

“常時微動測定とその解析に関する若干の考察”

中 村 満 喜 男

“Some Investigations for Measurement and Analysis of Micro Tremor”

Makio NAKAMURA

常時微動を測定・解析することは地盤・構造物等の動特性を明らかにし、強震時における災害の可能性を把握する上で非常に有効である。本論文では測定された常時微動の波動の性質を振巾に関する確率密度分布、周期に関するフーリエ振巾スペクトルとゼロクロッシング法による周期一頻度スペクトルとの比較検討を行い波動解析に関する若干の考察を行ったものである。測定はナゴヤ球場で行われたものである。

1. まえがき

地震時における構造物及び地盤の動特性を把握する有力な手段として、常時微動による地盤の評価と構造物の固有周期の評価がある。常時微動による地盤種別の区分が人口の密集した各都市において検討されている。又構造物の固有周期が起振機による強制振動実験によらなくても常時微動より明らかとなれば非常に簡便な方法として常時微動測定が評価されるのである。このような意味で当研究室では常時微動測定装置を揃え実測を開始した。本論文は測定された波動データの解析について考察を加えたものである。波動データは現地データレコーダに収録され、愛知工業大学電子計算機センターで処理される。このように実測から電子計算機処理にいたる一貫したシステムを完成することが大きな目的である。

主な検討項目は

- I) 微動の振巾に関する確率密度分布
- II) フーリエ解析によるフーリエスペクトルとゼロクロッシング法による周期一頻度スペクトルとの比較
- III) フーリエスペクトル・パワースペクトルを求める際の平滑化に係わるラグウインドウのバンド巾に関するパラメトリックな検討

筆者はたまたまナゴヤ球場の常時微動と新幹線通過時の微動の測定・解析の機会を得ることができ上記の検討を行った。測定は次の3項目に分けて行われた。第1はスタンドを構成する3つの構造物ブロックの常時微動測定であり、第2はグラウンドの常時微動測定であり、第3

は新幹線通過時における各構造物ブロックの微動測定である。

解析の結果より、第1に振巾に関する確率密度分布は振巾ゼロを対称軸とする正規分布とみなしてさしつかえないことである。第2に周期一頻度スペクトルとフーリエスペクトルを詳細に比較すると、ピークの現れる振動数は両者で概ね一致するが、ピーク値の大小関係は全く異なる。卓越周期を求める目的の解析ならば両者の差はない。第3にスペクトルの平滑化に関するラグウインドウのバンド巾は0.6が適切であることが明らかとなった。

2. 微動の解析について

微動の解析には2つの流れがある。アナログ量として最初から最後の結果まで得るものと、デジタル変換を行った後電子計算機による解析を行い最後にX-Yプロッターで図形表示するものである。本論文は後者の方法について検討を加えたものである。

解析は測定データをA-D変換器に通し、デジタル量に変換し磁気テープに出力する。この時データは0.01秒きざみで1つの波形に対し3072個（およそ30秒間）が出力される。これらのデータを電子計算機（FACOM 230-25）で処理した。その流れが図1に示されている。ソースプログラムの内WAVE Iでデータの順づけを行い、WAVE IIで零線補正とスケールと波動の最大振巾を求める。WAVE IIIで規格化された波動に対し、振巾に関する確率密度分布、ゼロクロッシング法による周期一頻度スペクトル、フーリエ変換・逆変換とラグウ

indowを使って平滑化されたフーリエスペクトルを計算している。解析方法として特に新しい所があるわけではないが、簡単にここで示しておく。

(文献1による)

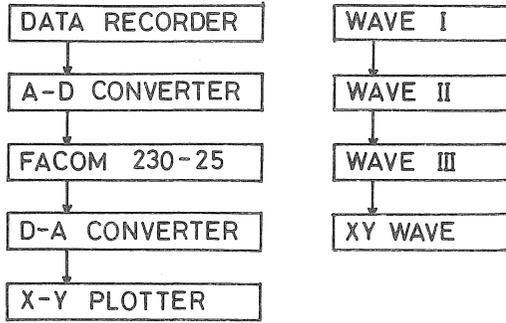


図1 フローチャート

I) 確率密度分布

微動の振巾に関する確率密度分布を検討する意味は微動のランダムさの程度を知ることである。一般にランダムな波の確率密度分布は正規分布となることが知られているから、測定された微動の分布が正規分布からどの程度一致するかは、常時微動がエルゴードックでランダムである仮定とどの程度一致するかを明らかにする手段となる。

今微動の規準化された標本値を x_j ($j = 0, 1, \dots, N-1$) とする。振巾を $+1 \sim -1$ の0.1ごとの21のクラスに分ける為にその区分値を Y_j とすると、 $Y_j \geq x_m > Y_{j-1}$ の標本の個数を数えればよい。この数を P_j とすると、 P_j/N が Y_j の振巾に対する確率密度である。 Y_j 値に対してこの値をプロットすると確率密度分布が得られる。

