応用力学論文集 Vol.11, pp.665-673　(2008 年 8 月)　土木学会

非線形系の応答の時間周波数特性の複素数表現に基づく入力波の推定

INPUT GROUND MOTION ESTIMATION FROM COMPLEX-VALUED TIME-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF NONLINEAR RESPONSE

本田利器*・宮本崇**
Riki HONDA and Takashi MIYAMOTO

*正会員　工博　東京大学大学院　工学系研究科 社会基盤学専攻（〒 113-8656 東京都文京区本郷 7–3–1）
**学生会員　東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻（〒 113-8656 東京都文京区本郷 7–3–1）

Consideration of nonlinear response of structures is essential in the dynamic response analysis for the performance based design. Due to technical difficulties, however, they are not sufficiently considered in the current seismic design schemes. This paper proposes a method to estimate an input ground motion from the time-frequency characteristics of the nonlinear response of systems, by using wavelet transform. Performance of the proposed method is verified by numerical simulations.

Key Words : *wavelet transform, time-frequency characteristics, input ground motion, nonlinear response*

1. はじめに

耐震設計の基準として用いられる設計地震動の設定には，線形系を前提として規定された応答スペクトルに基づき，フーリエ変換を利用して入力波形を合成する手法が多くとられる[1)]．しかし，こうした方法では応答値を定量的に評価する対象を非線形系に拡張するための理論的根拠が希薄である．

構造物の非線形応答には，入力地震動の周波数特性だけでなくその時間変化をとらえた時間周波数特性が大きな影響を与える．したがって，構造物の非線形性を考慮に入れるためには，時間周波数特性に着目することが必要である．

規定された応答特性から模擬地震動を合成する方法として，想定する地震規模に応じた応答スペクトルを満たす入力波形を合成する手法が広く用いられているが，この方法では地震の持つ非定常性を考慮することが難しい．この点を解消するため，位相差分スペクトルを利用する手法[1)]やウェーブレット変換を用いる手法[2),3)]が提案されている．大崎[1)]や前田[3)]は線形系の応答スペクトルを対象としている．室野ら[4)]は，非線形系の最大応答値による非線形応答スペクトルの利用を提案しているが，応答履歴は考慮されていない．非線形系の挙動は，応答履歴の影響も受けるものであるため，応答の最大値だけで議論するのではなく，その時間的な変化を考慮することが重要であると考えられる．

以上のような背景を考え，本研究では，入力地震動が満たすべき条件を，非線形系の応答の時間周波数特性を用いて規定することを考える．

線形系が対象の場合，応答の周波数特性を伝達関数で除するだけで入力の周波数特性を求めることができる．しかし，非線形系が対象である場合，一般に，このような関係を満たす「伝達関数」は存在しないため，このような手順では非線形系の応答から入力を算出することはできない．

本研究では，非線形系の応答の時間周波数特性を所与とし，それに基づき，入力波形を合成する手法を提案することを目的としている．

2. 時間周波数特性の表現

本研究では，波形の時間周波数特性を表現するためにウェーブレット変換を利用する．以下に，本研究で用いるウェーブレット関数の主な性質について簡単に述べる[5),6)]．

2.1 ウェーブレット変換

時系列信号 $s(t)$ に対するウェーブレット変換，ウェーブレット逆変換はそれぞれ次のように定義される．

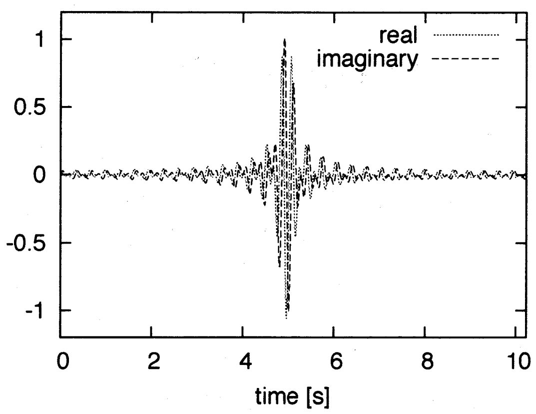
$$T(a,b) = \int s(t)\psi^*_{a,b}(t)dt \tag{1}$$

$$s(t) = \frac{1}{c}\int\int T(a,b)\psi_{a,b}(t)/a^2 dadb \tag{2}$$

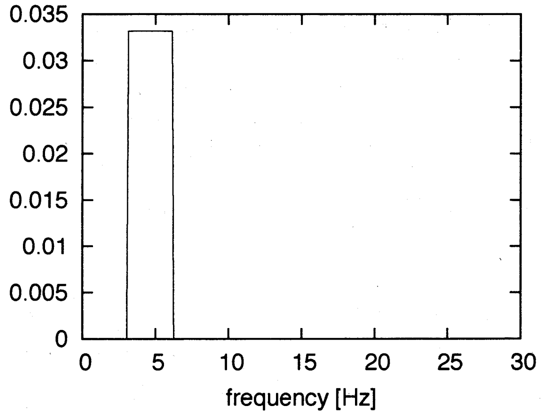
ただし，

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}}\psi(\frac{t-b}{a}) \tag{3}$$

$$c = \int \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|}dw \tag{4}$$



(a) 時刻歴データ



(b) フーリエ振幅スペクトル

図–1 解析信号ウェーブレットの例:スケール $j = 5$, シフト $k = 15$

$$a(\neq 0), b \in R \qquad * :複素共役$$

ただし，$\psi(t)$ はマザーウェーブレットと呼ばれる関数であり，$\hat{\psi}(t)$ はそのフーリエ変換である (以下，関数に^のつくものは全てフーリエ変換を表すこととする). a はスケールと呼ばれ，ウェーブレット関数の卓越周波数帯を表すパラメタである. また，b はシフトと呼ばれ，ウェーブレット関数の卓越時間帯を表すパラメタである.

