

新潟におけるやや長周期地震動と堆積盆地地形の関係

その1 1983年 日本海中部地震の伝播経路の検討と表面波の識別

A study of topological effects of Niigata sedimentary basin on middle-period seismic waves; Part I Paths of wave propagation and identification of surface waves in the 1983 Japan Sea earthquake.

横山正義 岡本晋 河村壮一

By Masayoshi YOKOYAMA, Susumu OKAMOTO and Souichi KAWAMURA

The Niigata basin is a sedimentary deposit with 50km width in EW direction, 70km length in NS direction and some 6km depth.

In the 1983 Japan Sea earthquake with magnitude 7.7, the displacement meter under the Japan Meteorological Agency in Niigata city recorded over thirty centimeter displacement.

This paper analyse the seismic paths of propagation, particle orbit and dispersive characteristics of dominant waves and try to estimate the topological effects on the amplification characteristics of deep sedimentary layer.

1. まえがき

気象庁1倍変位計記録の統計分析により新潟は日本で有数の揺れやすい地点であることが従来より指摘されている。¹⁾1983年5月26日の日本海中部地震においても震央距離 90 kmの男鹿では原油タンクのスロッシング波高は0.5 m程度であったにもかかわらず、震央距離270 kmの新潟では4m以上のスロッシング波高となったことが報告されている。²⁾日本海中部地震に関する新潟での地震動特性についてはすでに多くの研究が成されている。^{3),4),5),6),7)}

本研究は今回まとめた新潟の詳しい堆積盆地構造とやや長周期帯域における地震動の増幅メカニズムの関連について考察を行うものである。

2. 新潟堆積盆地の基底面の推定

新潟地方は、石油・ガス資源探査を目的とした深層ボーリングが多数実施されている地域であり、深度4,000～5,000 mまでの層序構成が極めて詳しく調査されている。これらのボーリングデータを耐震の分野に応用するには従来、次のような難点があった。

- ① ボーリングが地震基盤深度に達していないところがあり、基盤の形状が不明瞭である。
- ② 海域でのボーリングデータが少なかった。

今回、海域において実施されたエアガン探査の結果を整理し、新潟堆積盆地の詳しい形状を推定した。

* 工修 大成建設 技術研究所 耐震研究室 (〒245 横浜市戸塚区名瀬町344)

** 工博 同上 耐震研究室 室長

2. 1 新潟堆積盆地の形成史

東北日本の日本海側に存在する新潟から秋田にかけての堆積盆地は中新世以降の極めて激しい地殻変動の結果形成されたものである。中新世前半においてこの地域の盆地底は沈下し、新第3紀末から第4紀においては北北西、南南東を圧縮軸とするテクトニクスにより著しい褶曲地形と逆断層地形が形造られた。その結果、中新世以降の新潟堆積盆地における地殻の総沈下量は6,000 m以上に達したとされている。⁸⁾

このような歴史的背景により、東北日本の日本海側の地殻の沈下の地域変化は著しいものとなっている。

2. 2 新潟堆積盆地の形状

石油探査を目的とする新潟県下の深層ボーリングの試掘数は500本以上あり、その内、最も深いものは5,300 mに達している。これらのボーリングデータをもとに層序について詳しい資料が作成されている。新潟市東方10kmの東新潟ガス田での層序をFig. 1に示す。⁹⁾

基盤層としてせん断波速度 3.4km/sの花崗岩層の上面もしくは海上エアガン探査における反射面に相当する七谷層下面を採用する。文献¹⁰⁾に示される七谷層上面深度分布図と七谷層の平均層厚800 m¹¹⁾を参照し、陸上部における基盤深度図をFig. 2(a)の如く作成する。海上部については、新潟沖合におけるエアガン探査による音響基盤までの反射時間分布¹²⁾とFig. 2(c)に示す基盤深度-エアガン反射時間関係図を用いて海域での基盤深度図を作成する。このような手順で作成された海域の基盤深度図はその接合部で陸地の基盤深度図とほぼ整合するものである。Fig. 2(a)に以上の手順で求めた新潟堆積盆地の基盤深度図を示す。三条以北の新潟堆積盆地は南北約70km、東西約50kmの拡がりを持ち、西側縁部は急峻な逆断層地形となっている。新潟市は、この堆積盆地のほぼ中央部に位置する。層厚6 km以上の深い谷筋状の堆積層は新潟市から北北西および北北東方向の2方向に拡がっている。この2つの谷筋は各々幅約15kmで長さ約50kmとなっている。

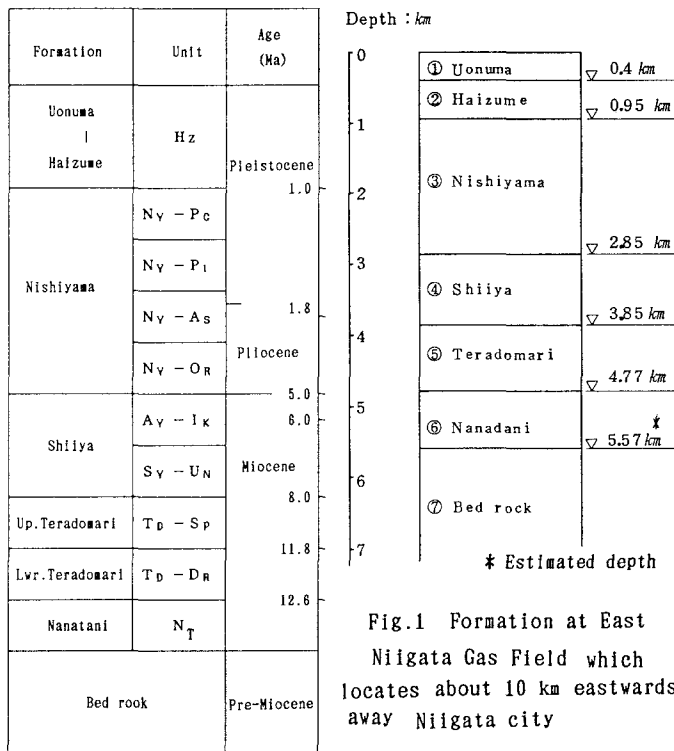


Fig.1 Formation at East Niigata Gas Field which locates about 10 km eastwards away Niigata city

3. 1983年日本海中部地震の特徴

1983年5月26日の日本海中部地震はマグニチュード 7.7、震源深さ14kmの海洋底に発生した浅発型の地震である。地震学分野における震源パラメータの同定により、本地震は20~30°の低角で西から東へ向ってもぐり込む逆断層タイプの地震で、イベント数2もしくは3の多重震源であるとされている。¹³⁾

