

コンプレックス・ディモデュレーション法による地震動の 非定常スペクトル解析

NONSTATIONARY SPECTRUM ANALYSIS OF EARTHQUAKE GROUND MOTION BY MEANS OF COMPLEX DEMODULATION METHOD

小松定夫*・藤原豪紀**・中山隆弘***

By Sadao KOMATSU, Hidetoshi FUJIWARA and Takahiro NAKAYAMA

This paper presents a procedure of nonstationary spectrum analysis by using complex demodulation with which both accurate evolutionary spectrum and nonstationary phase variation can be directly estimated. Furthermore, the record of an actual strong seismic motion, that is, the N-S component of Muroran acceleration record (1968) is analysed to demonstrate the applicability of the present analytical method. The set of results indicates that the method of complex demodulation is an effective and reliable method of evaluating evolutionary power spectrum and phase of a strong earthquake motion.

1. 緒 言

本研究は、非定常確率過程における位相の非定常性まで考慮できる汎用的な非定常スペクトル解析法を確立し、それを地震動のスペクトル解析に適用することを目的としている。

地震動は、震源から発生した波動が地殻内を反射あるいは屈折しながら地表近くまで伝播する現象であるから、その周波数、強さおよび位相は時間とともに変化する。

従来、地震動のもつ非定常性を把握するために、evolutionary spectrum, physical spectrum などの非定常スペクトル理論や、マルチフィルタリングの原理に基づいた非定常スペクトル解析法が提案され、実際の地震動記録に対する解析が行われてきた^{1)~5)}。

ただし地震動のもつ位相の非定常性については、重要性を指摘されながらも²⁾注目されることは少なかったように思われる。その理由としては、通常の耐震設計にお

いて、位相が応答に与える影響は小さいと考えられてきたこと、また従来の非定常スペクトル解析法が、位相の非定常性まで明確にできるような解析法ではなかったことなどが考えられる。

しかし、長大橋あるいはライフラインシステムの耐震設計においては、入力地震動のもつ位相差が構造物に対して不利に作用することも指摘されており、位相差を考慮できる地震応答解析法も提案されている⁶⁾。したがって今後設計用地震動を確率過程としてモデル化するためには、地震動記録から、周波数特性や振幅特性のみではなく、位相特性をも明らかにできる非定常スペクトル解析法を確立しておくことが必要である。

そこで本研究では、物理的解釈が容易で、その定義方法も定常確率過程の拡張として理解しやすい Priestley の evolutionary spectrum 理論^{7),8)}に J.W. Tukey によって開発された complex demodulation 法⁹⁾ (以下 CD 法と略記する) を適用して、振幅、周波数および位相の非定常を考慮できる非定常スペクトル解析法を提案する。なお CD 法は、通信工学の分野ではヘテロダイン法としてよく知られている非定常周波数解析の一手法で、これまで脳波の分析などに適用された例があるが¹⁰⁾、著者らの知る限りでは、地震動のスペクトル解析への応用例はないようである。

* 正会員 工博 大阪産業大学教授 工学部土木工学科
(大阪大学名誉教授) (〒574 大東市中垣内 3-1-1)

** 正会員 工修 日立造船(株)陸機本部
(〒554 大阪市此花区桜島 1-3-40)

*** 正会員 工博 広島工業大学助教授 工学部土木工学科
(〒731-51 広島市佐伯区五日市町三宅 725)

本論文では、まず CD 法を用いた非定常スペクトル解析法を定式化し、次に本解析法に適するフィルターの選択条件を示す。そして条件にうまく適合する Ormsby のフィルター¹²⁾を用いて解析した実際の地震動記録の非定常スペクトルと時間的に変化する位相特性を提示する。さらに本解析法の有効性を、解析結果を用いて求めた再合成波形と原波形との比較によって示す。

上記の比較検討によって、本解析法の有効性、さらには従来無視されてきた位相の非定常性を考慮することの重要性を考察する。ただし位相の非定常性の物理的意味については現段階では言及していない。

なお本論文における定式化は、一般的な非定常確率過程を想定して行っているが、実際の解析は、1つのサンプル関数について行っている。具体的には、1968年の十勝沖地震の際に室蘭で得られた地震動記録の NS 成分に対するものである。

2. CD 法による非定常パワースペクトル密度関数と位相の算定法

(1) 非定常パワースペクトル密度関数の定義

まず非定常確率過程 $X(t)$ の非定常パワースペクトル密度関数 (以下、簡単に非定常スペクトルという) を、Priestly の evolutionary spectrum 理論によって定義する。まず、本論文で扱う非定常確率過程 $X(t)$ は時間および周波数に対してともにゆるやかに変化する確定的な変調関数 (modulating function) $A(t, \omega)$ によって

