堆積層による地震動の増幅

清水建設技術研究所 *

佐藤 智美

京都大学防災研究所 *

川瀬 博

Site Responses of Sediments

Toshimi SATOH

Institute of Technology, Shimizu Corporation,
4-17, Etchujima 3-chome, Koto-ku, Tokyo 135-8530, Japan

Hiroshi KAWASE

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

(Received June 23, 2008; Accepted September 1, 2008)

Effects of site responses are quite influential on strong ground motion characteristics. Dense strong motion networks, most of which were deployed after the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, have contributed significantly to recent site response studies. In this paper, we reviewed published papers after the 1990's on site responses most of which were objected to broadband strong motion predictions in time domain. We focused our attention mainly to one-dimensional theoretical studies and empirical ones. One-dimensional theoretical site responses of horizontal motions for S waves and vertical motions for P waves were main concerns in the 1990's. Vertical array records or borehole records were inverted for both sediments' Q_p and Q_s based on one-dimensional (1-D) wave propagation theory assuming vertical incident P and S waves, respectively. In the 2000's three-component site responses for both P and S waves based on 1-D wave propagation theory assuming obliquely incident P and S waves became to be a primary target. The three-component site responses for P and S waves were applied to strong motion predictions by statistical Green's function method and provided several successful examples. However, we have concluded that more quantitative study is necessary to understand the mechanisms of three-component site responses, especially for three components of P waves and the vertical component of S waves. We also summarized recent studies on nonlinear site responses, in which observed records were simulated well by revised equivalent linear analyses, time-domain total stress analyses, or effective stress analyses. For empirical site response studies, estimation methods for both Fourier amplification spectra

and phase spectra of site responses have been proposed and revised since the 1990's. In addition, a new method to estimate empirical site responses in time domain using a wavelet analysis has been recently proposed. Estimated empirical site responses were applied to strong motion predictions through statistical Green's function method and showed their good applicability. Empirical site response factors obtained from records of horizontal components for S waves were inverted for 1-D structures at observation sites. The agreements between them were very good or good for about one half of the sites. This result suggests that empirical site responses have advantage over 1-D theoretical site responses, because they include the site effects which cannot be represented by simple 1-D models. However, empirical site responses can be obtained only at strong motion observation sites. We should study the relationship between 1-D three-component site responses assuming obliquely incident P and S waves with the corresponding empirical site responses in a more quantitative manner. Then we will see more clearly the contribution of the basin effects, as well as the source and path effects.

Key words: One-dimensional site response, Empirical site response, Soil nonlinearity, Strong motion prediction, Deviation

§ 1. はじめに

表層地盤および地震基盤から上の堆積層全体の地震動の増幅特性に関しては、川瀬 (1993) のレビュー論文によりまとめられているように、1930 年代の妹沢・石本の先駆的研究から、多くの研究がなされている。川瀬 (1993) により、1990 年代前半の研究まではまとめられているため、本論文では、その後の研究を取り上げてレビューを行う。ここでレビューする多くの研究では、防災科学技術研究所の K-NET・KiK-net、気象庁の 95 型震度計観測網をはじめとする強震観測網による観測記録が利用されている。このように表層地盤の増幅特性に関する研究には、1995 年兵庫県南部地震を契機とした全国的な強震観測網の整備が重要な役割を果たしている。したがって、それらの強震観測網についても取り上げるべきところではあるが、本特集号の地震観測の章でも取り上げられており [刃刀・他 (2009)], また 4 年前の日本地震工学会論文集の特集号 Recent development of research and practice on earthquake engineering in Japan (第 4 巻, 第 3 号, 2004) にもいくつかレビューされているので、本論文では割愛する。長周期域における二・三次元の盆地効果については本特集の額・三宅 (2009) を、経験的最大限度増幅率評価に関しては翠川 (2009) を参考にされたい。

§ 2. 一次元理論地盤増幅特性に関連する研究

1980 年代までの一次元波動理論増幅特性に関する研

*〒135-8530 東京都江東区越中島3丁目4-17

**〒611-0011 宇治市五ヶ庄

究は、S波の鉛直下方入射を仮定した工学的基盤で浅のS波部水平動の増幅特性が主な対象であった。1990年代以降もその分野の研究はより精緻なモデル化および領域の拡大を図りつつ継続されてきている。特にS波の減衰定数（あるいは Q_s ）に関しては、1980年代から指摘されてきた周波数依存の Q_s が、多くの鉛直アレー記録あるいはボアホール記録から推定されている。また、最近では、S波部上下動、P波部上下動の増幅特性の研究も進み、P波の鉛直下方入射を仮定してP波の減衰定数（あるいは Q_p ）のインバージョンも行われるようになり、 Q_p と Q_s の関係も検討されている。さらに、地震基盤でのS波の斜め入射を考慮した、 Q_s のインバージョンや水平2成分（Radial成分とTransverse成分）と上下成分の地盤増幅特性に関する研究がなされるようになっていく。また、強震観測網の強化により、多数の軟弱地盤上の観測記録に地盤の非線形性が確認され、地盤の非線形性を考慮したシミュレーション解析に関する研究もなされている。以下では、これらの一次元理論地盤増幅特性に関連する研究を概観する。

2.1 S波の鉛直下方入射を仮定した水平成分の理論地盤増幅特性

一次元理論地盤増幅特性に基づき表層地盤の増幅特性を検討するには、鉛直アレーあるいはボアホールの記録が有効である。鉛直アレー地震観測の草分けは、Kanai *et al.* (1959) による日立銅山における地表と地下300 mでの地震観測であろう。その後、1968年十勝沖地震を契機に、田中・大沢 (1972) は八戸で地表と地中50 mにおける鉛直アレー地震観測を行ない、地中に対する地表の観測スペクトル比と約800 m離れた地点におけるS波検層に基づく一次元理論スペクトル比との比較を行なっている。太田 (1975) は、この八戸での観測スペクトル比（フーリエ振幅スペクトル比）を用いて、減衰定数やS波速度などの地盤定数を、S波の鉛直下方入射を仮定した一次元波動理論（重複反射理論）により逆算した。以後、S波の鉛直下方入射を仮定したS波部の水平成分による地盤定数のインバージョンは、多数の観測点で多くの研究者により実施されている。インバージョンには、非線形最小二乗法 [例えば、太田 (1975), Kobayashi *et al.* (1992), 武村・他 (1993), 佐藤・他 (1994a), 藤堂・他 (1995), Satoh *et al.* (1995a)] や、GA (遺伝的アルゴリズム) [例えば、小林 (1999), 佐藤・他 (2002), 川瀬・松尾 (2004a, b)] や焼き鈍し法 [佐藤 (2003), Satoh (2006), 佐藤・他 (2006)] などの手法が用いられている。ほとんどの研究では、フーリエ振幅スペクトル比をフィッティングの対象としているが、川瀬・松尾 (2004a, b) の基準点サイトに対するインバージョン

では、フーリエ振幅スペクトル比のみならず、位相差スペクトルもフィッティングの対象にしている。

地中で観測される記録には入射波と反射波が含まれるが、インバージョンで推定された地盤定数を用いることにより入射波と反射波が理論的に分離できる。したがって、地盤定数のインバージョンは、工学的には、入力地震動設定位置での露頭基盤波（いわゆる表層地盤の増幅特性を除いたはざとり波）を推定する際に広く用いられている。

鉛直アレー観測点では、地中観測点までの速度構造がPS検層等により事前に調査されている場合が多いため、インバージョンの際は、層厚はPS検層結果で固定して、S波速度は検層結果を初期値とするか探索範囲に含めて、S波速度と減衰定数を推定するのが一般的である。減衰定数はS波速度とは異なり、鉛直アレー観測点でも事前調査されている場合はほとんどなく、インバージョンで得られる最も重要なパラメータとなる。インバージョンにより、鉛直アレー記録の観測スペクトル比を説明するためには減衰定数 h に周波数依存性を考慮することが必要であることがわかってきた。 Q_s^{-1} は、減衰定数 h の2倍 ($Q_s^{-1} = 2h$) であり、 h を周波数 f の関数として $h = h_0 f^{-\alpha}$ でモデル化した場合、上述の多くの研究では、 α はほぼ0.5～1.0の間に推定されている。また、Kinoshita (1992), 武村・他 (1993) は、 Q_s^{-1} 値の減少が高周波数領域で止まる傾向を指摘しており、小林 (1999), 吉田・小林 (2002), 佐藤・他 (2006) は、このような傾向が表現できる Q_s^{-1} のモデル式を提案している。さらに、多地点の Q_s 値を統計解析することにより、土質毎に、周波数（場合によってS波速度も）をパラメータとした経験式も提案されている [Kobayashi *et al.* (1992), 福島・翠川 (1994), 小林 (1999), 佐藤・他 (2005)]。

