

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1022 June 2002

羽田空港の地震動特性に関する研究
(第1報) 表面波の特性

野	津	厚
安	中	正
佐	藤	陽
菅	野	高

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. 研究の背景と目的	4
2. 新A滑走路の地震観測の概要	6
3. 解析対象記録	18
3.1 解析対象地震	18
3.2 解析対象記録	18
4. 解析手法	25
4.1 非定常スペクトル	25
4.2 F-K解析	27
5. 解析結果	33
5.1 表面波の伝播方向	33
5.2 表面波の位相速度と波長	36
6. 地震応答計算における位相差の与え方の提案	37
7. 結論	38
8. あとがき	38
謝辞	39
参考文献	39

Characteristics of Ground Motions Observed at Haneda Airport (First Report) Characteristics of Surface Waves

Atsushi NOZU*

Tadashi ANNAKA**

Yoko SATO***

Takahiro SUGANO****

Synopsis

Earthquake ground motions have been observed at the New A Runway, the Sky Arch, the New B Runway and a railroad tunnel at Haneda Airport. The Port and Airport Research Institute have been in charge of collection and analyses of the data. Through the analyses of the data, the authors would like to retrieve a wide range of technical information which would play a vital role in the future construction of facilities not only at this particular airport but also at other airports which are located on soft soil layers.

In the present technical report, as the first step of the research, the authors investigate the basic characteristics of surface waves (back azimuth, phase velocity and wave length) at this particular airport. These characteristics have significant effects on the seismic performance of long structures such as runways, submerged tunnels and pipelines because the ground motions acting on various parts of a long structure show phase difference, which is mainly due to the transmission of surface waves in case without significant horizontal heterogeneity. In the present report, F-K analysis is applied to the array records at the New A Runway to examine the characteristics of surface waves.

As a result of the analyses, it was revealed that the phase velocity of the fundamental-mode Love wave, which has the shortest wave length among various surface waves here at Haneda Airport and hence which is the most dangerous from the structural safety point of view, is approximately 400m/s at the period of one second and approximately 750m/s at the period of 3 seconds. Accordingly, its wave length is approximately 400m at the period of one second and approximately 2250m at the period of 3 seconds. It should be noted that these values may become even smaller if the ground show a non-linear behavior during large earthquakes. The observed dispersion curve agrees well with the theoretical one obtained from a subsurface structure based on conventional articles.

Keywords: Haneda Airport, ground motion, surface wave, wave length, phase velocity,
subsurface structure

* Senior Researcher, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Advanced Engineering Department, Tokyo Electric Power Services Co., LTD.

*** STA Core Research Project Assistance Fellow

**** Chief of Structural Dynamics Division, Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka 239-0826, Japan

Phone: +81-468-44-5058 Fax: +81-468-44-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

羽田空港の地震動特性に関する研究 (第1報) 表面波の特性

野津 厚*
安中 正**
佐藤 陽子***
菅野 高弘****

要 旨

東京国際空港(羽田空港)では新 A 滑走路, スカイアーチ, 新 B 滑走路および鉄道トンネルに地震計を設置して観測を行っており, 当研究所は記録の収集・整理と解析を担当している. 記録の解析を通じて, 当該空港のみならず広く軟弱地盤上における空港施設整備において有用となる情報を引き出し, とりまとめて行きたいと考えている.

ここでは, 一連の研究の最初のものとして, 新 A 滑走路に展開された地震計群列(アレー)の記録を利用し, 地震波の一種である表面波の基本的な特性(伝播方向, 位相速度, 波長)を明らかにする. 表面波の特性を知ることは, 滑走路, 沈埋トンネル, 埋設パイプラインなど線状構造物の耐震性を議論する際には極めて重要である. なぜなら, 線状構造物の各部分に作用する地震動は位相差をもっており, その位相差は水平成層とみなせる地盤では主に表面波に起因すると考えられるからである. このとき, 表面波の振幅が同じであれば, 波長が短いほど構造物にとって厳しい条件となる. 表面波の特性は場所毎の地下構造を反映して著しく異なることが知られている. 従って, 原位置での表面波の特性をアレー観測の結果に基づいて明らかにすることが望ましい. ここでは新 A 滑走路のアレー観測結果に F-K 解析を適用して, 当該空港における表面波の特性を明らかにする.

解析の結果, 羽田空港を伝播する表面波のうち, 最も波長の短いラブ波基本モードの位相速度は, 周期 1 秒で約 400m/s, 周期 3 秒で約 750m/s であることがわかった, また, 波長については, 周期 1 秒で約 400m, 周期 3 秒で約 2250m であることがわかった. これらの値は地盤が線形に近い状態での値であることに留意する必要がある. 観測で得られた表面波の分散曲線(位相速度と周期の関係)と, 既往の文献に基づいて設定した当該空港の深部地下構造モデルによる理論分散曲線とは良い一致を示す.

キーワード: 羽田空港, 地震動, 表面波, 波長, 位相速度, 深部地下構造

* 地盤・構造部主任研究官

** 東電設計(株)技術開発本部

*** 科学技術庁重点研究支援協力員

**** 地盤・構造部構造振動研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1

電話: 0468-44-5058 Fax: 0468-44-0839 e-mail: nozu@pari.go.jp

1. 研究の背景と目的

東京国際空港（羽田空港）では新 A 滑走路，スカイアーチ，新 B 滑走路および鉄道トンネルの 4 施設に地震計を設置して観測を行っており，当研究所は記録の収集・整理と解析を担当している．最も早く観測を開始した新 A 滑走路では観測を開始してからすでに 14 年が経過しており，204 の地震が記録されている．また，他の施設でもこれに次ぐ数の記録が得られている．これらの記録の解析を通じて，当該空港のみならず広く軟弱地盤上における空港施設整備において有用となる情報を引き出し，とりまとめていきたいと考えている．

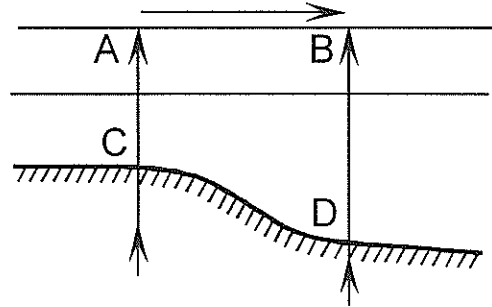
ここでは，一連の研究の最初のものとして，新 A 滑走路に展開された地震計群列（アレー）の記録を利用し，地震波の一種である表面波の基本的な特性（伝播方向，位相速度，波長）を明らかにする．ここにアレーとは多数の地震計を密に組織的に配置して同時観測を行うシステムのことであり，アレー観測は，地震動が空間的にどのように分布しているか，地震波がどのように伝播しているかなどを明らかにするのに適している．

表面波は地表面に沿って水平方向に伝播する性質を有しており，その振幅は一般には深さとともに減少する．表面波にはレイリー波とラブ波の 2 種類がある．レイリー波は運動学的には海の波に似ているところもあり，進行方向ベクトルを含む鉛直面内において，粒子軌跡は円または楕円を描く（表-1）．一方，ラブ波の場合，進行方向ベクトルを含む鉛直面に対して，粒子軌跡は直交する（表-1）．関東平野や大阪平野など基盤が盆地状に落ち込んでいる場所（堆積盆地）では，震源から盆地端部に実体波が入射すると，表面波が生成され，堆積盆地内を伝播する．これは盆地生成表面波と呼ばれる．生成した表面波は反対側の盆地端部で反射され盆地内を行き来することがある．この場合，堆積盆地内の地震動継続時間が著しく長くなることが知られている（例えば川瀬，1993）．

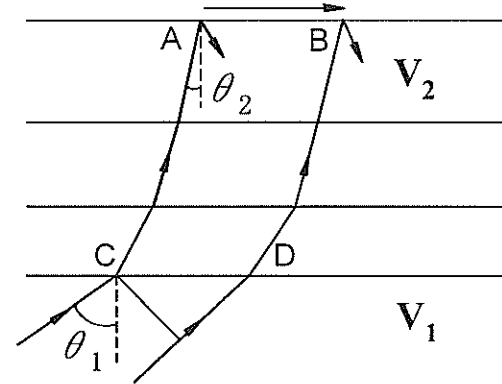
表面波の特性を知ることは，滑走路，沈埋トンネル，埋設パイプラインなど線状構造物の耐震性を議論する際には極めて重要である．なぜなら，地表に沿った相異なる二点間の相対変位が線状構造物の耐震性にとっては重要であり，表面波は相対変位の主要な要因の一つであるからである．

地表に沿った相異なる二点間の相対変位の要因としては図-1に示すように次の 3 者が考えられる（清宮他，1983）．

①表層地盤の土質条件が場所毎に異なる場合



②表層地盤へ実体波が斜めに入射する場合



③表層地盤を表面波が伝播する場合

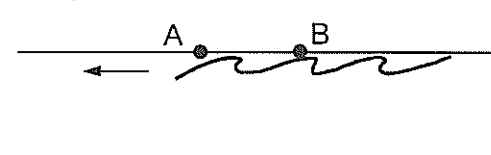


図-1 地表に沿った相異なる二点間の相対変位の要因

①表層地盤の土質条件が場所毎に異なるとき，表層地盤へ鉛直下方から実体波が同時に入射しても，表層地盤を通して実体波が地表面に到達する時間が場所毎に異なるので，相対変位が生じる．

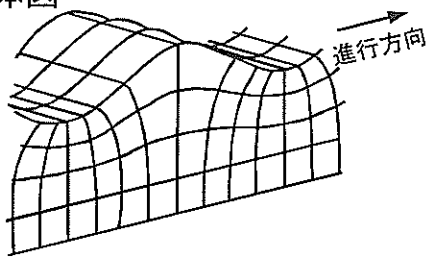
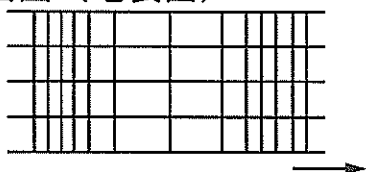
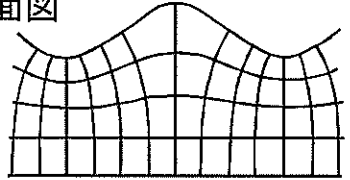
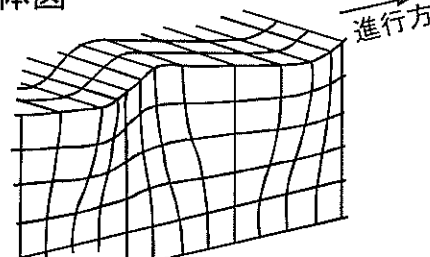
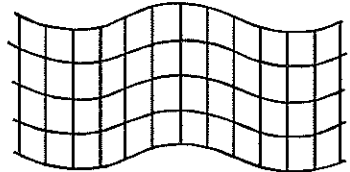
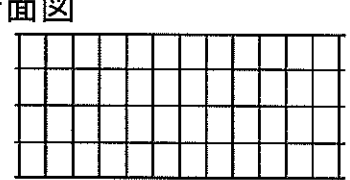
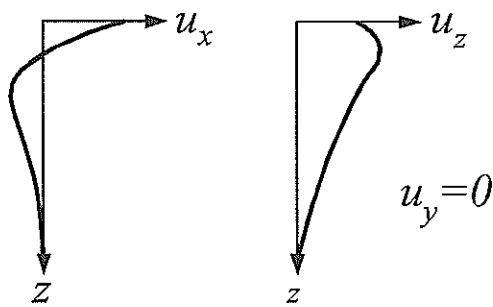
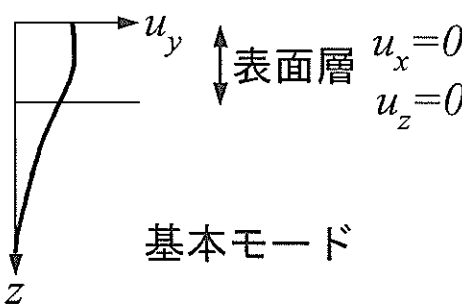
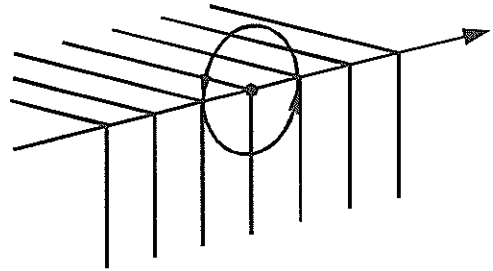
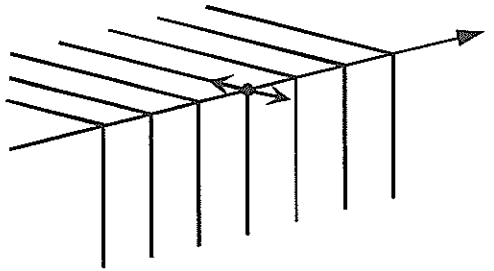
②表層地盤が仮に水平方向に一律であっても，表層地盤を实体波が斜めに伝播するとき，地震波が地表面に到達する時間が場所毎に異なるので，相対変位が生じる．

③表層地盤を表面波が伝播するとき，地表面の相異なる二点間には相対変位が生じる．

これらの要因の相対的な重要性を，多少議論が前後することにはなるが，羽田空港の場合について簡単に見積もることとしたい．ここでは互いに 450m 離れた二つの観測点，すなわち No.2 地点と No.3 地点（2. 参照）について検討する．

まず①について検討する．2. で述べるように，羽田空港新 A 滑走路の No.2 地点と No.3 地点は工学的基盤の深度が 20m ほど異なる．鉛直下方から入射した S 波が

表-1 レイリー波とラブ波 - 土田・井合 (1991) の図 3.19 に加筆

	レイリー波	ラブ波
存在する地盤	半無限地盤もしくは水平成層地盤	水平成層地盤
変位分布	<p>立体図</p>  <p>進行方向</p> <p>平面図 (地表面)</p>  <p>断面図</p> 	<p>立体図</p>  <p>進行方向</p> <p>平面図 (地表面)</p>  <p>断面図</p> 
振幅分布 u_x, u_y, u_z : x, y, z 方向の 変位成分 x は表面波の進行 方向 z は深さ方向	 <p>u_x u_z</p> <p>$u_y = 0$</p> <p>振幅分布は地盤条件に依存. 図は半無限地盤の場合.</p>	 <p>u_y</p> <p>表面層 $u_x = 0$ $u_z = 0$</p> <p>基本モード</p> <p>振幅分布は地盤条件に依存.</p>
軌跡	 <p>回転の向きは地盤条件に依存.</p>	

工学的基盤から地表に到達するのに要する時間を PS 検層の結果から求めると、No.2 地点で 0.486 秒、No.3 地点で 0.419 秒、その差は 0.067 秒である。

次に②について検討する。基盤に入射する実体波は、震源の位置に応じて大きな入射角（図-1②）を有する場合があるかもしれない。しかし、羽田空港のように表層地盤が軟弱な場合には、実体波の入射角は地表に近づくにつれて次第に小さくなる。この効果はスネルの法則により簡単に評価することができる。いま、基盤における入射角を θ_1 、S 波速度を V_1 、地表における入射角を θ_2 、S 波速度を V_2 とすると次式が成立する。

$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} \quad (1)$$

ここで V_1 は 3000m/s 以上、 V_2 は 100m/s 程度と考えられる。また $\sin \theta_1$ は 1 より大きい値をとることができない。これらのことから

$$\sin \theta_2 < \frac{1}{30} \quad (2)$$

と評価できる。従って最表層においては S 波の伝播は鉛直に近いと判断される。仮に S 波が多少は斜めに伝播することがあるとしても、その場合の No.2 地点と No.3 地点の時間差は 0.15 秒を越えることはない。

最後に③について検討する。議論が前後することにはなるが、羽田空港を伝播する表面波のうち最も位相速度の遅いラブ波基本モードの位相速度は 5. で述べるように周期 1 秒付近では 400m/s である。従ってラブ波基本モードによる No.2 地点と No.3 地点の時間差は 1.1 秒程度である。

以上の検討結果から、当該空港においては、地表に沿った相異なる二点の相対変位の要因としては表面波の伝播が圧倒的に重要であること、表面波の特性を明らかにすることが滑走路、沈埋トンネル、埋設パイプラインなど線状構造物の耐震性を議論する上で必須であることがわかる。

一般に表面波の特性は場所毎の地下構造を反映して著しく異なることが知られている。従って、アレー観測の結果に基づき、原位置での表面波の特性を明らかにすることが最も望ましい。そこで、以下においては新 A 滑走路のアレー観測結果に F-K 解析を適用し、当該空港における表面波の基本的特性（伝播方向、位相速度、波長）を明らかにする。このうち波長は最も重要なパラメタの一つである。なぜなら、仮に振幅を一定として比較すれば、波長が短いほど地盤のひずみは大きくなり、構

造物にとっては厳しい条件となるからである。表面波の特性の同定は、アレー観測のデータの活用としては最も生産性の高いものの一つであると考えられる。

さて、羽田空港を伝播する地震波に関する既往の研究としては、旧 C 滑走路に設置されたアレーの記録を用いた土田他（1981, 1983）の研究がある。このうち土田他（1981）は、地表面を見かけ上伝播しているように見える地震波（表面波とは明言していない）の（見かけの）伝播速度は 1.2 ~ 10.1km/s、波長は 1.4 ~ 11.1km であるとしている。この結果は、当時の最新の観測成果に基づくものではあったが、現在の目から見ると当時の観測システムは必ずしも理想的なものとは言えず、結果にも観測システムの限界が表れている。すなわち、旧 C 滑走路のアレーは地表のものだけを見ると滑走路に沿った直線的な配置であり、現在新 A 滑走路に見るような十文字型の配置ではなかった。直線的なアレーの場合、アレーに対して平行に入射する表面波はよいが、アレーに対して斜めに入射する表面波の場合、波長を実際よりも長く評価してしまう性質があったと考えられる。現在羽田空港の新 A 滑走路に展開されているアレーは 2. で詳述するように十文字型のアレーであるから、旧 C 滑走路のアレーよりも表面波の波長の同定により適したものとなっている。

土田他（1983）の研究では、旧 C 滑走路の記録に対して主に鉛直方向への地震波の伝播の観点から解析を行っており、貴重な結果が得られているが、本研究と直接関わるところは必ずしも多くないので、ここでは説明を割愛させていただく。

2. 新A滑走路の地震観測の概要

新 A 滑走路では 1988 年 7 月の供用開始より地震観測を実施している。ここでは地震観測の概要を述べる。

図-2に観測システムの平面図を示す。同図に示すように新 A 滑走路では No.1 ~ No.8 の 8 地点で観測を行っている。No.1 ~ No.6 は滑走路に平行であり、No.7 と No.8 を結ぶ線分は滑走路に直交して、全体として十文字型のアレーを形成している。十文字の交点を原点とし、滑走路に平行に x 軸を（南向き正）、これと直交する方向に y 軸をとり（東向き正）、No.1 ~ No.8 の x 座標と y 座標を示したものが表-2である。なお、ここでは詳しく述べないが羽田空港では新 A 滑走路以外にもスカイアーチ（No.9, No.10）、新 B 滑走路（No.11 ~ No.13）および鉄道トンネル（No.14 ~ No.17）において観測を実

施している。それらの位置についても図-2に示している。

さて、新 A 滑走路の No.1 ~ No.8 の各々には複数の換振器が置かれている。No.1,2,3,4,6,8 の 6 地点には図-3に示すように深さの異なる 6 つのボアホールがある。各々のボアホールには地震計または間隙水圧計が設置されている。図-6に各ボアホールの観測上の機能を示す。同図に示すように、ボアホール A には基盤層の地震動を記録するための地震計が、ボアホール B には Ac2 層の地震動を記録するための地震計が、ボアホール D には As 層の地震動を記録するための地震計が、ボアホール F には地表付近の地震動を記録するための地震計が設置されている。また、ボアホール C,D,E には As 層の間隙水圧を記録するための間隙水圧計が設置されている。各々の計器の設置深度は表-3に示す通りである。

新 A 滑走路の No.5 地点では、図-4に示すようにボアホール A ~ F に加え滑走路と平行にボアホール G,H,I,J が設けられている。また No.7 地点では、図-5に示すようにボアホール A ~ F に加え滑走路と直交する方向にボアホール G,H,I,J が並んでいる。No.5 地点および No.7 地点のボアホール A ~ F の役割は他の地点と同じである(図-6)。No.5 地点および No.7 地点のボアホール G,H,I,J には地表付近の地震動を記録するための地震計が設置されている。地表付近の地震動を記録するための地震計はボアホール F にも設けられているが、これとは別にボアホール G,H,I,J に地表地震計を設置している目的は次の通りである。No.1 ~ 8 地点のボアホール F の地震計は互いに数 100m 離れている。したがって、こ

