

本震観測記録を利用した地震動推定手法の比較検討事例

秦吉弥¹・片岡正次郎²・野津厚³

¹正会員 博士(工学) 大阪大学 助教 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)
²正会員 博士(工学) 国土交通省国土技術政策総合研究所 主任研究官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)
³正会員 博士(工学) (独)港湾空港技術研究所 領域長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)では、強震動の作用による橋梁の被災が数多く報告^{1),2)}されている。この経験を踏まえた今後の橋梁の耐震性評価のためにも、被災(ならびに無被災)地点における地震動を事後評価していくことは非常に重要^{3),4)}である。この点に関して、既に著者ら⁵⁾⁻¹⁵⁾は、2011年東北地方太平洋沖地震などにおける主に被災橋梁サイトでの強震動を数多く推定している。

その際、採用している地震動推定手法は、断層モデルに基づく方法^{16),17)}と対象サイト周辺の本震観測記録に対して補正を施す方法^{18),19)}に大別することができる。このうち、後者の方法は、工学的基盤～地表の地盤震動特性の差異に着目することで周辺の観測記録に対してSHAKEなどの重複反射理論を適用する方法(以後、等価線形解析手法と呼ぶ)¹⁸⁾と、地震基盤～地表の地盤震動特性の差異に着目することで周辺の観測記録に対してサイト増幅・位相特性を置き換える方法(以後、サイト特性置換手法と呼ぶ)¹⁹⁾に更に分けることができる。しかしながら、地震動推定手法として、対象サイト周辺の本震観測記録に対して補正を施す方法を採用した場合に、採用手法のバリエーションが推定結果に及ぼす影響については、これまで十分な検討が行われていない。

そこで本稿では、橋梁近傍の自由地盤上の強震観測点(MLIT観測点²⁰⁾)とその周辺の強震観測点(K-NET観測点²¹⁾)の組合せを対象に、本震観測記録に対して補正を施す方法として、等価線形解析手法およびサイト特性置換手法の二種類の手法を採用して強震動を推定し、観測地震動に対して両手法による推定地震動を比較することで、推定精度に関する基礎的な検討を行った結果について報告する。

なお、本研究は、(公社)土木学会地震工学委員会東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会(委

員長：幸左賢二 九州工業大学教授)が実施している委員会活動の一環として実施したものである。

2. 対象サイト

図-1および表-1に本稿で対象としたサイトおよび強震観測点の組合せを示す。強震観測点の選定には、①橋梁近傍の強震観測点(MLIT観測点)の5km以内にK-NET観測点が存在すること、②MLIT観測点およびK-NET観測点ともにPS検層による工学的基盤～地表の速度構造²²⁾が既知であること(図-2(a)～(f)参照)、③MLIT観測点およびK-NET観測点において2011年東北地方太平洋沖地震による観測記録が得られていること、の上記三条件を満足した組合せを選

表-1 基準点と推定点の組合せ一覧

	基準点 (MLIT観測点)	推定点 (K-NET観測点)
Couple_A	MLIT新晩翠橋	K-NET黒磯
Couple_B	MLIT 神宮 橋	K-NET鹿嶋
Couple_C	MLIT水郷大橋	K-NET佐原