Fig. 3に震源と新潟および相川の位置関係を示す。新潟は震源に対しN 180° E、相川はN 196° Eであり、ほぼ真南の方位に位置する。

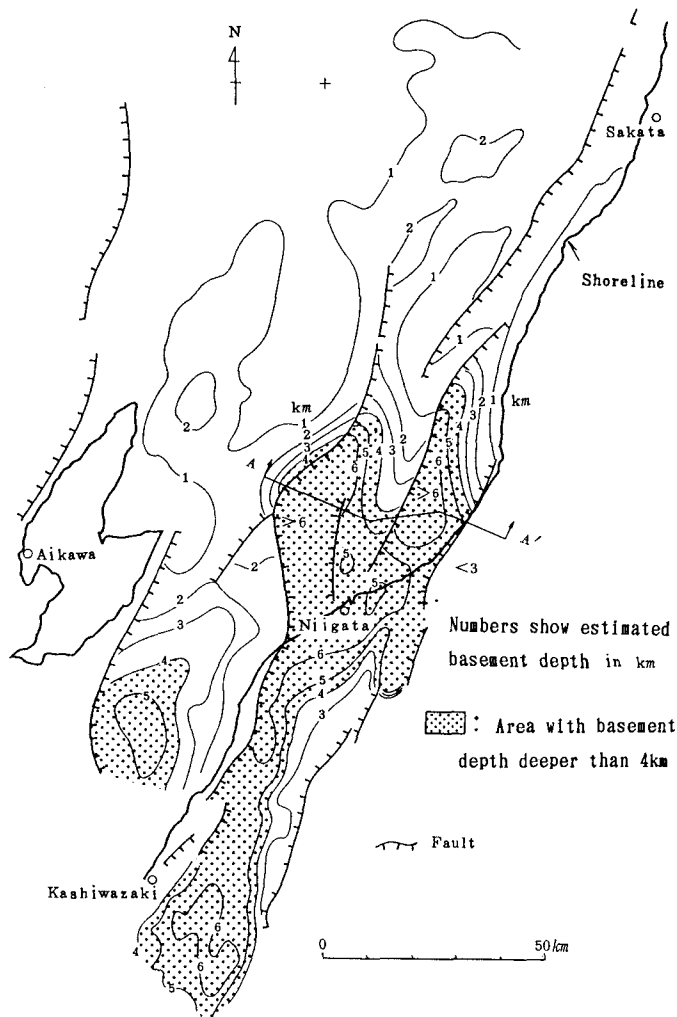


Fig.2(a) Estimated basement depth in Niigata sedimentary basin

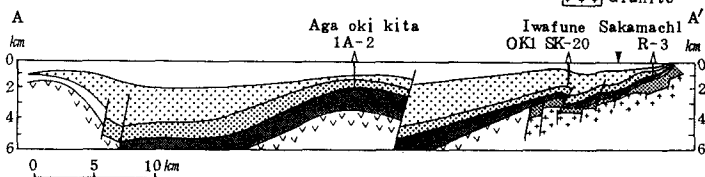


Fig.2(b) Cross section of A-A'

Fig. 4に本研究で対象とする新潟と相川の気象庁1倍変位計の波形を示す。Fig. 4に示す全波形について記録時のペンの円弧補正、摩擦の補正、計器特性補正が実施されている。新潟のNSとEWは記録時に飽和していた記録であるが、山田、野田、嶋田、吉田により修復されたものである。14)

Fig. 4の各変位波形の最大値は新潟UD 3.0cm, NS 33 cm, EW 16 cm, 相川UD 1.1cm, NS 2.4cm, EW 2.6cmとなっている。

これらの波形の特徴は以下の通りである。即ち、新潟NSの記録は相川NSに比べ約14倍、新潟EWは相川EWに比べ約7倍大きく、また、新潟UDは相川UDに比べ約3倍大きい。

気象庁1倍変位計修復記録の信頼性を検証するために新潟市内で記録されたSMA C強震記録とのクロスチェックをFig. 5に示す。工藤らにより、すでにSMA C強震計加速度記録の積分変位波形が算定されている。15) その際加速度記録読み取り時の長周期のドリフト誤差を除くため周期15秒以下のハイパスフィルターが用いられている。そこで修復波形にも同様の周期15

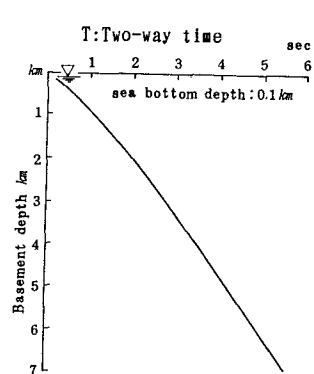


Fig.2(c) Basement depth versus two-way reflection time

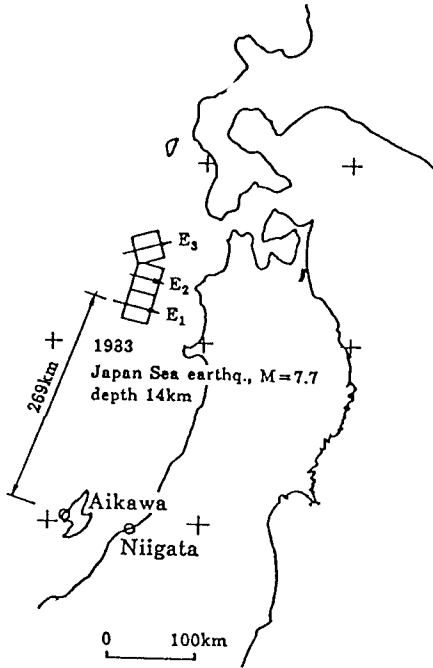


Table 1(a) Source parameters of 1983 Japan sea earthquake

Location	40° 21.4' N, 139° 04.6' E
Depth	14km
J.H.A Magnitude	7.7
Time of Initial break	May, 26, 1983 11h 59m 58s : J.S.T