れらの地震計が構成するアレーは波長数 100m 以上の表面波を捉えるのには適している。しかし、波長数 100m 未満の表面波を捉えることには適していない。そこで、波長数 100m 未満の表面波を捉えるために、No.5 および No.7 地点のボアホール G,H,I,J に地表地震計を設置している。これらの地震計は互いに数 10m の間隔で設置されているから、波長数 100m 未満の表面波を捉えることに適している。

以上の地震計はいずれも東西、南北、上下の 3 成分を記録するものである。ただし、ボアホール内に設置された換振器の水平面内での設置方位は必ずしも正確でない場合があるので、データ使用に際しては設置方位に関する補正が必要である。これについては後述する。

表-2 新 A 滑走路の観測点座標 (単位 m)

観測点	x 座標	y 座標
No.1	2000	0
No.2	1500	0
No.3	1050	0
No.4	500	0
No.5	0	0
No.6	-550	0
No.7	0	-330
No.8	0	170

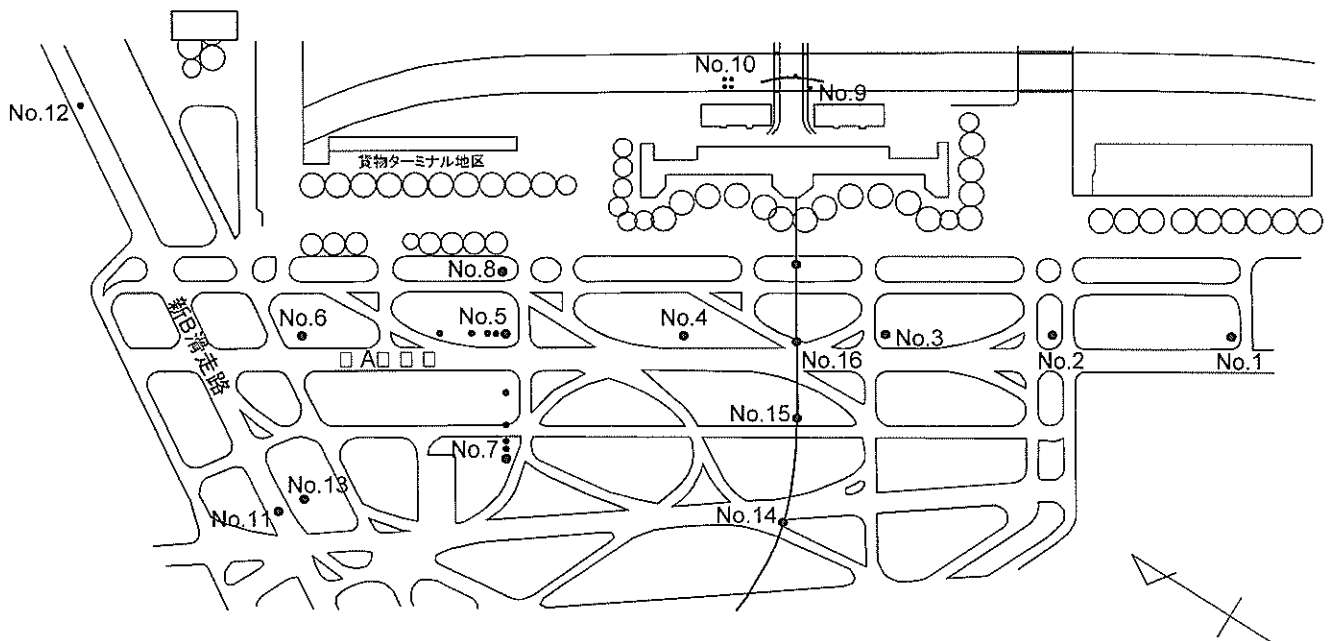


図-2 羽田空港地震観測平面図

No.1, 2, 3, 4, 6, 8 地点

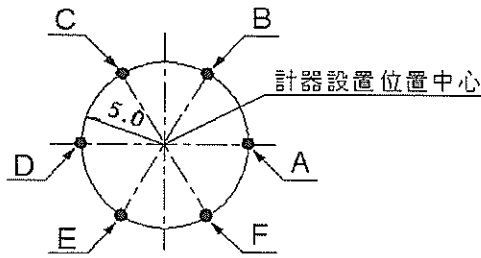


図-3 No.1,2,3,4,6,8 地点平面図

No.7 地点

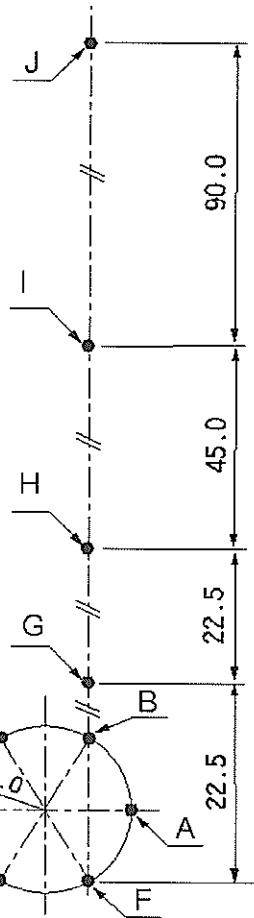
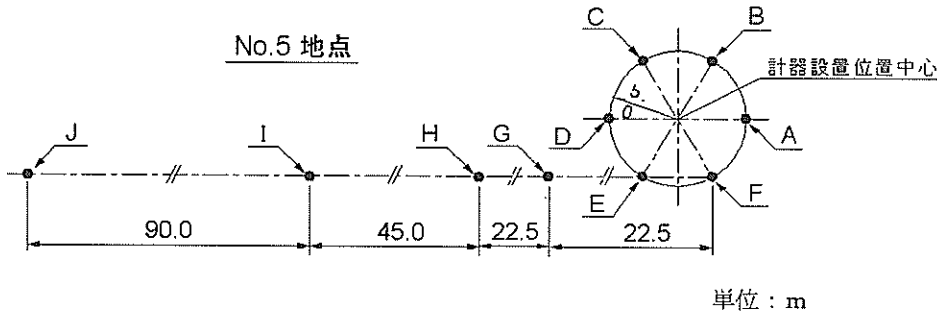


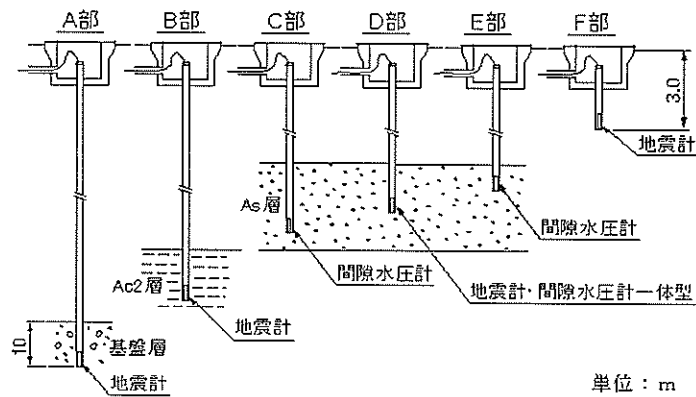
図-5 No.7 地点平面図

No.5 地点



単位：m

図-4 No.5 地点平面図



単位：m

図-6 ボアホール A～F の役割

表-3 地震計・間隙水圧計設置深度一覧

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
No.1	GL-85.20	GL-28.10	GL-16.30	GL-13.70	GL-11.10	GL-3.00	---	---	---	---
No.2	GL-84.70	GL-26.30	GL-13.60	GL-11.30	GL-9.00	GL-3.00	---	---	---	---
No.3	GL-61.00	GL-25.57	GL-18.70	GL-17.90	GL-17.10	GL-3.05	---	---	---	---
No.4	GL-71.00	GL-25.45	GL-13.37	GL-12.80	GL-12.23	GL-2.82	---	---	---	---
No.5	GL-66.00	GL-25.73	GL-15.39	GL-14.68	GL-13.96	GL-2.99	GL-2.99	GL-2.99	GL-2.98	GL-2.98
No.6	GL-69.60	GL-26.45	GL-14.70	GL-13.95	GL-13.20	GL-2.96	---	---	---	---
No.7	GL-75.00	GL-24.62	GL-13.95	GL-13.60	GL-13.25	GL-3.12	GL-2.72	GL-2.28	GL-1.94	GL-2.23
No.8	GL-45.00	GL-26.07	GL-16.32	GL-15.80	GL-15.28	GL-2.97	---	---	---	---

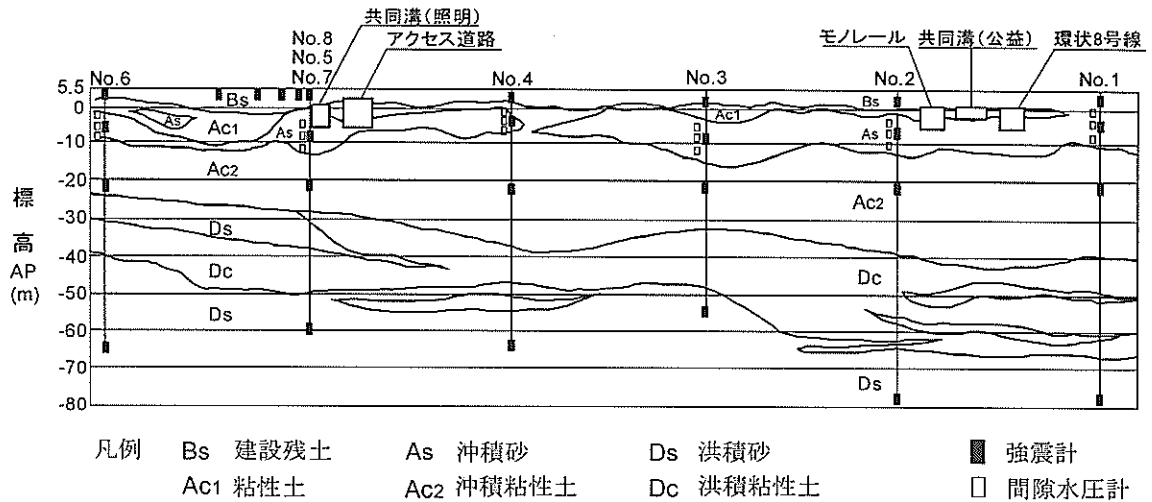


図-7 地層断面図

新 A 滑走路に沿った地層断面図を図-7に示す。また No.1 ~ No.8 地点のボアホール A (おのおのの観測点で一番深いボアホール) における土質柱状図を図-8(a)-(h)に示す。これらの図から、N 値 50 以上の工学的基盤の深度は、No.1 から No.6 に向かって次第に浅くなっていること、また No.7 から No.8 に向かって次第に浅くなっていることがわかる。ここで表層地盤の各層の S 波速度と層厚から重複反射理論 (例えば大崎, 1994) により表層地盤の固有周期を求めると、固有周期は表-4に示す通りとなる。同表から、新 A 滑走路における表層地盤の固有周期は 0.8 秒と 1.8 秒の間にあることがわかる。

観測に使用されている換振器は港湾地域強震観測 (例えば野津他, 2002) で使用されている ERS-G 型強震計の換振器 (フォースバランス式) と同じものである。写真-1に換振器を示す。また表-5に換振器の仕様を示す。



写真-1 新 A 滑走路で使用中のものと同じ換振器

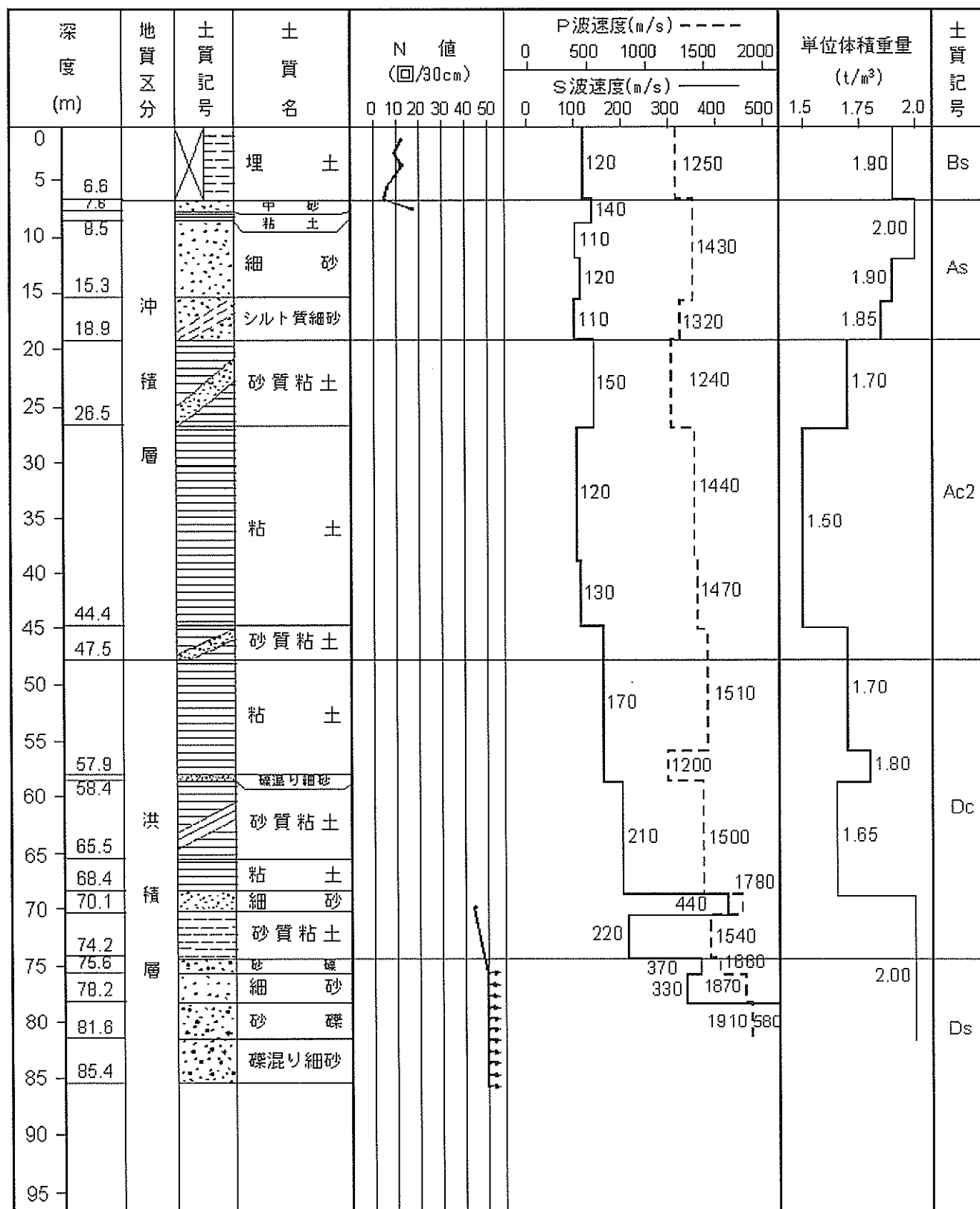
表-4 表層地盤の固有一次周期 (単位 s)

観測点	固有一次周期 (s)
No.1	1.8
No.2	1.6
No.3	1.4
No.4	1.4
No.5	1.3
No.6	0.8
No.7	1.5
No.8	1.0

表-5 新 A 滑走路で使用中の換振器の仕様

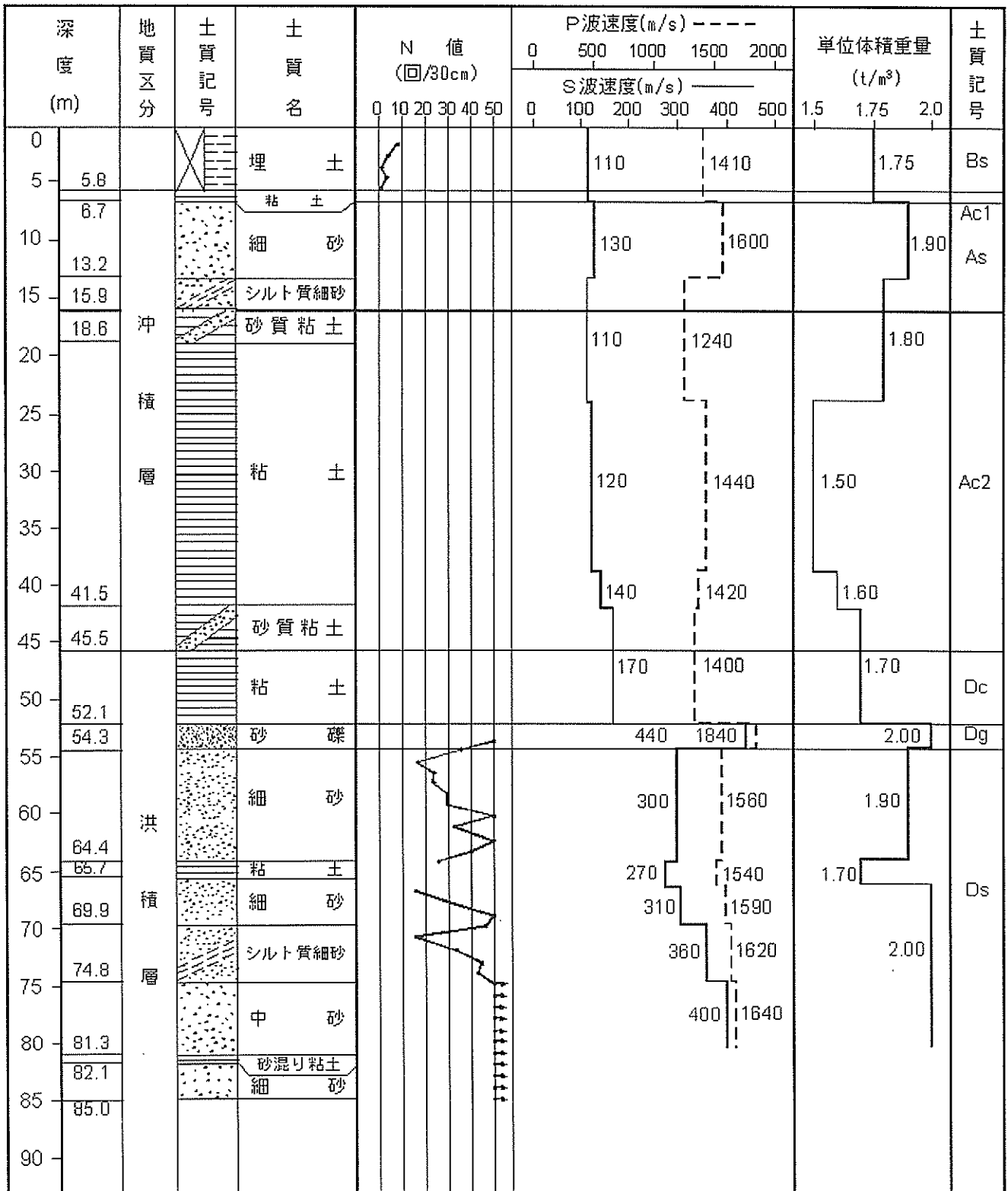
形式	フォースバランス
成分	水平 2 成分と上下成分
感度	2V/フルスケール
フルスケール	0.008G から 2G の範囲で設定可能

