

残差相互スペクトルによる地震動の波形特性

WAVE CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKE GROUND MOTION BY RESIDUAL CROSS SPECTRA

星 谷 勝*・石 橋 裕**

By Masaru HOSHIYA and Yutaka ISHIBASHI

1. ま え が き

多次元非定常確率過程の理論構成を物理的意味を明らかにするために分解してみると、Bendat⁴⁾、Dodds 等⁶⁾の残差相互スペクトル(または、残差コヒーレンス)が理論の中心的な役割を果していることが明らかとなった¹⁾。ここでは、この残差相互スペクトルを用いて強震地震動の加速度波形特性の解明を試みたものである。まず、2. 残差相互スペクトルの物理的意味を検討し、3. 残差コヒーレンスを用いて特徴のわかった人工地震動3成分の波形特性の相互相関性を解析し、残差コヒーレンスによってその特徴をとらえることのできることを確認した。そして、2、3の結果を踏えて、先の研究²⁾で扱った実地震加速度波(Hollywood Storage 記録)の1点3成分波の波形特性を解析し、実体波や表面波の検出に残差コヒーレンスが有用であることを示唆した。

2. 残差相互スペクトルの物理的意味の検討

(1) 残差相互スペクトル

多次元非定常確率過程のシミュレーション理論³⁾によれば

$$x_i(t) = \sum_{p=1}^i \sum_{k=1}^N b_{ip}(\omega_k, t) \cos\{\omega_k t + \beta_{ip}(\omega_k, t) + \varphi_{pk}\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $b_{ip}(\omega, t)$ 、 $\beta_{ip}(\omega, t)$ は次式のように $S_{ij}(\omega, t : \omega)$ を分解して与えられる。

$$S_{ij}(\omega, t : \omega) = \frac{1}{4} \sum_{p=1}^i \sum_{q=1}^j B_{ip}(\omega, t) B_{jq}^*(\omega, t) \dots\dots\dots (2)$$

$$B_{ip}(\omega, t) = b_{ip}(\omega, t) \exp\{i\beta_{ip}(\omega, t)\}$$

$$d\omega = (\omega_U - \omega_L)/N, \omega_k = \omega_L + \left(k - \frac{1}{2}\right) d\omega$$

$\varphi_{pk} : 0 \sim 2\pi$ の一様乱数

なお、 ω_U, ω_L は $S_{ij}(\omega, t : \omega)$ が有意強度を持つ正の ω 領域の上限値および下限値である。 N は十分に大きな整数とする。

ここで、式(1)は次式のように分解されよう。

$$a_p(t) = \sum_{k=1}^N \cos(\omega_k t + \varphi_{pk}) \dots\dots\dots (3)$$

$$x_{ip}(t) = \sum_{k=1}^N |B_{ip}(\omega_k, t)| \cos\{\omega_k t + \beta_{ip}(\omega_k, t) + \varphi_{pk}\} \dots\dots\dots (4)$$

$$x_i(t) = \sum_{p=1}^i x_{ip}(t) \dots\dots\dots (5)$$

式(3)は $\omega_L \leq \omega \leq \omega_U$ 領域でパワースペクトル S_{ap} が一定 ($1/4 d\omega$) の有帯域ホワイトノイズである。式(4)はホワイトノイズ $a_p(t)$ がフィルター $B_{ip}(\omega, t)$ に入力したときの出力となっている。式(5)は式(4)の出力を $p=1$ から i まで加算したものである。したがって、式(1)は図-1のように地震動は互いに独立なホワイトノイズ $a_i(t)$ がある非定常なシステムを通して出力された応答量と考えることができる。

そこで、式(1)や図-1より出力 $x_i(t)$ と $x_j(t)$

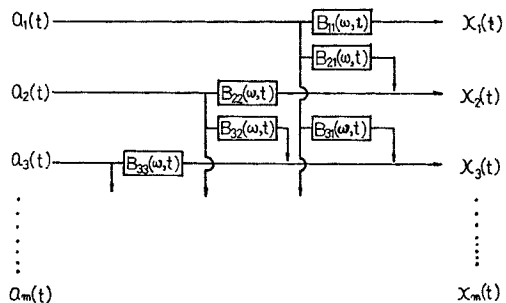


図-1 入出力システム

* 正会員 Ph.D. 武蔵工業大学教授 土木工学科

** 八千代エンジニアリング(株)技術本部

の相互スペクトルを次のように分解することが可能となる。

$$S_{ij}(\omega, t; \omega) = \frac{1}{4d\omega} \sum_{p=1}^i B_{ip}(\omega, t) B_{jp}^*(\omega, t) \\ = \sum_{p=1}^i B_{ip} \cdot B_{jp}^* \cdot S_{a_p}$$