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(t, \omega) e^{i\omega t} dz(\omega) \dots\dots\dots (1)$$

と表わされるものとする。ただし式中の $dz(\omega)$ は次式を満たす直交関数である。

$$E[dz(\omega_1) dz^*(\omega_2)] = \begin{cases} dG(\omega) (\omega_1 = \omega_2 = \omega) & \dots\dots\dots (2) \\ 0 (\omega_1 \neq \omega_2) \end{cases}$$

ここで、 $dz^*(\omega)$ は $dz(\omega)$ の共役複素数である。

このときいわゆる evolutionary spectrum $g_X(t, \omega)$ は、次式のように定義される。

$$g_X(t, \omega) d\omega = |A(t, \omega)|^2 dG(\omega) \dots\dots\dots (3)$$

(2) Complex demodulation 法

緒言でも述べたように、CD 法は、通信工学の分野ではヘテロダイン法としてよく知られている非定常周波数解析の一手法であり、ある周波数に対する振幅 (包絡線) および位相の時間的変化を算出できる点にその特徴がある。以下、CD 法の概念を簡単に説明する。

いま単一周波数 ω_0 をもち、振幅 $a(t)$ および位相 $\varphi(t)$ がいずれも時間 t の関数で与えられるような確率過程 $U(t)$ を考える。このとき $U(t)$ は次式で表わされる。

$$U(t) = a(t) \cos(\omega_0 t + \varphi(t)) \dots\dots\dots (4)$$

式 (4) の両辺に、それぞれ $\cos \omega_0 t$, $\sin \omega_0 t$ を掛け

ると、

$$\left. \begin{aligned} U(t) \cos \omega_0 t &= \frac{1}{2} a(t) \{ \cos \varphi(t) \\ &\quad + \cos(2\omega_0 t + \varphi(t)) \} \\ U(t) \sin \omega_0 t &= \frac{1}{2} a(t) \{ -\sin \varphi(t) \\ &\quad + \sin(2\omega_0 t + \varphi(t)) \} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

となる。さらに式 (5) にローパスフィルター処理 F を施して、上式における $2\omega_0$ の周波数成分をカットし、0 周波数成分を取り出す。すなわち

$$\left. \begin{aligned} p(t, \omega_0) &= F(U(t) \cos \omega_0 t) = \frac{1}{2} a(t) \cos \varphi(t) \\ q(t, \omega_0) &= F(U(t) \sin \omega_0 t) = -\frac{1}{2} a(t) \sin \varphi(t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

式 (6) より、次式が成立することがわかる。

$$\left. \begin{aligned} a(t) &= 2 \{ p(t, \omega_0)^2 + q(t, \omega_0)^2 \}^{1/2} \\ \varphi(t) &= -\arctan(q(t, \omega_0)/p(t, \omega_0)) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

なお $\varphi(t)$ は $-\pi \leq \varphi(t) \leq \pi$ で $q(t, \omega_0)$ と $-\sin \varphi(t)$ が同符号になるようにとるものとする。以上のように原波形に式 (5) と式 (6) で表わされる処理を施すことにより、式 (7) によって単一周波数 ω_0 をもつ関数 $U(t)$ の振幅 $a(t)$ および位相 $\varphi(t)$ の時間的変化を知ることができる。

さて地震動はもちろんのこと、実際の物理的現象あるいは社会的現象は、ほとんどの場合単一周波数成分のみではなく、ある周波数帯域をもつ関数によって表現される。その場合には、関数にあらかじめ中心周波数が ω_0 のバンドパスフィルターをかけて得られる新たな関数に対し CD 法を適用し、元の関数の ω_0 成分に対する振幅ならび位相を検出すればよい。すなわち具体的には以下のようなものである。

まず関数 $V(t)$ が次式のように表わされるものとする。

$$V(t) = \sum_{i=1}^N a(t, \omega_i) \cos(\omega_i t + \varphi(t, \omega_i)) \dots\dots\dots (8)$$

上式で表わされるデータに中心周波数 ω_j なる狭帯域のバンドパスフィルターを掛けると、得られる新たなデータは次式によって与えられる。

$$V_{\omega_j}(t) = \sum_{i=j-m}^{j+m} a(t, \omega_i) \cos(\omega_i t + \varphi(t, \omega_i)) \dots\dots\dots (9)$$

ここで上述の狭帯域バンドパスフィルターが適切なものであれば式 (9) の $V_{\omega_j}(t)$ は近似的に次式のようになる。

$$V_{\omega_j}(t) = a(t, \omega_j) \cos(\omega_j t + \varphi(t, \omega_j)) \dots\dots\dots (10)$$

式 (10) に対して式 (5) ~ 式 (7) で示した処理を行うと、関数 $V(t)$ の ω_j 周波数成分に対する包絡線 $a(t, \omega_j)$ および位相 $\varphi(t, \omega_j)$ が得られる。

