

首都圏直下のやや深発の地震による強震動の方位依存性について

○大堀 道広¹⁾, 飯山かほり²⁾, 翠川 三郎³⁾, 三浦 弘之⁴⁾

- 1) 東京工業大学 総合理工学研究科 都市地震工学センター, ohori@enveng.titech.ac.jp
2) 東京工業大学 総合理工学研究科 都市地震工学センター, kiiyama@enveng.titech.ac.jp
3) 東京工業大学 総合理工学研究科 人間環境システム専攻, smidorik@enveng.titech.ac.jp
4) 東京工業大学 総合理工学研究科 都市地震工学センター, hmiura@enveng.titech.ac.jp

1 はじめに

2005年7月23日に発生した千葉県北西部を震源とする地震(M_j6.0, 深さ68 km)は, 首都圏の広い範囲に震度4の揺れをもたらす, 湾岸の埋立地や旧河川の後背湿地など地盤が軟らかい地点では震度5が記録されている^{1),2)}. 著者らはこの地震の震度分布に注目し, 特に震度4の領域が震源メカニズムによりS波が卓越すると予測される領域とよく一致することを指摘している^{3),4)}. 本研究では, この地震を含めて千葉県北西部で最近発生したやや深発の3地震について, 最大加速度・最大速度の空間的な分布とS波の理論放射特性との関係について考察するものである. 加えて, 様々な地盤条件を有する観測点で得られた強震記録を取り扱うことから, 表層地盤の増幅特性を特徴づける指標の一つとして多用されているAVS30(地表30 mの平均S波速度)を用いて, 上述の地震動特性を検討する.

ここで, 関東地方におけるやや深発の地震がもたらす地震動特性に関する既往の研究で本研究に関連の深いものとして, Nakanishi & Horie⁵⁾, Ohta et al.⁶⁾, 中村ら⁷⁾の研究を紹介する. Nakanishi & Horie⁵⁾は, 気象庁の震度分布が震央を中心に同心円状にならない異常な分布を示すことを指摘し, これを説明するためには放射特性のみでは十分ではなく, 関東地方の直下のQ値構造によって決定される地震波の減衰性を考慮する必要があると論じている. Ohta et al.⁶⁾らは, 岩盤上あるいは岩盤内の4観測点の地震記録を用いて, Transverse成分およびUD成分のそれぞれの最大加速度, 最大変位に見られる方位依存性がSH波およびP波のそれぞれの理論放射特性の違いにより説明できることを示している. ただし, 彼らが対象とした地震は, 本研究で対象としている千葉県北西部を震源とする地震とほぼ同位置のものを含んでいるが, 観測点は関東平野の周縁部に位置するため, 震央距離が60~130 km程度と大きくなり, 震央近傍の観測記録を用いた検討が行われていない. また, 地盤条件が良好な観測点のみが対象とされていることから, 彼らの研究は様々な地盤条件を有する観測点での記録を用いた形で発展させることが望まれる. 以上の2例は今日の充実した強震

観測網^{8),9)}が整備される以前の研究と位置づけられる. これに対して, 中村ら⁷⁾の研究では, 高密度な地震観測点より算定された震度分布を用いて, Q値構造の不均質性の観点からの検討が行われており, Nakanishi & Horie⁵⁾を進化させたものと位置づけられる. しかし, 彼らの研究では, 理論放射特性との関係については, 議論されていない. 以上より, 本研究は, Ohta et al.⁶⁾らの研究の延長線上にあると位置づけられる.

2 対象とする地震と観測点

本研究において対象とする地震の震央位置を図1に示す. 同図には, 防災科学技術研究所のF-net¹⁰⁾による震源メカニズム解を合わせて示している. 2005年7月23日の地震(Event 1)とその最大余震である2005年8月7日の地震[Event 2 (M_j4.7, 深さ62 km)]はともに低角逆断層型, 2006年2月1日の地震[Event 3 (M_j5.1, 深さ95 km)]は横ずれ型となっている. 従って, Event 1に対して, Event 2は震源メカニズムが同様の地震で, Event 3はEvent 1の結果を震源メカニズムの異なる地震で, それぞれ再現性を確認することを意図している.

図1には, 対象とする観測点の分布も示す. ここでは, K-NET⁸⁾, KiK-net⁹⁾を対象にEvent 1に関して震央距離100 km程度の観測点(図1に示す円内の観測点)を抽出した後に, 検討に応じてより震央に近い観測点を用いることにする. 同図中, 各観測点は, AVS30¹¹⁾を用いて4段階に分類して示している. なお, AVS30の算出は, PS検層データ^{8),9)}を用いて, 既往の研究に準じる^{11),12)}. また, PS検層データのない観測点は対象としないことを原則とするが, 東京都の湾岸部の観測点については, AVS30の回帰モデル¹³⁾に基づき算定し, 対象とする.