これより S_{ij} はホワイトノイズ $a_p(t) : p=1 \sim i$ の影響を受けた各要素の総和から構成されることがわかる。

たとえば、 $x_3(t)$ に関しては

$$S_{33} = \frac{1}{4d\omega} \sum_{p=1}^3 |B_{3p}|^2 \\ = |B_{31}|^2 S_{a_1} + |B_{32}|^2 S_{a_2} + |B_{33}|^2 S_{a_3} \\ = \tau_{13}^2 S_{33} + \tau_{23,1}^2 S_{33,1} + S_{33,12} \dots \dots \dots (6) \\ = \tau_{13}^2 S_{33} + S_{33,1} \dots \dots \dots (7)$$

式 (6) は $x_1(t)$ または $x_2(t)$ に対して共通な $x_3(t)$ のエネルギー (第 1, 2 項) に対して、それらとは独立な新たなエネルギー $S_{33,12}$ を加えるものである。あるいは式 (7) から $x_1(t)$ に対して共通なエネルギー $\tau_{13}^2 S_{33}$ に対して、それとは独立な新たなエネルギー $S_{33,1}$ を加えたものといえる。 $S_{33,12}$ は $x_1(t)$ および $x_2(t)$ の影響を除去した $x_3(t)$ の残差 Physical Spectrum と呼ぶことにする。

この考え方は C.J. Doods と J.D. Robson⁶⁾ および J.S. Bendat^{4), 5)} に基づくものであり、一般に J.S. Bendat⁴⁾ によって次のような公式が与えられている。

$$S_{ij,1} = \frac{S_{11} S_{ij} - S_{i1} S_{j1}}{S_{11}} \quad i=2, \dots, m \dots \dots (8) \\ S_{ij,12} = \frac{S_{22,1} S_{ij,1} - S_{i2,1} S_{j2,1}}{S_{22,1}} \quad i=3, \dots, m \\ i \leq j \dots \dots \dots (9)$$

(J.S. Bendat は 定常過程の場合を示しているが非定常過程に容易に拡張できる)

そこで、 $x_2(t)$ および $x_3(t)$ から $x_1(t)$ の影響を除去した残差相互スペクトルは

$$S_{23,1} = \frac{S_{11} S_{23} - S_{21} S_{13}}{S_{11}} = \frac{1}{4d\omega} B_{22} B_{32}^* \dots \dots (10)$$

となる。

さて、次のような要素からなる地震動 3 成分を考えてみよう。

$$x_1(t) = y_{11}(t) + y_{12}(t) + y_{13}(t) \\ x_2(t) = y_{21}(t) + y_{22}(t) + y_{23}(t) \\ x_3(t) = y_{31}(t) + y_{32}(t) + y_{33}(t)$$

ここで、 $y_{12}(t)$ と $y_{21}(t)$ は完全相関しているものとする。同様に $\{y_{13}(t)$ と $y_{31}(t)\}$ および $\{y_{23}(t)$ と $y_{32}(t)\}$ はそれぞれ完全相関したグループとする。一方、 $y_{11}(t)$, $y_{22}(t)$ および $y_{33}(t)$ は互いに独立で、かつ他の $y_{12}(t)$, $y_{13}(t) \dots$ 等とも独立であるとする。このようにして構成された $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ を式 (1) よりシミュレートすれば

$$x_1'(t) = Y_{11}(t) \\ x_2'(t) = Y_{21}(t) + Y_{22}(t) \\ x_3'(t) = Y_{31}(t) + Y_{32}(t) + Y_{33}(t)$$

となる。すなわち、最初のプロセス $x_1(t)$ は 1 つの項より構成され $x_1'(t)$ となる。第 2 のプロセス $x_2(t)$ は 2 つの項から構成されてシミュレートされる。第 3 のプロセスは同様にして 3 つの項から構成されることになる。その結果、たとえば第 3 式は元の構成要素を示すが、第 2 式の $Y_{22}(t)$ および第 1 式の $Y_{11}(t)$ は元の構成要素ではなく実際は $Y_{22}(t) = \{y_{22}(t) + y_{23}(t)\}$ と $Y_{11}(t) = \{y_{11}(t) + y_{12}(t) + y_{13}(t)\}$ と考えられる。

したがって、地震動成分を構成要素に分解して調べるためには、各成分の解析順序を入れ換えて式 (1) をそれぞれに対して計算する必要がある。いいかえれば、おのおの波の構成要素を明らかにするために相互スペクトル行列の入れ換えが必要となる。