Table 1(b) Process time of subevents

Subevent E1	12h 00m 01~11s : J.S.T
Subevent E2	12h 00m 22~40s : J.S.T

Fig.3 Locations of the source area and observation sites

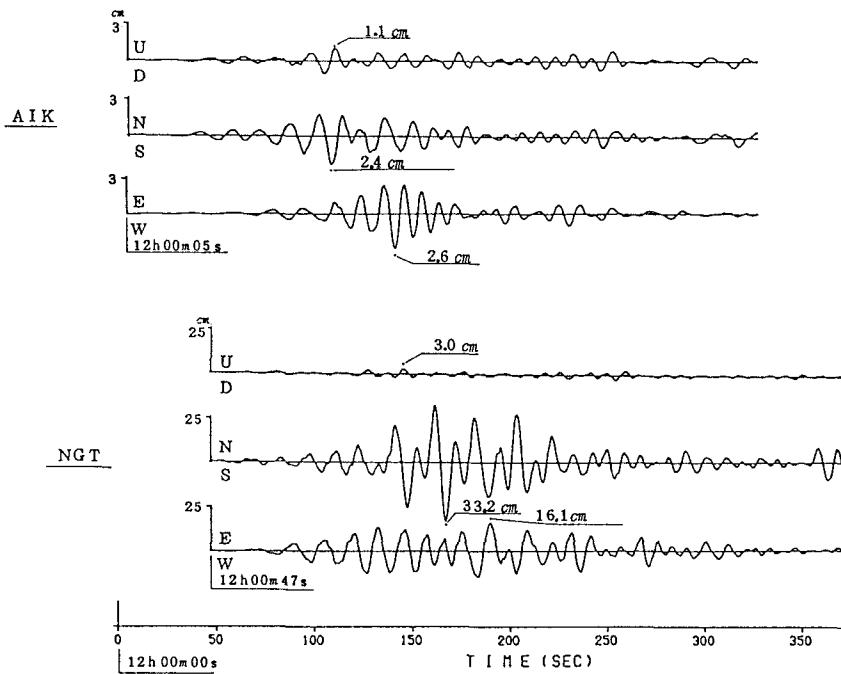


Fig.4 Corrected displacement records at Aikawa and Niigata by the J.M.A type displacement meters

秒以下のハイパスフィルターを通過させ比較を行った。SMAC記録の長周期のノイズについては慎重な取り扱いが必要であるとされている。¹⁶⁾ 即ち一般にはフーリエスペクトル上に基線のゆらぎに關係する $1/f$ のノイズ(f は振動数)が混入しているが、同文献に示される日本海中部地震の秋田のSMAC記録のように周期10秒の振幅が6gal程度(変位振幅換算15cm相当)あり、かつドリフトに十分注意を払う場合、時刻歴波形上の記録は信頼できると理解される。Fig. 5に示される如く両者の波形は主要動部で良い一致を示しており、修復された変位記録は少なくとも周期15秒より短周期側においては十分な信頼性を有しているものと判断される。

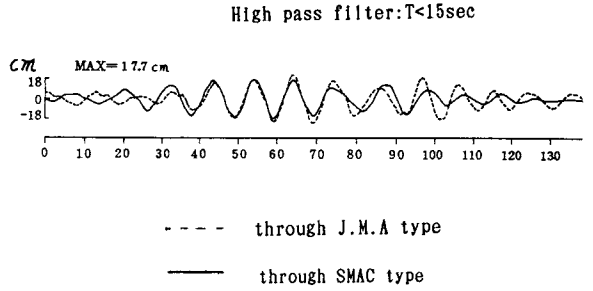


Fig.5 Displacement record through J.M.A type displacement meter and integrated displacement record through SMAC type accelerometer.

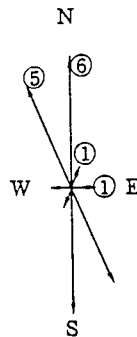
3. 1 変位記録の軌跡

Fig. 6 (a)に相川における平面内の変位軌跡図を20秒間隔で示す。時刻85秒から125秒の間ではNS方向の振動が卓越している。鉛直面内の軌跡図とも見比べると時刻85秒から125秒の間にレイリー波の主要動が到着している。時刻125秒から165秒の間ではEW方向の振動が卓越しており、ラブ波の主要動が到着している。Fig. 6 (b)に鉛直面内の軌跡図を示す。時刻105秒から時刻185秒の間レイリー波の特徴である反車輪回転の軌跡が読み取れる。時刻105秒-125秒では最大の振幅を示しており、この時間における鉛直振幅と進向方向水平振幅の比は1:1.9となっている。

Fig. 6 (c)に新潟における平面内の変位記録の軌跡図を示す。主要動に先立つ時刻107秒から147秒の間においては概ね円形状の軌跡を画く

この時刻においては東西と南北方向の2方向の振動が位相差を持って伝播し重なったものと考えられる。時刻147秒から207秒の約60秒間で最も振幅が大きくなり、その振幅の卓越振動方向は南北および $N30^{\circ}W$ 方向である。この $N30^{\circ}W$ 方向の変位振幅は両振幅66cmにも達する大振幅となっている。

Fig. 7に新潟での浮屋根式円筒型原油タンクのスロッシングの油痕の調査に基づく振動方向調査結果¹⁷⁾を示す。スロッシング1次固有周期8.5秒~11.0秒、かつスロッシング波高2m以上であったタンク13基の内、6基は南北方向、5基は北北西-南南東方向であり、南北から北北西にかけての方向の振動が卓越するという今回の軌跡分析と整合している。



○ : Numbers of Tanks

predominant direction of sloshing	Numbers of tank
North-South	6
N.N.W-S.S.E	5
N.N.E-S.S.W	1
East-West	1
Total numbers	13

*) Tanks with sloshing height more than 2.0 meters and fundamental sloshing period between 8.5 sec and 11.0 sec are selected

Fig.7 Predominant direction of sloshing after the investigation of crude oil traces of tanks