3 最大値の空間的な分布

まず, 震央を中心とする最大値の方位分布性状について観察する. 各観測点の強震記録を用いて水平2成分の同時性を考慮した最大加速度, 最大速度を算出し, さらに震源メカニズムに基づくS波の理論放射特性(SV波と

SH 波の放射係数の RMS 値、以下、S 波放射特性)を算出した上で、これらの振幅を用いて震央を中心とする 2 次元的な方位分布を描き、図 2~図 4 に示す。同図は、震源距離 50 km (Event 1, 2) もしくは 40 km (Event 3) 以内の観測点を対象に、それぞれの振幅 (最大加速度、最大速度、S 波放射特性)を原点 (震央) からの距離として描いている。ただし、最大加速度、最大速度に関しては、距離減衰式¹²⁾の減衰特性を用いて、震源距離 100 km に基準化している。これらの図より、いずれの地震に関しても、最大加速度および最大速度の震央を中心とする分布性状は S 波放射特性のそれと概ね調和的であることがわかる。Event 1, 2 では S 波放射特性は震央の東側で小さく、西側で大きくなる特徴が、Event 3 では S 波放射特性の振幅分布は震央の南側で小さく、北側で大きくなる特徴が見られる。こうした特徴は、最大加速度および最大速度の結果から読み取れる。なお、図面の掲載は割愛するが、Radial 成分、Transverse 成分に関して、図 2~図 4 と同様の方位分布を描いたものの、それぞれ SV 波、SH 波の理論放射特性との対応は良好ではなかった。今後、周期依存性を考慮した検討を行う必要があると考える。

次に、図 2~図 4 に示したデータを用いて、図 5, 6 に最大加速度および最大速度を S 波放射特性と比較して示す。Event 1, 2 の場合 [同図(a), (b)] において、S 波放射特性が 0.5~0.6 程度以上になると、AVS30 の大小によらず最大加速度、最大速度が大きくなる傾向が認められる。同様の傾向は、同図(c)に示す Event 3 の結果にも認められる。ただし、Event 3 は横ずれ型の震源メカニズムを有するため、射出角が大きいやや深発の地震の場合は震央付近で S 波放射特性が取り得る範囲が狭く、その値も全体的に小さい。以上より、震源メカニズムが本震 (Event 1) と同様の場合 (Event 2) にも異なる場合 (Event 3) にも、最大加速度、最大速度が S 波放射特性に依存する傾向が認められた点を強調しておく。

続いて、図 1 に示す全観測点について、最大加速度、最大速度の観測値と距離減衰式¹²⁾より算出される計算値との比 (観測値/計算値) を取り、震央からの方位角 (北方向から時計回り) に対する分布として描き、図 7 に示す。同図には S 波放射特性の方位分布も重ね書きしている。利用した距離減衰式¹²⁾ は様々な地震を対象に導かれたものであり、個別の地震を対象とするものではないことや、特に Event 2, 3 は地震規模が小さいことからその適用範囲を超えている面もあり、振幅レベルに違いが認められるものの、いずれの地震においても、最大加速度、最大速度のそれぞれの比の方位方向の変化には S 波放射特性のそれと調和的な特徴が認められる。

引き続き、図 7 に示した結果をもとに、最大加速度および最大速度の観測値と計算値との比 (観測値/計算値) と、AVS30 および S 波放射特性との関係を探ることにする。まず、各地震ごとに全観測点の観測値/計算値

の比を用いて平均値と標準偏差を算出する。次に、平均値+標準偏差、平均値、平均値-標準偏差、以上の三つをしきい値として、各観測点の観測値/計算値の比を 4 分類し、これを AVS30 と S 波放射特性との平面上に 4 種類のシンボルを用いて重ね書きする。こうして得られた結果を図 8, 図 9 に示す。同図において、観測値/計算値の比が相対的に大きい場合 (<平均値+標準偏差>以上) に着目する。Event 1, 2 においては、観測値/計算値の比が大きい観測点は、S 波放射特性が 0.5 以上、AVS30 が 400m/s 以下の範囲に分布している。総じて、AVS30 が小さく S 波放射特性が大きい場合に、観測値/計算値の比が大きくなる傾向が認められる。一方、Event 3 の場合には、他の 2 地震よりも複雑となり、観測値/計算値の比が大きい観測点は、S 波放射特性が 0.25~0.6、AVS30 が 600m/s 以下の範囲に分布している。観測値/計算値の比と S 波放射特性および AVS30 との関係が明瞭でない観測点が認められることから、観測点固有の揺れやすさ、揺れ難さが示唆される。

