

地震観測記録に基づく地下構造推定

竹中工務店技術研究所 小林喜久二

1. はじめに

強震動特性にみられる地域性が堆積層の構造と密接な関係にあり、強震動特性の解明に地下構造の情報が不可欠であることは被害地震を経験するたびに繰り返して指摘されてきた。例えば、1995年兵庫県南部地震ではいわゆる震災の帯が形成され注目を集めたが、その解明に地下構造の情報が重要な役割を果たしたことは記憶に新しいところである（例えば Kawase,1996）。さらに最近では、計算機能力の向上により大規模な3次元の地下構造モデルに基づく強震動シミュレーションも可能になり、従来にも増して地下構造の情報は重要性を増している。特に2003年十勝沖地震以後社会的にも関心が高まっている周期数秒から10数秒の長周期地震動問題に対応するためには、地震基盤（S波速度約3km/s、P波速度約5km/sの地殻の最上層）までの3次元の地下構造の情報が不可欠であり、大都市が立地する平野部の地下構造の解明とモデル化は大きな課題となっている（例えば山中・山田,2002、文部科学省,2004）。

本報告は、以上を背景として、小林啓美先生及び東京電力殿と1990年から現在までに行ってきた一連の研究内容について紹介する。この一連の研究のメインテーマは標題の通り「地震観測記録に基づく地下構造推定」であり、従来堆積層の地下構造推定に利用されることがほとんどなかった地震観測記録を積極的に利用し、どこまで目的に迫れるか試みたものである。地下深部の探査法として周知のように人工地震による反射法や微動アレー探査法が実用化されているが、基本的に反射法はP波速度構造、微動アレー探査法はS波速度構造の探査法であり、速度構造とともに強震動評価で重要な地盤減衰が評価できないという難点がある。本研究では地震観測記録に注目したが、それは第一に、K-NETやKiK-netを始めとして全国に多数展開されている地震観測点のデータの有効活用を図ること、第二に、既存の探査法では評価困難な地盤減衰も評価することを狙いとしている。

本研究の全体フローを図1に示す。本研究は上述のように1990年に開始して現在に至るが、项目的に分類すると、①PS変換波に関する検討、②水平/上下スペクトル振幅比の逆解析による地下構造推定に関する検討、③伝達関数の多地点同時逆解析による地盤減衰評価に関する検討、④速度構造を事前情報としたスペクトルインバージョンに関する検討に大きく分類される。前半の2検討は地震基盤までの速度構造の推定に関わるものであり、②の検討では地盤減衰の推定可能性についても検討した。一方、後半の2検討は地盤減衰の評価ないしモデル化に関わるものであり、③の検討では浅部地盤、④の検討では深部地盤を対象とした。以下、各検討の内容について示す。

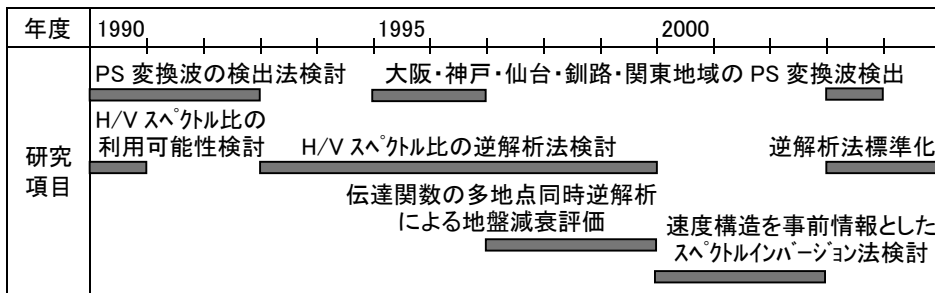


図1 本研究の全体フロー

2. PS 変換波に関する検討

本検討は座間(1990)による研究が契機となっている。座間(1990)は東京湾岸とその周辺の地震観測記録の性状を検討し、P 波初動付近の水平成分に顕著な位相が存在すること、そしてその位相が地震基盤面で P 波から S 波に変換した PS 変換波に対応することを示した。したがって、PS 変換波と直達 P 波の到達時間差(PS-P 時間)に着目すると、それは地震基盤以浅の堆積層の速度構造にのみ依存する量となるため、堆積層の速度構造解明の拘束条件として利用できることになる。しかし、多数の観測点の地震記録を調べてみると、PS 変換波の位相の特定が目視では困難な場合も少なからずあり、PS 変換波の利用を図るためには目視に頼らない PS-P 時間の検出が課題となった。

そこで着目したのが P 波初動部の上下成分に対する水平成分の振幅比関数のフーリエ逆変換から求められるインパルス応答である。これは堆積層上で観測される P 波初動部の水平/上下スペクトル振幅比が地震基盤以浅の堆積層の P 波入射に対する伝達特性で基本的に説明できること(小林・他,1990)を踏まえて、工学の分野でよく用いられる建物の伝達関数のインパルス応答から着想したものであるが、後に、地震学の分野で用いられているレシーバーファンクション(Langston,1979)に対応することを知った。レシーバーファンクションは建物伝達関数のインパルス応答の定義から類推されるように、物理的には上下成分が時刻 $t=0$ で単位インパルスとなるときに水平成分の応答を表現する。レシーバーファンクションの適用性の検討としては、地盤モデルに基づく数値シミュレーションと観測記録の解析を行い、観測記録としては東京都江東区南砂のデータ及び地震基盤までの速度構造が PS 検層で得られている電力共通研究所の富岡・いわき観測点のデータを用いた。その結果、レシーバーファンクションの最大値発生時刻が PS-P 時間と等価であること、また PS 変換波の位相が目視では特定できない観測記録からも精度よく PS-P 時間が検出できることを把握し、PS-P 時間の検出にレシーバーファンクションが有効であることを確認した(小林・他,1998a)。図 2 に南砂における解析例を一例として示す。PS-P 時間の検出はこれまでに大阪・神戸地域(阿部・他,1996)、仙台地域(佐藤・他,1997)、釧路地域、及び関東地域(小林・他,2004)で行ったが、各地域で堆積層に関する既往の知見と調和する PS-P 時間を得ている。