II) ゼロクロッシング法による周期—頻度スペクトル

金井はこの方法を使って常時微動の解析を行い耐震工学上有益な結果を得ている。古典的ではあるが常時微動の解析法として現在でも有効に利用されている。この方法は零軸を横切る波動の各時間間隔を測りその2倍があらかじめ決めておいた周期のクラスのどの部分に入るかを決めクラスごとにその数を数えておく方法である。

$T_j \geq 2 \cdot (t_{k-1}) > T_{j-1}$ の数を数えればよい。但し T_j は各クラスを区分する値であり t_k は微動が零線を横切る k 番目の時刻である。各クラスの代表値は $\bar{T}_j = (T_j + T_{j-1}) / 2.0$ で表わされ、カウントされた数を P_j とすると $P_j = P_j / \sum_k P_k$ が相対的な頻度となり、単位はパーセントで表わされる。 \bar{T}_j に対し P_j をプロットしたものが周期—頻度スペクトルとなる。この方法は零軸を横切らな

い、周期が短くて振巾の小さいさぎ波のような波形の情報を全く与えない。すなわち一種のlow pass フィルターであることが注意されるべきである。

III) フーリエ解析による振巾スペクトルとパワースペクトル

微動データが離散的なデジタル量 x_j ($j = 0, 1, \dots, N-1$) で表わされるから、そのフーリエ変換・逆変換は

$$C_k = 1/N \cdot \sum_{m=0}^{N-1} x_m \cdot \exp(-i \cdot 2\pi k \cdot m/N) \quad \dots\dots(1)$$

$$x_m = \sum_{k=0}^{N-1} C_k \cdot \exp(i \cdot 2\pi k \cdot m/N)$$

$k, m = 0, 1, 2, \dots, N-1$

k に対してすなわち振動数 $f_k = k \cdot \Delta f = k \cdot 1/T$ (T : 継続時間) に対して $|C_k|$ をプロットしたものがフーリエスペクトルである。

パワースペクトルは次式の右辺の項で表わされる。

$$\sum_{m=0}^{N-1} x_m^2 \cdot \Delta t = T \cdot |C_0|^2 + 2 \sum_{k=1}^{N/2-1} (T \cdot |C_k|^2) + T \cdot |C_{N/2}|^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

f_k に対して上式の右辺の各項をプロットしたものがパワースペクトルである。

IV) ラグウインドウ (平滑化について)

本論文ではParzen のラグウインドウが使われる。それは次式である。

$$w(\tau) = \begin{cases} 1 - 6\left(\frac{\tau}{u}\right)^2 + 6\left(\frac{|\tau|}{u}\right)^3 & |\tau| \leq \frac{u}{2} \\ 2 \cdot \left(1 - \frac{|\tau|}{u}\right)^3 & \frac{u}{2} \leq |\tau| \leq u \\ 0 & |\tau| > u \end{cases} \quad \dots\dots(3)$$

原波形の自己相関関数 $R(\tau)$ より平滑化された自己相関関数 $\bar{R}(\tau)$ は次式となる

$$\bar{R}(\tau) = R(\tau) \cdot w(\tau) \quad \dots\dots\dots(4)$$

パワースペクトル $\bar{G}(\omega)$ は $\bar{R}(\tau)$ のフーリエ変換であるから

$$\bar{G}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \bar{R}(\tau) \cdot \exp(-i \cdot \omega\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots(5)$$

$\bar{G}(\omega)$ よりフーリエ振巾スペクトルは $|\bar{F}(f)| = \{T \cdot \bar{G}(f)\}^{1/2}$ の関係より容易に得られる。上式の関係より平滑化された $\bar{G}(f)$ と原波型の $G(f)$ の間には

$$\bar{G}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} G(s) \cdot W(f-s) ds \quad \dots\dots\dots(6)$$

の関係があり $\bar{G}(f)$ は $G(f)$ の移動平均になっていることがわかる。 $W(f)$ は Parzen のスペクトルウィンドウであり次式で表わされる。

$$W(f) = 3/4 \cdot u \cdot \left\{ \sin(\pi u f / 2) / (\pi u f / 2) \right\}^4 \dots\dots\dots(7)$$

バンド巾 b (cps) = $280/151u$ の数値については後で検討される。 b が大きくなる程パワースペクトルにおける平滑化が進むことになる。

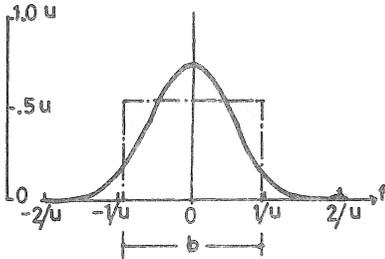


図2 Parzenのスペクトルウィンドウ(文献1)