このようにして推定された減衰定数や経験式による減衰定数は、特に浅い層の場合にはその定義周波数である1 Hzで50%を越えるような (Q_s で1以下の) 場合もある（ただしこの表層の Q_s 値は1 Hzの地震波成分から求められているわけではないので注意されたい）。これは、観測記録に含まれる波を全てS波の鉛直下方入射の波と仮定していることから、この仮定で説明しきれない部分（表面波などの混入を含むすべての仮定外成分）が減衰定数に押し付けられているためと考えられている。したがって、得られた減衰定数は物理定数、すなわち媒体の減衰そのものではなく、このモデルの条件下での最適な見かけの減衰定数であると理解すべきである。見かけの減衰定数が大きいのという問題に関しては、池浦 (2006) は、相関解析により鉛直アレー間で無相関な成分がかなり含まれることを示している。Yoshida and

Sasatani (2008) は、PS 検層結果に基づく速度構造と仮定した減衰定数を用いて、足柄平野内の鉛直アレーの記録 (0.4 ~ 2 Hz のフィルター波) を用いて、地表の記録から鉛直下方入射して伝播した実体波と横方向から伝播した表面波基本モードの分離を行っている。その例を Fig. 1 に示したが、この図のように実体波到達直後から表面波が混在していることがわかる。佐藤 (2003)、Satoh (2006) は、斜め入射の影響を考慮することで鉛直入射の仮定の影響を除いて、地盤定数のインバージョンを行なっている。斜め入射を考慮した地盤定数のインバージョンについては 2.3 節でレビューする。

2.2 P 波の鉛直下方入射を仮定した上下成分の理論地盤増幅特性

2.1 節で述べた S 波に対する考え方と同様の考え方で、P 波の鉛直下方入射を仮定した一次元波動理論に基づき、鉛直アレー記録を用いて Q_p の推定がなされている。藤堂・他 (1995) は S 波部の上下成分を用いて Q_p を推定しているが、他の多くの研究では P 波の上下成分を用いている。Yoshimoto *et al.* (1993) は、岩盤サイトでの鉛直アレー記録から $Q_p \approx Q_s / 2$ の関係でほぼ観測スペクトル比が説明できることを示している。藤堂・他 (1995) は、新第三紀以前の比較的硬い層では $Q_p \approx Q_s (V_s / V_p)^{0.3 \sim 1.0}$ (ここで、 V_p は P 波速度、 V_s は S 波速度)、第四紀や風化層に対応する比較的軟弱な層では $Q_p \approx Q_s / 1.5$ の関係で

ほぼ説明できるとしている。また、吉田・小林 (2002) は、軟弱地盤観測点も含む鉛直アレー地震記録を用いて、 $Q_p \approx Q_s / 2$ の関係で観測スペクトル比がほぼ説明できることを示している。佐藤・他 (2002) も、第四紀層が厚く堆積した茨城県の観測点の記録から $Q_p < Q_s$ の関係を示している。

地中観測点が深部にあり、時間軸で入射波と地表での反射波が分離できる場合には、地中観測点の入射波部分と反射波部分の伝達関数 (スペクトル比) を用いて、地中観測点から地表までの堆積層における平均的な Q_p や Q_s を推定することができる [木下 (1983), Fukushima *et al.* (1992), Kinoshita (2008)]。この際、 Q_p は P 波部の上下成分、 Q_s は S 波部の水平成分 (SH 波) を用いて推定される。Kinoshita (2008) は、この考え方により、関東平野にある 2 つの観測点 SHM (下総) と FCH (府中) の地中観測点の地震記録から、 Q_p と Q_s を推定している。SHM (下総) の地中観測点は深さ 2.3 km にある S 波速度 2.6 km/s の基盤中、FCH (府中) の地中観測点は深さ 2.75 km にある S 波速度 2.5 km/s の基盤中に存在する。Fig. 2 には、2 つの観測点の記録から推定された Q_p に対する Q_s の比 Q_s / Q_p を示す。1 ~ 10 Hz で $Q_p < Q_s$ であり、上述の地中と地表のスペクトル比を用いて推定されている結果と整合する。詳細にみると、 Q_s / Q_p には周波数依存性があり、3 Hz 以下では 1.5 ~ 3 倍、4 Hz 以上で約

Fig. 1. (a) Vertical array records at CTS in the Ashigara basin for a nearby intermediate-depth event. These are bandpass filtered velocity seismograms; the pass band is from 0.4 to 1.6 Hz. (b) Vertical array analysis results; the decomposed waveforms at CTS. [after Yoshida and Sasatani (2008)] .

Fig. 2. $Q_s(f) / Q_p(f)$ for deep sediments inverted from borehole records at SHM (GL-2,300 m) and FCH (GL-2,750 m) in the Kanto basin. [after Kinoshita(2008)].

1 となることが指摘されている。なお、 Q_s 値は、0.4 ~ 2 Hz の範囲で、SHM で $Q_s = 33f^{0.82}$ 、FCH で $Q_s = 31f^{0.76}$ と推定されている。この値は福島・翠川 (1994) がまとめた深さ 100 m 以上の堆積岩の平均値 $Q_s = 36f^{0.68}$ とよく整合している。

以上では、堆積地盤の Q_p と Q_s の関係をレビューしてきたが、その多くの結果で堆積地盤における Q_p は Q_s より小さい、つまり、P 波の減衰定数は S 波の減衰定数より大きいことが指摘されている。

2.3 P 波と S 波の斜め入射を仮定した水平・上下成分の理論地盤増幅特性

2000 年代に入り、S 波部の 3 成分 (Transverse 成分, Radial 成分, Vertical 成分) を用いて S 波の斜め入射を考慮した地盤定数のインバージョンが行なわれるようになった [佐藤 (2003), Satoh (2006)]。また、統計的グリーン関数法による 3 成分の強震動予測手法では、波線理論により S 波速度 3 km/s 程度の地震基盤における入射角を計算し、その入射角を用いた P 波と S 波それぞれの 3 成分の一次元理論地盤増幅特性が用いられている [大西・堀家 (2000, 2004), 香川 (2004), 佐藤 (2008)]。

Fig. 3 には、KiK-net 仙台 (MYGH01) で観測された 2003 年宮城県沖地震の地中 (GL-1,206 m) に対する地表の観測スペクトル比 (S 波部) と、焼きなまし法により推定された地盤定数と入射角 (17.1 度) を用いた理

論スペクトル比の比較を示す。このインバージョンでは、S 波部の Transverse 成分は、基盤に斜め入射した SH 波が SH 波として、S 波部の上下成分と Radial 成分は、基盤に斜め入射した SV 波が P 波と SV 波として伝播すること [Takahashi *et al.* (1992)] が仮定されている。したがって、この手法を用いるためには、地中観測点が地震基盤中にあることが必要である。理論スペクトル比は、焼きなまし法で用いる初期値の違いによる 5 つの場合が示されている。なお、線が 2 本にみえるのは異なる乱数で同じ値が推定されているためである。水平 2 成分の観測スペクトル比の 1 次ピークの違いが斜め入射を考慮することにより表現されている。また、斜め入射を考慮する考え方には、S 波の鉛直下方入射では表現できない上下成分の地盤増幅特性が表現できるという利点がある。 Q_s 値は、0.5 から 10 Hz の範囲で、 $V_s = 200$ m/s 程度の厚さ 50 m の浅部地盤に対して $Q_s = V_s f^{0.63} / 28$ 、 $V_s = 500 \sim 3,000$ m/s 程度の深部地盤に対して $Q_s = V_s f^{0.63} / 54$ と推定されている。ここで深部地盤の平均 S 波速度 2,460 m/s を用いると $Q_s = 46f^{0.63}$ となり、前述の SHM や FCH での推定値や深い堆積岩の平均値と調和的であるといえる。

Fig. 4 には、入射角の違いによる、3 成分の理論地盤増幅率 (地中入射波に対する地表入射波の比) の違いを計算した事例を示す [佐藤 (2008)]。仙台市内中心部の

Fig. 3. Comparison between observed (dashed lines) and computed (thin lines) surface-to-borehole spectral ratios (GL0m/GL-1,206m) at MYGH01 during the 2003 Miyagi-ken Oki earthquake. The spectral ratios are computed using parameters inverted from five initial values (thin lines). The estimated incidence angle is 17.1 degree. [after Satoh (2006)].

