

中部・関東・東北南部における K-NET・KiK-net 地点のサイトファクターと 内陸地震の距離減衰特性

Relative Site Factors of K-NET and KiK-net Sites in the Chubu, Kanto and Southern Tohoku Regions and Attenuation Characteristics of Strong Ground Motions during Inland Earthquakes in and around the Regions

池 浦 友 則

要 約

中部、関東地方及び東北地方南部における地震動の距離減衰特性を明らかにするため、同地域の K-NET, KiK-net の隣接観測点 network を用いた広域相対サイトファクターの評価を行い、各観測地点の揺れ易さを調べた。また、その結果を用いて同地域で発生した内陸地殻内地震の観測記録から基盤地震動振幅を求め、その距離減衰特性を検討して同地域における距離減衰異常として波動伝播経路の不均質な減衰分布を検出した。その結果、飛騨山脈（立山・焼岳・乗鞍）、草津白根・浅間山、日光白根といった火山周辺において顕著な高減衰域、新潟県とその周辺で低減衰域が見出された。

目 次

- I. はじめに
- II. 相対サイトファクター (RSF) の評価
- III. 内陸地震による基盤地震動の距離減衰特性
- IV. 議 論
- V. おわりに

I. はじめに

地域の地震防災や構造物の耐震検討において、外力設定の基礎となる強震動の予測評価は、極めて重要なステップであり、高い評価精度が要求される。しかしながら、地震・地震動は極めてばらつきの大きな自然現象であるため、常に過去の地震の地震動記録を用いて慎重な検討を繰り返し、予測精度の向上を図ってゆくことが必要である。

地震動の予測精度は、(1) 震源特性：震源から放出された地震波の特徴、(2) 伝播経路特性：震源から放出された地震波がサイト直下に至るまでに次第に減衰してゆく特徴、(3) サイト特性：観測地点の直下に届いた地震波がサイトの地盤によってどれだけ増幅されるか、の3要素の予測精度に左右される。このうち、(1)の震源特性は、地震の発生現象と同様に不確実性が最も強い項目であり、現在でもなお正確な予測は難しいが、(2) 伝播経路特性や(3) サイト特性は現象としての再現性が高いため、過去の地震の経験をもとに確実に精度を向上させてゆくことができる。

そこで、筆者は、まずサイト特性を精度よく推定するために、隣接観測点のネットワークを用いた相対サイトファクター(RSF)評価法を考案し、これを東北地方太平洋側の K-NET, KiK-net 地点に適用した[池浦(2009)¹、池浦・加藤(2011)²]。また、その結果を用いて観測地震動から基盤地震動振幅を求め、その距離減衰特性を検討する手法を示した[池浦(2010)³]。その後も、中京地区[池浦(2010)⁴]、東北～関東地方[池浦・友澤(2012)⁵]、2007年3月能登半島沖地震($M_6.9$)[池浦(2013)⁶]、中部～近畿地方[池浦(2015)⁷]、中国・四国・九州地方[池浦(2016)⁸]に適用し、それぞれの地域で K-NET, KiK-net 地点の RSF を評価するとともに、その RSF を用いて周辺で発生していた地震による基盤地震動の距離減衰特性を検討している。

これらの検討を通じて言えることは震源距離に対する基盤地震動振幅の分布の特徴が地域毎、地震毎に顕著に異なるということであった。例えば、中国地方や東北地方太平洋岸の内陸地震では基盤地震動振幅の距離減衰分布が比較的よくまとまるのに対し、中部地方や九州地方では基盤地震動の距離減衰分布が非常に大きくばらつき、単に平均的な距離減衰特性を把握したところで個々の地震動評価における予測精度を向上させることは難しいことが予想された。

この原因としては、波動伝播経路の媒質の減衰性が地域毎に異なるという要因や、火山周辺における高減衰領域の存在などに代表される不均質な減衰構造の影響などが挙げられ

キーワード：地震，地震動，距離減衰特性，強震観測網，距離減衰異常，中部・関東・東北地方南部

Keywords: earthquake, seismic ground motions, attenuation characteristics, K-NET, KiK-net, attenuation anomaly, Chubu, Kanto and Southern Tohoku Regions

る。仮に距離減衰特性の地域性・不均質性が強いのであれば、全国平均の距離減衰特性を定めたとしても、それがそのまま各地で当てはまるとは考え難い。強震動予測の精度向上を図るには、むしろ地域毎に距離減衰特性を正確に把握し、それを再現する技術を磨く必要があるといえよう。

このような背景から、本研究では先の検討[池浦(2013)⁶⁾]で基盤地震動の距離減衰特性に大きなばらつきが認められ、その原因として火山帯周辺における高減衰域の影響が示唆された中部地方、および同様に火山帯の影響が想定される関東地方～東北地方南部を合わせた広い領域を対象に、K-NET・KiK-net 地点⁹⁾のRSFを評価し、その結果を用いてこの領域で発生した内陸地殻内地震による基盤地震動の距離減衰特性を検討した。また、その結果から、この領域における距離減衰異常(Attenuation Anomaly)として距離減衰特性の不均質分布を明らかにした。

II. 相対サイトファクター (RSF) の評価

1. 評価法

東北南部～関東～中部地方における K-NET・KiK-net 地点の相対サイトファクター(RSF)の評価は、池浦・加藤(2011)²⁾に倣い、隣接観測点ネットワークを用いた広域 RSF 評価法により行った。この方法は次の3つのステップで実施される。まず、(step1) 検討地域において離間距離約 25km 以内で隣接する 2 観測地点のペアでネットワークを構成する。次に、(step2) 各々の隣接 2 地点ペアで同時に観測した地震の観測記録を用いて 2 地点間の RSF をすべて求める。最後に、(step3) ネットワークの中から 1 地点を基準点を選び、すべてのペア地点間の RSF を同時に満足するように、最小二乗法で基準点に対する RSF を評価する。

このうち、(step2)において、隣接 2 地点ペアの RSF 評価で用いる地震については、①震源から 2 地点に伸ばした直線で作られる角が 5 度以内、② 2 地点における地震動最大振幅(PGA)が 100Gal 以下、③ 2 地点までの震源距離が 300km 以内の 3 つの条件を課している。①は地震基盤面入射波が 2 地点で共通する記録、②は表層地盤が概ね弾性応答状態であるような記録を選ぶことを狙っており、③は強震部分の地盤増幅特性を検討する目的から、非常に遠方の記録を除外するため設けたものである。また、個々の隣接地点ペアで同時観測記録から RSF を評価する際には次式の最小二乗法を実施した。

$$\ln[R_{A/Bk}(f)] = \ln[RSF_{A/B}(f)] - b(f)(r_{Ak} - r_{Bk}) \quad (1)$$

ただし、ここでは A, B 地点を隣接 2 地点ペアとしており、 r_{Ak} と r_{Bk} は A, B 地点における k 地震の震源距離、 $RSF_{A/B}(f)$ は B 地点に対する A 地点の RSF、 $b(f)$ は A, B 地点の周辺における距離減衰係数である。また、 $R_{A/Bk}(f)$ は k 地震における次式

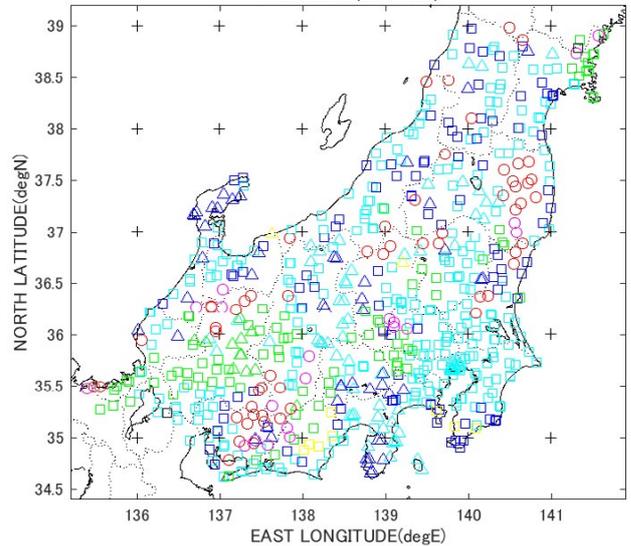
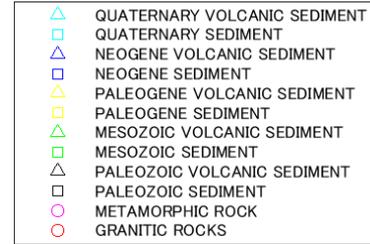