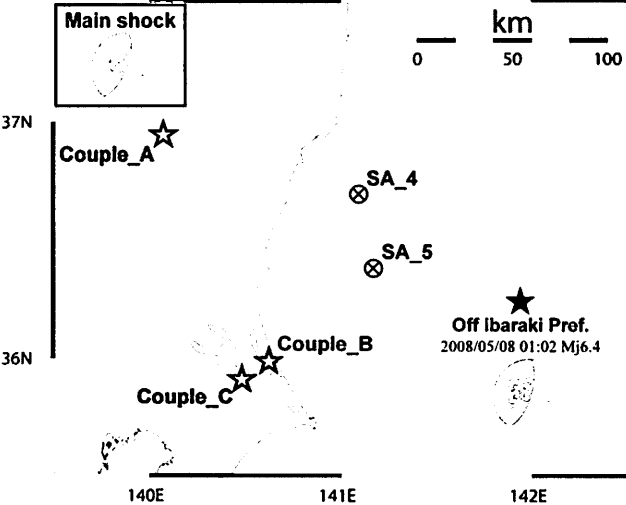


図-1 強震観測点の組合せ、および茨城県沖の中小地震

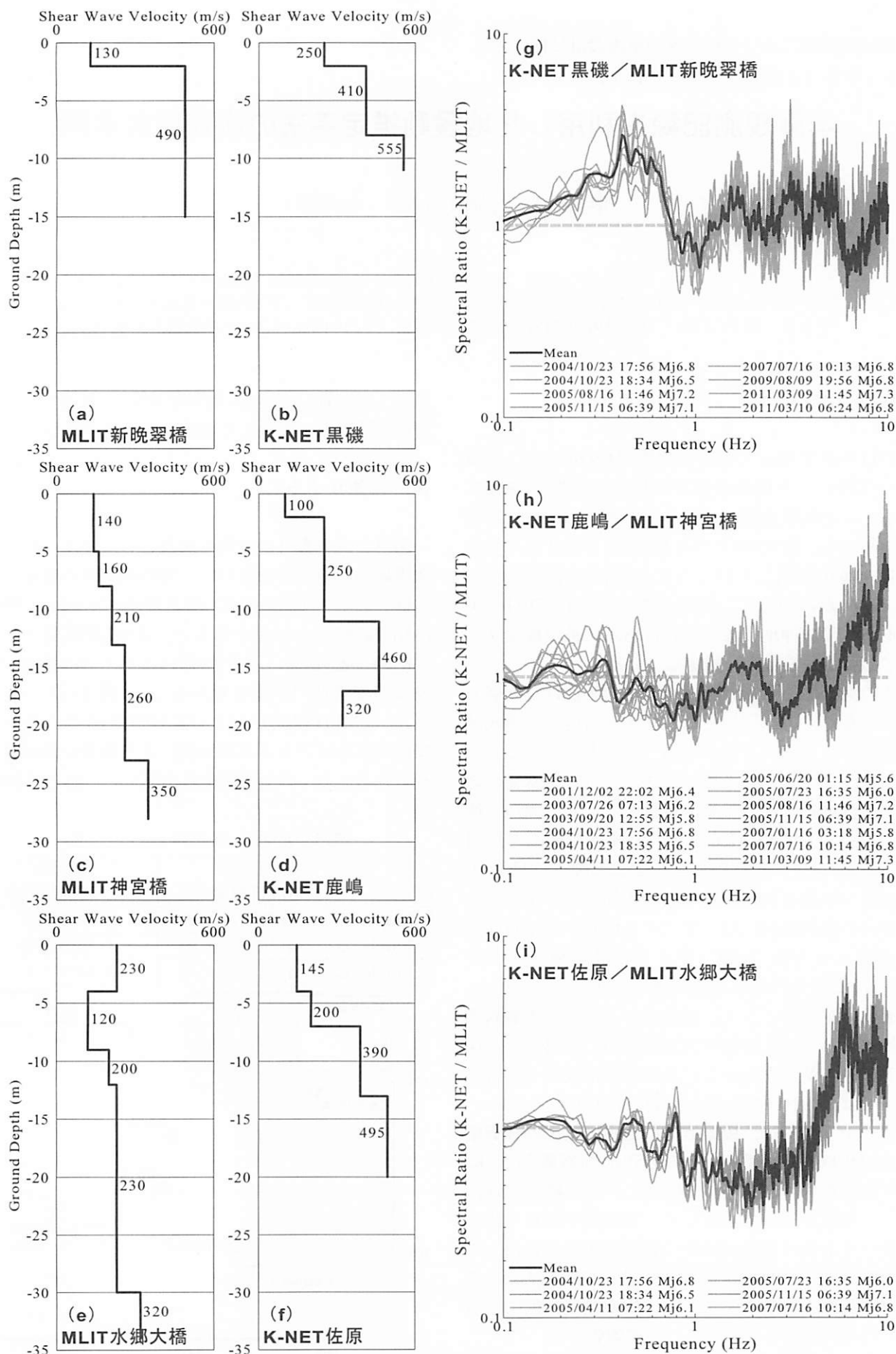


図-2 選定した強震観測点での表層地盤における速度構造(左)²²⁾, および中小地震観測記録に基づくスペクトル比(右)



図-3 MLIT新晩翠橋とK-NET黒磯の位置関係(Couple_A)



図-4 MLIT神宮橋とK-NET鹿嶋の位置関係(Couple_B)



図-5 MLIT水郷大橋とK-NET佐原の位置関係(Couple_C)