以上の考え方を実証するために、あらかじめ特徴のわかかった波で残差相互スペクトルを求めてみることにする。

(2) 人工地震波による残差相互スペクトルの検討

(a) 人工地震波

残差相互スペクトルマップを正しく解釈するために、あらかじめ特徴の明白なかつ、もっとも単純な波を用いて検討する。そのために、人工地震波 $x_i(t)$, $i=1, 2, 3$ は次のようにして作成した。

まず、平均値 0 のホワイトノイズが伝達関数 $H_i(\omega)$ に入力したときの定常応答量 $y_i(t)$ を $i=1$ から 3 まで互いに独立として、次のように作成する。

$$y_i(t) = \sum_{k=1}^N |H_i(\omega_k)| \cos\{\omega_k t + \theta_i(\omega_k) + \varphi_{ik}\} \\ \dots \dots \dots (11)$$

ただし、 $H_i(\omega) = f_i(\omega) \exp\{i\theta(\omega)\}$

ここで、 $f_i(\omega)$ は $y_i(t)$ のスペクトル強度分布がはっきり現われるようにするために

$$f_i(\omega) = 10 \cdot e^{-2|\omega - \omega_0|} \dots \dots \dots (12)$$

ただし、 $\omega_0 : H_i(\omega)$ の周波数特性値の関数で与えた。 $f_i(\omega)$ の関数形は 図-2 のようになる。また、位相角 $\theta_i(\omega)$ は任意に与える。

さて、これらの $y_i(t)$ を用いて解析に使用する人工地震波を次のようにして作成した。

$$x_1(t) = y_1(t) \dots \dots \dots (13)$$

$$x_2(t) = y_1(t) + y_2(t) \dots \dots \dots (14)$$

$$x_3(t) = y_1(t) + y_2(t) + y_3(t) \dots \dots \dots (15)$$

ここで、3 個の独立波 $y_i(t)$, $i=1, 2, 3$ の性質を表-1 に示しておく。この人工地震波構成からわかるように、 $x_i(t)$ と $x_j(t)$ の相互スペクトルはそれぞれ共通に有する構成要素の Physical Spectrum の和となり位相差は

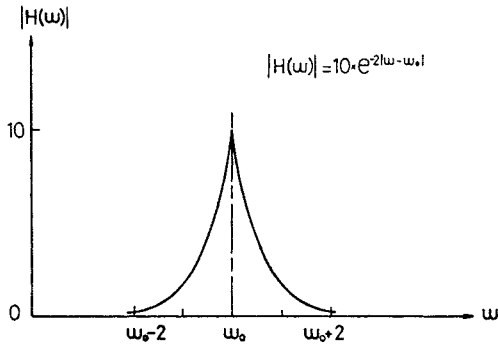


図-2 $f(\omega) = |H(\omega)|$ の関数形

表-1 人工地震波の特性

	含有周波数領域幅 (Hz)	周波数特性値 (Hz)	位相角
y_1	0.0~5.0	2.0	30°
y_2	1.5~6.5	4.0	30°
y_3	3.5~8.5	6.0	30°

常に0となる。たとえば、 $x_2(t)$ と $x_3(t)$ の相互スペクトルは式 (14) と式 (15) より $y_1(t)$ の Physical Spectrum と $y_2(t)$ の Physical Spectrum の和となっている。そのため、位相角 $\theta_i(\omega)$ は任意に与えても本質的にはここでの目的に影響を及ぼさない。

そこで、この人工地震波を用いて残差相互スペクトルを調べることにする。

(b) 人工地震波の残差相互スペクトル

上記の人工地震波は定常であるが、現象を明確に表示できるように非定常な数値解析と同一の処理を行った。

多次元非定常確率過程の相互スペクトルを求め、式 (2) および式 (8) から式 (10) の計算をすることにより残差相互スペクトルを求める。なお、それらのマップを図-3 から 図-8 に示す。

まず、 $x_3(t)$ の Physical Spectrum は

$$S_{33} = S_{y_1} + S_{y_2} + S_{y_3} = \frac{1}{4} \frac{1}{d\omega} (|H_{11}|^2 + |H_{21}|^2 + |H_{31}|^2)$$