以上の結果を踏まえて後述の水平/上下スペクトル振幅比の逆解析では PS-P 時間を拘束条件として利用しているが、PS-P 時間は図 3 に示すように堆積層の表面波基本モードの卓越周期と比較的高い相関を示す(小林・他,1998a)。図中の実線及び一点鎖線は検討に用いた地盤モデルの精度を勘案し、PS 検層モデルに基づく結果を重視して引いた暫定的な関係式であるが、現在は全体の結果を考慮して Love 波の卓越周期は PS-P 時間の 4.5 倍程度、Rayleigh 波の卓越周期は PS-P 時間の 2.6 倍程度で評価した方がよいかも知れないと考えている。図 4

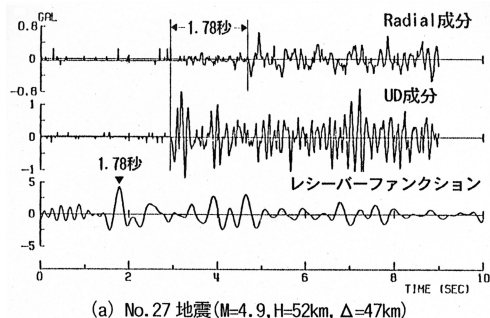


図 2 レシーバーファンクションの解析例(小林・他,1998a)

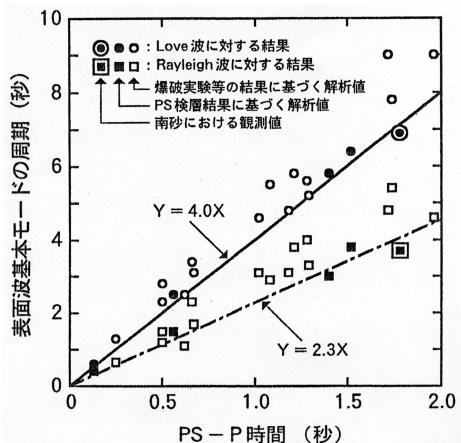


図 3 表面波基本モードの卓越周期と PS-P 時間の関係(小林・他,1998a)

は関東地域の K-NET、117 観測点のデータに基づく PS-P 時間の分布(小林・他,2004)、図 5 はこの結果に上述の関係式を当てはめて評価した Love 波基本モードの卓越周期の分布を示す。これによると、埼玉県東部、東京都東部、神奈川県北東部及び千葉県中部は 6~10 秒の周期を示し、首都圏における長周期地震動の卓越周期に関する既往の知見と整合していると考えられる。PS-P 時間から推定される卓越周期にはある程度の幅を考慮する必要があるが、今後全国に展開されている K-NET や KiK-net 等の地震観測点のデータを利用すれば、全国的な長周期地震動の卓越周期予想マップを簡便に作成することができ、長周期地震動対策の基礎資料として活用できるものと考えられる。

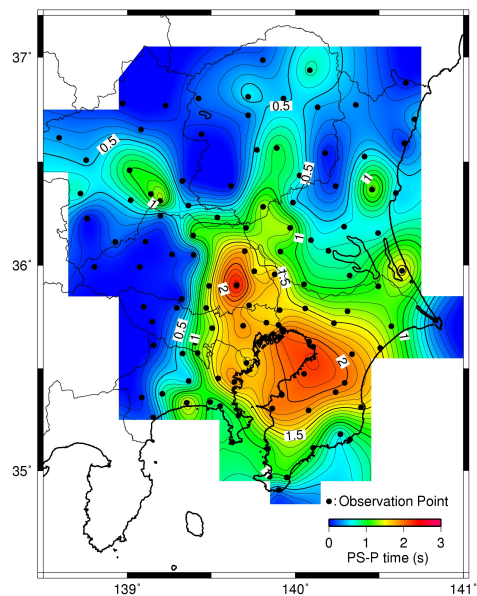


図 4 K-NET 観測データに基づく関東地域の PS-P 時間の分布(小林・他,2004)

