

## 地盤の常時微動とその基本的解析

東山 勇・吉田 力・石田朋靖\*

(山形大学農学部農業工学講座・\*宇都宮大学農学部農業環境工学科)  
(平成4年9月1日受理)

### Field Observation and Its Fundamental Analysis on Microtremors of the Ground

Isamu HIGASHIYAMA, Chikara YOSHIDA and Tomoyasu ISHIDA

Section of Agricultural Engineering, Faculty of Agriculture,  
Yamagata University, Tsuruoka 997, Japan

\* Faculty of Agriculture, Utsunomiya University,  
Utsunomiya 321, Japan

(Received September 1, 1992)

#### Summary

On May 26, 1983, a strong earthquake and subsequent tidal waves hit coastal areas of northern Japan along the Sea of Japan, causing heavy and extensive damage. The magnitude of the quake was 7.7 on the Richter scale, and the Meteorological Agency designated the earthquake as the "1983 NIHONKAI CHUBU Earthquake" (the "1983 Central Sea of Japan Earthquake").

Hachirogata was among the areas that suffered severe damage. Both the frontal dike and the east intercepting drain dike had been built on a sand bed that had been laid to improve the existing ground layer. The west intercepting drain dike was also on relatively sandy ground. The Japan Sea Earthquake was so severe that there was liquefaction along both the east and west dikes. A record of accelerations in the dikes was obtained with a seismographic recorder (17) at SMAC-B (see Fig. 1; the record's location is indicated on Fig. 1).

Sand volcanoes caused by liquefaction were observed at a site by the outer base of the east intercepting drain dike, parallel to the longitudinal direction of the dike (2). Field investigation and the measurement of microtremors had been carried out (1). Those points shown in Fig. 1, indicated by a solid circle. The analytical results of microtremors are affected by many factors concerned with the measuring conditions or analytical treatments. In order to make clear those factors the fundamental study had been proceeded. We evaluated the accuracy of the analytical method of microtremors. Future comparative studies of microtremors will serve as a basis for understanding damage caused by liquefaction.

#### I. はじめに

わが国は世界でも有数な地震国の一つであるが、常時微動の震動性状が自然地震とも深い関係があることがわかってきている。また、常時微動は弾性波探査や、電気探査

などのように、地盤の構造を知るための物理探査の一手法として利用され、地震工学の分野だけでなく土質工学、建設工学の分野にも役立っている。特に、新潟地震、日本海中部地震などにより飛躍的に研究が進んだ液状化問題との関連<sup>1,2)</sup>など、今後、益々研究が期待されている。

本研究は、当初、導入した、常時微動解析装置(コンピュータは OKITAC-system 50)による研究成果のうち、特に基本的問題を検討した部分について報告するものである。また、過去、長年にわたって卒論研究として、様々な地盤の常時微動解析を行ってきた<sup>4)~12)</sup>結果、膨大なデータを集めることができたが、本研究では、基本的な諸問題、例えば、高速フーリエ変換(FFT)における観測波形の問題、サンプリング周期の検討、さらに、測定上の問題として、低域フィルタの有無、振動の方向性に対する問題などを検討する。そのためには、地盤が均一で大きな構造物がそばにない所と、堤防のような、すなわち構造の明確な長大構造物のある所をはっきり区別でき、しかも何年間も測定を行っている八郎潟干拓地地盤が最適と考え、それを対象に検討することにした。

## II. 常時微動解析装置

### 1. システム構成

この装置は、波形収録部とシグナルプロセッサからなる。波形収録部は垂直、水平方向振動を、それぞれ  $\mu\text{m}$  オーダーで測れる高感度長周期振動計(通称、換振器)、増幅器、データレコーダ、モニタとしてレクチグラフ、DC-AC インバータ等からなる。振動計の固有周波数は 1 sec であるが、増幅器と組み合わせることにより、電気的に固有周波数を変化することが出来るように設計されており、1 sec, 5 sec の切り替え選択が出来る。

シグナルプロセッサは OKITAC-system 50 モデル40 をメインにディスプレイ、ラインプリンタ、XYプロッタなどの周辺機器で構成されている。

### 2. 測定方法

常時微動とは、測定地点から遠くはなれたところで、交通機関など人為的振動源によって発生し、固有振動をもつ地盤によって選択吸収を受け、観測地点に到達した波と考えられている。一般に 0.5 Hz から数 Hz 以内の波であるが、地盤の固有振動は地下構造やそれを構成する物質、水分状態などの要因に支配される。

測定は、東西、南北の水平換振器、垂直換振器の計3器を1セットとし、振動変位による励起電圧変化を測定する。その測定電圧は、増幅器を通してデータレコーダの磁気テープにアナログ量として書き込まれる。測定時間はトラブルその他を考慮して少なくとも約5分程度とし、テープに記録された波形はレクチグラフでモニタし、サンプリング場所を決める。ただし、インバータなど電

源機器を携行する煩雑さもあり、最近は殆ど、レクチグラフを測定現場には携行せず、単に電圧計による変化をモニタするにとどめている。しかし、特殊な条件の現場でない限り、これで不都合はないようである。尚、測定に際しては風や雨などの影響を防ぐために換振器のまわりをダンボール箱で覆うなどの工夫をしている。