ただし、 $S_{y_i} : y_i(t)$ の Physical Spectrum で表わされる。 $x_3(t)$ の Physical Spectrum マップ (図-3) は横軸を周波数軸に、縦軸を時間軸とした。また、影の領域が最大スペクトル強度の 10% 以上領域を示している。数値解析に含まれる誤差量と考えた上でながめてみれば、この図は期待された通りの定常なマップとなっている。図-4 は $S_{33,1}$ の解析マップであるが、 $x_1(t)$ の影響である 2 Hz を中心とする分布の帯が消えていることが確認できる。次に、 $S_{33,12}$ の解析マップ (図-5) から 2 Hz および 4 Hz を中心とする分布の帯が消えていることが確認される。除去された分布の帯は $x_1(t)$ と $x_2(t)$ の影響部分である。

次に、 $x_2(t)$ に関するスペクトルマップを検討してみ

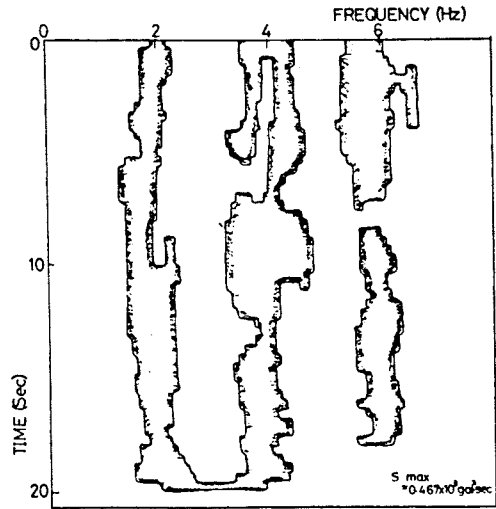


図-3 Physical Spectrum S_{33}

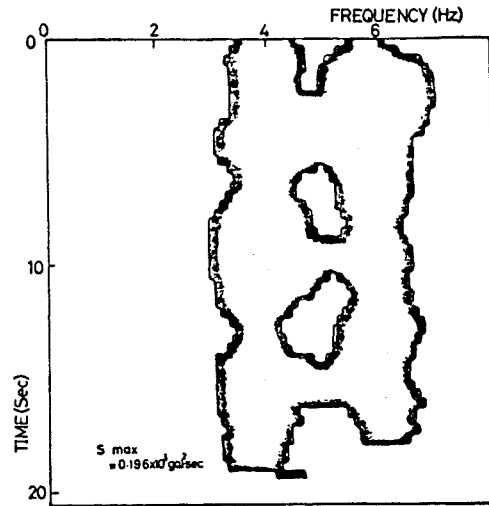


図-4 残差 Physical Spectrum $S_{33,1}$

よう。まず、 $x_2(t)$ と $x_3(t)$ の相互スペクトルマップを図-6 に示すが、期待どおり 2 Hz および 4 Hz を中心とした分布の帯になっている。図-7, 8 はそれぞれ $S_{22,1}$ および $S_{23,1}$ の解析マップであるが、 $x_1(t)$ の影響である 2 Hz 中心の分布の帯が消えている。また、 $S_{22,1}$, $S_{23,1}$ の最大スペクトル強度 および分布形状がほぼ一致し、理論どおりに $S_{22,1} = S_{y_2}$, $S_{23,1} = S_{y_2}$ となっていることがわかる。

以上のことより、注目地震動 2 成分から他の影響成分を除く残差相互スペクトルの解釈の正しさが明らかにされたと考える。さらに、これらを正規化したコヒーレンス (残差コヒーレンス) を用いれば波形特性をより明確にとらえることができると思われるので、次に人工地震波のデータを用いて残差コヒーレンスマップの検証を行うことにする。

