPGA比の方位依存性が強いことが明らかである．

近接した2地震によるPGA比の空間分布が，距離減衰式ではどのように表わされるのかを調べる．ここでは，次の，Kanno et al.（2006），森川・他（2006）による距離減衰式を用いる．

$$\begin{aligned}\log PGA &= aM_W + bX - \log X + c + \log G + \log A_{new} + \log S_c \\ &= \log(pre) + \log G + \log A_{new} + \log S_c\end{aligned} \tag{1}$$

ここで，Xは震源距離，a，bおよびcは回帰係数，Gはサイト補正項，A_{new}は異常震域に関する補正項，S_cは地震タイプ（プレート間地震，スラブ内地震）に関する補正項である．この式は，震源が30 kmよりも深いプレート間地震とスラブ内地震を対象としたものであり，A_{new}

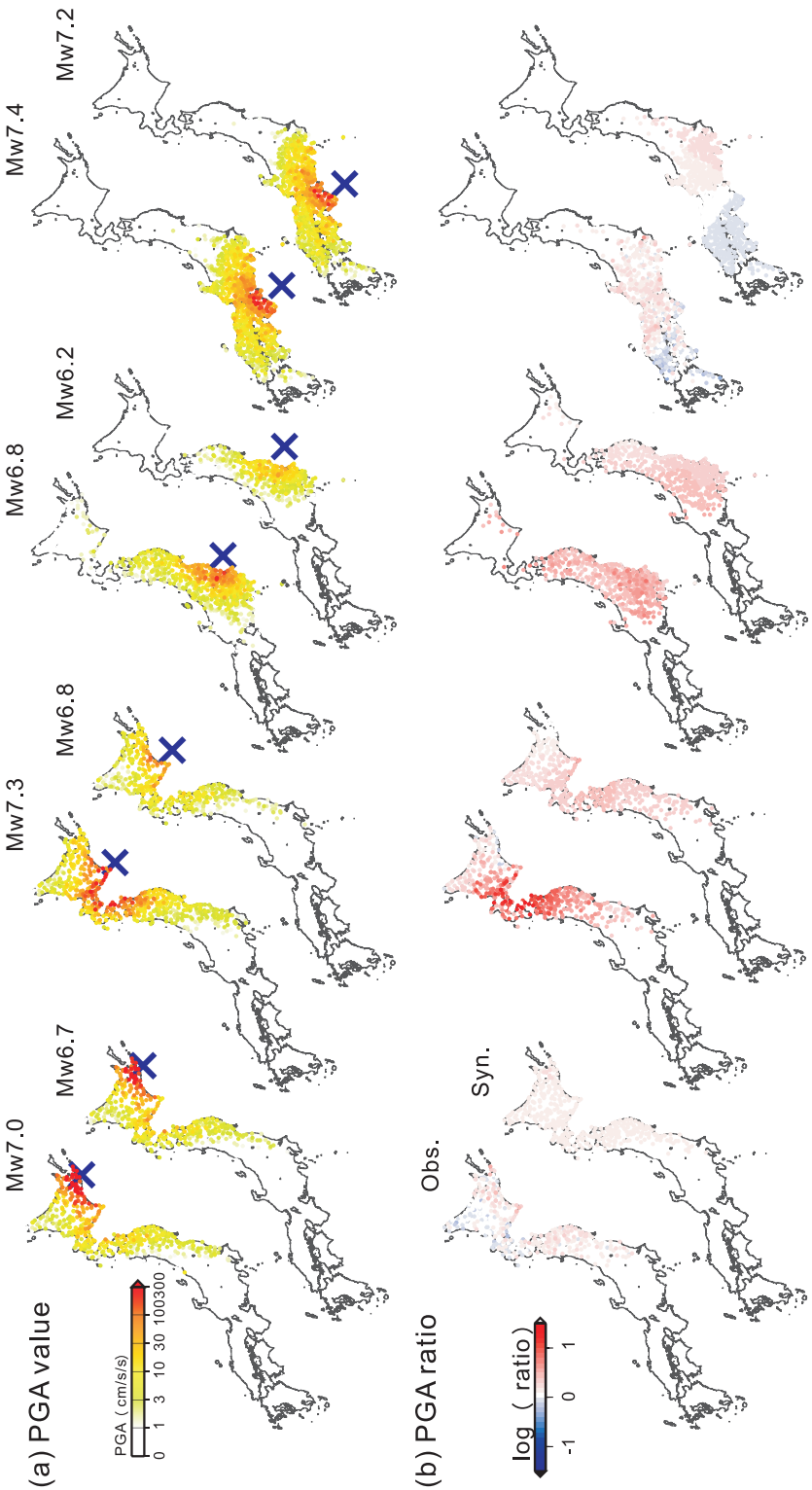

Fig. 2. (a) Spatial distribution maps of the PGA value for four couples of earthquakes occurring in Nemuro-oki (Nov. 29, 2004, M_w 7.0 and Dec. 6, 2004, M_w 6.7), Tokachi-oki (Sept. 26, 2003, M_w 7.3 and Sept. 11, 2008, M_w 6.8), Ibaraki-oki (May 8, 2008, M_w 6.8 and May 8, 2008, M_w 6.2), and Kii-oki (Sept. 5, 2004, M_w 7.4 and Sept. 5, 2004, M_w 7.2). Crosses indicate the epicenters. (b) Observed and synthetic spatial distribution maps of PGA ratio ([larger event]/[smaller event]) for the four pairs. Synthetic data is calculated by the empirical attenuation relationship (Kanno et al., 2006; Morikawa et al., 2006). The Tokachi-oki pair shows obvious azimuth dependency of observed PGA ratio compared with the synthetic one.