ウェーブレット関数の値が卓越する周波数帯と時間帯は, a, b の2つのパラメタによって決まる. この a, b を連続的に変化させながらウェーブレット変換を行う場合，それは連続ウェーブレット変換と呼ばれる.

一方，a, b を離散的に変化させる場合は離散ウェーブレット変換と呼ばれ，整数 j, k を用いて次式のように構成されることが多い.

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{\frac{j}{2}}\psi(2^j t - k) \tag{5}$$

このとき，$\psi(t)$ を適切にとることによってウェーブレット関数は正規直交系をなし，信号 $s(t)$ は次のように展開，構築される.

$$a_{j,k} = \int s(t)\psi^*_{j,k}(t)dt \tag{6}$$

$$s(t) = \sum_{j,k} a_{j,k}\psi_{j,k}(t) \tag{7}$$

上記の式 (6) が離散ウェーブレット変換， 式 (7) が逆離散ウェーブレット変換の定義となる.

本研究では，連続ウェーブレット変換において次式で定義される Morlet ウェーブレットを用いる.

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}}e^{-\frac{t^2}{2}}e^{i\omega t} \tag{8}$$

Morlet ウェーブレットは正規直交性を持たないが，時間領域において局在性を持たないフーリエ変換の基底関数 $e^{i\omega t}$ と異なり，時間領域と周波数領域の両方においてある程度の局在性を有しているため，地震波形の時間周波数特性の表現に用いることとする.

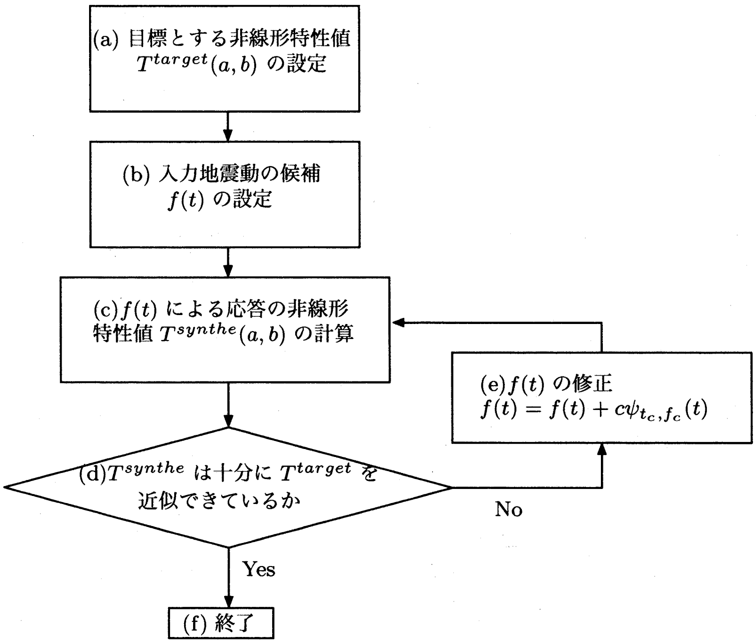
離散ウェーブレット変換において正規直交系をなすウェーブレットは複数提案されているが，本研究では大濱らが用いている解析信号ウェーブレット[7]を用いる. このウェーブレット関数は前田ら[3] が用いている sinc wavelet を解析信号としたものに相当し，Complex wavelet の例として用いられるものである[8),9)]. 解析信号ウェーブレットは係数の絶対値がそのウェーブレット基底が実数領域で持つパワーを表し，係数の偏角が複素数平面内での基底の回転を表す特性を有しており，波形合成の際にフーリエ変換と同程度の使い易さを持っており，波形合成への利用を提案されている[10)].

式 (6) において $j = 5, k = 15$ とした場合の，解析信号ウェーブレットの時刻歴波形とフーリエ振幅スペクトルを図–1 に示す. サンプリング数は 1024，時間間隔 Δt は 0.01 としている.

連続ウェーブレット変換はスケールとシフトが連続的に変化するため，ウェーブレット関数における卓越周波数帯や卓越時間帯を連続的に表現できる。このため，信号の変換を行った際に時間周波数特性を高い解像度で得ることができる. しかし，連続ウェーブレット変換におけるウェーブレット関数は正規直交系を張らないため，逆変換による信号の復元は常に可能とはならない.

一方，離散ウェーブレット変換ではスケールとシフトが離散的に与えられるため，連続ウェーブレット変換に比べ時間周波数特性の解像度が低い. しかし，関数を適切にとることでウェーブレット関数は正規直交系を構成し，常に逆変換が可能となる. ウェーブレット関数が正規直交系を構成するとき，特にウェーブレット関数をウェーブレット基底と呼ぶことがある.

以上の特徴を踏まえ，本研究では時系列波形の時間周波数特性を検出するときは連続ウェーブレット変換を用いた波形の展開を行い，波形合成を行うときは完全正規直交系を構成することのできる離散ウェーブレット変換を用いる.