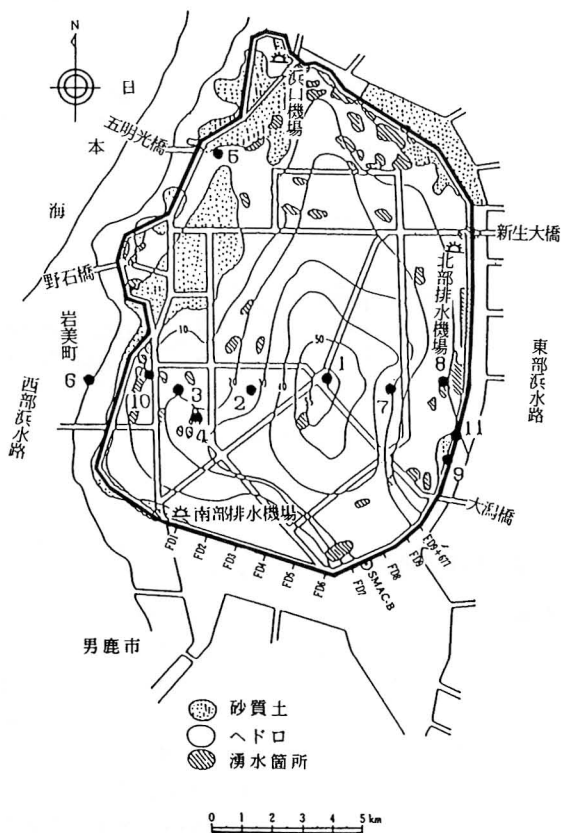
### 3. 解析方法

解析用のソフトはすべて独自に開発した。それらは、FORTRAN によって組まれている A/D 変換用プログラムと解析用プログラムからなる。A/D 変換用プログラムはサンプリングすべきアナログデータについてサンプリング定理を考慮してデータ間隔を与える。そして、A/D 変換されたデータはディスクにシーケンシャルファイルとして書き込む。また、解析プログラムではデータにウィンドウ処理を行い、FFT、周期頻度スペクトル、フーリエスペクトル、パワースペクトル、自己相関関数、相互相関関数、確率密度スペクトルなどの解析結果をラインプリンタや XY プロッタに出力する。また、本装置を購入する以前は、TEAC の PS-80 を使用して常時微動を測定していたため TEAC でも A/D 変換、スペクトル解析を行うことができるが、そのプログラムは機械語で組まれている。またそれらのデータを PC-9800 に転送させて解析し、結果は、RS 232C により OKITAC の XY プロッタに出力することもできるようになっているが、そのことについては、別報でとりあげる。

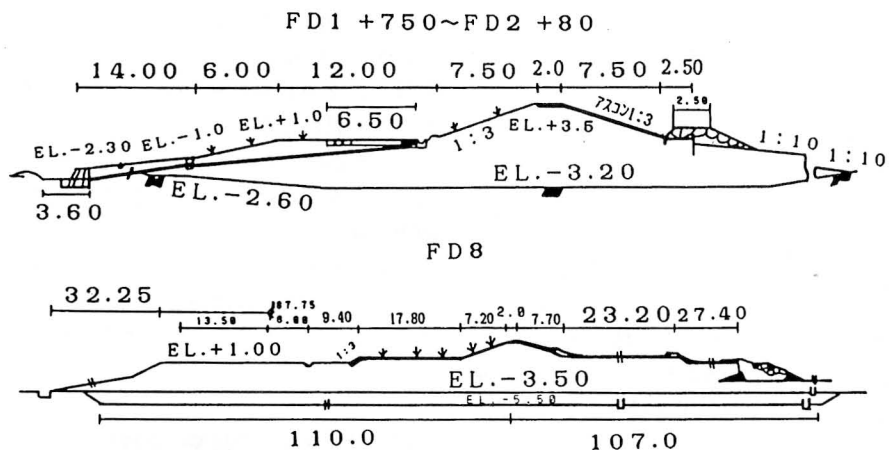
### 4. 測定地点

八郎潟中央干拓地は、図-1のように堤防(図中太い線)によって囲まれている。堤防の高さ、幅、構造などについては、図-2に断面図<sup>3)</sup>を示す。なお、堤防は日本海中部地震により、図-3に示すような被災を受けたが<sup>2)</sup>、その後、原形に修復されている。図-1の常時微動測定地点は、日本海中部地震の調査の時ヘドロの深さに沿って測定<sup>1)</sup>していたもので、今回もそれにあわせて測定している。

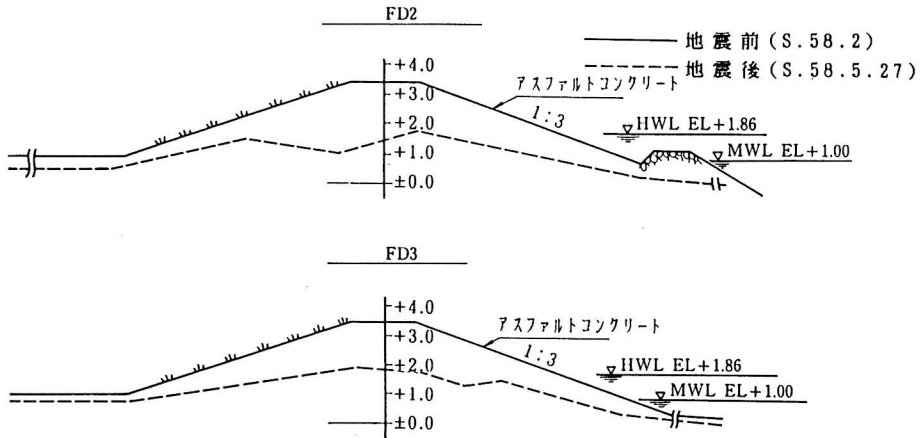
測点 No. 1 は、干拓地の中央部分に位置しヘドロが 60 m で最も深いところであり、周りに大きな構造物がないところである。また、測点 No. 9 は、近くに堤防があるところである。振動の方向性に対する問題を説明するためには、紙数の都合もあり測点 No. 1 と No. 9 での検討結果を示すことにする。もちろん、他の測点についても同様な傾向が認められる。



図一 八郎潟干拓地へドロ等深図と測定地点



図二 正面堤防断面<sup>3)</sup>



図一3 正面堤防被災横断面<sup>2)</sup>

Ⅲ. 基本的事項についての解析結果と考察

1. FFTにおける観測波形の問題

時間  $t$  の関数  $x(t)$  のフーリエ変換  $X(\omega)$  とその逆変換は、次式で表わされる。

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \tag{1}$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \tag{2}$$

しかし、コンピュータでのFFTは次のような計算をしていることになる。

$$X_l = \sum_{k=0}^{N-1} x_k e^{-j l \Delta \omega k \Delta t} : l=0, 1, \dots, N-1 \tag{3}$$

$$x_k = \frac{1}{2\pi} \sum_{l=0}^{N-1} X_l e^{-j l \Delta \omega k \Delta t} : k=0, 1, \dots, N-1 \tag{4}$$

