

(34) 明石海峡大橋近傍におけるアレー地震観測記録のビームフォーミングに基づく地震動伝播解析と地震動波形の推定

大成建設	正員 石川 滝二
京都大学工学部	正員 家村 浩和
京都大学工学部	正員 五十嵐 晃
京都大学大学院	学生員 高橋 卓也
京都大学工学部	正員 中西 伸二

1. はじめに

明石海峡大橋のような中央スパンが約2kmにもおよぶ長大橋に対し、各々の基礎に対する入力地震動の相違を定量的に把握することは地震応答の検討などの基礎資料として重要であると考えられる。本研究では、明石海峡大橋近傍4地点（明石、神戸市垂水区、淡路島海岸部、淡路島山頂部）に設置されたアレー観測システム [1] により得られたデータのビームフォーミングによる入射地震波の時系列上での伝播速度、および入射角の推定と、明石海峡大橋の本州側、淡路島側両架設地点での地震動波形の合成による推定を行った。さらに、両岸における長周期地震動の位相および振幅特性の相違について検討を行った。

2. ビームフォーミング手法

ビームフォーミングとは、一般に波動現象を対象としたアレー観測システムにおける各アレー観測点での測定値時系列を、観測点間での伝播遅れ時間や観測データの重み等を考慮してスタッキングすることにより、波動源や波動場に関する情報の同定を行う計測データ処理アルゴリズムの総称である [2]。震源が十分遠い地点である場合に、観測地域を地震波が見かけ上地表面上を平面波として伝播していると仮定すると、時間領域ビームフォーミングの中で最も基本的な方法であるdelay-and-sum beamformingの考え方に従えば、座標原点における地震動を各アレー観測点 $m$ での計測信号 $y_m(t)$ ,  $m=1, 2, \dots, M$ を、次式のように伝播遅れ時間を考慮してスタッキングした結果 $z(t)$ により推定することが考えられる。

$$z(t) = \sum_{m=0}^{M-1} w_m y_m(t - \Delta_m)$$

ここに、 $w_m$ は観測点 $m$ に対する重み、 $\Delta_m$ は次式で計算される観測点 $m$ における時間遅れである。

$$\Delta_m = -\frac{\vec{\zeta} \cdot \vec{x}_m}{c}$$

$c$ は波動の位相速度、 $\vec{\zeta}$ は伝播方向ベクトル、 $\vec{x}_m$ は観測点 $m$ の位置ベクトルである。ここで $c, \zeta$ を変化させてそれに対応する $z(t; c, \vec{\zeta})$ から、次式で与えられる出力パワーを算出する。

$$P(c, \vec{\zeta}) = \int_{t_0}^{t_1} |z(t; c, \vec{\zeta})|^2 dt$$

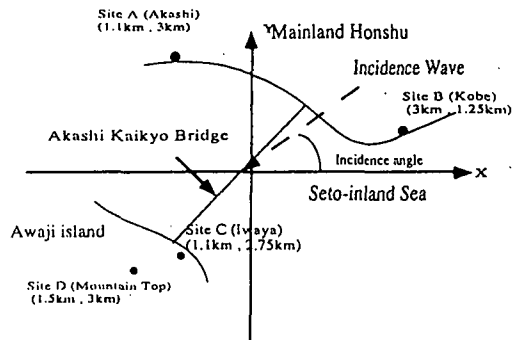


Fig. 1 Coordinate System for Analysis

位相速度と伝播方向ベクトルが実際の値と等しい

ときにPが極大となる性質を利用して、これらのパラメータを推定することが可能である。本研究では、Fig. 1に示すように明石海峡大橋中心点を原点とし、4点アレー地震観測記録にこの考え方を適用することにより、入射角、伝播速度を推定することとした。

### 3. 観測記録

本稿ではTable 1に示す、ウラジオストック地震、北海道東方沖地震の2つの地震を取り上げる。Fig. 2およびFig. 3に、ウラジオストック地震と北海道東方沖地震の観測速度時刻歴波形の例を示した。ウラジオストック地震では周期7秒、北海道東方沖地震では周期10秒を越える長周期成分が卓越しており、観測記録の変位軌跡の特性やその解析結果からも裏づけられるように、表面波成分が卓越して現れているものと推定される。また、両地震とも淡路島側にあるC地点での記録は本州側の観測記録に比べ1.5倍から2倍程度の大きな振幅レベルを示している。