図–2 波形合成手法のフローチャート

2.2 ウェーブレット変換における伝達関数の取扱い

一般の外力 $f(t)$ に対する 1 自由度 1 質点系の応答変位 $x(t)$ は，インパルス応答関数 $r(t)$ を用いて

$$x(t)=\int_0^t f(\tau)r(t-\tau)d\tau \tag{9}$$

と，$f(t)$ と $r(t)$ の畳み込みによって表すことができる．関数の畳み込みは，フーリエ変換を行うことによって関数の積に変換されることを利用すると，式 (9) は

$$\hat{x}(\omega)=\hat{f}(\omega)\cdot\hat{r}(\omega) \tag{10}$$

と表される．式 (10) における $\hat{r}(\omega)$ は伝達関数と呼ばれる．

一方，ウェーブレット変換においても，入力のウェーブレット変換と出力のウェーブレット変換の関係を，伝達関数を用いて同様に記述することができることを，以下に示す．

ウェーブレット変換の定義式 (1) より，

$$\begin{aligned}T(a,b)&=\int s(t)\psi^*_{a,b}(t)dt\\&=\int s(t)\psi^*_a(t-b)dt\end{aligned} \tag{11}$$

ただし，

$$\psi_a(t)=|a|^{-\frac{1}{2}}\psi(\frac{t}{a}) \tag{12}$$

である．

ここで，$\tilde{\psi}(t)=\psi(-t)$ なる $\tilde{\psi}(t)$ を用いて式 (11) を表すと，

$$\begin{aligned}T(a,b)&=\int s(t)\tilde{\psi}^*_a(b-t)dt\\&=s(b)*\tilde{\psi}^*_a(b)\end{aligned} \tag{13}$$

となり，ウェーブレット変換をシフト b を変数とした $s(b)$ と $\tilde{\psi}^*_a(b)$ との畳み込みとして表すことができる．したがって，式 (13) は変数 b についてフーリエ変換した際の周波数領域において

$$\hat{T}(a,\omega)=\hat{s}(\omega)\cdot\hat{\tilde{\psi}}^*_a(\omega) \tag{14}$$

ω ： 変数 b の周波数成分

となる．

式 (14) を用いて，入力 $f(t)$ のウェーブレット変換 $T^f(a,b)$ と応答 $x(t)$ のウェーブレット変換 $T^x(a,b)$ を表すと，それぞれ

$$\hat{T}^f(a,\omega)=\hat{f}(\omega)\cdot\hat{\tilde{\psi}}^*(a,\omega) \tag{15}$$

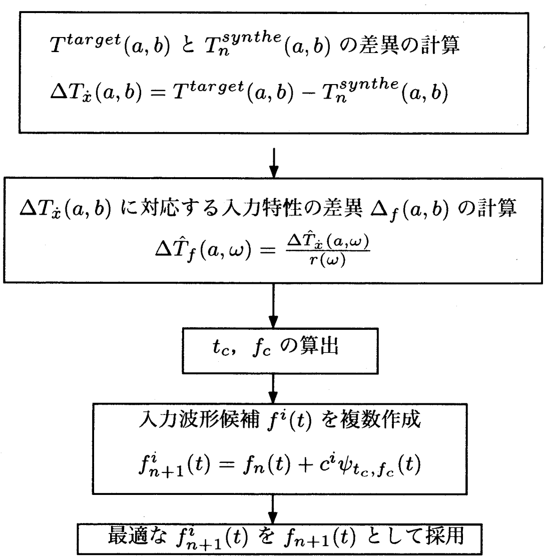
$$\hat{T}^x(a,\omega)=\hat{x}(\omega)\cdot\hat{\tilde{\psi}}^*(a,\omega) \tag{16}$$

となる．式 (10)，(15) および (16) より，線形系においては応答のウェーブレット変換のフーリエ変換 $\hat{T}^x(a,\omega)$ と系の伝達関数 $\hat{r}(\omega)$ から，入力波形のウェーブレット変換のフーリエ変換 $\hat{T}^f(a,\omega)$ を

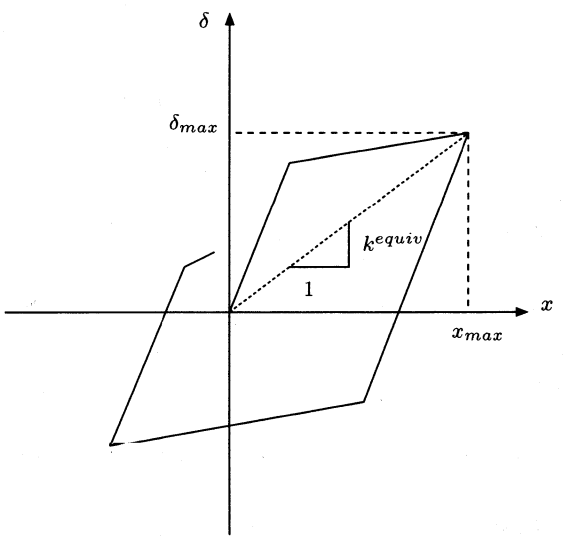
$$\hat{T}^f(a,\omega)=\frac{\hat{T}^x(a,\omega)}{\hat{r}(\omega)} \tag{17}$$

として求めることができる[6)]．

式 (17) は，系の伝達関数を知ることができれば，単純な演算によって入力と出力のウェーブレット変換の



図–3 波形修正に関するフローチャート



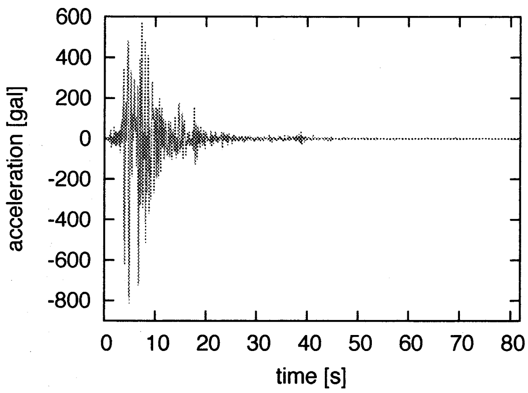
図–4 バイリニアモデルの等価線形近似

いずれか一方から他方を知ることができることを表している．

3. 波形合成手法

想定された構造モデルに対し，目標とする非線形応答特性が複素数値の連続ウェーブレット変換 $T^{target}(a,b)$ で与えられるものとする．$T^{target}(a,b)$ は合成される入力波形が構造モデルに作用した際に出力されるべき応答の特性であり，そのような入力波形を合成することが手法の目的である．