さて、ボアホールへの換振器の設置にあたっては、東西、南北、上下の 3 成分を記録することを目標として注



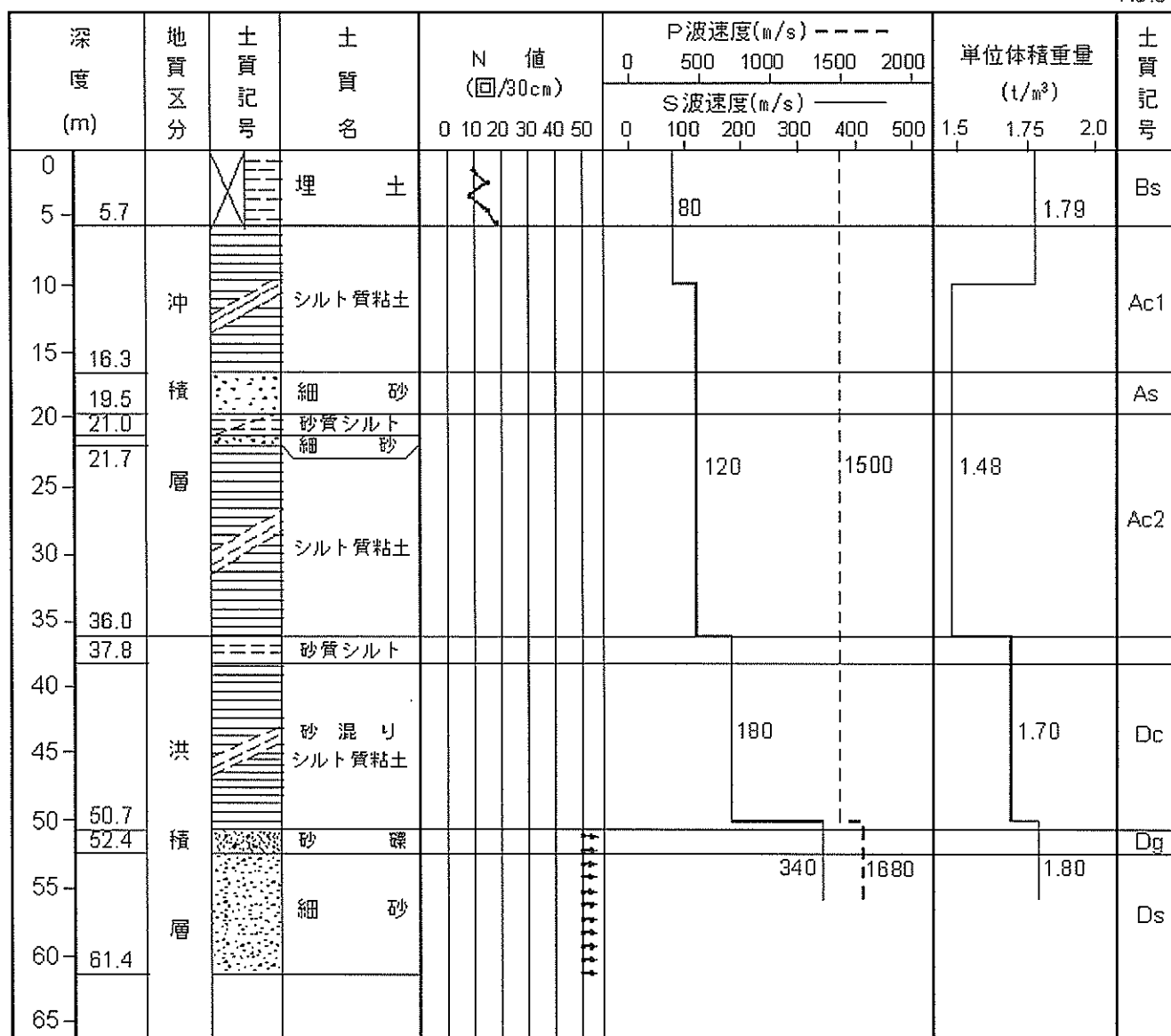
地盤高 A.P. +7.1m
孔内水位 G.L. -5.4m

図-8(a) No.1地点のボアホールAにおける土質柱状図



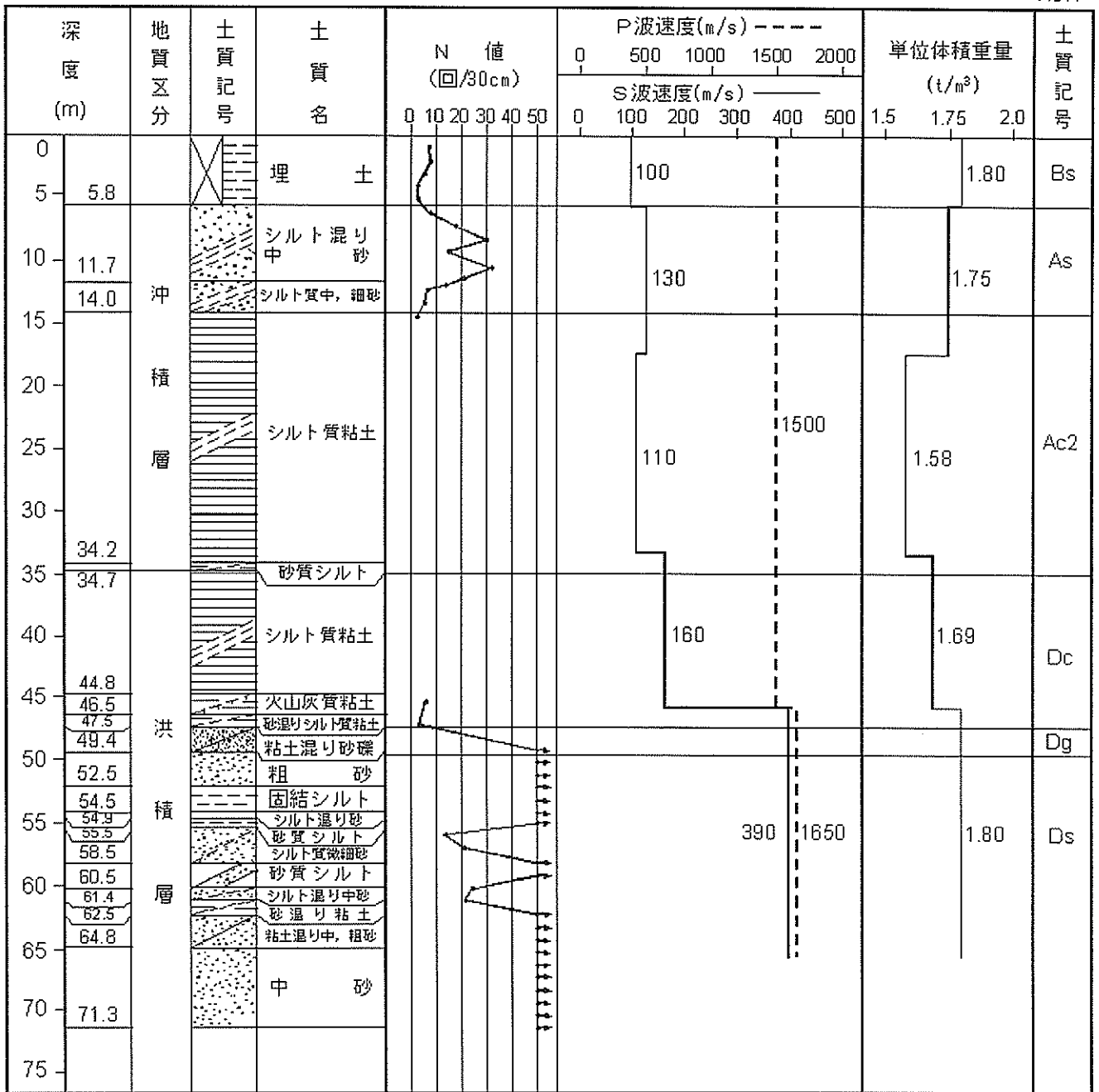
地盤高 A.P. +5.3m
 孔内水位 G.L. -3.4m

図-8(b) No.2 地点のボアホール A における土質柱状図



地盤高 A.P. +4.6m
 孔内水位 G.L. -2.3m

図-8(c) No.3地点のボアホールAにおける土質柱状図



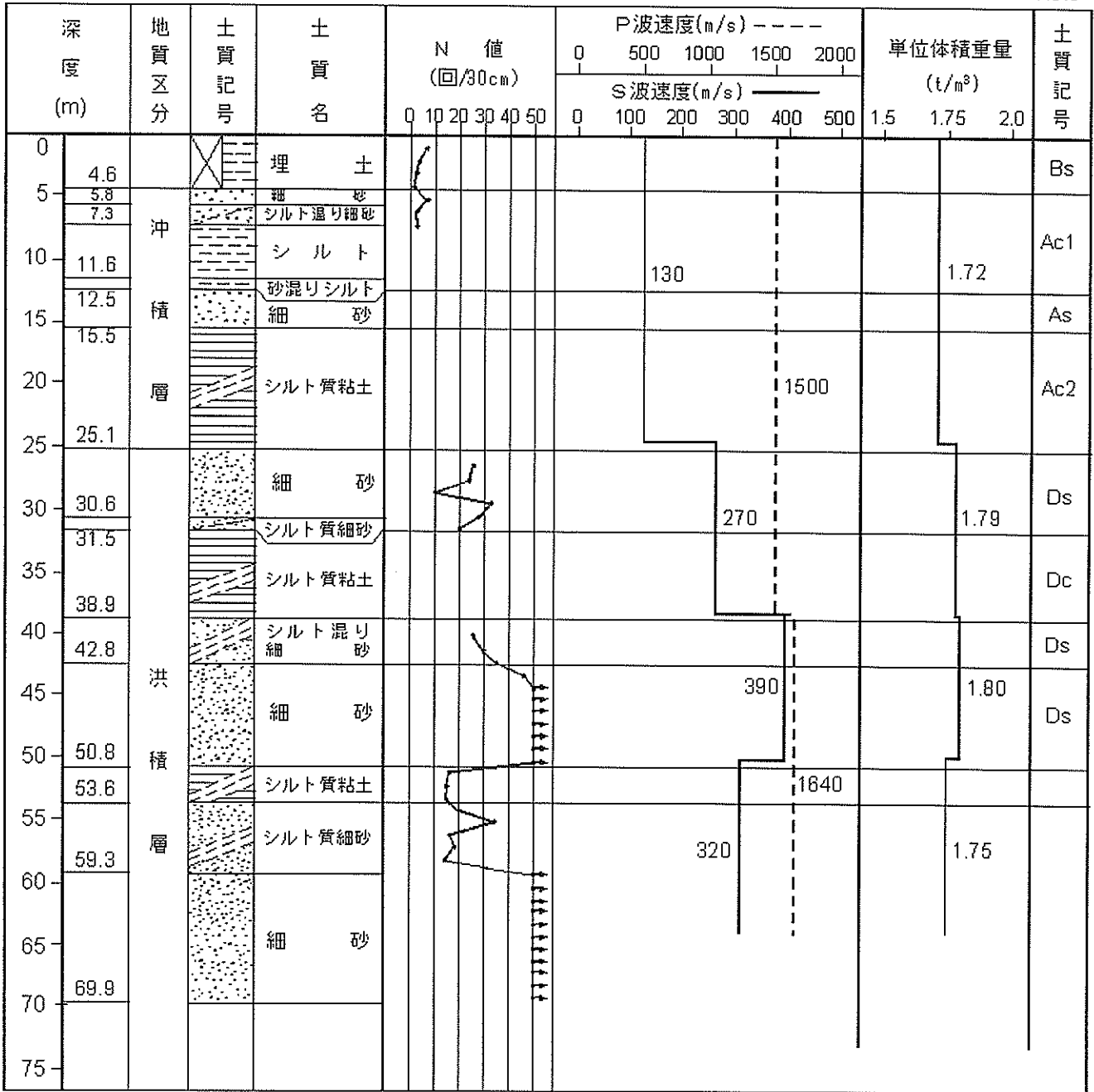
地盤高 A.P. +4.5m
 孔内水位 G.L. -5.8m

図-8(d) No.4 地点のボアホール A における土質柱状図

深度 (m)	地質区分	土質記号	土質名	N 値 (回/30cm)	P波速度(m/s) -----		単位体積重量 (t/m ³)			土質記号								
					0 500 1000 1500 2000	S波速度(m/s) -----	1.5 1.75 2.0	0 100 200 300 400 500										
0	6.8	X	埋 土	5						Bs								
5																		
10	13.3	沖積層	シルト	10		90		1.53		Ac1								
15			微細砂								15						As	
20			シルト								20							Ac2
25	16.1																	
30	35.2	洪積層	細 砂	30		130	1500	1.57		Ds								
35											37.5							
40	41.7	洪積層	微 砂	40		200		1.70		Ds								
45			シルト質微砂								45							
50			粘土質シルト								48.3							Dc
55			腐食土質シルト								50.8							
60			シルト質微砂								51.4							
65			55.4								細 砂	55						Ds
70	56.1	砂 礫	60															
65	66.2	洪積層	細 砂	65		330	1650	1.80		Ds								
70			66.2															

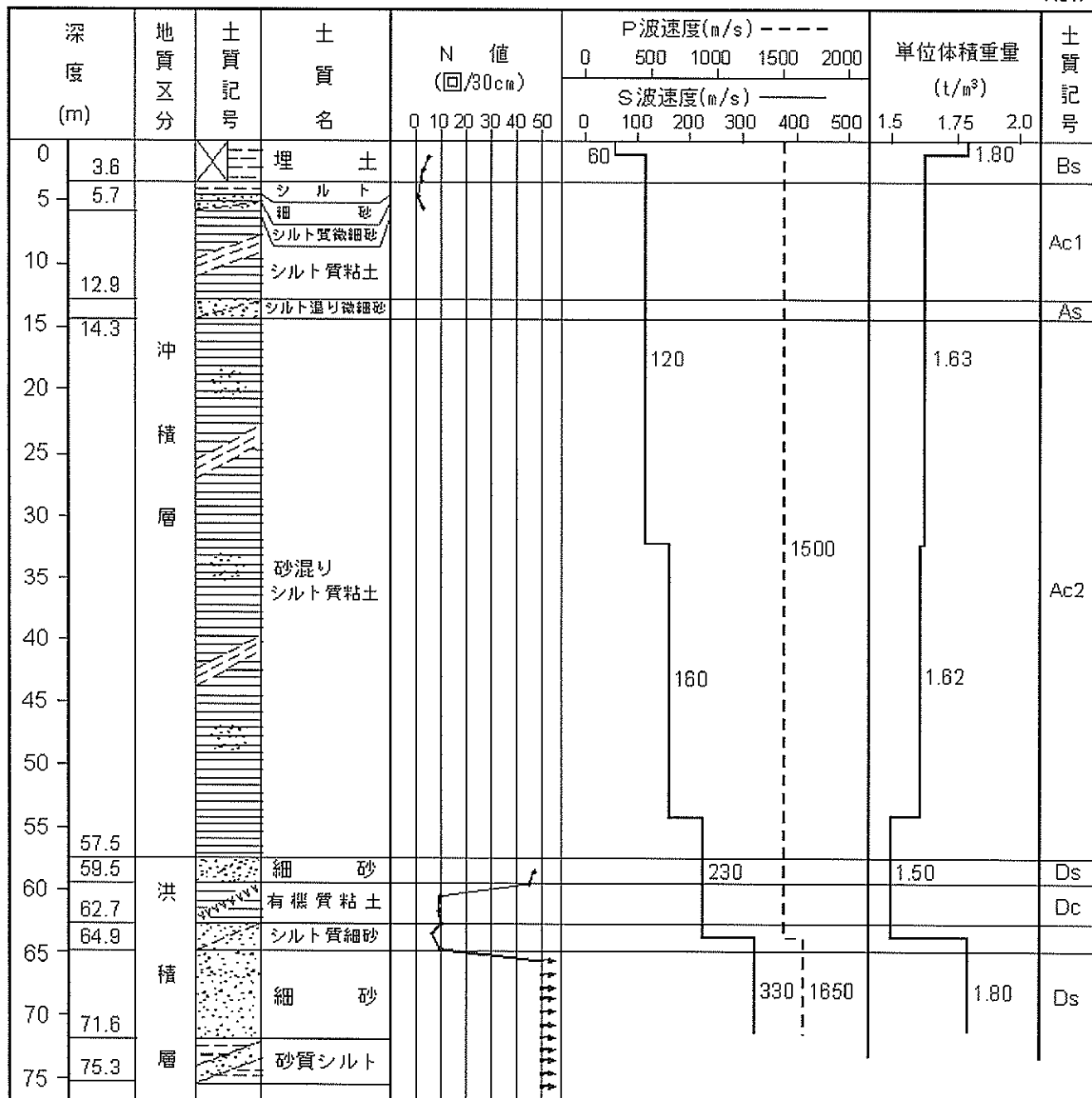
地盤高 A.P. +4.7m
 孔内水位 G.L. -1.9m

図-8(e) No.5 地点のボアホール A における土質柱状図



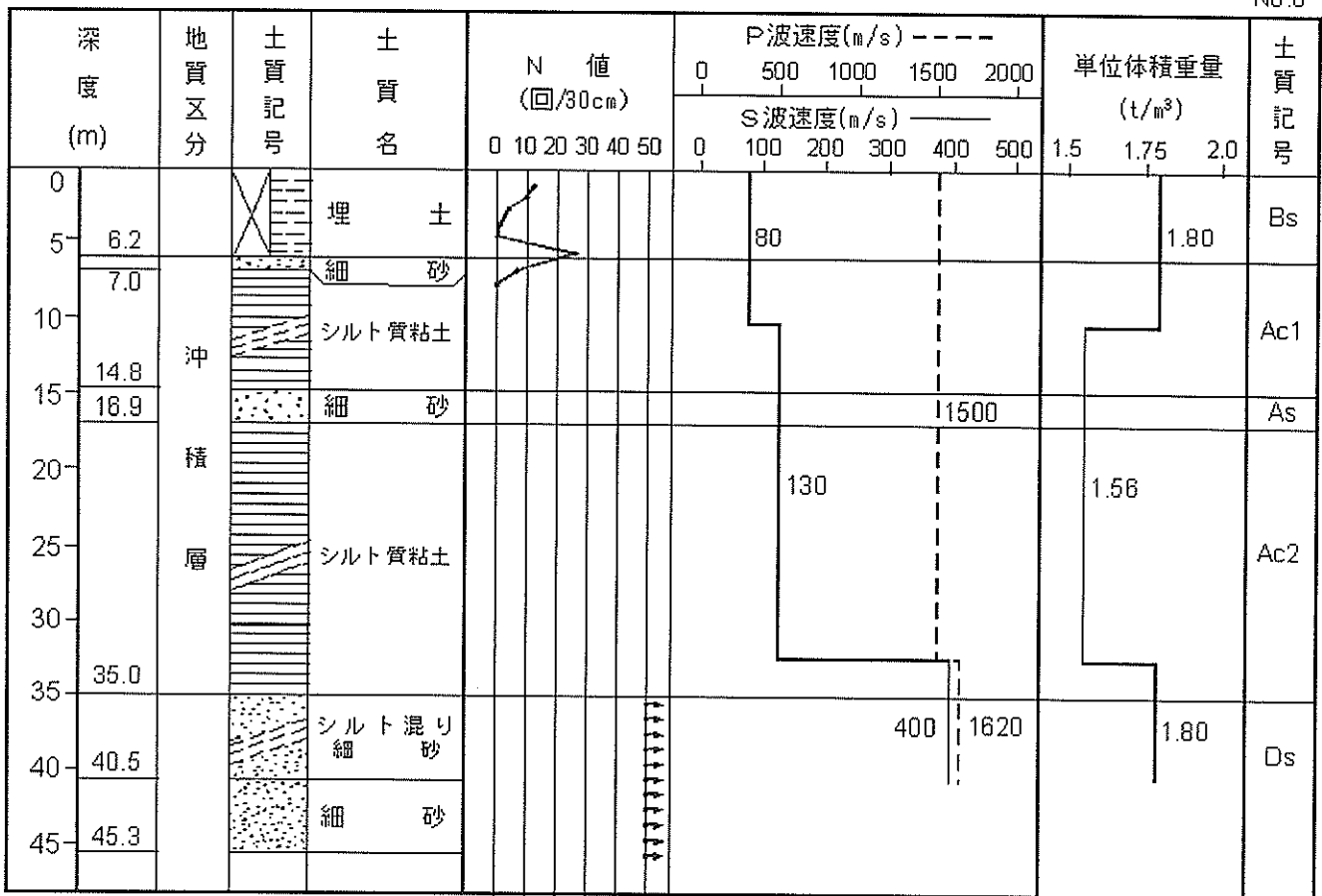
地盤高 A.P. +5.5m
 孔内水位 G.L. -2.6m

図-8(f) No.6 地点のボアホール A における土質柱状図



地盤高 A.P. +3.6m
 孔内水位 G.L. -8.2m

図-8(g) No.7地点のボアホールAにおける土質柱状図



地盤高 A.P. +5.1m
孔内水位 G.L. -4.2m

図-8(h) No.8地点のボアホール Aにおける土質柱状図

意深く設置することになっている。しかし実際にはボアホール内に設置された換振器の水平面内での設置方位は必ずしも正確でない場合がある。ここではこのことにも注意して、今回解析に用いるボアホール F の換振器の水平面内での設置方位誤差を検討した。この検討には、比較的長周期成分を多く含む 1990 年 2 月 20 日の地震の記録を用いた。No.1 ~ No.8 のボアホール F の記録からフィルターにより長周期成分を取り出し、その軌跡を描く。それらの軌跡は、もしも設置方位誤差がなければ互いにちょうど重なり合うはずであるが、実際には軌跡同士は重なり合わない。そこで、一方の軌跡を原点を中心に回転させ、どの程度回転させれば互いに重なり合うかを調べ、設置方位誤差を明らかにした。このとき、No.5 の換振器を基準とした。結果を表-6の左の欄に示す。ボアホール F の換振器は比較的浅い場所に設置されているにも関わらず、その設置方位誤差はやや大きいことがわかる。