Table 1 List of Earthquakes used in the Analysis

No	Date Hypocenter	Observed site	Epicenter Lat. Lon. (° N) (° E)	Depth (km)	Magnitude	Distance from A (km)
1	1994/7/22 Vladivostok	A, B, C, D	42.3 133.6	552	7.6	858
2	1994/10/4 Hokkaido Toho Oki	A, C, D	43.4 147.7	30	8.1	1458

### 4. ビームフォーミング結果

ウラジオストック地震記録200秒を同程度周波数帯域である0秒～50秒、50秒～100秒、100秒～150秒、150秒～200秒の4時間区間に分割した。ビームフォーミング解析はradial、transverse、vertical 3成分に関して行った。そのビームフォーミングのパワーの変動はradial、transverse両成分が非常に類似した結果となり、vertical成分はそれに比べパワーの起伏の激しいものとなった。その1例としてウラジオストック地震の0秒～50秒区間における鉛直成分の出力パワーの変化をFig. 4に示した。使用する観測点数を現状より増加すれば、これらの出力パワー変動の分解能が向上するため、より望ましい結果が得られることが予想さ

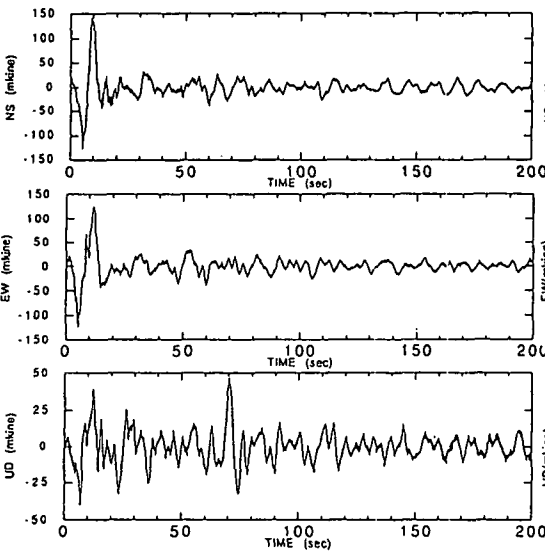


Fig. 2 Representative Record of Vladivostok Earthquake (Site A)

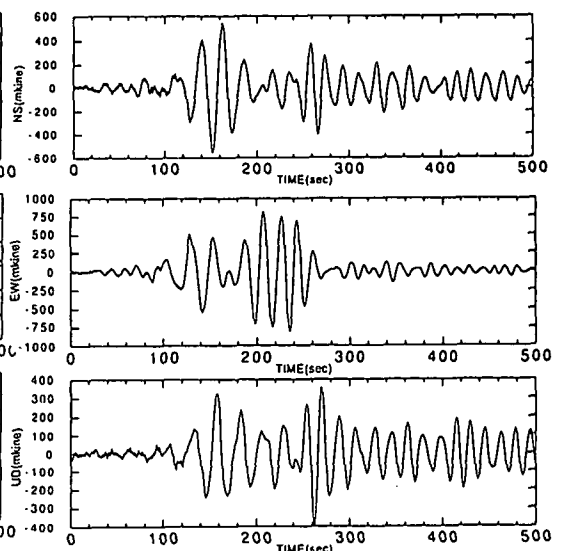


Fig. 3 Representative Record of Hokkaido Toho-Oki Earthquake (Site A)

