

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

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M8クラスの巨大地震である。この地震による記録を用いて強震動評価手法の適用性を確認しておくことは、東南海・南海地震による揺れを推定精度を向上させる上でも重要である。本研究では、工学的にも重要な周期数秒の揺れに着目して、経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンにより、震源モデルの構築を試みた。その結果、三力所にアスペリティを有する震源モデルにより、比較的広範囲の地震動を再現できることがわかった。また、得られた震源モデルに対して、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法による強震動シミュレーションを実施したところ、周期数秒の揺れを一定の精度で再現できることがわかった。

Key Words : *The 2003 Tokachi-oki Earthquake, waveform inversion, empirical Green's function method, site effect, stochastic Green's function method*

1. はじめに

2003年十勝沖地震はK-NET¹⁾に代表されるような密な強震観測網が我が国に整備されてから初めて発生したM8クラスの巨大地震である。この地震では北海道を中心に多数の貴重な強震記録が得られている。これらの記録を用いて強震動評価手法の適用性を確認しておくことは、近い将来の発生が予想される東南海・南海地震による揺れの推定精度を向上させる上でも重要である。

本研究では、工学的にも重要な周期数秒の揺れを対象とし、経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンにより、各地の揺れを再現できるような震源モデル(variable slip model)の構築を試みる。また、得られた震源モデルに対して、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法²⁾による強震動シミュレーションを実施し、当該手法の妥当性についても検討を行う。

このとき主に対象とした観測点は図-1に示す震源近傍のK-NET観測点である。この結果、図-1に示す観測点では、本震と表-1の余震1の波形に類似性のあることがわかった。その例としてHKD098(K-NET大樹)およびHKD095(K-NET帯広)における比較の結果を図-2および図-3に示す。これらの観測点では余震1の速度波形(周期2-10秒)に適当な倍率を与えると、本震の速度波形に類似したものが得られる。このように、本震と余震1の波形に類似性が見られるのは、これらの波形が伝播経路とサイト特性を概ね共有しているためであると考えられる。すなわち、図-1に示す観測点に対しては、本震時に、余震1の震源と類似した方位から主要なエネルギーが到来したものと推察される。サイト特性はサイト近傍の堆積層への地震波の入射角にも依存することが考えられるが、地震波が堆積層に対して同様の方位から入射していれば、本震と余震の地震波に対して同様のサイト特性が作用するものと考えられる。

表-1 余震のパラメータ

	日	時	北緯 (度)	東経 (度)	深さ (km)	M _J	M _W
余震1	2003/9/26	7:20	42.057	143.734	40.9	5.2	5.4 [*]
余震2	2003/9/27	17:06	42.733	144.346	59.2	5.2	5.3 ^{**}
余震3	2003/9/28	9:23	42.265	143.324	43.4	5.0	5.0 ^{**}
*余震1と余震2のスペクトル比から算定							
**F-NETによる							

2. 予備検討

経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンにより2003年十勝沖地震の破壊過程を推定するのに先立ち、使用する余震の選択のための予備検討を実施した。予備検討では本震波形と余震波形の類似性について検討を行