Fig. 4. Computed one-dimensional site response factor from bedrock with S wave velocity of 3 km/s to surface at MIYA for (a) S wave and (b) P wave. The amplification factors are calculated with incident angle of ① values based on ray theory, ② 0 degree, and ③ 30 degree. [T], [R], and [V] indicate transverse, radial, and vertical components, respectively. In the vertical component panel for S wave part we also include P wave amplification factors of 0 degree incidence, while in the radial component panel we add S wave amplification factors of 0 degree incidence. [after Satoh (2008)].

1 観測点 (MIYA) における S 波速度 3,000 m/s の層上端 (地下約 660 m) から S 波速度 203 m/s の地表までの理論地盤増幅率である。S 波部は入射角 0 度 (鉛直下方入射), 30 度及び 45 度 (対象地震から波線理論で計算される入射角) の場合である。S 波部の上下成分は, P 波の鉛直入射を仮定した一次元理論地盤増幅率で説明できるという研究成果 [藤堂・他 (1995)] もあるため, Fig. 4 (a) の S 波部の上下成分には鉛直 P 波入射の場合も点線で示されている。P 波部は, 入射角 0 度 (鉛直下方入射), 30 度及び 48 度 (同じく対象地震から波線理論で計算される入射角) の場合である。Fig. 4 (b) の P 波部の Radial 成分には鉛直 S 波入射の場合も点線で示されている。S 波部をみると, Transverse 成分より Radial 成分で入射角の影響が大きく, 上下成分は最も入射角の影響が大きい。S 波部の上下成分の増幅特性として, P 波の鉛直入射を仮定するか, SV 波の斜め入射を仮定するかにより増幅特性がかなり異なることがわかる。Fig. 4 (b) の P 波部の上下成分も, 入射角の違いによる理論地盤増幅率の違いが大きい。仮に, P 波の入射角が 30

度の場合に 0 度 (鉛直入射) を仮定して, P 波部上下成分から減衰定数を推定すれば, 減衰定数が過大評価 (Q_p が過小評価) されることになる。Fig. 4 (b) の P 波部 Radial 成分は, 0.5 Hz 以下の低周波数領域を除くと, P 波斜め入射と S 波鉛直入射の増幅特性は類似していることがわかる。この結果は, P 波部の水平動と S 波部の水平動の経験的サイト増幅特性が類似しているというスペクトルインバージョンに基づく研究成果 [岡本・他 (1999)] と定性的に整合する。

点震源を仮定した, 平行成層の一次元地盤モデルによる計算でも, 地震基盤に入射する P 波の理論波形に Transverse 成分は存在しないが, 実観測記録では Transverse 成分は存在するように見える。したがって, 実記録を再現できる強震動予測のためには, P 波部の Transverse 成分の地盤増幅特性の評価も必要となる。P 波部の Transverse 成分の主な原因として, 散乱波の影響が考えられるが, P 波部水平成分の増幅特性に関しては, 上述の岡本・他 (1999), 佐藤 (2008) を除き観測記録に基づく検討はほとんど行われていない。P 波部水平成分

の振幅は相対的に小さいため、その増幅特性は、強震動予測の観点からはあまり重要ではない。しかし、散乱波の研究などには有用であると考えられることから、今後検討していく価値はあると考えられる。

S波部上下動の増幅特性については、波線理論で計算される入射角を用いたS波の斜め入射で算出される地盤増幅特性を用いて計算される統計的グリーン関数の上下動が過小評価される可能性が指摘されている[三明・他(1999)]。佐藤(2008)は、その原因として理論地盤増幅特性には散乱波などのインコヒーレントな成分の影響が含まれていないことを指摘し、低周波数領域を波線理論で計算される入射角を用いたS波の斜め入射による理論地盤増幅特性、高周波数領域をP波鉛直入射の増幅特性とすると、S波上下動の過小評価が改善されることを示している。これは、高周波数領域のみを考えると、前述の鉛直アレー記録に基づくS波部の上下動の観測スペクトル比がP波鉛直入射の一次元理論地盤増幅特性で説明できるという研究成果[藤堂・他(1995)]や、スペクトルインバージョンによる経験的サイト増幅特性はP波部の上下動とS波部の上下動が類似しているという研究成果[岡本・他(1999)]と定性的には整合するが、今後、理論的に推定される波動場の特性を踏まえた定量的な検討が必要であると考えられる。P波部のTransverse成分やS波部上下動が単純な斜め入射だけでは十分説明できない原因が散乱波などのインコヒーレントな成分の影響であれば、P波部3成分、S波部3成分全てについて考慮すべき問題となる。一次元理論地盤増幅特性は、平行成層地盤における直達実体波入射を仮定したものであるため、散乱波の影響が考えられる高周波数領域も含めた合理的な3成分の地盤増幅特性の算出法に関しては、S波部、P波部に共通の今後の課題であると考えられる。

2.4 地盤の非線形性を考慮したシミュレーション

これまでレビューした研究で対象としているのは、基本的には線形領域での地盤増幅特性である。強震動のレベルが大きくなると、特に表層の軟弱地盤では地盤の非線形性の影響が無視できなくなる。地盤が非線形化するような強震記録に対しても、鉛直アレー観測記録のS波部の水平成分を用いてS波の鉛直下方入射を仮定した一次元波動理論に基づく地盤定数のインバージョンが行なわれている[例えば、Satoh *et al.* (1995b, 1997, 2001), Sato *et al.* (1996)]。この場合、等価なS波速度と減衰定数がインバージョンで求められるが、インバージョンで得られたS波速度から算出される剛性低下率は室内試験結果とほぼ整合することが指摘されている[Satoh *et al.* (1995b, 1997, 2001), Sato *et al.* (1996)]。従来より、一般

的な等価線形解析手法では高周波数領域で過小評価となる問題が指摘されていたが、この問題を解決する等価線形解析手法の改良手法が、杉戸・他(1994)、佐藤・他(1994b)、Yoshida *et al.* (2002)、Satoh *et al.* (2001)、山本・笹谷(2007)などより提案されている。したがって、等価線形解析手法が有効なひずみレベルの範囲ではこのような手法が有効であろう。

しかし、ひずみレベルが 10^{-3} 程度以上となると逐次非線形解析、特に、液状化の時のように過剰間隙水圧が上昇する場合には有効応力解析が必要となる。このような研究に関しては、森(2005)やYoshida and Iai (1998)でレビューがなされているため、その中ではレビューされていない最近のシミュレーション解析に関する研究事例を概観する。1995年兵庫県南部地震の際には、ポートアイランドの鉛直アレーで観測された、液状化したと考えられる強震動波形が、有効応力解析により再現されることが示されている[例えば、川瀬・他(1995)、吉田(1995)]。2000年鳥取県西部地震のKiK-net日野、KiK-net伯太の記録に対しては、地表の記録から地中の記録を再現するように非線形パラメータの推定が行われている[山添・他(2004)]。また、2003年十勝沖地震のKiK-net豊頃の記録では、山本・笹谷(2007)により改良された等価線形化法と吉田(2003)により提案されている非線形解析手法DYNES3Dにより、波形が再現されることが示されている[山本・笹谷(2007)]。最近では、2004年新潟県中越地震のK-NET小千谷とJMA小千谷(気象庁小千谷市城内)の強震記録に対して、700mほど離れた堆積岩上にある建物基礎の記録を入力とした逐次非線形解析や有効応力解析により、強震記録が再現されることが示されている[藤川・他(2006)]。Fig. 5には、K-NET小千谷とJMA小千谷の地表における観測波形と逐次非線形(全応力)解析により推定された波形との比較(EW成分の加速度波形と速度波形)を示す。JMA小千谷とK-NET小千谷の距離は700m程度と近いものの、観測波形の最大加速度が、それぞれ、 898 cm/s^2 、 1308 cm/s^2 、最大速度が、それぞれ、 92 cm/s 、 131 cm/s と大きく異なっている。この違いが逐次非線形解析により、よく再現されている。Fig. 6には、逐次非線形解析による最大加速度、最大速度、最大ひずみの深さ分布を示す。なお、地下32mのS波速度510 m/s層上面が入力位置である。表層3mの増幅率の差が大きいことがわかる。これは、主に、表層3mのS波速度がJMA小千谷とK-NET小千谷でそれぞれ、130 m/s、50~60 m/sと倍以上の差があることと関連が深い。藤川・他(2006)は、K-NET小千谷の観測波形は有効応力解析を行うと、さらに再現性がよくなることも示している。このように、

Fig. 5. Comparison between observed and synthetic acceleration time histories (left) and velocity time histories (middle), and pseudo velocity response spectra (right) at (a) JMA Ojiya and (b) K-NET Ojiya during the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake. The synthetics are calculated by an effective stress analysis using a record observed on sedimentary rock. [after Fujikawa *et al.* (2006)].