Fig.1 中部、関東、東北地方南部の K-NET, KiK-net 地点分布 (Distribution of K-NET and KiK-net Strong Motion Sites in the Chubu, Kanto and Southern Tohoku Regions)

の振幅比を表している。

$$R_{A/Bk}(f) = \{r_{Ak} S_{Ak}(f)\} / \{r_{Bk} S_{Bk}(f)\} \quad (2)$$

ここに、 $S_{Ak}(f)$, $S_{Bk}(f)$ は A, B 地点における k 地震の観測地震動スペクトル振幅である。

また、(step3)では、(step2)で求めたすべての隣接地点ペアの RSF を用いて次式を連立させ、最小二乗法を適用する。

$$\ln[RSF_{i/ref}(f)] - \ln[RSF_{j/ref}(f)] = \ln[RSF_{ij}(f)] \quad (3)$$

ただし、 $RSF_{i/ref}(f)$ と $RSF_{j/ref}(f)$ は基準点 ref に対する i 地点、 j 地点の RSF、 $RSF_{ij}(f)$ は (step2) で得られている j 地点に対する i 地点の RSF である。

この RSF 評価では、従来の距離減衰式の回帰分析による方法やスペクトルインバージョン解析による方法と異なり、広域の波動伝播経路における一定の距離減衰特性を a priori に仮定する必要がない。そのため、この RSF 評価法は、距離減衰特性の仮定で生じる誤差から解放されている、という点で従来法に比べ原理的に優れている。

2. 評価結果

さて、今回検討した K-NET, KiK-net 地点は東北南部～

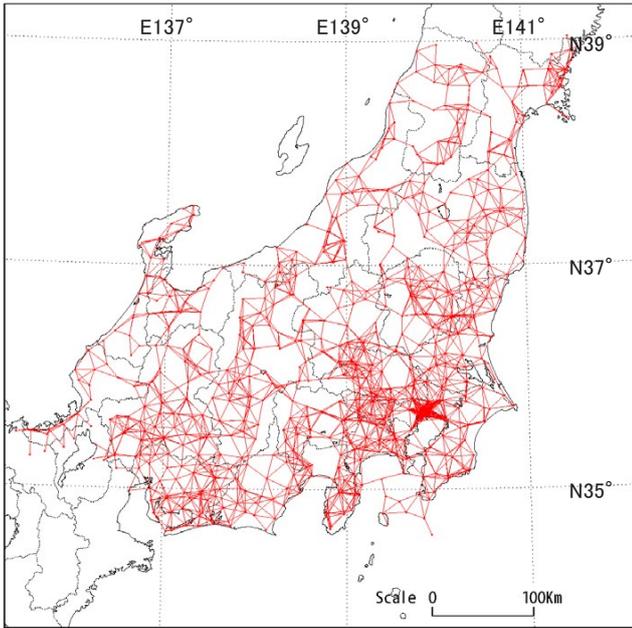


Fig.2 中部・関東・東北地方南部の K-NET, KiK-net 地点による隣接観測点ネットワーク (Adjacent Sites Network of K-NET and KiK-net Strong Motion Stations in the Chubu, Kanto and Southern Tohoku Regions)

関東～中部地方における 971 地点である。これらの地点を Fig.1 に示す。図では各地点の広域地質[地質調査所(1982)¹⁰⁾] を、花崗岩(Granitic Rock), 変成岩(Metamorphic Rock), 堆積岩(Sediment)に 3 分類し, さらに堆積岩を, 古生代(Paleozoic), 中生代(Mesozoic), 古第三紀(Paleogene), 新第三紀(Neogene), 第四紀(Quaternary)の 5 つの地質年代と, 水成堆積岩(Sediment), 火山性堆積岩(Volcanic Sediment)の形成条件で区別した。このうち, 花崗岩, 変成岩, 中生代以前の堆積岩が地震基盤相当の岩質にあたる。花崗岩・変成岩の地点は福島県東部, 愛知県北東部～長野県南西部, 岐阜県北部に分布する。また, 古生代堆積岩の地点は少ないが, 中生代堆積岩の地点は, 岐阜県を中心にその東西も含めて広く分布し, また, 東京・埼玉・山梨の都県境付近にも多い。

Fig.2 はこれらの地点の離間距離 25km 以下の 5345 ペア 971 地点を結んで構成したネットワークである。これらの 2 地点ペアでそれぞれ同時に観測した地震の観測記録を用いて 2 地点間の相対サイトファクターを評価した。その際に, 検討に用いたデータは K-NET, KiK-net の観測開始から 2016 年 6 月までの延 614332 地震, 1228664 記録 (正味 220029 記録, 6276 地震) である。それらの地震の震央分布を Fig.3 に示す。図では赤の■で観測地点の分布を示している。これらの地震の震央は東北地方～関東地方の太平洋側に集中する傾向があるが, 観測地点分布の全域をカバーする。

各隣接地点間でそれぞれこれらの地震の同時観測記録を用いて隣接地点間の RSF を求め, 次いで, それらの結果をもとに(3)式による最小二乗法で基準点に対する RSF を評価

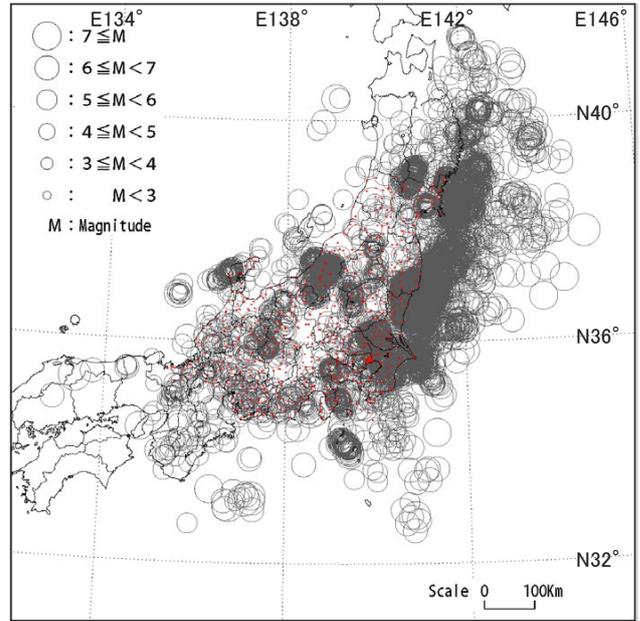


Fig.3 RSF の評価に用いた地震の震央分布 (Distribution of Epicenters of Events Used to Evaluate RSF)

Table 1 KiK-net 都幾川(SITH10)の地盤速度構造 (Velocity Profile of KiK-net Tokigawa Site)

層 No.	層厚 (m)	P 波速度 (m/s)	S 波速度 (m/s)
1	4	240	140
2	3	500	300
3	3	1800	750
4	10	3000	1450
5	28	4000	1700
6	24	4700	1800
7	20	4000	1400
8	—	4900	2500

した。なお, 基準点としては KiK-net 都幾川(SITH10)の地中観測点(GL-102m)を用いた。同地点の速度構造⁹⁾を Table 1 に示す。地中観測点は中生代三疊紀の岩盤($V_p=4.9\text{km/s}$, $V_s=2.5\text{km/s}$)の内部に位置しており, 地震基盤相当の観測点である。