(3) CD法を用いた非定常スペクトルおよび位相の算定法

式(1)において、

$$dF(t, \omega) = A(t, \omega) dz(\omega) \dots\dots\dots (11)$$

とおくと、

$$X(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega t} dF(t, \omega) \dots\dots\dots (12)$$

が得られる。

このとき式(3)より、 $X(t)$ の非定常スペクトルは

$$g_x(t, \omega) d\omega = E[|dF(t, \omega)|^2] \dots\dots\dots (13)$$

と表わせる。

さて $dF(t, \omega)$ の実部、虚部をそれぞれ $dF_R(t, \omega)$, $dF_I(t, \omega)$ とすれば、式(12)は次式のようになる。

$$\begin{aligned} X(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} (\cos \omega t + i \sin \omega t) [dF_R(t, \omega) + i dF_I(t, \omega)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \{dF_R(t, \omega) \cos \omega t - dF_I(t, \omega) \sin \omega t\} \\ &\quad + i \int_{-\infty}^{\infty} \{dF_I(t, \omega) \cos \omega t + dF_R(t, \omega) \sin \omega t\} \\ &\quad \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

しかるに $X(t)$ は実関数であるから、式(14)の虚部は0である。すなわち $dF_R(t, \omega)$ および $dF_I(t, \omega)$ はそれぞれ ω の偶関数および奇関数となる。したがって式(14)は

$$\begin{aligned} X(t) &= 2 \int_0^{\infty} \{dF_R(t, \omega) \cos \omega t - dF_I(t, \omega) \sin \omega t\} \\ &= 2 \int_0^{\infty} |dF(t, \omega)| \cos\{\omega t + \varphi(t, \omega)\} \dots\dots\dots (15) \end{aligned}$$

となる。ただし、 $\varphi(t, \omega) = \arctan\{dF_I(t, \omega)/dF_R(t, \omega)\}$ であり、 $\varphi(t, \omega)$ は $-\pi \leq \varphi(t, \omega) \leq \pi$ で $dF_I(t, \omega)$ と同符号になるように選ぶ¹¹⁾。

さらに式(15)の $X(t)$ を近似的に次式によって表わす。

$$X(t) = 2 \sum_{i=1}^N |dF(t, \omega_i)| \cos\{\omega_i t + \varphi(t, \omega_i)\} \dots\dots\dots (16)$$

式(8)と(16)には完全な対応関係があり、これによりCD法によって式(16)の $|dF(t, \omega_i)|$ と $\varphi(t, \omega_i)$ が得られることがわかる。さらに $|dF(t, \omega_i)|$ が求まれば、式(13)によって非定常スペクトル $g_x(t, \omega_i)$ が得られる。ただしこれより以降では、 $\omega > 0$ の領域でのみ定義される非定常スペクトル、いわゆる片側スペクトル $f_x(t, \omega)$ を $X(t)$ の非定常スペクトルと考えてゆくことにする。この場合

$$f_x(t, \omega_i) \Delta\omega_i = 2 E[|dF(t, \omega_i)|^2] \dots\dots\dots (17)$$

となる。ただし $\Delta\omega_i$ はバンドパスフィルターの帯域幅である。

以上は、非定常確率過程 $X(t)$ に対する非定常スペクトル解析法であるが、1つの確定時間関数 $x(t)$ に対しても全く同様のプロセスによって、その非定常スペクトル $f_x(t, \omega_i)$ と位相特性の時間的変化を求めることがで

きる。すなわち、 $f_x(t, \omega_i)$ は式(17)に対して

$$f_x(t, \omega_i) \Delta\omega_i = 2 |dF(t, \omega_i)|^2 \dots\dots\dots (18)$$

とすればよい。

本研究では式(18)で定義される非定常スペクトルを強震記録の解析に適用している。

(4) 本解析で用いたフィルター

CD法を利用するとき最も留意すべき点は、適切なフィルターを選択することであるが、本解析では、以下の条件を考慮して使用するフィルターを選定した。

i) バンドパスフィルターに対する条件

- a) 位相遅れがないこと。
- b) 各バンドを通して得られたフィルター処理後のデータ $x_i(t)$ の総和が、元のデータ $x(t)$ に一致すること。すなわち次式が成立すること。

$$x(t) = \sum_{i=1}^N x_i(t) \dots\dots\dots (19)$$

c) フィルター処理した周波数帯域が明確であること。

d) 式(17)の $\Delta\omega_i$ を統一的に説明できること。

ii) ローパスフィルターに対する条件

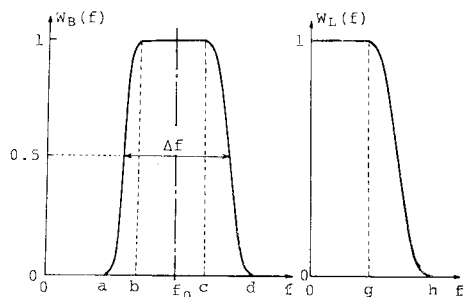
- a) 位相遅れがないこと。
- b) カットオフ周波数や遮断周波数が明確であること。