線形系を考える場合，系の伝達関数と式 (17) を利用



図–5 検討に用いた強震記録:神戸海洋気象台

表–1 対象とした系のパラメタ

パラメタ	系 1	系 2
質量 m	1.0	1.0
減衰定数 c	5.0	5.0
一次剛性 k_0	800.0	100.0
二次剛性 k_1	200.0	20.0
固有周波数 f_0[Hz]	4.5	1.6
降伏耐力 σ	640.0	500.0

して

$$\hat{T}_f(a,\omega) = \frac{\hat{T}^{target}(a,\omega)}{\hat{r}(\omega)} \tag{18}$$

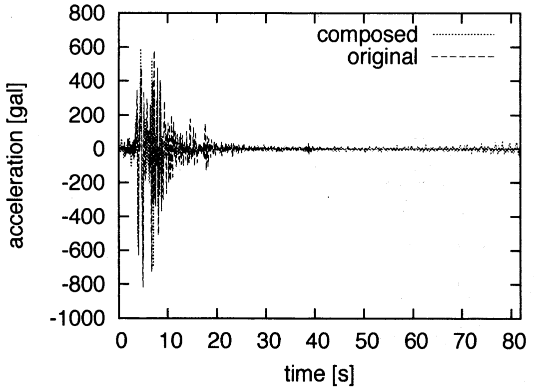
とすることで，応答のウェーブレット変換 $T^{target}(a,b)$ に対応する入力波形の連続ウェーブレット変換 $T_f(a,b)$ を求めることができる．したがって，この $T_f(a,b)$ を用いて逆連続ウェーブレット変換を行うことで，目標とする入力波形を求めることができる．

しかし，非線形系においては式 (17) は成立せず，また規定された $T^{target}(a,b)$ に対応する入力波形が厳密に存在する保証はない．そこで，目標へ近付くように少しずつ波形を修正する試行を繰り返すことにより波形を合成する手法を考える．

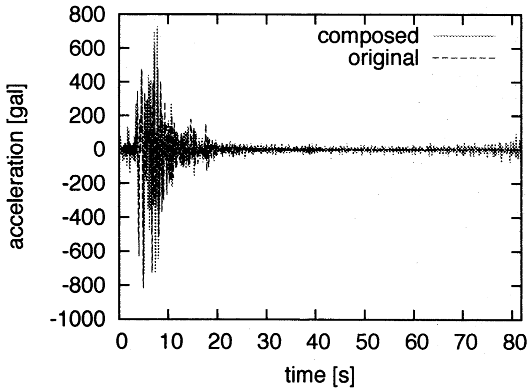
図–2 に，提案する波形合成手法の概略を示す．想定される構造系の，入力波形 $f(t)$ に対する応答の特性値 $T^{synthe}(a,b)$ が目標値 $T^{target}(a,b)$ に十分近付くまで $f(t)$ の修正を行うことが提案手法の枠組である．

目標とする非線形特性値 $T^{target}(a,b)$ は時間周波数特性として与えられるため，手順 (e) においても入力波形の時間周波数特性を操作することによる波形修正を行うことで，効率良く波形修正を行うことができると考えられる．本研究ではウェーブレット関数を用いて時間周波数特性に着目した波形の修正を行う手法を提案する．その概要をフローチャートとして図–3 に示し，以下に手順を記す．

今，n 回目のステップにおける入力波形を $f_n(t)$ で表し，$f_n(t)$ を外力とした非線形 1 自由度系に作用させ



(a) 系 1



(b) 系 2

図–6 強震記録 (original) と合成波形 (composed) の時刻歴波形

た際に得られる速度応答を $\dot{x}_n(t)$ とする．また，$\dot{x}_n(t)$ のウェーブレット変換を $T_n^{synthe}(a,b)$ とする．

$$T_n^{synthe}(a,b) = \int \dot{x}_n(t)\psi_{a,b}^*(t)dt \tag{19}$$

ここで，$T^{target}(a,b)$ と $T_n^{synthe}(a,b)$ の差を $\Delta T_{\dot{x}}(a,b)$ とする．

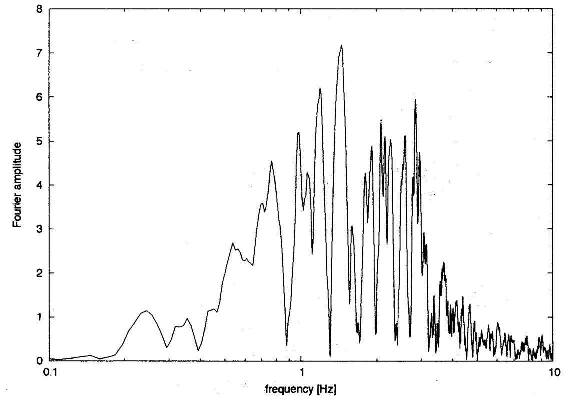
$$\Delta T_{\dot{x}}(a,b) = T^{target}(a,b) - T_n^{synthe}(a,b) \tag{20}$$

$\Delta T_{\dot{x}}(a,b)$ が小さくなるように入力波形を修正することがここでの目的であるが，このとき，$\Delta T_{\dot{x}}(a,b)$ に対応する，入力波形の成分 $\Delta T_f(t)$ が最も大きくなる時間と周波数に対応する入力波形の成分を修正すれば効率が良い．そこで，式 (18) より，入力波形の修正すべき時間周波数成分 $\Delta T_f(a,b)$ を，次式で得られる $\Delta\hat{T}_f(a,\omega)$ を逆フーリエ変換することによって求める．