定した。図-3、図-4、図-5に本稿で選定した組合せ(Couple_A, Couple_B, Couple_C)によるMLIT観測点とK-NET観測点の位置関係を示す。また、MLIT新晩翠橋はI種地盤、MLIT神宮橋はII種地盤、MLIT水郷大橋はIII種地盤となっているのに対し(図-2(a),(c),(e)参照)、K-NET黒磯・K-NET鹿嶋・K-NET佐原はともにI種地盤となっている。

3. 地震動推定手法

表-1に示すとおり、橋梁近傍のMLIT観測点で得られた本震観測記録に対して補正を施すことで、K-NET観測点での地震動を推定した。ここに、地震動推定手法としては、図-6および図-7に示す等価線形解析手法¹⁸⁾およびサイト特性置換手法¹⁹⁾を採用した。図-6および図-7に示すように、両手法の大きな違いは、等価線形解析手法ではMLIT観測点とK-NET観測点に作用した工学的基盤相当の地震動が同等であると仮定しているのに対し、サイト特性置換手法ではMLIT観測点とK-NET観測点に作用した地震基盤相当の地震動が同等であると仮定している点にある。

図-6に示すとおり、等価線形解析手法では、まず、工学的基盤～地表の速度構造モデル(図-2(a),(c),(e)参照)に基づき、地盤地表面におけるMLIT観測点での観測記録に対して、非線形の(土木研究所¹⁸⁾の実験式に基づく動的変形特性を考慮した)重複反射理論を適用し、工学的基盤相当の地震動を評価した(その際、Couple_Cでは最大せん断ひずみが1%を上回っていたことを付記しておく)。そして、評価した工学的基盤相当の地震動に対して、K-NET観測点における工学的基盤～地表の速度構造モデル(図-2(b),(d),(f)参照)に基づく非線形の重複反射理論を適用することで、K-NET観測点での地震動を最終的に推定した。

一方で、図-7に示すとおり、サイト特性置換手法では、工学的基盤～地表の速度構造モデル(図-2(a),(c),(e)参照)に基づき、地盤地表面におけるMLIT観測点での観測記録に対して、非線形の(土木研究所¹⁸⁾の実験式に基づく動的変形特性を考慮した)重複反射理論を適用し、工学的基盤相当の地震動を評価した(この過程は上述した等価線形解析手法¹⁸⁾と同様である)。そして、評価したMLIT観測点での工学的基盤相当の地震動に対して、線形の重複反射理論を適用することで、MLIT観測点での地盤地表面における工学的基盤～地表の地盤非線形の影響が含まれていない地震動を評価した。さらに、評価した地盤地表面における地震動に対して、MLIT