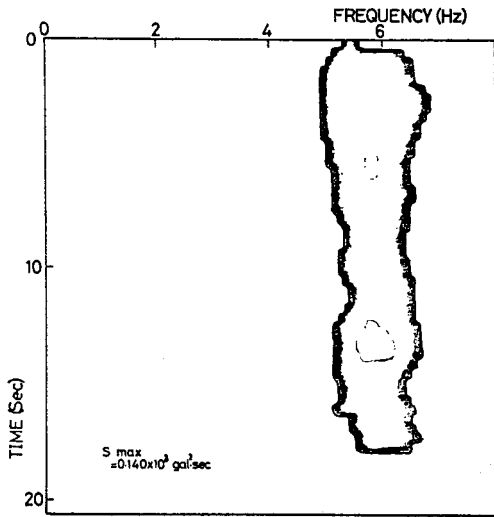


図-5 残差 Physical Spectrum $S_{23,12}$

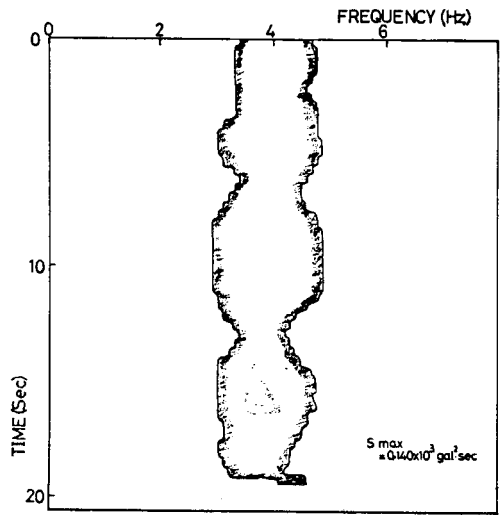


図-7 残差 Physical Spectrum $S_{22,1}$

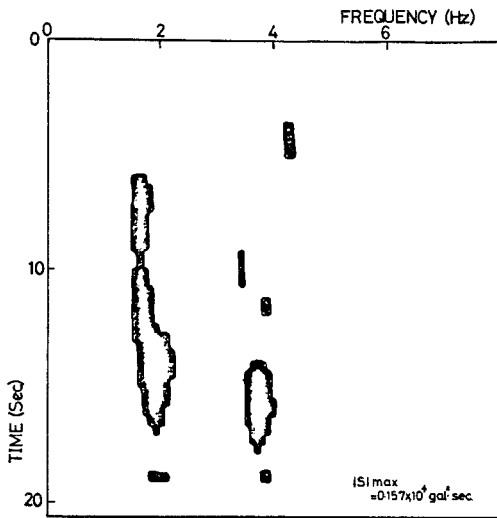


図-6 相互スペクトル $|S_{23}|$

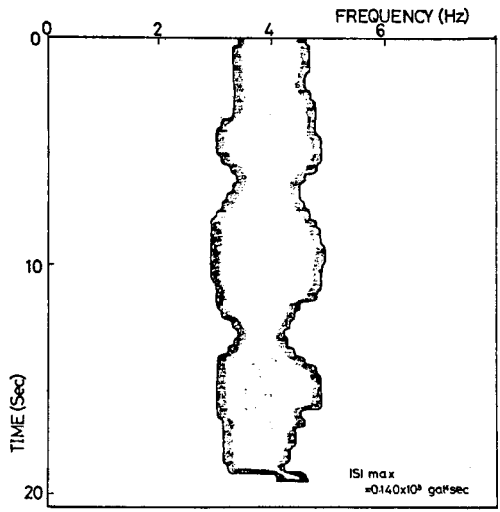


図-8 残差相互スペクトル $|S_{23,1}|$

3. 残差コヒーレンスによる人工地震動3成分の波形特性の解析

地震動を3次元のベクトルと考えた場合、長周期成分に限定してベクトルの変動平面がわかれば表面波の種類を検出できよう。

(1) 人工地震波によるコヒーレンスマップの検討

人工地震波は高相関領域の時間的推移を追跡すること

$$\begin{array}{l}
 X_1(t) = \underbrace{y_1^{\textcircled{1}}}_{\text{卓越時刻}} + 0.0 \quad \underbrace{+ y_1^{\textcircled{2}} \quad + y_3^{\textcircled{2}}}_{10 \sim 13 \text{ 秒}} + 0.0 \quad \underbrace{+ y_1^{\textcircled{3}} + y_2^{\textcircled{3}} + y_3^{\textcircled{3}}}_{14 \sim 19 \text{ 秒}} \\
 X_2(t) = \underbrace{y_1^{\textcircled{1}} + y_2^{\textcircled{1}}}_{\text{卓越時刻}} + 0.0 \quad \underbrace{+ y_1^{\textcircled{2}} + y_2^{\textcircled{2}} + y_3^{\textcircled{2}}}_{10 \sim 13 \text{ 秒}} + 0.0 \quad \underbrace{+ y_2^{\textcircled{3}}}_{14 \sim 19 \text{ 秒}} \\
 X_3(t) = \underbrace{y_1^{\textcircled{1}} + y_2^{\textcircled{1}} + y_3^{\textcircled{1}}}_{\text{卓越時刻}} + 0.0 \quad \underbrace{\quad \quad \quad + y_3^{\textcircled{2}}}_{10 \sim 13 \text{ 秒}} + 0.0 \quad \underbrace{+ y_2^{\textcircled{3}} + y_3^{\textcircled{3}}}_{14 \sim 19 \text{ 秒}}
 \end{array}$$