3. 測定の概要

3.1 測定場所と周辺の地盤条件

名古屋市の地盤は東から西へ向ってゆるやかな傾斜を持った地層構造からなり、西へ行くに従ってしだいに沖積層が厚くなる。東側は熱田層・八事層・唐山層の洪積台地からなる良質の地盤を形成している。

ナゴヤ球場は上記熱田層より少し西にはずれた位置にある。近傍の案内図を図3に示す。東海道新幹線・東海道本線・中央本線・東臨港線・名古屋鉄道が近くを走っている。特に東海道新幹線はナゴヤ球場外野席の近い所では30m くらいの所を走っている。図3の1~7の地点にお

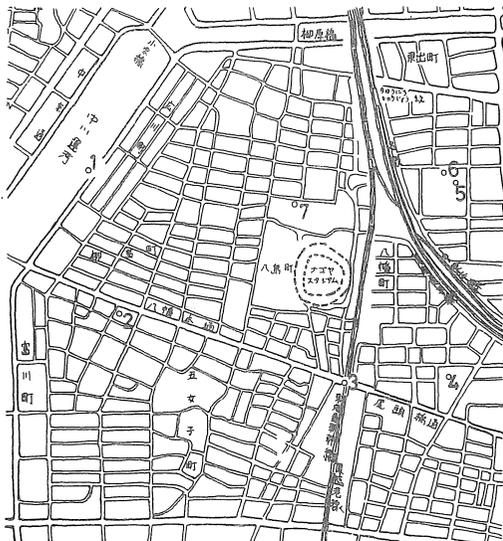


図3 ナゴヤ球場近傍地図(名古屋地盤図より)

ける柱状図が図4に示されている。これよりナゴヤ球場の地盤はN値0~9の沖積層が10m厚で存在し、その下にN値10以上の熱田層が存在することがわかる。

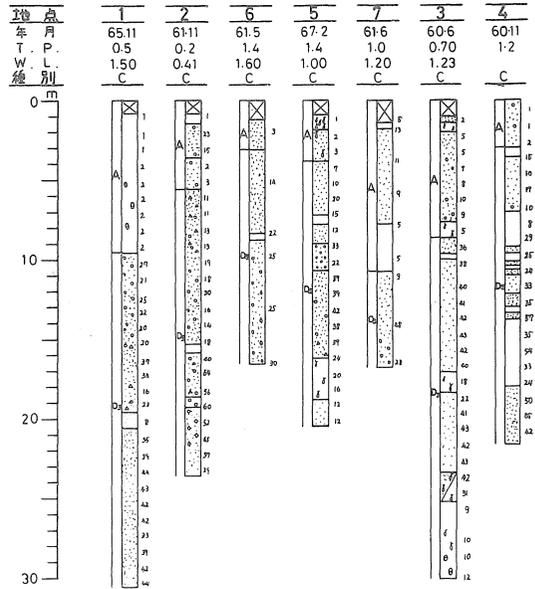


図4 柱状図(名古屋地盤図より)

3.2 測定器具と測定システム

測定に使用された計器は次の通りである。

記録：カセットデータレコーダ (TEAC, R-81)

モニター：オシロスコープ (LEADER LBO-310A)

増巾器：アンプ (TA-406 保坂製)

センサー：水平ピック 4台 (MTKH-1C 保坂製)

鉛直ピック 1台 (MTKV-1C 保坂製)

上記の計器を図5の様に配線し、PIC A, B, C, Dをそれぞれの測定位置に置き同時測定を行った。

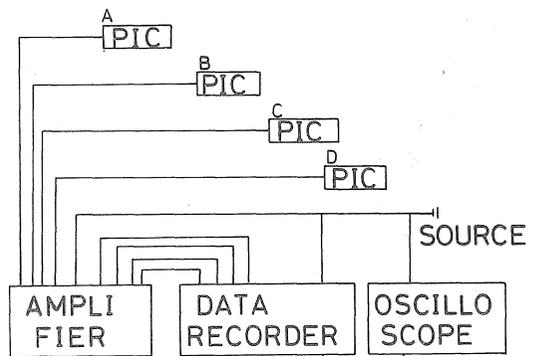
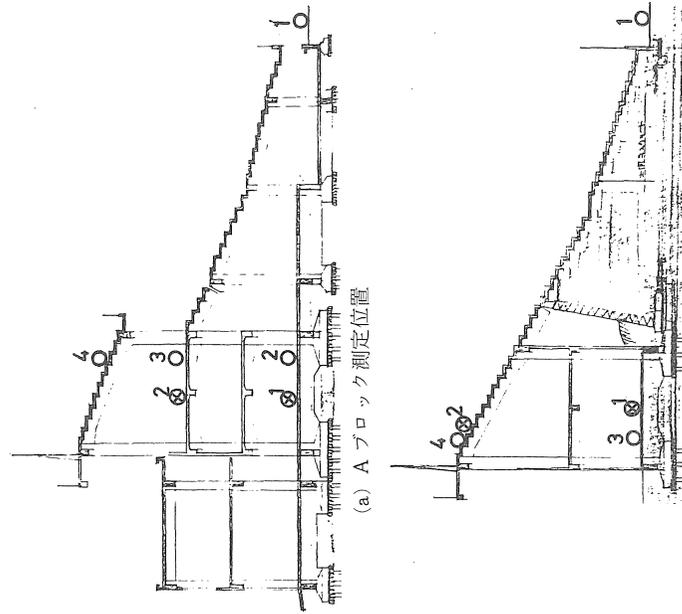
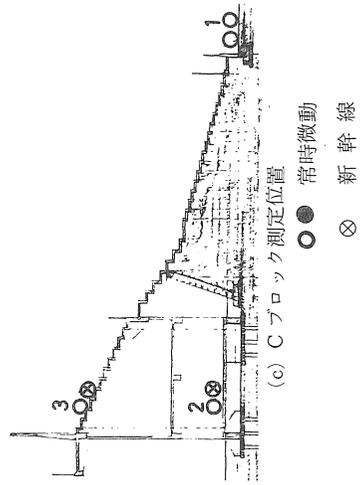