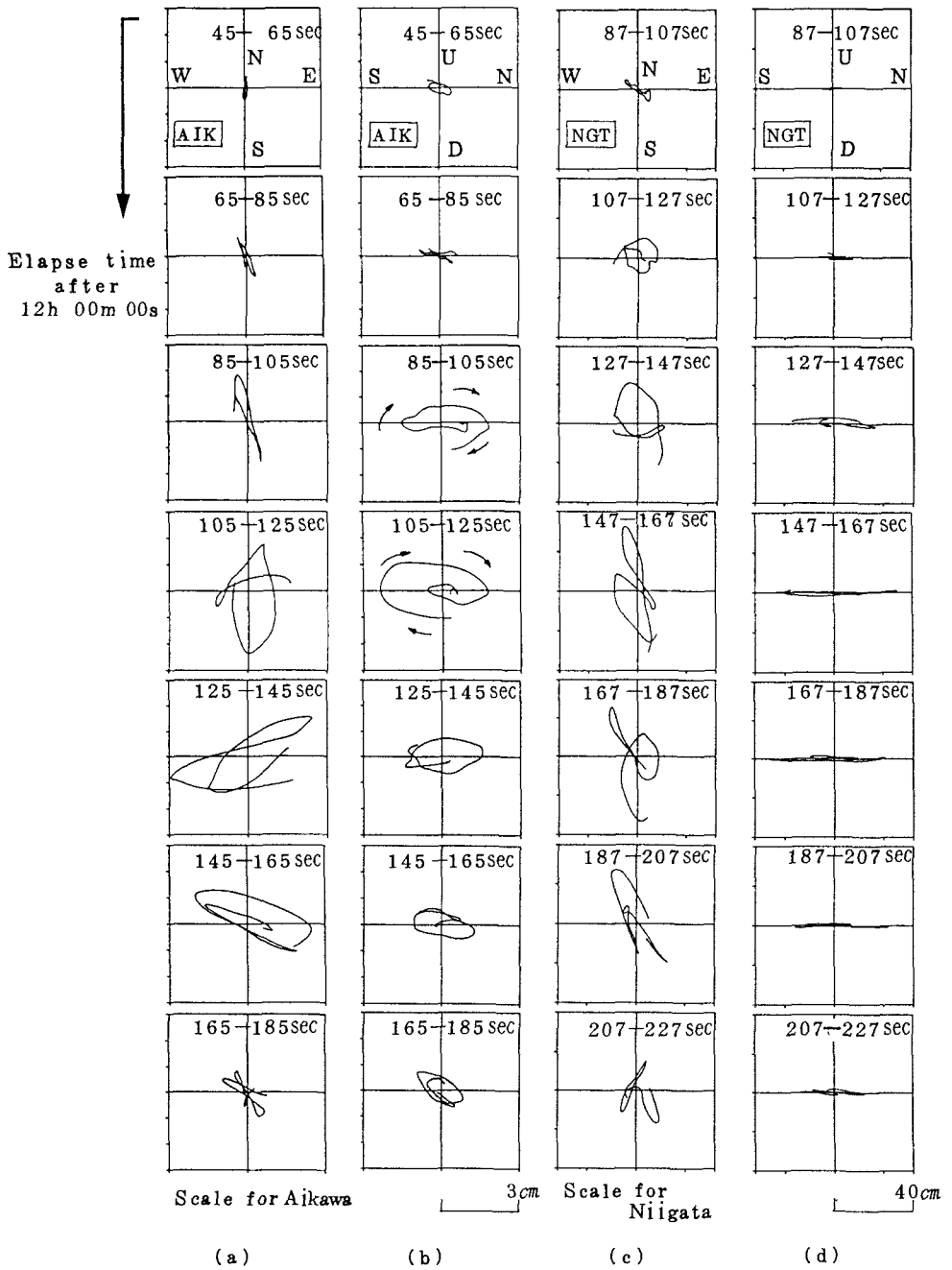


Fig.6 Particle orbits in the vertical plane and horizontal plane

Fig. 6 (d) に新潟での鉛直面内の変位軌跡図を示す。NS方向に振幅が大きい時刻147秒から207秒の間においても鉛直変位は水平変位に比べ極めて小さく、このことから新潟のNS成分が震源から伝播するレイリー波に励起された波動と考えるよりも他の波動の伝播の可能性の余地が示される。

3. 2 非定常スペクトルによる波群の分析

Fig. 8 にマルチフィルター法¹⁸⁾ による波動の分析結果を示す。横軸は時刻軸 t 、縦軸は周期軸 T を表わす。Fig. 8 (a), (b), (c) に示す相川の非定常スペクトルにより以下の知見が得られる。UD, NS はほぼ似た非定常スペクトルの形状を示しており、震源での3つの多重震源に対応する3つの波群が識別される。Fig. 8 (c) に示すEW成分の第1波群には極めて明瞭な分散性のパターンが読み取れる。図中に示す黒点はラブ波の基本モードの理論分散曲線から求まる波群の到着時刻を示すものであり、周期20秒から9秒の間の観測値と概ね合致する。理論分散曲線の計算に当っては震源と相川間の平均地層モデルをFig. 9およびTable2のように設定する。Fig. 9およびTable2の層厚および物性値は工藤¹⁹⁾ が震源と新潟の平均地層モデルとして同定した値を基本モデルとし、ここでは第2層の V_s 値を工藤の $V_s = 1.2 \text{ km/s}$ から今回の観測値と合うよう $V_s = 1.35 \text{ km/s}$ に変更して用いる。

Fig. 8 に示す新潟における非定常スペクトルの結果から以下の知見が得られる。

- ① 新潟の非定常スペクトル値 $G(t, T)$ が最大となる時刻は相川UDの110秒、NSの105秒、EWの142秒に比べ、新潟UDで148秒、NSで172秒、EWで140秒となり、概ね30秒ないし40秒遅れている。これは、新潟の主要動が伝播速度の遅い堆積盆地の影響を受けた波動であることを示している。
- ② NS成分の非定常スペクトルでは周期9秒から11秒のところに振動エネルギーが集中しているように見受けられる。一方、EW成分では5つの波群が識別することが出来る。これは異なる経路を通過して次々に波群が到来する様子を示しているものと思われる。

前節で示した軌跡図と非定常スペクトル解析の考察を総合すると相川NSおよびUDの主要動はレイリー波であり、相川EWの主要動はラブ波であると判断される。一方、新潟の水平動の特徴として、相川に比べ約30~40秒の時間遅れが見られることおよび複数の波群に分れて波動が到着することなどのように堆積盆地の影響を強く受けたものであることが理解される。

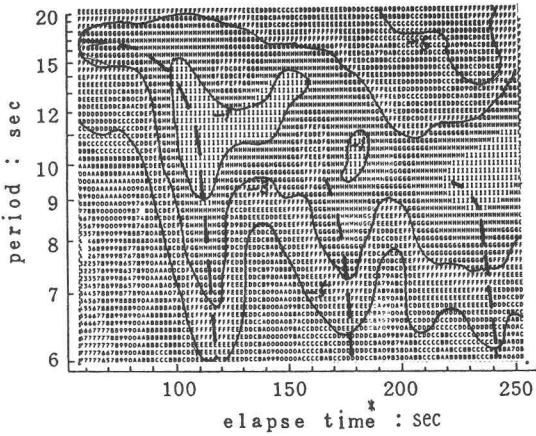
Fig. 10 に相川と新潟の変位波形のフーリエスペクトルを示す。フーリエ振幅の大きさを相川と新潟で比較すると新潟NS, EWは相川NS, EWの概略10倍の振幅となっている。一方で、各スペクトル図の極大および極小となる周期を詳細に比較すると以下の興味深い知見が得られる。即ち、相川EW, 新潟NSは共に周期10秒のところに最大振幅をもつこと。相川NS, 新潟EWは共に周期15秒前後で振幅が最大もしくは極大となり、周期10秒では振幅が極小値となること。以上のフーリエスペクトルのピーク周期の対応関係より、周期特性からみると新潟NSは相川EWと相関が高く、新潟EWは相川NSと相関が高いことが示される。

