

近接設置された強震観測点における地盤震動特性の評価

Difference of Ground Shaking Characteristics between Adjacent Observation Stations

秦吉弥 Yoshiya HATA (日本工営(株)中央研究所)
一井康二 Koji ICHII (広島大学大学院工学研究院)
野津厚 Atsushi NOZU ((独)港湾空港技術研究所)

近年発生した大規模地震では、近傍の強震観測点での記録においても、地盤震動特性の差異などにより、地震動特性に大きな変動が起こりうる事が報告されている。しかしながら、設置間隔が数m~100m程度の極めて近接する強震観測点間における地盤震動特性の差異については、これまで十分な検討が行われていない。そこで本研究では、日本国内における極めて近接した強震観測点でのサイト増幅特性ならびに常時微動H/Vスペクトルを比較分析することで、極めて近接した地点における地盤震動特性の変動に関する基礎的な検討を行った。

キーワード：地震観測，サイト増幅特性，常時微動H/Vスペクトル (IGC：D07，E08)

1. はじめに

今日、我が国では、非常に密な地震観測ネットワークが整備されている。2011年1月1日現在、(独)防災科学技術研究所K-NETの1,042地点、KiK-netの689地点、気象庁(JMA)の624地点の強震観測点が存在し、その他にも、港湾、ダムサイト、地方自治体などでも強震観測が行われている。その結果、近年発生した大規模地震では、近傍の強震観測点での記録においても、地盤震動特性の差異などに起因して、地震動特性に大きな変動が起こりうる事が明らかとなってきている¹⁾。

片岡ほか²⁾は、青森県内のK-NETとK-NETに近接する震度計で同時に観測された青森県東方沖の中小地震による計測震度を対象に比較検討を行っている。また、下田ほか³⁾は、1994年ノースリッジ地震の観測記録を用いて、近接地点における地震動特性の変動について検討を行っている。さらに、神山ほか⁴⁾は、アレー地震観測システムSmall-Titanによる記録に基づき仙台市圏では1.6程度の計測震度差が生じることを報告している。しかしながら、これらの研究²⁾³⁾⁴⁾では、観測点が近接しているものの、両観測点は100m~数km程度の距離間隔を有しており、極めて近接している強震観測点間が対象となっていない。さらに、人工構造物や地形の影響などにより地盤の地震応答が局所的に大きく変動することなども報告⁵⁾されている。

そこで本研究では、数m~100m程度の距離間隔を有する極めて近接した強震観測点間の地盤震動特性の差異について基礎的な検討を行った。具体的には、日本国内に存在する極めて近接した強震観測点において常時微動計測

を実施した。そして、その強震観測点における常時微動H/Vスペクトルならびにサイト増幅特性をそれぞれ比較分析することで、極めて近接した地点での地盤震動特性の変動に関する基礎的な検討を行った。

2. 近接設置された強震観測点

表-1に日本国内において近接設置された強震観測点の一覧を示す。本研究では、(独)防災科学技術研究所の強震ネットワークK-NET⁶⁾および基盤強震観測網KiK-net⁷⁾、気象庁JMA⁸⁾、首都圏強震動総合ネットワークSK-net⁹⁾によ

表-1 近接設置された強震観測点一覧

Couple No.	Station_A	Station_B	The shortest distance between Station A and B
Couple-01	K-NET Takinoue	KiK-net Takinouekita	3 m
Couple-02	K-NET Honbetsu	KiK-net Honbetsu	5 m
Couple-03	K-NET Akan	KiK-net Akanminami	4 m
Couple-04	K-NET Yubari	KiK-net Yubari	27 m
Couple-05	K-NET Shiraio	KiK-net Shiraio	3 m
Couple-06	K-NET Rokkasho	KiK-net Rokkasho	125 m
Couple-07	KiK-net Rokkasho	JMA Rokkasho	5 m
Couple-08	K-NET Nakamura	KiK-net Nishikawanishi	1 m
Couple-09	K-NET Misaki	SK-net Misaki	4 m
Couple-10	K-NET Hiratsuka	SK-net Hiratsuka	2 m
Couple-11	K-NET Shirakawa	KiK-net Shirakawa	6 m
Couple-12	K-NET Tochio	KiK-net Kamitakara	11 m
Couple-13	K-NET Hamamatsu	JMA Hamamatsu	23 m
Couple-14	K-NET Owase	KiK-net Owase	11 m
Couple-15	K-NET Kitagawa	KiK-net Kitagawa	73 m