図5 測定システム



(a) Aブロック測定位置

(b) Bブロック測定位置



(c) Cブロック測定位置

● 常時微動
⊗ 新幹線

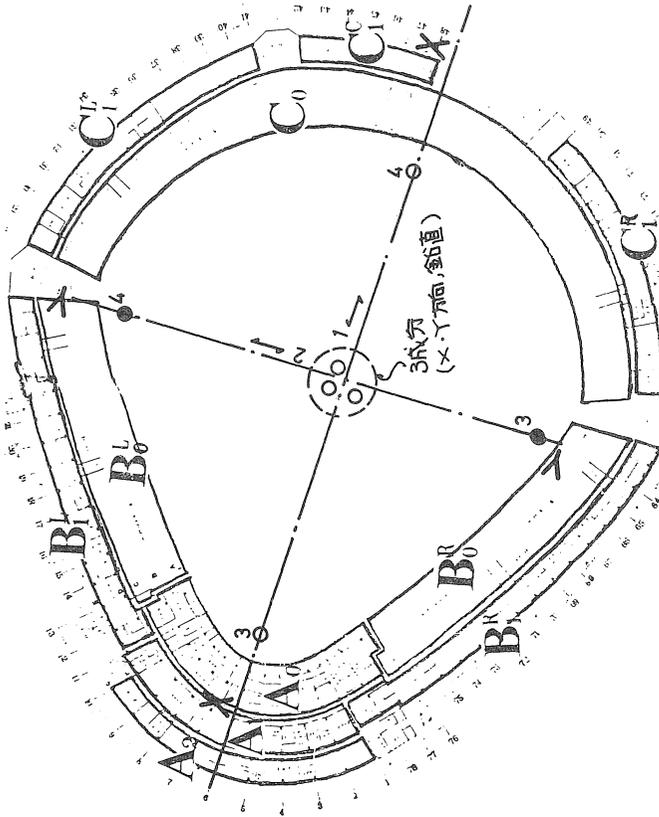
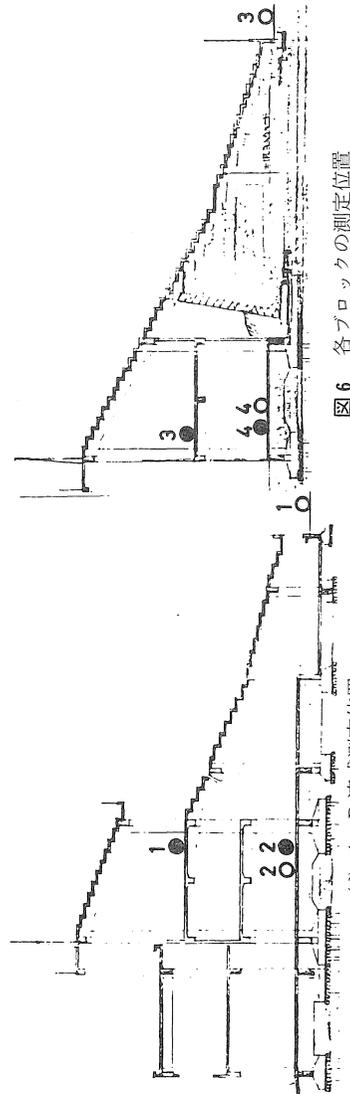


図7 ブロック種別とグラウンド測定位置



(d) A-B 連成測定位置

図6 各ブロックの測定位置

3. 3 常時微動測定

ナゴヤ球場は近くを国鉄・私鉄が通っている為深夜でも貨車等の交通が多いが測定はその合間をぬって行われた。測定日時は昭和52年

7月25日(23時)～7月26日(4時)