観測点～K-NET観測点間におけるサイト増幅特性を行うことで、K-NET観測点での地盤地表面における線形時の地震動を評価した。

(地震基盤～地表)およびサイト位相特性の置き換え
 サイト増幅・位相特性の具体的な置き換え方法は、
 図-8に示すとおりである。まず、評価したMLIT観

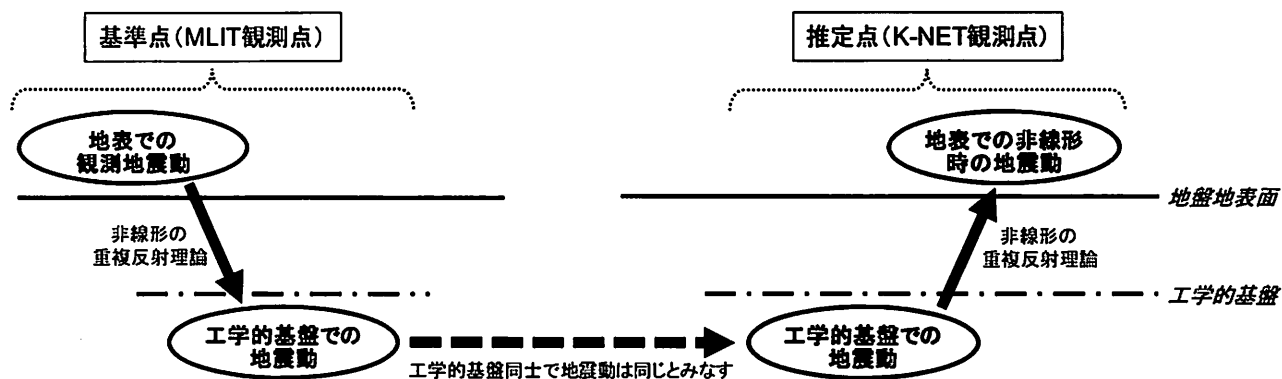


図-6 等価線形解析手法に基づく地震動推定のフレームワーク