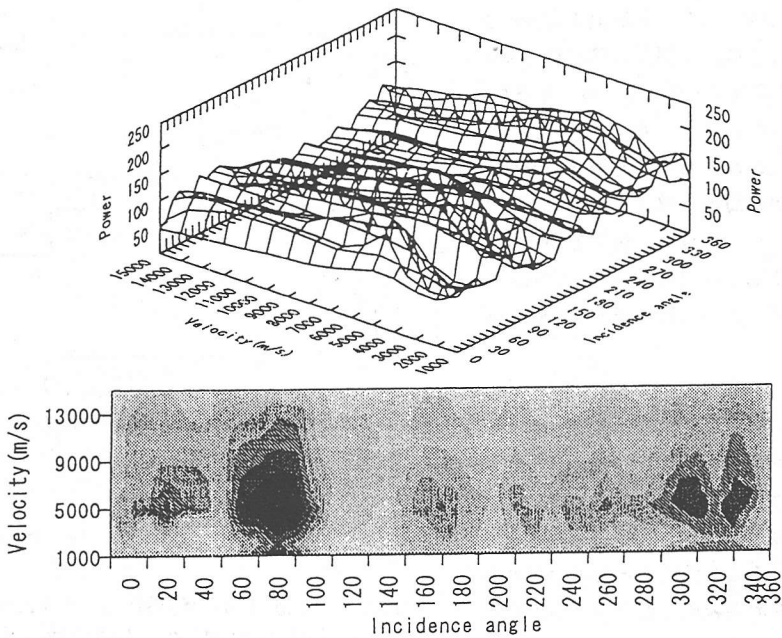


Fig. 4 Variation of Beamformer Output Power for Vladivostok Earthquake Records ( $t = 0 - 100$  sec)

れる。伝播速度に関しては各成分とも最大パワーを与える唯一の値を与えたが、入射角に関してはradial、transverse成分で最大パワーを与える第1ピーク点と第2ピーク点を持つ滑らかな曲線となったが、第1ピーク値と第2ピーク値のパワーレベルの差は大きく第1ピーク値を与える入射角を区間入射角とした。なお、各時間区間の卓越周期、およびビームフォーミング結果をFig. 5に示した。

北海道東方沖地震記録500秒は0秒～100秒、100秒～200秒、200秒～300秒、300秒～500秒の4時間区間に分割した。そのビームフォーミング結果をFig. 6に示す。本解析の結果は、radial、transverse、vertical 3成分とも入射角、伝播速度はおおむね同様であることを示している。前述のように、解析に用いた2地震は遠距離震源の地震であるため表面波が卓越して伝播されていると考えられるが、分散性から伝播速度の推移は区間卓越周期の変化によるものと推定される。

#### 5. 架橋地点地震動の合成

次に以上2地震についての解析結果をもとにした明石海峡大橋の本州、淡路島側両架設地点における合成地震動波形をFig. 7およびFig. 8に示した。ウラジオストック地震の場合、淡路島側が本州側に比べ、振幅レベルが1.2～1.3倍となる結果となった。各観測点の時刻暦波形によると淡路側が本州側に比べ振幅レベルが高くなっており、それが影響していると考えられる。位相差は0.7秒、0.8秒、

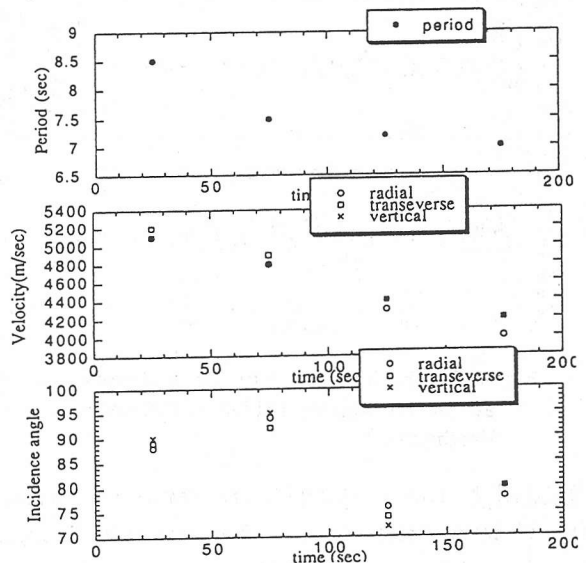


Fig. 5 Transition of Estimated Phase Velocity and Incidence Angle (Vladivostok Earthquake)

1.0秒、1.2秒と推移した。北海道東方沖地震に関してはやはり淡路島側が2倍前後の振幅となり、位相差は0.6秒、0.4秒、0.7秒、0.9秒と推移した。なお、明石海峡大橋は55°方向に建設されており、北海道東方沖地震の場合特に明石海峡大橋橋軸方向に近い入射方向を持つ。したがって、伝播方向に関する限り、ここに示された位相差が大橋両端部で最も顕著に現れる場合に相当するものと考えられる。