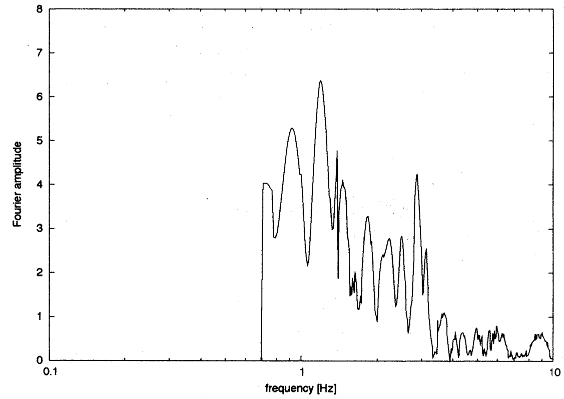
$$\Delta\hat{T}_f(a,\omega) = \frac{\Delta\hat{T}_{\dot{x}}(a,\omega)}{r(\omega)} \tag{21}$$

次に，この $\Delta T_f(a,b)$ が最も大きくなる時間 t_c，周波数 f_c を求め，t_c，f_c に卓越するウェーブレット関数に適切な係数 c を乗じて $f_n(t)$ に足し合わせることで，次式のように波形修正を行う．

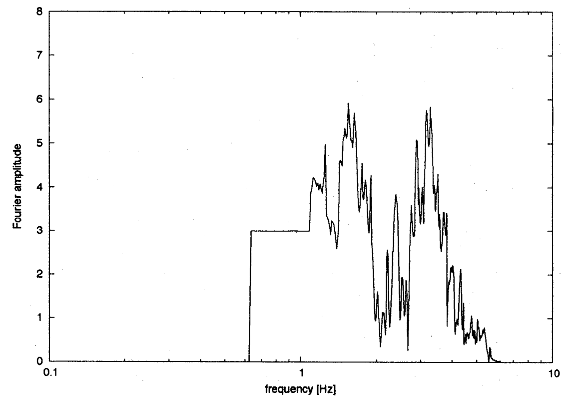
$$f_{n+1}(t) = f_n(t) + c\psi_{t_c,f_c}(t) \tag{22}$$



(a) 強震記録:神戸海洋気象台



(b) 合成波形:質点系 1



(c) 合成波形:質点系 2

図–7 強震記録と合成波形のフーリエ振幅スペクトル

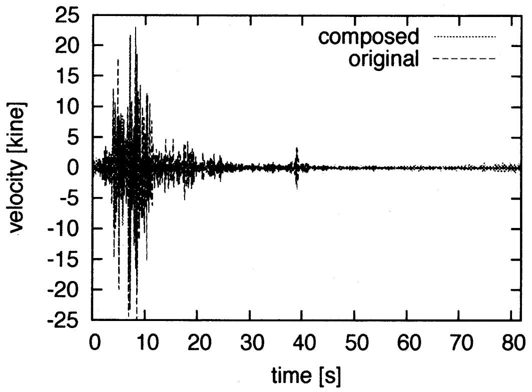
ただし，$\psi_{t_c,f_c}(t)$ は t_c，f_c で卓越する解析信号ウェーブレットを表す．

式 (18) に用いる伝達関数は非線形系では定義できないため，等価線形近似した系のものを用いる．図–4 に示すように，$f_n(t)$ を外力としたとき，系の最大応答変位を x_{max}，最大復元力を δ_{max} として，

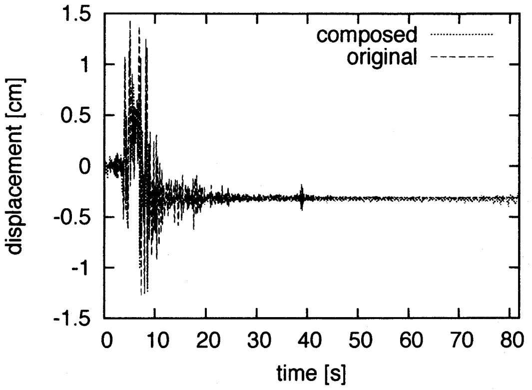
$$k^{equiv} = \frac{\delta_{max}}{x_{max}} \tag{23}$$

によって求められる k^{equiv} を剛性とすることで系を等価線形近似する．この伝達関数は，波形修正のステップごとに評価される．

伝達関数を等価線形近似によって得たことを考える

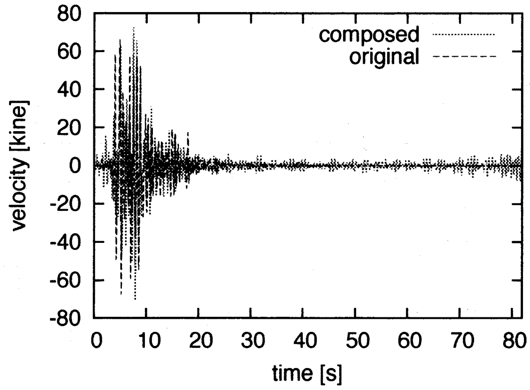


(a) 応答速度

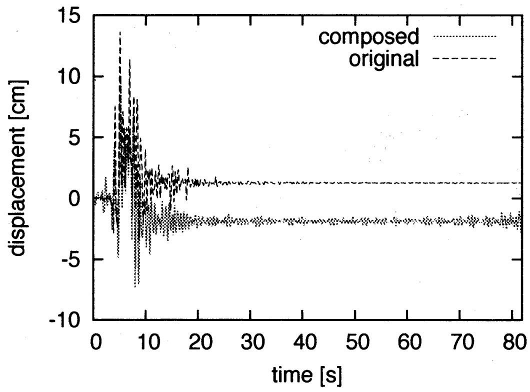


(b) 応答変位

図–8　強震記録 (original) と合成波形 (composed) に対する系 1 の応答



(a) 応答速度



(b) 応答変位

図–9　強震記録 (original) と合成波形 (composed) に対する系 2 の応答

と，t_c と f_c は，最も効率良く入力波形を修正できる卓越時刻や卓越周波数に対し，誤差を持つと考えられる．そこで，波形を修正する際に t_c 及び f_c にばらつきを与え，ウェーブレット変換の絶対値や位相においても確率的な変動を与えて複数のウェーブレット関数を作成し，それらを足し合わせることで $f_n(t)$ を修正した複数の候補波形 $f_{n+1}^i(t)$ を作成する．ここで，上付きの i は候補波形に付した番号である．これらの入力波形を外力としたときの速度応答 $\dot{x}_{n+1}^i(t)$ のウェーブレット変換を再び計算し，これを $T_{n+1}^{i,synthe}(a,b)$ とする．