ここで、

$$x_k = x(k\Delta t) : k=0, 1, \dots, N-1 \tag{5}$$

$$X_l = X(l\Delta\omega) : l=0, 1, \dots, N-1 \tag{6}$$

フーリエ変換では $-\infty$ から $+\infty$ まで積分するのに対し、FFTは0から $N-1$ までの離散化したデジタル量を計算しているから、その観測波形を繰り返すことになる。

2. ウィンドウ処理について

ウィンドウとは、有限長の被解析信号を切り出す場合

に、不連続接点の影響を軽減する方法として、適当な窓関数を元信号に作用させ、観測区間両端を0にして、解析に与える切り出し影響を最小にするものである。窓関数には、図-4のハニングウィンドウ、ハミングウィンドウはじめ色々なものがある。OKITACのFFTモジュールの使用などを考慮して、ここでは、最も一般的なハニングウィンドウを使うことにした。

図-5は、ウィンドウの有無によるフーリエスペクトルの違いを示すものである。フーリエスペクトルをみると卓越振動数は、どちらも同じ値を示しているが、図-5下段はウィンドウ処理により、スペクトルの小さなノイズが消えていることが分かる。この図ではあまり違いがでていないように見えるが、これは切った点での値がほとんど0に近い値であったため、あまり差が出なかったと思われる。しかし、ここで注意することは、ウィンドウをかけたため、図-5の丸で囲む中に本来はないスペクトルが出ている。この周波数を調べてみると波の観測時間に相当している。ウィンドウをかけると必ずこの問題が起きるので、プログラムでは計算上で出たとしても、プロットには出力しないようにしてある。上記のものについて、そのような処理をしたのが、図-6である。

3. サンプリング周期の再検討

図-7に示すように周波数が8Hzの波を、0.1secの間隔でサンプリングすると、あたかも周波数2Hzの波があるかのように見える<sup>13)</sup>。この現象はいわゆるエイ

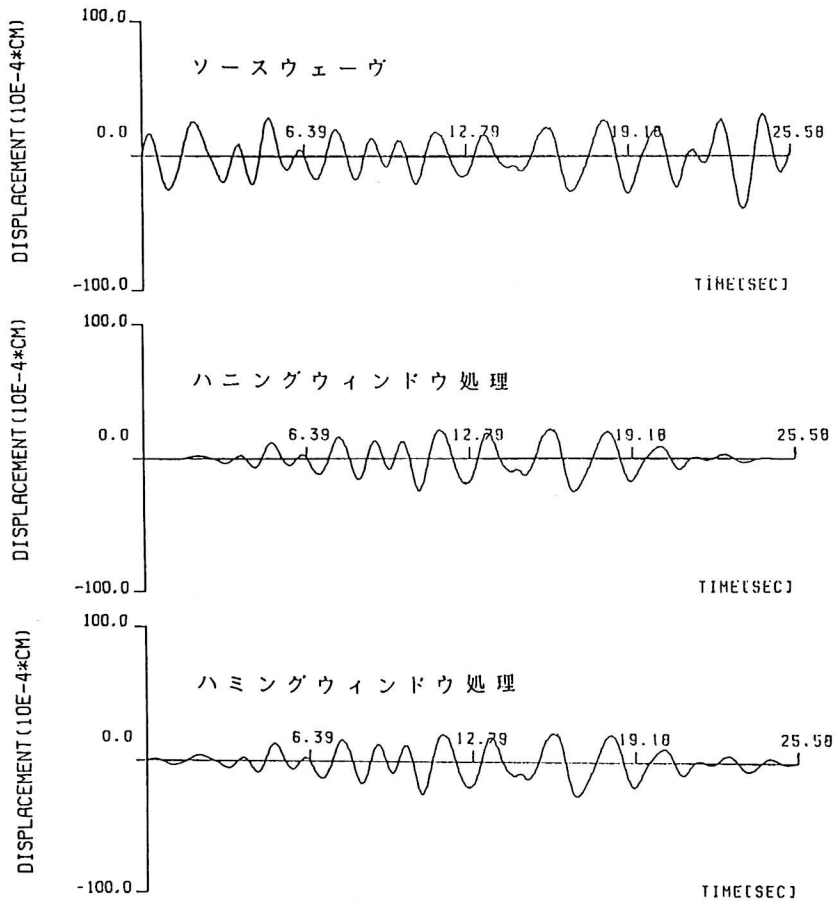


図-4 各種ウィンドウ処理

リアシング(aliasing)とよばれ、サンプリング周期と関係するたいへん重要な問題である。エイリアシングの誤差を防ぐためにはサンプリング定理がある。

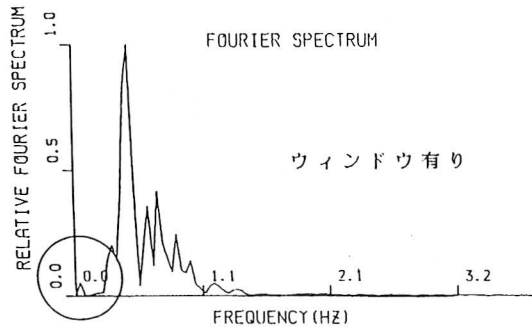
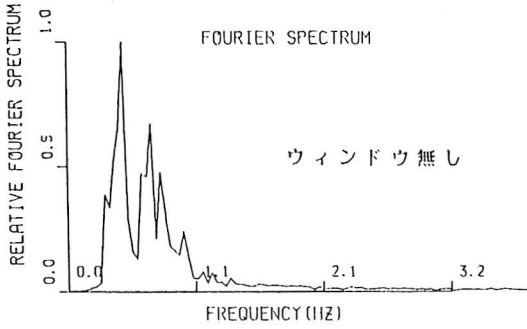
サンプリング定理とは、もし波形が  $F_c$  (Hz) 以上の高周波成分を含まないとするならば  $\Delta T \leq 1/2 F_c$  の時間間隔でサンプリングされた値には、もとの波形中の情報はすべて入っているということである。しかし、これを越えてしまうとエイリアシングの誤差が出てくる。初期の頃の卒論研究の八郎潟測定では、経験的にサンプリング周期を 25 ms にしていたが、今回、再検討の結果、25 ms のサンプリング周期は適当なものであることが判った。また、サンプリング定理により、制限周波数を越えるものは、解析の対象から外さなければならないが、幸いにも過去の卒論データ解析に、問題がないことを再