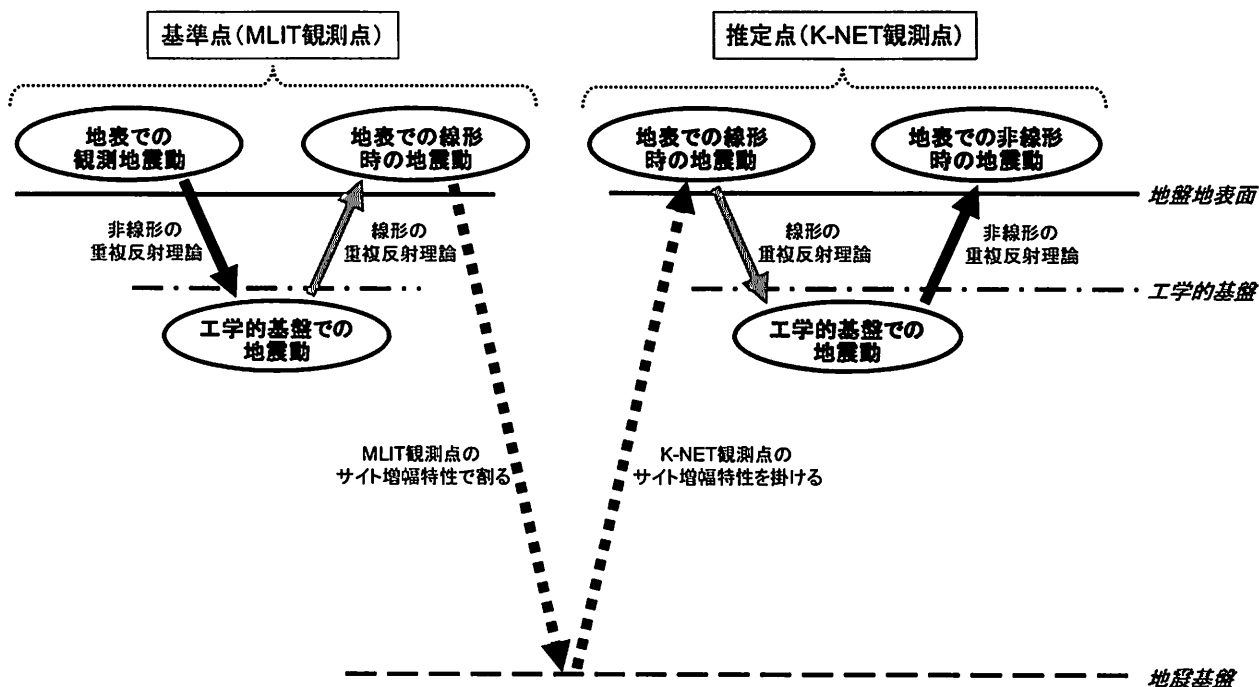


図-7 サイト特性置換手法に基づく地震動推定のフレームワーク

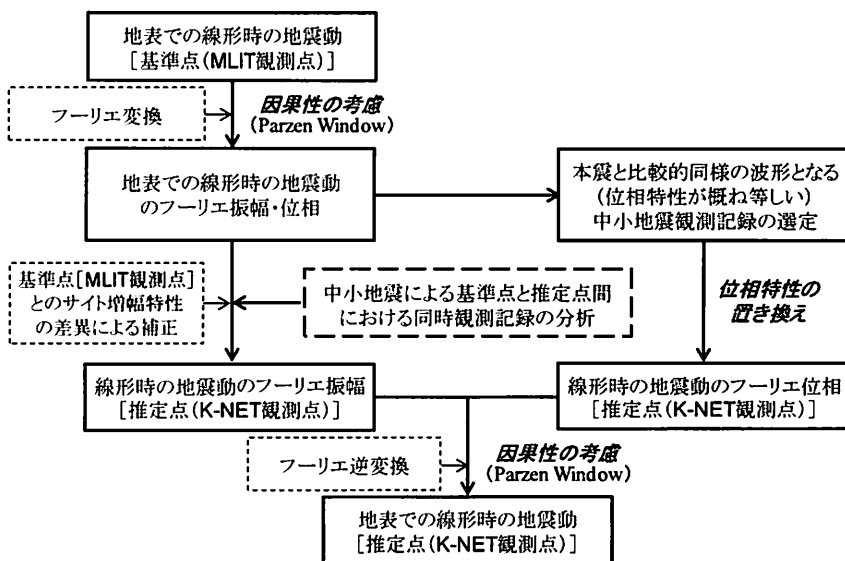


図-8 サイト増幅・位相特性の置換えフロー

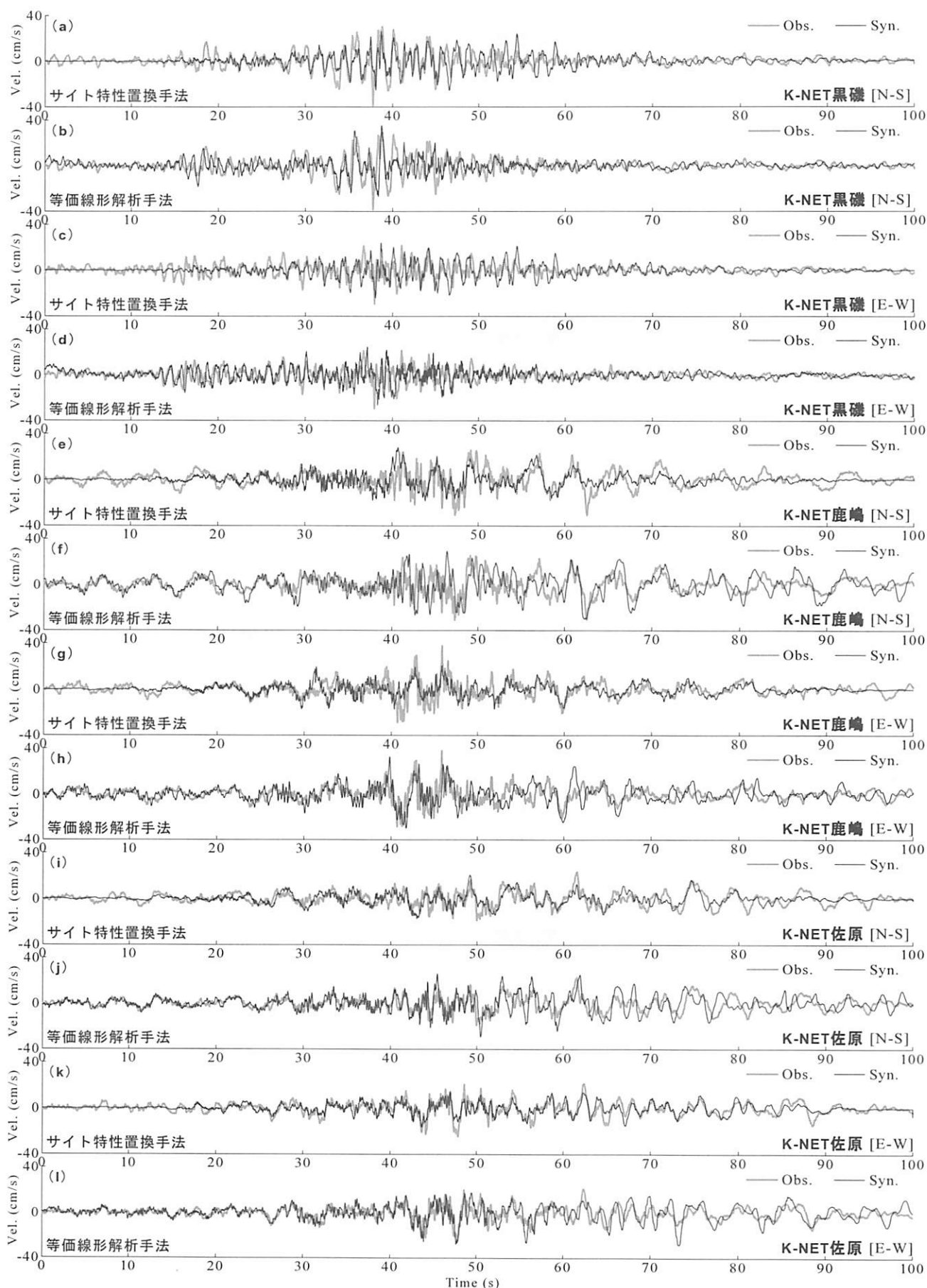


図-9 等価線形解析手法およびサイト特性置換手法に基づく強震動(速度波形)の推定