$$T_{n+1}^{i,synthe}(a,b) = \int \dot{x}_{n+1}^i(t)\psi_{a,b}^*(t)dt \tag{24}$$

この $T_{n+1}^{i,synthe}(a,b)$ と $T^{target}(a,b)$ の差の絶対値を時刻，周波数について和をとる．この和の減少をもって応答特性の改善と判断し，最も応答特性が改善された波形を $n+1$ 回目の波形 $f_{n+1}(t)$ として採用する．

以上の操作を繰り返し，$T_n^{synthe}(t)$ を $T^{target}(t)$ に近づけることで入力波形を合成する．

4.　数値シミュレーション

前節で提案した波形合成法の適用性を調べるため，数値シミュレーションを行う．設定した構造モデルに対し，強震記録を作用させることで得られる速度応答の連続ウェーブレット変換を図–2 における (a) の $T^{target}(a,b)$ とみなし，提案手法による波形合成を行うことで得られる合成波形による応答特性と $T^{target}(a,b)$ とを比較する．

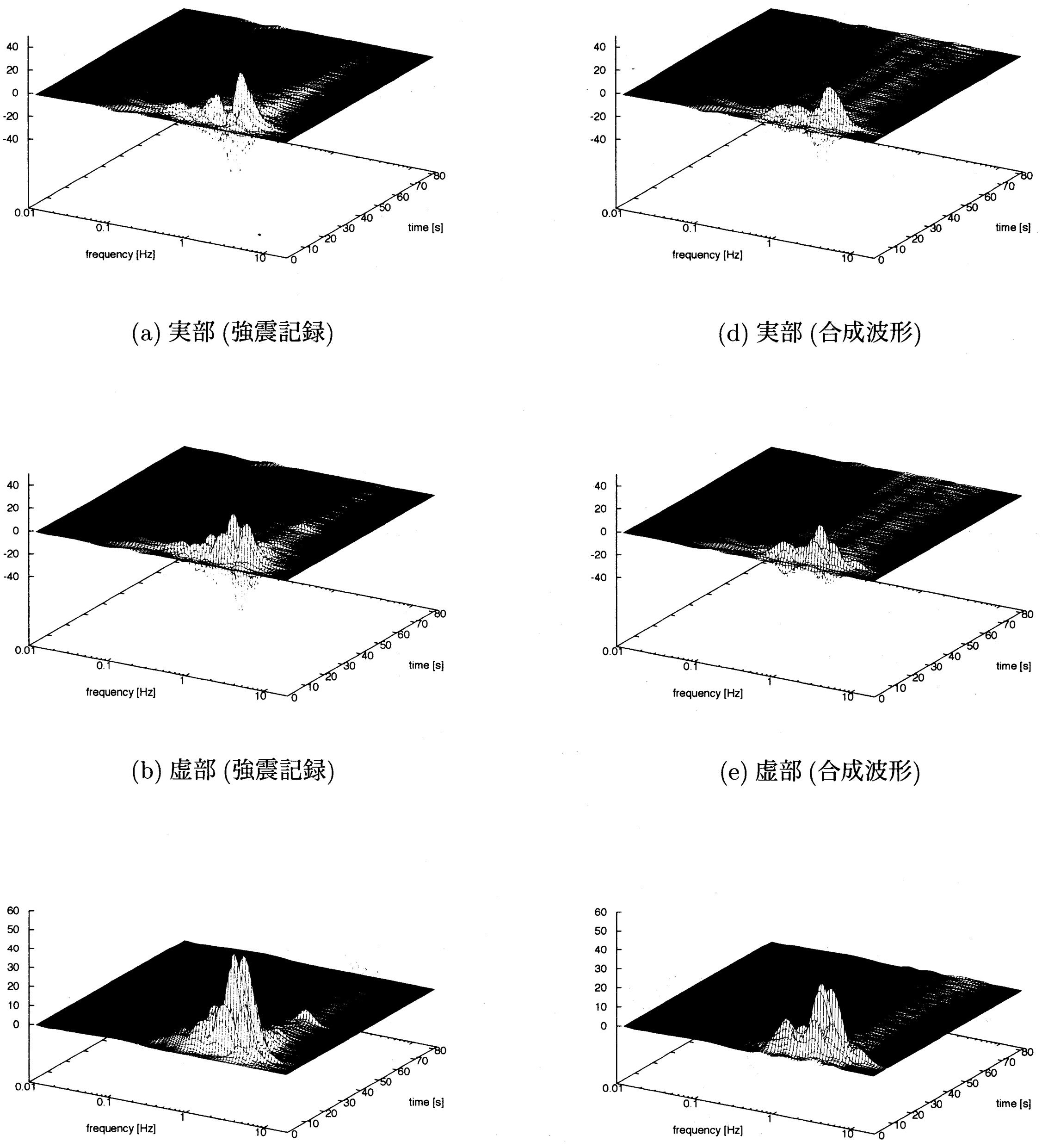
4.1　解析条件

強震記録として，兵庫県南部地震時において神戸海洋気象台で観測されたもの (NS 成分) を利用する．図–5 にその時刻歴波形を示す．データサンプリング数は 4096，時間間隔は $0.02s$ とした．