確認した。

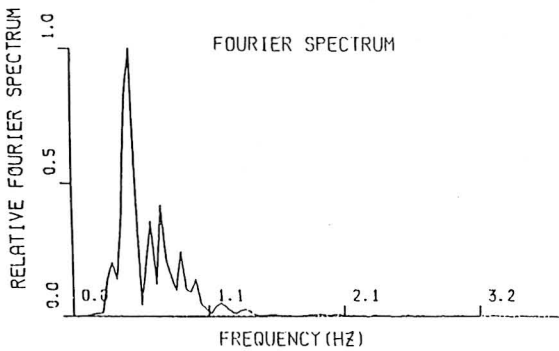
#### 4. 低域フィルタの有無

フィルタは本来、原波形のリップルを取るためのもので、フィルタの使用により図-8のように、原波形は短周期のノイズが取り払われる。

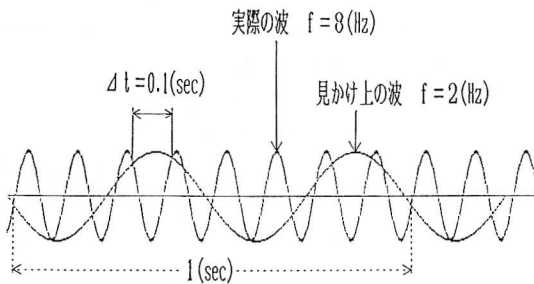
長周期成分が見やすい自己相関関数のコレログラム(図-9)、フーリエスペクトル(図-10)、パワースペクトル(図-11)には、違いはみにくいが、短周期成分が見やすい周期頻度スペクトル(図-12)については、フィルタの有無しが明瞭にでてくる。フィルタをかけない場合には、25 ms のサンプリング時間を下まわるような、意味のない短周期成分が誤差としてあらわれるが、フィルタをかけた場合には、こうした誤差はあられ



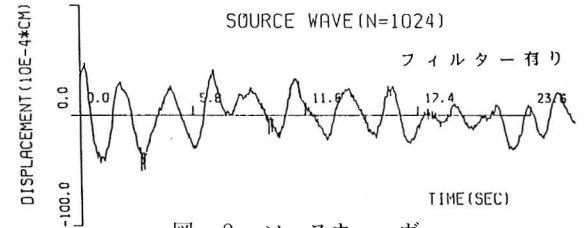
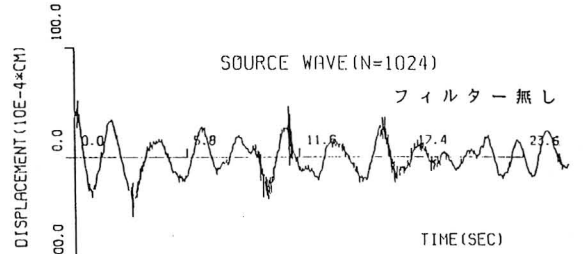
図—5 ウィンドウの有無によるフーリエスペクトルの違い



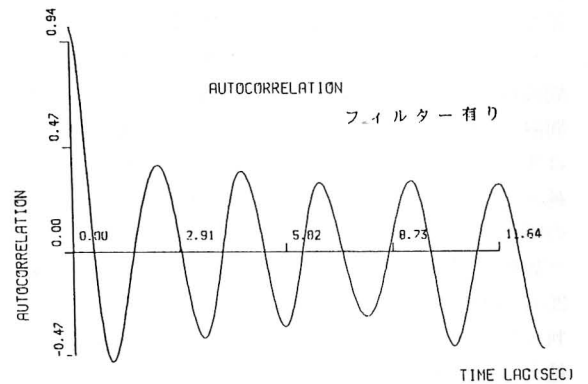
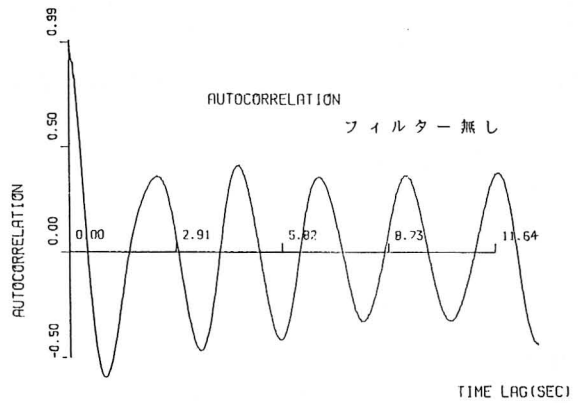
図—6 出力処理をしたフーリエスペクトル



図—7 正弦波のサンプリングにともなうエイリアシング



図—8 ソースウェーブ



図—9 コレログラム

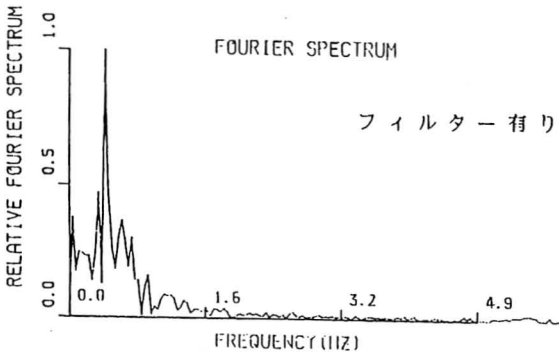
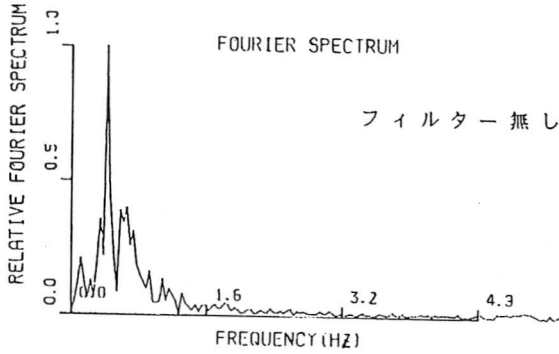