の計算には震源深さが必要である．気象庁一元化震源による最大余震の震源深さは21.4 kmであるが，本研究では深さを30.1 kmと仮定して(1)式を適用した．また，M_W 7前後の地震が含まれているが，点震源を仮定して震源距離を計算した．距離減衰式から予測されるPGA比の空間分布をFig. 2 bに示す．十勝沖の地震ペアは他の3組と比べて震源位置の違いが大きいため，距離減衰式による予測値も観測値と同様に方位依存性を示している．しかしながら，他の3組の観測PGA比が距離減衰式からの予測値と同程度であるのに対して，十勝沖では観測PGA比は予測値よりも明らかに大きく，十勝沖のペアの観測PGA比は特異であると考えられる．

Ⅲ．距離減衰関係

前節で示された十勝沖の地震ペアの特異なPGA比の成因について，本節では最大余震とその周辺で発生した M_W 6.0～6.8の3地震（Fig. 4）によるPGA値の距離減衰関係（Fig. 3 a）をもとに検討する．最大余震の距離減衰関係は他の地震と比べて震源距離が200～300 kmの範囲でばらつきが大きく，この距離範囲では方位依存性を示している．片岡（2005）では最大余震のPGA値に対するサイト特性の影響が指摘されているが，次のように2地震による同一観測点でのPGA比を計算することでその影響を回避する．

$$\frac{\left[\dfrac{obs(PGA_{ik})}{obs(PGA_{jk})}\right]}{\left[\dfrac{1}{calc(PGA_{jk})}\right]}=\frac{\left[\dfrac{(pre)_{ik}\times G_k\times(A_{new})_{ik}\times(S_c)_i}{(pre)_{jk}\times G_k\times(A_{new})_{jk}\times(S_c)_j}\right]}{\left[\dfrac{1}{(pre)_{jk}\times(A_{new})_{jk}\times(S_c)_j}\right]}=(pre)_{ik}\times(A_{new})_{ik}\times(S_c)_i \tag{2}$$

ここで，分子は k 観測点での2地震（i，j）による観測PGA比，分母の分母はサイト補正項を除いた j 地震に対する距離減衰式による予測値であり，式の上ではサイト特性が除去された i 地震による k 観測点でのPGA値が得られる．2007年2月17日の M_W 6.0の地震（Fig. 4，070217）を基準（j 地震）として求めた3地震の距離減衰関係をFig. 3 bに示す．サイト特性が除去されたことでFig. 3 aに見られたばらつきが改善されているが，最大余震の距離200～300 kmでのばらつきは依然として大きく，最大余震は他の地震と比べて特異なPGA値の距離減衰関係を有している．すなわち，前節で示された十勝沖のペアの観測PGA比の特異性は，最大余震の持つ特異性によるものであると考えられる．また，これらの地震の震源は近接しており，伝播経路はほぼ共通しているので，最大余震のPGA値のばらつきは震源特性に起因していると考えられる．