7月26日(23時)～7月27日(4時)

である。測定はスタンドの測定、それからグラウンドの測定の順で行われた。スタンドは構造的に3つのブロックA・B・Cに分けることが出来る。測定はAブロックA-B連成, Bブロック, Cブロックの順に行われ, 図6にそれぞれの場合のピックの位置と番号が示されている。ピックは地盤と1階床と各階床に置かれ, 地盤と構造物の微動の違いを明らかにすると共に構造物に固有な微動を見つける目的で配置された。

グラウンドの測定は中央に3成分(X・Y方向, 鉛直)のピックを固定し, 番号3・4のピックをX-X軸とY-Y軸上に置いて測定を行った。図7にそれが示されている。

3. 4 新幹線通過時における各ブロックの微動測定

新幹線のみの影響を知る為, 他の交通量の比較的少ないと思われる下記の時間帯に測定を行った。

7月26日(22時～23時)

7月28日(21時～23時)

最も激しく揺れると思われるおよそ40～50秒を記録した。スタンドの各ブロックにおけるピックの位置と番号が図6の⊗印で示されている。

4. 測定・解析結果について

解析に先だちバンド巾bの違いによってフーリエスペクトルがどの程度平滑化されるかについて検討を行った。バンド巾を大きくとりすぎると主要なピークを見落す恐れがあり, バンド巾が小さすぎるとどれが主要ピークであるのか見失う恐れがある。図8に4種類のバンド巾に対する平滑化されたフーリエスペクトルが示されているバンド巾が1.0と0.8では1つのピークがバンド巾0.4と0.5では2つのピークに分かれている。この程度のピークが2つに分解されて見えないのでは実用上困るため常時微動の解析ではバンド巾は0.6程度が適切であることがわかった。

各ブロックのうち代表的なAブロックの-span方向と桁行方向について, 原波形・確率密度分布・周期-頻度スペクトル・フーリエスペクトルが図9に示される。図中の番号は図6のピック位置と対応している。

グラウンドの測定結果のうちX-X方向について得られたものを図10に示してある。図中12-3, 12-4はX-X測線上における同時測定によるピック番号3・4の結果であり, 14-3, 14-4はY-Y測線上の同時測定による結果である。

新幹線通過によるCブロックの結果が図11に示されている。

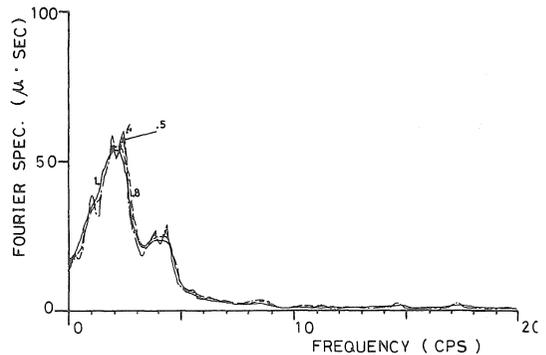


図8 バンド巾の違いによるフーリエスペクトル

5. 結果の考察

5. 1 確率密度分布について

図9～11を比較してみると各ブロックと地盤の常時微動の確率密度分布はほとんど変わらない。図9の-span方向のピック番号1・3は鋭くかつがっているがこれは波形の1～2秒の所に非常に大きな振巾が記録されたための現象と考えられ, 常時微動では確率密度分布は振巾零を通る鉛直軸に対称となっており, 概ね正規分布と見て差しつかえないようである。

新幹線通過時のCブロックの確率密度分布は常時微動のそれと非常に良く似ている。原波形の違いは顕著であるから, この違いは確率密度分布以外の要因すなわち周期特性に大きく依存する事が明らかである。

5. 2 周期-頻度スペクトルとフーリエスペクトルの比較

横軸が周期-頻度スペクトルでは周期, フーリエスペクトルでは振動数(cps)である為に比較しにくい, Aブロックとグラウンドの常時微動に対し詳細に検討すると, ピークの位置は両者共に同じように現われているがピーク値のピック番号に関する大小関係は, 周期-頻度スペクトルが振巾に関する情報を含んでいない為, 対応は全くない。しかし卓越周期のような主要ピークはどちらの方法によっても同じことが明らかである。図11の新幹線通過時のフーリエスペクトルは周期的に高い振動数