図-10 フーリエスペクトル

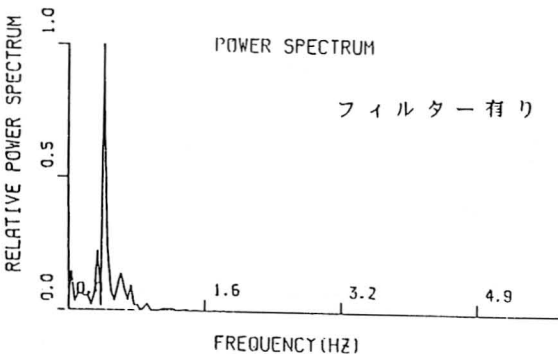
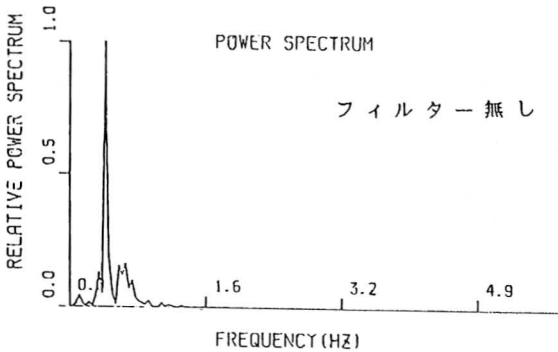


図-11 パワースペクトル

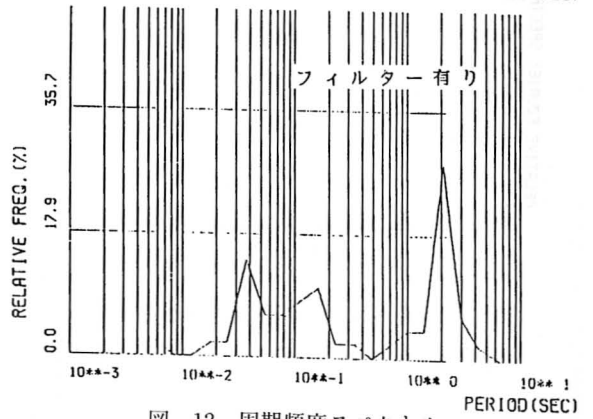
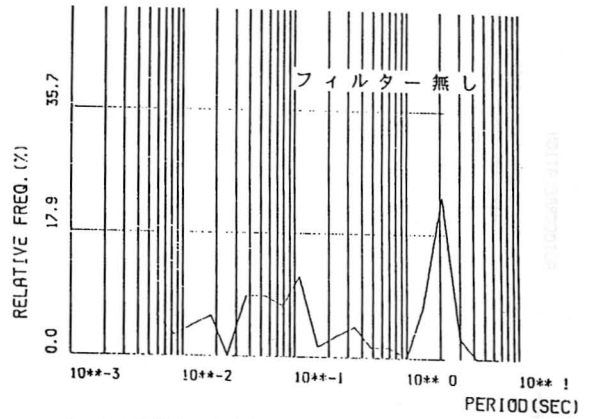


図-12 周期頻度スペクトル

ない。したがって、フィルターをかけない場合には、サンプリング周期以下のものについては、充分注意して考察しなければならない。

### 5. 振動の方向性に対する問題

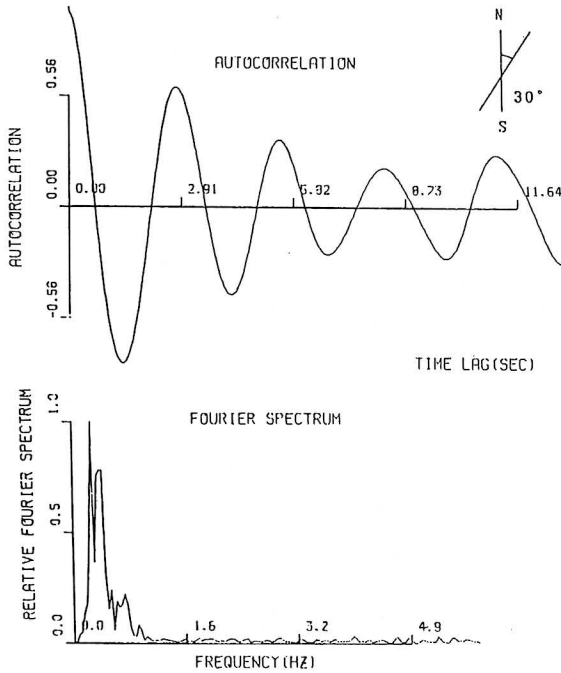
#### 1) 干拓地の中央部(測点 No. 1)

図-13~16は、測点 No. 1 の自己相関関数のコレログラムとフーリエスペクトルを表わしたものである。この測点 No. 1 は、干拓地の中央部にあって、ヘドロが最も深く、周りに構造物がないところである。ここで、水平換振器を30度ずつ回し一回転させて、様々な方向の波がどの様になるかを測定した。

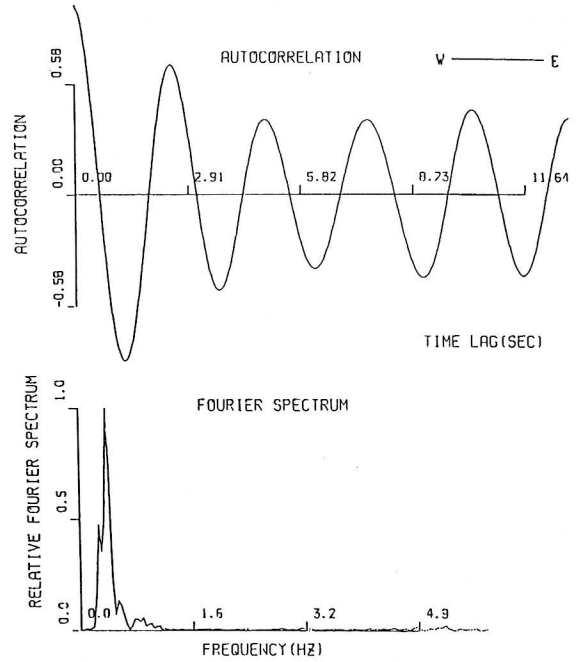
その結果、どの方向を取ってみても、自己相関、フーリエスペクトル共に違いはみられない。すなわち、この地点のように方向性のない単純な地盤では、どの方向でも同じような常時微動が現われてくるのが明かである。