によって、地震動ベクトルの変動平面が想定できるような3成分とした。その人工地震動3成分のコヒーレンスおよび残差コヒーレンスマップを作成する。

(a) 人工地震波

簡単のために、人工地震波には式(11)および式(12)を用いて作成した定常過程の組み合わせから構成される非定常波を採用することにした。そこで、おのおのの特定時間領域で卓越する9波の独立波を作り、合成することによって3波の非定常合成波とした。その3波の合成人工地震波は次のようである。

表-2 人工地震波の特性

	含有時間領域 (sec)	含有周波数領域 (Hz)	周波数値 (Hz)	位相角	
$y_1①$	0.0~9.0	0.0~5.0	3.0	90°	注目成分
$y_2①$	0.0~9.0	0.0~2.0	0.3	30°	
$y_3①$	0.0~9.0	0.0~8.0	5.0	60°	
$y_1②$	10.0~13.0	0.0~2.0	0.3	30°	注目成分
$y_2②$	10.0~13.0	0.0~8.0	6.0	60°	
$y_3②$	10.0~13.0	0.0~5.0	3.0	90°	
$y_1③$	14.0~19.0	0.0~8.0	7.0	60°	注目成分
$y_2③$	14.0~19.0	0.0~5.0	3.0	90°	
$y_3③$	14.0~19.0	0.5~2.0	0.3	30°	

なお、添字 ①; $i=1, 2, 3$ は卓越時間領域のグループを示している。たとえば、①は卓越時刻 {0~9秒} のグループ、同様に②は {10~13秒}、③は {14~19秒} の卓越時刻グループを示す。また、グループ間同士は互いに独立である。

ここで、各構成要素 $y_i①, y_i②, y_i③; i=1, 2, 3$ の性質を表-2 に示す。

この合成人工地震波は、 $t=0\sim9$ 秒間では $X_i(i=1, 2, 3)$ を相関づける要素 $y_1①$ と $X_i(i=2, 3)$ を相関づける要素 $y_2①$ 、および X_3 のみの要素 $y_3①$ からなる波とし、相関性の循環を考慮して $t=10\sim13$ 秒および $14\sim19$ 秒にそれぞれ異なる要素を組み込んだ。なお、3つの時間区間を明確に分離するために、それぞれ1秒間にわたって $X_1\sim X_3$ の値を 0.0 としてある。

表-2 を参照すれば、これらは注目成分波 (周期 0.5 秒以上) ベクトルが、0~9 秒間で X_2 成分方向と X_3 成分方向の作る面内で変動することになる。10~13 秒間は X_1 成分方向と X_2 成分方向の作る面内で、それ以後は X_1 成分方向と X_3 成分方向の作る面内で変動すると考えてよい。

このようにして作られた合成人工地震波を次式を使って解析する。

式 (8) を正規化して、残差コヒーレンスは

$$r_{ij,1}^2 = \frac{|S_{ij,1}|^2}{S_{ii,1} \cdot S_{jj,1}} \quad (i \leq j)$$

となる。

さて、ここでの波は3次元波であるから $X_{2,1}$ と $X_{3,1}$

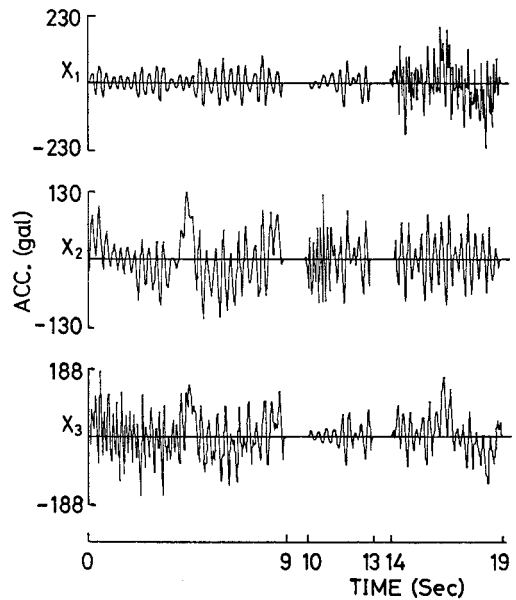


図-9 人工地震波 X_1, X_2, X_3

また、残差コヒーレンスを求めるにあたっては解析上の誤差等によりスペクトル強度の小さい領域で高い相関を持つ場合が生ずる。そこで、残差コヒーレンス式の分子の絶対残差相互スペクトル強度がきわめて小さな値となる領域の相関度を 0 とした。

