

2003年十勝沖地震の特性化震源モデル構築の試み - 周期1-5秒の地震動を対象として -

野津 厚¹

¹正会員 (独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail: nozu@pari.go.jp

2003年十勝沖地震は我が国に密な強震観測網が整備されてから初めて発生した海溝型巨大地震である。この地震の記録を用いて、震源のモデル化手法を含む強震動評価手法の適用性を確認しておくことは、来るべき東南海・南海地震による揺れの予測精度を向上させる上でも重要である。本研究では、波形インバージョンの結果を参照し、工学的にも重要な周期1-5秒の揺れを説明できるような特性化震源モデルの構築を試みた。その際、強震波形計算手法としては、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した手法を用いた。経験的サイト増幅特性はスペクトルインバージョンの結果を用いた。その結果、比較的簡便な特性化震源モデルにより、広範囲の地震動を再現できることがわかった。

Key Words : The 2003 Tokachi-oki earthquake, characteristic source model, Site amplification factor, group delay time, stochastic Green's function method

1. はじめに

海溝型巨大地震による強震動を予測するための震源のモデル化手法については、これまでのところ様々な議論がある。例えば、2003年十勝沖地震の強震記録に基づいて既往のモデル化手法の検証を行った研究¹⁾では、周期1-5秒の帯域での地震動の再現性に改善の余地があるとしており、今後、震源のモデル化や計算手法のさらなる改良も必要であると指摘している。震源のモデル化に関しては、アスペリティの階層化²⁾、あるいは破壊伝播の複雑化³⁾など、どちらかと言えば震源モデルをより複雑化していく方向の提案が行われている。しかしながら、海溝型巨大地震による周期1-5秒の地震動は、単純な震源モデルでも十分に説明できるように著者には思われる。そのように思われる理由は次の通りである。

前報⁴⁾でも指摘したように、2003年十勝沖地震(M8.0)の本震波形と、同じ地点で得られた特定の余震波形の位相は良く似ている。図-1はK-NET池田とK-NET帯広において、2003年十勝沖地震(M8.0)の本震波形のフーリエ位相を2003年9月26日7:20の余震(M5.2)のフーリエ位相に置き換えた波形を計算し(黒)、それをもとの本震波形(灰色)と比較した結果である(0.1-1Hzの速度波形の比較)。これを見ると、両者は良く一致している。このことは、本震波形と余震波形のフー

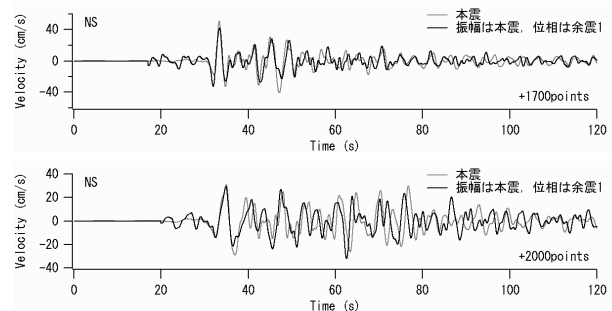


図-1 K-NET池田(上)とK-NET帯広(下)において、2003年十勝沖地震(M8.0)の本震波形のフーリエ位相を2003年9月26日7:20の余震(M5.2)のフーリエ位相に置き換えた波形(黒)ともとの本震波形(灰色)との比較(0.1-1Hzの速度波形の比較)。

リエ位相が類似していることを意味し、さらには、フーリエ位相の角周波数に関する微分と定義される群遅延時間が類似していることを意味する。

M8クラスの地震とM5クラスの地震の位相が類似していることは奇妙なことも思えるが、条件が整えば、そうしたことは可能である。その条件とは、本震と余震が伝播経路特性とサイト特性を共有していることと、本震の震源特性が比較的シンプルで、位相に対して大きな影響を与えないことである。もしも本震の震源過程が非常に複雑なものであれば、位相に対して大きな影響を及ぼすので、点震源に近いM5クラスの

地震と位相が類似することはあり得ないであろう。

以上のことから、本研究では、比較的シンプルな特性化震源モデルにより、2003年十勝沖地震の周期1-5秒の地震動が説明可能であるか検討を行った。その際、強震波形計算手法としては、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した手法を用いた。以下においては、まず、強震波形計算手法について説明し、次に、震源モデルについて説明する。

2. 強震波形計算手法

本研究では古和田他⁵⁾により提案されている経験的サイト増幅・位相特性を利用した強震動評価手法を適用する。この方法は、統計的グリーン関数法⁶⁾のバリエーションの一つであり、観測点周辺の堆積層が地震動の振幅および位相の双方に及ぼす影響を考慮できる手法である。ここではその概要について述べる。