表-6 地表換振器の水平面内での設置方位誤差

	相対値 (度) 基準は No.5	絶対値
No.1	11	7
No.2	-9	-13
No.3	3	-1
No.4	16	12
No.5	0	-4
No.6	-1	-5
No.7	11	7
No.8	5	1

ところでこの検討では No.5 に対する各換振器の相対的な設置方位誤差を明らかにできるだけである。羽田空港新 A 滑走路のすべての換振器はボアホール内に設置

されているので、設置方位誤差の絶対値を求めようとしても、基準となる換振器がないのでそれは不可能である。そこで、ここでは各ポアホール換振器の設置方位誤差の平均値は0であると仮定して（言い換えれば設置方位誤差は時計回りと半時計回りにまんべんなく生じていると仮定して）換振器の設置方位誤差の絶対値を求めた。結果を表-6の右の欄に示す。以下の解析では、ポアホール F のすべての記録に対し、表-6の数字に基づいて設置方位誤差に関する補正を施したものをを用いる。

3. 解析対象記録

3.1 解析対象地震

新 A 滑走路は 1988 年 7 月の供用開始と同時に地震観測を開始しており、同年 9 月に最初の記録が取得された。以来、2001 年末までに表-7に示すとおり 204 の地震による記録が得られている。表-7には観測された地震の発生時刻、緯度、経度、震央地名、震源深さ、震央距離、気象庁マグニチュード、地表最大加速度を示している。ここに地表最大加速度とは、当該地震の地表におけるすべての波形（東西・南北・上下の3成分を含む）の最大加速度を比較して、その中の最も大きいものことである。地震の発生時刻その他は気象庁による。

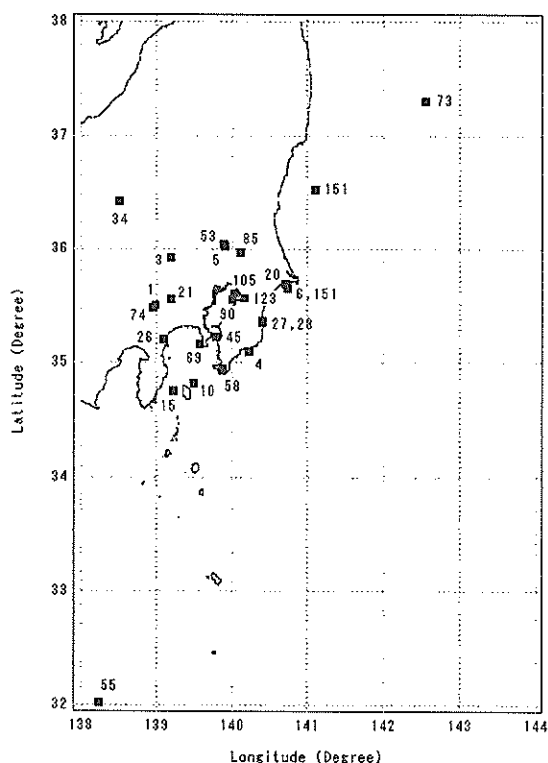


図-9 解析対象地震の震央

ここでは、表-7に示す地震の中で、気象庁マグニチュードが 5.0 以上で、かつ、地表最大加速度が 10Gal 以上の記録を選択して用いることとした。これは、本研究で対象とする表面波は規模の小さい地震の記録にはあまり含まれていないこと、振幅の小さな記録は SN 比があまり良好でないなどを考慮したものである。上記の条件を満足する記録は、これまでのところ 27 得られていることがわかった。それらを表-7にハッチングして示している。対象とする 27 の地震の震央を図-9に示す。図-9において、■印の横の番号は表-7の地震番号と対応している。地震番号 6 の地震と地震番号 151 の地震は互いに近接しているので重なって見える。また地震番号 27 の地震と地震番号 28 の地震も重なり合っている。1994 年北海道東方沖地震（地震番号 61）の震央は表示していない。対象地震の震央位置は、羽田空港の周辺にまんべんなく分布しているように見える。

3.2 解析対象記録

ここでは、上記の 27 地震による記録のうちポアホール F の記録を解析対象とする。いかなる位置において得られた記録を解析の対象とするかについては慎重な検討を要するところである。ここでは表面波を解析対象としているが、表面波の振幅は、周期にもよるが、一般には地表に近づくほど振幅が大きい。そこで、表面波に関する限り、地表の記録が最も SN 比が良好であると予想される。地表付近に換振器が設置されているポアホール F の記録を用いることは、この点から考えて合理的である。また、地表付近の換振器の中でも、No.1 ~ No.8 のポアホール F が構成する大きなアレーと、No.5 および No.7 の内部に構成されている小さなアレーのいずれを用いるかという点で選択肢がある。この選択は、2. で述べたように解析対象とする表面波の波長を考慮してなされるべきであるが、ここでは波長数 100m 以上の表面波を対象とすることとして、No.1 ~ No.8 のポアホール F が構成する大きなアレーを用いることとする。

さて、対象とする表面波の波長そのものも、解析の目的にかなうように選定する必要がある。この点については次のような考え方によっている。

そのそも表面波の解析を行う主要な目的は、当該空港における表面波の特性を明らかにして、将来、滑走路、沈埋トンネル、埋設パイプライン等の耐震性を検討する際の基礎資料とすることにある。したがって、解析の対象とする表面波の波長は、これらの構造物に大きな影響を及ぼすような表面波の波長として選定すべきであろう。ここでは、表面波が構造物に及ぼす影響の大きさを

表-7 羽田アレー観測記録一覧(その1)

No.	地震発生時刻	緯度 (北緯)	経度 (東経)	震央地名	震源深さ (km)	震央距離 (km)	マグニチュード	地表最大 加速度(Gal)
1	1988/09/05 00:49	35° 29.8'	138° 59.2'	EASTERN YAMANASHI PREF	29.6	72	5.6	14.0
2	1988/09/26 17:23	35° 32.5'	141° 10.9'	NEAR CHOSHI CITY	35.7	126	5.8	5.9
3	1988/09/29 17:23	35° 55.1'	139° 11.4'	WESTERN SAITAMA PREF	15.0	67	5.0	16.8
4	1988/10/28 15:13	35° 05.8'	140° 13.8'	SE OFF BOSO PENINSULA	75.5	65	5.1	25.4
5	1989/02/19 21:27	36° 01.1'	139° 54.5'	SW IBARAKI PREF	55.3	53	5.6	37.8
6	1989/03/06 23:39	35° 41.6'	140° 42.8'	NEAR CHOSHI CITY	55.7	85	6.0	12.9
7	1989/04/26 02:18	35° 54.6'	140° 29.6'	SOUTHERN IBARAKI PREF	64.8	75	5.4	6.3
8	1989/09/05 13:07	35° 33.0'	140° 08.3'	CENTRAL CHIBA PREF	78.2	32	4.6	21.0
9	1989/10/10 15:28	35° 34.9'	140° 03.5'	CENTRAL CHIBA PREF	78.3	25	4.8	20.1
10	1989/10/14 06:19	34° 49.4'	139° 30.2'	NEAR IZU-OSHIMA ISLAND	21.2	85	5.7	13.4
11	1989/11/02 03:25	39° 51.3'	143° 03.4'	FAR E OFF SANRIKU	0.0	557	7.1	2.9
12	1989/11/25 16:02	35° 57.0'	140° 07.1'	SOUTHERN IBARAKI PREF	76.0	54	4.6	7.0
13	1989/12/20 23:32	35° 56.9'	139° 34.8'	EASTERN SAITAMA PREF	54.6	48	3.9	4.4
14	1990/02/12 02:46	36° 24.1'	141° 01.2'	E OFF IBARAKI PREF	38.3	146	5.3	2.4
15	1990/02/20 15:53	34° 45.6'	139° 14.0'	NEAR IZU-OSHIMA ISLAND	5.8	101	6.5	15.8
16	1990/03/03 00:07	36° 08.3'	139° 52.2'	SW IBARAKI PREF	59.5	66	4.3	3.9
17	1990/04/12 05:51	35° 31.0'	135° 38.5'	WESTERN FUKUI PREF	367.9	374	6.4	5.0
18	1990/05/03 16:45	36° 26.0'	140° 36.8'	NOTHERN IBARAKI PREF	58.0	123	5.2	6.0
19	1990/05/14 17:14	35° 36.5'	140° 04.7'	CENTRAL CHIBA PREF	81.3	27	4.2	7.0
20	1990/06/01 10:22	35° 38.5'	140° 43.8'	NEAR CHOSHI CITY	59.3	86	6.0	13.3
21	1990/06/05 22:42	35° 33.2'	139° 11.8'	KANAGAWA PREF	122.8	53	5.4	13.8
22	1990/06/15 22:05	35° 47.1'	140° 10.7'	NOTHERN CHIBA PREF	77.5	44	4.2	3.3
23	1990/06/27 06:54	35° 00.1'	139° 07.0'	E OFF IZU PENINSULA	148.0	86	5.4	9.1
24	1990/07/04 03:32	36° 02.4'	140° 07.2'	SOUTHERN IBARAKI PREF	76.0	62	5.1	8.0
25	1990/08/05 12:36	36° 24.1'	141° 06.6'	E OFF IBARAKI PREF	39.1	152	5.8	3.7
26	1990/08/05 16:13	35° 12.4'	139° 05.7'	HAKONE REGION	13.6	73	5.1	10.0
27	1990/08/23 08:47	35° 20.7'	140° 23.8'	KUJUKURI COAST BOSO PEN	49.9	60	5.4	48.0
28	1990/08/23 11:44	35° 21.5'	140° 24.3'	KUJUKURI COAST BOSO PEN	49.5	60	5.2	24.0
29	1990/08/24 22:11	35° 39.7'	139° 38.9'	TOKYO PREF	41.9	18	3.7	5.6
30	1990/10/06 23:33	36° 29.1'	140° 36.8'	NORTHERN IBARAKI PREF	50.8	128	5.0	4.6
31	1990/12/16 14:23	35° 36.8'	140° 13.2'	CENTRAL CHIBA PREF	77.3	40	4.6	22.5
32	1991/03/01 07:40	35° 39.5'	139° 42.6'	TOKYO PREF	43.1	14	3.8	15.9
33	1991/06/28 20:11	35° 29.4'	139° 51.5'	TOKYO BAY REGION	68.0	9	4.6	9.9
34	1991/07/14 23:19	36° 25.0'	138° 30.5'	NW GUNMA PREF	187.8	150	5.4	14.4
35	1991/07/20 14:40	35° 21.6'	139° 22.6'	KANAGAWA PREF	26.5	43	3.9	8.9
36	1991/08/06 23:49	35° 48.9'	141° 09.6'	NEAR CHOSHI CITY	42.5	128	5.9	6.5
37	1991/08/11 06:41	35° 31.0'	139° 59.1'	CENTRAL CHIBA PREF	64.9	19	4.0	5.2

表-7 羽田アレー観測記録一覧(その2)

No.	地震発生時刻	緯度 (北緯)	経度 (東経)	震央地名	震源深さ (km)	震央距離 (km)	マグニチュード	地表最大 加速度(Gal)
38	1991/09/03 17:44	33° 41.0'	138° 49.9'	NEAR MIYAKEJIMA ISLAND	33.1	225	6.3	2.9
39	1991/09/29 13:13	35° 45.0'	140° 06.2'	NOTHERN CHIBA PREF	79.4	36	4.9	13.2
40	1991/09/29 13:42	35° 45.6'	140° 07.7'	NOTHERN CHIBA PREF	81.6	39	4.2	7.8
41	1991/09/29 14:00	35° 45.4'	140° 07.7'	NOTHERN CHIBA PREF	81.1	39	4.3	13.0
42	1991/10/19 08:31	36° 05.0'	139° 55.2'	SW IBARAKI PREF	59.0	61	4.3	4.6
43	1991/11/19 17:24	35° 36.3'	140° 01.5'	CENTRAL CHIBA PREF	81.2	23	4.9	44.4
44	1992/01/05 20:38	35° 35.0'	140° 04.9'	CENTRAL CHIBA PREF	81.2	27	4.3	9.5
45	1992/02/02 04:04	35° 13.6'	139° 47.5'	TOKYO BAY REGION	92.3	36	5.9	133.7
46	1992/02/03 07:47	35° 12.6'	139° 46.2'	TOKYO BAY REGION	92.3	38	4.1	12.3
47	1992/04/10 23:31	35° 42.4'	139° 37.8'	TOKYO PREF	89.0	22	4.9	26.9
48	1992/05/11 19:07	36° 31.8'	140° 32.4'	NORTHERN IBARAKI PREF	56.2	128	5.6	5.5
49	1992/05/20 17:23	35° 12.3'	139° 46.4'	TOKYO BAY REGION	91.7	38	4.8	30.4
50	1992/06/01 22:51	36° 40.2'	141° 16.4'	E OFF IBARAKI PREF	43.8	183	5.7	3.8
51	1993/01/15 20:06	42° 55.0'	144° 21.4'	SE OFF TOKACHI	100.6	905	7.8	9.3
52	1993/01/19 23:39	38° 37.2'	133° 52.1'	SEA OF JAPAN	489.2	624	7.0	4.5
53	1993/05/21 11:36	36° 02.5'	139° 54.0'	SW IBARAKI PREF	60.8	56	5.3	18.3
54	1993/09/18 11:18	36° 10.8'	140° 53.1'	E OFF IBARAKI PREF	35.4	121	5.0	3.4
55	1993/10/12 00:54	32° 01.5'	138° 14.6'	FAR S OFF TOKAI DISTRICT	390.7	416	7.1	21.0
56	1993/11/01 21:22	36° 06.0'	140° 13.5'	SOUTHERN IBARAKI PREF	82.3	73	4.6	3.4
57	1994/05/27 23:53	35° 42.1'	139° 41.7'	TOKYO PREF	41.8	19	4.0	7.3
58	1994/06/29 11:01	34° 57.1'	139° 52.9'	SOUTHERN BOSO PENINSULA	60.0	67	5.2	17.2
59	1994/08/14 18:06	38° 40.6'	142° 23.3'	E OFF MIYAGI PREF	42.4	417	6.0	2.3
60	1994/09/04 10:19	35° 34.8'	140° 08.3'	CENTRAL CHIBA PREF	83.2	32	4.2	7.9
61	1994/10/04 22:22	43° 22.3'	147° 40.7'	E OFF HOKKAIDO	28.0	1095	8.1	13.2
62	1994/10/25 15:06	35° 10.7'	138° 59.2'	HAKONE REGION	3.9	83	4.9	4.3
63	1994/10/29 23:43	34° 52.3'	140° 43.3'	SE OFF BOSO PENINSULA	70.8	114	4.9	3.0
64	1994/11/04 19:06	36° 03.1'	139° 54.8'	SW IBARAKI PREF	56.3	57	4.3	5.5
65	1995/01/10 03:00	35° 56.0'	141° 25.9'	FAR E OFF IBARAKI PREF	43.3	155	6.1	3.8
66	1995/03/23 07:24	36° 05.7'	140° 01.0'	SW IBARAKI PREF	56.2	64	4.9	21.1
67	1995/04/18 20:26	35° 03.7'	138° 35.3'	NORTHERN SURUGA BAY REG	24.1	121	4.5	8.3
68	1995/05/20 03:24	35° 16.4'	139° 46.8'	TOKYO BAY REGION	89.9	31	3.9	6.0
69	1995/07/03 08:53	35° 09.8'	139° 34.1'	SAGAMI BAY REGION	122.1	47	5.2	86.6
70	1995/07/30 03:24	35° 54.0'	140° 35.3'	SOUTHERN IBARAKI PREF	42.6	82	5.1	5.2
71	1995/09/26 20:45	35° 33.5'	140° 08.1'	CENTRAL CHIBA PREF	79.3	32	4.4	11.7
72	1995/11/12 06:01	35° 40.9'	139° 30.2'	TOKYO PREF	49.0	29	4.1	9.3
73	1996/02/17 00:22	37° 18.4'	142° 33.1'	E OFF FUKUSHIMA PREF	58.0	315	6.5	13.5
74	1996/03/06 23:35	35° 28.4'	138° 57.0'	EASTERN YAMANASHI PREF	19.6	76	5.3	19.2

表-7 羽田アレー観測記録一覧(その3)

No.	地震発生時刻	緯度 (北緯)	経度 (東経)	震央地名	震源深さ (km)	震央距離 (km)	マグニチュード	地表最大 加速度(Gal)
75	1996/04/06 05:12	35° 32.2'	140° 05.2'	CENTRAL CHIBA PREF	78.1	27	4.0	17.8
76	1996/06/16 15:50	35° 30.5'	139° 48.9'	TOKYO BAY REGION	66.8	5		8.7
77	1996/07/10 23:06	35° 13.9'	139° 30.7'	SAGAMI BAY REGION	104.6	43	4.0	6.8
78	1997/02/19 10:04	35° 33.8'	140° 08.9'	CENTRAL CHIBA PREF	76.5	33	4.0	14.3
79	1997/02/20 05:21	37° 23.1'	141° 09.5'	E OFF FUKUSHIMA PREF	88.5	238	5.3	4.4
80	1997/03/03 23:09	34° 57.4'	139° 09.7'	E OFF IZU PENINSULA	14.0	87	5.3	4.6
81	1997/03/04 00:30	34° 57.7'	139° 10.5'	E OFF IZU PENINSULA	0.0	86	4.7	5.2
82	1997/03/04 12:51	34° 57.1'	139° 10.4'	E OFF IZU PENINSULA	2.6	87	5.7	7.5
83	1997/03/09 21:07	35° 36.8'	140° 10.2'	CENTRAL CHIBA PREF	74.8	36	4.2	10.2
84	1997/03/16 14:51	34° 55.5'	137° 31.7'	NE AICHI PREF	39.1	216	5.8	7.5
85	1997/03/23 14:58	35° 57.9'	140° 06.6'	SOUTHERN IBARAKI PREF	71.5	55	5.0	49.0
86	1997/03/26 18:30	35° 38.1'	139° 41.1'	TOKYO PREF	39.6	13	3.7	6.5
87	1997/05/12 12:13	35° 22.3'	139° 46.3'	TOKYO BAY REGION	61.4	20	3.6	7.8
88	1997/06/30 11:57	35° 33.4'	140° 09.2'	CENTRAL CHIBA PREF	75.4	33	3.8	5.1
89	1997/07/09 18:36	35° 33.1'	140° 07.7'	CENTRAL CHIBA PREF	77.3	31	4.6	27.7
90	1997/09/08 08:40	35° 33.3'	140° 00.3'	CENTRAL CHIBA PREF	108.6	20	5.2	40.3
91	1997/11/02 07:13	36° 03.6'	139° 55.4'	SW IBARAKI PREF	51.3	58	4.3	5.0
92	1997/12/06 15:40	35° 42.3'	140° 07.2'	NORTHERN CHIBA PREF	56.0	35	4.6	9.6
93	1997/12/07 08:02	35° 44.7'	140° 07.6'	NORTHERN CHIBA PREF	52.8	38	4.2	7.4
94	1998/01/14 02:17	35° 35.2'	140° 14.4'	CENTRAL CHIBA PREF	75.9	41	4.9	38.3
95	1998/01/16 10:57	35° 12.3'	140° 18.4'	KUJUKURI COAST BOSO PEN	57.5	61	4.6	10.1
96	1998/03/01 02:38	33° 32.6'	138° 25.2'	FAR S OFF TOKAI DISTRICT	312.4	255	5.6	3.5
97	1998/03/08 13:46	36° 05.1'	139° 51.5'	SW IBARAKI PREF	51.7	60	4.4	7.2
98	1998/03/23 18:37	36° 22.2'	141° 10.5'	E OFF IBARAKI PREF	45.0	155	5.3	3.8
99	1998/04/09 17:45	36° 56.4'	141° 01.9'	E OFF FUKUSHIMA PREF	93.0	191	5.4	5.6
100	1998/05/03 11:09	34° 57.3'	139° 10.6'	E OFF IZU PENINSULA	2.8	86	5.7	4.9
101	1998/05/16 03:45	34° 58.2'	139° 56.6'	SOUTHERN BOSO PENINSULA	73.9	66	4.8	11.3
102	1998/07/20 10:43	35° 38.2'	139° 32.6'	TOKYO PREF	27.2	24	3.6	6.3
103	1998/07/31 10:12	35° 33.2'	140° 09.9'	CENTRAL CHIBA PREF	73.3	34	3.9	3.9
104	1998/08/20 15:40	28° 54.2'	139° 53.3'	W OFF OGASAWARA	457.0	737	7.1	7.7
105	1998/08/29 08:46	35° 36.2'	140° 02.7'	CENTRAL CHIBA PREF	67.1	24	5.1	50.1
106	1998/11/08 21:40	35° 36.6'	140° 03.2'	CENTRAL CHIBA PREF	78.0	25	4.6	43.9
107	1998/11/28 00:22	35° 37.7'	140° 05.8'	CENTRAL CHIBA PREF	67.0	30	4.3	12.9
108	1998/12/03 05:15	35° 36.4'	140° 02.5'	CENTRAL CHIBA PREF	66.7	24	4.2	12.6
109	1999/03/26 08:31	36° 27.3'	140° 37.0'	NORTHERN IBARAKI PREF	57.5	125	4.9	4.6
110	1999/04/08 22:10	43° 35.8'	130° 48.5'	NEAR VLADIVOSTOK	598.0	1171	7.2	1.7
111	1999/04/19 08:14	34° 19.4'	139° 42.7'	FAR S OFF BOSO PENINSULA	120.9	136	4.6	1.1