4. 表面波の伝播経路に関する検討

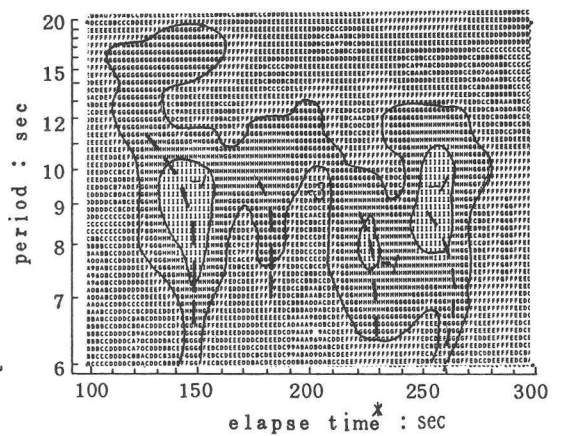
4. 1 波線追跡法による解析

地震学で震源パラメータの同定に用いる周期200秒前後のマントル表面波はマントル構造が水平方向にはほぼ一様構造とみなせるので直進するとされている。一方、本節で対象とする周期10秒前後の堆積盆地構造と関連する表面波は堆積層の厚さに応じてその位相速度が変わり、その伝播方向も堆積盆地の構造の影響を受けることが予想される。

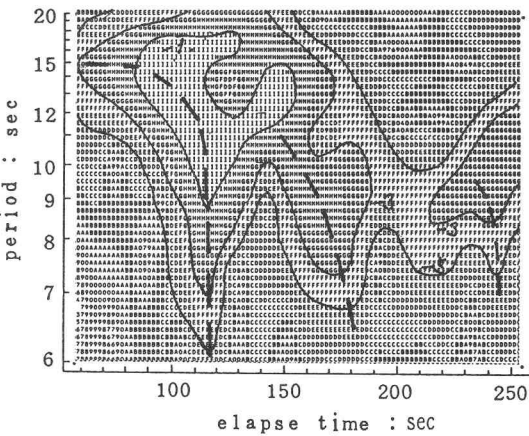
今回、新潟堆積盆地を対象としてラブ波の波線追跡を以下に試みる。具体的な計算は以下の手順に従うものである。²⁰⁾



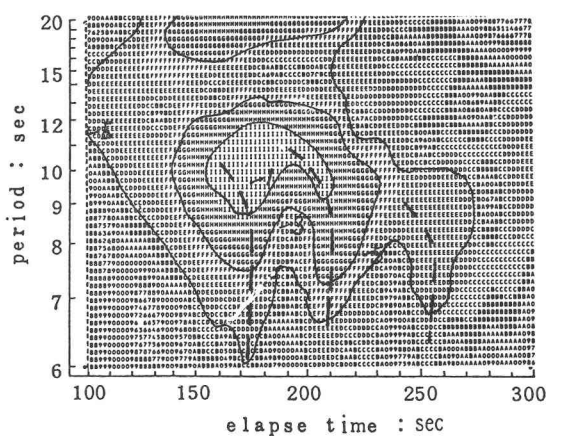
(a) AIK UD



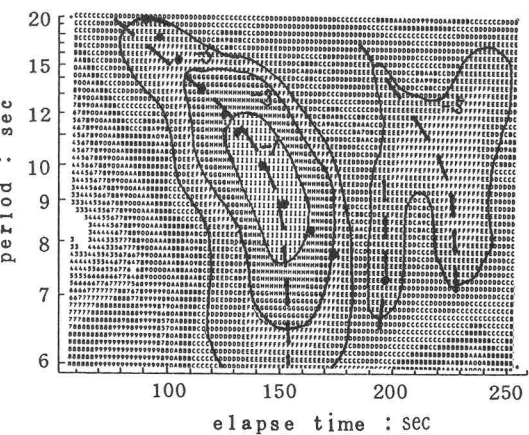
(d) NGT UD



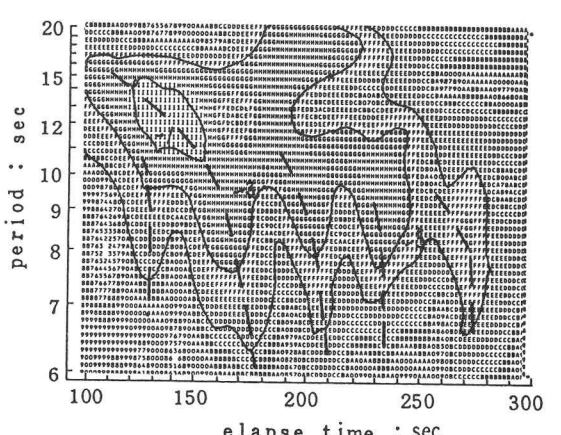
(b) AIK NS



(e) NGT NS



(c) AIK EW



(f) NGT EW

The dotted lines show peak values of spectrum

Numbers show spectrum intensity in dB scale

* Elapse time after 12h00m00s

Fig.8 Multiple filter analysis

Table 2 An average structure model
between source and Aikawa

No.	Vp:km/sec	Vs:km/sec	γ :t/m ³	Thickness:km
①	1.5	0.0	1.0	1.0
②	2.5	1.35	2.2	2.5
③	5.9	3.4	2.6	8.6
④	7.0	3.9	2.9	10.0
⑤	8.2	4.5	3.3	∞