#### 2) 堤防付近(測点 No. 9)

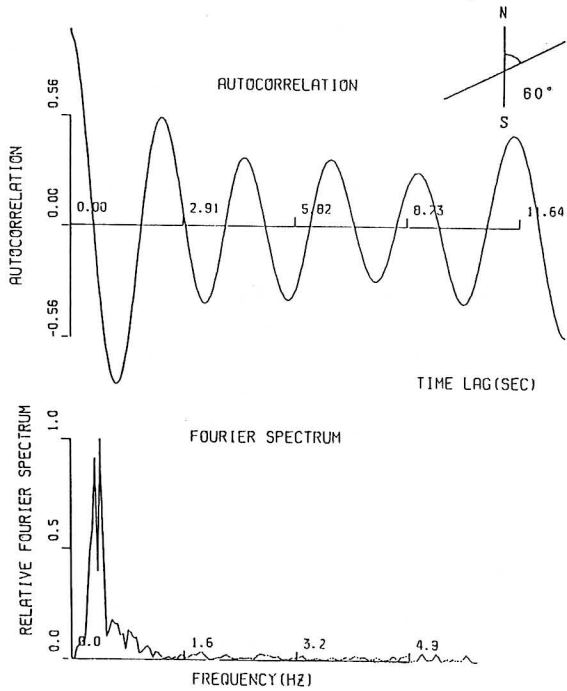
図-17~22は、スペクトルに違いがあるものの代表と



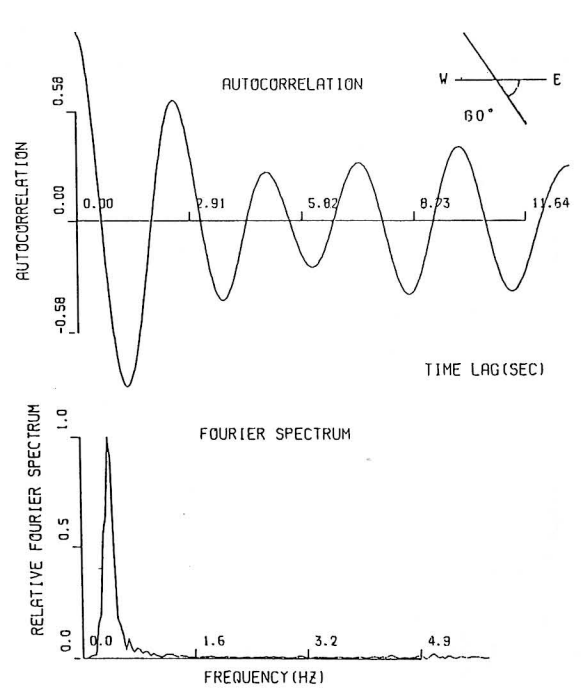
図—13 コレログラムとフーリエスペクトル  
(測点 No. 1 南北方向から30度)



図—15 コレログラムとフーリエスペクトル  
(測点 No. 1 東西方向)

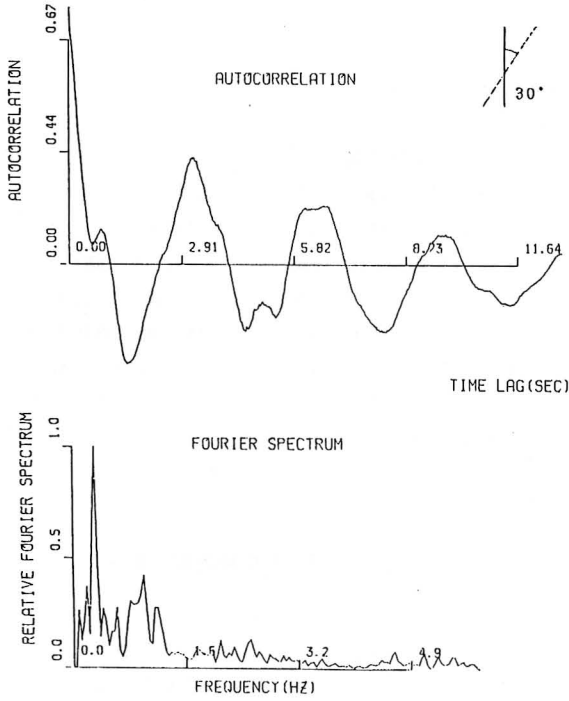


図—14 コレログラムとフーリエスペクトル  
(測点 No. 1 南北方向から60度)

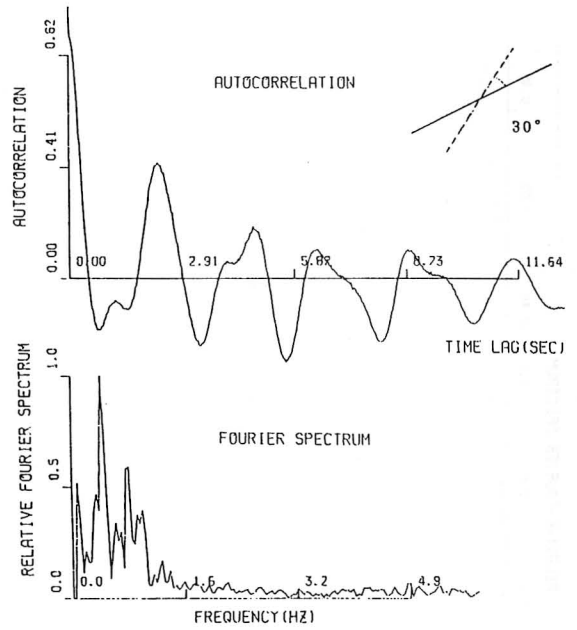


図—16 コレログラムとフーリエスペクトル  
(測点 No. 1 東西方向から60度)