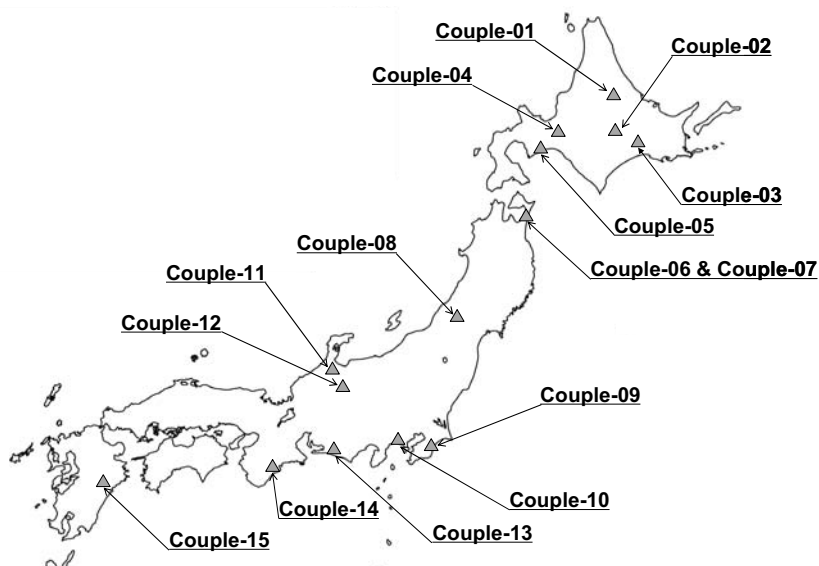


図-1 近接設置された強震観測点の分布

る強震観測点をそれぞれ対象とし、数 m~100m 程度の距離間隔を有する近接設置された強震観測点を抽出した。図-1 は近接設置された強震観測点の位置をプロットしたものであり、概ね日本全国に分布している。近接する強震観測点間の距離(表-1 参照)については、写真-1(次頁)に示すように全て観測点で現地踏査を行い、1m 単位の測量結果に基づいて算定した。図-2 には、(独)防災科学技術研究所強震ネットワーク K-NET⁶⁾および基盤強震観測網 KiK-net⁷⁾による強震観測点(Station_A)での地盤条件(地盤柱状図・せん断波速度分布・密度分布)を示す。

3. 常時微動計測

微動計には、一体型微動探査兼地震計機器¹⁰⁾を採用し、設置位置は、強震観測点(強震計設置位置)のごく近傍とした。計測条件として、サンプリング振動数を 100Hz、日中 11 分間の連続計測とし、雑振動の影響が大きい場合には、日時を変えて再度計測を行った。計測方向は、NS, EW, UD 方向の計 3 成分とし、2 台の微動計(Couple-06, 07 では 3 台の微動計)の GPS 機能を利用することで、Station_A および Station_B での計測開始時間を完全に一致させた同時計測とした。図-3 に各強震観測点での常時微動計測結果(H/V スペクトル)を示す。常時微動 H/V スペクトルの計算処理方法としては、微動の加速度時刻歴に対して、まず 0.1Hz のハイパスフィルターを施し、11 分間(ほぼ 163.84 秒×4 区間)の中で、雑振動が小さい 163.84 秒の区間を 3 区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行った。そして、バンド幅 0.05Hz の Parzen ウィンドウで平滑化したのちに、H/V スペクトルを算出し、その平均をとった。なお、評価

する周波数範囲としては、使用した微動計の対応周波数などを考慮して 0.2~10Hz とした。常時微動 H/V スペクトルは、水平動スペクトルと上下動スペクトルの比をとることにより、震源の影響がキャンセルされて、サイトに固有のスペクトルが得られる¹¹⁾。また、複数の時間区間から得られた常時微動 H/V スペクトルのばらつきが小さいことを確認することを通じて、外乱の影響が少ないことも確認している。図-3 に示すとおり、Couple-01, 02, 03, 05, 08, 09, 10, 14 では両強震観測点での常時微動 H/V スペクトルの特性が概ね一致しているものの、Couple-04, 06, 07, 11, 12, 13, 15 では両強震観測点における常時微動 H/V スペクトルの特性(スペクトル形状やピーク周波数など)に比較的大きな差異が生じている。以上は、両地点(Station_A と Station_B)の差に関する定性的な観察結果であるが、定量的な検討も行っている。これについては後述する。