本研究では以上の条件で周波数 0.3Hz～30Hz の範囲における水平動と上下動の RSF を評価した。また, この帯域を対数周波数で 8 等分して中心振動数 $f_c=0.4, 0.7, 1.3, 2.3, 4, 7, 13, 23\text{Hz}$ の帯域に分割し, 各々の帯域平均 RSF を求めた。K-NET および KiK-net 地表観測点を対象にして各帯域における水平動の RSF 分布を Fig.4 に示す。なお, カラーバーはいずれも 0.5 倍～32 倍の範囲を表している。

同図のうち, 低周波数帯域 ($f_c=0.4\text{Hz}, 0.7\text{Hz}$) の分布では, 沿岸部や関東平野で RSF が大きい特徴が認められる。また, 内陸部でも関東平野の北側から東北方面にかけての領域と北西部から上越方面にかけての領域でやや大きな RSF が線状に分布し, 平野部で低周波数帯域の RSF が大きくなる傾向が確認される。

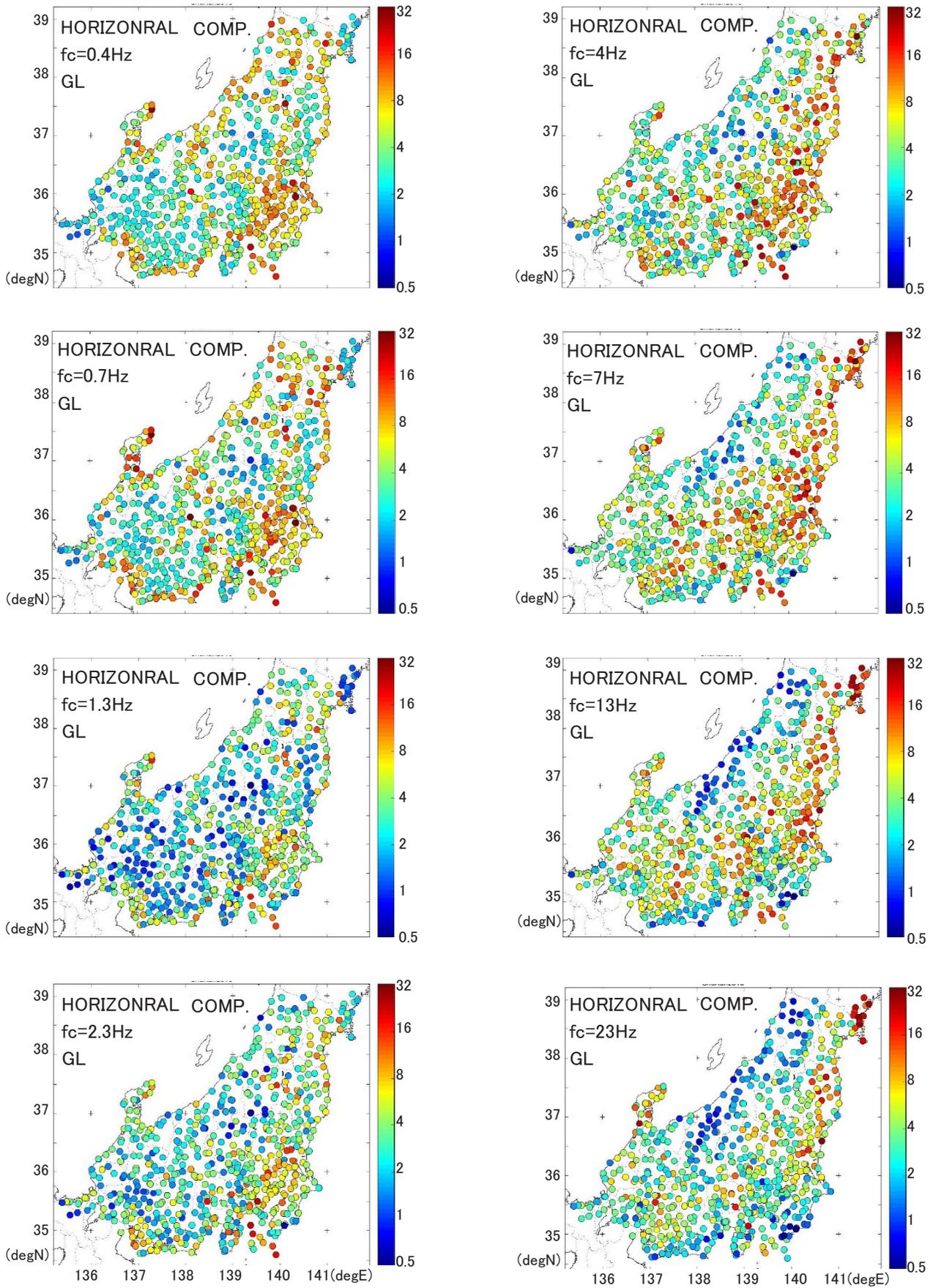


Fig.4 中部・関東・東北地方南部における K-NET, KiK-net 地点の周波数帯域別水平動 RSF の分布
(Distribution of Band Limited RSFs of K-NET and KiK-net Sites in the Chubu, Kanto and Southern Tohoku Regions)

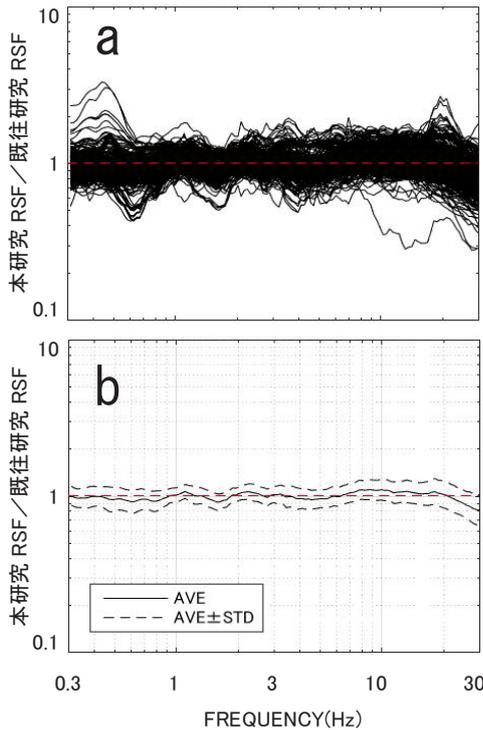


Fig.5 既往研究⁵⁾のRSFに対する本研究のRSFの倍率
(Ratios of Site Factors Evaluated in This Study to Previous Ones)

一方、高周波数帯域 ($f_c=13\text{Hz}, 23\text{Hz}$) の分布では、福島県東部～茨城県の内陸部、山梨県周辺、愛知県東部周辺で大きい。これらの領域は先に Fig.1 で指摘した花崗岩・変成岩および中生代以前の堆積岩などの地震基盤地点の分布に近い。また、山形県～新潟県とりわけ上越市付近で RSF が小さくなる傾向が顕著である。

3. 既往評価との対応関係

今回は中部地方、関東地方、東北地方南部の領域の K-NET, KiK-net 地点の RSF を評価したが、このうち関東地方、東北地方南部の K-NET, KiK-net 地点では池浦・友澤(2012)⁵⁾ によって KiK-net 都路(FKSH19)の地中観測点(GL-100m)を基準とした RSF が評価されている。そこで、両研究で共通に評価されている 528 観測点について、本研究の RSF から KiK-net 都路(FKSH19)の地中観測点を基準とした RSF を求め、池浦・友澤(2012)⁵⁾ による RSF と比較した。Fig.5a は両研究で共通に評価されている地点における(本研究の KiK-net 都路基準 RSF)/(池浦・友澤(2012)の KiK-net 都路基準 RSF)の倍率をすべて重ね書きした結果、Fig.5b はそれらの平均、平均±標準偏差の幅を求めた結果である。低周波数側と高周波数側の端部で違いがやや大きい例はあるが、平均するとほぼ 1 倍であり、2つの研究の RSF が概ね一致することが確認できる。