以上の条件を満たすフィルターとして、図-1に示すような Ormsby のフィルターを用いた¹²⁾。まずバンドパスフィルターの周波数領域での重み関数 $W_B(f)$ は、

$$W_B(f) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{f-a}{b-a} + 1\right)\pi & (a \leq f \leq b) \\ 1 & (b \leq f \leq c) \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{f-c}{d-c}\right)\pi & (c \leq f \leq d) \end{cases} \dots\dots\dots (20)$$

で与えられる。ただし f (Hz) は周波数を表わす。また時間領域での重み関数 $w_B(t)$ は $W_B(f)$ のフーリエ逆変換によって次式のように表わされる。

$$w_B(t) = \frac{1}{2\pi t} \left[\frac{\sin 2\pi c t + \sin 2\pi d t}{1 - 4(d-c)^2 t^2} \right]$$



(a) バンドパスフィルター (b) ローパスフィルター
図-1 Ormsbyのフィルター

$$\frac{\sin 2\pi at + \sin 2\pi bt}{1 - 4(b-a)^2 t^2} \dots\dots\dots(21)$$

次にローパスフィルターとしては、やはり Ormsby のフィルターを利用し、次に示すような周波数領域の重み関数 $W_i(f)$ と時間領域での重み関数 $w_i(t)$ をもつフィルターを用いた。

$$W_i(f) = \begin{cases} 1 & (0 \leq f \leq g) \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{f-g}{h-g}\pi\right) & (g \leq f \leq h) \end{cases} \dots\dots(22)$$

$$w_i(t) = \frac{1}{2\pi t} \left\{ \frac{\sin 2\pi gt + \sin 2\pi ht}{1 - 4(h-g)^2 t^2} \right\} \dots\dots\dots(23)$$

3. 数値解析

(1) 地震動記録

本研究で使用した地震動データは、1968年の十勝沖地震における室蘭地震波のNS成分であり、記録時間が90.11秒、記録時間間隔が0.01秒のデジタル記録である。さらに最大加速度は204.57galである。本研究では強震記録の非定常スペクトルや位相の算定にCD法を活用できるかどうかを検討することに主眼を置いたので、解析はこの地震動のみに対して行った。

(2) 周波数帯域およびバンドパスフィルターの帯域幅

周波数帯域は0.1Hz~11.0Hzとし、表-1に示すような15個の中心周波数 f_0 に着目して非定常スペクトルと非定常位相特性を算出した。おのおのの着目周波数を含むバンドパスフィルターの一部を図-2に示す。いうまでもなく、本解析法によって得られる非定常スペクトルと位相の時間曲線は、バンドパスフィルターの帯域幅によってかなり異なることが考えられるが、本研究では亀田²⁾および吉田⁴⁾の研究成果を参考にして15個のバンドパスフィルターの帯域幅を決定した。なお式(17)に含まれる $\Delta\omega_i$ については、図-1(a)に示すような周波数間隔 Δf_i に対して、 $\Delta\omega_i = 2\pi\Delta f_i$ として定めた。本論文ではこの $\Delta\omega_i$ をバンドパスフィルターの帯域幅と考えている。またバンドパスフィルターの中心周波数はフィルターの周波数領域における重み関数の重心とした。

図-2に示したフィルターが本解析に適したものであ

表-1 各バンドの中心周波数およびフィルターの重み関数に含まれる定数

No.	f_0 (Hz)	a (Hz)	b (Hz)	c (Hz)	d (Hz)	g (Hz)	h (Hz)
1	0.095	0.079	0.090	0.110	0.124	0.050	0.140
2	0.134	0.110	0.124	0.152	0.172	0.110	0.200
3	0.189	0.152	0.172	0.212	0.240	0.180	0.290
4	0.271	0.212	0.240	0.296	0.335	0.290	0.400
5	0.378	0.296	0.335	0.413	0.468	0.360	0.500
6	0.529	0.413	0.468	0.578	0.655	0.500	0.800
7	0.740	0.578	0.655	0.809	0.917	0.700	1.000
8	1.037	0.809	0.917	1.133	1.284	0.800	1.500
9	1.450	1.133	1.284	1.586	1.794	1.300	2.000
10	2.024	1.586	1.794	2.210	2.501	2.100	3.000
11	2.823	2.210	2.501	3.083	3.490	3.100	4.000
12	3.941	3.083	3.490	4.304	4.874	4.500	5.900
13	5.505	4.304	4.874	6.014	6.812	6.000	8.000
14	7.695	6.014	6.812	8.408	9.523	8.000	11.800
15	10.757	8.408	9.523	11.753	13.314	10.000	16.000