4. 観測点間の地盤震動特性の差異

図-4は、各強震観測点でのサイト増幅特性(地震基盤~地表)を示す。図-4におけるK-NETおよびKiK-netのサイト増幅特性は野津ほか¹²⁾によるスペクトルインバージョンの結果を転用したものである。一方で、JMAおよびSK-netのサイト増幅特性は、スペクトル比に基づく方法¹³⁾を用いて算定し、基準点は、KiK-net六ヶ所(Couple-07)、K-NET 岬(Couple-09)、K-NET 平塚(Couple-10)、K-NET 浜松(Couple-13)である。評価する周波数範囲としては、常時微動H/Vスペクトル(図-2参照)と同様に0.2~10Hzとした。

図-4 に示すとおり、Couple-01, 02, 03, 05, 08, 09, 10, 14 では両強震観測点でのサイト増幅特性が概ね一致しているものの、Couple-04, 06, 07, 11, 12, 13, 15 では両強震観

近接設置された強震観測点における地盤震動特性の評価



(a) Couple-01



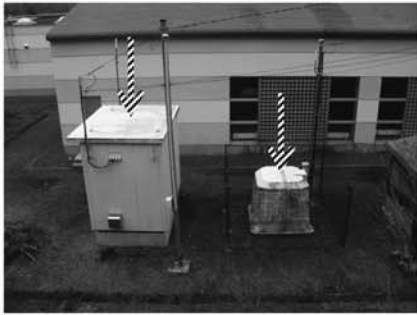