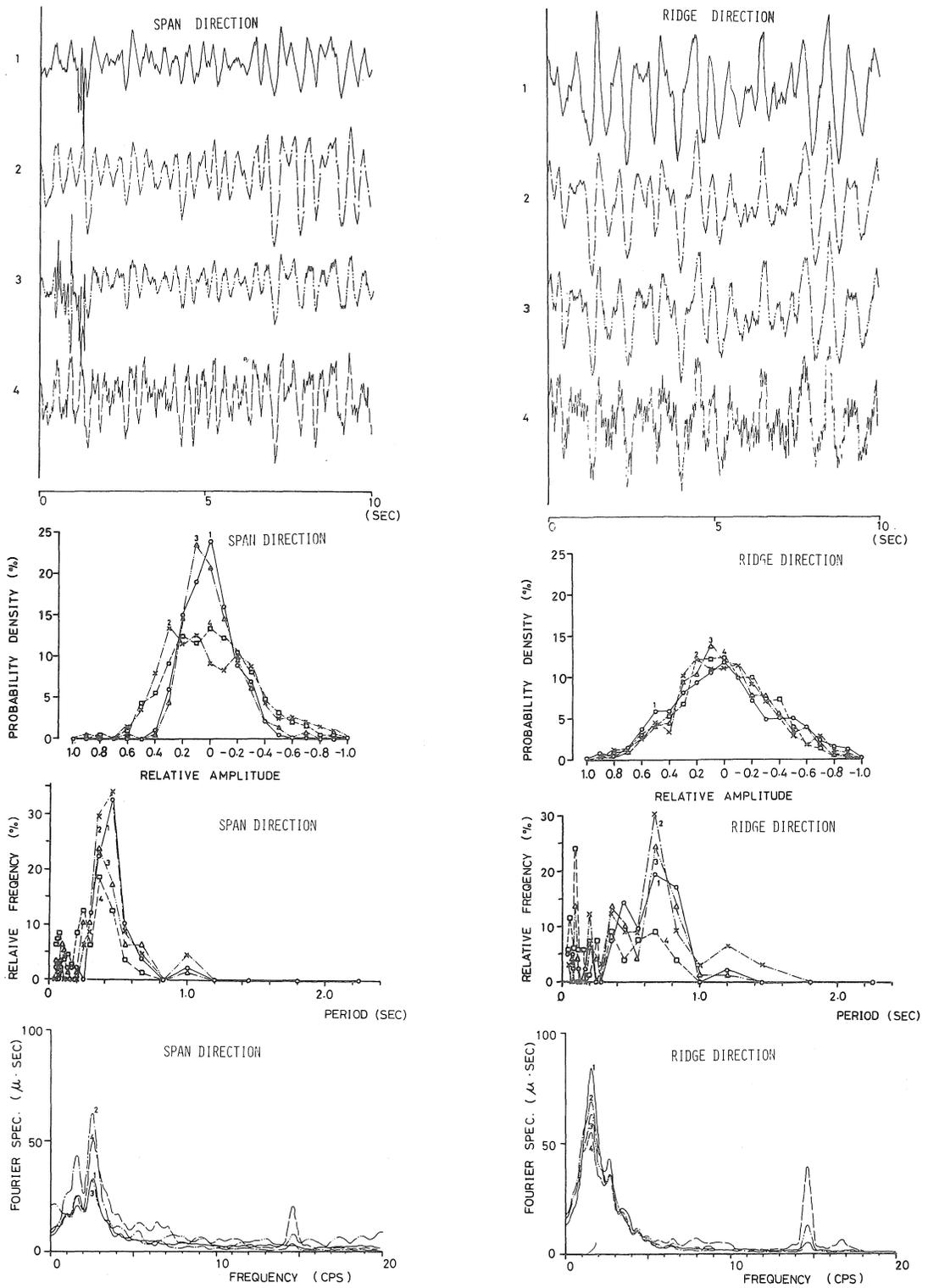


図 9 Aブロック原波形・確率密度分布・周期-頻度スペクトル・フーリエスペクトル

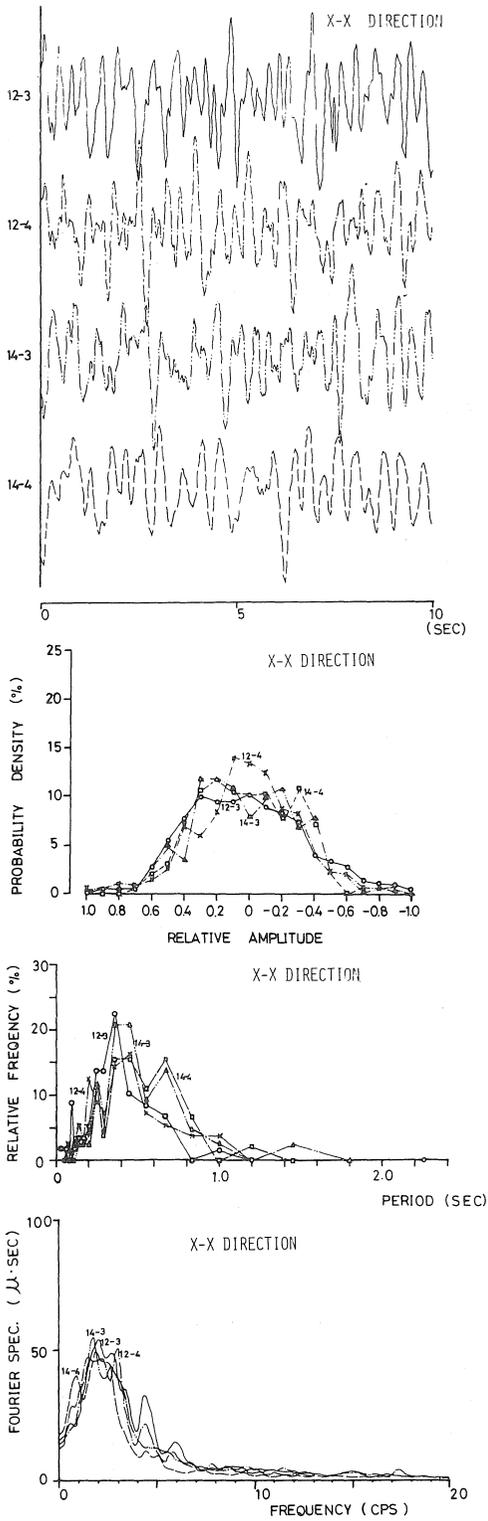


図10 グラウンドー原波形・確率密度分布・周期一頻度スペクトル・フーリエスペクトル。

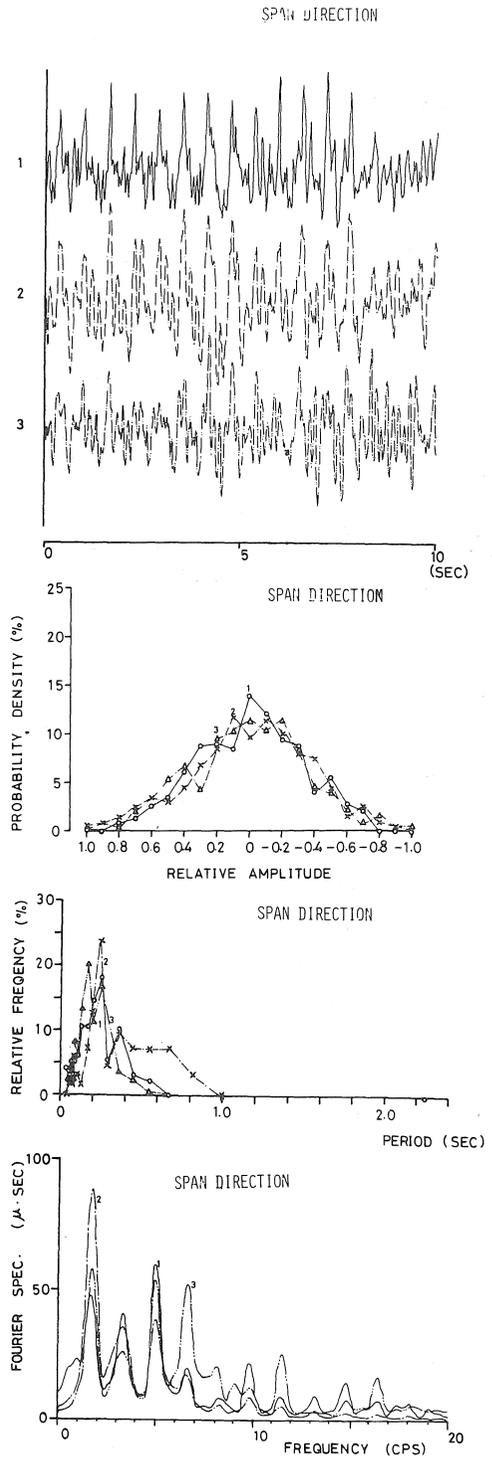


図11 新幹線ー原波形・確率密度分布・周期一頻度スペクトル・フーリエスペクトル。

表1 常時微動および新幹線振動の最大振巾

CASE NO.	Block	Point	MAXIMUM AMPLITUDE (MICRON)				
			1 ch.	2 ch.	3 ch.	4 ch.	5 ch.
1	A	○	0.6665	0.3668	0.7991	0.5136	—
2	A	○	0.3918	0.3677	0.4727	0.4445	—
3	AB	○	0.4536	0.3944	0.4522	0.4270	—
4	AB	○	0.3465	0.4156	0.5382	0.3038	—
5	AB	○	0.3125	0.2817	0.5414	0.3774	—
6	AB	○	0.4231	0.3785	0.5161	0.3663	—
7	B	○	0.6537	0.6004	0.4572	—	—
8	B	○	—	0.3032	0.2691	—	—