るかどうかは、原波形をフィルターに通して得られた波形と、CD法によって求めた $f_x(t, \omega_i)$ と $\varphi(t, \omega_i)$ を用いて、後述する式(25)で再構成した波形とを比較することによって判定した。また0.1Hz~11.0Hzの帯域を15個の部分周波数帯域に分割して地震動の非定常性を議論することの妥当性については、原波形と $f_x(t, \omega)$ と $\varphi(t, \omega_i)$ とを用いて、やはり後述する式(26)によって再合成した波形との比較、および両波形をそれぞれ入力加速度として得られた応答スペクトルの比較によって行うことにした。

(3) 地震動の再合成

亀田は文献2)において、強震記録を解析して得られた非定常スペクトル $\overline{G}(t, \omega)$ の計算結果を用いて、次式によって加速度波形を再合成する方法を示している。

$$x(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{2G(t, 2\pi k\Delta t)(2\pi\Delta f)} \cos(2\pi k\Delta f t + \varphi_k) \dots\dots\dots(24)$$

ただし、 φ_k は $0 \sim 2\pi$ の間で一様分布する乱数である。これに対して本研究では、位相の非定常性を考慮する

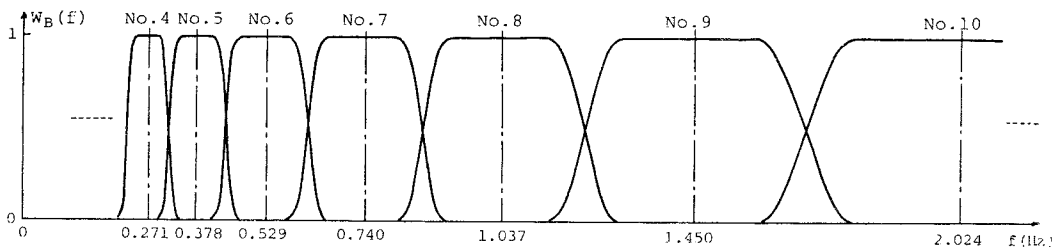


図-2 解析に用いたバンドパスフィルター

ため、まず

$$\tilde{x}_i(t) = \sqrt{2 f_x(t, \omega_i) \Delta \omega_i} \cos \{ \omega_i t + \phi(t, \omega_i) \} \dots \dots (25)$$