(b) Couple-02



(c) Couple-03



(d) Couple-04



(e) Couple-05



(f) Couple-06



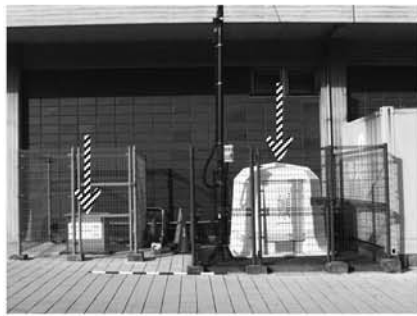
(g) Couple-07



(h) Couple-08



(i) Couple-09



(j) Couple-10



(k) Couple-11



(l) Couple-12



(m) Couple-13

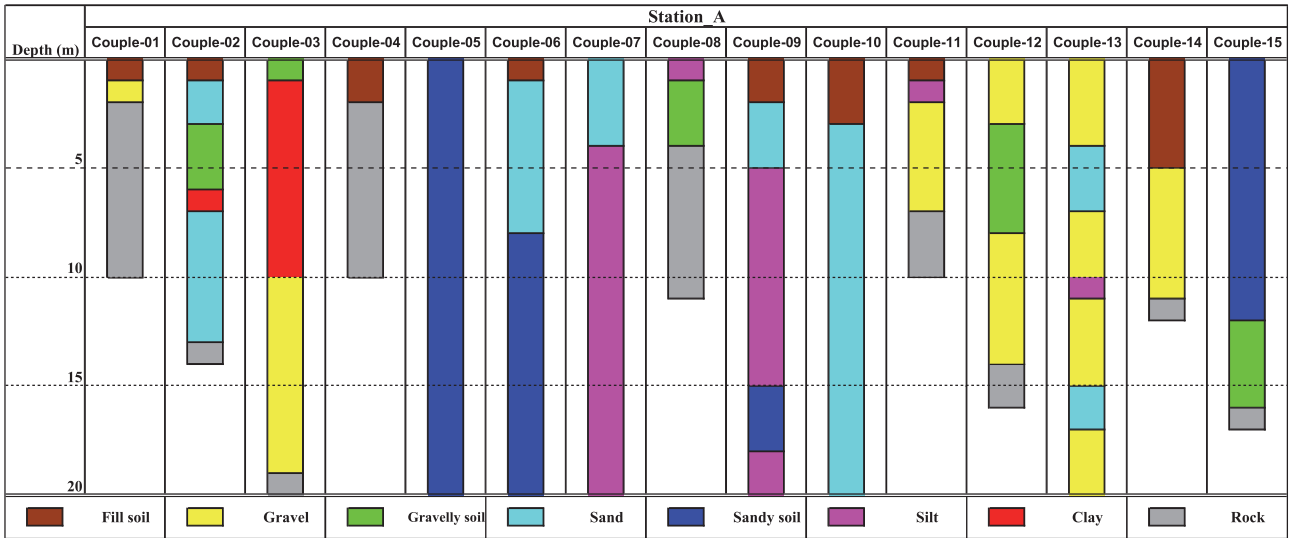


(n) Couple-14

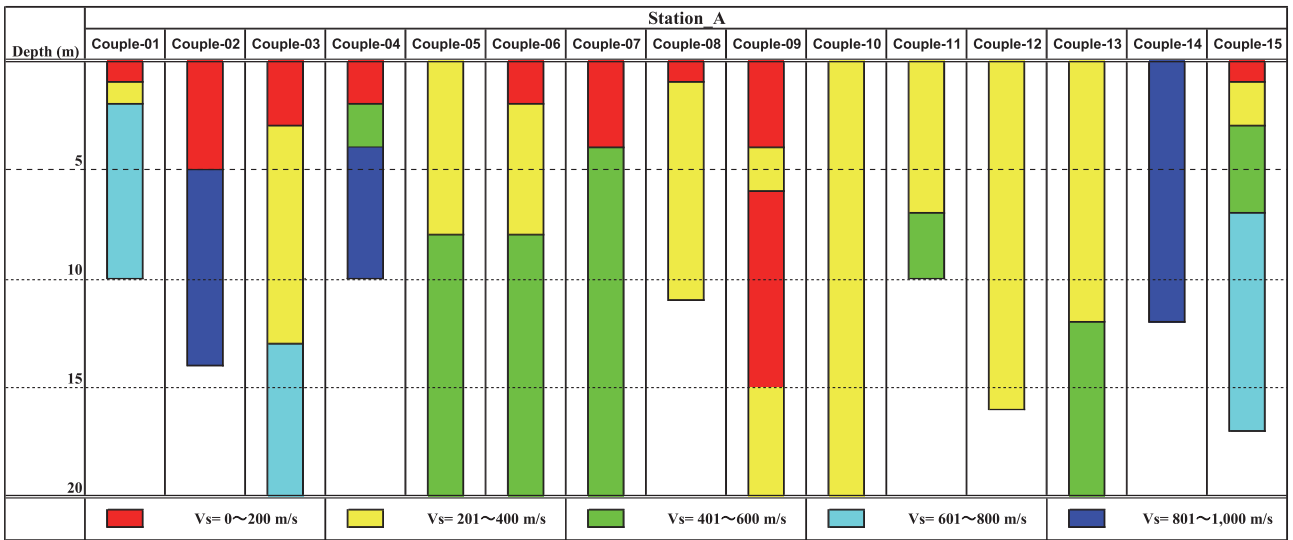


(o) Couple-15

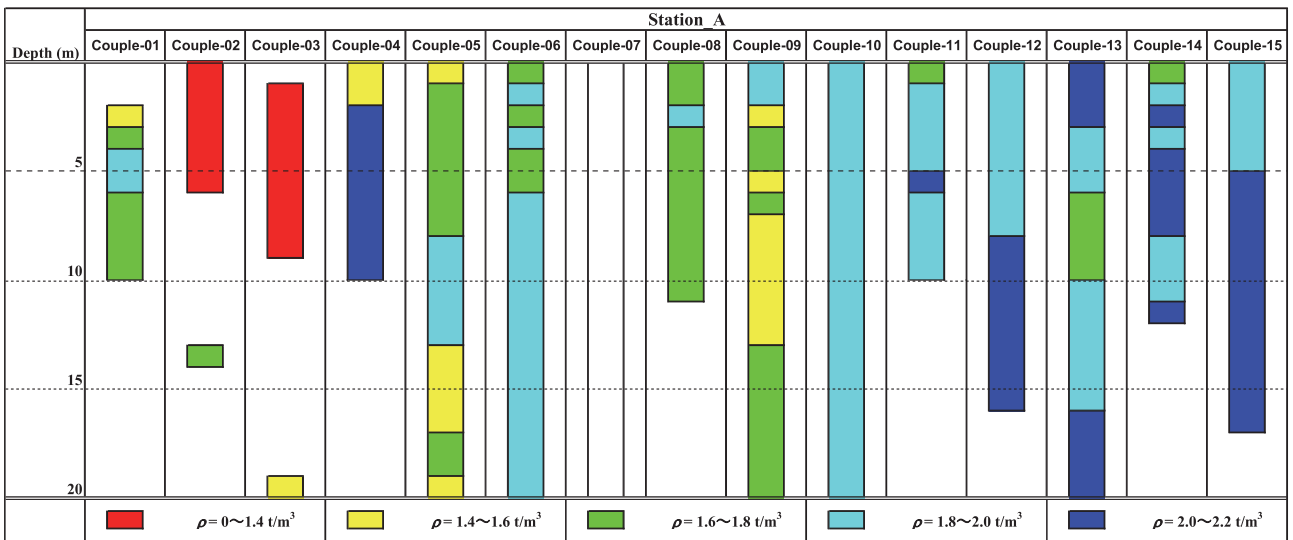
写真-1 極めて近接している強震観測点の状況



(a) 地盤柱状図



(b) せん断波速度



(c) 密度

図-2 強震観測点 (Station_A) における地盤条件