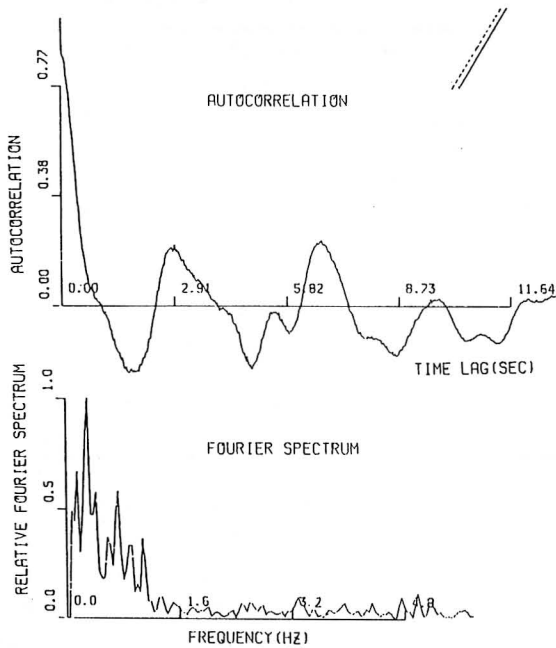




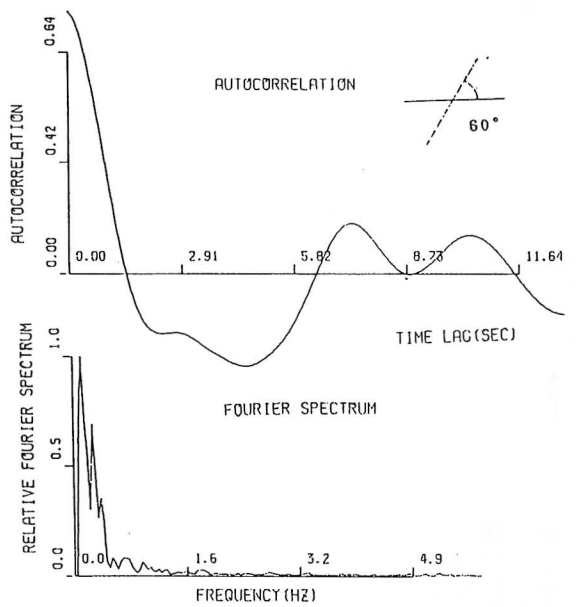
図—17 コレログラムとフーリエスペクトル  
(測点 No. 9 堤防と平行方向から左に30度)



図—19 コレログラムとフーリエスペクトル  
(測点 No. 9 堤防と平行方向から右に30度)



図—18 コレログラムとフーリエスペクトル  
(測点 No. 9 堤防と平行方向)



図—20 コレログラムとフーリエスペクトル  
(測点 No. 9 堤防と直角方向から左に30度)

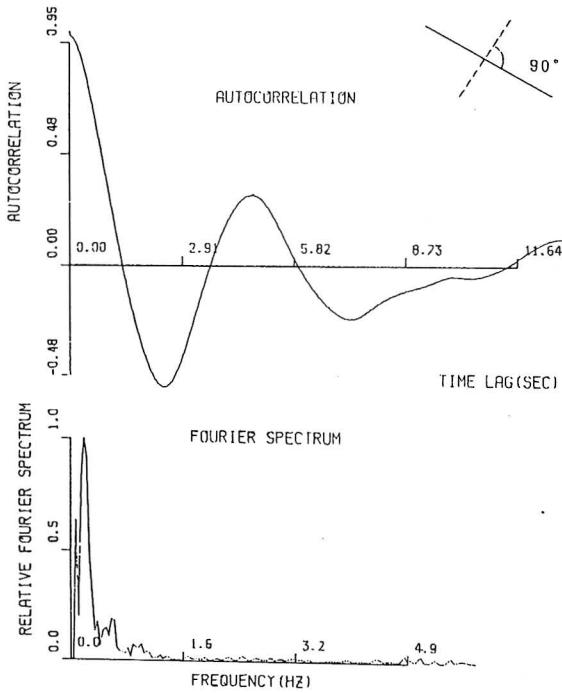


図-21 コレログラムとフーリエスペクトル  
(測点 No. 9 堤防と直角方向)

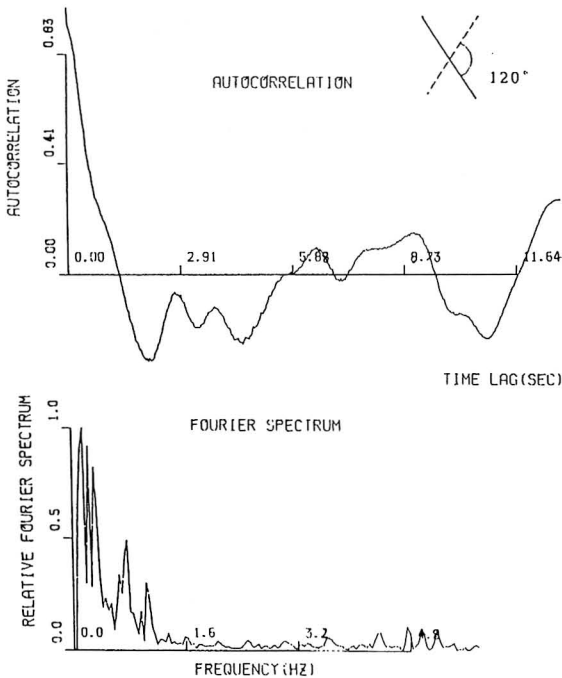


図-22 コレログラムとフーリエスペクトル  
(測点 No. 9 堤防と直角方向から右に30度)

して、近くに堤防のある測点 No. 9 で、同じような測定を行って見た。堤体の軸は、破線で示した方向にある。堤防に対して、様々な角度で常時微動を測定し、自己相関関数のコレログラム、フーリエスペクトルを示すと、図-17~19が堤体の軸と平行または平行に近いもの、図-20~22が堤体の軸と直角または直角に近いものとなる。これを見ると明らかに堤防の影響があることがわかる。すなわち堤体の軸方向に近いものには、測点 No. 1 で示したように、ヘドロ本来の2.9秒前後の長周期成分が現われている。それに対して、堤体の軸と直角方向に近いものには、全く異なった自己相関関数のコレログラム、フーリエスペクトルが現われたことが分かる。ここには、4.8秒という長周期が現われているが、これは明らかにヘドロにはなく、堤防の振動が現われているものと考えられる。

Ⅳ. ヘドロの深さと卓越周期の関係

図-1 は八郎潟干拓地の等深図<sup>3)</sup>であり、表-1 は、各測点のヘドロの深さと卓越周期の関係を表わしたものである。さらに、5年前の日本海中部地震の調査のときの測点<sup>1)</sup>での値も一緒に示してある。