Fig. 6. Depth distributions of peak ground acceleration (left), peak ground velocity (middle), and maximum shear strain (right) at JMA Ojiya and K-NET Ojiya calculated by an effective stress analysis during the 2004 Mid-Niigata prefecture earthquake. [after Fujikawa *et al.* (2006)].

精度よい地盤モデルと、非線形計算に必要なパラメータがあれば、地盤の非線形性を考慮した表層地盤の増幅特性の評価が可能となってきているといえる。

最後に、これは非線形応答のシミュレーションではないが、非線形サイト増幅特性に関して興味深い結果が得られているので報告しておく。次章で詳しく解説するが、同一地震で多数の記録が得られている場合、スペクトルインバージョンによって経験的サイト増幅特性を求めることができる。その方法を用いて Kawase and Nejime (2006) は、まず地震動レベルが線形範囲内と考えられ

るサイト群を用いてその地震の震源スペクトルを求め、それと伝播経路特性から地震動レベルが大きな地点のサイト増幅特性を残差として求め、それを地震動レベルが小さい地震群から求めた平均的なサイト増幅特性と比較した。その結果、一般にいわれるようなピーク振動数の低下とともにピークレベルが低下する典型的な地盤の非線形性による影響と考えられる差異が生じている地点も見出されたが、ピーク振動数は低下しているもののピークレベルは逆に増大している地点も見つかった。それらの地点はいずれも硬い地盤の上に薄い表層が載っている構造をしており、表層地盤の非線形化によりインピーダンス比が増大する効果（ピークレベルを増大させる）の方が、減衰が増大する効果（ピークレベルを減少させる）よりも大きかった可能性が指摘されている。

§ 3. 経験的サイト特性

観測される地震動の S 波のフーリエスペクトル $A(f)$ は、震源特性 $S(f)$ 、伝播経路特性 $P(f)$ 、サイト特性 $G(f)$ を用いて

$$A(f) = S(f)P(f)G(f) \quad (1)$$

で表現できる。ここで f は周波数であり、全てのフーリエスペクトルは複素フーリエスペクトルである。 $G(f)$ が、観測記録に基づき推定される場合、経験的サイト特性と呼ばれる。(1) 式を、フーリエ振幅スペクトル $|A(f)|$ 、 $|S(f)|$ 、 $|P(f)|$ 、 $|G(f)|$ とフーリエ位相スペクトル $\phi_A(f)$ 、 $\phi_S(f)$ 、 $\phi_P(f)$ 、 $\phi_G(f)$ を用いて表現すると

$$|A(f)| \exp\{-i\phi_A(f)\} = |S(f)| |P(f)| |G(f)| \exp\{-i(\phi_S(f) + \phi_P(f) + \phi_G(f))\} \quad (2)$$

と書き換えられる。ここで、 i は虚数単位である。(2) 式をフーリエ振幅スペクトルとフーリエ位相スペクトルと分離して表示すると、

$$|A(f)| = |S(f)| |P(f)| |G(f)| \quad (3)$$

$$\phi_A(f) = \phi_S(f) + \phi_P(f) + \phi_G(f) \quad (4)$$

となる。フーリエ位相スペクトルは連続量ではなく、そのままでは特性をとらえるのは困難である。そこで、位相スペクトルの微分である群遅延時間 $tgr^A(f)$ を用いて位相スペクトルをモデル化することが行われている。 $tgr^A(f)$ は、 $\phi_A(f)$ の微分を用いて

$$tgr^A(f) = d\phi_A(f) / (2\pi df) \quad (5)$$

で表され、 $tgr^A(f)$ も

$$tgr^A(f) = tgr^S(f) + tgr^P(f) + tgr^G(f) \quad (6)$$

と、震源特性、伝播特性、サイト特性の線形和で表現することができる。 $tgr^A(f)$ は、フーリエ振幅スペクトルが小さい周波数では、信頼のできない値をもつ可能性があり、周波数による変動が大きい。したがって、 $tgr^A(f)$ をフーリエ振幅スペクトルで重みづけた狭周波数帯域での平均値 $\mu_{tgr}^A(f)$ と分散 $\sigma_{tgr}^A(f)^2$ を用いて、フーリエ位相スペクトルがモデル化される場合もある。 $\mu_{tgr}^A(f)$ と分散 $\sigma_{tgr}^A(f)^2$ は、狭帯域フィルター波の重心位置と広がりを意味しており [和泉・勝倉 (1983)]、いずれも、以下のように震源特性、伝播特性、サイト特性の線形和で表現できる [澤田・他 (1998)]。

$$\mu_{tgr}^A(f) = \mu_{tgr}^S(f) + \mu_{tgr}^P(f) + \mu_{tgr}^G(f) \quad (7)$$

$$\sigma_{tgr}^A(f)^2 = \sigma_{tgr}^S(f)^2 + \sigma_{tgr}^P(f)^2 + \sigma_{tgr}^G(f)^2 \quad (8)$$

ここでは、観測記録から分離された $tgr^G(f)$ 、 $\mu_{tgr}^G(f)$ 、 $\sigma_{tgr}^G(f)^2$ を総称して、経験的サイト位相特性と呼ぶものとする。

(3) 式の両辺の対数をとると右辺は和で表すことができるため、 $|A(f)|$ から $|S(f)|$ 、 $|P(f)|$ 、 $|G(f)|$ を最小二乗法により分離することができる。一般に、このフーリエ振幅スペクトルの分離を「スペクトルインバージョン」と呼んでいる。このうち、 $|G(f)|$ を「経験的サイト増幅特性」や「経験的地盤増幅特性」と呼ぶ。なお、 $|P(f)|$ は通常、

$$P(f) = \frac{1}{X^\alpha} \exp\left(-\frac{\pi f X}{Q_s(f) V_s}\right) \quad (9)$$

とモデル化される。ここで、 X は震源距離、 V_s は伝播経路の平均的 S 波速度である。 α は、一般には実体波の幾何減衰である 1 が用いられるが、この α も記録から推定する場合もある [川瀬・松尾 (2004a)]。

以下では、経験的サイト増幅特性（経験的地盤増幅特性）と経験的サイト位相特性に関する研究を概観するとともに、これらを用いた強震動予測に関する研究を紹介し、経験的サイト特性に関する今後の課題を整理する。