一般に地震動のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積で与えられる。

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

一方、地震動の群遅延時間は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の和で与えられる⁷⁾。

$$t_{gr}^O(f) = t_{gr}^S(f) + t_{gr}^P(f) + t_{gr}^G(f) \quad (2)$$

式(2)において添字Oは観測点において実際に観測される地震動を、添字Sは震源特性を、添字Pは伝播経路特性を、添字Gはサイト特性を示す。

古和田他⁵⁾は、規模と震源距離の十分に小さな地震が対象サイトで観測されている場合、その記録の群遅延時間は、時間軸上での平行移動の分を除けば、ほぼ式(2)の右辺第三項すなわちサイト特性を表現していると考え、このことを利用した強震動評価手法を考案している。すなわち、先ず、対象地震による地震基盤での地震動を評価し(その方法については後述する)、次に、地震基盤での地震動をいったんフーリエ変換し、振幅を $Q(f)$ 倍し、さらに、上記の条件を満足する記録を周波数領域で振幅1に調整して乗じ、フーリエ逆変換する。このことを具体的に式で書くと次のようになる。

$$A(f) = A_b(f) G(f) \frac{O(f)}{|O(f)|} \quad (3)$$

ここに $A(f)$ は対象地震による地表での地震動のフーリエ変換で複素数、 $A_b(f)$ は対象地震による地震基盤での地震動のフーリエ変換で複素数、 $G(f)$ は上述のサイト増幅特性で実数、 $O(f)$ は対象地点で得られた中小地震記録のフーリエ変換で複素数である。式(3)の右辺第二項は堆積層が地震動の振幅に及ぼす影響を、右辺第三項は堆積層が地震動の位相に及ぼす影響を示す。なお、原論文⁵⁾には述べられていないが、このとき用いる対象地

点の中小地震記録は、対象サイトへの入射角ができるだけ対象地震と類似したものを選択する。それにより、堆積層が地震動の位相に及ぼす影響をより適切に考慮できるためである。

以上の方法で堆積層の影響を評価する場合、現地取得された中小地震記録の群遅延時間にはS波の寄与と後続位相の寄与が渾然一体となっていることから、振幅についても、両者の寄与を考慮したサイト増幅特性を用いることが必要である。

対象地震による地震基盤での地震動は通常の統計的グリーン関数法と同様の方法で評価することができる。すなわち、まず、対象地震の断層面上で発生する小地震を考え、小地震による地震基盤での加速度フーリエスペクトルを震源特性(4)と伝播経路特性(5)の積として与える。

$$S(f) = R_{0\phi} \cdot FS \cdot PRTITN \frac{M_{0e}}{4\pi\rho V_s^3} \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (4)$$

$$P(f) = \frac{1}{r} \exp\left(-\pi fr / QV_s\right) \quad (5)$$

式(4)において M_{0e} は小地震の地震モーメント、 f_c は小地震のコーナー周波数、 ρ は地震基盤における媒質の密度、 V_s はS波速度を示す。 R はラディエーション係数であり、本研究では平均値0.63を用いる。 FS は自由表面による増幅の効果(=2)を示す。 $PRTITN$ は地震動のエネルギーが水平方向の2成分に分散する効果を示す係数であり、本研究では水平2成分のエネルギーが等しい場合の値(0.71)を用いる。式(5)において r は震源距離を、 Q は伝播経路における媒質の Q 値を示す。小地震のコーナー周波数はBruneの式^{9),10)}で与える。

さて、要素波の求め方には、加速度フーリエスペクトルと加速度波形の包絡線の両方を近似的に満足するような波形を求めるBooreの方法¹¹⁾と、要素波の位相を0とする方法がある。Booreの方法で加速度波形(要素波)を生成するとき、生成された要素波のフーリエスペクトルと目標スペクトルとの間には、ある程度の残差が含まれる。従って、Booreの方法を採用する場合には、多数の要素波を生成し、その中で、構造物に対して影響の大きい周波数帯域で残差の小さい要素波を選ぶなどの配慮が必要である。しかし、その場合でも、要素波の任意性の問題は残る。最近、このような要素波の任意性に関わる問題に解決を与える方法として、久田¹²⁾は、要素波の位相を低周波側で0とする方法を提案している。本研究では、久田の考え方をさらに進め、高周波側を含め位相=0とする考え方を適用する。この方法による場合、要素波には任意性が無く、かつ、生成された要素波のスペクトルは目標スペクトルに完全に一致する。さらに、最適な要素波を探索する必要がないので計算時間も短い。

3. サイト増幅特性

ここでは図-2に示すK-NET¹³⁾およびKiK-net¹⁴⁾の計20地点を対象に強震波形計算を実施した。各々の地点でスペクトルインバージョンにより推定されたサイト増幅特性¹⁵⁾を図-3～図-12に示す。K-NETは地表で観測を行っており、KiK-netは地表と地中で観測を行っているが、図-3～図-12のサイト増幅特性はいずれも地震基盤～地表に対応するものである。そのため、以下においてはK-NET、KiK-netとも地表の波形を計算する。図-3～図-12より、1Hz以下の帯域でサイト増幅特性が10を上回る地点も少なくないことがわかる。

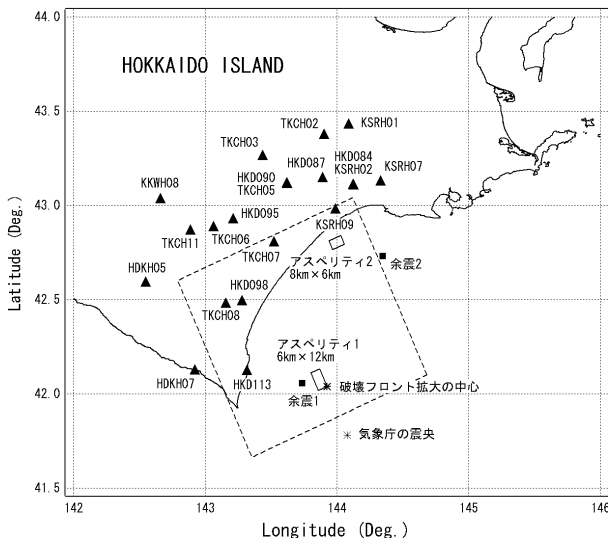


図-2 強震波形計算の対象地点 () と、本研究で設定した2003年十勝沖地震のアスベリティ (小さな長方形)