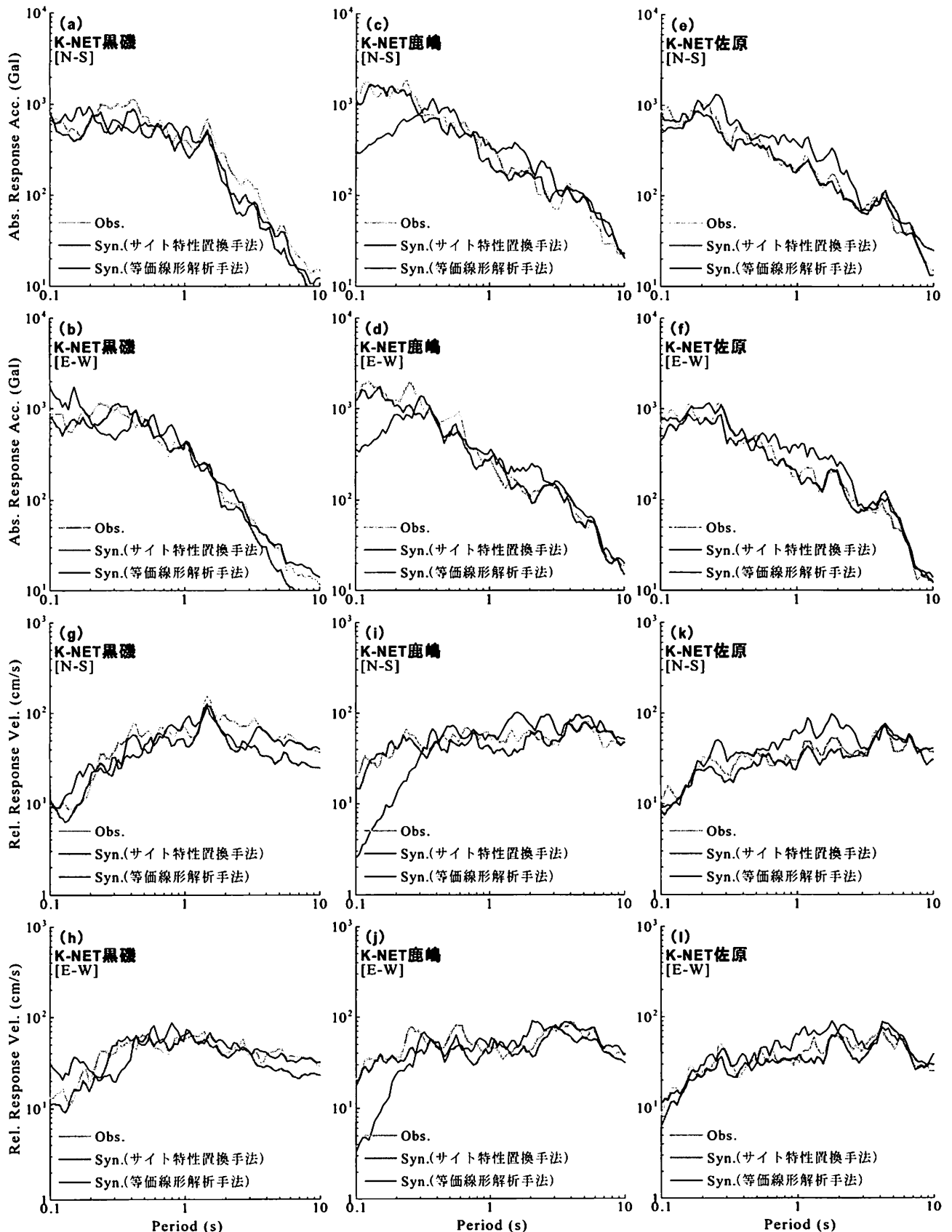


図-10 等価線形解析手法およびサイト特性置換手法に基づく強震動(応答スペクトル)の推定

測点での地盤地表面における線形時の地震動に対してフーリエ変換を施し、フーリエ振幅を計算する。

次に、得られたフーリエ振幅に対して、中小地震

観測記録によるフーリエ振幅の比率(K-NET観測点／MLIT観測点：図-2(g),(h),(i)参照)を乗じることにより、K-NET観測点でのフーリエ振幅を評価した。