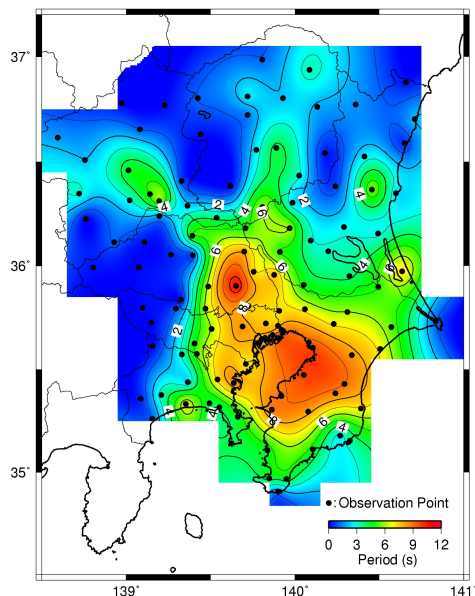


図 5 PS-P 時間から推定された関東地域の Love 波基本モードの卓越周期の分布

3. 水平/上下スペクトル振幅比の逆解析による地下構造推定に関する検討

本検討は堆積層上で観測される P 波初動部の水平/上下スペクトル振幅比が地震基盤以浅の堆積層の P 波入射に対する伝達特性で基本的に説明できること(小林・他,1990)を踏まえて、水平/上下スペクトル振幅比を遺伝的アルゴリズムを用いて逆解析し、地震記録から地下構造パラメータの推定可能性を把握しようとしたものである。この問題では、各層の S 波速度、P 波速度、層厚、密度、S 波減衰 (Q_s 値)、P 波減衰 (Q_p 値)、そして P 波の入射角がパラメータとなるため、密度は S 波速度との経験式を作成して S 波速度に連動させ、また Q_p 値は後述の伝達関数に基づく検討で得られた $Q_p=Q_s/2$ を仮定するなどの工夫を施してきた。その適用性の検討は地震基盤までの速度構造が PS 検層で得られている電力共通研究の富岡観測点のデータを用いて行い、その結果、地表 1 点のデータの逆解析から PS 検層モデルにほぼ対応するモデルが推定できることを確認し、堆積層の地下構造推定に地震観測記録が活用できることを示した(例えば小林・他,1998b、Kobayashi, K. et al., 2000)。なお、以上の検討では Q_s 値について木下(1986)を参考に $Q_s=50f$ を仮定したが、その後の検討を踏まえて、原子力発電技術機構(現、原子力安全基盤機構)の成田観測点では Q_s 値も未知変数とした逆解析を行い、S 波速度・P 波速度構造とともに減衰構造も推定できる可能性のあることを確認した(小林・他,2003)。

現在は以上を踏まえ、多地点の地下構造推定を念頭に置いて逆解析法の標準化を試み、その適用性を検討しており(小林・他,2005)、以下にその概要を示す。

逆解析はこれまで水平/上下スペクトル振幅比に対して行ってきたが、現在はレシーバーファンクションも加えている。その際、解の一義性をより高めるために、水平/上下スペクトル振幅比とレシーバーファンクションは見掛け入射角と震央距離が類似する複数のデータ群からそれぞれ評価し、それらを各データ群の入射角が異なるという条件で同時に逆解析する。

図6にはVs0.4km/s以上の層モデルと未知変数の探索範囲の設定法を示す。層数とVsの探索範囲は地震基盤までのVsを8分割して設定し、Vpの探索範囲は関東平野のKiK-net観測点の検層データから得られたVp-Vs経験式と予備解析結果を参考にして設定している。

層厚の探索範囲の設定は事前情報がない場合に最も難しいが、ここでは既往のデータから作成したPS-P時間と地震基盤深さの概略の関係式、

$$D_B = 1.4 \times [PS - P \text{ 時間}] \text{ (km)} \quad (1)$$

を参考にして下層部の上限値を設定している。

Qs値の基本式は後述のQs値モデルを参考に

$$1/Q_s(f) = 1/(Q_o \cdot f) + 1/Q_i \quad (2)$$

を仮定し、QoとQiの探索範囲の上限値は図6の第3層以浅に対してそれぞれ40、400、第4層以深に対して80、800を設定する。

解析は上述の条件で行う解析を第1次解析とし、次に、その第1次解析結果の平均値±標準偏差で探索範囲を変更して第2次解析を行い、その結果を最終モデルとする。

以上が標準化の概要であり、その適用性の検討は図7に示すK-NET 6観測点とKiK-net成田の計7地点で行った。K-NET 6観測点の近隣では微動アレー探査(文部科学省,2001,2002,2004、神奈川県,2001)、KiK-net成田では地震基盤までの速度検層が実施されている。図8にKiK-net成田の逆解析モデル、図9に同時逆解析した2種類のデータ群

層 No	Vs (km/s)	Vp (km/s)	H (km)
1	0.4~0.5	1.5~1.8	0.01~0.4
2	0.5~0.6	1.5~1.8	0.01~0.4
3	0.6~0.8	1.6~2.0	0.01~DB/3.0
4	0.8~1.0	1.7~2.4	0.01~DB/2.0
5	1.0~1.2	2.0~2.5	0.01~DB/1.5
6	1.2~1.6	2.4~3.6	0.01~DB/1.5
7	1.6~2.2	3.0~4.7	0.01~DB/1.5
8	2.2~3.2	3.8~5.5	∞

DB: PS-P 時間から推定される基盤の概略深さ

図6 Vs0.4km/s以上の層モデルと未知変数の探索範囲(小林・他,2005)

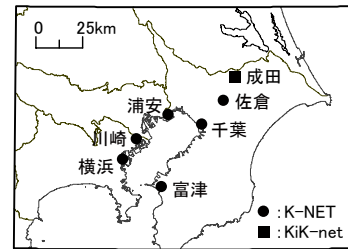


図7 標準化法の適用性検討地点(小林・他,2005)

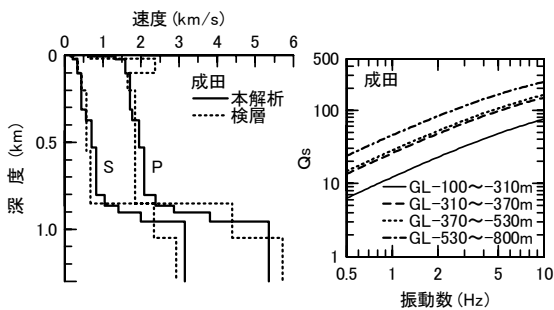


図8 KiK-net 成田の逆解析モデル(小林・他,2005)