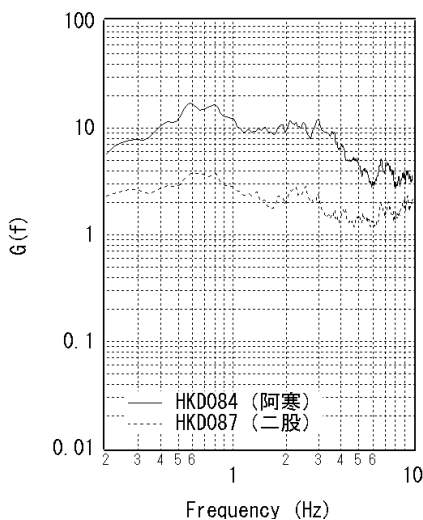


図-3 HKD084とHKD087のサイト増幅特性

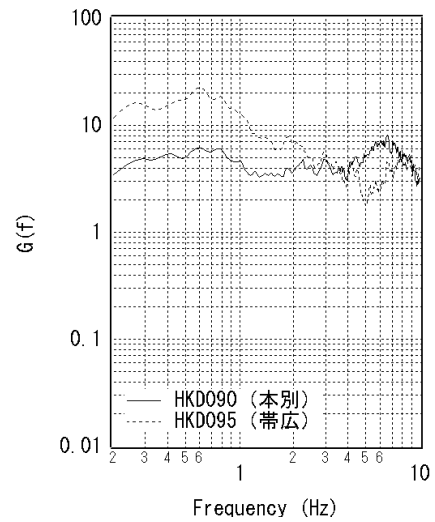


図-4 HKD090とHKD095のサイト増幅特性

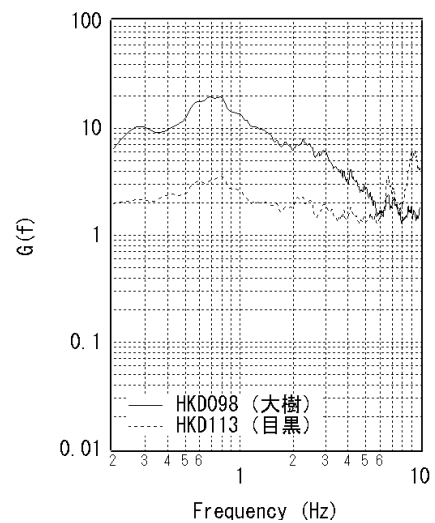


図-5 HKD098とHKD113のサイト増幅特性

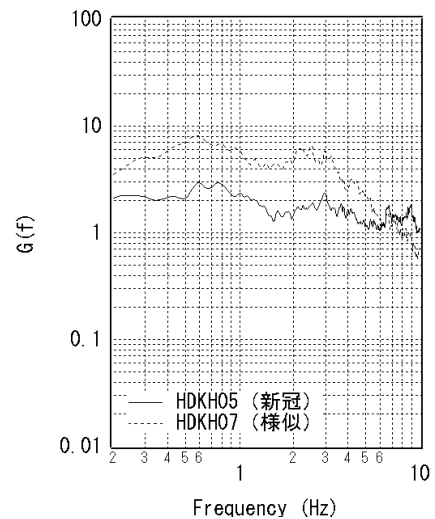


図-6 HDKH05とHDKH07のサイト増幅特性

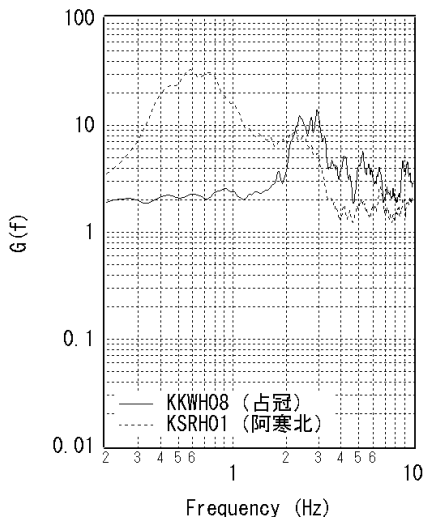


図-7 KKWH08とKSRH01のサイト増幅特性

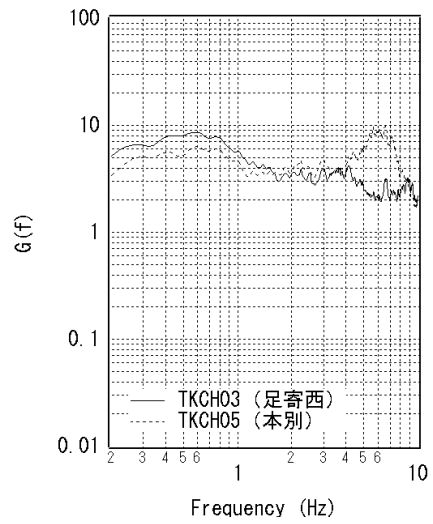


図-10 TKCH03とTKCH05のサイト増幅特性

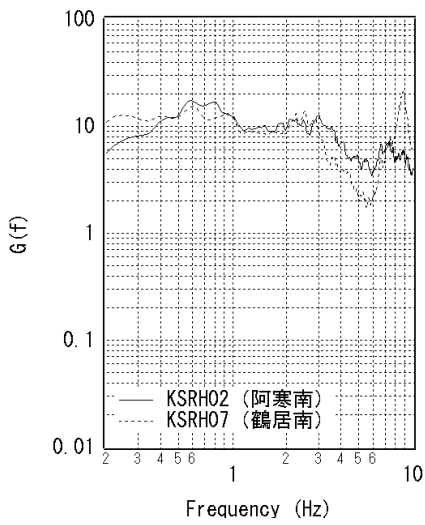


図-8 KSRH02とKSRH07のサイト増幅特性

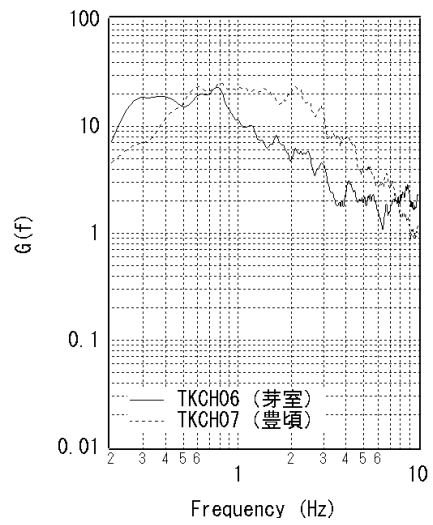


図-11 TKCH06とTKCH07のサイト増幅特性

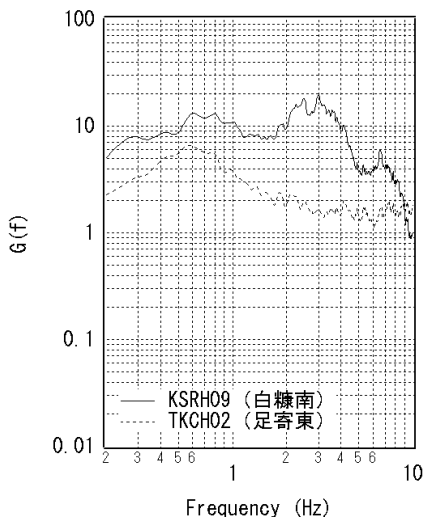