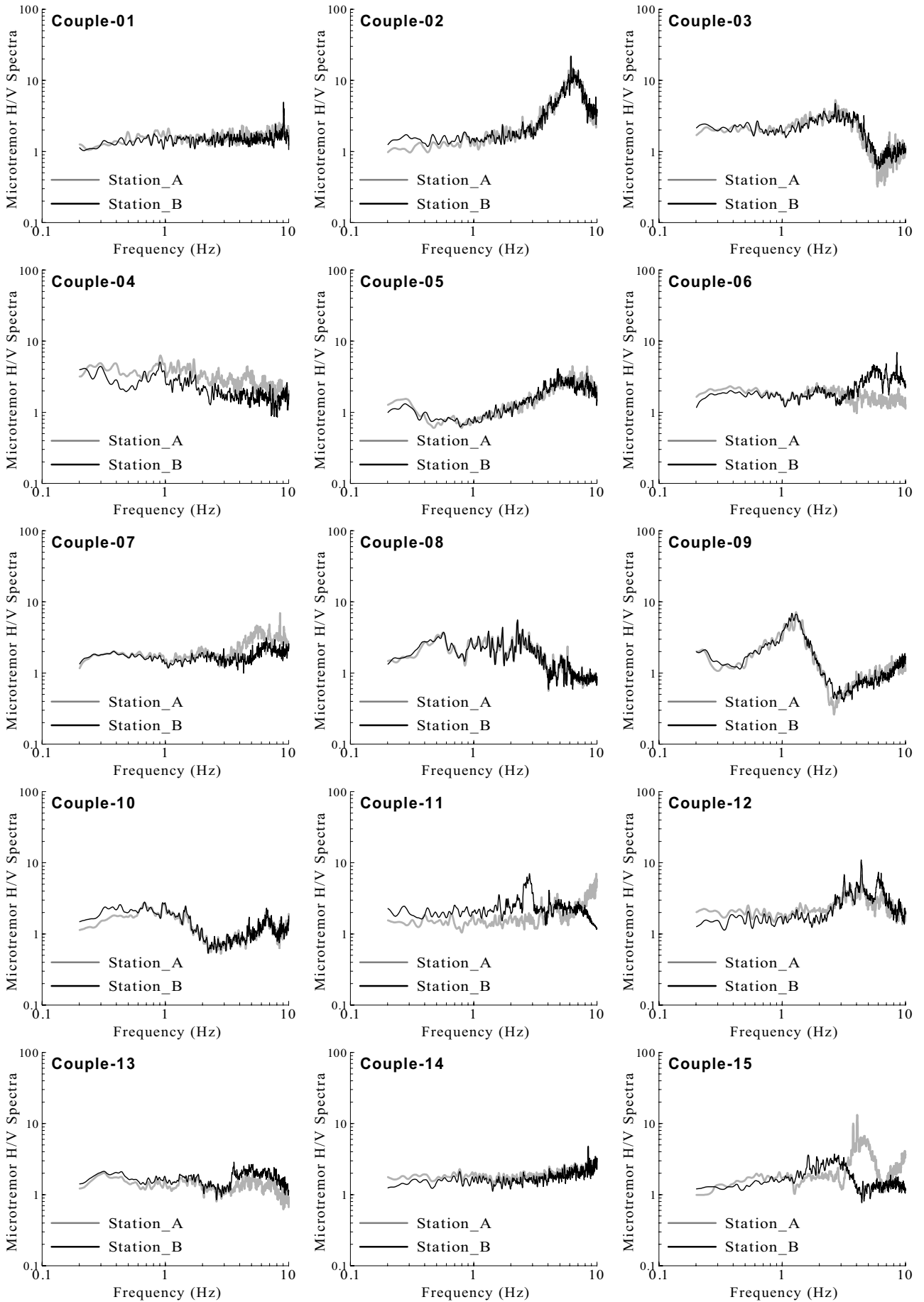


図-3 極近接する強震観測点での常時微動 H/V スペクトルの比較

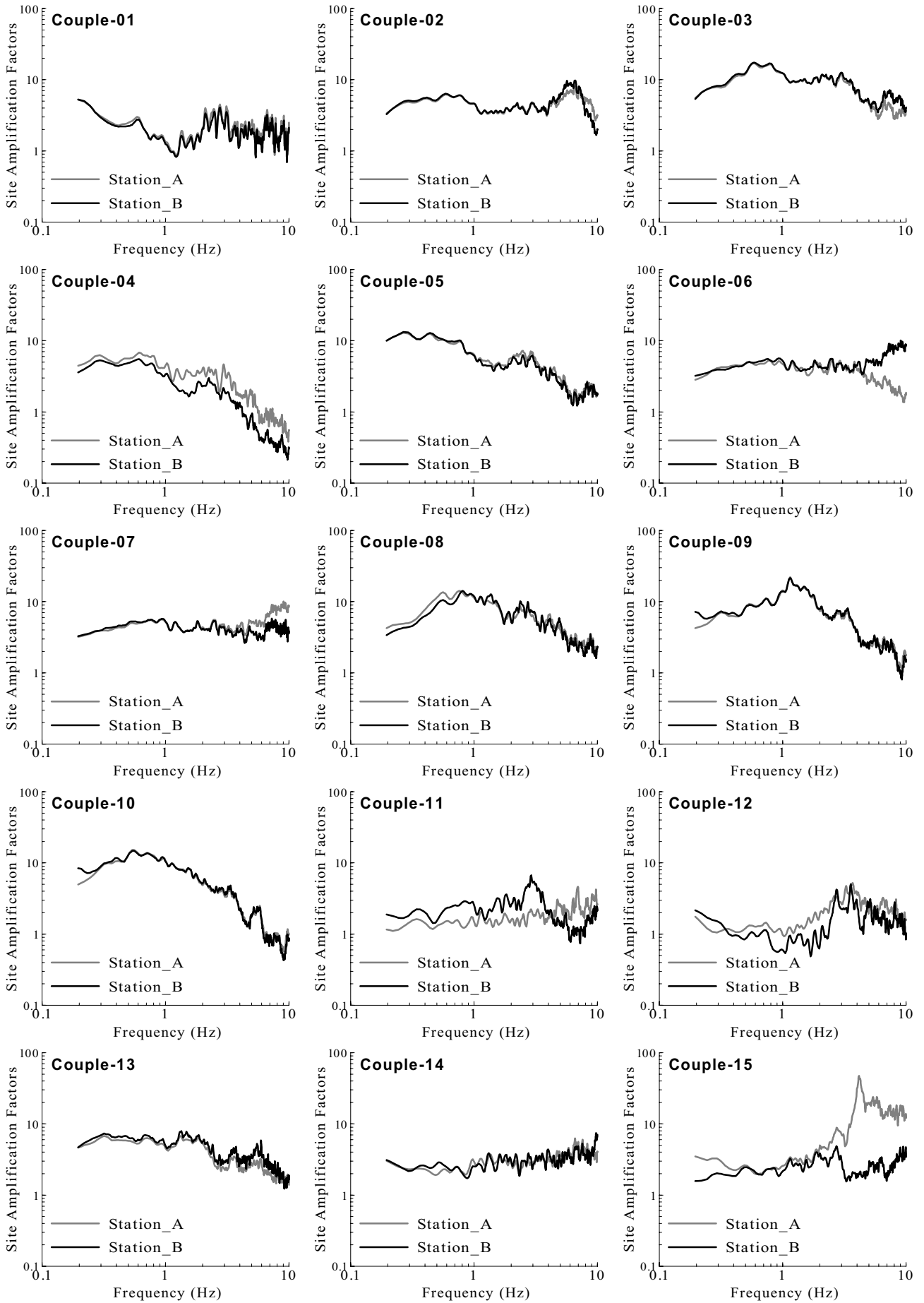


図-4 極近接する強震観測点でのサイト増幅特性の比較

表-2 DGS 値一覧

Couple No.	DGS value	
	Site amplification factor	Microtremor H/V spectrum
Couple-01	0.473	0.690
Couple-02	0.735	0.580
Couple-03	0.766	0.962
Couple-04	2.492	1.640
Couple-05	0.419	0.671
Couple-06	2.737	2.177
Couple-07	1.381	1.410
Couple-08	0.561	0.301
Couple-09	0.368	0.742
Couple-10	0.368	0.362
Couple-11	2.449	1.981
Couple-12	1.716	0.977