最後に、図 1 に示す全観測点について、加速度について Radial 成分と Transverse 成分のそれぞれの最大値の比 (R/T 比) を算出し、これらを理論放射特性における SV 波と SH 波の絶対値振幅比 (SV/SH 比) と比較し、Fig. 8 に示す。なお、作図上の都合により、R/T 比と SV/SH 比にはそれぞれ 4, 8 の上限を設定している。図 10 より、いずれの地震に関しても、多くの観測点で R/T 比は SV/SH 比によらずに概ね 1 程度と言えそうである。図面の掲載は割愛するが、最大速度においても同様の特徴が認められる。

4 考察

S 波放射特性の高周波数側での限界に関しては、震源近傍における密度の高い地震観測網により得られた記録を用いた Liu and Helmberger¹⁴⁾の先駆的な研究がある。彼らは、震源近傍の多数の観測記録を用いて、鉛直横ずれ断層が特徴づける理論放射特性が形作る 4 枚の花びら型の方位分布を Radial 成分と Transverse 成分のそれぞれについて再現するとともに、その周波数依存性を指摘している。今日では全国的な強震観測網の整備が進んでいる (例えば 8),⁹⁾もの、震源近傍において彼らと同等の高密度の強震記録を得ることは容易ではない。このため、S 波放射特性の周波数依存性を指摘した彼らの方法は、観測点ごとの R/T 比と震源メカニズムにより決定される SV/SH 比との比較に置き換えられ、どのくらい高い周波数まで両者が一致するかが検討されてきている¹⁵⁾⁻¹⁸⁾。これまで広く共有されている認識として、数 Hz 以下までは R/T 比と SV/SH 比は一致するものの、周波数がさらに高くなるにつれて、そのような一致は見られなくなり、やがて R/T 比は 1 に近づくと受け止められている。これは、主に高周波数帯域を取り扱うスペクトル・インヴァージョ

ン¹⁹⁾や経験的グリーン関数法²⁰⁾などの解析における S 波放射特性を一定値とする取り扱いを支持する結果を与えている。

一方、本研究では、やや深発の地震に対する震央近傍の観測点において、最大加速度および最大速度と、S 波放射特性の空間分布との対応が確認されるとともに、さらに多くの観測点において加速度および速度の水平 2 成分の最大値が概ね一致することを確認された。今回の検討結果より、やや深発の地震がもたらす強震動には、震源メカニズムにより特徴付けられる S 波放射特性が、低い周波数帯域では SV 波、SH 波の違いを伴って、高い周波数帯域では SV 波と SH 波の 2 乗平均値として、方位依存性を有する形で現れるものと考えられる。これは、佐藤¹⁶⁾が仙台市とその周辺の地震記録を用いて提案した周波数依存性を考慮して S 波放射特性の経験的モデルの基本的な考え方を支持するものと言える。今後、S 波放射特性の周波数依存性に関する検討を行い、関東地方のやや深発の地震による地震動を予測する上で適切な S 波放射特性のモデル化を行いたい。

5 まとめ

千葉県北西部を震源とするやや深発の 3 地震が示す強震動の空間的な分布について、特に震源メカニズムにより決定される S 波放射特性との関係に着目した検討を行った。その結果、1) 震央を取り囲む観測点の振幅分布には、最大加速度、最大速度のいずれにおいても S 波放射特性に調和的な方位依存性が認められる、2) 多くの観測点において R/T 比は 1 に近く、SV/SH 比に依存する傾向は見られない、以上が確認された。今後観測記録の蓄積に伴い、地震動予測手法を高度化して行くための検討要因となり得ることが示唆される。そのためにも、今回やや深発の地震で得られた知見が、どのような地震（震央位置、震源の深さ、地震規模、震源メカニズムなど）に共通するのかが検討が必要である。