によって、第 i 番目の中心周波数に対する波形を再構成し、さらに

$$\tilde{x}(t) = \sum_{i=1}^{15} \tilde{x}_i(t) \dots \dots \dots (26)$$

によって加速度波形を再合成した（以下では $\tilde{x}_i(t)$ および $\tilde{x}(t)$ を、それぞれ部分周波数再構成波形および再合

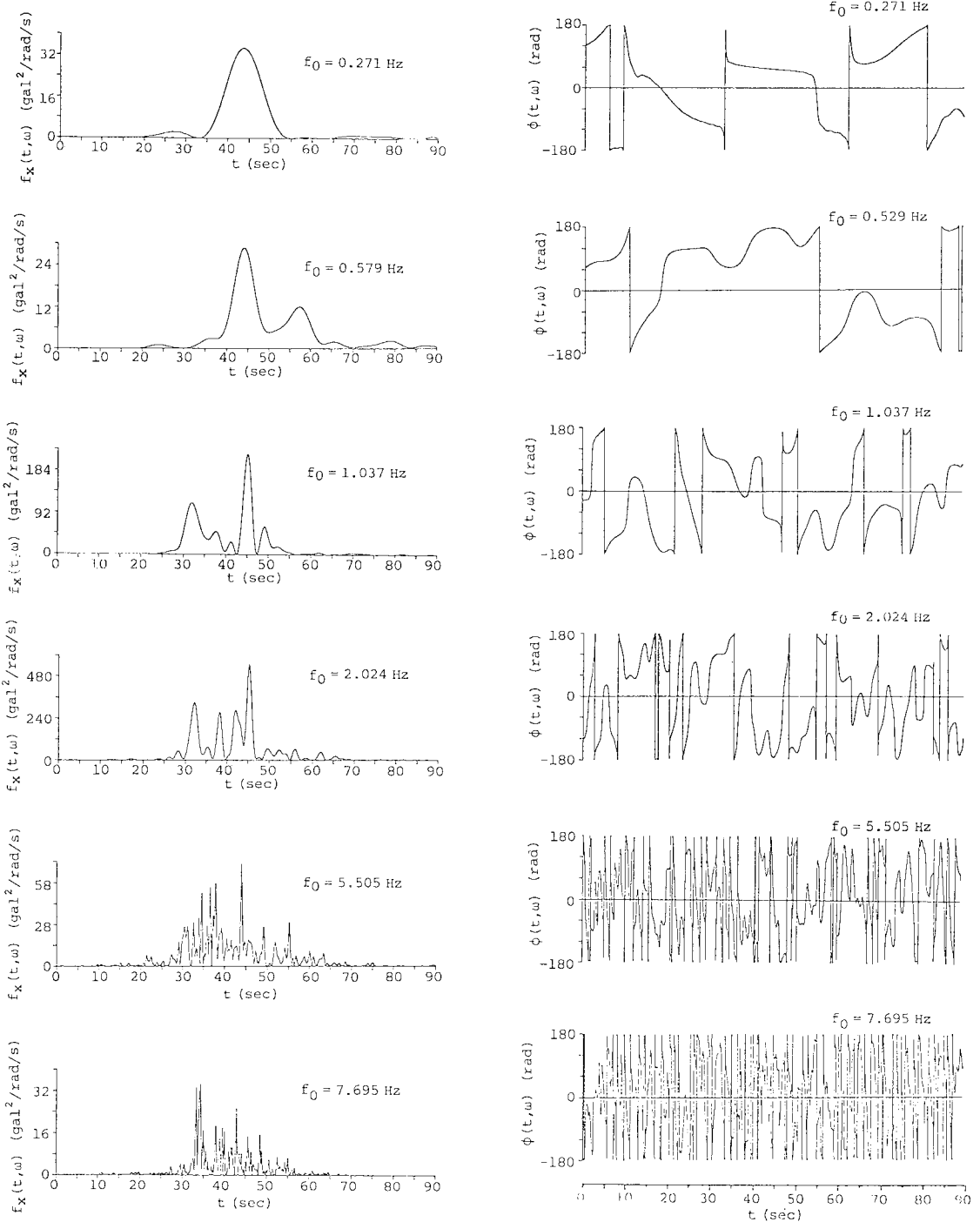
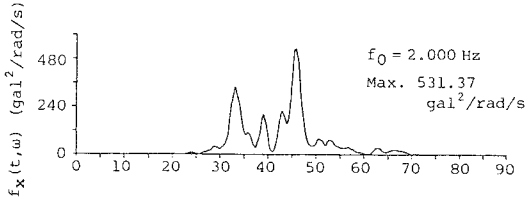


図-3 非定常スペクトルおよび位相特性

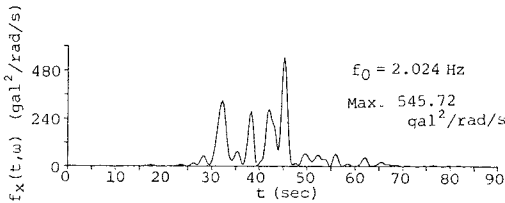
成波形とよぶ⁴⁾。

(4) 解析結果と考察

まず図-3に、2.(3)の方法に基づいて算出した非定常スペクトルと位相特性の一部を示す。図より7.695 Hzを除いたすべての中心周波数について、44~45秒にスペクトルのピークが発生していることがわかる。また周波数の増加に伴って、スペクトルおよび位相の時間的変化が激しくなっていることも理解できる。



(a) 亀田の計算法



(b) 本計算法

図-4 亀田の計算法との比較

また図-4(a)は、中心周波数を2.0 Hzとして、亀田の計算法²⁾に基づいて得られた非定常スペクトルである。同計算法は線形1自由度系を狭帯域フィルターとして解析を行う方法であり、非定常スペクトルの時間曲線は1自由度系の減衰定数によって異なるが、ここでは、