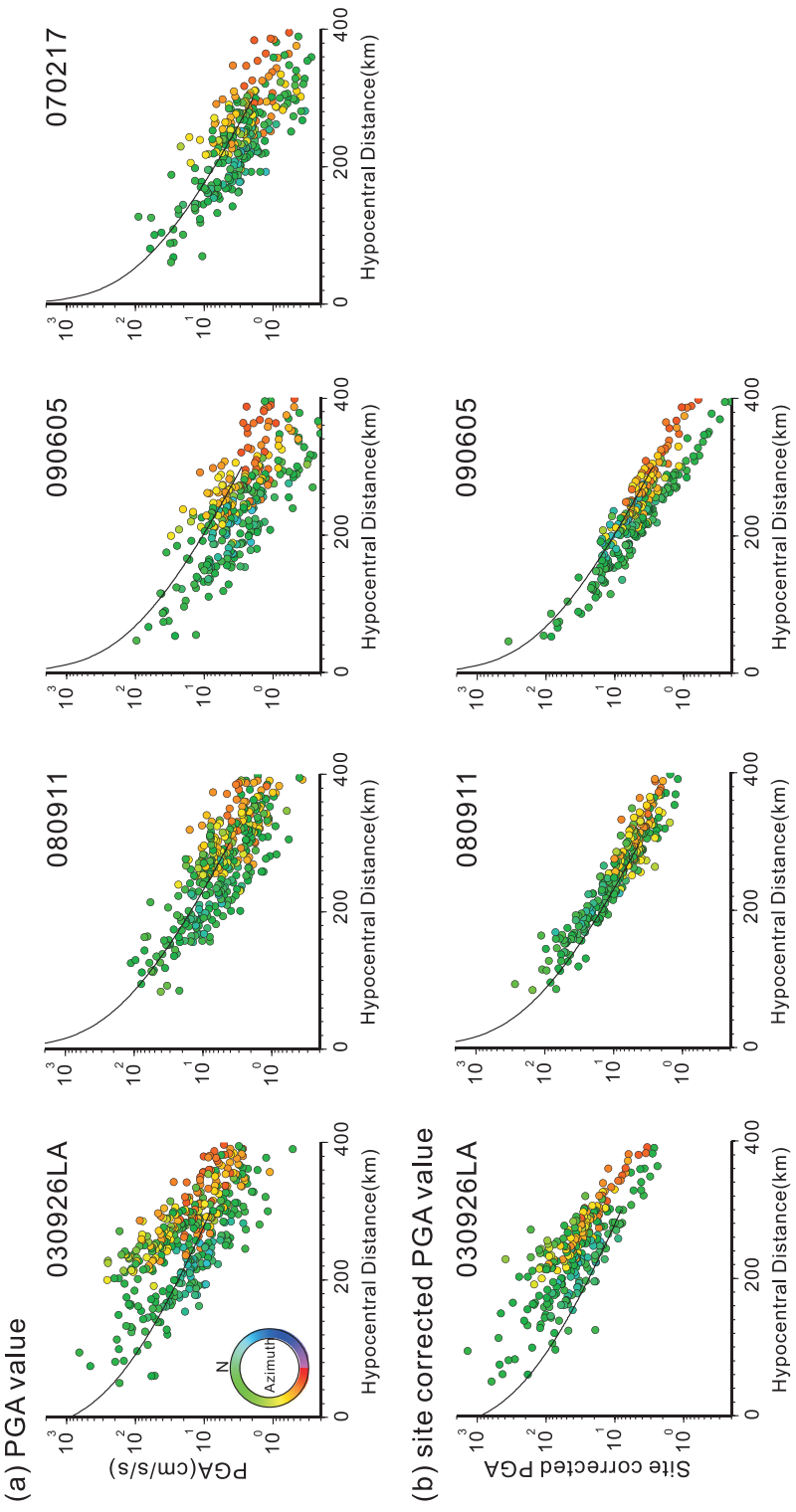

Fig. 3. (a) Attenuation relationships of the PGA value for the largest aftershock and three earthquakes occurring around the largest aftershock (Fig. 4). Color scale indicates epicenter-to-station azimuth. Solid curves show the empirical attenuation relationship. (b) Attenuation relationships of a site-corrected PGA value calculated using eq. (2). The site-corrected PGA values of the largest aftershock show a large azimuth-dependent scattering at distances from 200 to 300 km, which indicates an anomalous character of largest-aftershock PGA value.