解析結果を図-10, 11 に示す。与えた情報に従って 0~2 Hz 領域で各成分間の高相関領域の時間的推移がわかるように表わすことができた。また、オリジナルコヒーレンスマップに比べて、いっそう明瞭な残差コヒーレンスマップを表わすことができた。ただ、どの組み合わせの残差コヒーレンスマップとも 9~10 秒付近と 13~14 秒付近に高い相関を示す領域が存在する。これは人工地震波を合成するとき、人工地震波の値を 0 に置いた部分である。人工地震波の値が 0 の情報だけで、その他何んの情報も与えなかったことが高い相関を生じさせる原因となったと思われる。

なお、全体のマップを通して、時刻の初期と最終期の値は、時刻の中間期の解析精度に比べて解析精度が悪く

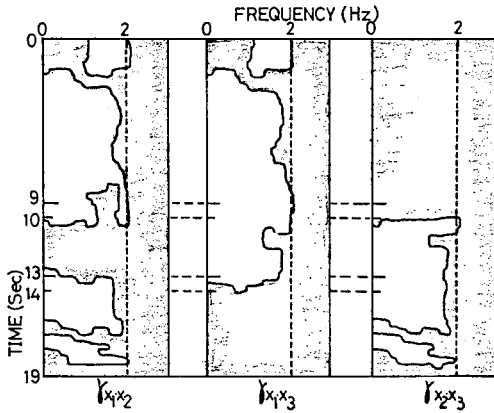


図-10 人工地震波のオリジナルコヒーレンス

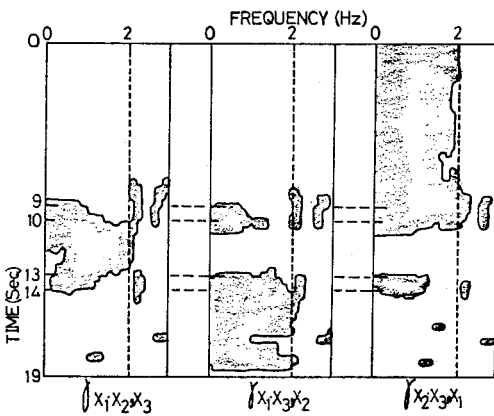


図-11 人工地震波の残差コヒーレンス

~3 Hz) の相関は高い。以上の観察結果は人工地震波をそのように作ったわけであるから当然のことといえる。

次に、残差コヒーレンスマップ(図-11)であるが、注目周波数・注目時刻 (r_{x_1, x_2, x_3} ; 10~13秒・ r_{x_1, x_2, x_3} ; 14~19秒・ r_{x_1, x_3, x_2} ; 0~9秒) 領域以外の相関はきわめて低く、注目2成分から他の1成分の影響が除去された相関分布となっている。

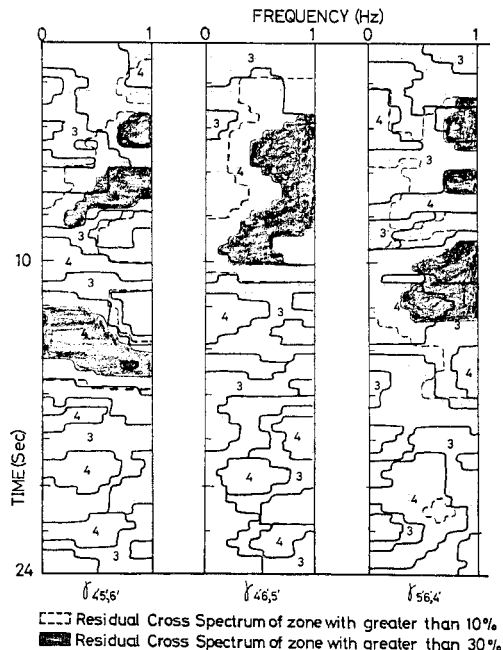
2, 3よりあらかじめ特徴のわかった人工地震波によって、残差相互スペクトルの物理的意味を明らかにし、与えた情報どりの相関度を残差コヒーレンスマップによって明瞭に示すことができた。これは逆にコヒーレンスマップから相関度を知り、地震加速度ベクトルの変動平面推定の可能性を示したことになる。よって、実地震波のコヒーレンスマップの長周期領域(周期1秒以上)内で高相関領域の推移を追跡することによって、表面波成分の検出が可能となろう。このとき残差コヒーレンスを適用して、オリジナルコヒーレンスマップよりも明瞭なマップが作成できるならば波形特性を明瞭に抽出できると思われる。