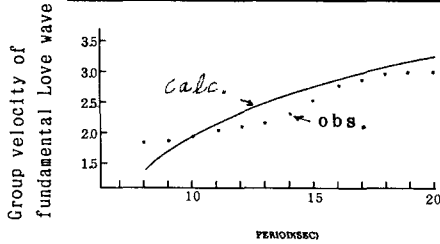


Fig.9(b) Group velocity of
fundamental Love wave

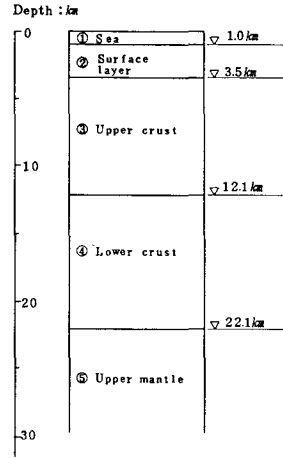
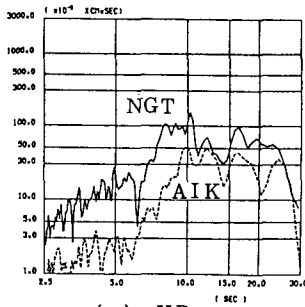
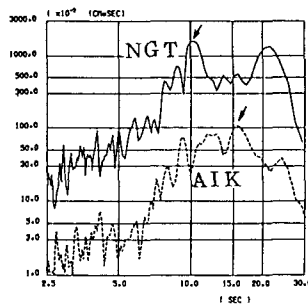


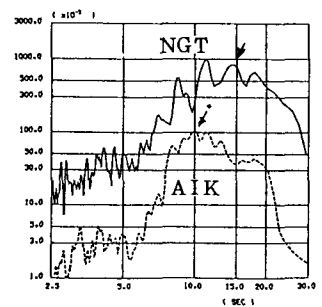
Fig.9(a) An average structure model
between source area and Aikawa



(a) UD



(b) NS



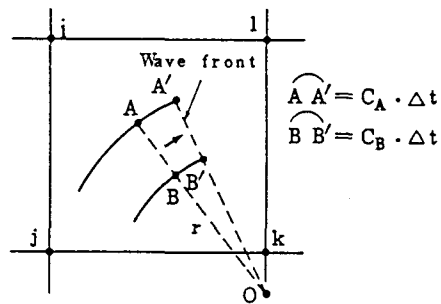
(c) EW

Fig.10 Fourier spectra at Aikawa and Niigata

- (1) 計算対象とする平面領域を格子に分割する。
- (2) 各格子の土柱モデルについて平行層モデル理論によりラブ波の基本モードに相当する位相速度を求める。
- (3) 分布位相速度場における波線追跡手法 (Fig. 11参照) により波線と波面の追跡を行なう。

具体的には Fig. 13に示す東西57km, 南北86kmの平面領域について東西27要素, 南北39要素の格子に分割する。次に各格子点の堆積層の厚さを読み取り、堆積層厚2.5 kmから7 kmの土柱モデルについてラブ波の基本モードの位相速度を計算する。今回用いた地層構造をTable 3 およびFig. 12(a)に示す。Fig. 12(a)において、マントル、地殻上部および地殻下部の深度及び物性値は吉井ら²¹⁾の爆破振動探査の結果を参照したものである。堆積層は第4紀層と新第3紀層の2層構造で代表させるものとする。全格子点での第4紀層の層厚を与えるデータは不十分であるのでここでは堆積層厚の1/4を第4紀層、残り3/4を新第3紀層から成るものと仮定する。この比率は新潟堆積盆地の平均的な層厚比²²⁾を参照したものである。

Fig.12(b)に堆積層厚 2.5kmから 7kmに対応する周期10秒のラブ波の基本モードの位相速度を示す。Fig. 12(b) より堆積層厚 6 kmでは表面波の位相速度は1.16km/sに低下するが、堆積層厚を 7kmとしても位相速度は1.05km/sにわずかに変化するだけであり、基盤深度6~7kmの不明確さが今回の解析結果に与える影響は小さいものと判断される。



CA, CB : Phase velocity of point A and B
 Δt : Time increment

Fig.11 Ray tracing scheme in medium with slowly varying velocity

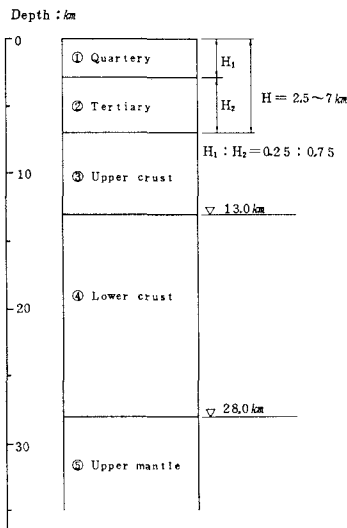
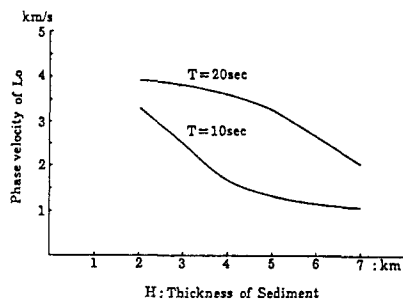


Fig.12(a) A structure model of Niigata sedimentary basin

Table 3 A structure model of Niigata sedimentary basin

No.	Vp;k/m/sec	Vs;k/m/sec	γ :t/m ³	Thickness;km
①	2.0	0.7	2.0	H1
②	2.5	1.35	2.2	H2
③	5.9	3.4	2.6	13.0-(H1+H2)
④	7.0	3.9	2.9	15.0
⑤	8.2	4.5	3.3	∞



(b) Phase velocities versus thickness of sediment in Niigata sedimentary basin

4. 2 波線追跡による波動伝播経路の検討

前節までの検討により、新潟で記録された大きい変位振幅は新潟での堆積層の影響を強く受けたローカルな波動であることが推定された。新潟堆積盆地における地震観測データは関東平野等に比べると少なく、その堆積盆地の増幅メカニズムに関する既往の研究も少ない。そこで、ここでは既往の関東平野の堆積盆地におけるローカル表面波の発生機構に関する以下の知見²³⁾を参考にする。

すなわち、関東平野の南西部から中央部に至る地域では、伊豆大島近海地震の前震、長野県西部地震等の観測記録の分析および数値解析により周期8秒前後のやや長周期地震動の主成分がラブ波タイプの表面波であることが示されている。これらの研究では、関東平野の内部で観測されるやや長周期地震動の主成分が

基本的には同地域に存在する厚い堆積層によって励起された表面波であること、その発生機構については地震波が平野の外縁部から到達した後に堆積層内を水平に伝播しながら振幅や継続時間を増大させ次第に表面波としての性格を整えてくる過程が明らかにされている。