4. 広域地質分類と RSF の関係

RSF が地盤の地質条件とどのように対応するかを調べることは、地盤条件の観点から個々の地点の揺れ易さを考えるときの参考になる。そこで本研究で得られた RSF を広域

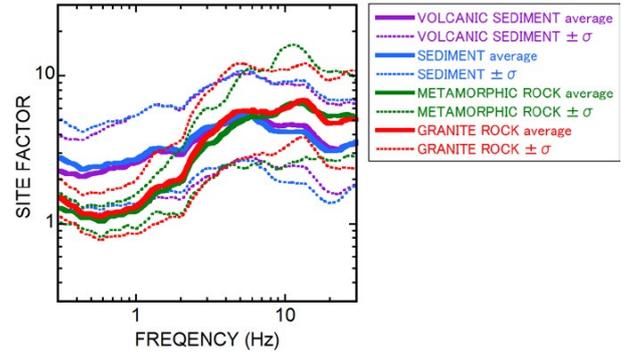


Fig.6 広域地質分類毎の平均 RSF の比較
(Comparison of Average RSF with Respect to Regional Geological Conditions)

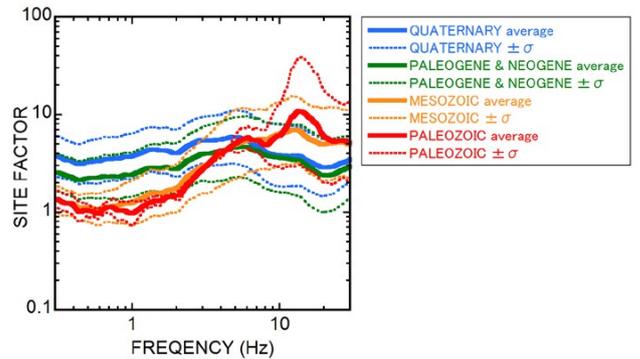


Fig.7 堆積層の地点における地質年代毎の平均 RSF の比較
(Comparison of Average RSF of Sedimentary Sites with Respect to Geological Ages)

地質との関係で整理した。Fig.6 では水平動の RSF について広域地質分類として花崗岩(Granitic Rock)、変成岩(Metamorphic Rock)、堆積層(Sediment)、火山性堆積層(Volcanic Sediment)の 4 種類を考え、それぞれ RSF の平均値と標準偏差の幅を求め、比較している。これによると、花崗岩と変成岩、堆積層と火山性堆積層の RSF がそれぞれほぼ同様の特徴を示し、低周波数領域では花崗岩≒変成岩<堆積岩≒火山性堆積岩であるが、周波数 5Hz 付近で逆転して、高周波数領域では花崗岩≒変成岩>堆積岩≒火山性堆積岩となる。

また、Fig.7 では、堆積層の地点に限り古生代(Paleozoic)、中生代(Mesozoic)、古第三紀と新第三紀(Paleogene & Neogene)、第四紀(Quaternary)の 4 つの地質年代に分けて、それぞれ平均 RSF を求め比較した。低周波数領域では古生代≒中生代<古第三紀と新第三紀<第四紀であるが、やはり周波数 5Hz 付近で大小関係が入れ替わり、高周波数領域では古生代>中生代>古第三紀と新第三紀≒第四紀となっている。このように、花崗岩類や中生代以前の堆積岩類といったいわゆる地震基盤相当の地点では、低周波数領域の RSF は小さいものの、高周波数領域の RSF が非常に大きくなることが多い。地震基盤相当のサイトでは、堆積層がほとんど無いため長周期成分の増幅は小さいが、軟弱な表層の直ぐ下に硬質な地盤があるこ

とが多く、最表層部で共振現象が生じ易い。その結果、高周波数領域のRSFが大きくなり易いと考えられている²⁾。

Ⅲ. 内陸地震による基盤地震動の距離減衰特性

1. 基盤地震動振幅の距離減衰分布

上記で評価したRSFを用いて中部・関東・東北地方南部で発生した地震によるK-NET, KiK-net地点の観測記録から基盤地震動振幅を評価し、距離減衰特性を検討した。

基盤地震動振幅は観測点毎に次式により評価した。

$$BRM_i(f) = OBS_i(f) / RSF_{i/ref}(f) \quad (4)$$

ここに、 $BRM_i(f)$ と $OBS_i(f)$ は地点*i*における基盤地震動振幅と観測地震動振幅である。なお、 $OBS_i(f)$ の計算ではS波の立ち上がり付近から約40s間のデータを用いることとした。

また、検討に用いた14地震をTable 2に示す。このうち、①2004年新潟県中越地震本震($M_16.8$)、⑥2007年能登半島の地震($M_16.9$)、⑦2007年新潟県中越沖地震($M_16.8$)、⑧2011年長野県北部の地震($M_16.7$)、⑨2011年静岡県東部の地震($M_16.4$)、⑫2011年福島県浜通の地震($M_17.0$)、⑬2013年栃木県北部の地震($M_16.3$)、⑭2014年長野県北部の地震($M_16.7$)について、いずれも $f_c=4\text{Hz}$ 付近の基盤地震動振幅の距離減衰分布をFig.8a~hに示す。なお、各図で、GLの記録から求めた基盤地震動振幅については、元記録のPGAが100Galを超える場合は、表層地盤応答の非線形化により(4)式による線形処理が誤差を生じる場合もあるため、'GL>100'として赤で示し、100Gal以下の場合を'GL<100'として青で区別した。また、地中記録からの評価結果は'DH'として黒で示している。

Fig.8aの①新潟県中越地方の地震では距離とともに概ね単調に減衰するが、Fig.8bの⑥能登半島の地震やFig.8fの⑩福島県浜通りの地震では震源距離30~100kmの範囲でほとんど

減衰せず、遠方になって急減する特徴を示す。

また、特にFig.8bの⑥能登半島の地震の場合100km以上の距離になると極端にばらつきが増加する。類似の特徴は、Fig.8gの⑬2013年栃木県北部の地震やFig.8hの⑭2014年長野県北部の地震でも30km前後の比較的近距离の領域から現れていることがわかる。

一方、Fig.8eの⑨静岡県東部の地震の場合はこれらの中間的な傾向であるが、この地震が富士山の直ぐ南側、すなわち富士火山帯内部で発生していることを考えると、予想外にばらつきが小さい。

2. 距離減衰異常の検討

さて、これらの距離減衰の特徴から中部・関東・東北南部における距離減衰特性の不均質性を検討する。この種の不均質減衰構造の推定は、スペクトルインバージョン解析の中で波動伝播領域をブロックに分割し、観測記録の振幅を再現するように各ブロックの減衰特性を逆算する、いわゆるブロックインバージョンによって行われてきた[例えば、中村(2009)¹¹⁾]。最近、友澤・池浦(2017)¹²⁾は、中部地方のブロックインバージョンにおいて、推定された減衰特性をもとに、隣接するブロックとの間で結果の差異に関する有意性判定を行い、有意な違いがない場合は2つのブロックを統合し、一方、有意な違いがある場合はそれぞれのブロックを再分割するという処理を加えながら、iterativeに波動伝播経路の不均質減衰モデルの領域分割を最適化していく方式を試みた。彼らの解析自体は、実体波と表面波を区別せずに扱っている点で物理的には課題があるものの、有意性に基づく領域分割最適化の考え方をブロックインバージョンに導入した時点で注目される。

とはいえ、ブロックインバージョンでは、一般に直達S波の波線を考え、それが通過するブロック毎に波動の伝播距離を算定してQ値の推定に用いるが、現実には散乱した波動場の影響を受けるため、必ずしも直達波線に沿った局所的な減衰性だけで地震動の振幅が決まるわけではない。また、直達S波の波線の設定に際して速度構造の不均質性が無視されることも多く、その結果、ブロック内における波動伝播距離の評価精度に疑問が残る場合がある。