図-9 KSRH09とTKCH02のサイト増幅特性

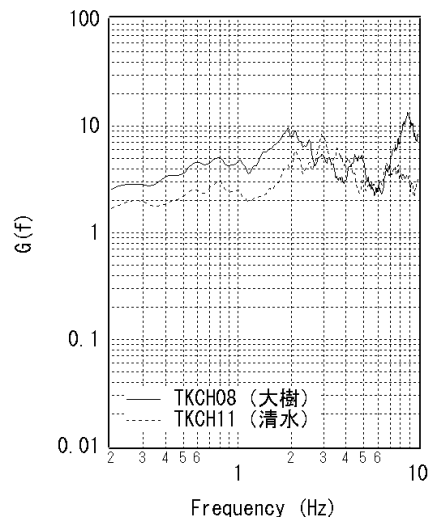


図-12 TKCH08とTKCH11のサイト増幅特性

4. 震源モデル

2003年十勝沖地震について、前報⁴⁾では経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンを実施し（対象周波数は0.1-0.5Hz）、図-13に示すように、三箇所にアスペリティを有する比較的シンプルな震源モデルを得ている。ここでは、この最終滑り量分布に基づき、図-2および表-2に示すような特性化震源モデルを構築した。ただし、図-13の三箇所のアスペリティのうち、広尾町の海岸線付近のアスペリティ3は、他の二つのアスペリティほど波形への寄与が明確でない。そこで、図-2および表-2の特性化震源モデルでは、波形への寄与が特に明確な二つのアスペリティをモデル化した。震源付近の密度とS波速度は地震調査研究推進本部のレポート¹⁾を参考に設定した。

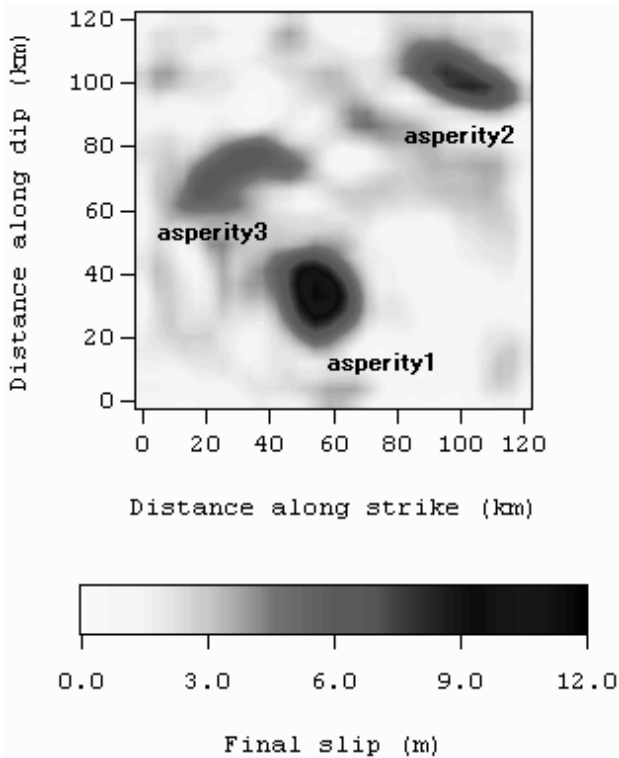


図-13 経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンによる2003年十勝沖地震のすべり量分布⁴⁾。図-2の大きな長方形に対応。