その際、水平2成分それぞれについて同様の計算を行った。最後に、得られたフーリエ振幅と中小地震観測記録のフーリエ位相を組み合わせ、因果性を考慮したフーリエ逆変換²³⁾を行うことで、K-NET観測点における本震時の線形時の地震動を推定した。なお、このとき用いる中小地震観測記録としては、茨城県沖を震源とする地震(2008/05/08 01:02 $M_{\text{w}}6.4$: 図-1参照)によるK-NET観測点での記録を採用²⁴⁾した。

評価したK-NET観測点での地盤地表面における線形時の地震動に対して、工学的基盤～地表の速度構造モデル(図-2(b),(d),(f)参照)に基づく線形の重複反射理論を適用することで、K-NET観測点での工学的基盤における地震動を評価した。そして、評価した工学的基盤相当の地震動に対して、工学的基盤～地表の速度構造モデル(図-2(b),(d),(f)参照)に基づく非線形の重複反射理論を適用することで、K-NET観測点での本震時の地震動を最終的に推定した。

4. 地震動推定結果

図-9に推定点であるK-NET黒磯、K-NET鹿嶋、K-NET佐原における本震時の速度波形(観測波)と、等価線形解析手法およびサイト特性置換手法に基づく強震動推定結果(推定波)を比較したものを示す。図-9に示すとおり、速度波形による比較では、本稿で設定した組合せの違い(Couple_A, B, C)に関わらず、等価線形解析手法およびサイト特性置換手法による推定波は比較的良好に観測波を再現できている。

図-10に絶対加速度応答スペクトルおよび相対速度応答スペクトル(ともに減衰定数5%)を観測波と推定波で比較したものを示す。図-10に示すとおり、応答スペクトルによる比較では、同じI種地盤同士であるMLIT新晩翠橋とK-NET黒磯の組合せ(Couple_A)では、両手法ともに観測波による応答スペクトルを一定の精度で再現できている。さらに、サイト特性置換手法を採用したケースでは、地盤種別が異なるMLIT神宮橋とK-NET鹿嶋の組合せ(Couple_B)、およびMLIT水郷大橋とK-NET佐原の組合せ(Couple_C)においても、観測波による応答スペクトルの再現性は良好である。しかしながら、等価線形解析手法を採用したケースでは、Couple_BおよびCouple_Cにおいて応答スペクトルの再現性がともに低下している。具体的には、K-NET鹿嶋では0.1～0.3sの周期帯域において過小評価、K-NET佐原では0.5～3sの周期帯域で過大評価しているのが読み取れる。これらの再現性が低下している周期帯域は、中小地震観測記録によるフーリエ振幅の比率(K-NET観測点

／MLIT観測点: 図-2(g),(h),(i)参照)が1.0から乖離している周波数帯域と概ね一致していることから、工学的基盤～地表のみならず地震基盤～工学的基盤における基準点～推定点間の地盤震動特性の差異が比較的大きい場合、等価線形解析手法に基づく工学的基盤～地表の地盤震動特性の置き換えだけでは、推定点に作用した地震動(特に応答スペクトル)を十分な精度で評価できない可能性を示唆している。

5. まとめ

本研究では、等価線形解析手法およびサイト特性置換手法を用いて、2011年東北地方太平洋沖地震($M_{\text{w}}9.0$)でのMLIT新晩翠橋、MLIT神宮橋、MLIT水郷大橋(基準点)での観測記録に補正を施すことによって、K-NET黒磯、K-NET鹿嶋、K-NET佐原(推定点)における強震波形を推定し、観測波との比較検討を行い、採用手法の違いが地震動推定結果に及ぼす影響に関して基礎的な検討を行った。

その結果、等価線形解析手法およびサイト特性置換手法ともに、本震観測記録の速度波形を一定の精度で評価することができた。一方で、絶対加速度応答スペクトルおよび相対速度応答スペクトルの推定に関しては、基準点～推定点間の地盤震動特性の差異が比較的大きい場合には、等価線形解析手法の適用、すなわち工学的基盤～地表の地盤震動特性の置き換えだけでは十分な推定精度を得られない可能性が高いことがわかった。

上記の結論は、本稿で設定した限られたケースの中で得られた1つの知見であり、今後は、適用ケースを増やしていくことで更に詳細な検討を行ってみたいと考えている。

謝辞：本研究では、(独)防災科学技術研究所K-NETによる地震観測データを利用しました。

参考文献

- 1) 川島一彦，西岡勉，高橋良和，秋山充良，渡邊学歩，古賀裕久，松崎裕：橋梁の被害調査，土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，第9章，pp.1-42，2011.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人土木研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震土木施設災害調査速報，国総研資料No.646・土研資料No.4202，pp.377-462，2011.
- 3) 野津厚，一井康二：性能設計の発展型としてのEvidence-Based Designの提案とその実現に向けた課題，