これらのことを考えると、波動伝播経路に関しては、おおまかな直達波線を設定し、その周囲にある程度広がりを持たせて減衰特性の不均質性を検出する方式がより現実的なように思われる。また、それによって波線の不確かさが評価結果に及ぼす影響が低減できる可能性もあるだろう。そこで、波動伝播領域における不均質減衰分布を前提としつつ、暫定的に平均的な距離減衰特性を求め、その平均特性に対する各観測記録の残差を媒質の減衰特性の不均質性に起因する距離減衰異常(Attenuation Anomaly)として直達波線周辺の空間に分布させることを考えた。

Table 2 距離減衰特性の検討に用いた内陸地震
(List of Inland Earthquakes Used in This Analysis)

発生日-時刻	東経 (degE)	北緯 (degN)	深さ (km)	M_j	震源地
①2004/10/23-17:56	138.86717	37.29250	13.08	6.8	新潟県中越
②2004/10/23-18:03	138.98333	37.35400	9.38	6.3	新潟県中越
③2004/10/23-18:11	138.82950	37.25300	11.52	6.0	新潟県中越
④2004/10/23-18:34	138.93000	37.30633	14.17	6.5	新潟県中越
⑤2004/10/27-10:40	139.03333	37.29183	11.60	6.1	新潟県中越
⑥2007/03/25-09:41	136.68600	37.22067	10.70	6.9	能登半島
⑦2007/07/16-10:13	138.60950	37.55683	16.75	6.8	新潟県中越沖
⑧2011/03/12-03:59	138.59783	36.98600	8.38	6.7	長野県北部
⑨2011/03/15-22:31	138.71450	35.30950	14.31	6.4	静岡県東部
⑩2011/03/19-18:56	140.57150	36.78367	5.37	6.1	茨城県北部
⑪2011/03/23-07:12	140.78783	37.08483	7.60	6.0	福島県浜通
⑫2011/04/11-17:16	140.67267	36.94567	6.42	7.0	福島県浜通
⑬2013/02/25-16:23	139.41283	36.87367	2.84	6.3	栃木県北部
⑭2014/11/22-22:08	137.89100	36.69283	4.59	6.7	長野県北部

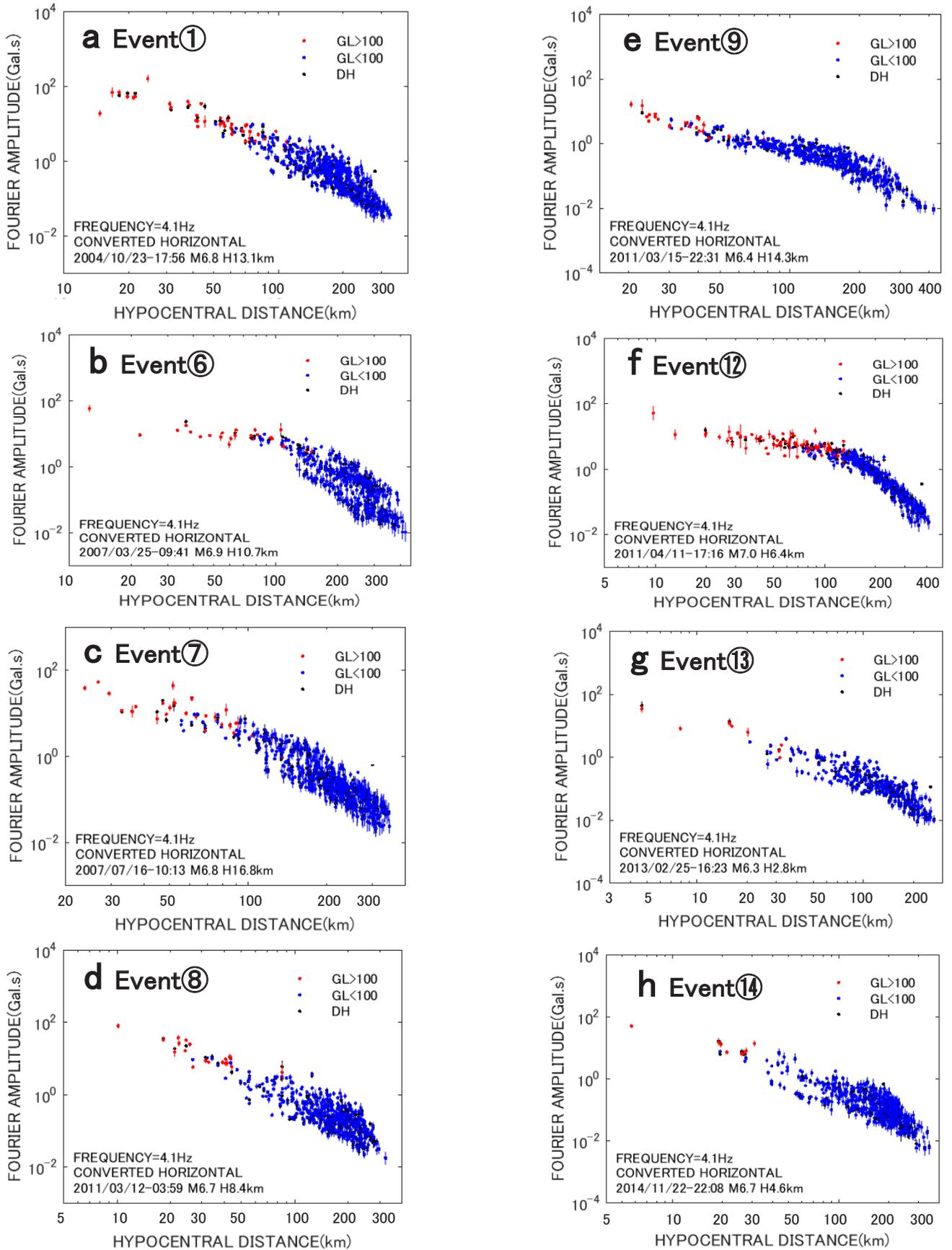


Fig.8 $f_c=4\text{Hz}$ の帯域における基盤地震動振幅の距離減衰分布
(Distribution of Bedrock-Motion Amplitudes around 4Hz)

(1) 平均的な距離減衰特性

まず m 地震 n 地点 ($m=1\sim M, n=1\sim N$)における基盤地震動振幅を $B_{mn}(f)$ とし、その距離減衰特性を次式でモデル化する。

$$\ln B_{mn}(f) = \sum_{i=1}^M c_i(f) \delta_{im} - b(f)r_{mn} - 0.5 \ln r_{mn} + \varepsilon_{mn}(f) \quad (5)$$

ただし、 $c_m(f)$ は地震 m の地震項、 $b(f)$ は全データ共通の距離減衰係数、 r_{mn} は地震 m 地点 n の記録の震源距離である。また、 $\varepsilon_{mn}(f)$ は地震 m 地点 n の記録における残差(誤差)、 δ_{im} は $i=m$ のとき 1, それ以外のとき 0 をとる変数である。

ここで、(5)式で表面波の幾何減衰を仮定している点について触れておこう。強震動のモデル化では直達 S 波の近似解が用いられることが多い。しかし、我が国の陸域における平均的な速度構造[例えば、上野他(2002)¹³⁾]を仮定すると、震源がごく浅い地殻内地震の場合は、震央距離が震源深さ h の 3 倍程度に達する位置で直達 S 波の透過率がほぼ 0 になる。そのため、それ以降は主要動が反射・屈折した S 波だけで構成されるようになり、さらに遠方では主要な成分が表面波として伝播していくこととなる。そこで、ここでは内陸地震の代表深さを 15km とし、 $r_{mn} \geq 3 \times h = 45\text{km}$ のデータを用いることを前提にして表面波の幾何減衰特性を仮定した(5)式を適用することとした。なお、遠方では強震動部分を解析対象とすることから $r_{mn} \leq 300\text{km}$ の制限を設けた。

Fig.9 は Table 2 の 14 地震による $f_c=4\text{Hz}$ の帯域の基盤地震動振幅で(5)式による回帰分析を行った結果であり、黒のドットがデータ、赤のドットが 14 個の地震についてそれぞれの平均的な距離減衰特性を表している。なお、平均的な距離減衰係数 $b(f)$ は 0.0139 であった。