謝辞

本研究において、防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net の観測記録と F-net の震源メカニズム解を利用して頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁 : <http://www.jma.go.jp/jma/press/0507/23a/kaisetsu200507231815.pdf>.
- 2) 東京大学地震研究所強震動グループ : <http://taro.eri.u-tokyo.ac.jp/saigai/chiba/index.html>.
- 3) 大堀, 翠川, 高浜, 三浦 : 首都圏を揺さぶった M6 地震 (7 月 23 日千葉県北西部の地震), 東京工業大学都市地震工学センター, 第 7 回防災セミナー資料, 2006 年 1 月 24 日.
- 4) 大堀, 翠川, 三浦 : 千葉県北西部を震央とするやや深発の地震による強震動の方位依存性について, 日本地震工学シンポジウム論文集, 論文番号 31, pp.230-233, 2006 年 11 月.
- 5) Nakanishi, I. and A. Horie: Anomalous distributions of seismic intensities due to the descending Philippine Sea Plate beneath the southern Kanto district, Japan, J. Phys. Earth, 28, pp.333-360, 1980.
- 6) Ohta, T., Y. Koshida, and M. Takemura: Determinant of a peak acceleration value, Proc. of 3rd Microzonation, pp.495-506, 1982.
- 7) 防災科学技術研究所・強震観測網 : <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>.
- 8) 防災科学技術研究所・基盤強震観測網 : <http://www.kik-net.bosai.go.jp/k-net/>.
- 9) 中村 : 関東地域における異常震域現象及び三次元減衰構造, 日本地震工学会・年次大会, 2005 年.
- 10) 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/>.
- 11) 内山 : 地表の強震記録に基づく工学的基盤での応答スペクトルの評価とその距離減衰特性, 東京工業大学・学位論文, 2005 年 3 月.
- 12) 司, 翠川 : 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, pp.63-70, No.523, 1999 年.
- 13) 若松, 久保, 松岡, 長谷川, 杉浦 : 日本の地形・地盤デジタルマップ, 東大出版会, 2005 年 11 月. (シリアル番号 : JEGM12648)
- 14) Liu, H.-L. and D. V. Helmberger : The 23:19 aftershock of the 15 October 1979 Imperial Valley earthquake: more evidence for an asperity, BSSA, pp. 689-708. 1985.
- 15) 俣田, 二牟禮, 竹中 : マルチバンドパスフィルターを用いた S 波最大振幅解析による地震波放射特性の周波数依存性に関する考察, 地震学会・秋期講演集, P017, 1999 年.
- 16) Satoh, T.: Empirical frequency-dependent radiation pattern of the 1998 Miyagiken-Nanbu earthquake in Japan, BSSA, pp.1032-1039, 2002.
- 17) 大堀, 野畑, 村上 : 高周波数帯域 (1Hz 以上) での S 波放射特性の確認, 日本建築学会大会・学術講演梗概集, B-2 分冊, pp.143-144, 2002 年.
- 18) Matsushima, S. and T. Sato: Frequency, distance, and time dependence of radiation pattern characteristics of strong motions, Proc. of 11th JEES, Paper No. 106, 2002 年.
- 19) 岩田, 入倉 : 観測された地震波から, 震源特性・伝播経路特性及び観測点近傍の地盤特性を分離する試み, 地震 2, pp.579-593, 1986 年.
- 20) 引田・工藤 : 経験的グリーン関数法に基づく 1855 年安政江戸地震の震源パラメーターと地震動の推定, 日本建築学会構造系論文集, pp.63-70, No.546, 2001 年.