**おわりに**

本研究において使用したアレー観測システムは観測点数が限られており、それに伴う問題点があるものの、ここで行った数値処理により多点入力地震動の基本的な検討を行う程度の情報は十分得ることができるものと考えられる。なお、本地震観測においては本四公団垂水工事事務所の関係各位および夢の架け橋記念事業協会の安達寿伸氏の御協力を頂いた。

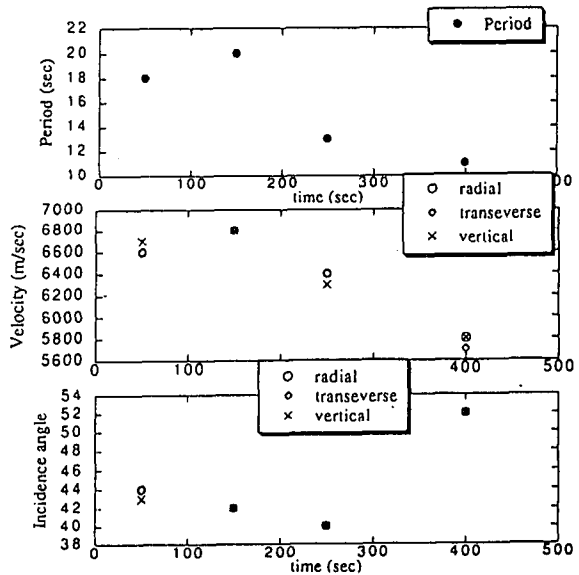


Fig. 6 Transition of Estimated Phase Velocity and Incidence Angle (Hokkaido Toho-Oki Earthquake)

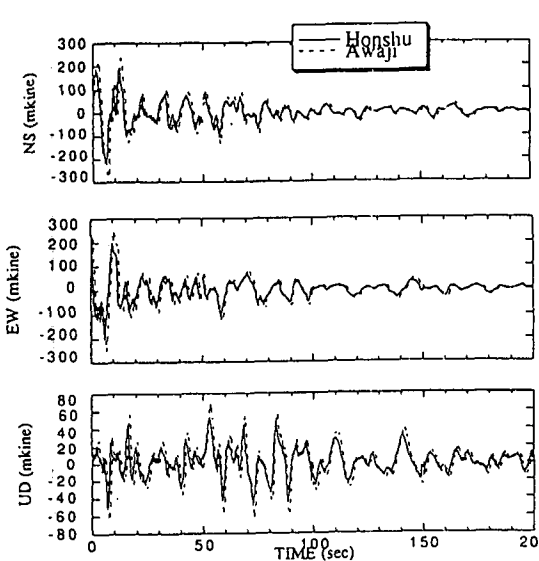


Fig. 7 Synthesized Velocity Time History at Akashi Kaikyo Bridge (Vladivostok Earthquake)

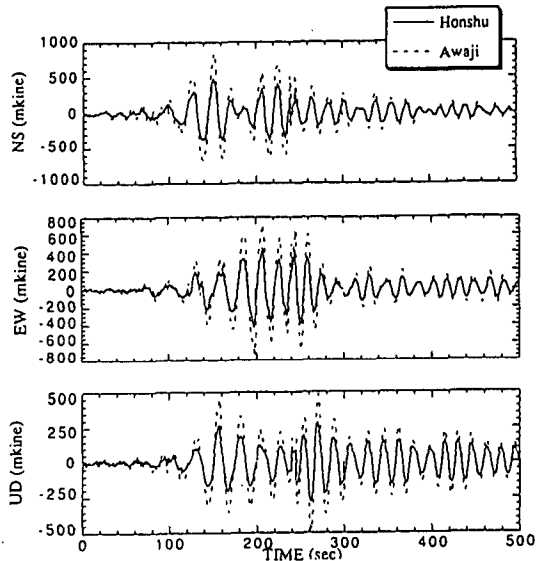


Fig. 8 Synthesized Velocity Time History at Akashi Kaikyo Bridge (Hokkaido Toho-Oki Earthquake)

参考文献 [1] H. Iemura, 'Array observation of long-period earthquake ground motion for the aseismic design of Akashi Kaikyo Bridge,' *Proc. 9th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Vol. 3, pp. 49-54, 1994. [2] D.H. Johnson and D.E. Dudgeon, *Array Signal Processing, Concepts and Techniques*, Prentice Hall, 1993.