9-1-A	C	○	3.380	1.932	2.850	—	—
9-1-B	C	○	9.034	4.854	8.093	—	—
9	A	○	0.8253	0.5273	0.6506	—	—
9	B	○	1.114	0.4795	0.6286	—	—
10	C	○	0.4038	0.4696	0.6354	—	—
11	Gr	○	0.4203	0.4051	0.3994	0.3742	0.1337
12	Gr	○	0.5503	0.5432	0.4070	0.4419	0.4453
13	Gr	○	0.5331	0.5546	0.6256	0.4824	0.6346
14	Gr	○	0.4084	0.4248	0.3575	0.3553	0.3524
14-A	Gr	○	1.906	1.542	2.152	1.274	1.863
14-B	Gr	○	2.196	1.942	1.967	1.860	2.924
15	A	○	1.437	1.653	—	—	—
16-A	A	○	1.428	1.387	—	—	—
16-B	A	○	0.7241	1.891	—	—	—
16-C	A	○	0.7600	0.7440	—	—	—
17-A	B	○	1.839	4.285	—	—	—
17-B	B	○	1.645	3.742	—	—	—
17-C	B	○	1.480	3.032	—	—	—
18-A	B	○	0.9426	2.991	—	—	—
18-B	B	○	1.144	1.152	—	—	—