5. 計算結果

作成した震源モデルによる速度波形の再現状況を図-14に示す。なお、計算に際し、伝播経路のQ値としては佐藤・巽¹⁶⁾による東日本海溝型地震のQ値 ($Q=114 \times f^{0.92}$) を用いている。また、対象サイトの位相特性を考慮するための観測記録としては、対象サイトへの入射角が対象地震と類似した中小地震を選ぶことが望まし

表-2 特性化震源モデルのパラメタ

(全体)
震源付近の密度：3.1g/cm ³
震源付近のS波速度：3.9km/s
走向：246°
傾斜：18°
破壊フロント中心：
(143.925E, 42.039N, 深さ 30.1kn)
破壊伝播速度：2.7km/s
(アスペリティ1)
アスペリティのサイズ：6×12km ²
アスペリティの地震モーメント：6.0E+26dyne-cm
アスペリティのライズタイム：1.2s
分割数：5×5×5
(アスペリティ2)
アスペリティのサイズ：8×6km ²
アスペリティの地震モーメント：3.0E+26dyne-cm
アスペリティのライズタイム：1.2s
分割数：3×3×3

いが、対象地震は複数のアスペリティで構成されており、対象地点によって、波形に対して最も影響の大きいアスペリティは異なっている。そこで、アスペリティ1の影響の大きいHKD090以西の観測点についてはアスペリティ1の近くで発生している2003年9月26日7:20の余震1 (M5.2) の記録を用い、アスペリティ2の影響の大きいHKD087以东の観測点についてはアスペリティ2の近くで発生している2003年9月27日17:06の余震2 (M5.2) の記録を用いた。余震1および余震2の震央を図-2に示す。

図-14より、各地の速度波形 (0.2-1Hz) の再現性は概ね良好であると判断される。特に、TKCH02やTKCH07で観測されたインパルス状の波形、KSRH01やTKCH06で観測された継続時間の長い波形など、地点毎の特徴が良く捉えられている。KSRH01はTKCH02と、TKCH06はTKCH11と、それぞれ地理的には近い位置にあるが、十勝沖地震による速度波形の振幅と継続時間はかなり異なっている。こうした違いが、計算結果でも再現されている。一方、観測波と合成波の主な不一致としては、十勝支庁の東部の観測点 (HKD090, TKCH03, TKCH05) において、EW成分のパルスが再現できていない点を挙げることができる。ただし、同じ地点でNS成分の再現性は良好である。

このように、地点によっては不一致も見られるものの、総じて言えば、比較的シンプルな特性化震源モデルと経験的サイト増幅・位相特性を利用した強震波形計算手法の組み合わせにより、海溝型巨大地震である2003年十勝沖地震による周期1-5秒の地震動はほぼ説明可能であると言える。