対象として，固有周期の異なる 2 つの 1 自由度バイリニアモデル[16]を用いることとした．系のパラメタを表–1 に示す．

上記の 2 種の質点系を用いたケースについて，提案手法による合成波形と元の強震記録とを比較する．入力波形の初期値は $f_0(t)=0$ とし，各ケースにおける波形修正の試行回数は 2000 回とした．また，波形修正を行う際に t_c に対して $\pm 0.1s$，f_c に対して $\pm 10\%$ の範囲と分散が一致するようにガウス分布のばらつきを与え，各ステップにおいて 20 の候補波形を作成した．

なお，各パラメタのばらつきの範囲は試行錯誤により決定しており，また式 (21) においてウェーブレット



(a) 実部 (強震記録)　(d) 実部 (合成波形)

(b) 虚部 (強震記録)　(e) 虚部 (合成波形)

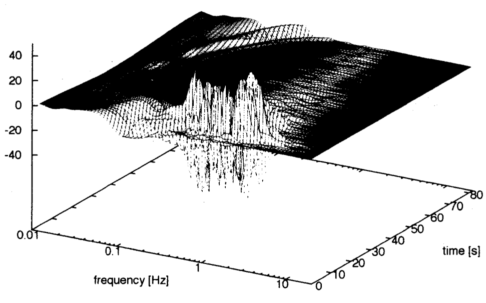
(c) スカログラム (強震記録)　(f) スカログラム (合成波形)

図–10 系 1 における速度応答の連続ウェーブレット変換

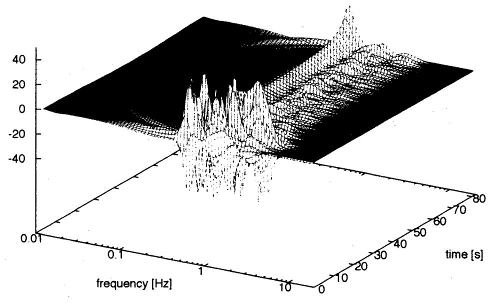
関数に乗じる係数 c は，同じく試行錯誤により決定した値 $c_{max} = 50.0$ に対し $-c_{max} \leq |c| \leq c_{max}$ の範囲で絶対値を一様分布で与え，位相は 0 から 2π の範囲で一様分布させている．波形修正の試行回数は，反復試行による応答の近似精度の向上が見られなくなるまで十分な回数を判断，決定した．

4.2　計算結果

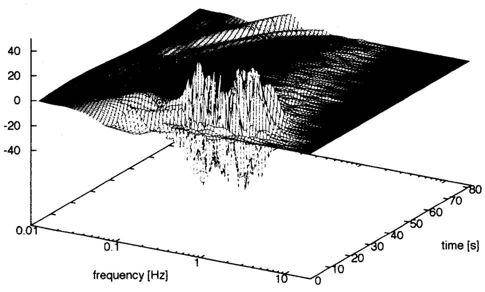
図–6 に，強震記録と合成波形の時刻歴を示す．強震記録は，0s から 10s にかけて大きな加速度を持ち，20s 付近まで小さな加速度を保ちながらその後は揺れが収束に向かっている．合成波形は，そのような非定常性を，系 1 と系 2 の両方の場合においてよく再現している．本手法は応答特性の再現を目的として波形合成を行っているが，入力波形の非定常特性は非線形応答にとって影響が大きいために，合成波形によって必然的に再現されたものであると考えられる．一方で，合成波形には元の強震記録にはない，細かな加速度の揺れが後半の時間帯にみられる．これは，波形合成に用いた解析信号ウェーブレットは，図– 1 に示されるように



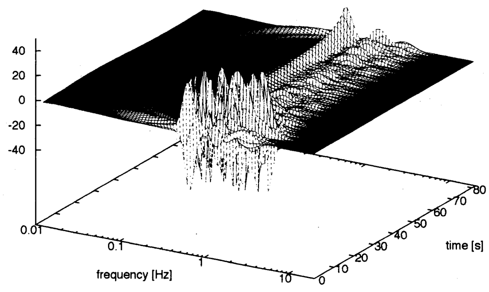
(a) 実部 (強震記録)



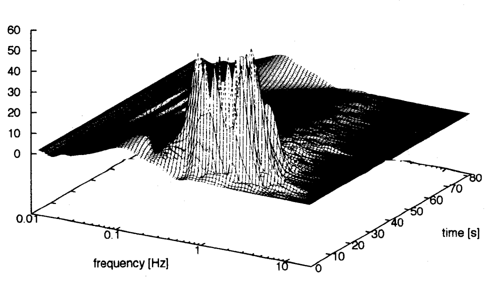
(d) 実部 (合成波形)



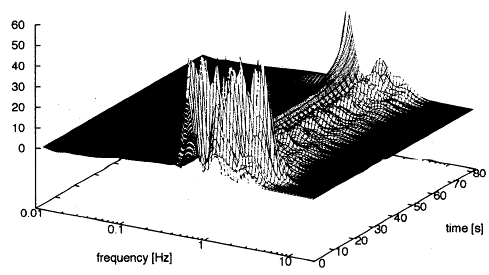
(b) 虚部 (強震記録)



(e) 虚部 (合成波形)



(c) スカログラム (強震記録)



(f) スカログラム (合成波形)

図–11 系 2 における速度応答の連続ウェーブレット変換

時間領域における局在性が低く，式 (22) を用いて波形を修正する際に，着目している時刻から離れた時刻に及ぼす影響が十分に小さくないためである．

また，図–7 に示した強震記録と合成波形のフーリエ振幅スペクトルを比較すると，系 1，系 2 の両方の場合において，合成波形は低周波数帯に成分を持っておらず，強震記録の周波数特性を完全に再現するには至っていない．これは，波形合成のアルゴリズムが系の応答に影響の大きな成分のみを考慮しているので，応答への影響が小さい低周波数帯は更新されないためである．