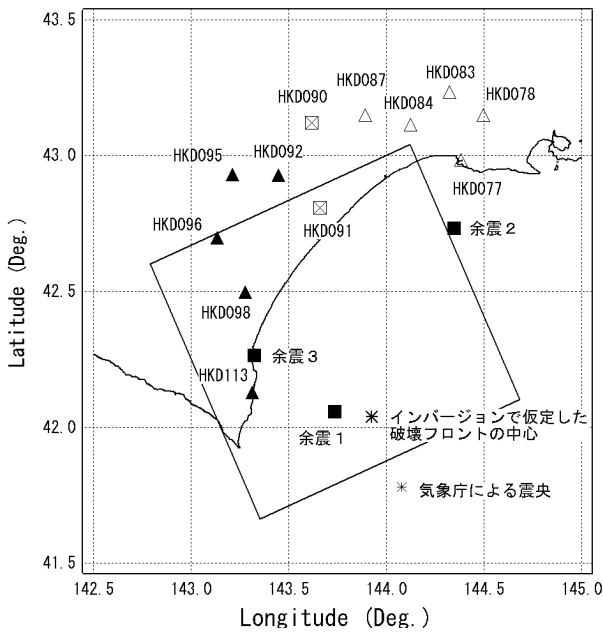


図-1 予備検討の対象地点

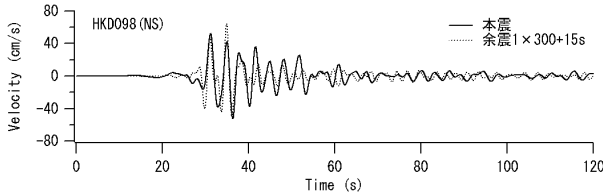
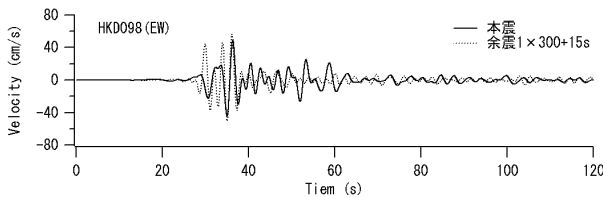


図-2 本震と余震1の波形の類似性 (HKD098)

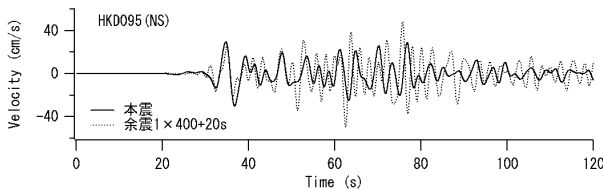
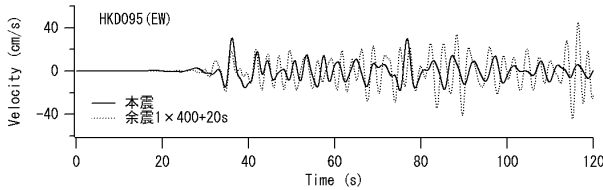


図-3 本震と余震1の波形の類似性 (HKD095)

一方、図-1に示した観測点に対しては、本震と余震1の波形には類似性が認められなかった。その一例としてHKD084 (K-NET阿寒) において比較を行った結果を図-4に示す。そこで、本震と余震2の波形について比較を行ったところ、図-5に示すように類似性が認められた。このことから、図-1に示す観測点に対しては、本震時に、余震2の震源と類似した方位から主要なエネルギー

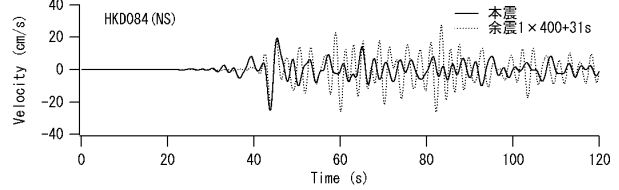
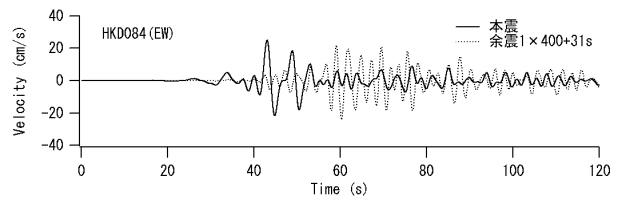


図-4 本震と余震1の波形の相違 (HKD084)

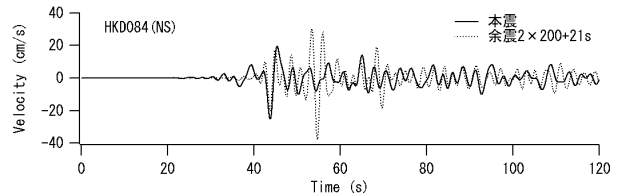
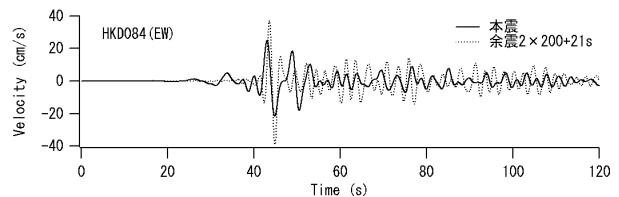