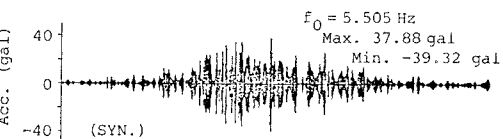
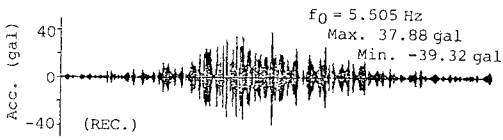
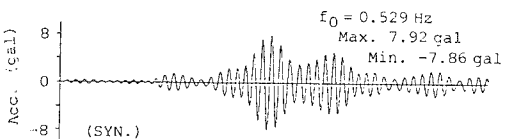
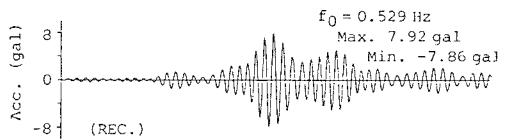
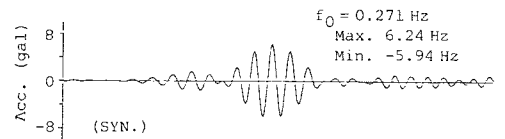
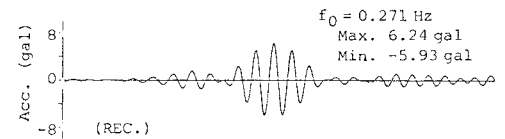
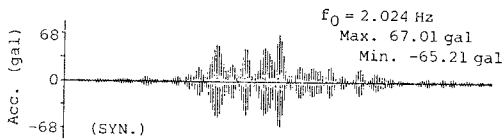
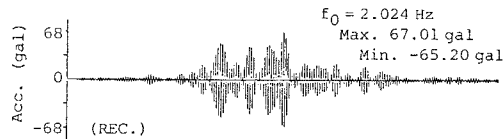
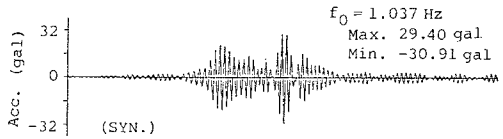
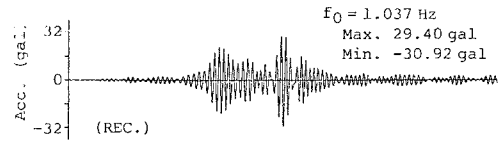


図-5 バンドパスフィルター処理後の原波形と部分周波数再構成波形との比較

本解析法で用いた Ormsby のフィルターの帯域幅とほぼ等しい帯域幅を与える 0.05 を採用している。さらにある時間幅で行う平滑化の操作については、亀田の手法をそのまま用いている。図よりピーク値の大きさと、その発生時刻は、図-4(b) に示した本解析結果とほぼ一致していることがわかる。

次に図-5 は原波形を各バンドパスフィルターに通して得られた波形と式 (25) に基づいて $f_x(t, \omega_i)$ と $\varphi(t, \omega_i)$ を用いて再構成した波形すなわち部分周波数再構成波形とを比較したものの一部である。いずれの場合にも両波形は非常によく一致しており、この結果より、CD 法による非定常解析が良好に行われたものと判断できる。

さらに図-6、図-7 は、それぞれ原波形および位相の非定常性を考慮に入れた式 (26) に基づいて求めた再合成波形である。一方、図-8 は位相の非定常性を無視した式 (24) によって算出した再合成波形であり、異なる 2 組のランダム位相角に対する計算結果を示している。まず図-6 と図-7 の比較により、位相の非定常性

を考慮して再合成した加速度波形は、振幅の時間的変動の性状さらにはその最大値・最小値のいずれの点に関しても、ほぼ原波形に近いものであるといえよう。これに対して図-8 からは、位相の非定常性を無視した場合には亀田²⁾も指摘しているように、 φ_k の選択によって再合成波形がかなり異なることがわかる。なお図-7 の波形が原波形に近いものであることは、両加速度波形を用いて計算して描いたそれぞれの加速度応答スペクトル (図-9) の比較によっても理解できる。

以上の結果を総合的に判断し、本論文で示した非定常スペクトルおよび非定常位相の算定法は、地震動の解析方法として非常に有力な方法であると考えられる。

4. 結 言

本研究では、complex demodulation 法を用いて地震

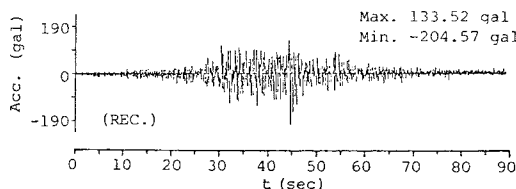


図-6 原波形

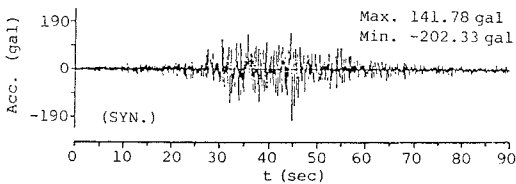
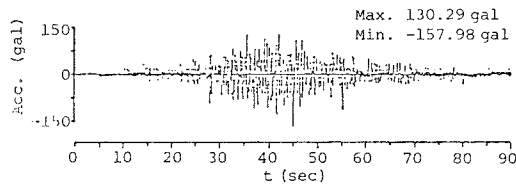
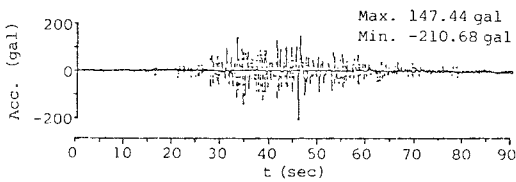