3.1 地表での経験的サイト増幅特性

スペクトルインバージョンで、 $|S(f)|$ と $|G(f)|$ を分離するためには、何らかの拘束条件が少なくとも 1 つ必要であり、この拘束条件には様々なバリエーションがある。岩田・入倉 (1986) では、全ての経験的サイト増幅率が 2 倍以上になる（＝ある振動数で増幅率最小のサイトを自由地表面効果のみのサイトとする）という拘束条件を用いている。しかし、5 Hz 以上では減衰の影響で 2 倍以下になることもあり、増幅率の評価が難しくなることを指摘している。この減衰の影響を避けるため、野津・他 (2006a, 2006b, 2007) は、地表付近の S 波速度が十分に大きい地点の中から周波数毎に増幅率が最も小さい地点での地盤増幅率を 2 倍としている。一方、ある特定の観測点を基準観測点とする場合も多い [例えば、Kato *et al.* (1992), 佐藤・巽 (2002)]。しかし、高周波数領域まで地盤増幅がないと仮定できる観測点はほとんどないため、各種の方法で基準観測点における地震基盤からの地盤増幅特性が推定されている [Takemura *et al.* (1991), 山中・他 (1998), 川瀬・松尾 (2004a, b)]。特定の観測点を基準観測点とする方法では、一般に基準観測点の地震基盤の S 波速度が既知であるため、強震動予測の際の地震基盤の S 波速度として直接使用が可能という利点がある。川瀬・松尾 (2004b) は、K-NET, KiK-net 観測点での PS 検層結果で表層地盤モデルを作成し、地震基盤から地表までの経験的サイト増幅特性（水平動）に鉛直下方入射の一次元理論地盤増幅率がフィッティングするように地震基盤から PS 検層最深部までの地下構造モデルを推定している。Fig. 7 には、K-NET 蒲郡 (AIC014) でのフィッティングの例を示す。経験的サイト増幅特性が、一次元理論地盤増幅率でよく再現されている。この例は、フィッティングがよい例であり、フィッティングがうまく行えない観測点もあることが述べられている。フィッティングがよくない原因として表層地盤を PS 検層で固定していること以外に、二、三次元的効果、地形効果が挙げられている。散乱波の影響の可能性も考えられる。したがって、経験的サイト増幅特性は、強震観測点でのみ得られるという制限はあるもの、一次元理論地盤増幅特性で説明できないような効果が経験的に入って

Fig. 7. Comparison between empirical site response factor (black line) and one-dimensional site response factor (blue line) from the seismic bedrock to surface fitting to the empirical site response factor at AIC014. The red line indicates one-dimensional site response factor calculated using a PS logging result from a depth of 20 m to the surface. [after Kawase and Matsuo (2004b)].

いるため、強震動予測の観点からはより有用であるといえる。さらに、川瀬・松尾 (2004b) は、地下構造が推定された大多数の観測点で浅い部分 (500 m 以下) に S 波速度 2 km/s 以上の層が推定されること、表層から地下 10 m までの平均 S 波速度と最大加速度と最大速度との相関が表層から地下 30 m までの平均 S 波速度より高いことを指摘している。これは、地下 10 m までの極表層の地盤増幅が地震動特性に大きく寄与していることを意味している。

これまで紹介したスペクトルインバージョンでは、サイト特性に拘束条件を付与している。したがって、この方法では、基準となる観測点での地盤増幅特性をいかに精度よく推定するかが鍵となる。一方、震源特性に拘束条件を付与する考え方もある。佐藤・他 (1994b)、山本・他 (1995)、あるいは鶴来・他 (1997) は震源特性を ω^{-2} モデルと仮定して、経験的サイト増幅特性を算出している。ただし、この手法でも、低周波数領域では、基準観測点で地盤増幅率 2 という拘束条件も付与されている。Moya and Irikura (2003) は、基準となる地震の震源特性を ω^{-2} モデルと仮定するとともに、近接して発生した大小二つの地震に対するスペクトル比からコーナー周波数を推定することで震源特性の影響を除いてスペクトルインバージョンを行う手法を提案している。ただし、これらの ω^{-2} モデルと仮定する手法において $f_{\max}$ を考慮しない場合、得られた経験的サイト増幅特性に用いた多数の中小地震の $f_{\max}$ の影響が入っていることに注意が必要である。

なお、岩田・入倉 (1986) をはじめとする多くの研究では、S 波部を対象にスペクトルインバージョンを行っているが、表面波を含む後続部までを含めて経験的サイト増幅特性や経験的サイト位相特性を求めるためにあえて S 波部以降の表面波を含む長い継続時間を用いる場合もある [野津・他 (2006a, 2006b, 2007)]。この際、後続波が $|P(f)|$ と $|S(f)|$ の推定に悪影響を及ぼさないように、一段階目で S 波部を用いたスペクトルインバージョンを行い、ここで得られた $|P(f)|$ と $|S(f)|$ を用いて、二段階目で S 波部以降の長い継続時間の記録から $|G(f)|$ が推定されている [野津・他 (2006b, 2007)]。

3.2 地中での経験的サイト増幅特性

これまであまり試みられてきていないが、ボアホール観測記録に対しても地表の観測記録に対するのと同様なスペクトルインバージョンが可能である。この場合ボアホール観測記録におけるサイト特性が直接得られるわけで、もしも拘束条件として地震基盤相当の基準点を選べばそれに対する地中での相対増幅特性が得られる。ここでは Kawase (2006) の結果を紹介する。

Kawase (2006) では川瀬・松尾 (2004a, 2004b) のスペクトルインバージョンと同様に、拘束条件として YMGH01 の記録から表層の影響を剥ぎ取ったものを用いている。その S 波速度は 3,450 m/s なので地震基盤相当である。Fig. 8 にはそうして得られた KiK-net 観測点のサイト増幅特性の 1 例を示す。この図からボアホール観測記録も相当強いサイト特性を有していること (ちなみに地中最下層の S 波速度は 1.8 km/s)、地中でディップ (谷) となっている振動数ではスペクトル比は必ずピークとなるがそ

Fig. 8. Site amplification factors at IWTH25 KiK-net site obtained by the spectral inversion method. Red: surface, Black: borehole, Blue: ratios between them. [after Kawase (2006)].

の振動数で必ず地表でもピークとなっているわけではないことがわかる。多くの観測点で同様の比較をすると、むしろ Fig. 8 に示した例のように地中でディップが明瞭に見られる地点は少なく、地表と似た周波数特性を示す地点が多い。これは入射波と反射波の干渉がコヒーレントに生じていないことを示しており、2.1 節で指摘した見かけの減衰が大きく評価されることと対応する。いずれにしても「硬質地盤の地中ではサイト特性が無視できる」と仮定することには根拠が乏しいことに注意が必要である。

3.3 経験的サイト位相特性

はじめに、 μ_{gr}^A の観測事例として、1990 年伊豆大島近海地震 ($M_0 6.5$, 震源深さ 5.8 km) の気象庁観測点の銚子 (震央距離 183 km) における周期 1 ~ 10 秒の速度フィルター波 (Transverse 成分) の非定常スペクトルと μ_{gr}^A を Fig. 9 に示す [佐藤・他 (1996)]. Love 波と考えられる表面波の卓越により、周期毎に波群の伝播時間が異なる分散性波動の特徴が μ_{gr}^A で表現されている。佐藤・他 (1997) は、多数の強震観測記録の $\mu_{gr}^A(f)$ と $\sigma_{gr}^P(f)$ を震央距離で回帰分析し、サイト特性である $\mu_{gr}^G(f)$ と $\sigma_{gr}^G(f)$ を回帰式からの残差として求めている。これは、(7), (8) 式において、震源特性の影響がないと仮定したことになる。また、古和田・他 (1998) は、震源の規模が小さい場合には、S 波初動を基準とした $tgr^d(f)$ はサイト特性 $tgr^G(f)$ を表しているとして、広帯域の経験的サイト位相特性 $tgr^G(f)$ を求めている。澤田・他 (1998) は、震源特性の影響がないと仮定し、伝播経路

特性 $\sigma_{gr}^P(f)^2$ が経験的に震源距離の 2 乗に比例するとして、大阪付近で観測された記録から伝播特性 $\sigma_{gr}^P(f)^2$ とサイト特性 $\sigma_{gr}^G(f)^2$ の分離を行っている。また、佐藤 (2004, 2006) は $\mu_{gr}^A(f)$ を、岩田・入倉 (1986) のスペクトルインバージョン手法と同様に、非負条件付きの最小二乗法で、震源特性 $\mu_{gr}^S(f)$ 、伝播特性 $\mu_{gr}^P(f)$ 、サイト特性 $\mu_{gr}^G(f)$ に分離している。以上の手法では、周波数領域での経験的サイト特性を扱っているが、Birgoren and Irikura (2005) は Wavelet 変換を用いて時間領域で経験的サイト特性を推定する手法を提案している。

3.4 経験的サイト特性を用いた強震動評価

ここでは、経験的サイト増幅・位相特性を用いた統計的グリーン関数法による強震動評価事例を紹介する。

佐藤・他 (1994c) は、経験的サイト増幅特性を用いて、統計的グリーン関数法により 1978 年宮城県沖地震の仙台周辺での S 波部の水平動の強震動シミュレーションを行ない、観測加速度波形がよく再現できることを示している。経験的サイト増幅特性は、一般には、地盤が線形領域の増幅特性である。したがって、佐藤・他 (1994c) では、地震基盤から工学的基盤までは、工学的基盤ではぎとり波を用いた経験的サイト増幅特性、工学的基盤から地表までは地盤の非線形性を考慮した一次元理論増幅特性を用いて統計的グリーン関数法により強震動評価を行っている。

また、古和田・他 (1998) は、経験的サイト増幅・位相特性を用いて統計的グリーン関数法により 1995 年兵庫県南部地震の大阪平野の観測点の S 波部の水平動と

Fig. 9. Nonstationary spectrum and μ_{gr}^A of a velocity record bandpass-filtered in the period range from 1 to 10 sec at Choshi (JMA site) during the 1990 Izu-Oshima Kinkai earthquake. [after Satoh *et al.* (1996)].