図-5 本震と余震2の波形の類似性 (HKD084)

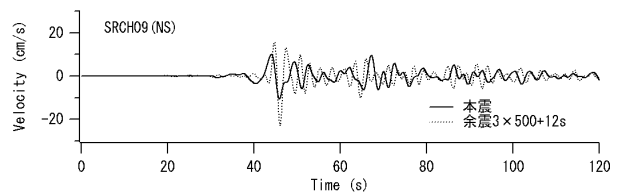
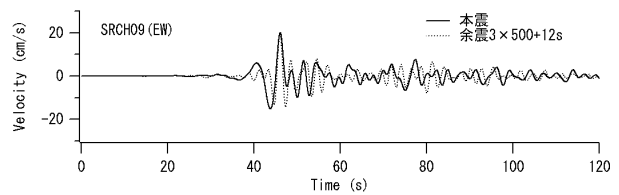


図-6 本震と余震2の波形の類似性 (SRCH09)

ーが到来したものと推察される。

さらに西方の観測点、例えばSRCH09 (KIK-NET栗山) の波形について検討したところ、本震と余震3の波形に類似性が認められたが(図-6)、余震1、余震2の波形との類似性は認められなかった。

このように地域によって異なる余震の波形が本震波形と類似しているのは、本震がM8クラスの巨大地震であり、震源断層が大きいため、震源断層の異なる部分が各地の揺れに寄与しているためであると考えられる。

以上のことから、以下において波形インバージョンを実施する際には、余震1~3の波形を併用することとした。

3. インバージョンの方法

インバージョンで仮定した断層面の位置を図-7に示す。断層面は地震調査研究推進本部の長期評価³⁾のプレート境界と概ね一致するような深度となっており、走向246°、傾斜18°、長さ120km、幅120kmである。その後、プレート境界面の深度について新たに検討が加えられているが、その結果についてはここでは反映されていない。断層を30×30に分割し、計900個の小断層を設定した。図-7に示すように、南西側部分の寄与を計算する際には余震1の波形を、東側部分の寄与を計算する際には余震2の波形を、北西側部分の寄与を計算する際には余震3の波形を各々グリーン関数として用いることとした。

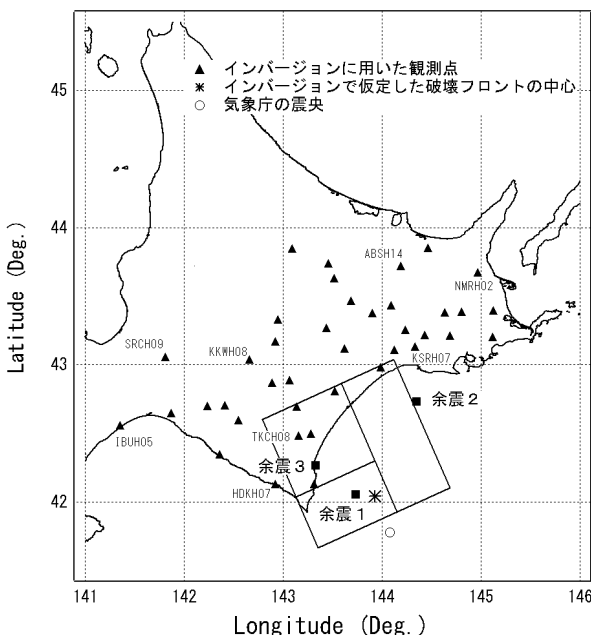


図-7 インバージョンに用いた観測点とインバージョンで仮定した断層面

表層地盤の非線形挙動の影響をできるだけ避けるため、インバージョンには主にKIK-NETの地中観測点の記録を用いることとした。本震、余震1、余震2、余震3のすべてを記録したKIK-NET観測点は全部で39あり、このうち余震記録の精度が十分でなかったABSH06（湧別北）、ABSH11（女満別）、HDKH04（門別西）を除くすべての観測点を対象とした。これに3箇所のK-NET観測点（HKD096、HKD098、HKD113）を加え、合計39観測点における速度波形のN30W成分をインバージョンのターゲットとした。これらの観測点を図-7に示す。インバージョンには本震波形のS波第一波を含む30秒間を用いた。