また、Fig.10 では、 $f_c=4\text{Hz}$ の帯域において各地震について得られた定数項 $c_i(f)$ の値のマグニチュード M_j に対する関係を●で示している。同図では、参考のため最も低周波数側の $f_c=0.4\text{Hz}$ で得られた結果も○で示した。

これによると、 $c_i(f)$ はいずれの周波数帯域でも概ね M_j とともに増加するが、そのばらつきは $f_c=0.4\text{Hz}$ の帯域における $c_i(f)$ の方が小さい。これは $f_c=0.4\text{Hz}$ の帯域が M_j の決定周期 5~6s 程度(周波数 0.167~0.2Hz)に近いことを反映した特徴と考えられる。一方、 $f_c=4\text{Hz}$ の $c_i(f)$ の分布に注目すると、下側にやや外れた地震が 3 つあることがわかる。⑧と⑭は 2011 年と 2014 年の長野県北部の地震、⑬は 2013 年栃木県北部の地震であり、これらの地震では 4Hz 付近の周波数帯域における地震波の励起特性がほかの地震に比べてやや弱かったことを表しているように見える。しかし、これらの地震の場合、非常に近い位置にそれぞれ立山、草津白根、日光白根といった活火山が存在しており、たとえ震源からの地震波の励起特性が通常どおりだったとしても、火山周辺の高減衰効果によって見かけ上振幅が小さくなっている可能性がある。これら

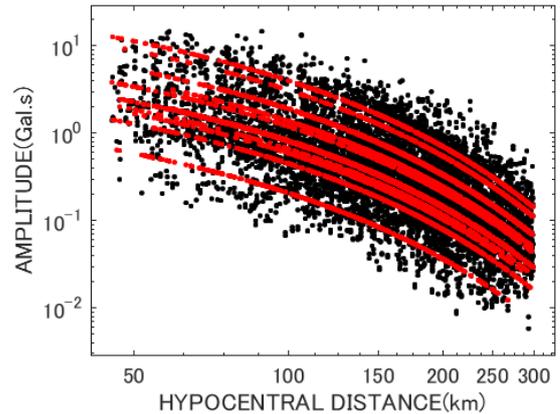


Fig.9 $f_c=4\text{Hz}$ の帯域における基盤地震動の距離減衰分布 (Attenuation Distribution of Bedrock Motions)

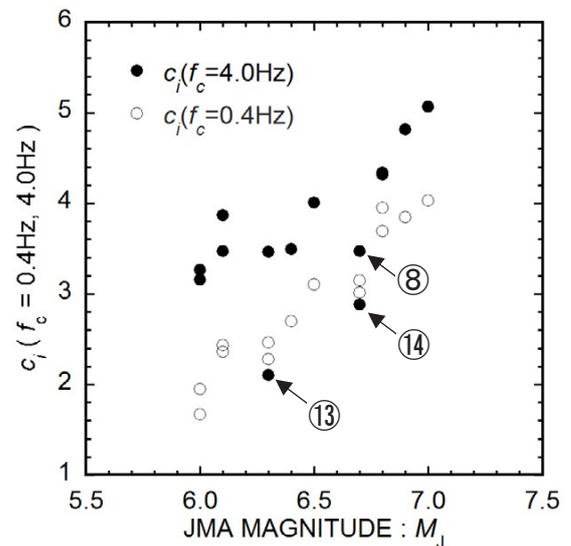


Fig.10 $f_c=4\text{Hz}$ の帯域における $c_i(f)$ と M_j の関係 (Relation between $c_i(f)$ and M_j)

の地震で震源からの短周期地震波の励起特性を見誤らないようにするには、震源周辺における距離減衰異常を正確に把握することが重要となってくる。

(2) 距離減衰異常のマッピング方法

距離減衰異常のマッピングでは、観測記録毎に残差 $\varepsilon_{mn}(f_c)$ から単位震源距離当たりの偏差(すなわち距離減衰係数の誤差)を求め、これを距離減衰異常のサンプルとして検討領域内の評価点に重みつきで配分し、評価点毎にすべてのデータにわたる距離減衰異常のサンプルの重み付き平均値を求め、距離減衰異常の分布を作る。

はじめに、Fig.9 に示した $f_c=4\text{Hz}$ の帯域において個々のデータの誤差が震源距離に対して系統的に変化していないことを確認しておく。Fig.11 は、Fig.9 をもとに、データ/回帰平均の倍率(残差倍率: $\exp[\varepsilon_{mn}(f_c)]$)を求め、震源距離に対する関係を示した結果である。これによると、残差倍率は最小 0.1

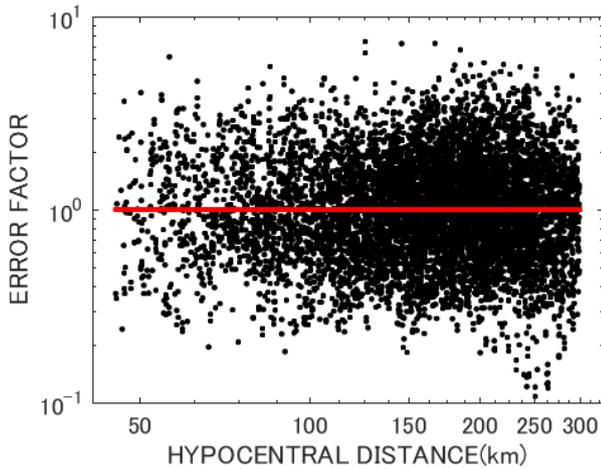


Fig.11 $f_c=4\text{Hz}$ の帯域における残差倍率の距離依存性 (Distribution of Residual Factors)

～最大 8 倍の範囲に分布するが、1/3～3 倍程度の誤差は全距離領域で概ね一様に生じていることがわかる。

さて、距離減衰異常のマッピングでは、まず、検討領域内の任意の位置に距離減衰異常の評価点を配置する。次に、地震 m 地点 n の地震動の残差 $\varepsilon_{mn}(f_c)$ について、距離減衰異常のサンプル $\Delta b_{mn}(f_c)$ を次式で表す。

$$\Delta b_{mn}(f_c) = \varepsilon_{mn}(f_c) / r_{mn} \quad (6)$$

また、この地震動の直達波線経路を L 個の点 $x_{mnl}(l=1\sim L)$ で代表させ、点 x_{mnl} から距離減衰異常の評価点までの距離を r_{mnl} として、(6)式の $\Delta b_{mn}(f_c)$ に対し r_{mnl} とともに減少する重み w_{mnl} を次式で与える。これは単純に波線経路から遠く離れた領域の減衰異常の影響を減じる措置である。したがって、 w_{mnl} の具体的な関数としては r_{mnl} に対する減少関数が多数候補になるが、ここでは単純に次式で与えることとした。

$$w_{mnl} = \exp[-\alpha r_{mnl}] \quad (7)$$

ここに、 α は距離による重みを制御するための正の定数である。

このとき、評価点における距離減衰異常 $AA(f_c)$ は、 $\Delta b_{mn}(f_c)$ の重み付き平均として、次式により与えられる。

$$AA(f_c) = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L \Delta b_{mn}(f_c) w_{mnl}}{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L w_{mnl}} \quad (8)$$

(3) 中部・関東・東北地方南部の距離減衰異常

この方法を、中部地方と関東地方を概ね含む東経 $136^\circ \sim 141^\circ$ 、北緯 $35^\circ \sim 38^\circ$ の範囲に適用した。対象領域を Fig.12 に示す。図中には検討に用いた 14 地震の震央(★)と距離減衰異常の評価点(●、東西 51 点×南北 41 点=2091 点)を示して