Fig. 10. Location of three asperities for the 2003 Tokachi-oki earthquake (squares) and strong motion observation sites (triangles). [after Nozu *et al.* (2007)].

上下動の強震動シミュレーションを行い、手法の妥当性を検証している。野津・他(2006a, 2006b, 2007)は、経験的サイト増幅・位相特性を用いて統計的グリーン関数法により複数の地震に対する強震動シミュレーションを行い、S波部以降の後続部を含めた観測記録(水平動)をよく再現できることを示している。Fig. 10には、野津・他(2007)が経験的サイト増幅・位相特性を用いて統計的グリーン関数法により2003年十勝沖地震の強震動の再現を行った際の震源モデルと観測点位置を示す。Fig. 11には、KiK-net 茅芽(TKCH06)とKiK-net 清水(TKCH11)での水平成分のフィルター(0.2~1 Hz)速度

波形を再現した事例を示す[野津・他(2007)]。両観測点は、アスベリティ位置から見ても近いが、経験的サイト増幅・位相特性を考慮したことにより、後続波も含めた観測波形の違いが非常によく再現されている。

以上のように、統計的グリーン関数法によるS波部及び後続部の強震動シミュレーションを通じて、経験的サイト特性の有効性は検証されている。しかし、斜め入射を考慮した一次元理論地盤増幅特性は入射角により変化し、その影響はP波部、S波部とも上下動で特に大きい。したがって、経験的サイト増幅特性は、これらの違いが平滑化されている可能性がある。今後、P波とS波

Fig. 11. Comparison between observed (black lines) and synthetic (red lines) velocity time histories band-pass filtered from 0.2 to 1 Hz at TKCH06 and TKCH11 during the 2003 Tokachi-oki earthquake. The synthetics are calculated by statistical Green's function method using empirical site responses. [after Nozu *et al.* (2007)].

の斜め入射を考慮した3成分一次元理論地盤増幅特性と対応する経験的サイト特性の比較により、両地盤増幅特性の適用範囲や精度についてさらに検討していく必要があると考えられる。

3.5 経験的サイト特性のばらつき評価

スペクトルインバージョンによって求めた経験的サイト増幅特性には必ずばらつきが存在し、予測に際してはそれを考慮することが重要である。しかしこれまで強震動予測研究で震源モデルのパラメータ変動に対する検討はいくつかされてきているが、サイト特性によるばらつきについては十分な検討がなされてきていなかった。これはおそらくこれまで平均特性だけでなくそのばらつきまで考慮するに足る十分なデータがなかったためと考えられる。

最近になって最大値および応答スペクトルのばらつきに関して従来の結果の見直しをせまる重要な論文が登場した [Morikawa *et al.* (2008)]。そこでは震源とパスの影響を最小限に減らすため、50 km 四方の同一クラスター内の震源群に対して経験的距離減衰式 [Kanno *et al.* (2006)] との残差をサイト特性として補正し、その補正平均値からの観測値のばらつきを求めている。その結果、補正した場合の応答スペクトルのばらつき（対数標準偏差）は低振動数域で0.2（1.6倍/1.6分の1）、高振動数域で0.16（1.4倍/1.4分の1）となり、補正しない場合の0.4（2.5倍/2.5分の1）に比べ対数で半分かそれ以下（比で1.6分の1かそれ以下）となった。特に重要なことは、そのばらつきは周波数によらず距離が大きくなるほど小さくなること、振幅が大きくなるほど大きくなることである。彼らが報告した結果はそれまで経験的予測式におけるばらつき評価に用いられてきた翠川・大竹 (2003) が報告していた結果と全く逆となっている。

同様の結果は、称占・川瀬 (2008) によっても報告さ

れている。彼らは、川瀬・松尾 (2004a, 2004b) と同じスペクトルインバージョンにより、サイト特性を分離しているが、その際に得られた個々の地震のサイト特性からフーリエスペクトルの対数標準偏差を求めている。Fig. 12 には彼らが求めた全地点の残差のばらつきを示す。左の図は 200 cm/s^2 以下の記録に対するもの、右の図は 200 cm/s^2 以上の記録に対するもので、振幅の大きな記録の方がばらつきが大きくなっていることがわかる。いずれもばらつきの周波数依存性は小さい。距離依存性についても震源距離が大きくなるほど小さくなる傾向を示した。ただ、マグニチュード依存性については、Morikawa *et al.* (2008) は若干見られるとしているが、称占・川瀬 (2008) ではほとんど見られないと報告されている。振幅が小さい場合のばらつきは対数で0.23から0.27で（倍率では約1.8倍/1.8分の1）、平均増幅率が表層地盤の硬軟によらずピークで10倍に達していることを考えると比較的小さいといえる。

§ 4. ま と め

本論文では、時刻歴波形として広帯域（0.1～20 Hz 程度）の強震動予測を行うという観点で1990年代以降の表層地盤の増幅特性の研究をレビューした。表層地盤の増幅特性を、一次元理論地盤増幅特性と経験的サイト増幅特性の2つに大別してレビューしており、研究の現状と今後の課題を以下にまとめる。

一次元理論地盤増幅特性に関しては、1990年以降、ボアホール記録（鉛直アレー記録）を用いた、実体波の鉛直下方入射を仮定した一次元波動理論（重複反射理論）に基づくインバージョン解析により、堆積地盤の Q_s 値に周波数依存性があり、周波数が高くなると Q_s 値が大きくなることが明らかになった。土質毎に、周波数（場合によってはS波速度も）に依存する Q_s 値の経験式も

Fig. 12. Logarithmic standard deviations obtained by the spectral inversion (a) for records with PGA less than 200 cm/s^2 , (b) for records with PGA more than 200 cm/s^2 . [after Nejime and Kawase (2008)].

提案されている。堆積地盤の Q_p 値については、複数の研究者により $Q_p < Q_s$ であることが示されている。また、地盤が非線形化した場合（ひずみレベル 10^{-3} 程度以下）の簡便な増幅特性の計算法として、周波数依存の減衰定数を考慮できる等価線形解析手法が提案され、従来の手法で問題となっていた高周波数領域での増幅率の過小評価が改善されるようになっている。2000 年代に入ると、S 波部の 3 成分（Transverse 成分、Radial 成分、Vertical 成分）を用いて S 波の斜め入射を考慮した地盤定数のインバージョンが行なわれるようになった。また、統計的グリーン関数法による 3 成分の強震動予測手法などでは、斜め入射を考慮した P 波部と S 波部の 3 成分の地盤増幅特性が用いられている。しかし、P 波の斜め入射を考慮した P 波部 3 成分の増幅特性については、観測記録に基づく定量的な検討はほとんど行われていない。また、S 波部上下動の増幅特性も、S 波の斜め入射だけでは過小評価される傾向が指摘されており、今後の検討が必要である。一次元理論地盤増幅特性は、平行成層地盤における直達実体波入射を仮定したものであるため、散乱波の影響が考えられる高周波数領域も含めた合理的な 3 成分の地盤増幅特性の算出法に関しては、S 波部、P 波部に共通の今後の課題であると考えられる。また、強震時の軟弱地盤における地盤の非線形性については、地盤構造や非線形解析に必要なパラメータがあれば、逐次非線形解析や有効応力解析により精度よい予測が可能となってきたといえる。