インバージョンはHartzell and Heaton⁴⁾の方法に基づいている。それぞれの小断層では、破壊フロント通過後の6.0秒間に8回のすべりが許されるものとした。各々のすべりによるモーメント解放量が余震モーメントの何倍

であるかを未知数としてインバージョンを行う。破壊フロントはHi-netにより自動決定された震央（これは気象庁の震源よりも30kmほど北西に位置する）の真下から同心円状に速度2.8km/sで広がるものとし、基盤のS波速度は3.8km/sとした。インバージョンには非負の最小自乗解を求めるためのサブルーチン⁵⁾を用いた。また、すべりの時空間分布を滑らかにするための拘束条件を設けた。記録のヘッダに記載された絶対時刻の情報を用いた。

4. インバージョンの結果

図-8にインバージョンの結果として得られた最終すべり量の分布を示す。同図に示すように破壊開始点付近と釧路沖、それに海岸線沿いの広尾町付近の三カ所にアスペリティを有する震源モデルが得られた。ここでのインバージョンでは、直接には各々の小断層におけるモーメント解放量の余震モーメントに対する比が明らかになるだけであるから、最終すべり量を求めるためには、余震のモーメントが別途必要である。ここで用いた余震のうち余震2および余震3については防災科学技術研究所（www.fnet.bosai.go.jp）によりCMT解が求められており、 M_0 が推定されている。一方、余震1については、本震後間もなく発生した余震であるためこれまでCMT解は公表されていない。そこで、余震1と余震2のK-NET各観測点におけるスペクトル比（ただし幾何減衰に関する1/Rの補正を施したもの）をとると、図-9に示すように0.1-0.3Hz付近では平均して1.5程度の値を示す。このことから、余震1のモーメントマグニチュードは $M_0=5.4$ と推定した。図-8に示す最終すべり量の分布はこのようにして求めたものである。図-8に示す本震の最終すべり量の分布は $M_0=8.1$ に相当する。

Kanae and Kawabe⁶⁾は経験的グリーン関数を用いたフォワードモデリングにより当該地震のアスペリティモデルを構築しているが、図-8のアスペリティ1~3のうち、アスペリティ1と2はKanae and Kawabeのアスペリティ1と3に、その位置は極めて良く一致している。一方図-8のアスペリティ3については、Kanae and Kawabeのアスペリティ2と比べ、その位置はやや異なっている。しかし、断層面の西半分には二つのアスペリティが存在しているという点では、二つの震源モデルは類似している。

図-8の震源モデルから計算される合成波と本震の観測波を網走、根室、釧路、十勝、日高、上川、空知、胆振の各支庁につき一カ所づつ比較したものを図-10~17に示す。いずれも地中の速度波形（周期2-10秒）である。観測点の位置は図-7に示す通りである。インバージョンはN30W成分の波形を用いて実施しているが、ここでの比較はEW成分とNS成分の双方について実施している。