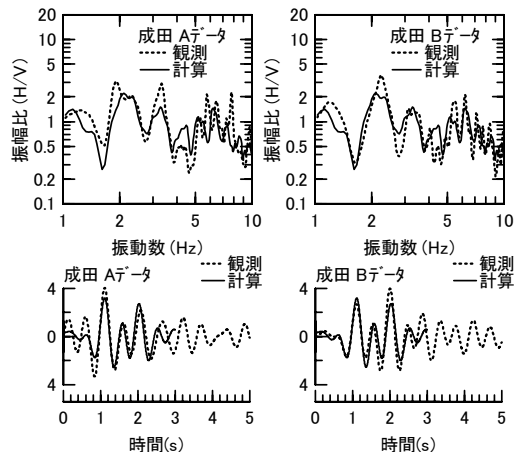


図9 水平/上下スペクトル振幅比とレシーバーファンクションの観測値と計算値の比較(小林・他,2005)

の水平/上下スペクトル振幅比とレシーバーファンクションの観測値と計算値の比較を示す。各観測値はいずれも計算値でよく説明されている。図 10 には震央距離 30km 以下の 6 地震データから評価された KiK-net 成田の GL/GL-1300m の伝達関数のシミュレーション結果を示す。水平、上下各成分とも 1 次振動数まで観測値と計算値はよく対応し、逆解析モデルの妥当性を示している。図 11 には K-NET 6 観測点の逆解析結果を示す。逆解析モデルは各地点とも微動アレーモデルとおおむねよく対応し、逆解析モデルの妥当性を示唆している。富津と横浜では基盤深さに有意な違いがみられるが、K-NET 富津は微動アレー地点と約 4km 離れており、この間で地下構造が変化している可能性があると考えられる。一方、K-NET 横浜は微動アレー-SA11 地点と SA12 地点のほぼ中間に位置しており、このことを考慮すると本逆解析結果は微動アレーモデルと調和的な関係にある。

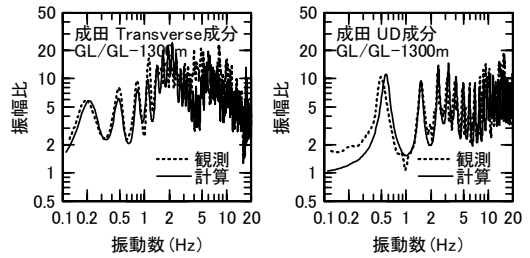


図 10 逆解析モデルによる伝達関数のシミュレーション結果(小林・他,2005)

図 6 に示した層モデルと探索範囲の設定のしかたについては今後検討地点を増やしてさらに適用性を検討する必要があるが、以上の結果から、地震観測記録が地下構造推定に積極的に活用できる見通しが得られたと考えている。

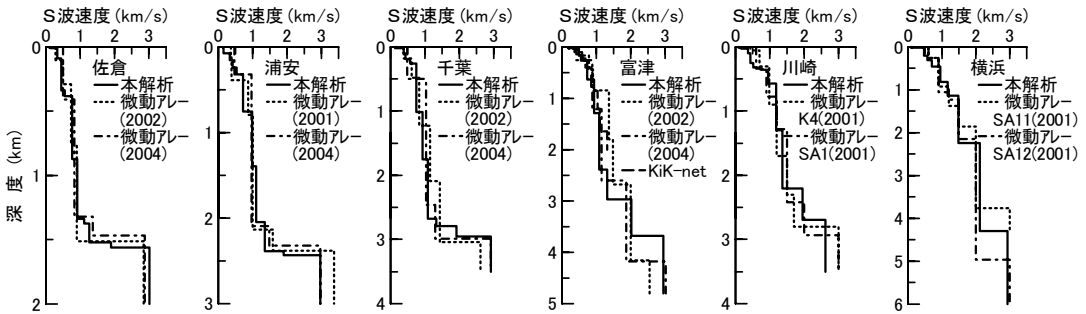


図 11 K-NET 6 観測点の逆解析モデルと近隣の微動アレーモデルとの比較(小林・他,2005)

なお、地下構造情報は基本的に離散情報であるため、3次元地下構造モデルの作成には空間補間が必要となり、通常曲面フィッティングによる方法が用いられている。しかし、この方法は点情報の数が少ないと急激な構造の変化を表現できないという短所がある。例えば、図 4 に示した PS-P 時間の分布は曲面フィッティング法によって作成したものであるが、PS-P 時間の評価地点間のコンターはこの図から判るように基本的に等間隔になり、曲面フィッティング法では評価地点間に急激な構造変化があったとしてもそれを表現することはできない。そこで現在、重力異常データが堆積層の構造変化の情報を有していることに着目し、空間補間に重力異常データを利用する方法についても検討しており、その概要を以下に示す。

本方法では生の重力異常よりもそれから低周波成分を除去した残差重力の方が堆積層の構造変化をより強く反映していること(駒澤・長谷川,1988)を参考にして残差重力を利用する。その場合、地下構造情報と残差重力の間には第 1 次近似として線形関係が成立すると考えられるが、距離が遠く離れるとその線形関係は変化する可能性がある。そこでこのことを考慮するため、各補間地点における地下構造情報と残差重力の間の線形関係式を距離の重み付けをした最小自乗法によって求め、それに補間地点の残差重力を代入して地下構造情報の空間補間を行うという方法を考案した。

本方法の適用例として、関東地域の PS-P 時間を補間した結果を図 12 に示す。曲面フィッティング法による図 4 の結果と比較すると、本方法による結果は岩盤地域と平野部の境界領域でコンターの密度がかなり高くなる傾向を示し、基盤構造が急激に変化していることを示唆する結果となっており、曲面フィッティング法よりもより実際を表現していると考えられる。岩盤地域と平野部の境界領域における基盤構造の形状は堆積層表面波の励起度合や兵庫県南部地震で明らかにされたエッジ効果に大きく影響し(堀家,1998)、そのモデル化の精度を高めることは特に重要であるが、従来の曲面フィッティング法では限界がある。これに対して本方法では、25km を標準間隔として配置されている K-NET のような離散データでも以上のような結果が得られており、本方法の細部についてはさらに検討が必要であるが、空間補間に重力異常データを利用するという考え方は基本的に有効であると考えられる。