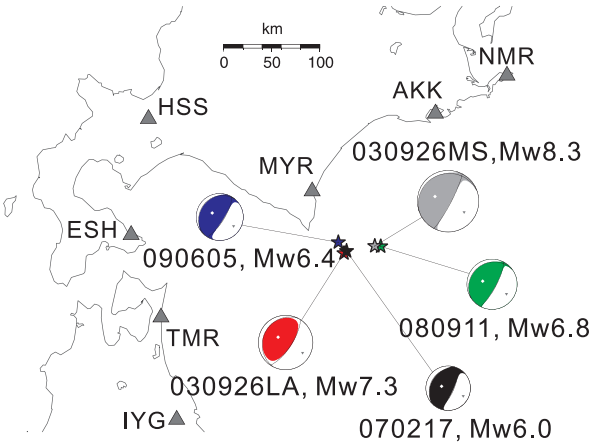

Fig. 4. Location map showing epicenters (solid stars) of the 2003 main shock (030926 MS), its largest aftershock (030926 LA), and three adjacent earthquakes (070217, 080911, 090605). Focal mechanism solutions determined by the Global CMT are also shown. Solid triangles indicate strong motion stations of Hokkaido University (NMR, AKK, MYR, and ESH) and National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (HSS, TMR, and IYG).

Ⅳ．フーリエスペクトルによる検討

ここまでの PGA 値を用いた検討から，最大余震の PGA 値分布の特異性は震源特性に起因していると推測される．そこで，本節ではフーリエスペクトルを用いて最大余震の震源特性について検討する．前節でも用いた最大余震の周辺で発生した M_W 6.0 ～ 6.8 の 3 地震を含む 4 地震（Fig. 4）に対して，硬質地盤上に設置された北海道大学と F-net の広帯域速度型強震計で記録されたＳ波を含む 60 秒間についてのフーリエスペクトルを求めた．そして，M_W 6.0 の地震を分母として同一観測点での 2 地震のＳ波スペクトル比をとることで伝播経路特性とサイト特性を相殺し，3 組の震源スペクトル比を求めた． Fig. 5 に震源スペクトル比を示す．震源スペクトルのスケーリング則（ω^{-2} モデル）によれば，同じ位置で発生した同じ震源メカニズム解を持つ大地震と小地震の震源スペクトル比は，応力降下量が等しければ，大地震のコーナー周波数よりも低周波数側では地震モーメント比に，小地震のコーナー周波数よりも高周波数側では地震モーメント比の1/3 乗になる．090605（M_W 6.4）と 080911（M_W 6.8）では，低周波数帯の振幅レベルは高周波数帯よりも大きく，震源スペクトル比の周波数特性はスケーリング則から予測される通りである．しかしながら，最大余震（030926 LA）の震源スペクトル比は，スケーリング則から予測される形状とは異なり，高周波数帯では低周波数帯と同程度の振幅を有している．また，090605 と 080911 では震源スペクトル比の方位依存性は認められないが，最大余震では周波数帯に依らず西側観測点の方が東側観測点よりもスペクトル比は大きい．特に，PGA 値に寄与している 1 Hz 以上の高周波数帯では，西側では東側に比べ約 10 倍大きな振幅を示し，最大余震の PGA 分布の特徴と良い対応を示している．