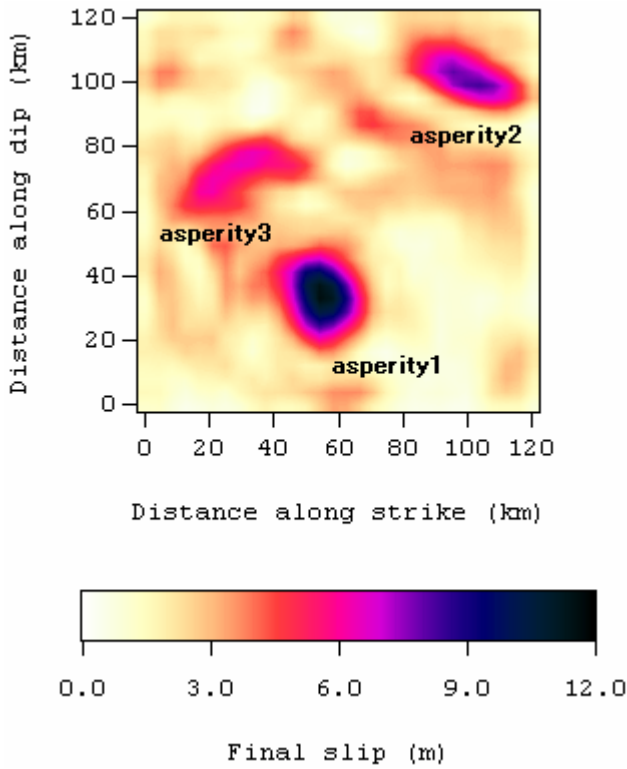


図-8 インバージョンの結果として得られた最終すべり量の分布

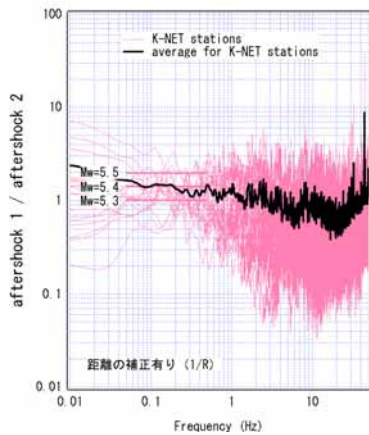


図-9 余震1と余震2のスペクトル比

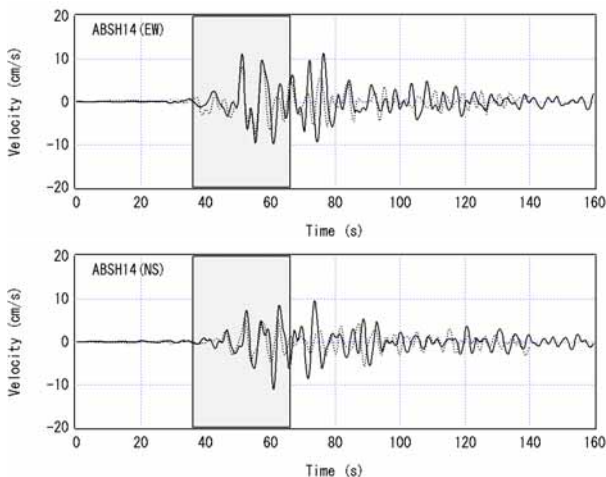


図-10 ABSH14における合成波(破線)と観測波(実線)

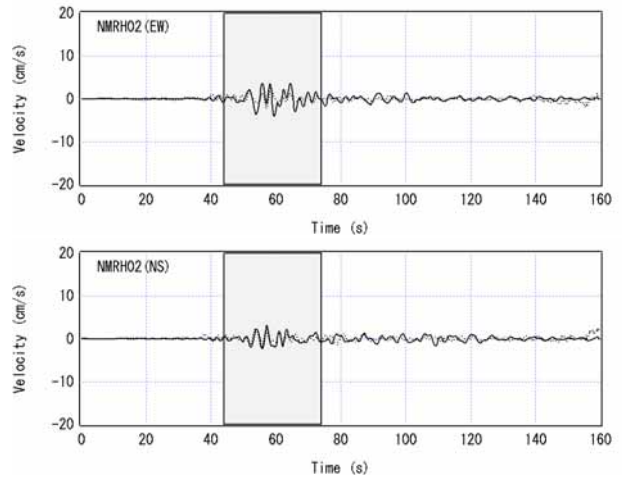


図-11 NMRH02における合成波(破線)と観測波(実線)