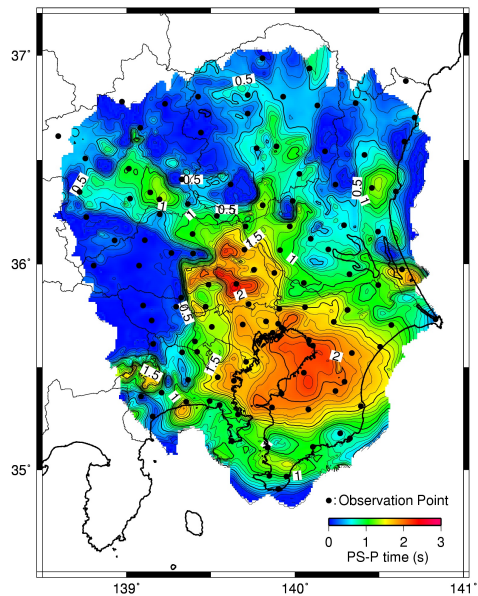


図 12 重力異常データを利用した PS-P 時間の空間補間結果

4. 伝達関数の多地点同時逆解析による地盤減衰評価に関する検討

地盤減衰の検討例は 1960 年代から 1990 年前半の間にも数多く報告されている(福島・翠川,1994)。しかし、これまでの検討は地点ごとの事例解析が主で、ある地点で評価された地盤減衰の他地点への適用性、さらに多地点に適用できる汎用性のある地盤減衰のモデル化の可能性については数例の検討例がある程度であり(小林・他,1989、Kobayashi, K. et al.,1992、福島・翠川,1994)、S 波の減衰(Qs 値)のモデル化の可能性が示唆されてはいるがまだ十分な検討がなされていない状況であった。そこで本検討では、これまでに蓄積されている鉛直アレーの地震観測記録を利用して、地盤減衰のモデル化の可能性についてさらに検討を行った(小林・他,1999、久家・他,1999,2000)。

方法論は通常よく用いられている伝達関数の逆解析を用いたが、従来の 1 地点単独の逆解析では地層間の Q 値のトレードオフなどがあるため、本検討ではそのような問題を極力回避するため、多地点の伝達関数を同時に逆解析することを試みた。なお、解析にあたっては次のような仮定を設けた。まず、Qs 値は土質ごとに分類すればモデル化できる可能性があること(Kobayashi, K. et al.,1992)を参考にして、土質の種類が同じ地層に対しては地点によらず共通の Qs 値を仮定した。次に、Qs 値の基本式は予備解析結果も参考にして最終的に S 波速度(Vs:m/s)をパラメータとした振動数依存型の式(Kobayashi, K. et al.,1992)に内部減衰を考慮した

$$\frac{1}{Q_s(f)} = \frac{1}{V_s} \left(\frac{1}{\alpha \cdot f} + \frac{1}{\beta} \right) \quad (3)$$

を仮定した。α と β が未知変数となる。

以上の条件のもとに、本検討ではまず、仙台高密度強震観測事業観測点の S 波主要動水平成分の伝達関数を同時逆解析して、これらの観測点の地層を構成する粘土・シルト、砂、砂礫、堆積岩の Qs 値モデルを評価し、次に、その Qs 値モデルの他地域における適用性を震災予防協会の強震動アレー

データベースを利用して検討した。仙台地域で得られた Q_s 値の逆解析モデルを表 1 に示す。図 13 に逆解析した仙台 7 観測点における伝達関数の観測値と逆解析モデルによる計算値の比較、図 14 及び図 15 には関東及び福島県の観測点に Q_s 値モデルを適用した時の伝達関数の観測値と計算値の比較を示す。これによると、逆解析した仙台地域だけでなく、関東及び福島地域の観測点でも観測値と計算値はよく対応し、仙台地域で得られた Q_s 値モデルがかなり高い汎用性を有していることを示している。堆積岩

表 1 仙台地域で得られた Q_s 値モデル
(小林・他,1999、久家,1999)

	粘土・シルト	砂	砂礫	砂礫(粘土混)	堆積岩 100m 以浅
α	0.031	0.022	0.015	0.0037	0.011
β	0.48	0.41	0.13	0.040	0.033

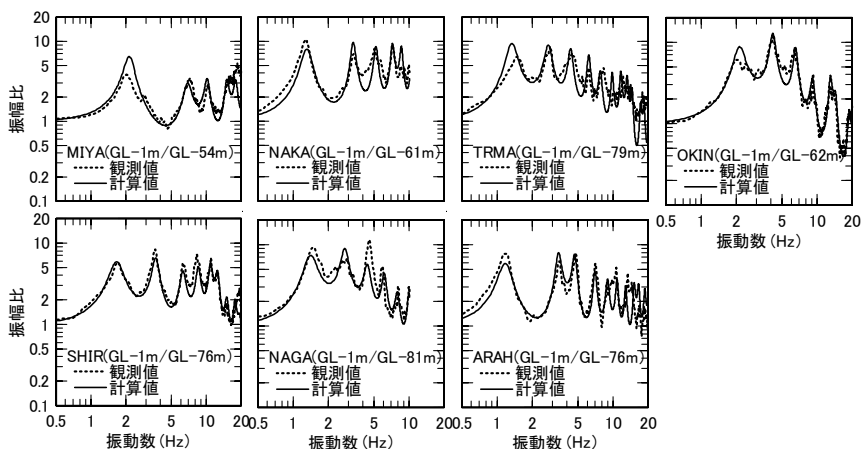


図 13 逆解析した S 波主要動部水平成分の伝達関数の観測値と計算値の比較 (久家・他,1999)