表-7 羽田アレー観測記録一覧(その4)

No.	地震発生時刻	緯度 (北緯)	経度 (東経)	震央地名	震源深さ (km)	震央距離 (km)	マグニチュード	地表最大 加速度(Gal)
112	1999/04/25 18:13	35° 31.0'	140° 17.8'	CENTRAL CHIBA PREF	92.4	47	4.2	10.7
113	1999/04/25 21:27	36° 27.7'	140° 37.8'	NORTHERN IBARAKI PREF	57.9	127	5.1	3.2
114	1999/05/07 21:48	35° 12.8'	138° 20.7'	CENTRAL SHIZUOKA PREF	19.9	136	4.7	3.2
115	1999/05/13 02:59	42° 56.7'	143° 54.5'	KUSHIRO REGION	103.6	892	6.4	2.3
116	1999/05/22 09:48	35° 27.0'	139° 11.7'	KANAGAWA PREF	23.5	55	4.1	6.2
117	1999/05/28 12:11	35° 30.9'	139° 30.4'	KANAGAWA PREF	39.4	25	3.5	2.9
118	1999/06/06 16:42	35° 32.0'	139° 51.0'	TOKYO BAY REGION	15.4	6	3.3	18.2
119	1999/06/17 22:39	35° 45.6'	140° 08.6'	NORTHERN CHIBA PREF	70.2	40	3.7	3.2
120	1999/07/22 18:57	35° 22.8'	140° 23.5'	KUJUKURI COAST BOSO PEN	62.6	58	4.0	2.4
121	1999/08/09 06:39	35° 50.1'	139° 57.6'	NORTHERN CHIBA PREF	116.0	35	4.4	4.4
122	1999/08/11 18:27	35° 24.0'	139° 49.8'	TOKYO BAY REGION	62.5	17	4.0	13.0
123	1999/09/13 07:56	35° 34.0'	140° 09.6'	CENTRAL CHIBA PREF	77.1	34	5.0	51.6
124	1999/12/04 14:06	35° 54.2'	140° 44.8'	SOUTHERN IBARAKI PREF	98.6	95	4.8	4.9
125	1999/12/06 07:00	29° 54.1'	139° 13.4'	NEAR TORISHIMA IS	434.8	629	5.9	2.1
126	1999/12/16 22:28	36° 37.5'	139° 26.1'	TOCHIGI GUNMA BORDER	10.9	124	4.1	1.2
127	1999/12/16 22:47	36° 37.9'	139° 26.4'	TOCHIGI GUNMA BORDER	11.5	124	4.1	2.6
128	1999/12/27 00:05	36° 08.8'	139° 52.1'	SW IBARAKI PREF	54.2	67	4.0	2.6
129	1999/12/29 01:06	35° 11.1'	140° 09.5'	SOUTHERN BOSO PENINSULA	54.3	53	3.7	3.9
130	2000/01/09 13:02	37° 16.4'	141° 42.3'	E OFF FUKUSHIMA PREF	45.8	257	5.0	1.2
131	2000/01/12 11:09	36° 27.1'	140° 35.5'	NORTHERN IBARAKI PREF	57.9	124	4.4	1.5
132	2000/01/28 23:21	42° 58.9'	146° 42.9'	OFF NEMURO PENINSULA	55.6	1013	6.8	1.4
133	2000/02/11 20:57	35° 30.0'	139° 03.0'	EASTERN YAMANASHI PREF	17.9	67	4.2	3.9
134	2000/05/16 19:40	36° 26.5'	140° 42.7'	E OFF IBARAKI PREF	50.8	129	4.6	2.1
135	2000/05/18 21:52	35° 37.0'	140° 05.3'	CENTRAL CHIBA PREF	71.9	28	3.6	4.4
136	2000/06/03 17:54	35° 40.7'	140° 43.2'	NEAR CHOSHI CITY	47.7	86	6.0	16.5
137	2000/06/06 17:25	35° 31.6'	139° 39.0'	KANAGAWA PREF	31.9	12	3.2	2.8
138	2000/06/10 08:31	30° 25.9'	138° 14.1'	NEAR TORISHIMA IS	528.0	586	6.5	1.6
139	2000/06/29 13:02	34° 08.6'	139° 21.6'	NEAR MIYAKEJIMA ISLAND	17.4	161	5.4	1.2
140	2000/06/29 13:53	34° 07.6'	139° 21.4'	NEAR MIYAKEJIMA ISLAND	16.7	163	5.1	1.0
141	2000/07/01 16:01	34° 12.3'	139° 13.3'	NEAR NIJIMA ISLAND	15.4	158	6.4	3.6
142	2000/07/03 12:36	34° 07.3'	139° 20.7'	NEAR MIYAKEJIMA ISLAND	18.1	164	4.8	1.2
143	2000/07/06 22:52	35° 14.8'	139° 22.7'	SAGAMI BAY REGION	150.5	50	4.1	2.1
144	2000/07/09 03:57	34° 13.4'	139° 15.2'	NEAR NIJIMA ISLAND	13.8	155	6.1	1.8
145	2000/07/12 12:19	34° 11.8'	139° 17.6'	NEAR NIJIMA ISLAND	17.6	157	5.1	1.0
146	2000/07/13 04:25	34° 10.6'	139° 15.5'	NEAR NIJIMA ISLAND	6.5	160	5.3	0.9
147	2000/07/15 03:28	34° 08.6'	139° 19.1'	NEAR MIYAKEJIMA ISLAND	18.0	162	5.2	1.2
148	2000/07/15 10:30	34° 25.4'	139° 15.2'	NEAR NIJIMA ISLAND	5.4	134	6.3	6.9

表-7 羽田アレー観測記録一覧(その5)

No.	地震発生時刻	緯度 (北緯)	経度 (東経)	震央地名	震源深さ (km)	震央距離 (km)	マグニチュード	地表最大 加速度 (Gal)
149	2000/07/16 01:32	35° 28.1'	139° 27.4'	KANAGAWA PREF	105.3	31	3.8	2.5
150	2000/07/20 06:18	34° 09.6'	139° 18.6'	NEAR MIYAKEJIMA ISLAND	14.0	160	5.2	0.7
151	2000/07/21 03:39	36° 31.4'	141° 05.8'	E OFF IBARAKI PREF	49.3	160	6.0	10.0
152	2000/07/24 06:26	34° 08.4'	139° 19.3'	NEAR MIYAKEJIMA ISLAND	19.0	162	5.3	1.0
153	2000/07/24 06:52	34° 11.9'	139° 14.5'	NEAR NIJIMA ISLAND	9.1	158	5.5	1.3
154	2000/07/27 10:49	34° 11.5'	139° 17.5'	NEAR NIJIMA ISLAND	12.1	157	5.6	1.7
155	2000/07/30 09:18	34° 00.6'	139° 22.8'	NEAR MIYAKEJIMA ISLAND	14.3	175	5.8	1.8
156	2000/07/30 21:25	33° 57.7'	139° 24.0'	NEAR MIYAKEJIMA ISLAND	18.2	180	6.4	5.7
157	2000/07/30 21:48	34° 00.3'	139° 23.6'	NEAR MIYAKEJIMA ISLAND	18.4	175	5.7	0.6
158	2000/08/03 06:42	34° 13.1'	139° 16.9'	NEAR NIJIMA ISLAND	15.7	155	5.1	1.3
159	2000/08/03 21:13	34° 13.8'	139° 15.7'	NEAR NIJIMA ISLAND	10.3	154	5.3	0.8
160	2000/08/03 22:18	34° 14.7'	139° 14.4'	NEAR NIJIMA ISLAND	11.9	153	5.2	0.9
161	2000/08/06 16:27	28° 51.6'	140° 04.2'	W OFF OGASAWARA	430.0	742	7.3	5.8
162	2000/08/14 16:33	35° 45.9'	140° 09.4'	NORTHERN CHIBA PREF	74.4	41	4.0	9.0
163	2000/08/18 04:53	35° 41.5'	139° 42.5'	TOKYO PREF	36.5	17	3.6	5.0
164	2000/08/18 10:52	34° 12.5'	139° 15.4'	NEAR NIJIMA ISLAND	11.2	157	6.0	1.1
165	2000/08/27 08:42	35° 45.3'	140° 08.4'	NORTHERN CHIBA PREF	76.5	39	4.2	4.7
166	2000/09/09 20:48	36° 01.6'	139° 39.1'	EASTERN SAITAMA PREF	66.9	54	4.2	2.0
167	2000/09/11 07:49	34° 30.8'	139° 13.4'	NEAR NIJIMA ISLAND	9.0	126	5.3	1.6
168	2000/09/29 08:56	35° 31.3'	139° 44.1'	TOKYO BAY REGION	85.8	6	4.5	14.2
169	2000/09/29 09:55	35° 30.5'	139° 43.1'	TOKYO BAY REGION	85.3	8	4.1	6.7
170	2000/09/30 23:23	35° 30.6'	139° 44.0'	TOKYO BAY REGION	83.6	6	3.7	3.0
171	2000/10/11 15:15	35° 31.9'	139° 43.4'	TOKYO BAY REGION	85.5	5.9	4.1	18.5
172	2000/10/14 20:19	34° 06.6'	140° 31.3'	FAR S OFF BOSO PENINSULA	87.0	174	4.9	5.9
173	2000/10/18 12:58	36° 55.2'	139° 42.1'	NORTHERN TOCHIGI PREF	9.0	152	4.5	2.9
174	2000/10/19 16:25	36° 55.1'	139° 42.4'	NORTHERN TOCHIGI PREF	11.4	152	4.0	1.8
175	2000/10/24 08:11	35° 45.2'	140° 07.0'	NORTHERN CHIBA PREF	74.8	38	4.2	14.0
176	2000/10/24 08:39	35° 45.1'	140° 07.2'	NORTHERN CHIBA PREF	72.3	38	3.8	2.5
177	2000/10/27 13:21	26° 37.6'	141° 26.5'	NEAR CHICHIJIMA ISLAND	410.8	1000	6.3	1.3
178	2000/11/14 04:13	35° 45.0'	140° 08.2'	NORTHERN CHIBA PREF	73.8	39	4.0	6.8
179	2000/11/16 18:31	37° 28.8'	141° 36.3'	E OFF FUKUSHIMA PREF	50.6	269	5.0	1.2
180	2001/02/25 06:55	37° 11.6'	142° 15.4'	福島県沖	24.0	287	5.8	2.7
181	2001/03/31 06:10	36° 48.7'	139° 23.4'	栃木県北部	8.0	145	4.9	1.7
182	2001/04/03 23:57	34° 59.7'	138° 06.5'	静岡県中部	33.0	164	5.1	4.2
183	2001/04/10 10:04	35° 17.9'	140° 22.0'	千葉県南部	98.0	60	4.5	7.0
184	2001/04/17 09:40	35° 36.9'	141° 07.4'	千葉県東方沖	40.0	121	4.8	2.2

表-7 羽田アレー観測記録一覧(その6)

No.	地震発生時刻	緯度 (北緯)	経度 (東経)	震央地名	震源深さ (km)	震央距離 (km)	マグニチュード	地表最大 加速度(Gal)
185	2001/04/20 01:45	36° 02.6'	139° 48.2'	埼玉県南部	63.0	55	4.0	4.0
186	2001/05/24 13:23	35° 53.4'	140° 08.8'	茨城県南部	74.0	50	4.2	7.5
187	2001/05/25 15:55	35° 44.9'	140° 41.6'	千葉県北東部	50.0	85	4.8	1.8
188	2001/05/31 08:59	36° 11.0'	139° 48.8'	茨城県南部	55.0	70	4.5	3.6
189	2001/06/01 00:42	34° 58.3'	138° 07.2'	静岡県中部	32.0	164	4.8	0.9
190	2001/06/25 01:27	35° 36.6'	139° 33.4'	神奈川県東部	32.0	22	4.0	14.9
191	2001/07/20 06:02	36° 10.0'	139° 49.5'	茨城県南部	56.0	69	4.8	6.8
192	2001/07/26 03:33	36° 01.6'	139° 48.7'	埼玉県南部	85.0	53	4.2	2.7
193	2001/08/14 05:14	41° 00.3'	142° 25.4'	青森県東方沖	43.0	647	6.2	1.1
194	2001/09/04 23:55	36° 45.0'	141° 30.1'	茨城県沖	45.0	204	5.2	2.0
195	2001/09/18 04:23	35° 25.2'	139° 48.7'	東京湾	45.0	15	4.2	31.1
196	2001/09/25 04:35	36° 18.6'	140° 06.2'	茨城県南部	71.0	89	4.3	1.9
197	2001/10/02 17:20	37° 43.5'	141° 49.0'	福島県沖	41.0	302	5.4	1.9
198	2001/10/18 06:30	36° 05.0'	139° 51.5'	茨城県南部	49.0	60	4.3	3.7
199	2001/11/17 01:31	35° 36.9'	140° 04.9'	千葉県北西部	73.0	28	4.4	9.2
200	2001/12/01 11:26	36° 00.0'	139° 02.6'	埼玉県秩父地方	141.0	83	4.1	2.5
201	2001/12/02 14:24	35° 38.7'	140° 07.1'	千葉県北西部	70.0	32	3.8	2.1
202	2001/12/02 22:01	39° 23.7'	141° 16.0'	岩手県内陸南部	122.0	446	6.4	3.5
203	2001/12/08 04:07	35° 32.2'	139° 08.9'	神奈川県西部	24.0	58	4.5	10.9
204	2001/12/19 00:07	35° 19.7'	139° 29.8'	相模湾	101.0	36	3.8	10.3

示すひとつの指標として、表面波の伝播に伴う地盤のひずみを考える。いま、 x 軸正方向に伝播する角振動数 ω の表面波に伴う地盤の変位を

$$u(x,t) = u_0 \sin(\omega t - kx) \quad (1)$$

と書く。ここに t は時刻、 k は波数である。ここでは変位の成分は特に限定しない。 x 軸に平行な成分であると考えても良いし、 x 軸に直交する成分であると考えても良い。このとき、地盤のひずみは (1) の空間微分として次式で与えられる。

$$\varepsilon(x,t) = -k u_0 \cos(\omega t - kx) \quad (2)$$

一方、地盤の速度は次式で与えられる。

$$v(x,t) = \omega u_0 \cos(\omega t - kx) \quad (3)$$

一方、波数 k と角振動数 ω の間には次の関係がある。

$$k = \omega / c(\omega) \quad (4)$$

ここに $c(\omega)$ は表面波の位相速度であり、 ω の関数である。(2) ~ (4) より、ひずみの振幅 ε_0 と速度の振幅 v_0 の間には次に示す関係が成立する。

$$\varepsilon_0 = v_0 / c(\omega) \quad (5)$$

ここでもしも分母の $c(\omega)$ が ω に依存しないならば、ひずみの振幅と速度の振幅は互いに比例関係があるということになり、つまり、地盤の速度振幅が大きいときに地盤のひずみ振幅も大きいということになる。実際には $c(\omega)$ が ω に依存するので少し議論が複雑になるが、5. に示すように、少なくとも当該空港において、基本モード

ラブ波や基本モードレイリー波の位相速度の ω への依存性は、少なくとも ω^{-1} に比例するというような強いものではない。このことを考慮すると、大きな速度振幅を有する表面波は大きなひずみ振幅を有しており、したがって線状構造物に及ぼす影響が大きいと考えて良いものと思われる。

そこで、議論が前後することにはなるが、上記 27 地震の加速度記録を積分して得た速度波形の非定常スペクトルを描いてみると (4.)、ほとんどの記録で周期 1 秒以上の成分が卓越している。これは既往の記録にみられる傾向であるが、防災上重要な将来の大地震において、一層マグニチュードの大きな地震を想定するとすれば、周期 1 秒未満の成分が卓越しにくい傾向は一層顕著になるものと考えられる。そこで、1 秒以上の周期を有する表面波を検討の対象とすることが合理的な選択であると考えられる。一方、表面波の周期と波長にも一定の関係がある。具体的には

$$\lambda = Tc(T) \quad (6)$$

なる関係がある。ここに λ は表面波の波長である。一般に、 $c(T)$ は T の増加関数なので、波長 λ も T の増加関数である。そこでやや議論が前後することになるが、当該空港における表面波の分散曲線 (5.) を参照すると、当該空港を伝播する周期 1 秒以上の表面波の位相速度は、少なくとも地盤が線形の状態では 400m/s 以上、したがって、表面波の波長は 400m 以上であると考えられる。以上のことを踏まえると、周期数 100m 以上の表面波をここで検討の対象とすることは、結果的には合理的であると考えられる。

周期 1 秒以上の表面波を解析対象とすることの妥当性については、別な観点からの傍証もある。清宮他 (1983) は川崎港海底トンネル (沈埋トンネル) に設置された地震計、鉄筋計、表面ひずみ計の記録の解析結果を報告しているが、得られたひずみのパワースペクトルを見ると、図示されたすべてのケースにおいて、周波数 1Hz 以上 (すなわち周期 1 秒以下) の成分は著しく小さい。川崎港海底トンネルと羽田空港は、直線距離はさほど離れておらず、シルトの厚く堆積した表層地盤は互いに似ており、また表面波の性質に影響しやすい深部地下構造も、鈴木 (1999) を見る限りさほど違うとは思えないことなどを考えると、羽田空港における線状構造物への影響を検討する際に、周期 1 秒以上の表面波を考えることは、この例からも妥当であると考えられる。

4. 解析手法

4.1 非定常スペクトル

以下においては上記の 27 地震によるボアホール F の記録 (ただし 2. で述べた設置方位誤差の補正を施したもの) に F-K 解析を適用して、表面波の特性を明らかにする。このとき、まず、解析に用いる時間区間ならびに周期帯域を決める必要がある。そこで、各々の記録の非定常スペクトルを描き、顕著な波群が到来している時間区間とその周期を求めることとする。

非定常スペクトルとは、地震動のどのような周期成分 (または周波数成分) がどのような時刻に到来しているかを縦軸に周期 (または周波数)、横軸に時間をとって示したものである。その算出方法は、地震波形からバンドパスフィルタによりある周波数帯域だけを取りだし、その包絡線を求めるということである。非定常スペクトルの算出方法をより具体的に述べると次の通りである。

まず加速度波形 $a(t)$ を積分して速度波形 $v(t)$ を得る。これに対して $(f-f_b/2, f+f_b/2)$ の範囲のバンドパスフィルタを作用させる。ここに f はバンドパスフィルタの中心周波数、 f_b はバンド幅である。次にバンドパスフィルタ通過後の波形 $b(t)$ の包絡線を求める。この包絡線の値はバンドパスフィルタの中心周波数 f (またはその逆数 η) と時刻 t の二変数関数となるが、これを非定常スペクトルと呼ぶ。

包絡線そのものにも種々の定義があるが、ここでは $b(t)$ の complex envelope (例えば渡辺・木村, 1994) の絶対値を採用する。complex envelope とは $b(t)$ を実部、 $b(t)$ の Hilbert 変換 $b_n(t)$ を虚部にもつような時間関数、すなわち

$$b_c(t) = b(t) + i b_n(t) \quad (7)$$

のことである。 $b_c(t)$ は複素数であるが、その絶対値をとると $b(t)$ の包絡線が得られる。 $b_c(t)$ のフーリエ変換 $B_c(\omega)$ は $b(t)$ のフーリエ変換 $B(\omega)$ と次の関係にあることがわかっている。

$$B_c(\omega) = 2B(\omega)U(\omega) \quad (8)$$

ここに $U(\omega)$ は単位階段関数である。そこで、 $b(t)$ をフーリエ変換して $B(\omega)$ を求め、式 (8) により $B_c(\omega)$ を求めてフーリエ逆変換すれば $b_c(t)$ が求まる。以上の過程