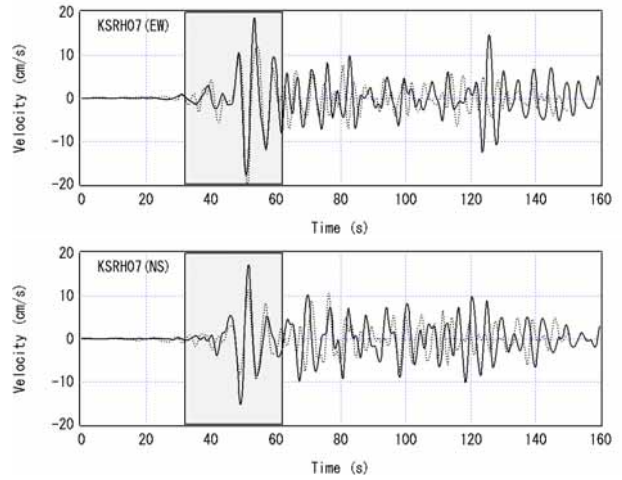


図-12 KSRH07における合成波(破線)と観測波(実線)

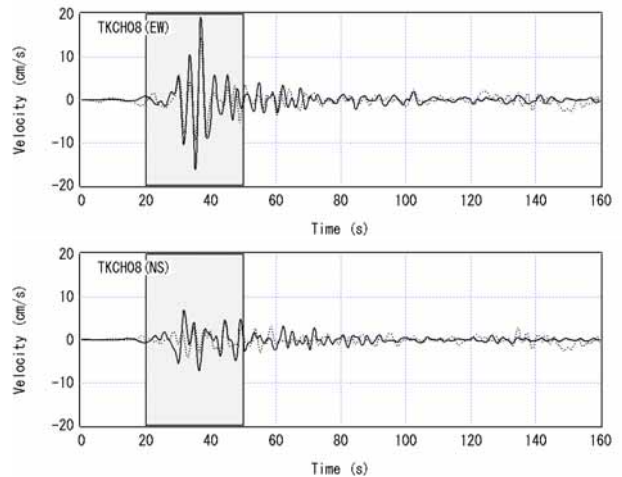


図-13 TKCH08における合成波(破線)と観測波(実線)

図-10~17を見ると、比較的広い範囲の地震動が図-8に示したモデルで再現できていることがわかる。これらの図においてハッチングをした部分がインバージョンに用いた部分である。ここに示した観測点のうちKSRH07, SRCH09, IBUH05においては、地中の波形であるにもかかわらず、後続位相が発達している。この後続位相は、インバージョンには用いていないが、一定の精度で再現できていることがわかる。

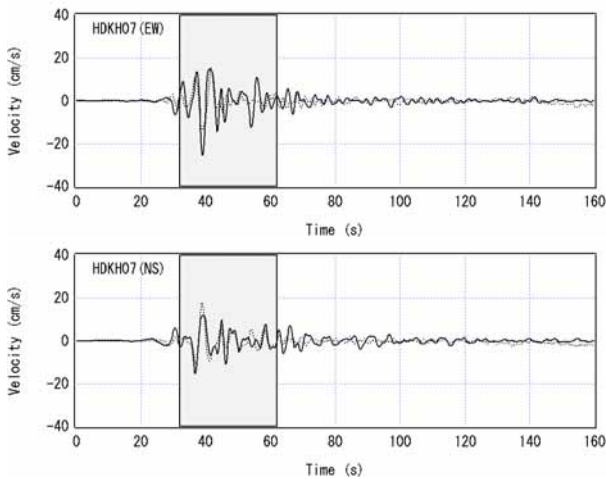


図-14 HDKH07における合成波(破線)と観測波(実線)

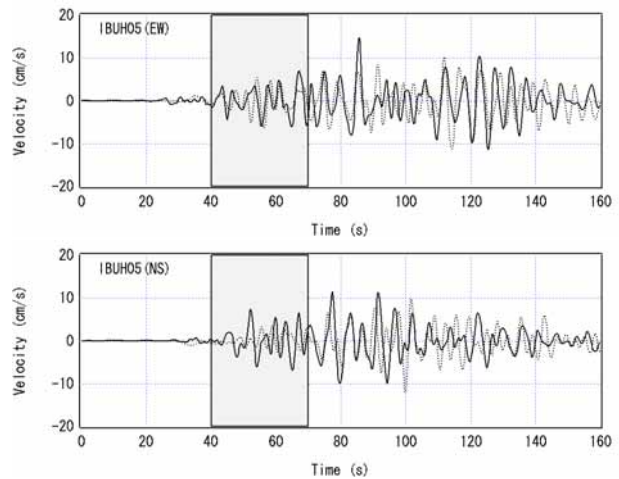


図-17 IBUH05における合成波(破線)と観測波(実線)