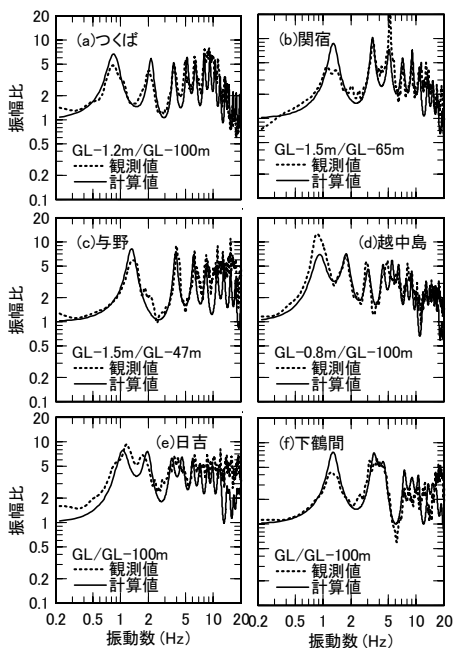


図 14 仙台地域で得られた粘土・シルト、砂及び砂礫の Q_s 値モデルの適用結果 (久家・他,2000)

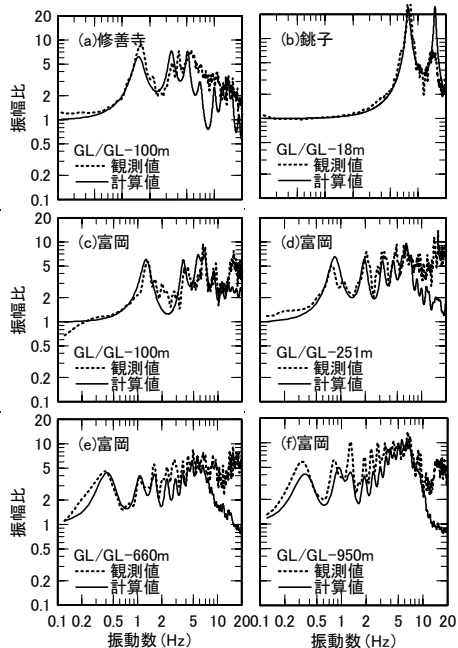


図 15 仙台地域で得られた堆積岩の Q_s 値モデルの適用結果 (久家・他,2000)

の Q_s 値モデルは 100m 以浅の浅部の堆積岩から得られたものであるが、図 15 に示す富岡の結果をみると、深部の堆積岩に対してもある程度適用できる可能性のあることを示している。これは Q_s 値モデルに S 波速度がパラメータとして導入されているためであるが、計算値は観測値に対して小さい傾向にあり、深部堆積岩については今後深層の鉛直アレーデータを利用して検討が必要である。

一方、P 波の減衰(Q_p 値)については検討例がほとんどないのが現状であるが、 Q_p 値が Q_s 値と同様に強い振動数依存性を示し、おおむね $Q_p=Q_s/2$ でモデル化できる可能性のあることが仙台高密度アレー観測記録及び電力共通研究の鉛直アレー観測記録に基づいて示されている(阿部・他,1993、藤堂・他,1995)。そこで、上述の Q_p 値と Q_s 値の関係の妥当性を表 1 の仙台地域で得られた Q_s 値モデルに基づいて検討した(吉田・小林,2002)。

図 16 に P 波初動部の上下成分から評価された伝達関数の観測値と $Q_p=Q_s/2$ に基づく計算値の比較を示す。これによると、観測値と計算値は観測点によらずよく対応し、 Q_p 値と Q_s 値の関係が $Q_p=Q_s/2$ でモデル化できることを示している。

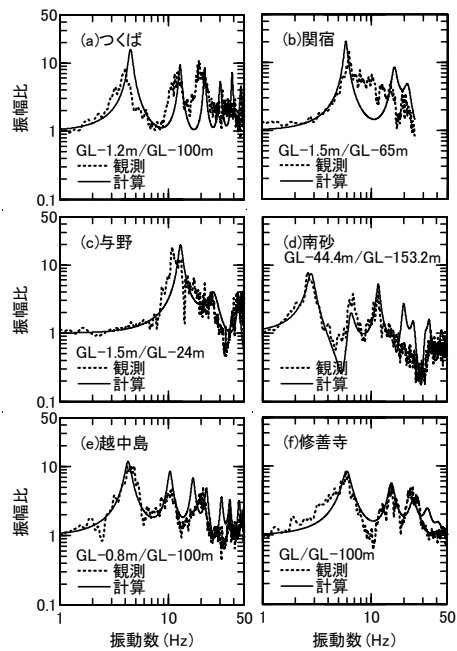


図 16 P 波初動部上下成分の伝達関数の観測値と計算値の比較 (吉田・小林,2002)

5. 速度構造を事前情報としたスペクトルインバージョンに関する検討

地盤減衰を精度よく評価する上で鉛直アレーの地震観測記録は有効であるが、従来深層の鉛直アレー観測点が少なかったこともあり深部の地盤減衰についてはまだ不明な点が多い。その解明のデータとして兵庫県南部地震後に設置された KiK-net のデータは有用であるが、地表観測点のデータから深部の地盤減衰が評価できれば多地域で多地点の評価が可能になる。前述したように水平/上下スペクトル振幅比の逆解析によれば地表データから速度構造とともに地盤減衰も評価できる見通しが得られたが、地盤減衰についてはその問題の難しさから多面的な評価を試み、妥当性を確認する必要があると考えられる。そこで本検討ではその試みとして、堆積層の速度構造を事前情報としたスペクトルインバージョン法を考案し、その適用性を検討した(小林・他,2002)。速度構造を事前情報としたのは微動アレー探査や水平/上下スペクトル振幅比の逆解析により速度構造が比較的容易に推定できる状況にあることを背景にしている。以下にその概要を示す。