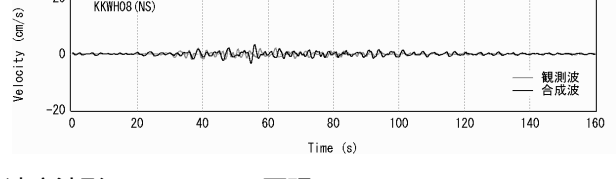
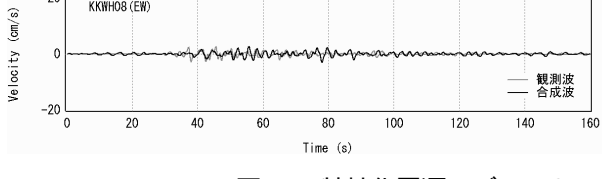
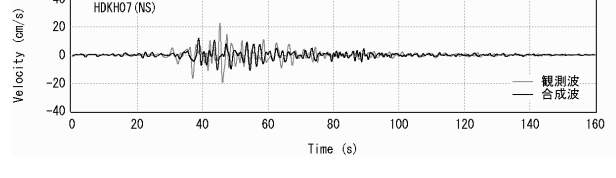
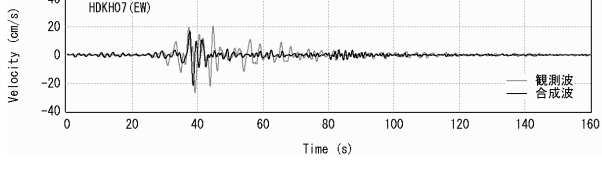
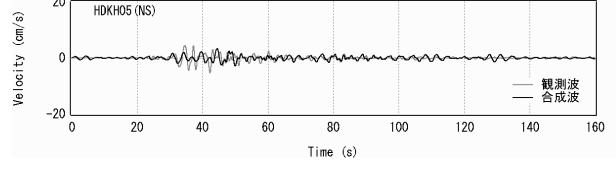
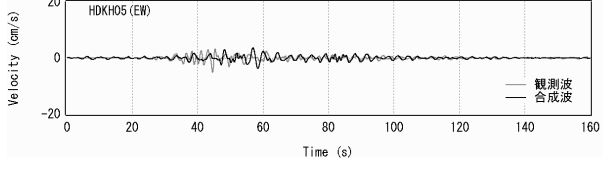
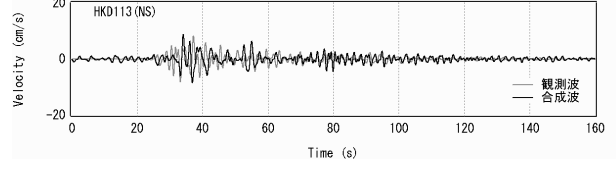
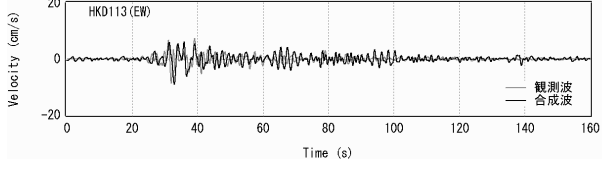
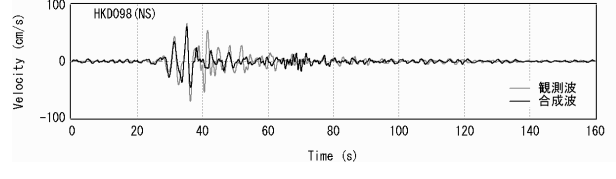
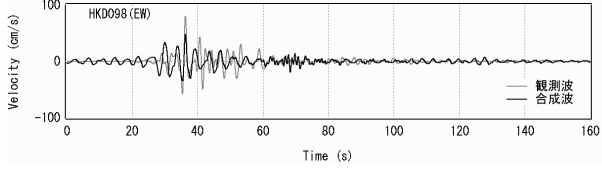
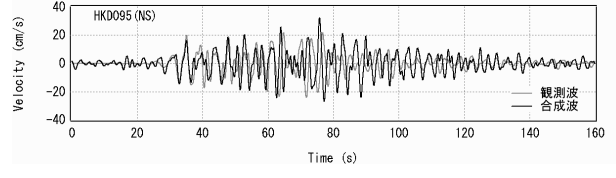
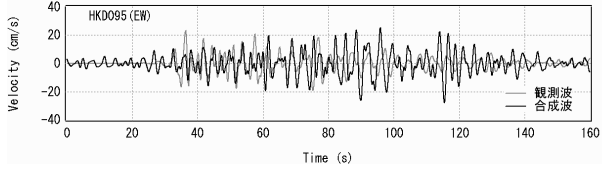
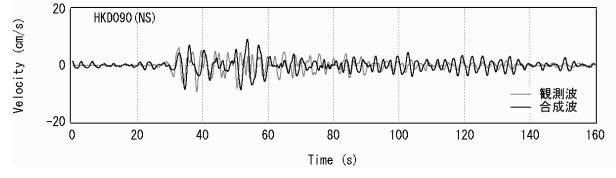
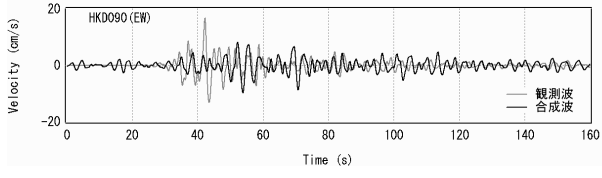
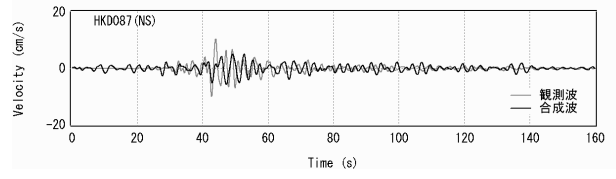
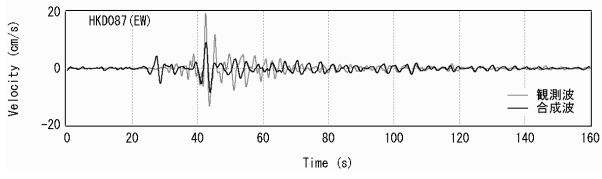
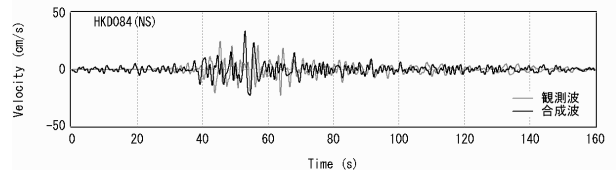
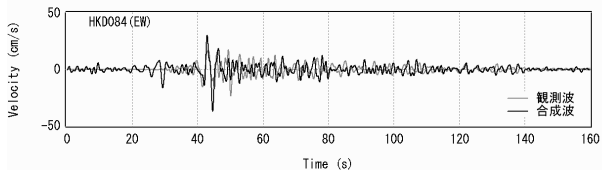


図-14 特性化震源モデルによる各地の速度波形 (0.2-1Hz) の再現 (1/3)