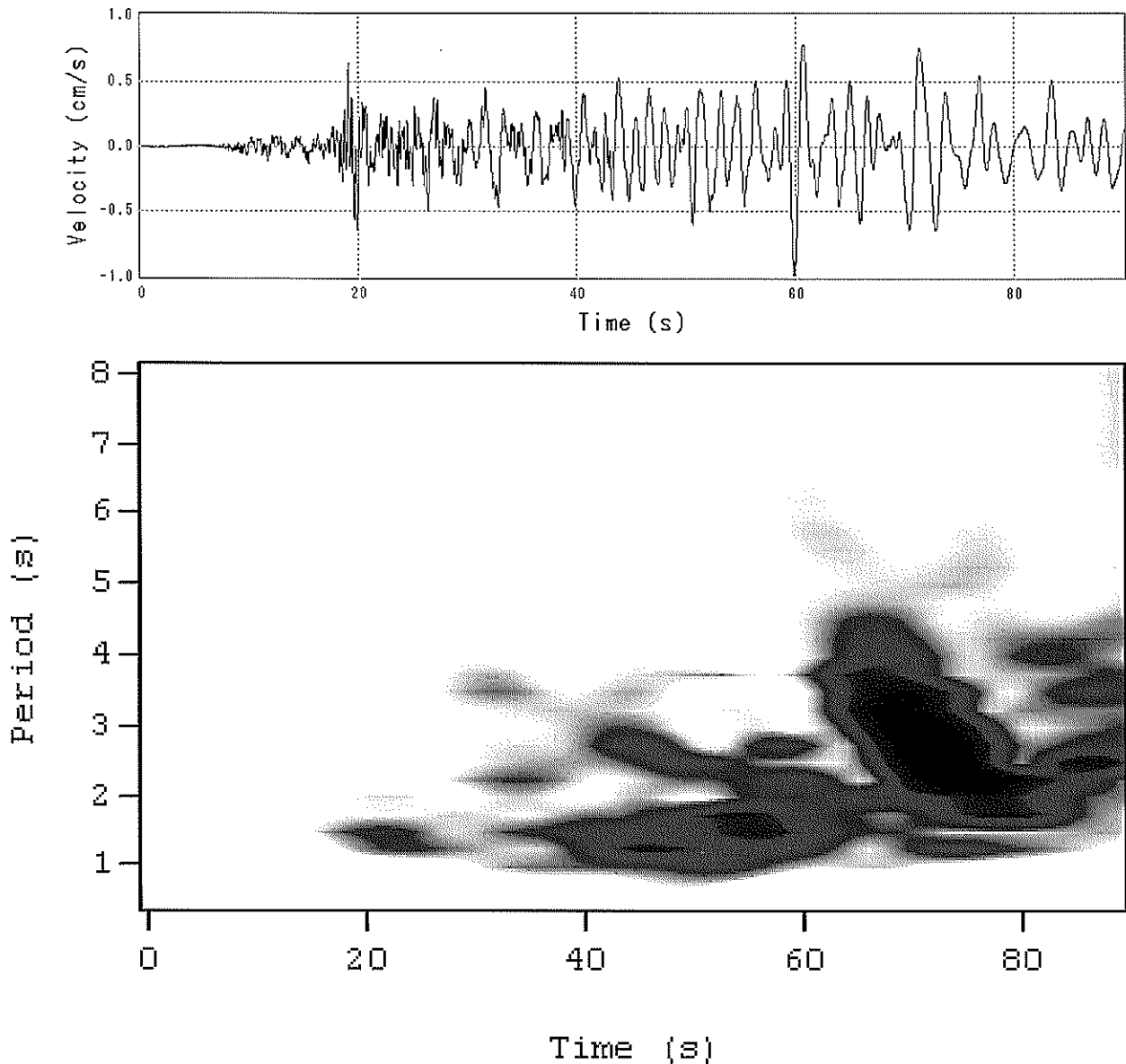


図-10 非定常スペクトル算出の一例（1996年3月6日山梨県東部の地震）
 （上段）IF地点の速度波形のNS成分
 （下段）速度波形のNS成分の非定常スペクトル

を踏めば、実際にHilbert変換を実行することなく complex envelopeを求めることができる。

このようにして得られた非定常スペクトルを、さらに No.1 ~ No.8 について重ね合わせることにより、顕著な波群が到来している時間区間とその周期を求める。この重ね合わせは、東西・南北・上下の各成分毎に行うので、最終的には一つの地震に対して各成分に対応する3つの非定常スペクトルが得られる。

ここではバンドパスフィルタのバンド幅を 0.1Hz とした。またバンドパスフィルタの中心周期は、0.5秒から8秒まで 0.25秒刻みとした。ここでは、周期1秒より短

周期側の表面波を解析対象とする必要がないことから、0.5秒より短周期側を非定常スペクトルの対象から外した。一方、長周期側では、当該地域に関する先験的な情報として関東平野では周期8秒程度のラブ波が卓越する観測事例が多く報告されていること（例えば座間, 1993）、8秒を越える周期に対しては記録の信頼性が十分でないことなどを考慮して、周期8秒までを非定常スペクトルの対象とした。

ここで、加速度波形 $a(t)$ でなく速度波形 $v(t)$ の非定常スペクトルを求めているのは、周期1秒~8秒の範囲でのスペクトル特性を把握しやすくするためである。

図-10に非定常スペクトル算出の一例を示す。上段は No.1 地点のボアホール F の記録（以後 1F 地点の記録と呼ぶ）の NS 成分を積分して速度波形を求めたものである。このとき積分は周波数領域で実施し、0.1Hz 以下の帯域をフィルターにより削除している。下段は速度波形の NS 成分から非定常スペクトルを求めたものである。非定常スペクトルは前述のように No.1 ~ No.8 の 8 地点について求めたものを重ね合わせている。速度波形は直達 S 波の到来時刻（時刻 20 秒前後）よりも、むしろ波形の後半部分で大きな振幅を示しており、最大速度は時刻 60 秒前後で生じている。非定常スペクトルを見ると、直達 S 波は周期 1-2 秒の成分が主であるが（時刻 20 秒）、時刻 70 秒 ~ 80 秒では周期 2-4 秒の成分が主である。このように、地震動の継続時間が長いことと、波形後半に周期 1 秒以上のやや長周期の成分が著しく卓越することが羽田空港の地震動の特徴として挙げられる。

このような非定常スペクトルを 27 のすべての地震について求め、F-K 解析の対象とする時間区間と対象周期を定めた。例えば図-10の例では、

- 1) 周期 1.3 秒で時間区間が 40-50 秒
- 2) 周期 1.5 秒で時間区間が 50-60 秒
- 3) 周期 3.0 秒で時間区間が 65-75 秒
- 4) 周期 2.3 秒で時間区間が 70-80 秒

のように時間区間と対象周期を選んだ。選択した周期と時間区間 (t_1, t_2) を表-8にまとめて示す。

4.2 F-K解析

ここでは非定常スペクトルに見られる各々の波群について伝播方向と位相速度を明らかにするため、地表の 8 地点で得られた加速度波形に F-K 解析 (Capon, 1969) を適用する。ここで実施する F-K 解析とは、波群の伝播方向と位相速度を様々に仮定して、各点の地震波の位相差を計算し、その位相差の分だけ各点の波形をずらした上で重ね合わせるものである。重ね合わせた後の波形に対し 4.1 で述べた方法で非定常スペクトルを計算し（ここでは加速度波形から非定常スペクトルを計算することとした）、対象周期での値を対象時間区間で平均して F-K スペクトルと称する。このとき、もしも仮定した伝播方向と位相速度が当該周期と当該時間区間において正しいならば、干渉によって波形が強め合い、F-K スペクトルは大きな値をとるはずである。このことを利用して伝播方向と位相速度を求める。

F-K 解析の手順をさらに詳しく述べると次の通りである。まず、各々の波群に対応する波数の x 成分 k_x と y 成分

k_y を次の通り定義する。波群の伝播方向が x 軸の正方向となす角を θ 、位相速度を c とするとき、

$$k_x = -(\omega/c) \cos \theta \quad (9)$$

$$k_y = -(\omega/c) \sin \theta \quad (10)$$

であるとする。言い換えれば、 (k_x, k_y) が与えられたとき、ベクトル (k_x, k_y) を 180 度回転させた方向が波の伝播方向を示すとともに、位相速度は次式で与えられる。

$$c = \omega / \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (11)$$

ここでは波群の伝播方向と位相速度を様々に仮定するが、このことはベクトル (k_x, k_y) を様々に仮定することと等価である。ベクトル (k_x, k_y) は

$$0 < k_x < \omega / c_{min} \quad (12)$$

$$0 < k_y < \omega / c_{min} \quad (13)$$

の範囲で任意の値をとるものとした。ここに $c_{min} = 400 \text{ m/s}$ とする。次に、仮定した (k_x, k_y) に基づいて各点の加速度波形の位相差を計算し、その位相差の分だけ各点の波形をずらして足し合わせたものを $s(t)$ とする。すなわち

$$s(t) = \sum_{i=1}^n a_i \left(t - (k_x x_i + k_y y_i) / \omega \right) \quad (14)$$

である。ここに $a_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, n$) は各々の観測点で得られた加速度波形、 (x_i, y_i) は観測点の座標である。 n は観測点数であり、本解析では 8 である。

次に F-K 解析の対象周期における $s(t)$ の非定常スペクトルの値を 4.1 に述べた手法で計算し、F-K 解析の対象時間区間 (t_1, t_2) における平均値を求める。この値を F-K スペクトルと称する。F-K スペクトルの値は仮定された (k_x, k_y) に対して一意に定まるので、 (k_x, k_y) を様々に仮定して F-K スペクトルの値が大きくなるような (k_x, k_y) を求める。

F-K スペクトルの算出例を示す。図-11 は前述の 1996 年 3 月 6 日山梨県東部の地震の NS 成分について F-K スペクトルを求めたものである。ここに対象周期は 1.5 秒、対象時間区間は 50-60 秒である。図では横軸に k_x 、縦軸に k_y をとっている。F-K スペクトルの値の大きいところが赤で示されている。図中の円は位相速度 800 m/s に対応する。また横軸に平行な図中の線は滑走路の方向を示している。同図から、波群はほぼ真西から到来していること、

表-8 F-K解析の対象とその結果(その1)

記録番号	成分	周期 (秒)	t1 (秒)	t2 (秒)	タイプ	到来方向 (度)	位相速度 (m/s)	波長 (m)	波の種類
1	EW	1.4	15	25	III	-	-	-	-
1	EW	1.8	35	45	I	293	2357	4243	Rayleigh波
1	NS	1.6	40	50	I	257	471	753	Love波
1	NS	2.0	70	80	II	270	544	1088	Love波
1	UD	1.8	35	45	IV	-	-	-	-
1	UD	2.0	65	75	IV	-	-	-	-
1	UD	3.1	55	65	IV	-	-	-	-
3	EW	2.1	40	50	I	306	1534	3221	-
3	EW	1.1	45	55	III	-	-	-	-
3	EW	1.4	60	70	III	-	-	-	-
3	NS	1.6	15	25	I	307	1715	2744	-
3	NS	1.6	55	65	III	-	-	-	-
3	UD	1.0	40	50	III	-	-	-	-
3	UD	1.6	50	60	IV	-	-	-	-
4	NS	1.2	20	30	III	-	-	-	-
5	UD	3.6	50	60	I	293	1347	4849	Rayleigh波
5	UD	3.5	75	85	IV	-	-	-	-
6	EW	2.0	15	25	I	61	4961	9923	実体波
6	EW	1.3	15	25	III	-	-	-	-
6	EW	1.5	35	45	III	-	-	-	-
6	EW	5.0	90	110	IV	-	-	-	-
6	EW	6.0	90	110	IV	-	-	-	-
6	NS	1.3	10	20	III	-	-	-	-
6	NS	1.5	30	40	I	260	2794	4191	Love波
6	NS	2.0	15	25	I	57	3922	7845	実体波
6	NS	1.5	50	60	I	245	1024	1536	Love波
6	NS	2.0	45	55	I	261	4339	8677	実体波
6	NS	2.0	100	110	II	95	539	1078	Love波
6	UD	5.0	90	110	IV	-	-	-	-
6	UD	4.0	140	160	IV	-	-	-	-
10	EW	1.3	30	40	I	339	439	571	Love波
10	EW	2.3	45	55	I	257	1644	3781	Rayleigh波
10	EW	1.5	50	60	II	206	1569	2353	Love波
10	EW	1.7	60	70	I	131	2236	3801	-
10	EW	2.1	75	85	I	227	1330	2792	-
10	EW	3.7	95	110	I	214	751	2779	Love波
10	NS	1.7	15	25	I	212	4650	7905	実体波
10	NS	2.0	30	45	I	257	6576	13151	実体波
10	UD	2.2	55	65	II	252	654	1440	Rayleigh波
10	UD	3.0	80	90	IV	-	-	-	-
15	EW	6.0	100	140	IV	-	-	-	-
15	EW	7.0	100	140	IV	-	-	-	-
15	EW	8.0	100	140	IV	-	-	-	-
15	NS	6.0	100	140	IV	-	-	-	-
15	NS	7.0	100	140	IV	-	-	-	-
15	NS	8.0	100	140	IV	-	-	-	-
15	UD	4.5	100	110	I	229	1643	7392	Rayleigh波
15	UD	6.0	100	110	I	223	1720	10318	Rayleigh波
20	EW	5.5	100	110	I	93	1720	9459	Rayleigh波
20	EW	4.7	110	120	I	185	4472	21019	実体波
20	EW	1.6	30	40	II	80	1221	1954	Rayleigh波

表-8 F-K解析の対象とその結果(その2)

記録番号	成分	周期 (秒)	t1 (秒)	t2 (秒)	タイプ	到来方向 (度)	位相速度 (m/s)	波長 (m)	波の種類
20	NS	1.6	35	45	II	64	1248	1996	Love波
20	NS	2.3	90	100	I	231	832	1913	-
20	NS	2.3	115	125	II	221	994	2286	-
20	UD	4.8	100	110	IV	-	-	-	-
20	UD	5.7	100	110	I	82	1386	7900	Rayleigh波
20	UD	3.2	125	135	I	153	1172	3750	Rayleigh波
21	NS	1.1	30	40	III	-	-	-	-
21	NS	1.6	35	45	II	278	4961	7938	実体波
21	NS	1.5	50	60	III	-	-	-	-
21	NS	2.1	75	85	I	269	718	1508	Love波
26	EW	1.0	10	20	III	-	-	-	-
26	EW	2.0	10	20	I	268	2341	4682	Rayleigh波
26	EW	1.5	25	35	I	10	4240	6360	実体波
26	EW	2.0	40	50	I	278	1654	3308	Rayleigh波
26	EW	1.8	50	60	I	13	1092	1912	Love波
26	NS	1.5	15	25	I	255	1017	1526	Love波
26	NS	1.5	40	50	I	271	1538	2308	Love波
26	NS	1.2	50	60	III	-	-	-	-
26	NS	1.8	70	80	I	289	715	1251	Love波
26	NS	3.0	65	75	IV	-	-	-	-
26	NS	5.0	50	60	I	241	945	4725	Love波
26	NS	8.0	20	60	I	244	950	7600	Love波
26	UD	1.0	15	25	III	-	-	-	-
26	UD	1.5	40	50	IV	-	-	-	-
26	UD	1.8	65	75	II	258	625	1094	Rayleigh波
26	UD	2.0	85	95	II	263	690	1380	Rayleigh波
27	EW	1.3	30	40	III	-	-	-	-
28	EW	1.8	20	30	I	68	5714	10286	実体波
34	NS	1.6	25	35	I	352	2425	3881	Rayleigh波
34	NS	1.4	45	55	III	-	-	-	-
34	NS	1.6	55	65	III	-	-	-	-
45	NS	1.4	25	35	III	-	-	-	-
53	EW	1.2	25	35	I	13	406	487	Love波
53	NS	1.1	25	35	III	-	-	-	-
53	NS	1.5	40	55	III	-	-	-	-
53	NS	3.8	80	100	II	120	1652	6279	Love波
55	EW	1.5	45	55	I	67	851	1276	Rayleigh波
55	NS	6.2	150	170	IV	-	-	-	-
55	NS	7.8	150	180	IV	-	-	-	-
55	UD	3.5	60	70	IV	-	-	-	-
55	UD	2.9	70	80	IV	-	-	-	-
55	UD	4.6	85	95	IV	-	-	-	-
55	UD	6.0	90	105	IV	-	-	-	-
61	EW	1.4	20	30	III	-	-	-	-
61	EW	1.8	50	70	I	288	1063	1913	Rayleigh波
61	EW	3.8	65	75	I	289	3763	14299	実体波
61	EW	3.5	90	100	I	329	3288	11508	-
61	EW	4.0	125	135	I	33	2060	8240	-
61	EW	5.5	150	160	IV	-	-	-	-
61	EW	7.0	170	180	IV	-	-	-	-
61	NS	1.6	20	30	I	53	1486	2377	-

表-8 F-K解析の対象とその結果(その3)

記録番号	成分	周期 (秒)	t1 (秒)	t2 (秒)	タイプ	到来方向 (度)	位相速度 (m/s)	波長 (m)	波の種類
61	NS	2.2	20	30	I	53	2036	4479	-
61	NS	3.3	70	80	I	352	2425	8004	Rayleigh波
61	NS	4.5	135	145	I	307	1075	4837	-
61	NS	6.0	140	150	IV	-	-	-	-
61	NS	8.0	125	135	IV	-	-	-	-
61	UD	3.5	110	130	I	276	1355	4741	Rayleigh波
61	UD	4.5	125	135	IV	-	-	-	-
61	UD	3.5	145	155	II	299	1197	4189	Rayleigh波
61	UD	4.0	165	175	IV	-	-	-	-
69	EW	1.2	25	35	III	-	-	-	-
69	NS	1.0	20	30	III	-	-	-	-
73	EW	5.0	30	45	I	50	4216	21082	実体波
73	EW	6.0	35	45	IV	-	-	-	-
73	EW	3.4	60	75	I	26	2691	9148	Love波
73	NS	4.6	35	45	IV	-	-	-	-
73	NS	6.3	30	45	IV	-	-	-	-
73	NS	7.2	50	65	IV	-	-	-	-
73	NS	3.6	50	60	I	45	3076	11077	-
73	NS	5.8	60	80	IV	-	-	-	-
73	UD	6.0	20	40	IV	-	-	-	-
73	UD	7.0	20	40	IV	-	-	-	-
73	UD	4.8	70	90	IV	-	-	-	-
73	UD	3.8	70	90	IV	-	-	-	-
74	EW	2.8	25	35	I	278	1654	4548	Rayleigh波
74	EW	2.5	30	40	I	274	1442	3606	Rayleigh波
74	EW	1.8	45	55	I	284	1550	2712	Rayleigh波
74	EW	2.5	55	65	I	259	1229	3071	Rayleigh波
74	EW	2.8	70	80	I	251	596	1639	Rayleigh波
74	EW	4.0	40	50	I	299	3123	6247	Rayleigh波
74	NS	1.3	40	50	III	-	-	-	-
74	NS	1.5	50	60	I	293	1489	2233	Love波
74	NS	3.0	65	75	I	270	725	2176	Love波
74	NS	2.3	70	80	I	262	598	1344	Love波
74	UD	2.5	35	45	I	273	1296	3239	Rayleigh波
74	UD	2.0	50	60	I	271	875	1751	Rayleigh波
74	UD	3.0	65	75	I	246	769	2306	Rayleigh波
74	UD	2.3	70	80	I	256	733	1649	Rayleigh波
85	EW	1.6	25	35	I	34	1182	1891	-
85	EW	1.2	45	55	III	-	-	-	-
105	EW	1.2	20	40	III	-	-	-	-
105	NS	1.8	60	70	I	189	1275	2294	Rayleigh波

位相速度は約1489m/sであることなどが推定される。さらに、解析対象がNS成分であり、波群の進行方向とほぼ直交しているので、この波群はラブ波であると推定され、その波長は周期と位相速度の積をとれば約2200mと求まる。

図-12は同じ地震の同じ成分についてF-Kスペクトルを求めたものであるが、ここでは対象周期は3.0秒、対象時間区間は65-75秒である。同図から、波群はほぼ真西から到来していること、位相速度は約725m/sであることなどが推定される。さらに、解析対象がNS成分であり、波群の進行方向とほぼ直交しているので、この波群はラブ波であると推定され、その波長は周期と位相速度の積をとれば約2200mと求まる。