地震 i に対する観測点 j の S 波の観測スペクトル $A_{ij}(f)$ は一般に次式で表現される。

$$A_{ij}(f) = S_i(f) X_{ij}^{-1} \exp(-\pi f X_{ij} / Q_s V_s) G_j(f) \quad (4)$$

ここに $S_i(f)$ は震源スペクトル、 X_{ij} は震源距離、 Q_s は伝播経路の Q_s 値、 V_s は伝播経路の S 波速度、 $G_j(f)$ は地盤増幅率である。本方法ではここに事前情報として地盤の速度構造を仮定し、震源スペクトル、伝播経路 Q_s 値、地盤 Q_s 値及び堆積層への S 波入射角を未知パラメータとする。その際、震源スペクトルは振動数ごとに独立のパラメータとし、伝播経路の Q_s 値は既往の研究を参考にして $Q_s(f)=Q_0 f^n$ を仮定し、地盤の Q_s 値は前述の式(2)を仮定する。逆解析は遺伝的アルゴリズムを利用し

ているが、探索能力を高めるためにアルゴリズムに震源スペクトルの修正ルーチンを導入するなどの工夫を施した。

本方法の適用性の検討として、まず4地震×3観測点のモデルによる数値実験を行い、震源スペクトル、伝播経路 Q_s 値ならびに地盤 Q_s 値がいずれも精度よく評価できることを確認した。次に観測データによる適用性の検討として、地震基盤まで鉛直アレー観測が実施され、評価結果の妥当性が検討できる電力共通研究の福島県富岡といわき観測点で同時に観測されている18地震データを解析した。解析にあたってはまず鉛直アレーのデータを用いて伝達関数の逆解析を行い、本方法の検証用地盤 Q_s 値と事前情報とするS波速度構造を得た。図17に本方法により得られた地盤の Q_s 値を伝達関数の逆解析から得られた結果と比較して示す。これによると、富岡では深さによらず両者がほぼ対応し、いわきでは浅部で両者の対応がよくないが、深部ではよい対応を示し、本方法により妥当な地盤の Q_s 値が評価

できることを示している。また、伝播経路の Q_s 値についても既往の知見と矛盾しない結果が得られている。図18には18地震に対して得られた震源加速度スペクトルを4.0 M 4.5, 4.8 M 5.2及び5.3 M 6.1に分類して示す。これによると、強震動予測の際に重要となる⁻²モデルの適用限界振動数 f_{max} が比較的明瞭に現れており、5.3 M 6.1の7地震では1地震を除き5Hz付近、4.0 M 4.5の5地震ではすべて10Hz以上、4.8 M 5.2の6地震は以上の両方の性状ならびに中間的な性状を併せ持ち、 f_{max} にM依存性のあることを示唆する結果が得られた。

本方法の適用性についてはさらに解析例を増やして検討が必要であるが、以上のことから、地盤減衰だけでなく、震源スペクトル及び伝播経路特性を評価する一手法としても本方法は利用できるものと考えられる。

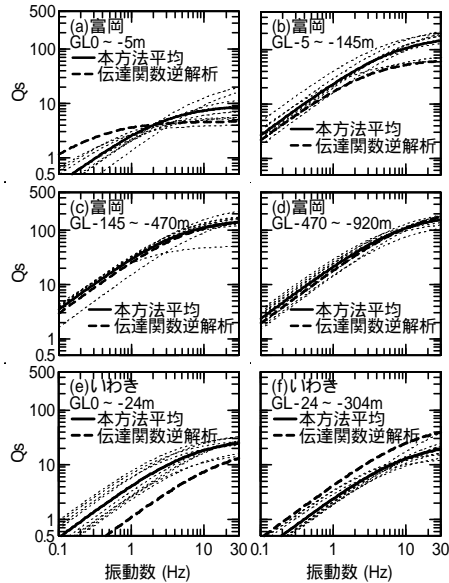


図17 スペクトルインバージョンによる地盤減衰の評価結果 (小林 他,2002)

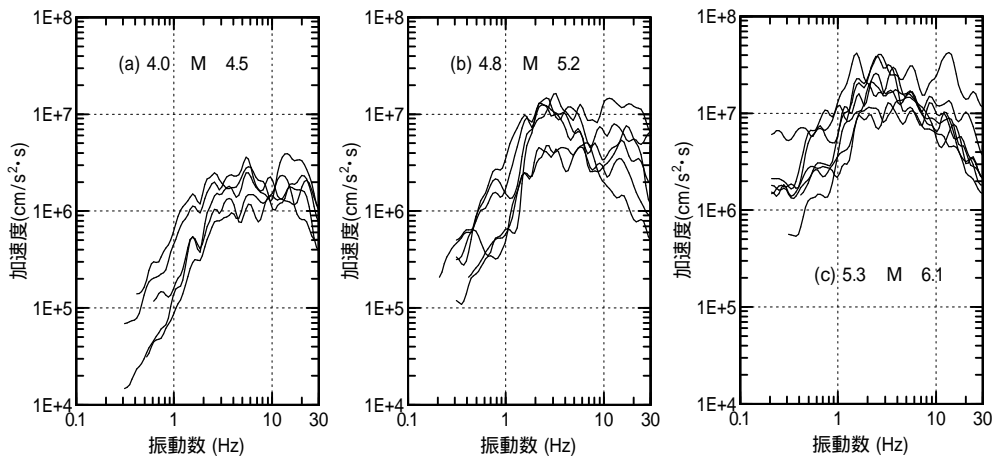


図18 震源加速度スペクトルの評価結果 (小林 他,2002)