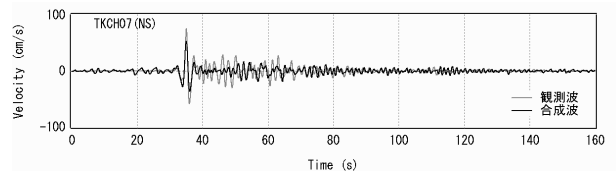
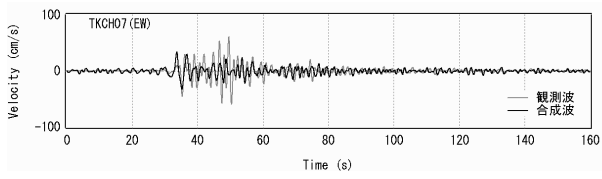
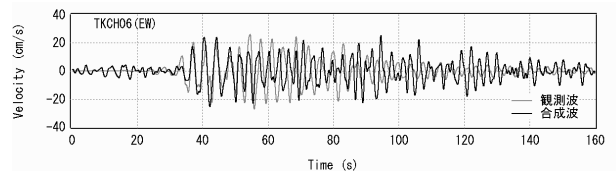
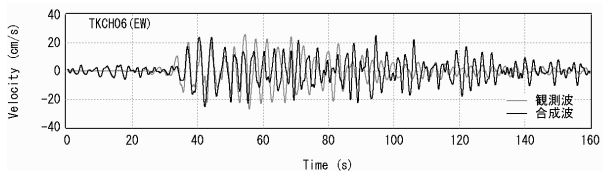
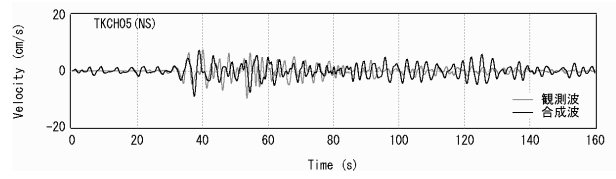
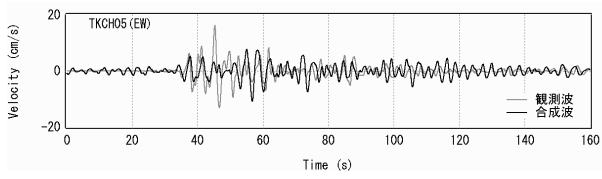
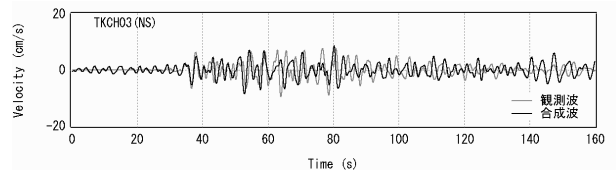
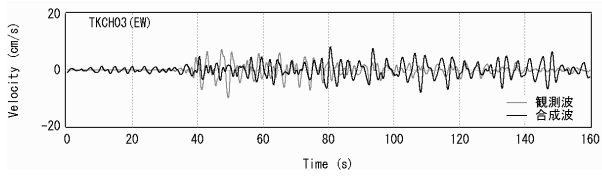
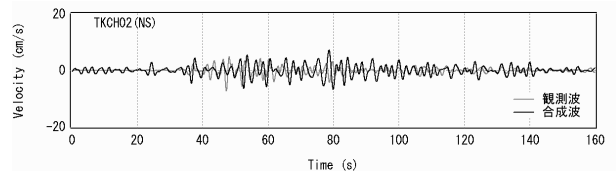
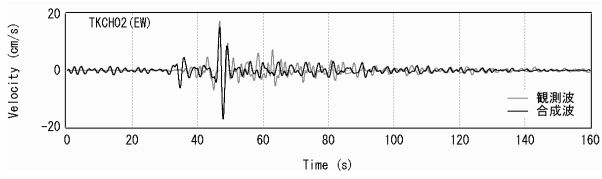
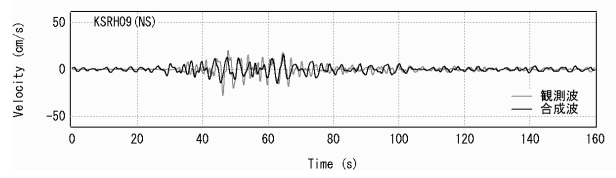
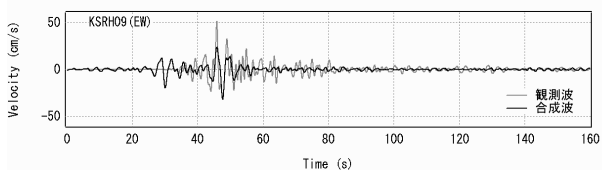
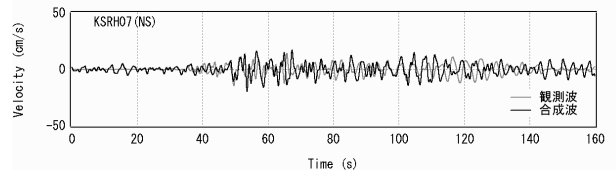
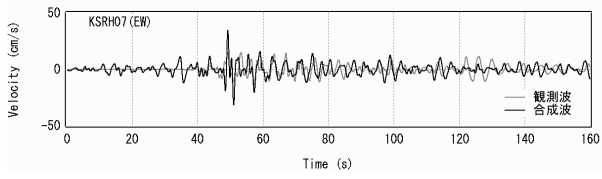
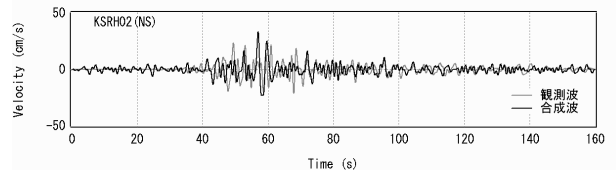
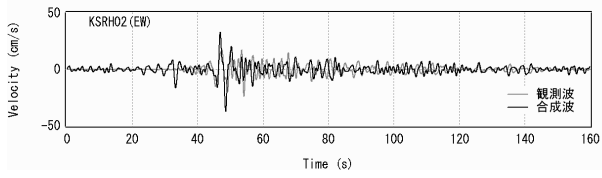
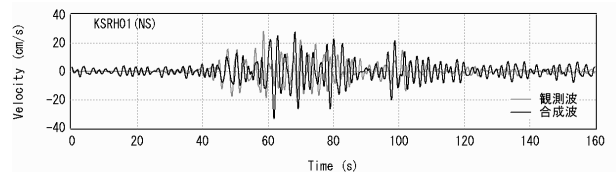
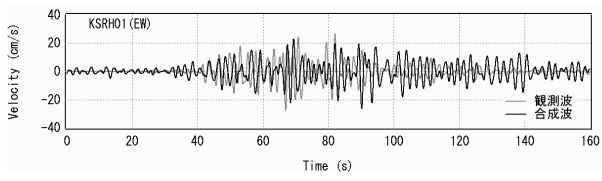