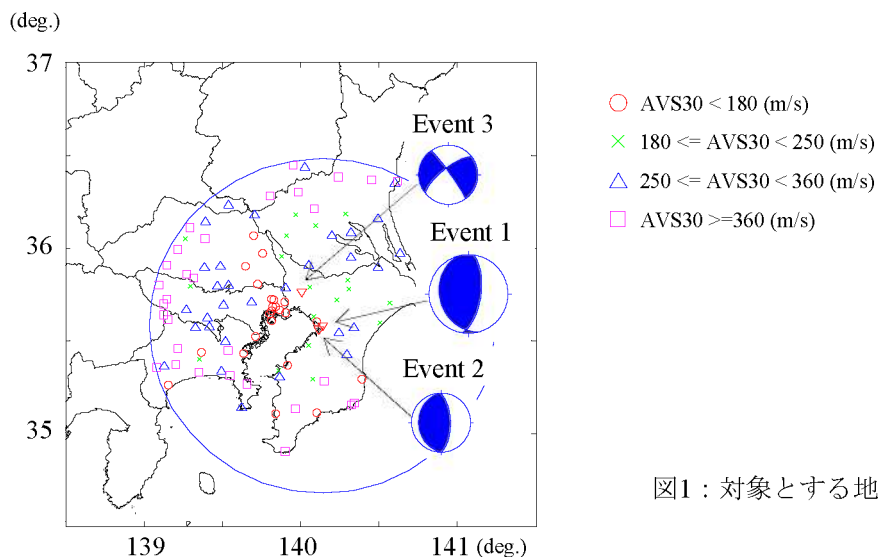


図1：対象とする地震と観測点の分布

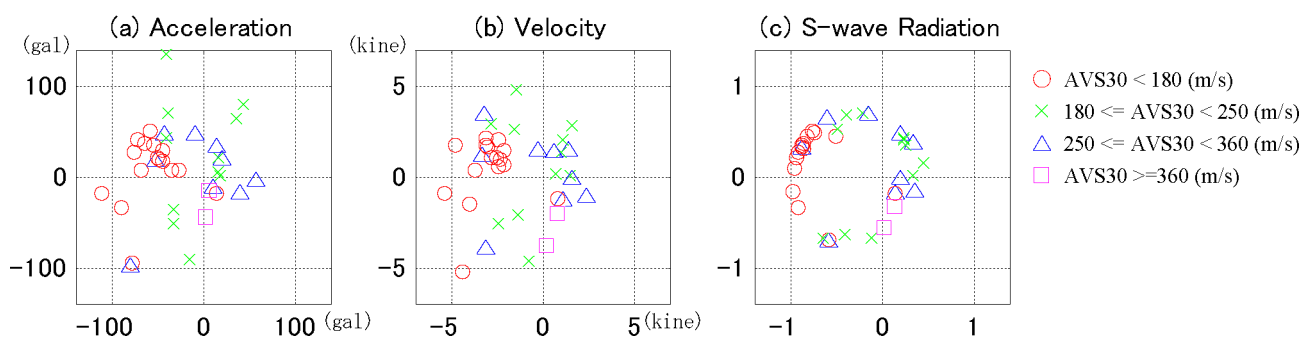


図2：最大加速度，最大速度，S波放射特性の方位分布（Event 1）

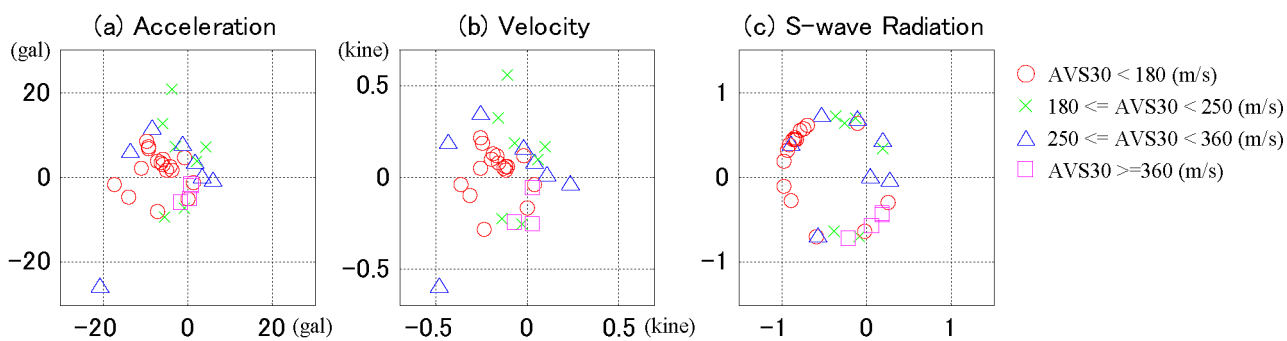