応答速度と応答変位の 2 つの観点から強震記録と合成波形を比較したものを，図–8 と図–9 にそれぞれ示す．系 1 において合成波形は応答速度の概形をよく近似しており，応答変位に関しては残留変位まで含めて強震記録による応答変位を精度良く再現している．系 2 においても応答速度の再現性は良い．応答変位については，残留変位の精度は低いものの，ピークの表れる時間帯や変位の変化が収束する時間といった時間的変化は概ね追従できている．残留変位は入力地震動のわずかな差異に対して鋭敏な指標であるために誤差は避け

がたいと考える．

次に，強震記録と合成波形のそれぞれに対する速度応答のウェーブレット変換を，実部，虚部，スカログラムの3つについて比較する．系1と2に対する結果をそれぞれ図–10と図–11に示す．図–10から，系1の場合，合成波形の速度応答は強震記録の速度応答の時間周波数特性の概形をおおむね近似できているが，細かな部分に差は残っていることがわかる．特にスカログラムにおいて最大値のずれが確認できるが，この原因として，解析信号ウェーブレットの解像度に限界があることや，修正波形が真値とは別の解に収束したことも原因と考えられる．前者の問題に関しては，時間と周波数の両方の領域において有限な台を持つウェーブレット関数は存在せず，本研究では波形合成の際の利便性を考慮して解析信号ウェーブレットを用いたために避けがたい問題であるが，後者の問題を避ける方法に関しては，修正波形候補の選定を各ステップで一つに限定するのではなく複数作り，最終的に合成された波形群の中から最適な波形を選択するなどの手法が考えられる．しかし，非線形系を想定する場合，本来は所与の応答特性に対する入力特性が存在する保証はなく，応答特性の近似誤差は避けられないと考えられるため，実用に向けて充分な精度が実現されているかどうかに着目すべきと考える．

図–11から，系2における同様の比較を行うと，合成波形に対する速度応答の連続ウェーブレット変換には，特に後半の時刻帯における誤差が確認できる．これは，先に述べた合成波形の後半の時刻帯での加速度の揺れが原因であり，波形合成に用いた解析信号ウェーブレットが時間領域において局在の程度が低いことに原因があると考えられる．

5. まとめ

本研究は，非線形系の応答の時間周波数特性を所与として入力波形を合成する手法を開発し，数値シミュレーションによりその有効性を検証した．有効性を検証する対象として2種類の構造モデルを考慮したが，今後は質点系の固有周期や非線形性を変えて更に多くのケースでシミュレーションを行い，提案手法の有効性の検証を重ねる一方で，波形の更新回数やパラメタの検索範囲が波形に与える影響について検討も行うことが重要であろう．

本研究では，時間周波数特性の表現に複素ウェーブレット変換を用いているが，設計基準を複素表現することは実用上受け入れられがたいと考えられるので，この点についても検討も行う必要がある．

また，実用性の面からは，設計で想定する非線形系の応答の時間周波数特性をいかに定めるかについての検討も今後の課題として挙げられる．

参考文献

1) 大崎順彦:新·地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，1994
2) 玉置哲男，田辺章，中村雅彦，佐々木文夫，水町渉，山田道夫:観測地震波形を利用した模擬地震動の作成，日本地震工学会論文集第3巻，第3号，pp.1-12，2003
3) 前田寿朗，佐々木文夫，山本佳史:Sincウェーブレットを用いた非定常性を有する模擬地震動作成手法の研究，日本建築学会構造系論文集，第553号，33-40，pp.33-40，2002
4) 室野剛隆，佐藤忠信:構造物の損傷過程を考慮した非線形応答スペクトル法の適用，土木学会地震工学論文集，Vol.29，pp.520-528，2007
5) Charles K.Chui:ウェーブレット入門，電機大出版局，1993
6) Christopher，Gilbert:A Practical Guide to Wavelet Analysis，Bulletin of the American Meteorogical Society Vol. 79，No.1，pp.61-78，1998
7) 大濱吉礼，本田利器:解析信号ウェーブレットを用いた入力地震動の合成，土木学会年次学術講演会講演概要集第1部 Vol.58，pp.597-598，2003
8) N.G.Kingsbury, "Complex wavelets for shift invariant analysis and filtering of signals", Appl. Comp. Harm. Anal., Vol.10, No.3, pp.234-253, 2001
9) R.v.Spaendonck et al. "Orthogonal Hilbert transform filter banks and wavelets", VI -505, ICASSP, 2003
10) 本田利器，宮本崇:解析信号ウェーブレットによる時間周波数特性を考慮した入力地震動表現，土木学会地震工学論文集，Vol.29，pp.139-145，2007
11) 本田利器，大濱吉礼:ウェーブレットを用いた Wigner 分布からの波形合成，土木学会論文集，No.696，I-58，pp.273-283，2002
12) L. コーエン:時間-周波数解析，朝倉書店，1998
13) 本田利器，澤田純男:非線形動的 FEM 解析の並列計算のための非反復積分法，応用力学論文集 Vol.3，pp.629-636，2000
14) 防災科学技術研究所 強震ネットワーク K-NET http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/
15) 土木学会編:動的解析と耐震設計 第1巻 地震動·動的物性，技報堂出版，1989
16) 土木学会編:動的解析と耐震設計 第2巻 動的解析の方法，技報堂出版，1989
17) 土岐憲三:新体系土木工学11構造物の耐震解析，技報堂出版，1981
18) 理論地震動研究会:地震動 その合成と波形処理，鹿島出版会，1994

(2008年4月14日 受付)