本研究においても、新潟で観測された周期10秒前後の波動はその大きな増幅度から見て堆積層内で増幅または励起された表面波であろうと考え、その伝播経路を波線追跡法により検討する。Fig. 13(a) に示す波線追跡結果について考察を加えると次の通りである。

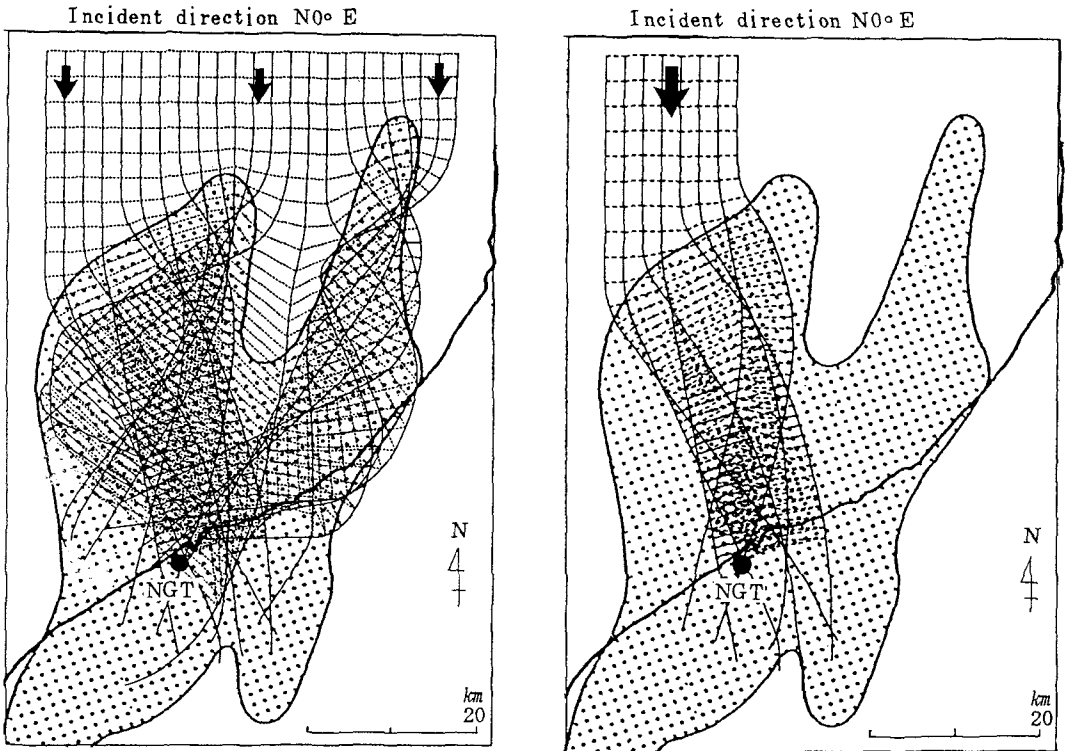


Fig.13(a) Result of ray tracing along the two channels

☐ : Area with basement depth deeper than 4km

(b) Result of ray tracing along the northwestern channel

① 全体的に見て、堆積盆地の形状を反映して新潟市近傍に波線が集中する傾向が見られる。これは新潟における大変位振幅と関連するものと思われる。

② 北東側谷筋に南方向に入射した波動は谷筋にトラップされる形で方向を変え、新潟に対して北東方向から入射している。これは新潟におけるNS成分の大振幅を解釈するうえで重要であると考えられる。

特に大きく方向を変える地点はFig. 2(a)のA-A断面にほぼ相当する地点であり、第四紀および新第三紀の堆積層が東西約20kmに渡って西下り約20度の傾斜基盤上に広がっている地点である。ここでの堆積層厚は6km以上となっている。

③ 北西側谷筋に南方向入射した波動はあまり方向を変えることなく、新潟においてもほぼ南方向へ入射している。

北西の谷筋の影響

新潟市において南北方向の振動が卓越した要因として北西の谷筋からの波線の合流を検討してみる。北西の谷筋に真北から入射する波動の波線追跡結果をFig.13(b)に示す。堆積層外縁での南北方向の波線は新潟市付近では概ね南方向に進む波線となっており、新潟での南北あるいは $N30^{\circ}W$ 方向の卓越振動に対応する入射波は堆積層外縁部におけるレイリー波となる。一方、新潟市における南北方向の卓越周期は約10秒前後であり、相川で記録されたラブ波およびレイリー波を新潟堆積盆地への入射波とみなすとその卓越周期が各々約10秒と13秒であったことから、新潟のNS成分についてはレイリー波の伝播と関連する北西方向の谷筋の影響は相対的に北東方向の谷筋に比べ2次的なものであったと推定される。