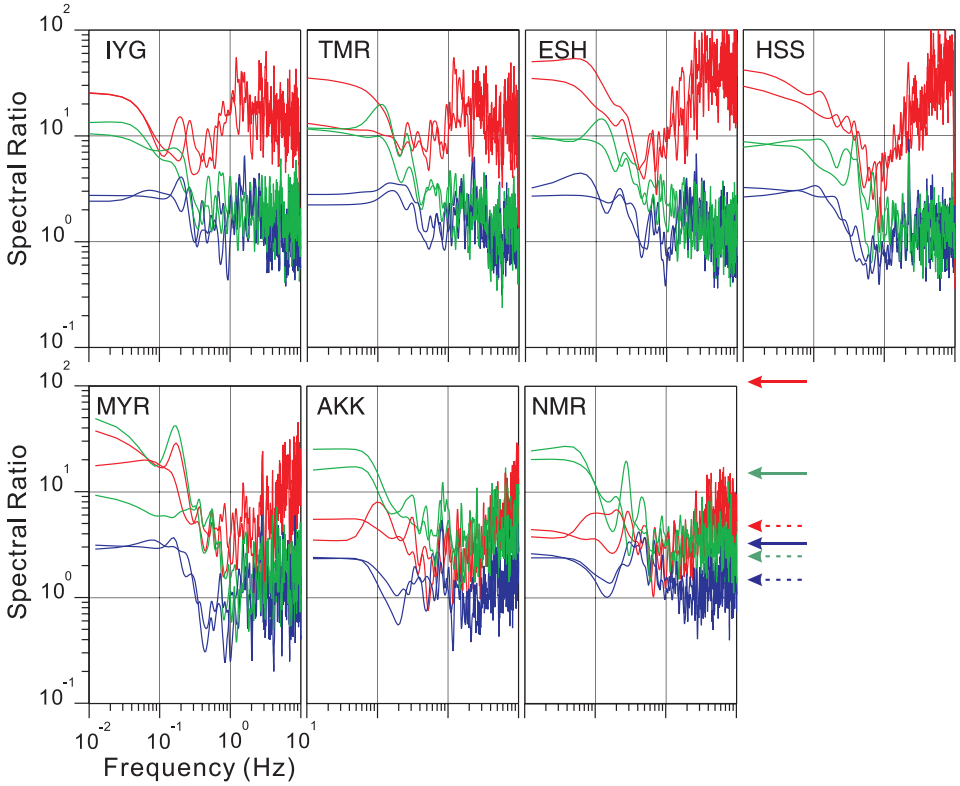

Fig. 5. Fourier spectral ratio at seven strong-motion stations shown in Fig. 4. Red, green and blue lines show spectral ratio of 030926 LA, 080911, and 090605 events to 070217 event (Fig. 4), respectively. Solid and dashed arrows indicate M_0/m_0 and $((M_0/m_0)^{1/3})$, respectively; M_0 and m_0 are seismic moment of numerator and denominator events of the spectral ratio, respectively. Fourier spectra are calculated using two horizontal-component velocity seismograms for 60-sec time window including S-wave. Spectral ratio of the largest aftershock (030926 LA) to the 070217 event shows azimuth dependency at higher frequencies than 1 Hz.

方位依存性が最大余震に対する震源スペクトル比だけに現れていることから，方位依存性は最大余震の震源特性に起因していると考えられる．前田・笹谷（2004）では，PGA 値の方位依存性が破壊の指向性（ディレクティビティ）などの震源特性を反映した現象であると指摘しているが，震源での地震波放射特性は高周波数帯ほど等方的になるので，最大余震の高周波数振幅レベルの方位依存性をラディエーションパターンやディレクティビティによって簡単に説明することはできない．

V．議　論・結　論

最大余震のPGA値のばらつきの要因として，最大余震とほぼ同時刻に別の場所で地震が発生していたと仮定する．ここでは，十勝沖と同時に⑴恵山沖（42.0°N，141.5°E，深さ82.5 km，Mw 6.2，スラブ内地震），⑵浦河沖（42.0°N，142.5°E，深さ42 km，M_W 7.1，プレート間地震），⑶青森県東方沖（41.5°N，142.0°E，深さ48.5 km，M_W 6.5，プレート間地震）で第2の地震が発生した場合のPGA値を距離減衰式に基づいて求め，観測値の距離減衰関係，空間分布の特徴が再現されるかどうかを調べる．