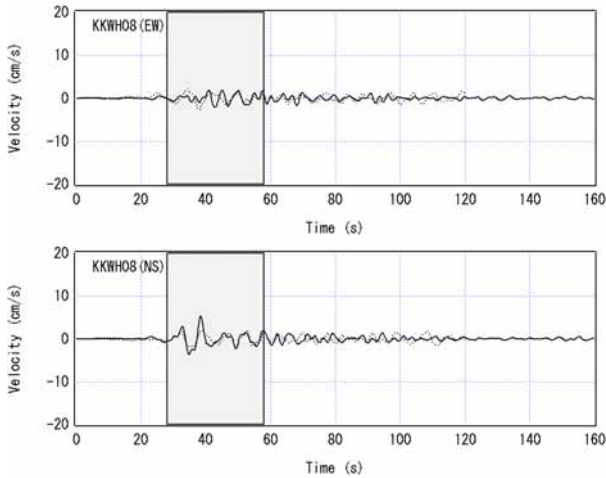


図-15 KKWH08における合成波(破線)と観測波(実線)

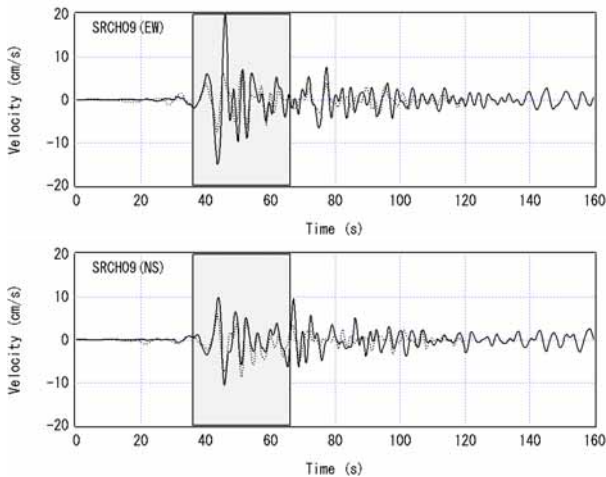


図-16 SRCH09における合成波(破線)と観測波(実線)

対照的にNMRH02およびKKWH08の波形は観測波、合成波とも継続時間の比較的短い波形となっている。これらの結果は、経験的グリーン関数を用いることにより、地震動の継続時間について、適正な評価が可能であることを示すものである。

5. 統計的グリーン関数を用いた検討

経験的グリーン関数法は有効な方法であるが、将来の地震による強震動の評価を考えると、その適用条件が限定的である点が問題となる。そこで、より適用範囲の広い方法として、統計的グリーン関数法⁹⁾が提案されている。ただし、統計的グリーン関数法にはサイト特性の考慮の仕方等に応じて様々なバリエーションがあり、いずれの方法を採用するかによって地震動の評価結果は異なるものとなる。古和田他²⁾は、統計的グリーン関数法のバリエーションの一つとして、経験的サイト増幅・位相特性を考慮できる手法を提案している。この方法は、サイト特性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という特徴を有している。そこで、以下においては、古和田他の方法を2003年十勝沖地震に適用し、その適用性について検討を行う。

古和田他の方法の概要は以下の通りである。一般に地震動の振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積で与えられる。

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

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⁸⁾。

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

式(1)および(2)において添え字Oは観測点において実際に観測される地震動を、添え字Sは震源特性を、添え字Pは伝播経路特性を、添え字Gはサイト特性を示す。古和田他は、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手法を考案している。すなわち、まず、地震基盤での統計的グリーン関数をBoore⁹⁾の方法で計算し、これにサイト特性を加味して地表での地震動を求