4. 実地震波への適用

先の研究²⁾で、Hollywood Storage 記録(1971年2月、サンフェルナンド地震)の地震加速度波の波形特性を主軸II方向(相互スペクトルを周波数領域および時間領域で積分したものを要素とする行列を対角化する主軸)で、地震動3成分の相関性および相互スペクトル強度の分布状態から表面波らしきものを抽出した(すなわち、時刻10秒から13秒にかけてRayleigh波が成長し、それ以降でLove波が成長していると推論したものである)。そこで、主軸II方向の地震加速度波の残差相互スペクトルおよび残差コヒーレンスを0~1 Hzの周波数領域帯で求め、あらためて先の研究での波形特性の観察について検討する。

なお、Hollywood Storage 記録の主軸II方向は、地震動の入射方向と考えられる方向(5'軸)と、それに直角な方向(4'軸)およびこれら2方向軸の作る平面に垂直な方向(6'軸)となっている。6'軸と鉛直方向とのなす角度が7°程度である。

実地震波成分の相関度は、高相関領域である限り、オリジナルコヒーレンスでも残差コヒーレンスでも相関度には差がない。しかし、低相関領域では、オリジナルコヒーレンスよりも、残差コヒーレンスの方が高い相関度を示すであろう。これは、注目2成分から他の影響1成分を除去する操作からも容易に想定できよう。そこ



□ Residual Cross Spectrum of zone with greater than 10%
 ■ Residual Cross Spectrum of zone with greater than 30%

図-12 残差コヒーレンス(主軸II)--Hollywood Storage 記録

で、残差コヒーレンスから波形特性を観察する場合にはスペクトル強度との関係に注意する必要がある。すなわち、注目周波数領域で相関度が高く、かつ残差相互スペクトル強度の高い領域を観察すればよい。

図-12に $r_{4 \cdot 5, 6}$, $r_{4 \cdot 6, 5}$ および $r_{5 \cdot 6, 4}$ の残差コヒーレンスマップを示す。なお、添字は主軸II方向での地震加速度波成分を示している。マップは、残差コヒーレンス値 0.8 以上領域を“4”、0.6 以上領域を“3”とし、それ以下の領域は無記入とした。また、絶対最大残差相互スペクトル強度の 10% 以上領域を破線で、30% 以上領域を影で示した。スペクトル強度を考慮すると、 $t=3 \sim 10$ 秒で $r_{4 \cdot 6, 5}$, $9 \sim 13$ 秒間は $r_{5 \cdot 6, 4}$ 、そして $12 \sim 16$ 秒にかけて $r_{4 \cdot 5, 6}$ と高相関領域を追究することができる。先の研究のように地震動ベクトルの変動平面を考えると、 $t=3 \sim 10$ 秒にかけてせん断的な波が卓越し、9 秒以降表面波の成長が考えられる。この表面波は、 $9 \sim 13$ 秒間は Rayleigh 波が卓越し、12 秒頃 からそれ以降 Love 波の卓越があると推定できる。

残差コヒーレンスがオリジナルコヒーレンスに比べて、より忠実に注目成分間のみの相関性をとると考えるから、この節での Hollywood Storage 記録の地震加速度波の波形特性の観察結果に対する確実度が上がったと考えられる。したがって、先の研究での観察は妥当な結果といえよう。

5. あとがき

本論は次のようにまとめられよう。

(1) あらかじめ特徴のわかった人工地震波の解析によって、残差相互スペクトルおよび残差コヒーレンスの物理的意味を確認することができた。

(2) このことは、多次元非定常確率過程のシミュレーション理論が妥当なものであることの検証となった。

(3) 残差コヒーレンスによって、人工地震波に与えられている特徴を抽出することができた。

(4) 実地震動の加速度波形特性をとらえるには残差コヒーレンスが有用である。

以上、残差相互スペクトルの物理的意味を明らかにするとともに、その有用性を示したものである。

参考文献

- 1) 星谷：多次元確率過程のシミュレーション理論の物理的意味について、土木学会論文報告集，第 270 号，1978 年 2 月
- 2) 星谷・石橋：地震動ベクトルの主軸と波形特性，土木学会論文報告集，第 268 号，1977 年 12 月
- 3) 星谷：多次元非定常確率過程の相互スペクトルとシミュレーション理論，土木学会論文報告集，第 253 号，1976 年 9 月
- 4) J.S. Bendat: Solutions for the Multiple Input/Output Problem, Journal of Sound and Vibration, 1976, 44 (3), 311-325
- 5) J.S. ベンダット, A.G. ピアソル：ランダムデータの統計処理，培風館，昭和 51 年
- 6) C.D. Dodds and J.D. Robson: Partial Coherence in Multivariate Random Processes, Journal of Sound and Vibration, 1975, 42 (2), 243-249

(1978.2.7・受付)