図3：最大加速度，最大速度，S波放射特性の方位分布（Event 2）

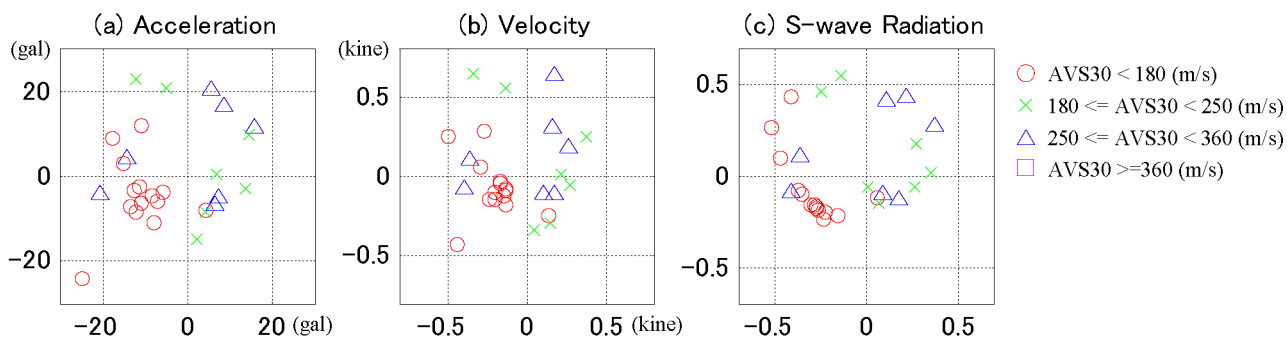


図4：最大加速度，最大速度，S波放射特性の方位分布（Event 3）

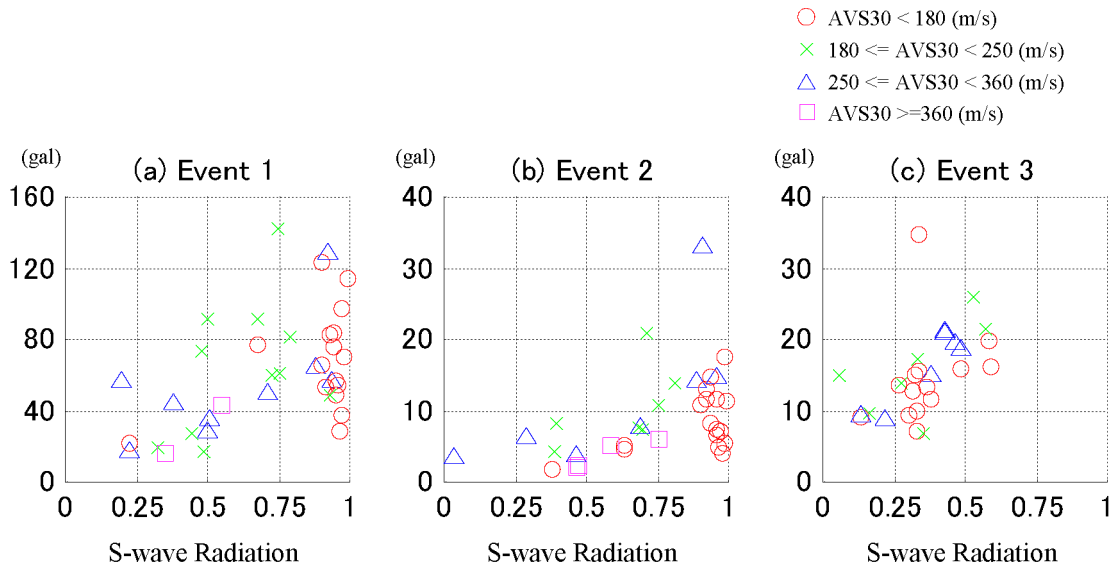


図5：S波放射特性と最大加速度との関係

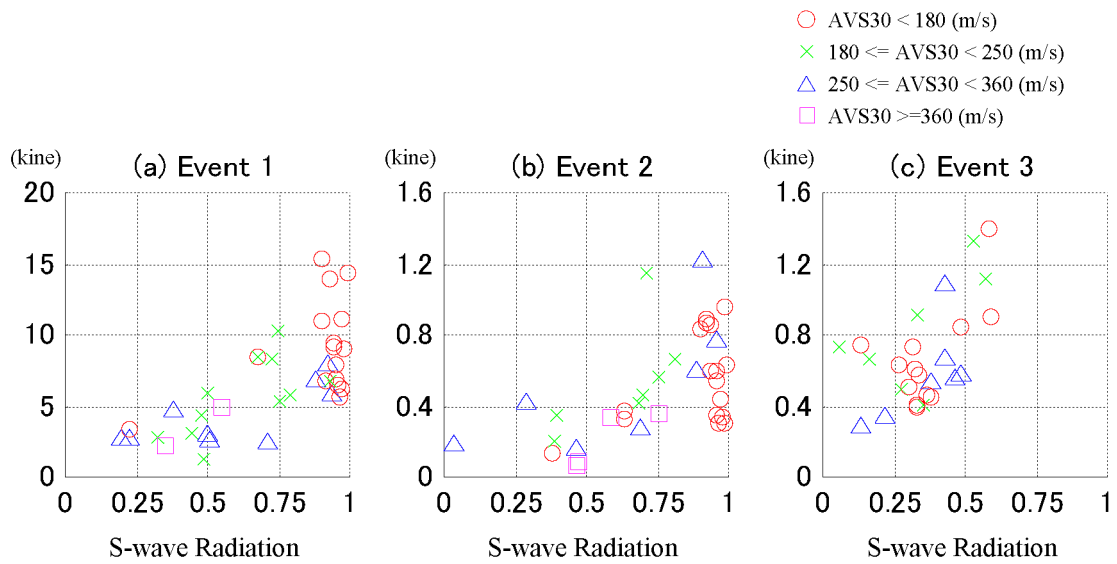