経験的サイト特性に関しては、1990 年代以前から行われていたフーリエ振幅スペクトルのスペクトルインバージョン手法にいくつかの改良手法が提案され、多くの強震観測点で経験的サイト増幅特性が求められている。また、水平動の経験的サイト増幅特性に S 波鉛直入射の一次元理論地盤増幅率がフィッティングするように地下構造の推定もなされている。一次元理論地盤増幅率でよく再現できる観測点とできない観測点があり、再現できない原因として二、三次元効果や地形効果や散乱波の影響が考えられる。したがって、一次元理論地盤増幅率では表現できないサイト特性が経験的に含まれている経験的サイト増幅特性は、強震動予測という観点からは有益であるといえる。しかし、経験的サイト増幅特性は、強震観測点以外では推定できないという問題がある。1990 年代後半以降にはフーリエ位相スペクトルからも経験的サイト位相特性が推定されるようになった他、wavelet 変換に基づき時間領域で経験的サイト特性を推定する手法も提案されている。このように、位相も考慮した経験的サイト特性が評価できるようになり、統計的グリーン関数法による S 波部及び後続波の強震動予測の

高精度化に大いに寄与している。ただし、10 Hz 程度以上の高周波数領域の経験的サイト特性については、基準観測点のサイト特性をいかに精度よく推定するか、あるいは、 ω^2 モデルで拘束する場合には $f_{\max}$ をどう評価するかなどの問題もある。また、経験的サイト特性は、斜め入射を考慮した一次元理論地盤増幅特性にみられる入射角による違いなどが、平滑化されている可能性があることに注意が必要である。鉛直下方入射の S 波の一次元理論地盤特性と S 波水平動の経験的サイト特性の関係については検討されているが、今後、同一地点で様々な入射角や方位角を持ったデータを蓄積し、P 波部・S 波部の 3 成分の斜め入射を考慮した一次元理論地盤増幅率と経験的サイト特性の関係を把握することにより、両増幅特性の適用範囲を明確化していく必要があると考えられる。経験的サイト特性のばらつき評価についてはまだ着手されたばかりであるが、上述のような課題も含め今後その発生源がモデル化可能なものと不可避なばらつきとに切り分けられ、データがある場合にはサイトの個性を反映したより高精度な予測が可能になるとともに、データが不十分な場合にはばらつきを考慮して第一次近似解を用いることも可能となろう。

はじめにでも触れたが、今回レビューした研究の多くは兵庫県南部地震以降に全国に展開された観測ネットワークで得られた強震記録を用いたものであり、大量かつ良質の強震記録が如何に地盤増幅特性の研究に貢献するものであるかを改めて痛感させられた。今後も、観測と理論の両面から地盤増幅特性の研究が進められていくことが期待される。

謝 辞

2 名の査読者のご意見は、本論文の修正にあたり大変有意義なものでした。また、論文の図を引用させて頂いた木下繁夫教授、野津 厚博士、吉田邦一博士、藤川 智氏には、原図を送って頂きました。記して、感謝致します。なお、本論文は科学研究補助金（基盤研究 (c) 課題番号 20560544）によるサポートを受けている。

文 献

- Birgören, G. and K. Irikura, 2005, Estimation of site response in time domain using the Meyer-Yamada wavelet analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 1447-1456.
- 藤川 智・先名重樹・藤原広行・大井昌弘, 2006, 2004 年新潟県中越地震の強震観測点における表層地盤の地震動増幅, *日本地震工学会論文集*, **6** (3), 27-42.
- 福島美光・翠川三郎, 1994, 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} 値とそれに基づく地盤増幅率の評価, *日本建築学会構造系論文集*, **460**, 37-46.

- Fukushima, Y., S. Kinoshita, and H. Sato, 1992, Measurements of Q^{-1} for S-waves in mudstone at Chikura, Japan : Comparison of incident and reflected phases in borehole seismograms, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **82**, 148-163.
- 池浦友則, 2006, 鉛直アレー記録に含まれる観測点間で無相関な波動成分の影響, 第 12 回日本地震工学シンポジウム, 242-245.
- 岩田知孝・入倉孝次郎, 1986, 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**, **39**, 580-593.
- 和泉正哲・勝倉 裕, 1983, 地震動の位相情報に関する基礎的研究, *日本建築学会論文報告集*, **327**, 20-28.
- 香川敬生, 2004, ハイブリッド合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯域への拡張, *日本地震工学会論文集*, **4** (2), 21-31.
- Kanai, K., T. Tanaka, and S. Yoshizawa, 1959, Comparative studies of earthquake motions on the ground and underground, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **37**, 53-87.
- Kanno, T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, Y. Fukushima, 2006, A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 879-897.
- Kato, K., M. Takemura, T. Ikeura, K. Urao, and T. Uetake, 1992, Preliminary analysis for evaluation of local site effects from strong motion spectra by an inversion method, *J. Phys. Earth*, **40**, 175-191.
- 川瀬 博, 1993, 表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション, *地震* **2**, **46**, 171-190.
- Kawase, H., 2006, Borehole observation for site effect studies, *Proc. of Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Grenoble, France, 30 August-1 September, invited, 3-20.
- 川瀬 博・松尾秀典, 2004a, K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析, *日本地震工学会論文集*, **4** (1), 33-52.
- 川瀬 博・松尾秀典, 2004b, K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性と S 波速度構造との対応, *日本地震工学会論文集*, **4** (4), 126-145.
- Kawase, H. and Y. Nejime, 2006, Separation of observed ground motion spectra to get site amplification factors: Linearity and nonlinearity, *Proc. Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Grenoble, France, 30 August-1 September, France, 265-274.
- 川瀬 博・佐藤智美・福武毅芳・入倉孝次郎, 1995, 兵庫県南部地震による神戸市ポートアイランドでのボアホール観測記録とそのシミュレーション, *日本建築学会構造系論文集*, **475**, 83-92.
- 木下繁夫, 1983, 表層地盤の減衰特性に関する考察, *土木学会論文報告集*, **330**, 15-25.
- Kinoshita, S., 1992, Frequency dependent attenuation of shear waves in a sedimentary layers-basement system in the Kanto area, Japan, *Proc. International Symposium Earthquake Disaster Prevention*, CENAPRED, Mexico, 212-226.
- Kinoshita, S., 2008, Deep-borehole-measured Q_p and Q_s attenuation for two Kanto sediment layer sites, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **98**, 463-468.
- 小林喜久二, 1999, 堆積地盤の速度構造と減衰の評価, 第 27 回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, 29-40.
- Kobayashi, K., F. Amaike, and Y. Abe, 1992, Attenuation characteristic of soil deposits and its formulation, *Proc. of the International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Odawara, Japan, March 25-27, **1**, 269-274.
- 額綱一起・三宅弘恵, 2009, 地下構造モデルと強震動シミュレーション, *地震* **2**, **61**, S441-S453 (本特集号).
- 古和田 明・田居 優・岩崎好規・入倉孝次郎, 1998, 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, *日本建築学会構造系論文集*, **514**, 97-104.
- 切刀 卓・青井 真・藤原広行, 2009, 強震観測－歴史と展望－, *地震* **2**, **61**, S19-S34 (本特集号).
- 三明雅幸・日下部 馨・前田幸典・堀家正則, 1999, 統計的グリーン関数法によって得られる合成波形の上下動成分に関する考察, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, **B-2**, 127-128.
- 翠川三郎, 2009, 地震動強さの距離減衰式, *地震* **2**, **61**, S471-S477 (本特集号).
- 翠川三郎・大竹 雄, 2003, 地震動強さの距離減衰式にみられるパラツキに関する基礎的分析, *日本地震工学会論文集* **3** (1), 59-70.
- 森 伸一郎, 2005, 非線形地盤増幅特性, *地盤震動－現象と理論－*, 日本建築学会, 267-283.
- Morikawa, N., T. Kanno, A. Narita, H. Fujiwara, T. Okumura, Y. Fukushima and A. Guerpinar, 2008, Strong motion uncertainty determined from observed records by dense network in Japan, *J. Seism. (in press)*.
- Moya, A. and K. Irikura, 2003, Estimation of site effects and Q factor using a reference event, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **93**, 1730-1745.
- 称占雄介・川瀬 博, 2008, 観測強震記録のスペクトルインバージョンで分離した統計的地震動特性に含まれる予測誤差, 日本地球惑星科学連合 2008 年大会, S146-011.
- 野津 厚・宮島正悟・中西 豪・山田雅行, 2006a, 海溝型地震の震源近傍における強震動の評価事例, *土木学会論文集* **A**, **62**, 877-890.
- 野津 厚・山田雅行・長尾毅行, 2006b, 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した盆地生成表面波のシミュレーション－九州地方のカルデラを例として－, *土木学会論文集* **A**, **62**, 891-905.
- 野津 厚・長尾 毅・山田雅行, 2007, 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*, **7** (2), 215-234.
- 岡本大志・岩田知孝・入倉孝次郎, 1999, S 波部分上下動, P 波部分水平動のサイト増幅特性, *京都大学防災研究所年報*, **42B-1**, 159-166.
- 大西良広・堀家正則, 2000, 統計的グリーン関数を用いた 3 成分地震動合成法の兵庫県南部地震への適用, *構造工学シンポジウム*, **46B**, 389-398.
- 大西良広・堀家正則, 2004, 震源近傍での地震動予測のた