2地震によるPGA値の評価は，個々の地震による寄与が重ならないものとして行う．すなわち，距離減衰式により，ある観測点での2地震それぞれによるPGA値を求め，値の大きな方をその観測点での予測PGA値とする．本検討では第2震源を置くことで観測値を説明できるかどうかを確認することが目的であり，第2震源の正確な位置を推定することが目的ではないので，第2震源の震央は適当に与え，震源深さはKatsumata et al.(2003)による二重深発地震面の深さを参考に設定した．ただし，M_Wは観測値との比較から試行錯誤的に決めた．なお，最大余震についてはⅡ節と同じ条件で計算した．Fig. 6に観測値と予測値の比較を示す．観測PGA値は⑵式から求めたサイト特性が補正された最大余震のPGA値である．Fig. 6では，2008年9月11日のM_W 6.8の地震（Fig. 4，080911）を基準地震とすることで，Fig. 3 bよりも多くのPGA値を使用している．最大余震よりも西側に第2震源を置いたことにより，北海道西部から東北にかけての地域では第2震源がPGA値を与えている．観測値と予測値の比には距離や方位に対する依存性は認められず，空間分布，距離減衰関係ともに観測値の特徴がよく再現されている．

二つの地震がほぼ同時に発生したと仮定することで，最大余震の特異なPGA分布を説明することはできたが，先に述べたとおり，本節での検討は第2震源を置くことで観測値を説明できるかどうかを確かめることに主眼をおいており，それぞれの場所において，ここで示した規模の地震が実際に発生する可能性については考慮されていない．神田・武村（2006）による震度インバージョン解析によれば，最大余震では震源付近の他に浦河沖付近にも短周期発生域が推定されており，本研究の結果（Fig. 6 c）とも整合している．しかしながら，一般に震源インバージョン解析の結果は仮定した断層面の形状に強く依存するので，神田・武村（2006）の結果から第2震源の位置を浦河沖と断定するのは早計である．

二つの地震が起きていたとするならば，PGA値だけではなく時刻歴にもその影響が表れていると予想される．経験的グリーン関数法などの高周波数地震動を対象とした解析手法によって波形合成を行い，第2震源を仮定することでPGA値の分布だけではなく時刻歴やスペクトル（Fig. 5）も説明できるかどうかを検証すること，そして，第2震源の位置や規模をより詳細に検討することが今後の課題である．