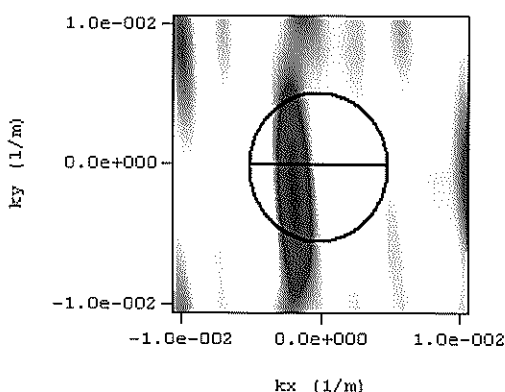


図-11 F-K スペクトルの算出例
(1996年3月6日山梨県東部の地震、
NS成分、周期1.5秒、時間区間50-60秒)

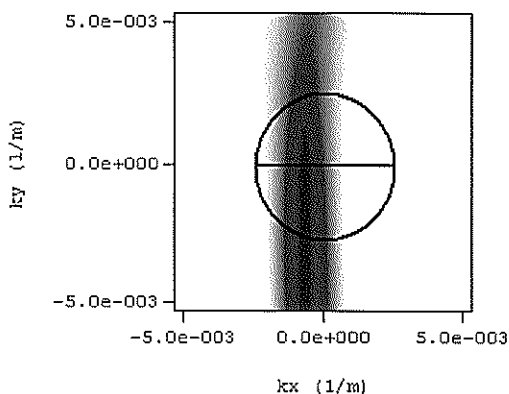


図-12 F-K スペクトルの算出例
(1996年3月6日山梨県東部の地震、
NS成分、周期3.0秒、時間区間65-75秒)

これらのF-Kスペクトルを見ると、スペクトルの値が大きい範囲が滑走路直交方向に長く延びていることがわかる。これは、羽田空港新A滑走路におけるアレーの特性によるものである。新A滑走路のアレーは滑走

路平行方向には2550mの長さを占めているのに対し、滑走路直交方向には500mの長さを占めているに過ぎない。このことから、滑走路直交方向については、F-K解析の解像度は滑走路平行方向と比べて若干劣る。同じ現象は、関西国際空港のアレー観測記録にF-K解析を適用した際にも見受けられた(野津・井合, 2001)。関西国際空港のアレーにおいても、アレーが滑走路直交方向に占める長さは滑走路平行方向に占める長さより大幅に小さかった。

さて、以上の解析を表-8に示すすべての記録と波群について実施する。そして、得られたF-Kスペクトルを次の4つのタイプに分類する。

Type-I: 解像度は十分であり、F-Kスペクトルに明瞭なひとつのピークが認められるもの

Type-II: 解像度は十分であり、F-Kスペクトルに互いに競合する複数のピークが認められるが、それらが k_x 軸上で等間隔ではないもの

Type-III: 解像度は十分であり、F-Kスペクトルに互いに競合する複数のピークが認められ、それらが k_x 軸上で等間隔であるもの

Type-IV: 解像度が十分でないもの

先に示した図-11と図-12はいずれもType-Iに属するスペクトルの例である。Type-II、Type-IIIおよびType-IVに属するスペクトルの例を図-13、図-14および図-15に示す。

Type-IIIのF-Kスペクトルは、滑走路平行方向のアレー間隔がほぼ等間隔(約500m)であるために、 x 軸に沿った波群の位相速度について複数の解釈が可能となることを反映したものであると考えられる。このことを詳しく説明すると次の通りである。いま仮に x 軸に沿ったアレー間隔が(実際にはそうでないが)すべて500mであるとする。ここで、波長500m、周期1秒の表面波が位相速度500m/sで x 軸の正方向に伝播するものとする。このとき x 軸に沿った各観測点では全く同一の波形が観測されることになる。逆に、そのようなデータが与えられたとき、次の3者の可能性をいずれも排除できないことになる。

- 1) 周期1秒、波長500mの表面波が $+x$ の方向に伝播している。
- 2) 周期1秒、波長500mの表面波が $-x$ の方向に伝播している。
- 3) 周期1秒の実体波が鉛直下方から到来している。

このときF-Kスペクトルには1)~3)に対応する3つのピークが k_x 軸上に等間隔で並ぶことになる。実際には x 軸に沿った観測点は全く等間隔ではないから、この

傾向は弱められることになるが、それでも、実際に F-K スペクトルを描いてみると、Type-IIIすなわち k_x 軸上に等間隔でピークの並ぶスペクトルが少なからず得られ

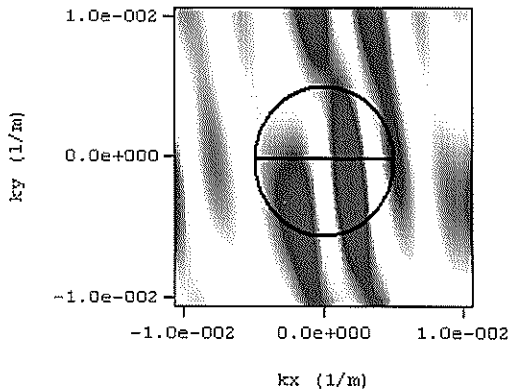


図-13 Type-II の F-K スペクトルの例
(1989年10月14日伊豆大島近海地震,
EW成分, 周期1.5秒, 時間区間50-60秒)

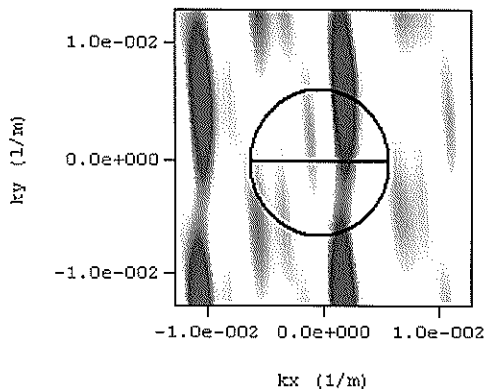


図-14 Type-III の F-K スペクトルの例
(1990年8月5日箱根地方の地震,
NS成分, 周期1.2秒, 時間区間50-60秒)

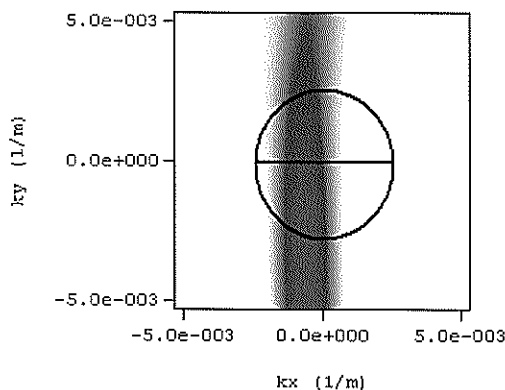


図-15 Type-IV の F-K スペクトルの例
(1990年8月5日箱根地方の地震,
NS成分, 周期3.0秒, 時間区間65-75秒)

る。この場合、伝播方向と位相速度の推定結果には信頼性がないことになるから、当該波群は解析対象から除外する。一方、F-K スペクトルに複数のピークが認められる場合でも、それらが k_x 軸上で等間隔ではない場合 (Type-II) は、各々のピークに物理的意味があると考えられる。

さて、得られた F-K スペクトルのタイプに応じて、その後の解析方針は次の通りとする。まず、得られたスペクトルが Type-I であれば、そのピークの位置から位相速度と伝播方向を読みとる。次に、得られたスペクトルが Type-II であれば、複数のピークからもっとも高いピークを選び、そのピークの位置から位相速度と伝播方向を読みとる。得られたスペクトルが Type-III もしくは Type-IV であれば、当該波群は解析対象から除外する。

次に、Type-I および Type-II のスペクトルの場合、波の種類について判断を行うが、この判断は次の考え方で行うものとした。まず、位相速度がかなり大きいとき、具体的には 3400m/s より大きいときには実体波と判断することとした。この判断は実はさほど厳密なものとは言えない。波群の位相速度が大きい場合、その波群は実体波である可能性もあるが、表面波の高次モードである可能性もある。この判断を厳密に行うことは必ずしも容易ではない。しかし、後述のように、線状構造物への影響という観点からは、表面波の中で最も重要なのは基本モードであり (波長が短いので線状構造物に影響を及ぼしやすい)、ここでの解析では基本モードの表面波を見逃さないことが最も大事であると考えられる。仮に高次モードの表面波を実体波と見なしてしまったとしても、そのことが本研究の結論に影響を及ぼすことは考えられない。そこで前記のような比較的簡易な判断基準で判断を下すこととした。次に、波が表面波と判断された場合、それがレイリー波であるかラブ波であるかの判断を次のように行う。まず、解析対象成分が上下成分であればレイリー波と判断する。次に、解析対象成分が水平動であれば、波群の進行方向と解析対象成分の関係からレイリー波であるかラブ波であるかを判断する。具体的には進行方向ベクトルと解析対象成分のなす角が $\pm 30^\circ$ 以内であればレイリー波と判断し、なす角が $60^\circ \sim 120^\circ$ であればラブ波と判断する。なす角が上記以外の場合、レイリー波であるかラブ波であるかの判断は行わない。なお、波群をレイリー波であると判断する場合、上下動と水平動の相関性についても検討するのが本来の方法であろう。しかし、ここでは、解析対象とする記録が多ことから、判断を効率化するために前記のような判断基準を設けることとした。

5. 解析結果

5.1 表面波の伝播方向

3. で選択した 27 の地震について、4.1 で述べた方法で非定常スペクトルを描き、解析対象とする周期と時間区間を選択した。解析対象周期と時間区間を表-8 に示す。なお 27 の地震の中には解析対象周期と時間区間が表-8 に示されていない地震もあるが、これは非定常スペクトルを描いた結果、記録に顕著な表面波が含まれないと判断した地震である。さて、各々の解析対象周期と時間区間に対して 4.2 で述べたように F-K 解析を適用した。得られた F-K スペクトルを 4.2 の判断基準に従って Type-I から Type-IV に分類し表-8 に示す。このうち Type-I または II と判定された F-K スペクトルについては到来方向、位相速度を求め表-8 に示す。さらに可能なものについてはレイリー波、ラブ波、実体波などの区別を行い表-8 に示す。

これらの結果のうち、ここでは表面波の到来方向について述べる。図-16～図-34 に表面波の到来方向と地震の震央方向の関係を示す。これらの図において★印は震央方向を示している。前記の手順で表面波と判定されたすべての波群の到来方向を、レイリー波もしくはラブ波の判別を行わなかったものを含め、示している。なおレイリー波と判別されたものには記号「R」を、ラブ波と判別されたものには記号「L」を付している。これらの図から、多くの地震では、震央の方向と表面波の到来方向は互いに整合していることがわかる。ただし、それらが全く整合していない地震もある。それらは地震番号 5, 6, 20, 53, 55, 61 および 105 の地震である。それらの地震の震源深さを震央距離で除した値を見ると、1.04, 0.66, 0.69, 1.09, 0.94, 0.03, 2.80 となり、地震番号 61 の地震（1994 年北海道東方沖地震）を除いては、震源の比較的深い地震であることがわかる。このことから、震源の深い地震では、必ずしも震央と観測点の途中にある盆地端部で表面波が発生するのではなく、震央とは関係ない方向にある盆地端部で表面波が発生する傾向があるのではないかと推察される。さて、1994 年北海道東方沖地震では、震央に比して震源が浅いにも関わらず、震央の方向と表面波の到来方向が整合しない結果となった。よく見ると、震央方向と表面波の到来方向に全く関係がないわけではなく、表面波の到来方向は震央方向から西側に集中している。このことから、ひとつ推定として、震央方向から関東平野に入射した表面波が北西側から回り込んできているのではないかと考えられる。

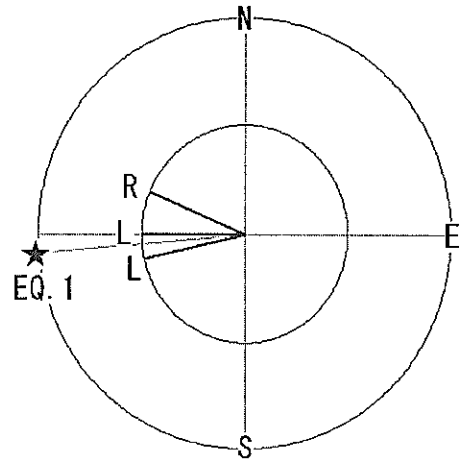


図-16 表面波の到来方向
(1988年9月5日山梨県東部の地震)

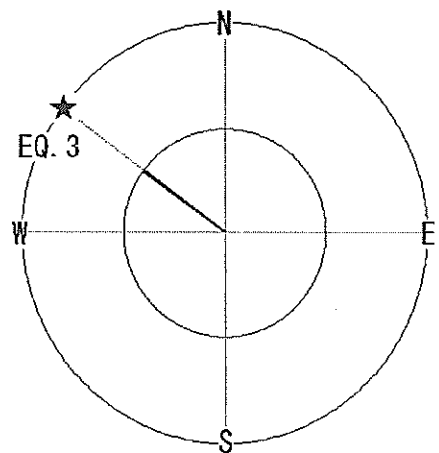


図-17 表面波の到来方向
(1988年9月29日埼玉県西部の地震)

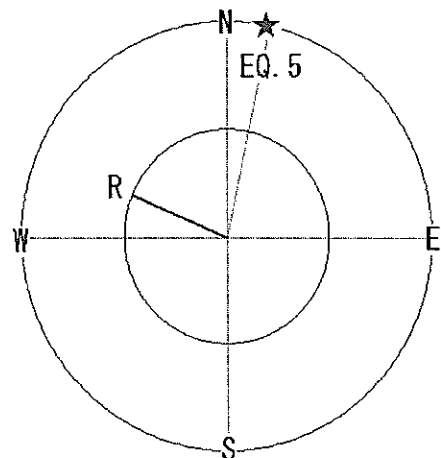


図-18 表面波の到来方向
(1989年2月19日茨城県南西部の地震)

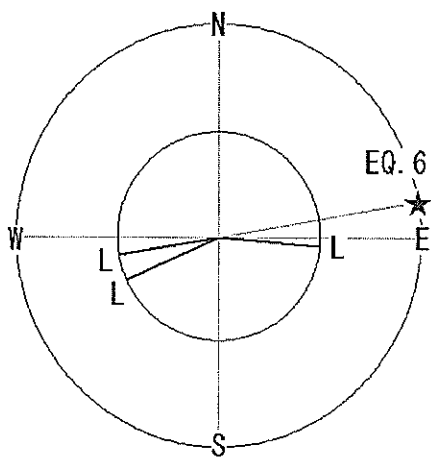


図-19 表面波の到来方向
(1989年3月6日銚子付近の地震)

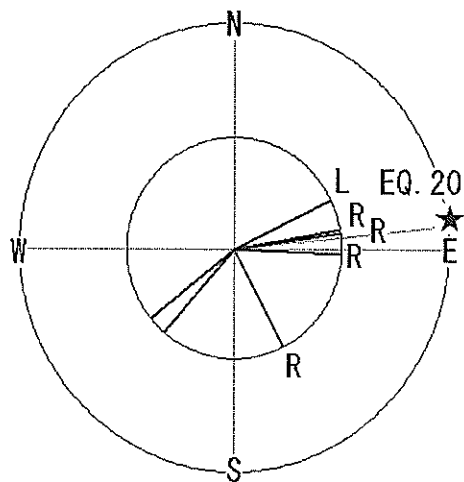


図-22 表面波の到来方向
(1990年6月1日銚子付近の地震)

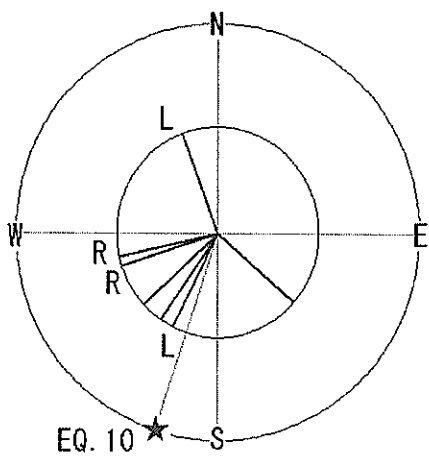


図-20 表面波の到来方向
(1989年10月14日伊豆大島近海地震)

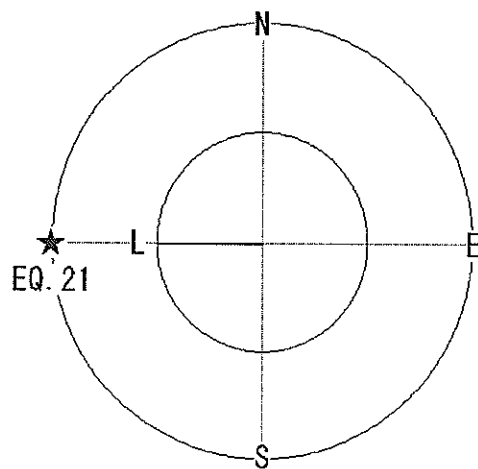


図-23 表面波の到来方向
(1990年6月5日神奈川県地震)

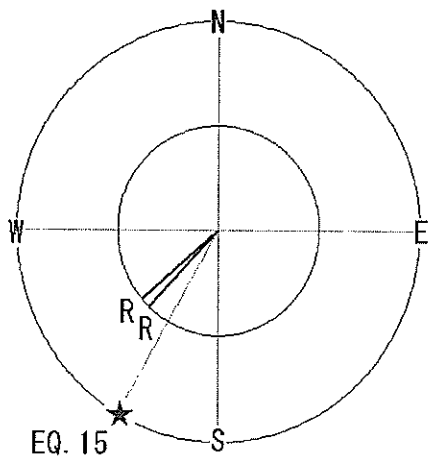


図-21 表面波の到来方向
(1990年2月20日伊豆大島近海地震)

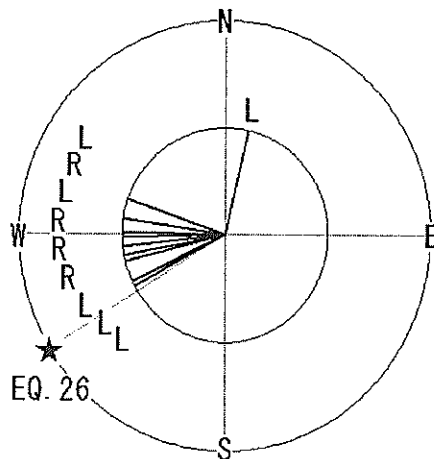


図-24 表面波の到来方向
(1990年8月5日箱根の地震)

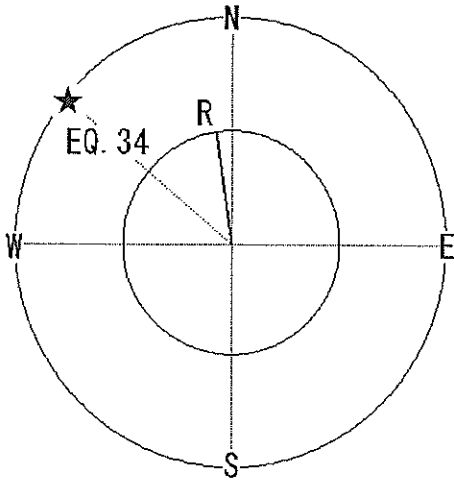


図-25 表面波の到来方向
(1991年7月14日群馬県北西部の地震)

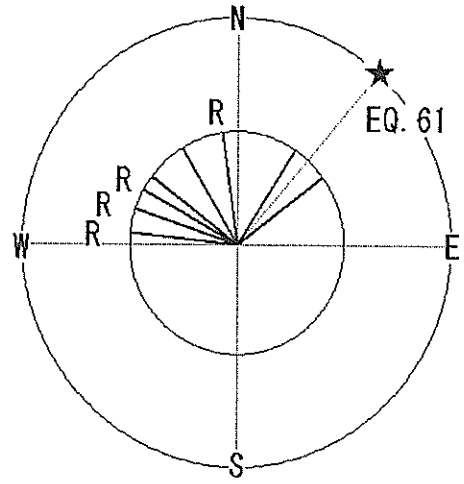


図-28 表面波の到来方向
(1994年10月4日北海道東方沖地震)