- 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 日本地震工学会, pp.3073-3080, 2010.
- 4) 野津厚: 地震動研究とのコラボレーションが地盤耐震工学の一層の発展をもたらす, 地盤工学会誌, Vol.62, No.2, pp.22-23, 2014.
 - 5) 片岡正次郎, 金子正洋, 松岡一成, 長屋和宏, 運上茂樹: 上部構造と橋脚が流出した道路橋の地震・津波被害再現解析, 土木学会論文集A1, Vol.69, No.4, pp.I_932-941, 2013.
 - 6) 片岡正次郎, 金子正洋, 長屋和宏: 津波が越流した被害が軽微な道路橋の地震・津波応答再現解析, 第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.7-12, 2013.
 - 7) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚, 一井康二: SPGAモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した2011年東北地方太平洋沖地震における長町高架橋での地震動とフラジリティカーブの評価, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.60A, pp.214-227, 2014.
 - 8) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚, 幸左賢二: スーパーアスペリティモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した2011年東北地方太平洋沖地震による南三陸町志津川での強震動の評価, 土木学会論文集B3, Vol.69, No.2, pp.I_161-166, 2013.
 - 9) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之: 常時微動H/Vスペクトルに基づく2011年東北地方太平洋沖地震における仙台市地下鉄高架橋被災地点での地震動の評価, 第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.117-122, 2013.
 - 10) 秦吉弥, 高橋良和, 秋山充良, 後藤浩之, 野津厚: SPGAモデルに基づく2011年東北地方太平洋沖地震における愛宕高架橋および稗田高架橋での強震動の推定, 第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.109-116, 2013.
 - 11) 秦吉弥, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚: 余震観測記録に基づく2011年東北地方太平洋沖地震におけるゴム系支承の被災橋梁での地震動の評価, 日本地震工学会論文集, Vol.13, No.3, pp.30-56, 2013.
 - 12) 秦吉弥, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚: スーパーアスペリティモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した2011年東北地方太平洋沖地震における岩切線路橋での地震動の評価, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.59A, pp.383-395, 2013.
 - 13) 秦吉弥, 畠田泰子, 野津厚: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した2011年東北地方太平洋沖地震における那珂川水管橋での地震動の評価, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.4, pp.374-393, 2012.
 - 14) 秦吉弥, 野津厚, 中村晋, 一井康二, 酒井久和, 丸山喜久: 2011年東北地方太平洋沖地震で被災した橋梁での余震観測と地震動の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.3, pp.49-52, 2012.
 - 15) Hata, Y., Nozu, A., Nakamura, S., Takahashi, Y. and Goto, H.: Strong motion estimation at the elevated bridges of the Tohoku Shinkansen damaged by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake based on extended site effects substitution method, *Proc. of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, pp.418-429, Tokyo, Japan, 2012.
 - 16) 野津厚: 2011年東北地方太平洋沖地震を対象としたスーパーアスペリティモデルの提案, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.2, pp.21-40, 2012.
 - 17) 野津厚, 山田雅行, 長尾毅, 入倉孝次郎: 海溝型巨大地震における強震動パルスの生成とその生成域のスケーリング, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.4, pp.209-228, 2012.
 - 18) 荒川直士, 常田賢一, 木全俊雄, 近藤益央, 高松重則: 地盤の地震時応答特性の数値解析法—SHAKE: DESRA—, 土木研究所資料, 第1778号, 136p., 1982.
 - 19) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America (BSSA)*, Vol.101, No.2, pp.688-700, 2011.
 - 20) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earthquake motion by National Institute for Land and Infrastructure Management, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.
 - 21) Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
 - 22) 大井昌弘, 藤原広行: 地盤情報の統合化と提供—ジオ・ステーション—, 地盤工学会誌, Vol.61, No.6, pp.8-9, 2013.
 - 23) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, 土木学会論文集A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
 - 24) 秦吉弥, 野津厚, 一井康二, 酒井久和: サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震における横浜・柴町集合住宅での地震動の評価, 土木学会論文集A1, Vol.68, No.1, pp.167-172, 2012.