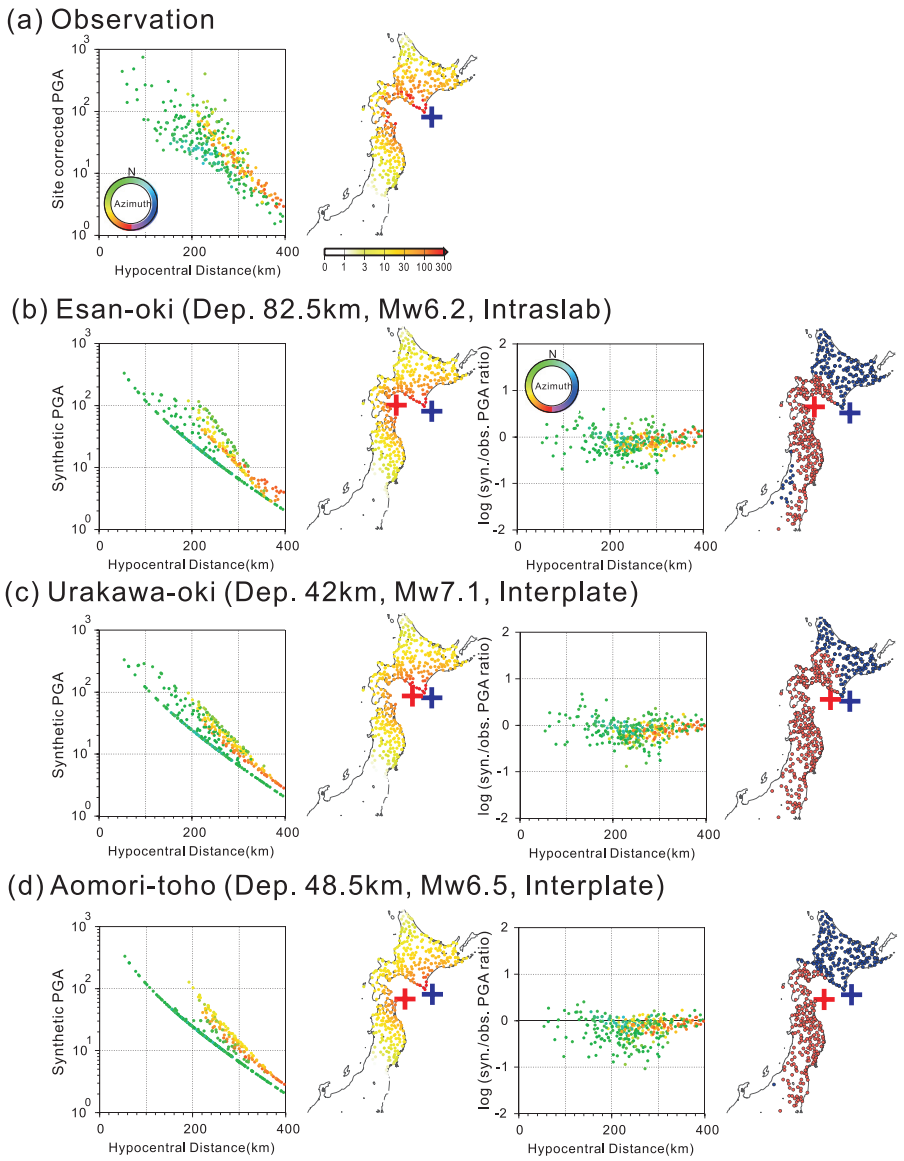

Fig. 6. We make a hypothesis that the azimuth dependency of largest-aftershock PGA values is an apparent one generated by two events occurring simultaneously at different regions. The hypothesis is confirmed by calculating synthetic PGA values from simultaneous events based on the empirical attenuation relationship; we assume that one event occurred in Tokachi-oki (the largest aftershock; blue cross) and another (red corss) occurred in (b) Esan-oki, (c) Urakawa-oki, and (d) Aomori-toho-oki regions. (a) Observed PGA spatial distribution map and attenuation relationship of the largest aftershock. From (b) to (d), the 1st and 2nd columns show synthetic PGA spatial distribution map and attenuation relationship, respectively. The 3rd column shows distance distribution of PGA ratio between observed and synthetic values. The 4th column shows dominant area of two events; blue and red circles indicate that the PGA value is recorded by the largest aftershock and hypothetical events, respectively.

謝辞　防災科学技術研究所のK-NET，KiK-net，F-netのデータを使用しました．北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センターによって設置，管理されている強震観測点の記録を使用しました．Global CMTによって決定されたCMT解と，気象庁一元化震源の震源情報を使用しました．一部の図は，GMT（Wessel and Smith, 1998）を用いて作成しました．記して感謝します．

文　献

神田克久・武村雅之，2006．十勝沖地震の震度インバージョン解析，月刊地球，号外 **55**，64-70．

Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara and Y. Fukushima, 2006. A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 879-897.

片岡俊一，2005．2003年十勝沖地震の余震地動の強さ，東北地域災害科学研究，**41**，49-54．

Katsumata, K., N. Wada and M. Kasahara, 2003. Newly imaged shape of the deep seismic zone within the subducting Pacific plate beneath the Hokkaido corner, Japan-Kurile arc-arc junction, *J. Geophys. Res.*, **108**, 2565, doi:10.1029/2002 JB 002175.

Macias, M., G. M. Atkinson and D. Motazedian, 2008. Ground-motion attenuation, source, and site effects for the 26 September 2003 M 8.1 Tokachi-oki earthquake sequence, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **98**, 1947-1963.

前田宜浩・笹谷努，2004．2003年十勝沖地震による強震動，北海道大学地球物理学研究報告，**67**，167-179．

森川信之・神野達夫・成田章・藤原広行・福島美光，2006．東北日本の異常震域に対応するための最大振幅および応答スペクトルの新たな距離減衰式補正係数，日本地震工学会論文集，**6**，23-41.

Wessel, P. and W. H. F. Smith, 1998. New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans AGU*, **79**, 579.

山中佳子，2004．長周期地震動から見た2003年十勝沖地震の震源モデル，月刊地球，号外 **49**，34-39．