- めの拡張統計的グリーン関数法とそのハイブリッド法への適用に関するコメント, 日本建築学会構造系論文集, **586**, 37-44.
- 太田 裕, 1975, 地震工学への最適化法の適用 1. 八戸港湾 SMAC 設置点の地下構造推定, 日本建築学会論文報告集, **229**, 35-41.
- 佐藤浩章・金谷 守・石川博之・金戸俊道, 2002, 鉛直アレー記録に基づく上下動の減衰特性とシミュレーション, 日本建築学会大会学術講演梗概集, **B-2**, 146-147.
- 佐藤浩章・金谷 守・大島靖樹, 2006, 減衰定数の下限値を考慮したスペクトル比の逆解析による同定手法の提案—岩盤における鉛直アレー記録への適用と減衰特性の評価—, 日本建築学会構造系論文集, **604**, 55-62.
- Sato, K., T. Kokusho, M. Matsumoto, and E. Yamada, 1996, Nonlinear seismic response and soil property during strong motion, Special Issue of Soils and Foundations, 41-52.
- 佐藤智美, 2003, 鉛直アレーデータに基づく S 波の斜め入射を考慮した地盤の減衰定数の同定—焼き鈍し法の適用—, 日本建築学会構造系論文集, **569**, 37-45.
- 佐藤智美, 2004, 群遅延時間のインバージョンと散乱理論に基づく地震動の経時特性モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, **586**, 71-78.
- 佐藤智美, 2006, フィリピン海プレート海溝型地震による短周期地震動の散乱理論に基づく経時特性モデル, 日本建築学会構造系論文集, **601**, 75-82.
- Satoh, T., 2006, Inversion of Q_s of deep sediments from surface-to-borehole spectral ratios considering obliquely incident SH and SV waves, Bull. Seism. Soc. Am., **91**, 943-956.
- 佐藤智美, 2008, 水平・上下動の広帯域統計的グリーン関数生成手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, **629**, 1087-1094.
- 佐藤智美・巽 誉樹, 2002, 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, **556**, 15-24.
- 佐藤智美・川瀬 博・佐藤俊明, 1994a, ボアホール観測記録用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその統計的経時特性, 日本建築学会構造系論文集, **461**, 19-28.
- 佐藤智美・川瀬 博・佐藤俊明, 1994b, 表層地盤の影響を取り除いた工学的基盤波の統計的スペクトル特性, 仙台地域のボアホールで観測された多数の中小地震記録を用いた解析, 日本建築学会構造系論文集, **462**, 79-89.
- 佐藤智美・川瀬 博・佐藤俊明, 1994c, 観測記録から同定した地震動の統計的特性と地盤の非線形性を考慮した強震動予測, 日本建築学会構造系論文集, **463**, 27-37.
- Satoh, T., H. Kawase, and T. Sato, 1995a, Evaluation of local site effects and their removal from borehole records observed in the Sendai region, Japan, Bull. Seism. Soc. Am., **85**, 1770-1789.
- Satoh, T., T. Sato, and H. Kawase, 1995b, Nonlinear behavior of soil sediments identified by using borehole records observed at the Ashigara Valley, Japan, Bull. Seism. Soc. Am., **85**, 1821-1834.
- 佐藤智美・佐藤俊明・植竹富一・菅原良次, 1996, 群遅延時間を用いたやや長周期地震動の経時特性評価のための基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, **480**, 57-65.
- 佐藤智美・植竹富一・菅原良次, 1997, 群遅延時間を用いたやや長周期地震動の経験的経時特性モデルに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, **493**, 31-39.
- Satoh, T., M. Horike, Y. Takeuchi, T. Uetake, and H. Suzuki, 1997, Nonlinear behavior of scoria evaluated from borehole records in eastern Shizuoka prefecture, Japan, Earthquake Eng. Struc. Dyn., **26**, 781-795.
- Satoh, T., M. Fushimi, and Y. Tatsumi, 2001, Inversion of strain-dependent nonlinear characteristics of soils using weak and strong motions observed by borehole sites in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., **91**, 365-380.
- 佐藤吉之・小林喜久二・植竹富一・八代和彦, 2005, 鉛直アレー記録を用いた深部地盤の減衰特性評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, **B-2**, 179-180.
- 澤田純男・盛川 仁・土岐憲三・横山圭樹, 1998, 地震動の位相スペクトルにおける伝播経路特性とサイトの分離, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, **1**, 915-920.
- 杉戸真太・合田尚義・増田民夫, 1994, 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, **493/III-27**, 49-58.
- Takahashi, K., S. Ohno, M. Takemura, and T. Ohta, 1992, Observation of earthquake strong-motion with deep borehole, Generation of vertical motion propagation in surface layers after S arrival, Proc. 10th World Conf. Earthq. Eng., Madrid, Spain, July 18-24, **3**, 1245-1250.
- Takemura, M., K. Kato, T. Ikeura, and E. Shima, 1991, Site amplification of S-waves from strong motion records in special relation to surface geology, J. Phys. Earth, **39**, 537-552.
- 武村雅之・池浦友則・高橋克也・石田 寛・大島 豊, 1993, 堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価, 日本建築学会構造系論文集, **446**, 1-11.
- 田中貞二・大沢 勝, 1972, 八戸市における地中地震動の観測, 特定研究「構造物災害に対する地震動特性の研究」報告, 38-67.
- 鶴来雅人・田居 優・入倉孝次郎・古和田 明, 1997, 経験的サイト増幅特性評価手法に関する検討, 地震 **2**, **50**, 215-228.
- 藤堂正喜・羽鳥敏明・千葉 脩・高橋克也・武村雅之・田中英朗, 1995, 堆積地盤における上下地震動の特性と Q_s 構造, 日本建築学会構造系論文集, **475**, 45-54.
- 山添正稔・加藤研一・山田有孝・武村雅之, 2004, KiK-net 伯太および日野地点の地盤構造の推定と 2000 年鳥取県西部地震時の基礎地震動の再評価, 日本地震工学学会論文集, **4** (4), 107-125.
- 山中浩明・中丸明子・栗田勝実・瀬尾和大, 1998, 表層の地盤特性を拘束条件にした S 波スペクトルのインバージョンによるサイト特性の評価, 地震 **2**, **51**, 193-202.
- 山本明夫・笹谷 努, 2007, 2003 年十勝沖地震における地盤の非線形応答: KiK-net 鉛直アレー記録の活用, 日本地震工学会論文集, **7** (2), 144-159.
- 山本みどり・岩田知孝・入倉孝次郎, 1995, 釧路地方気象台における強震動と弱震動に対するサイト特性の評価, 地震 **2**, **48**, 341-351.
- 吉田治雄・小林喜久二, 2002, 堆積地盤における P 波減衰と S 波減衰の関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集,

- B-2**, 183-184.
- Yoshida, K. and T. Sasatani, 2008, Seismic vertical array analysis for phase decomposition, *Geophys. J. Int.*, **174**, 707-718.
- 吉田 望, 1995, 1995 年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析, *土と基礎*, **43**, No.10, 49-54.
- 吉田 望, 2003, DYNES3D, A computer program for dynamic response analysis of level ground by effective stress nonlinear method, Version 2.73, < <http://boh0709.ld.infoseek.co.jp/> >, (参照 2008-6-23).
- Yoshida, N. and S. Iai, 1998, Nonlinear site response and its evaluation and prediction, *Proc. International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Yokohama, Japan, 1-3 December, 71-90.
- Yoshida, N., S. Kobayashi, I. Suetomi, and K. Miura, 2002, Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 205-222.
- Yoshimoto, K., H. Sato, S. Kinoshita and M. Ohtake, 1993, High-frequency site effect of hard rocks at Ashio, central Japan, *J. Phys. Earth*, **41**, 327-335.