6. おわりに

本報告では、小林啓美先生及び東京電力殿と 1990 年から現在までに行ってきた一連の研究の現時点での到達点を要約して示した。当初は試行錯誤の繰り返しであったが、現在は地震観測記録を利用して強震動特性の解明・評価に不可欠な堆積層の構造を推定するという目標に近づきつつあるように考えている。今後は本研究成果の利用とともに残された課題についてさらに検討を進める予定である。

謝辞

故小林啓美先生には本研究の遂行にあたり終始温かく見守って頂くとともに、多くのことを勉強させて頂きました。東京工業大学翠川三郎教授には本研究を通じ貴重なご意見を頂きました。山下利夫氏を始めとする東京電力(株)及び東電設計(株)の方々には本研究の機会を与えて頂きました。また、本研究には電力共通研究、仙台高密度強震観測事業、震災予防協会及び防災科学技術研究所のデータを利用して頂きました。記して感謝致します。

参考文献

- 阿部康彦・小林喜久二・天池文男(1993), 地盤の P 波減衰モデルに関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, 403-404.
- 阿部康彦・小林喜久二・植竹富一・真下貢・小林啓美(1996), 大阪・神戸地域における PS 変換波の検出—兵庫県南部地震余震観測記録による検討—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 157-158.
- Kawase,H.(1996),The cause of the damage belt in Kobe: "The basin-edge effect", Constructive interference of the direct S-wave with the basin-induced diffracted/Rayleigh waves, Seismo.Res.Lett.,67,No.5,25-34.
- 佐藤吉之・小林喜久二・植竹富一・中村亮一・小林啓美(1997):地震観測記録を利用した仙台地域における深部地下構造の推定 その 1 PS 変換波の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 183-184.
- 座間信作(1990), 東京湾岸及びその周辺で観測される P 波初動付近の位相について, 消防研究所報告, 69, 1-8.
- 神奈川県(2001), 平成 12 年度地震関係基礎調査交付金 神奈川県地下構造調査成果報告書.
- 木下繁夫(1986), 深層井観測により推定された厚い堆積層の地震応答特性,国立防災科学技術センター研究報告,38, 25-145.
- 久家英夫・小林喜久二・植竹富一・真下貢・小林啓美(1999), 伝達関数の多地点同時逆解析による地盤減衰の推定 その 4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 255-256.
- 久家英夫・小林喜久二・植竹富一・真下貢・小林啓美(2000), 伝達関数の多地点同時逆解析による地盤減衰の推定 その 5, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 247-248.
- 小林喜久二・阿部康彦・天池文男(1989), 地盤の Q 値の振動数依存性とモデル化について, Proc. Nat. Symp. Effects of Surface Geol. on Seism. Motion, 49-54.
- 小林喜久二・阿部康彦・天池文男(1990), 地震動の上下成分と水平成分の振幅関係に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, 309-310.
- Kobayashi,K., F.Amaike, and Y.Abe(1992), Attenuation characteristics of soil deposits and its formulation, International Symp. Effect of Surface Geol. on Seism.Motion, 269-274.
- 小林喜久二・植竹富一・真下貢・小林啓美(1998a), 深い地盤構造評価のための PS 変換波の検出法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 505, 45-52.
- 小林喜久二・植竹富一・真下貢・小林啓美(1998b), 地震動初期微動部の水平/上下スペクトル振幅比の逆解析による深部地盤構造の推定法, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, 1083-1088.
- 小林喜久二・久家英夫・植竹富一・真下貢・小林啓美(1999), 伝達関数の多地点同時逆解析による地盤減衰の推定 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 253-254.
- Kobayashi,K., T.Uetake, M.Mashimo and H.Kobayashi(2000), Estimation of deep underground velocity structures by inversion of spectral ratio of horizontal to vertical component in P-wave part of earthquake ground motion, 12th World Conf.Earthq.Eng., No.2658.
- 小林喜久二・植竹富一・真下貢・小林啓美(2002): 堆積地盤の速度構造を事前情報としたスペクトルインバージョンによる震源・伝播経路・地盤減衰特性評価法, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集,289-294.
- 小林喜久二・菊地利喜郎・小林啓美(2003), 地表地震観測記録の水平/上下スペクトル振幅比の逆解析による成田観測点の速度・減衰構造の推定, 日本地震工学学会大会-2003 梗概集, 366-367.
- 小林喜久二・植竹富一・小林啓美(2004), 関東地域の K-NET 観測点における PS-P 時間の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 539-540.
- 小林喜久二・植竹富一・土方勝一郎(2005), 地震動の水平/上下スペクトル振幅比の逆解析による地下構造推定法の標準化に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(投稿中)
- 駒澤正夫・長谷川功(1988), 関東地方の重力基盤に見える断裂構造, 地質学論集, 31, 57-74.
- 藤堂正喜・羽鳥敏明・千葉修・高橋克也・武村雅之・田中秀朗(1995), 堆積地盤における上下地震動特性と Q_p 構造, 日本建築学会構造系論文集, 446, 1-12.
- 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.
- 堀家正則(1998), 深部地下構造探査モデル化, 第 26 回地盤震動シンポジウム資料集, 47-54.
- 文部科学省(2001), 第 2 回堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集.
- 文部科学省(2002), 2002 年活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集.
- 文部科学省(2004), 2004 年活断層調査成果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集.
- 山中浩明・山田伸之(2002), 微動アレイ観測による関東平野の 3 次元 S 波速度構造モデルの構築, 物理探査, 55, 53-65.
- 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.
- Langston,C.A.(1979), Structure under Mount Rainier, Washington, inferred from teleseismic body waves, J.Geophys.Res., 84, 4749-4762.