Couple-13	0.926	1.218
Couple-14	0.697	0.396
Couple-15	5.908	2.563

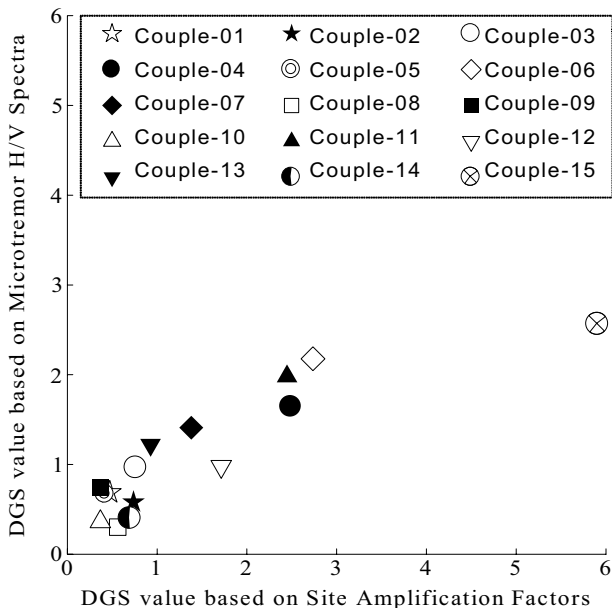


図-5 地盤震動特性の差異の定量的評価

観測点におけるサイト増幅特性に差異が生じているのが確認できる。特に、Couple-04, 06, 11, 15では、高周波領域を中心に比較的大きな差異が生じている。両地点 (Station_A と Station_B)間のサイト増幅特性の違いには種々の要因が考えられるが、常時微動 H/V スペクトル(図-2)とサイト増幅特性(図-3)を比較すると、両者の傾向が概ね整合しているため、地盤条件の影響である可能性が高い。以上は、両地点 (Station_A と Station_B)の差に関する定性的な観察結果であるが、定量的な検討も行っている。これについて以下に述べる。

野口・笹谷¹⁴⁾は同一地点で観測された強震時と弱震時の地震動 H/V スペクトルの差を定量的に評価するための尺度として DNL (Degree of Non-Linearity)値を提案している。ここでは、これを参考に、2地点間のサイト増幅特性また

は常時微動 H/V スペクトルの差異を定量的に評価するための尺度として DGS (Difference of Ground Shaking characteristics)値を新たに提案する。DGS 値はサイト増幅特性または常時微動 H/V スペクトルの2地点間の比率の常用対数を取り対象周波数範囲(0.2-10Hz)における積分量であり次式で表わされる。

$$DGS = \sum \left| \log \left(\frac{R_{Station_B}(f)}{R_{Station_A}(f)} \right) \right| \cdot \Delta f \quad (1)$$

表-2および図-5はこのDGS値に基づいて2地点間の地盤震動特性の差異を定量的に評価・比較したものである。この図から、サイト増幅特性と常時微動 H/V スペクトルに基づくDGS値は概ね正の相関を有すること、すなわち、サイト増幅特性の差異が大きい場合には常時微動 H/V スペクトルの差異も大きい傾向にあることが確認できる。