める．具体的には，地震基盤での地震動をいったんフーリエ変換し，振幅を $A^G(f)$ 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．

本研究では，上で述べた条件に加え，サイト近傍の堆積層への入射角ができるだけ大地震と共通となるような小地震を選択することを念頭においた．サイト増幅特性 $A^G(f)$ はスペクトルインバージョンにより求めた．算定された統計的グリーン関数を，先に求めたvariable slip modelに従って重ね合わせることで，十勝沖地震の地震動を算定した．

結果の一部を図-18以下に示す．ここで比較を行っているのは地表の速度波形（周期2-10秒）である．位相の補正のための小地震記録としては，KSRH07では余震2，TKCH08では余震1，HDKH07では余震3の記録をそれぞれ用いている．これらの図から，経験的サイト増幅・位相特性を利用した古和田他の統計的グリーン関数法は，適切な震源モデルと組み合わせることで，ここに示す周期帯域での揺れを評価するために有効な手法であると考えられる．

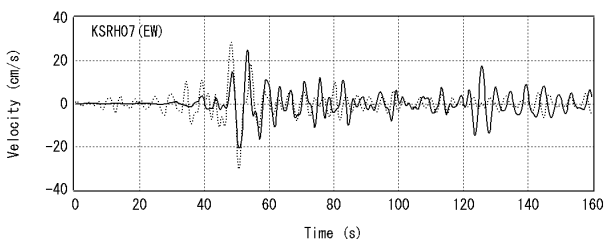


図-18 KSRH07における合成波（破線）と観測波（実線）

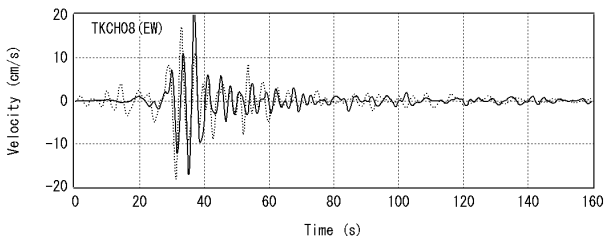


図-19 TKCH08における合成波（破線）と観測波（実線）

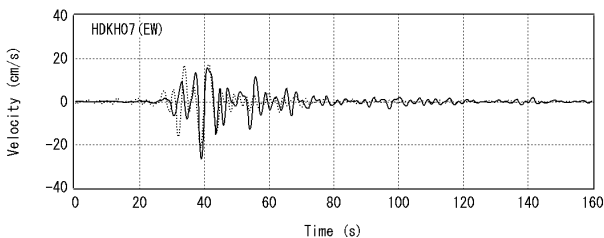


図-20 HDKH07における合成波（破線）と観測波（実線）

6. 結論

本研究では，2003年十勝沖地震により取得された豊富な強震記録を利用し，工学的にも重要な周期数秒の揺れに着目して，経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンにより，各地の揺れを再現できるような震源モデル（variable slip model）の構築を試みた．その結果，三カ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により，比較的広範囲の地震動を再現できることがわかった．また，得られた震源モデルに対して，経験的サイト増幅・位相特性を考慮した統計的グリーン関数法による強震動シミュレーションを実施したところ，周期数秒の揺れを一定の精度で再現できることがわかった．

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) Kinoshita, S.: Kyoshin Net (K-NET), *Seim. Res. Lett.*, Vol. 69, pp.309-332, 1998.
- 2) 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.
- 3) 地震調査研究推進本部: 千島海溝沿いの地震活動の長期評価について, 2003.
- 4) Hartzell, S.H. and Heaton, T.H.: Inversion of Strong Ground Motion and Telesismic Waveform Data for the Fault Rupture History of the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, pp.1553-1583, 1983.
- 5) Lawson, C.L. and Hanson, R.J.: Solving Least Squares Problems, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1974.
- 6) Kamae, K. and Kawabe, H.: Source model composed of asperities for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake (MJMA=8.0) estimated by the empirical Green's function method, *Earth Planets and Space.*, Vol.56, pp.323-327, 2004.
- 7) 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.
- 8) 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) 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.