図-7 再合成波形

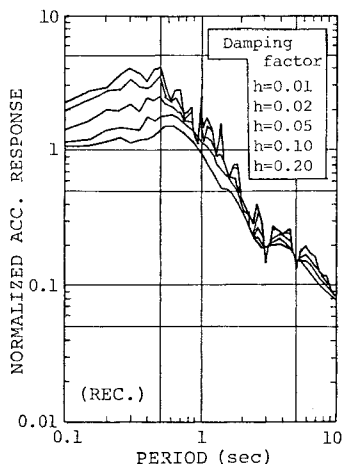


(a) Case 1

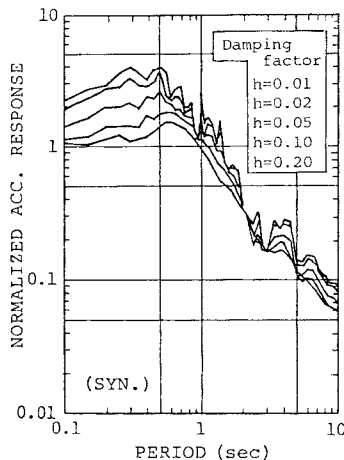


(b) Case 2

図-8 位相の非定常性を無視した再合成波形



(a) 原波形による加速度応答スペクトル



(b) 再合成波形による加速度応答スペクトル

図-9 原波形および再合成波形による加速度応答スペクトルの比較

動の非定常スペクトルと位相の非定常特性を算出する方法とそれを実際の地震動データに適用した場合の有効性を検討した。その結果得られた結論は以下の3点に要約できる。

(1) complex demodulation 法を活用した非定常スペクトル解析によれば、地震動の振幅や周波数特性のみならず、位相の時間的変化までも算出できる。したがって本方法は、地震動記録よりその非定常特性を抽出する方法として非常に有効である。

(2) 位相の非定常性を忠実に考慮することにより、非定常スペクトルを用いて再合成した地震動の波形は、原波形とほぼ完全に一致する。

(3) Ormsby のフィルターは、重み関数に含まれる定数を適切に選択すれば、本解析法にとって良好なフィルターになり得る。

ただし、本解析によって抽出された地震動の位相の非定常性がどのような物理的現象を表わしているのか、さらには位相に関する情報を耐震設計にいかに関用してゆくべきかについては、今後の重要な課題になるものと考えている。

本論文で提案した方法は上述のような特徴をもっているが、同時に地震動を受ける構造物の非定常スペクトル応答解析法への応用の可能性を包含している。この問題についても後日報告する予定である。

なお地震動の加速度記録を提供して下さった東京大学地震研究所 伯野元彦教授に対し、深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

1) 神山 眞：強震地震動の非定常スペクトル特性とその波

動論的考察，土木学会論文報告集，No. 284，pp. 35～48，1974年4月。

- 2) 亀田弘行：強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察，土木学会論文報告集，第235号，pp. 55～62，1975年3月。
- 3) 星谷 勝・千葉利晃・草野直幹：地震加速度の非定常特性とシミュレーション，土木学会論文報告集，No. 245，pp. 51～56，1976年1月。
- 4) 吉田 裕・増田陳紀・澤 正・若葉弘之：数値濾波の計算法と地震記録の非定常スペクトル解析への応用，土木学会論文報告集，No. 274，pp. 1～14，1978年6月。
- 5) Dzierwonski, A., BLoch, S. and Landisman, M. : Technique for the Analysis of Transient Seismic Signals, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 59, No. 1, pp. 427～444, Feb., 1969.
- 6) 青柳史郎：地震動の位相差を考慮した長大吊橋の地震応答について，土木学会論文報告集，No. 190，pp. 37～48，1971年6月。
- 7) Priestley, M. B. : Evolutionary Spectra and Non-Stationary Processes, Jour. R. Statist. Soc. Ser. B, Vol. 27, pp. 204～237, 1965.
- 8) Priestley, M. B. : Power Spectral Analysis of Non-Stationary Random Processes, Jour. Sound Vib., Vol. 6, No. 1, pp. 86～97, 1967.
- 9) Granger, C. W. J. : Spectral Analysis of Economic Time Series, Princeton Univ. Press, Chapt. 9, 10, 1964.
- 10) 野川徳二・片山尅行・田畑吉雄・大塩達一郎・川原琢治：大脳電位のインパルス応答，システムと制御，Vol. 21, No. 4, pp. 199～205, 1977.
- 11) 理工系のための数学ハンドブック，丸善，1976.
- 12) 朝倉夏雄：デジタルフィルターの設計と反射地震探鉱への適用，物理探鉱，23巻，4号，pp. 18～27，1970年8月。

(1985. 5. 27・受付)