表-1 ヘドロの深さと卓越周期の関係

測点	ヘドロの深さ (m)	卓越周期 (sec)	5年前の卓越周期 (sec)
1	55.0	2.10	2.10
2	20.0-30.0	2.10	
3	10.0-20.0	1.00	
4	18.0	1.40	1.40
5	5.0	0.23	0.34
6	-----	0.34	
7	50.0-55.0	2.10	
8	10.0-20.0	0.70	
9	13.0	1.40	2.10
10	12.0	0.70	0.16
11	-----	1.40	

測点 No. 1 はヘドロの最も深いところで、測点 No. 7, 2, 4, 3, 8, 9, 10 となるにしたがい、だんだん浅くなっている。これより、ヘドロが浅くなるにしたがい卓越周期が短周期側に移動していることが分かる。また測点 No. 5 はヘドロと砂の層が入り組んでいるところであり、No. 10 は砂地盤である。

さらに、5年前当時との比較ではヘドロの単一地盤で

は卓越周期の変化はない。しかし、砂も混ざったところの卓越周期に少し変化が見られることが分かる。No. 5は測定の精度を考えると、変わってないとも見れる。しかし、No. 10の値では明らかに変わっている。No. 9は堤防の影響がはいる場所であるため、測点の位置が少しずれても値は変わる可能性があるため、これだけでは何とも言えない。

尚、測点 No. 6は堤防の外、No. 11は堤防上で測定したものである。

## V. おわりに

常時微動が建築、土木の分野で注目されはじめたのは1960年代のことである<sup>14)</sup>。特に八郎潟の堤防の耐震性を検討した河上らの研究<sup>15)</sup>は土木分野の草分け的存在であった。同じ頃、八郎潟干拓地の経年変化を常時微動でとらえようとした東京大学山崎不二夫教授、須藤清次山形大学助教授らの総合研究グループがあった<sup>16)</sup>。そのメンバーの一人、東山は常時微動を堤体盛土の安定化の評価に用いようと試みた<sup>17)</sup>。その後、日本海中部地震調査により八郎潟の常時微動と液状化<sup>1,2)</sup>や堤体中に埋められていたSMACの波形解析<sup>18)</sup>、振動理論<sup>19)</sup>など再び八郎潟は注目を浴びる。一方、常時微動の研究は蓄積され<sup>20)~22)</sup>、教科書にまで取り上げられるようになった<sup>23)</sup>。筆者らの研究は現在、最大エントロピー法やカルマンフィルターを用いた解析に発展しているが、これについては別報で取り上げたい。

最後にこれまで卒論研究として協力頂いた大沼広行、堀米清也、高橋浩徳、成澤 準、板垣誠弘、猿山康弘、有泉光二、小林亮二、山下雄志の各位、特にこの報文の基礎となった研究を進めた猿山康弘氏に謝意を表したい。またご協力を得た山崎加津子技官にも感謝申し上げます。

## 引用文献

- 1) 東山 勇：日本海中部地震における八郎潟干拓地の液状化被害について、地盤の液状化，pp. 125~134，土質工学会(1984)
- 2) 東山 勇：八郎潟干拓堤防の液状化履歴，基礎工，pp. 40~43(1984)  
東山 勇ほか：日本海中部地震による八郎潟災害調査報告，農土誌，51(7)，pp. 101~104(1983)
- 3) 農林省構造改善局：八郎潟新農村建設事業誌，農業土木学会，pp. 1~992(1977)
- 4) 大沼広行：常時微動のスペクトル解析について，山形大学57年度卒論，pp. 1~84(1983)
- 5) 堀米清也：庄内地方の常時微動スペクトル解析，山形大学58年度卒論，pp. 1~110(1984)
- 6) 高橋浩徳：常時微動と地盤特性，山形大学59年度卒論，pp. 1~100(1985)
- 7) 成澤 準：地回り地における常時微動特性，山形大学62年度卒論，pp. 1~70(1988)
- 8) 板垣誠弘：パソコンによる常時微動解析の検討，山形大学62年度卒論，pp. 1~37(1988)
- 9) 猿山康弘：八郎潟の常時微動特性，山形大学63年度卒論，pp. 1~72(1989)
- 10) 有泉光二：最大エントロピー法による常時微動解析，山形大学平成元年度卒論，pp. 1~73(1990)
- 11) 小林亮二：最大エントロピーによるスペクトル解析の検討，山形大学平成2年度卒論，pp. 1~53(1991)
- 12) 山下雄志：カルマンフィルタによる常時微動解析，山形大学平成3年度卒論，pp. 1~52(1992)
- 13) 日野幹雄：スペクトル解析，朝倉書店，p. 175(1977)
- 14) 金井 清：地震・振動学・建築学大系，彰国社，p. 48，p. 258(1966)
- 15) 河上房義・浅田秋江・柳沢栄司：堤防の耐震性と常時微動，土と基礎，14(9)，pp. 19~25(1966)
- 16) 安富六郎・田中貞二・中村一明：八郎潟の常時微動について，農土学会講演誌，pp. 157~158(1969)
- 17) 東山 勇・月館光三・吉田 力・山崎加津子：巨礫を含む盛土の転圧と安定化の評価，山形農林学会，27，pp. 80~86(1970)
- 18) 浅田秋江・久保 陽：日本海中部地震における八郎潟干拓堤防の被害，土と基礎，31(12)，pp. 5~11(1983)
- 19) 柳沢栄司：振動時における堤防と地盤の動的相互作用と逸散減衰，土と基礎，29(9)，pp. 11~17(1981)
- 20) 森 芳信：地盤の常時微動特性と工学的利用，土木論集，313号，pp. 55~64(1981)
- 21) 安富六郎・須藤清次・軽部重太郎：八郎潟干拓地における常時微動の経年変化について，農土誌，56(2)，pp. 51~55(1988)
- 22) 森 芳信：地盤の微動に現われるやや長周期成分についての実測による検討，土木論集，424号，pp. 169~177(1990)
- 23) 浅田秋江：土質工学・同演習および土質地震工学，創栄出版 pp. 1~310(1990)