図-14 特性化震源モデルによる各地の速度波形 (0.2-1Hz) の再現 (2/3)

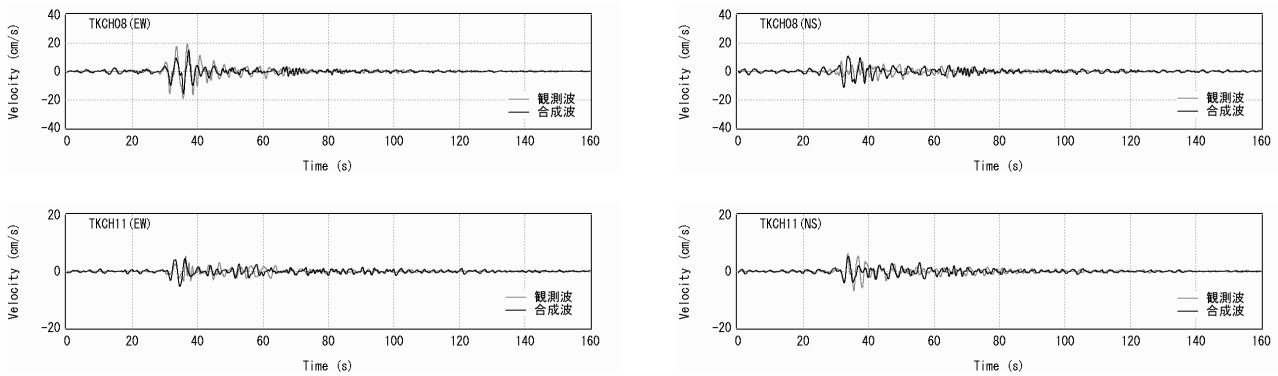


図-14 特性化震源モデルによる各地の速度波形 (0.2-1Hz) の再現 (3/3)

6. まとめ

本研究では、海溝型巨大地震である2003年十勝沖地震による周期1-5秒の揺れに着目して、各地の揺れを再現できるような特性化震源モデルの構築を試みた。その結果、比較的シンプルな特性化震源モデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法の組み合わせにより、この地震による周期1-5秒の帯域の地震動はほぼ説明可能であることがわかった。同様の手法を、同じく海溝型巨大地震である1968年十勝沖地震に適用したところ、青森港・八戸港・宮古港における速度波形 (0.2-1Hz) を良好に再現できることが確認できた。これについては稿をあらためて報告したい¹⁷⁾。また、本研究に使用した解析ツールの公開も行っていく予定である¹⁷⁾。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netの記録を使わせていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部：三陸沖北部の地震を想定した強震動評価について，<http://www.jishin.go.jp/main>，2004。
- 2) Matsushima, S., Kawase, H. and Sato, T.: A technique for estimating destructive strong motion generation patches and its slip velocity functions by waveform fitting, *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2004.
- 3) 渡辺基史，藤原広行，佐藤俊明，石井透，早川崇：断層破壊過程の複雑さが強震動予測結果に及ぼす影響 - 支配的パラメータの抽出 - ，日本地震工学会大会 - 2005梗概集，pp.302-303，2005。
- 4) 野津厚：経験的グリーン関数を用いた2003年十勝沖地震の波形インバージョン解析，海溝型巨大地震を考える - 広帯域強震動の予測 - シンポジウム論文集，土木学会・日本建築学会，pp.29-34，2005。
- 5) 古和田明，田居 優，岩崎好規，入倉孝次郎：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，第514号，pp.97-104，1998。
- 6) 釜江克宏，入倉孝次郎，福知保長：地震のスケ - リング則に基づいた大地震時の強震動予測，日本建築学会構造系論文報告集，第430号，pp.1-9，1991。
- 7) 澤田純男，盛川 仁，土岐憲三，横山圭樹：強震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.915-920，1998。
- 9) Brune, J.N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquake, *J. Geophys. Res.*, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
- 10) Brune, J.N.: Correction, *J. Geophys. Res.*, Vol.76, pp.5002, 1971.
- 11) Boore, D.M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 12) 久田嘉章：統計的グリーン関数法の震源域及び長周期帯域への拡張，日本地震工学会大会 - 2004梗概集，pp.368-369，2004。
- 13) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-NET), *Seim. Res. Lett.*, Vol. 69, pp.309-332, 1998.
- 14) Aoi, S., Obara, K., Hori, S., Kasahara, K. and Okada, S.: New strong-motion observation network: KiK-net, *EOS. Trans. Am. Geophys. Union*, Vol. 329, 2000.
- 15) 野津厚・長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性，港湾空港技術研究所資料，No.1112，2005。
- 16) 佐藤智美・巽誉樹：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，第556号，pp.15-24，2002。
- 16) 佐藤智美・巽誉樹：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，第556号，pp.15-24，2002。
- 17) 野津厚・菅野高弘：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法 - 内陸活断層地震および海溝型地震への適用性の検討 - ，港湾空港技術研究所資料 (刊行予定)。