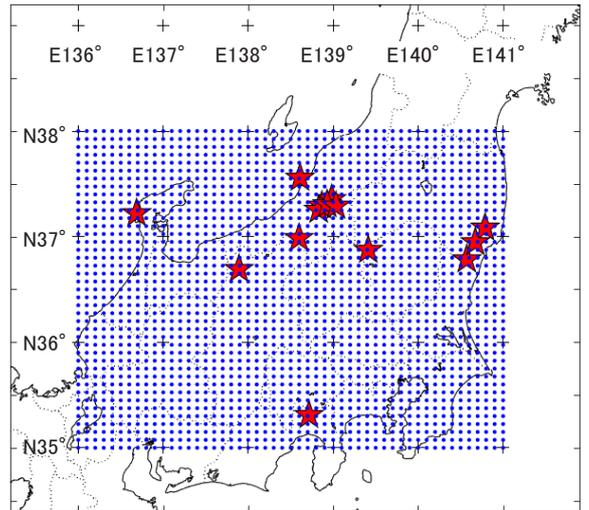


Fig.12 検討地震の震央と距離減衰異常の評価点分布 (Distributions of Epicenters and Estimation Points)

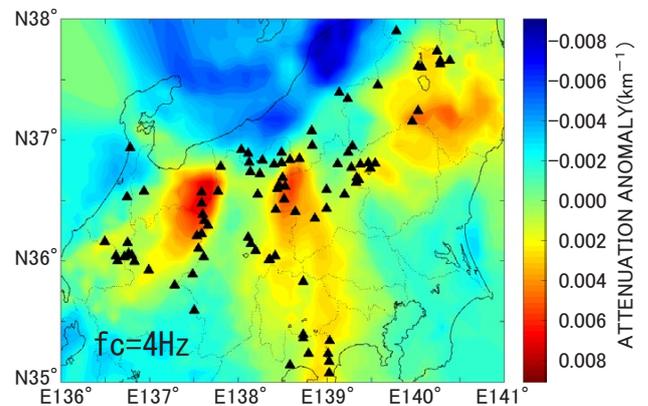


Fig.13 $f_c=4\text{Hz}$ の帯域における距離減衰異常の分布 (Distribution of Attenuation Anomaly of $f_c=4\text{Hz}$)

いる。直達波線経路としては単純に震源と観測地点を結ぶ直線を考え、代表点は $L=21$ として等間隔に配置した。

$f_c=4\text{Hz}$ の帯域について、重みの制御を $\alpha=0.3$ として評価した距離減衰異常(平均的な距離減衰係数からの偏差)の分布を Fig.13 に示す。図では、減衰が強い領域を暖色系で表し、逆に減衰が弱い領域を寒色系で表している。また、参考のために第四紀火山の位置¹⁴⁾も▲で示した。

これによると、富山・岐阜・長野の県境付近、長野・群馬県境付近、福島県南部に減衰効果が強い領域が認められ、それぞれ、立山・焼岳・乗鞍・御嶽山、草津白根・浅間山、那須岳といった活火山との関連が考えられる。なお、長野・群馬県境付近の高減衰域は、やや程度を弱めながらも埼玉県西部、山梨県東部を経て伊豆半島まで連なっており、これらと同程度の高減衰域は日光白根山がある栃木県北西部にも認められる。一方、新潟県とその北部では逆に減衰性が小さい。

なお、波動伝播経路から離れた日本海海域にも低減衰域が見られるが、これはこの領域に最も近い陸域(新潟県・山形県

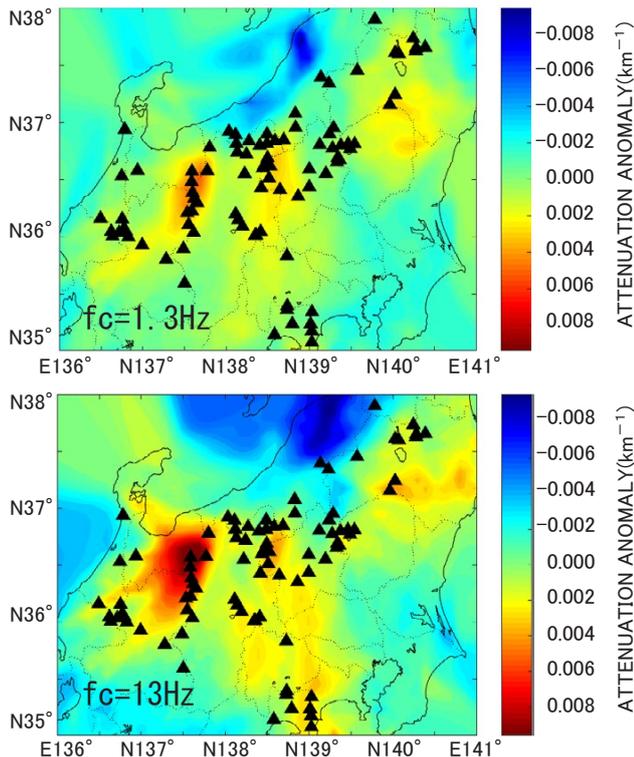


Fig.14 $f_c=1.3\text{Hz}$, 13Hz の帯域における距離減衰異常の分布 (Distribution of Attenuation Anomaly of $f_c=1.3\text{Hz}$ and 13Hz)

など、日本海沿岸部)における波線の低減衰特性を反映した結果であろう。

ほかの周波数帯域の距離減衰異常はどのような様相であろうか。Fig.14は $f_c=1.3\text{Hz}$, 13Hz の帯域についてFig.13と同様の検討を行った結果である。平均的な距離減衰係数 $b(f)$ はそれぞれ0.00718, 0.0203であった。 $f_c=4\text{Hz}$ の $b(f)$ は0.0139であったから、 $b(f)$ の値は低周波数側で小さく、高周波数側で大きいことになる。

これらによると、高減衰の領域と低減衰の領域は周波数によらず概ね共通するようである。しかし、その程度は周波数帯域によって異なり、例えば、 $f_c=1.3\text{Hz}$ の帯域の結果では伊豆から北上していた高減衰域が高周波数帯域に比べ不明瞭である。また、 $f_c=13\text{Hz}$ の帯域の結果では、高周波数帯域では立山(飛騨山脈)周辺の高減衰性がほかの高減衰域に比べ際立って強いことが分かる。

火山下に高減衰域が存在することについては古くから指摘されており[例えば、伊神(1975)¹⁵⁾]、飛騨山脈下についても局所的に非常に顕著な減衰体があることが良く知られている[例えば、勝俣(1995)¹⁶⁾]。今回の結果もそれらの影響を反映していることが考えられる。

さて、以上で明らかになったFig.13, Fig.14の距離減衰異常の分布によると、中越地方と東京湾の間には顕著な高減衰域が少なく、むしろ低減衰の領域が両側から伸びているようにも見える。一方、能登半島から東京湾に向かっては高減衰域

が二重に存在し、このうち立山付近の高減衰域はこの検討領域内で最も強い減衰性を有している。2004年10月23日中越地震の本震($M_j 6.8$)・余震群が発生した際に東京で相対的に揺れが強かったこと、および2007年3月25日の能登半島の地震($M_j 6.9$)の際に関東地方の揺れが総じて小さかったことは、このような距離減衰異常の影響として解釈される。

また、先にFig.10において、2011年と2016年の長野県北部の地震(⑧, ⑭)および2013年栃木県北部の地震(⑬)の地震項 $c(f)$ がほかの地震に比べて M_j のわりに著しく小さいことを指摘したが、この原因についても、それぞれ震源周辺に位置する立山、草津白根、日光白根といった活火山の顕著な高減衰域が、震源から放出されたばかりの短周期地震波を減衰させた結果、遠方に伝播する地震波の平均振幅が低下していたものと考えられる。

IV. 議論

本研究では、中部・関東・東北南部の領域において隣接観測点のネットワークを用いた方法を適用して求めたK-NET, KiK-net地点のサイトファクターを用い、この領域で発生した地震による地震動観測記録から基盤地震動振幅を評価して、その距離減衰特性を検討した。また、平均的な距離減衰特性からの残差を用いて、この領域における距離減衰異常を推定している。