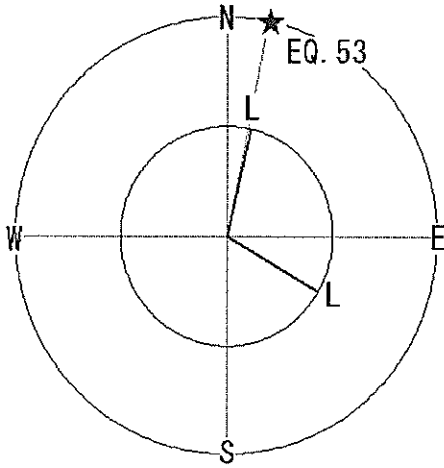


図-26 表面波の到来方向
(1993年5月21日茨城県南西部の地震)

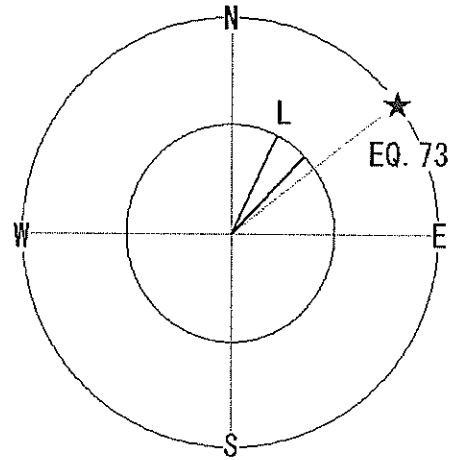


図-29 表面波の到来方向
(1996年2月17日福島県東方沖の地震)

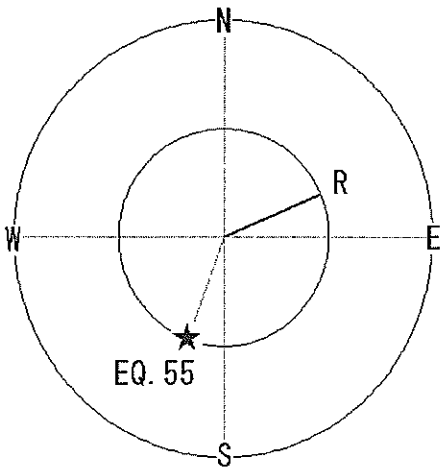


図-27 表面波の到来方向
(1993年10月12日東海はるか沖の地震)

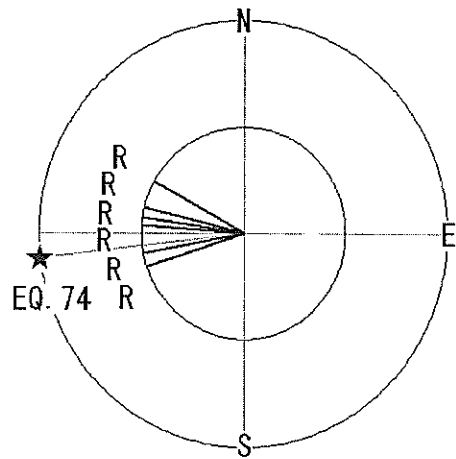


図-30 表面波の到来方向
(1996年3月6日山梨県東部の地震, EW成分)

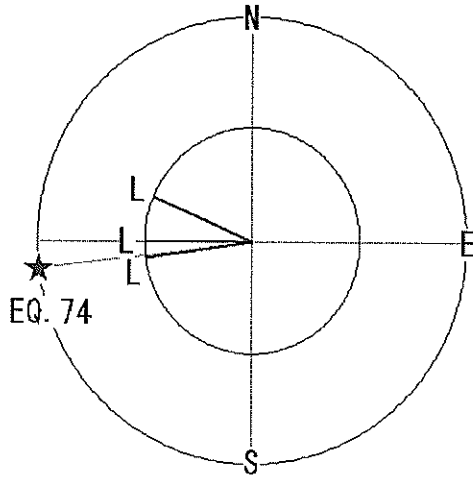


図-31 表面波の到来方向
(1996年3月6日山梨県東部の地震, NS成分)

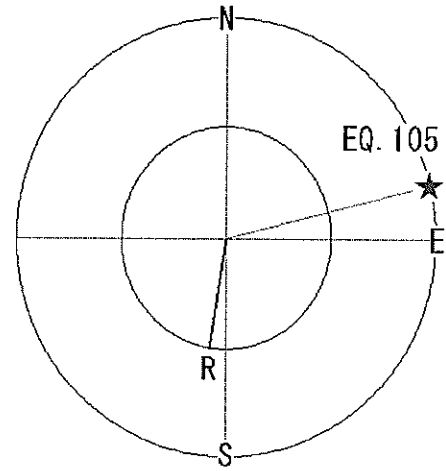


図-34 表面波の到来方向
(1998年8月29日千葉県中部の地震)

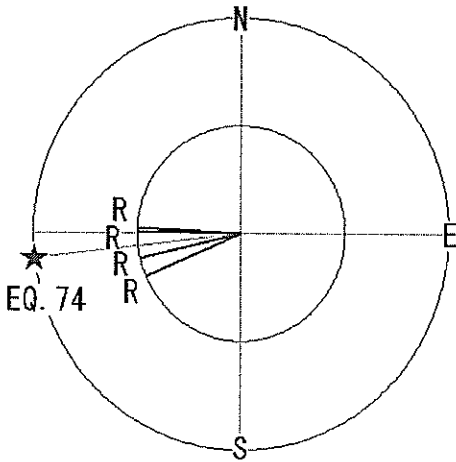


図-32 表面波の到来方向
(1996年3月6日山梨県東部の地震, UD成分)

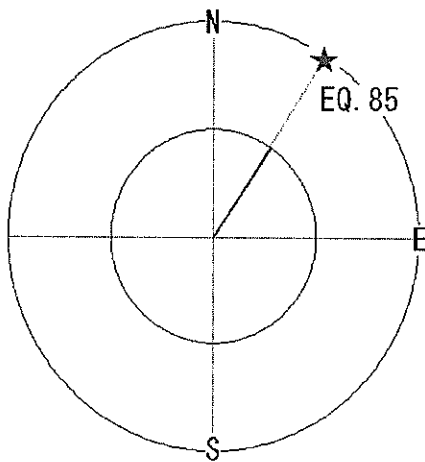


図-33 表面波の到来方向
(1997年3月23日茨城県南部の地震)

5.2 表面波の位相速度と波長

次に表面波の位相速度と波長について検討する。図-35は、前記の検討でラブ波と判定された波群について、その位相速度と周期の関係をプロットしたものである(■印)。一方、図-36は前記の検討でレイリー波と判定された波群について、その位相速度と周期の関係をプロットしたものである(■印)。

これらのプロットに加えて、図-35および図-36には、表-9に示す羽田空港の地下構造モデルに基づいて求めたラブ波とレイリー波の理論分散曲線(例えば Aki and Richards, 1980)を示している。それぞれ実線が基本モード、波線が高次モードである。表-9の地下構造モデルは、地質学的な情報(鈴木, 1999)に基づいて設定し、浅い部分については観測結果(■印)と整合するように若干の試行錯誤を行って定めたものであるが、図-35および図-36に示すように、ラブ波、レイリー波とも基本モードについてはほぼこの地下構造モデルで観測事実を説明できることがわかる。また高次モードについても、観測事実と大きく矛盾しているところはない。このことから、羽田空港の深部を含めた地下構造のモデルとして表-9に示すモデルは一定の妥当性を有すると考えられる。

さて、1.で述べたように表面波は、その振幅が同じであれば、波長が短いほど線状構造物に与える影響が大きい。ところで、一般にラブ波、レイリー波とも基本モードは高次モードよりも位相速度が遅く、したがって波長が短い。そこで、線状構造物への影響を考える立場からはラブ波、レイリー波とも基本モードを検討対象とすることが一般的である。そこで、次にラブ波とレイリー波

の基本モード同士を図-35及び図-36で比較すると、当該空港について言えば、周期1秒～8秒の広い周期帯域で、ラブ波の位相速度はレイリー波の位相速度を越えることはない。つまり、当該空港では、ラブ波基本モードが最も位相速度が小さく、したがって最も波長が短い表面波であることが理解される。このラブ波基本モードの位相速度は、周期1秒で約400m/s、周期3秒で約750m/sであることがわかる、また、波長については、周期1秒で約400m、周期3秒で約2250mであることがわかる。これらの数値は、今後、当該空港において滑走路、沈埋トンネル、埋設パイプライン等の耐震性を検討する際には有用な資料となる。ただし、8.で述べるように、ここで得られた波長等の数値は、空港周辺の地盤が線形に近い状態での値であることに留意する必要がある。

表-9 羽田空港の地下構造モデル

層厚 (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	密度 (ton/m ³)
50.0	1600.0	250.0	1.80
120.0	1800.0	410.0	1.90
1580.0	1900.0	800.0	1.90
1250.0	2400.0	1200.0	2.10
3100.0	5000.0	2600.0	2.60
	6000.0	3400.0	2.60

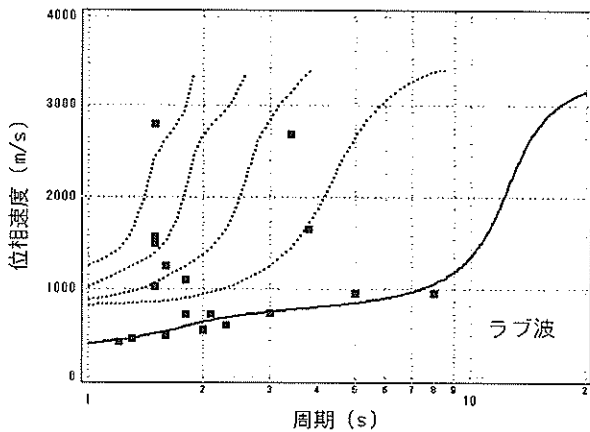


図-35 羽田空港を伝播するラブ波の位相速度と周期の関係 (分散曲線)

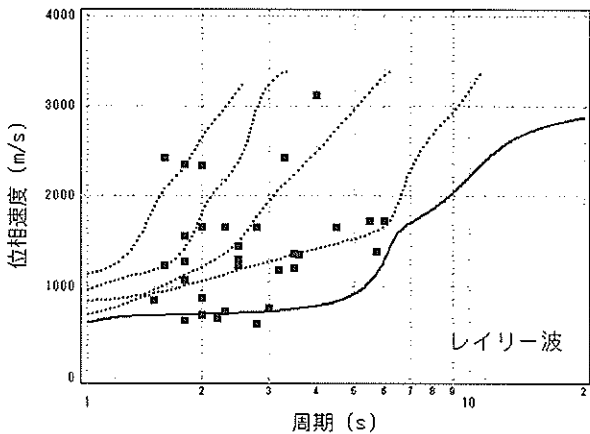


図-36 羽田空港を伝播するレイリー波の位相速度と周期の関係 (分散曲線)

さて、ここで得られた結果を既往の研究(土田他, 1981)と比較してみる。土田他(1981)は旧 C 滑走路に設置されたアレーの記録について解析を行い、地表面を見かけ上伝播しているように見える地震波(表面波とは明言していない)の(見かけの)伝播速度は1.2～10.1km/s、波長は1.4～11.1kmであるとしている。これらは、本研究で得られた値と比較してかなり大きな値であることに気付く。この原因としては、旧 C 滑走路に展開されたアレーが水平面内だけを見れば滑走路に沿った直線的な配置であり、滑走路に対して平行に入射する表面波は良いが、滑走路に対して斜めもしくは直角に入射する表面波については、その波長を実際よりも長く評価する性質があったことが原因であると推察される。

6. 地震応答計算における位相差の与え方の提案

滑走路、沈埋トンネル、埋設パイプラインなど線状構造物の耐震性を検討するためには、まず表面波の特性を十分に把握することが重要であるとの問題意識から、羽田空港新 A 滑走路の地震観測結果に基づき、当該空港の表面波の特性について検討してきた。ここではこの結果を線状構造物の地震応答計算において適切に活用するための方法について提案を行う。

線状構造物の耐震性を検討する際に、地表に沿った相異なる二点間の相対変位が重要であるが、相対変位の諸要因の中で、地盤が水平成層に近い場所では表面波の伝播が最も重要である。羽田空港の地盤は、完全に水平成層であるとは言いがたいが、上記のことが成り立つことはすでに確認している(1.)。そこで、線状構造物の地震応答計算における位相差の設定は、表面波の特性に基づいて行われるべきである。表面波の性質として重要な点として、位相速度が周期に応じて異なること(分散性)、

また、位相速度と周期の関係（分散曲線）が場所毎の地下構造を反映して著しく異なることなどが挙げられる。これらの性質を適切に反映した位相差の設定方法として、ここでは次のことを提案する。

いま、原点において地震応答計算用の入力地震動 $a_0(t)$ が与えられているものとする。このとき、任意の点 (x, y) における入力地震動 $a(t)$ を次の考え方で与える。

まず、 $a_0(t)$ のフーリエ変換 $A_0(\omega)$ を計算する。次に、 $a(t)$ のフーリエ変換 $A(\omega)$ を次式により計算する。

$$A(\omega) = A_0(\omega) \exp[-i(k_x x + k_y y)] \quad (15)$$

$$k_x = (\omega/c(\omega)) \cos \theta \quad (16)$$

$$k_y = (\omega/c(\omega)) \sin \theta \quad (17)$$

ここに $c(\omega)$ はラブ波基本モードの位相速度であり、図-35に実線で示すものである。一方 θ は表面波の進行方向が x 軸正方向となす角である。得られた $A(\omega)$ をフーリエ逆変換して $a(t)$ を得る。

ここでラブ波基本モードを採用するのは、少なくとも当該空港においてはラブ波基本モードが最も波長が短く、ラブ波基本モードを採用しておくことが最も安全側だからである。一方 θ については、表面波の進行方向について先験的に情報が与えられているときには、それに基づいて θ を定めることも可能と思われるが、一般には、試行錯誤を行い、構造物にとって最も危険となるような θ を選ぶ。

以上の考え方は、

- 1) 位相速度を周期に応じて与えることができる。
- 2) 位相速度と周期の関係（分散曲線）の原位置での観測結果に基づいており精度が高い

という大きな利点を有している。既往の耐震設計事例の中には阪神高速道路淀川左岸線のように原位置で得た表面波の位相速度に基づいて位相差を設定している例もあるが（足立他，2001），この場合、位相速度が周期に依存することまでは考慮されていない。上記の提案によれば、位相速度が周期に依存する性質まで考慮できることになるので一層合理的である。

7. 結論

本研究では羽田空港の新 A 滑走路に展開された地震計群列（アレー）の記録を利用し、地震波の一種である表面波の基本的な特性（伝播方向、位相速度、波長）を明らかにした。表面波の特性を知ることは、滑走路、沈

埋トンネル、埋設パイプラインなど線状構造物の耐震性を議論する際には極めて重要である。なぜなら、線状構造物の各部分に作用する地震動は位相差をもっており、その位相差は水平成層とみなせる地盤では主に表面波に起因すると考えられるからである。このとき、表面波の振幅が同じであれば、波長が短いほど構造物にとって厳しい条件となる。表面波の特性は場所毎の地下構造を反映して著しく異なることが知られている。従って、原位置での表面波の特性をアレー観測の結果に基づいて明らかにすることが望ましい。ここでは新 A 滑走路のアレー観測結果に F-K 解析を適用して、当該空港における表面波の特性を明らかにした。

解析の結果、羽田空港を伝播する表面波のうち、最も波長の短いラブ波基本モードの位相速度は、周期 1 秒で約 400m/s、周期 3 秒で約 750m/s であることがわかった。また、波長については、周期 1 秒で約 400m、周期 3 秒で約 2250m であることがわかった。これらの値は地盤が線形に近い状態での値であることに留意する必要がある。観測で得られた表面波の分散曲線（位相速度と周期の関係）と、既往の文献に基づいて設定した当該空港の深部地下構造モデルによる理論分散曲線とは良い一致を示す。

8. あとがき

本研究で明らかにされた羽田空港の表面波の基本特性は、当該空港において滑走路、沈埋トンネル、埋設パイプライン等の耐震性を検討する際には有用な資料となる。ただし、ここで得られた波長等の数値は、空港周辺の地盤が線形に近い状態での値であることに留意する必要がある。将来の大地震に際しては、空港周辺の表層地盤は多かれ少なかれ非線形挙動を示すものと考えられる。もしも、表層地盤が非線形挙動を示す場合の表層地盤の挙動を等価線形の考え方で近似することが許されるならば、表層地盤が非線形挙動を示す場合の表面波への影響についても、想像することは可能である。すなわち、等価線形の考え方に従って、表層地盤を線形時よりも S 波速度の小さな線形弾性体に置き換えることになるのだから、表面波の位相速度は線形時より遅くなり、波長は線形時より短くなることが想定される。しかしながら、そもそも表層地盤の非線形性が表面波に及ぼす影響をこのように等価線形の考え方でモデル化できるのかどうかという点について、現段階では全く知見が得られていないのが現状である。

この分野の研究が立ち後れている最大の原因は、地盤の非線形性が表面波に及ぼす影響を捉えた観測事例が存在しないことである。本研究で見てきたように、地震動のアレー観測は表面波の挙動を解明するための必須のツールであり、地震動がアレーの枠組みの中で観測されない限り、表面波に関する詳しい検討はできないと言っても過言ではない。ところが、地震動のアレー観測を実施している場所は全国的にもけて多いとは言えず、地盤の非線形挙動を伴うような強い地震動がアレーの枠組みの中で観測された事例がこれまでに存在しないのはやむを得ないことである。地震動に関する研究が実際のデータに裏打ちされてはじめて説得力を持ち得ることを考えると、地盤の非線形挙動が表面波に及ぼす影響を解明していくためには、地盤の非線形挙動を伴うような強い地震動をアレーの枠組みの中で捉えることがぜひとも必要である。このような意味においても、我が国の空港における地震動のアレー観測は重要な社会的使命を担っていると考えられる。

(2002年2月14日受付)

謝辞

本研究では羽田空港新 A 滑走路に設置されたアレー観測システムの記録を使用していますが、この観測システムは運輸省第二港湾建設局により整備され、運輸省第二港湾建設局及び国土交通省関東地方整備局によりメンテナンスがなされてきたものです。観測に係るこれらの機関の努力に対し敬意を表します。同観測システムによる記録の収集・整理と解析は国土交通省関東地方整備局から当所への受託業務となっています。

参考文献

足立幸郎, 中本覚, 鈴木直人 (2001): 開削トンネルの縦断方向耐震設計に考慮する地震波長と構造目地間隔に関する研究, 第 26 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1205-1208.

- 大崎順彦 (1994): 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会.
- 川瀬博 (1993): 表層地質による地震波の増幅とそのシミュレーション, 地震, 第 2 輯, 第 46 卷, pp.171-190.
- 清宮理・西澤英雄・横田弘 (1983): 川崎港海底トンネルでの地震応答観測と応答解析, 港湾技術研究所報告, 第 22 卷, 第 3 号, pp.253-299.
- 座間信作 (1993): やや長周期の地震動, 地震, 第 2 輯, 第 46 卷, pp.329-342.
- 鈴木宏芳 (1999): 首都圏における深部地質構造と地震活動, 地学雑誌, Vol.108, pp.336-339.
- 土田肇・南兼一郎・清宮理・倉田栄一・西沢英雄 (1981): 地震動の多点同時観測に基づくパイプラインの応力の検討, 港湾技術研究所報告, 第 20 卷, 第 4 号, pp.3-40.
- 土田肇・井合進 (1991): 建設技術者のための耐震工学, 山海堂.
- 土田肇・井合進・倉田栄一 (1983): 2 次元アレーによる地震動の観測と解析 (第 1 報) -1977 年 6 月 4 日東京湾北部の地震-, 港湾技術研究所報告, 第 22 卷, 第 2 号, pp.327-378.
- 野津厚・井合進 (2001): 経験的サイト増幅特性に基づくシナリオ地震の地震動の試算, 港湾技術研究所資料, No.991.
- 野津厚・深澤清尊・佐藤陽子・玉井伸昌・菅野高弘 (2002): 港湾地域強震観測年報 (1999&2000), 港湾空港技術研究所資料, No.1016.
- 渡辺孝英・木村正彦 (1994): 経験的地震動評価, 地震動-その合成と波形処理, 第 2 章, 鹿島出版会, pp. 107-142.
- Aki, K. and Richards, P.G. (1980): Quantitative Seismology. Theory and Methods, Vol.1, W.H. Freeman.
- Capon, J. (1969): High-resolution Frequency-wavenumber Spectrum Analysis, *Proc. of IEEE*, 57(8), pp.1408-1418.

港湾空港技術研究所資料 No.1022

2002.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL.0468(44)5040 URL.<http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 あんざい

Copyright © (2002) by PARI

All rights reserved. No part this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。