でピークが現われているが、周期一頻度スペクトルではこのようなピークは確認できない。原波形が短周期成分を多く含んでいることは明瞭であるが、周期一頻度スペクトルは low pass フィルター（すなわち high cut フィルター）である為に短周期成分の情報が欠落している。すなわちこの種の微動の解析ではフーリエスペクトルの方が適切であると結論される。

5. 3 各ブロックの常時微動に関する考察

紙面の都合上省かれた他のブロックの結果と図9より、第1にピックの位置の違いにもかかわらずほとんど同位相で振動していることが原波形を見ると明らかであり、フーリエスペクトルの形もほとんど同じである。すなわち各ブロック全体がスウェイ或いはロッキング振動している事がわかる。地盤上の微動のフーリエスペクトルが構造物の他の点の微動のフーリエスペクトルとほとんど同じ傾向を示しているという事は、構造物に固有な振動特性を示す情報がこれらの解析からは得られない事を示している。この事は低層で比較的剛な構造物の測定結果としてしばしば経験する所である。

第2にいずれのブロックでも主要な2つのピークがあり 1.5cps (0.67秒) と 2.6cps (0.38秒) で生じている。スパン方向では 2.6cps の方が大きなピーク値を示すが、桁行方向では 1.5cps の方が大きなピーク値を示す傾向がある。

第3に最大振巾については表1に示されているが、注意すべきは地盤上の最大振巾は1階スラブ上の最大振巾よりわずかに大きい事である。又桁行方向では1階スラブと2.3階スラブの振巾比はほとんど変わらないが、スパン方向ではこの比が1.2~2.0となりロッキング振動の影響が強い事を示している。

5. 4 グラウンドの常時微動に関する考察

図10より常時微動はX-X方向とY-Y方向で周期特性について明瞭な違いは見られず方向性はない。いずれも 1.5~3.0cps (0.67~0.33秒) に卓越周期を持っている。鉛直成分は 1.8cps (0.56秒) と 2.8cps (0.36秒) の2つの振動数でピークを示している。最大振巾は水平・鉛直共およそ 0.4~0.5ミクロンである。波形より注意すべきは同時測定であっても測点の距離が 100m 近く離れていると波形が全く異なっていることである。しかし前に記している通り周期特性は変わらないから、地盤の構成がこの 100m で変化しているとは考えられない。

5. 5 新幹線通過時における各ブロックの微動に関する考察

図11より微動が 1.7, 3.3, 5.0, 6.6, 8.0, 9.6, 11.5, 14.6cps で顕著なピークを持つ比較的高周波成分の多い波動であることがわかる。A・Bブロックにおける結果は省略されているが周期特性はCブロックと極めて良く似ている。最大振巾は表1からわかるように、Cブロック1階スラブで 4.8ミクロン、Bブロック1階スラブで 1.8ミクロン、Aブロック1階スラブで 1.4ミクロンと新幹線からの距離が大きくなるに従って振巾は減衰している。

6. 結 び

本研究は建築工学科創設以来機会あるごとに整備してきた微動測定装置による測定と本学電子計算機センターにおけるデータ処理を一貫して行うシステムを完成する事を目指して行われ、概ねその目的は達成されたと思われる。

なおプログラムの内WAVE IIIの個々のサブルーチンは文献1によった。

最後に測定の機会を与えて下さったナゴヤ球場関係者、測定と図表のとりまとめに協力いただいた建築学科卒論生石賀・牛居・出口の3君に深い感謝の意を表わす所である。

参 考 文 献

- 1) 大 崎 順 彦 「地震動のスペクトル解析入門」鹿島出版会
- 2) 日 本 建 築 学 会 「名古屋地盤図」 コロナ社
- 3) 横尾・坂本・多賀 「地震時における名古屋地盤の振動特性に関する調査」名古屋市防災会議資料
- 4) 小 林 芳 正 「建設における地盤振動の影響と防止」 鹿島出版会