図6：S波放射特性と最大速度との関係

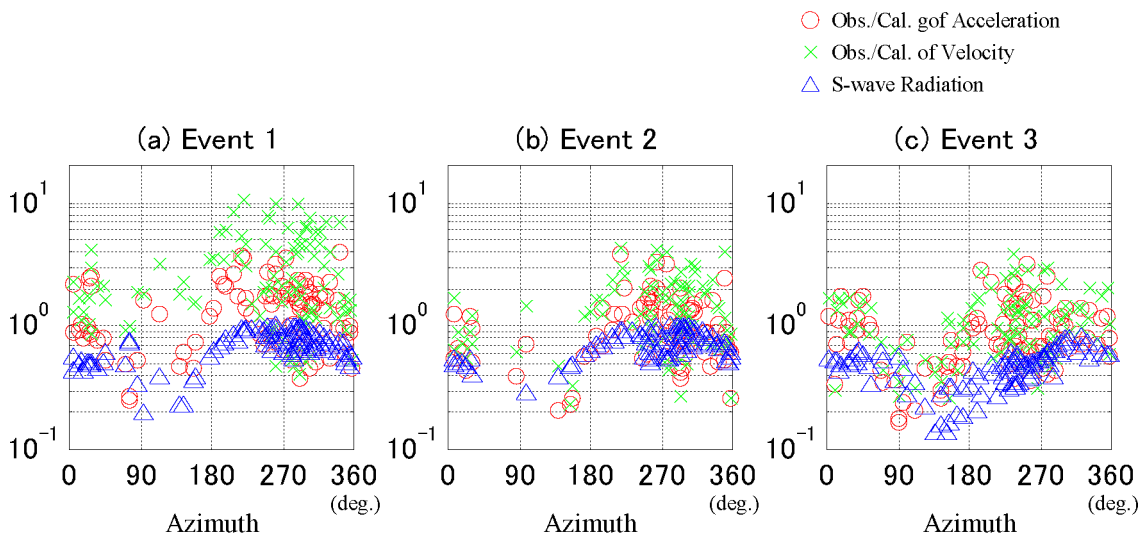


図7：最大加速度・最大速度の観測値と距離減衰式¹²⁾より算出される計算値の比（観測値／予測値）の方位依存性、およびおおよびS波放射特性の方位依存性

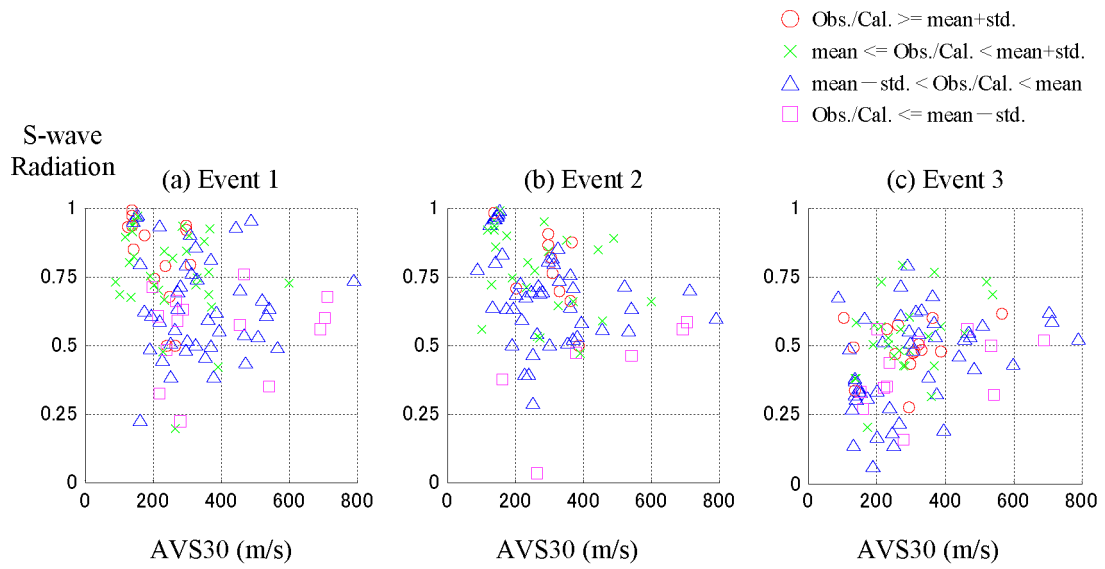