5. 考察および結論

新潟における卓越振動方向は $N30^{\circ}W$ であった。ここでは、この波動の主たる生成伝播過程をFig.14のように推論する。

① 震源方向よりラブ波が新潟盆地に入射する。

② 入射波が東北方向の傾斜基盤上の堆積層のローカルな表面波を励起する。励起されたローカルな表面波は谷筋に沿って西向きに伝播する。

以上の観点より、入射波としての相川EWと堆積盆地のローカルな表面波としての新潟NSを対比してFig. 15に示す。

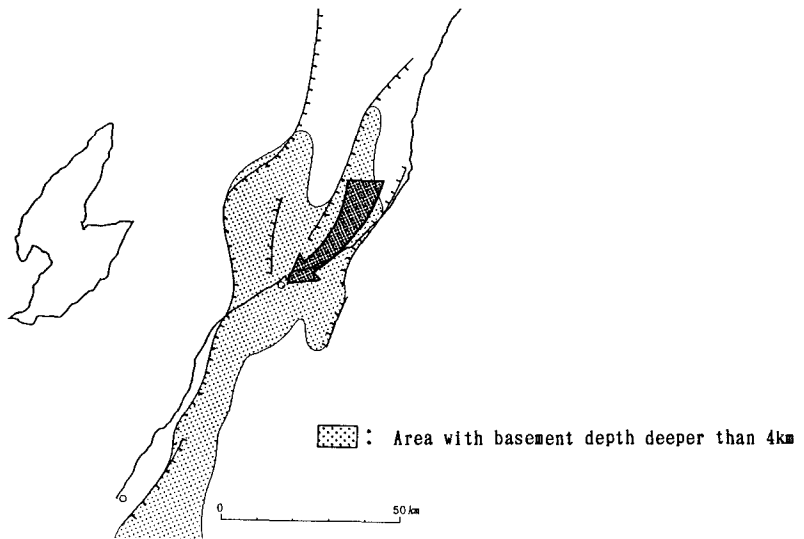


Fig.14 Estimated path of local Love wave in Niigata sedimentary basin

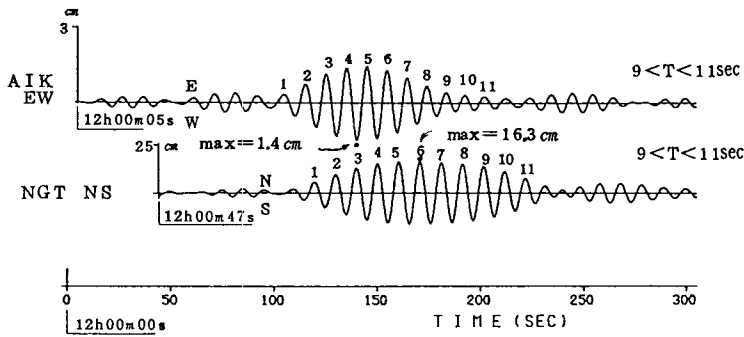


Fig.15 A ground motion at Niigata showing amplification, time delay and dispersion with the propagation in the deep sedimentary basin

両者の波形とも最も卓越する周期10秒前後の成分のみを取り出している。同図より、最大振幅は相川の1.4 cmから新潟の16.3cmへ約12倍へ増幅すること、振幅最大となる時刻が相川の143 秒から新潟の173 秒となり遅れが生じること、相川では第5波以降の波が比較的にすみやかに減衰するのに対し新潟では第5波以降の後続の波の振幅が相対的に優勢であることなどが特徴として挙げられる。

次に相川と新潟の振幅最大となる時刻差より、堆積盆地での周期10秒に対応する平均群速度を次式により試算する。

$$\Delta t = \frac{L}{U_1} - \frac{L}{U_2}$$

ここに Δt : 相川と新潟の振幅最大となる時刻差

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 173\text{sec} - 143\text{sec} \approx 30\text{sec} \quad (\text{Fig. 15より})$$

L : 堆積盆地北東の谷筋の中央部から新潟市までの距離 ($\approx 40\text{km}$)

U_1 : 堆積盆地内の平均群速度

U_2 : 堆積盆地外の平均群速度 ($\approx 2.0\text{km/s}$, Fig. 9(b)参照)

上式より比較的足の遅い堆積層内の平均群速度として $U_1 = 0.8\text{km/s}$ が得られる。

本研究によって得られた知見を以下に要約する。

- (1) 石油資源探査を目的とする地質調査データを整理し、やや長周期地震動を対象とする新潟堆積盆地の3次元的地震基盤面形状を推定した。この結果、新潟の北方には逆断層に囲まれた大規模な2つの溝状の堆積層が存在することなどが明らかとなった。
- (2) 堆積層の影響の少ない相川の記録と堆積層上の新潟の記録の対比分析および波線追跡による数値解析により、日本海中部地震において新潟で観測された南北方向の大きな地動変位は震源より伝播するラブ波が堆積盆地のローカルな表面波を励起したものである可能性を示した。

謝辞 気象庁1倍強震計のデジタルデータは鳥取大学 社会開発システム工学科 野田茂 助教授より借用したものです。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 岡田成幸・鏡味洋史：日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み，日本建築学会論文報告集，第267号，昭53年5月
- 2) 土木学会編：1983年日本海中部地震 震害調査報告書，土木学会，pp.891~892，1986
- 3) 野田茂ほか：日本海中部地震時の気象庁1倍強震計記録に基づく周期10秒前後の地震動特性，京都大学防災研究所年報，第28号，1985.4
- 4) 家村浩和・野田茂ほか：タンクのスロッシングおよび地震気象からみた長周期地震動の特徴，土木学会論文報告集，第362号/I-4，1985.10
- 5) 瀬尾和夫：1983年日本海中部地震における石油タンクのスロッシング現象について；1983年日本海中部地震による災害の総合的調査研究，文部省科学研究費自然災害特別研究突発災害研究成果，No.58022002，1984
- 6) 工藤一嘉：深い地盤による長周期地震動の卓越-1983年日本海中部地震による新潟での石油溢流，長周期地震動強さに関して-，第12回地盤振動シンポジウム資料集，日本建築学会，1984.6
- 7) 井上涼介ほか：気象庁変位強震計記録の数値化と解析，(I)-1983年日本海中部地震および比較的古い地震を対象として-，長周期(約2~20秒)地震動の工学的特性に関する総合研究，昭和59年度科学研究費(総合研究A)研究成果報告書，1985.3
- 8) 松田時彦他：日本の地質，岩波書店，p.150，1980年2月
- 9) 新潟県：新潟県地質図説明書，p.290，昭和52年3月
- 10) 天然ガス鉱業会：日本の石油・天然ガス資源，p.185，1982
- 11) 植村・山田：日本の地質4，中部地方I，共立出版，p.66，1988
- 12) 鈴木宇耕：日本海東部新第三系堆積盆地の地質，地質学論集，第32号，1989年3月
- 13) 佐藤良輔編著：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，pp.357~369，1989
- 14) 山田善一・野田茂・嶋田三朗・吉田隆治：振り切れた1倍強震計記録の修復波形による長周期応答スペクトル，土木学会論文集，No.386/I-8，1987年10月
- 15) 工藤一嘉・坂上実：1983年日本海中部地震による石油タンク被害と地震動の特徴について，B.E.R.I., Vol.59, p.370，1984
- 16) 土岐・中瀬：強震記録における長周期成分の信頼度に関する研究，京大耐震研究報告，No.86-1，1986-5
- 17) 前出 2)
- 18) DZIEWONSKI, A., S. BLOCH and M. LANDISMAN : A technique for the analysis of transient seismic signals. Bull. Seism. Soc. Amer., 59, 427-444, 1969
- 19) 前出 15), p.375
- 20) V.I. KEILIS-BOROK : Seismic Surface Waves in a Laterally Inhomogeneous Earth, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, pp.107 ~110, 1989
- 21) Yoshii, T. and S. Asano : Time-term analyses of explosion seismic data. Jour. Phys. Earth, 20, 47-57, 1972
- 22) 前出 11), p.66
- 23) 瀬尾和夫他：長大構造物の耐震安全性に関わるやや長周期地震動の発生機構に関する研究，昭和63年度 科学研究成果報告，p.23，1989年3月

(1989年10月2日受付)