今回距離減衰特性を検討した14地震のデータを用いれば、従来のスペクトルインバージョン解析でも類似の検討ができるように思えるかもしれない。しかし、答えは否である。スペクトルインバージョン解析では、距離減衰特性の関数形が予め仮定されるが、この仮定の拘束力は非常に強く、その仮定で再現できなかった誤差がサイト特性と震源特性の中に紛れ込むため、距離減衰特性自体の誤差が陽にならない。一方、本検討の場合は、予め独立に評価したサイトファクターを用いることによって、少なくともサイト特性が距離減衰特性の誤差の逃げ場になる問題は回避しており、距離減衰特性の非一様性を明らかにする上で有効な方式となっている。

とはいえ、今回の方法でも距離減衰特性と震源特性の間では誤差が移動する余地が残されている。例えば、本検討では、通常のスぺクトルインバージョン解析や距離減衰式の回帰分析などの短周期地震動の分析で一般に行われているように、震源からの地震波放射に関して等方向性の仮定を置いている。しかし、現実には、短周期領域でも移動震源効果のために、方位によって地震動振幅が系統的に異なる場合があることが知られている[例えば、小山(1980)¹⁷⁾]。仮に、強い地震波が放出された方向に遠方の観測点しかない場合、その波動伝播領域を低減衰領域と見誤る恐れがある。これを回避するには震源から放出される地震動振幅に関して方位による自由度を導入する必要がある。

また、今回示した距離減衰異常のマッピング方法は、距離減衰係数の誤差を空間に分布させるという非常に単純な方式であり、顕著な距離減衰異常がある場合は上記で示したように分かり易い結果が得られる。しかしながら、厳密な推定精度に関しては課題が多い。例えば、マッピング結果の安定性に関して、今回は北緯 37 度周辺の震源が多く、南側は 2011 年 3 月 15 日の静岡県東部の地震(M6.4)の 1 地震しかないので、検討領域の南西端や南東端における結果の安定性には不安が残る。また、今回用いた(7)式の重み関数やその制御係数 α についても改善の余地があるように思われる。これらの課題の解決とともに、今後もほかの地域への適用を試み、検討事例を積み重ねていくことが重要であろう。

V. おわりに

本研究では、はじめに中部・関東・東北南部における K-NET, KiK-net 地点の RSF を隣接観測点のネットワークを用いた方法²⁾で評価した。得られた RSF は既往研究⁵⁾の結果とよく一致した。また、各サイトの広域地質条件とサイトファクターとの関係を調べたところ、花崗岩類の地点と変成岩類の地点、堆積層の地点と火山性堆積層の地点で平均 RSF がそれぞれほぼ対応し、低周波数領域で後者が大きく、高周波数領域では前者が大きい結果であった。さらに、堆積層の地点の RSF については、地質年代が新しいほど低周波数領域で増加し、高周波数領域で減少する特徴が認められた。これらの特徴は東北～関東地方における既往の検討結果²⁾と概ね整合する。

次いで、得られた RSF を用いてこの領域で発生した 14 の内陸地殻内地震による地震動観測記録から基盤地震動振幅を求めて距離減衰特性を検討した。また、その平均的な距離減衰特性からの誤差に基づいて距離減衰係数の増減の空間分布を求めることにより、この領域における距離減衰異常を推定した。その結果によると、立山・焼岳・乗鞍・御嶽周辺(飛騨山脈)、草津白根・浅間山周辺、日光白根周辺、那須岳周辺に高減衰領域、新潟県周辺に低減衰領域が見いだされた。これらの距離減衰異常は、地殻内部を伝播する波動成分の不均質な減衰特性を反映した結果であり、スペクトルインバージョン解析ではなく、隣接観測点のネットワークを用いた方法で予め評価したサイト特性を用いることによって明らかにできたものと考えられる。ただし、定量的な点では、解析に用いた地震の震源分布の偏りや震源からの地震波放射特性の非一様性の影響についてまだ検討の余地が残されており、今後の課題である。

謝 辞

防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net による強震記録を使用させていただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 池浦友則;隣接地点間のスペクトル比による相対地盤増幅率とそれを除去した地震動の距離減衰特性, 日本地震工学会 2009 年年次大会, 2009, pp.192-193.
- 2) 池浦友則, 加藤研一;隣接 2 地点ペアのネットワークに基づく相対地盤増幅率の広域評価—東北地方太平洋側の K-NET・KiK-net サイトへの適用—, 日本地震工学会論文集, 第 11 巻, 第 4 号, 2011, pp.48-67.
- 3) 池浦友則;地盤の揺れ易さを除去した地震動スペクトルの距離減衰特性, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, 2010, pp.388-395.
- 4) 池浦友則;中京地区とその周辺における K-NET・KiK-net サイトの地震動相対地盤増幅率と距離減衰特性, 鹿島技術研究所年報, 第 58 号, 2010, pp.133-140.
- 5) 池浦友則, 友澤裕介;2011 年東北地方太平洋沖地震による基盤地震動の距離減衰特性, 日本地震工学会・大会—2012 梗概集, 2012, pp.82-83.
- 6) 池浦友則;強震観測地点の相対サイトファクターと基盤地震動の距離減衰特性, 鹿島技術研究所年報, 第 61 号, 2013, pp.161-168.
- 7) 池浦友則;中部～近畿地方における K-NET・KiK-net 地点の揺れ易さと地震動の距離減衰特性, 鹿島技術研究所年報, 第 63 号, 2015, pp.151-160.
- 8) 池浦友則;中国・四国・九州地方における地震動の距離減衰特性, 鹿島技術研究所年報, 第 64 号, 2016, pp.142-149.
- 9) 防災科学技術研究所;強震観測網(K-NET・KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 10) 地質調査所;日本地質アトラス, 1982, p.119.
- 11) 中村亮一;短周期地震動記録に基づく日本列島下の三次元減衰構造 Qs・震源スペクトル・地盤増幅の同時インバージョンとその応用, 学位論文, 2009.
- 12) 友澤裕介, 池浦友則;2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震の周辺領域の不均質な減衰構造の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016, pp.1165-1166.
- 13) 上野寛, 畠山信一, 明田川保, 舟崎淳, 浜田信生;気象庁の震源決定方法の改善—浅部速度構造と重み関数の改良—, 験震時報, 第 65 巻, 2002, pp.123-131.
- 14) 第四紀火山カタログ委員会;日本の第四紀火山カタログ, 火山, 第 44 巻, 第 6 号, 1999, pp.285-289.
- 15) 伊神輝;日本の火山前線下における地震波の減衰, 地震 2, 第 28 巻, 1975, pp.61-73.
- 16) 勝侯啓;飛騨山脈下の地震波異常減衰と低速度異常体, 月刊地球, Vol.18, No.2, 1996, pp.109-115.
- 17) 小山順二;短周期地震波の方位依存性, 地震 2, 第 40 巻, 1987, pp.397-404.

Relative Site Factors of K-NET and KiK-net Sites in the Chubu, Kanto and Southern Tohoku Regions and Attenuation Characteristics of Strong Ground Motions during Inland Earthquakes in and around the Regions

Tomonori Ikeura

In order to clarify the attenuation characteristics of strong ground motions due to inland earthquakes in the Chubu, Kanto and Southern Tohoku regions, firstly this study investigated relative site factors (RSF) of K-NET and KiK-net sites in these regions, using a method to evaluate regional RSFs based on a network of adjacent strong motion stations. Secondly, the observed strong motion data during 14 inland earthquakes that occurred in and around these regions were converted into seismic bedrock motion (SBM) amplitudes using the RSFs, and their attenuation characteristics in the regions were examined. The distribution of deviation of attenuation coefficient from the average attenuation characteristics of SBM amplitudes as an attenuation anomaly was also investigated. The results showed the existence of significant low-Q zones around volcanoes such as the Hida mountain range (Mt. Tateyama, Mt. Yakedake, Mt. Norikura), Mt. Kusatsu-Shirane and Mt. Nikko-Shirane regions, while a relatively high-Q zone was found in and around Niigata prefecture.