以上を総括すると、サイト増幅特性に比較的大きな差がある観測点では常時微動 H/V スペクトルにも比較的大きな差があり、さらに、それらの観測点におけるサイト増幅特性と常時微動 H/V スペクトルの大小関係にも対応が見られる。一般に、強震観測記録から推定されたサイト増幅特性が近接観測点間で異なる場合、その差には地盤震動特性の違い以外にも設置条件等の違いの影響が含まれる可能性があるが、今回の事例では、上述のようにサイト増幅特性と常時微動 H/V スペクトルとの間に極めて良い対応関係が認められることから、近接観測点間におけるサイト増幅特性の差は、実際に地盤震動特性の違いを示していると考えられる。また、サイト増幅特性に比較的大きな差がある観測点では常時微動 H/V スペクトルにも比較的大きな差が認められることから、近接した2地点間におけるサイト増幅特性の違いの有無を判断する上で、常時微動計測が極めて有効である可能性が高いことが指摘できる。

5. まとめ

本研究では、常時微動H/Vスペクトルおよびサイト増幅特性に基づいて、極めて近接設置された強震観測点間の地盤震動特性の差異について基礎的な検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- ・ 設置間隔が数m~100m程度の極めて近接した観測点においても、強震記録から推定されたサイト増幅特性にかなり差がある場合がある。
- ・ サイト増幅特性に比較的大きな差がある観測点では、常時微動H/Vスペクトルにも比較的大きな差がある。近接観測点間におけるサイト増幅特性の差は実際に地盤震動特性の違いを示していると考えられる。
- ・ 近接した2地点間におけるサイト増幅特性の違いの有

無を判断する上で、常時微動観測が極めて有効である可能性が高い。

今後は、本研究で抽出した極めて近接した強震観測点での記録を比較分析していく予定である。

謝辞

(独)防災科学技術研究所 K-NET・KiK-net, 気象庁, 首都圏強震動総合ネットワーク SK-net(千葉県および神奈川県)の地震観測記録を使用させていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) たとえば, 秦吉弥, 野津厚, 一井康二: 極近傍地点における地震動指標の変動に関する基礎的検討—平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震とその余震の事例—, 土木学会第66回年次学術講演会概要集(DVD-ROM), I-485, pp.969-970, 2011.
- 2) 片岡俊一, 市村強, 菊池俊紀: 近接したK-NET観測記録から見た青森県震度情報ネットワークの計測震度の特徴, 土木学会地震工学論文集(CD-ROM), Vol.28, Paper No.86, 2007.
- 3) 下田和宏, 翠川三郎, 三浦弘之: 近接地点における地震動特性の変動に関する基礎的検討—1994年ノースリッジ地震の事例—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 21437, pp.873-874, 2008.
- 4) 神山真, 松川忠司, 片岡俊一: アレー強震観測システムを利用したローカルサイト増幅に関する研究, 土木学会論文集A1, Vol.65, No.1, pp.38-51, 2009.
- 5) たとえば, 清野純史, 小野祐輔, 村井竜也: 計測震度観測地点近傍のローカルサイト特性が地震動強度に及ぼす影響について, 地域安全学会論文集, No.6, pp.121-128, 2004.
- 6) Kinoshita, S.: Kyoshin-net (K-NET), *Seism. Res. Lett.* Vol.69, pp.309-332, 1998.
- 7) Aoi, S., K. Obara, S. Hori, K. Kasahara and Y. Okada: New strong-motion observation network: KiK-net, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, No.329, 2000.
- 8) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, pp.75-78, 2004.
- 9) 鷹野澄, 額瀨一起, 工藤一嘉, 古村孝志, 山中佳子, ト部卓, 土井恵治: 首都圏強震動総合ネットワークSK-net, 記念シンポジウム「日本の強震観測50年」—歴史と展望—講演集, 防災科学技術研究所資料, No.264, pp.119-122, 2005.
- 10) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 地球惑星連合大会2006予稿集(CD-ROM), S111-P002, 2006.
- 11) たとえば, 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄巧: 常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集, No.489/I-27, pp.251-260, 1994.
- 12) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, pp.215-234, 2007.
- 13) (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 国土交通省港湾局監修, pp.336-341, 2007.
- 14) 野口科子, 笹谷努: 2003年宮城県沖スラブ内地震における表層地盤の非線形応答とその強震動への影響, 地震, 第2輯, 第63巻, 第3号, pp.165-187, 2011.

(2011年6月27日 受付)