図8：AVS30とS波放射特性との平面上での最大加速度の比（観測値／予測値）の分布性状

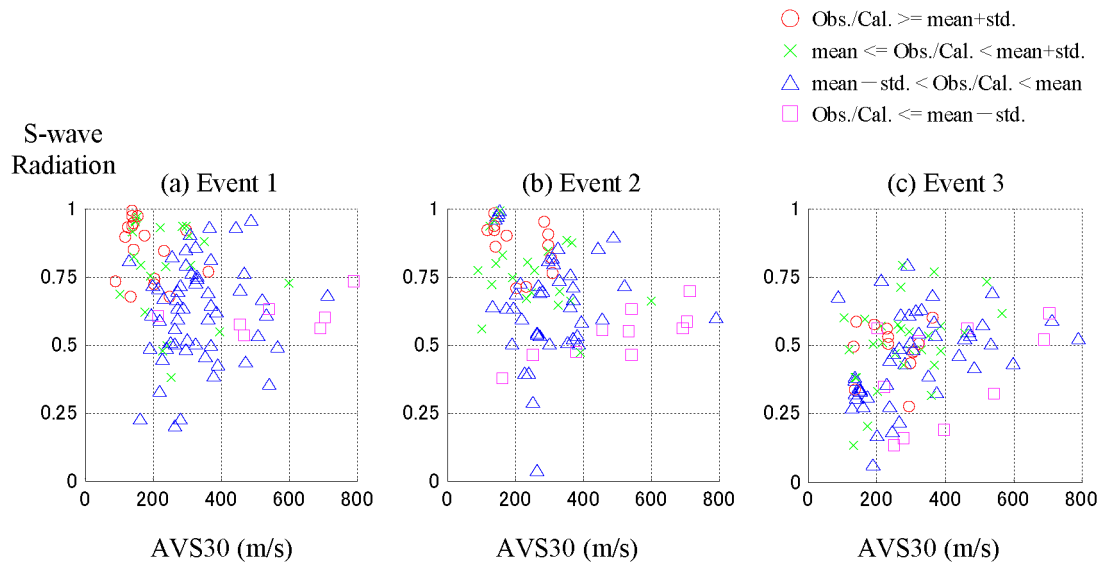


図9：AVS30とS波放射特性との平面上での最大速度の比（観測値／計算値）の分布性状

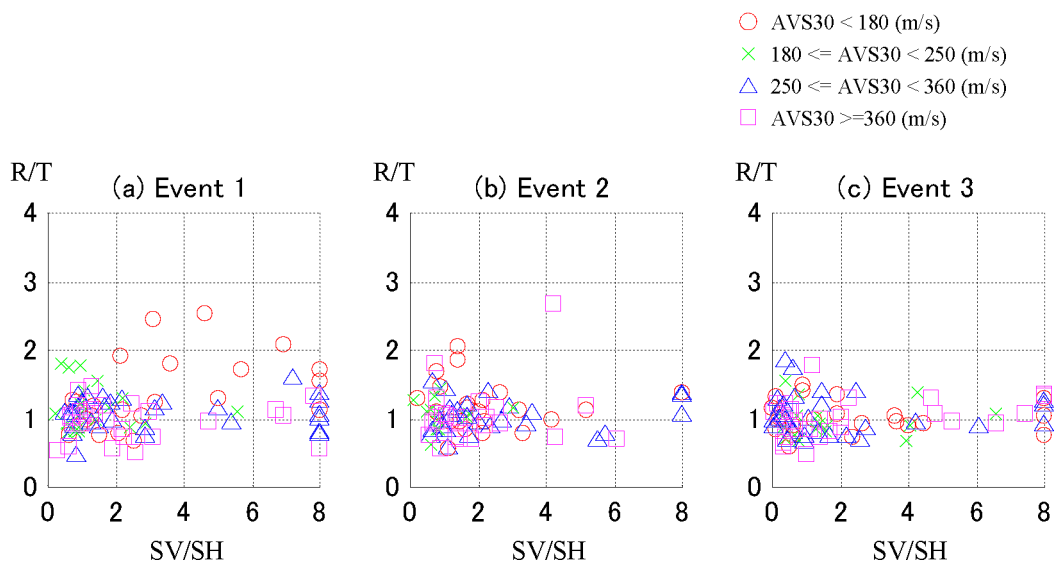


図10：SV/SH比（理論値）とR/T比（観測値）との関係