

## 非線形応答値を特徴指標とする探索的な設計地震動の合成

DESIGN INPUT MOTION SYNTHESIS USING NONLINEAR RESPONSE VALUE AS  
FEATURE INDICES BY SEARCHING ALGORITHM

宮本 崇\*・本田 利器\*\*

Takashi MIYAMOTO and Riki HONDA

\*学生会員 工修 東京大学大学院 博士後期課程 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)

\*\*正会員 工博 東京大学大学院 准教授 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)

A scheme for generating the design input ground motion is proposed. Nonlinear response values of structural systems are used as feature indices to define the characteristics of ground motions. The input motion is generated by searching an appropriate wave in the space where the norm is defined by those feature indices. As numerical example, the proposed scheme is applied to a case considering a 10DOF structure. The generated wave is compared with the ones generated by other conventional methods. The results verify the performance of the proposed scheme.

**Key Words** : seismic design, input ground motion, nonlinear dynamic analysis, information geometry space

## 1. はじめに

近年, 四川大地震, スマトラ島沖地震, パキスタン地震など, 世界各地で大地震が相継ぎ, その被害は多大なものとなっている. 日本においても, 兵庫県南部地震や新潟県中越地震を始めとする地震の被害は甚大であり, 地震防災は今もって重要な課題だと考えられる.

地震の脅威から人命や社会を守る方法として, 構造物の耐震設計を合理的に行うことは重要である. 現在, 社会基盤構造物の設計は性能照査型への移行が進みつつあり, 動的解析によって構造物の挙動を推定することにより安全性の評価を行う設計手法が採り入れられている<sup>1),2)</sup>. このとき, 設計荷重として考慮される地震力は静的荷重としてではなく時刻歴波形として与えられ, この時刻歴波形に対する挙動によって構造物の耐震性能は評価されるため, 設計基準として採用する地震動を合理的に設定することは, 今後の耐震設計において重要な要素となる.

設計に用いる地震動の時刻歴波形(以下では設計地震動と呼ぶ)の設定という問題においては, 設定された地震動を設計に用いる意味を明らかにするために, その地震動の強度を適切に評価することは重要であると考えられる. 現在, 設計地震動は応答スペクトルによる地震動の強度評価に基づいて合成する手法が多くとられている<sup>3),4),5)</sup>が, 構造物の非線形挙動を考慮するには不十分であると考えられる. また, 実際に設計, 建設される構造物には物性のばらつきや系全体の複雑さ等に起因する不可避な不確実性が存在し, こうした不確実性は構造系の非線形挙動に大きな影響を与えると考えられるため, 少数の精緻な解析が地震動の精緻な評

価につながるとは限らない. しかし, 不確実性に対する設計の考え方の例として挙げられる信頼性設計<sup>6),7)</sup>のような確率論に従う手法では具体的な時刻歴波形を決定することは難しく, また非常に大きい自由度の非線形構造モデルのパラメータを変化させて動的解析を行い, 地震動の評価を行うことも, 現時点では現実的な手法であるとは言い難い.

そこで本研究は, 対象構造系の非線形挙動を考慮するために十分と考えられる程度に単純化された構造系を利用し, この構造系の応答値を特徴指標として, 地震動がより複雑な構造物に与える影響を記述することを試みる. また, 構造系の不確実性を考慮するために動的解析のモンテカルロシミュレーションを行い, それによって得られる特徴指標の確率分布をもって地震動の評価を行うこととし, 対象構造系に対する影響の大きな地震動の合成という問題を, 確率分布のなす空間における探索問題として定式化を行う. 定式化に基づき, 波形合成の手法を構築し, 合成された波形の性能の検証を数値解析によって行う.

## 2. 提案手法

## 2.1 特徴指標を用いた地震動の記述

設計地震動の決定のためには, 地震動が構造系に与える影響を適切に評価する必要がある. 実際に建設される構造系は複雑なものであり, 地震動に対するその動的挙動を完全に予測することは難しいと思われるが, 構造系の1次モードに対応する1自由度系の挙動など, 適切にモデル化された構造モデルの挙動は実際の構造系の挙動と関連性が高いと考えられる.

そこで、評価の対象となる地震動による構造モデルの応答値を、設計される構造系の挙動を表す値ではなく地震動の強度を表現するための一つの指標とみなすことで、地震動の特徴を表現することを考える。このとき、対象構造系の非線形挙動の影響を考慮するため、構造モデルもまた非線形モデルを用いることとする。

本提案手法は、設計される構造系を単純化された構造モデルで代替するものではない。対象構造系の挙動を記述する指標として関連が高いと考えられる物理的な値を以て、地震動が構造系に与える影響を記述することが目的であり、したがって記述に用いる指標は一つである必要はない。条件に応じて、ある一つの構造モデルの変位応答や速度応答など複数の指標を用いることや、構造系の様々な振動モードに応じた複数の構造モデルの応答値を同時に利用することによって、地震動の持つ多様な特徴の複数の観点からの表現や強度評価の信頼性の向上を図ることができると考えられる。

本田、岡元<sup>9)</sup>は同様の考えに基づき地震動そのものの類似性評価を行っており、宮本、本田<sup>10)</sup>は、特徴指標を利用して地震動が設計対象となる構造系に与える影響の類似性の評価を行っている。本稿は、こうした考え方を背景に、特徴指標による地震動の記述手法に基づいて時刻歴波形の合成を行うものである。

## 2.2 確率システムとしての系における地震動の影響の記述

生起しうる地震動や実際に建設される構造系は、種々の断層パラメタや建設地点の地盤特性、あるいは材料特性や構造諸元といった構造パラメタに不確実性が存在し、その挙動が様々に変動する。このような系は、入力波や構造系を定めても非線形出力が確率的に変動するため、系の全体を確率システムとしてとらえることができる。地震動の強度の評価もまた、このような不確実性を前提として、確率システムとしての系に対して行われるべきである。

しかし、構造系のパラメタの変動を考慮するとともに、実際の構造系に近い挙動を示すと思われる非常に大きな自由度の構造モデルを幾通りも用意し、これらに対する動的解析を設計の変更の度に行うことは現時点では難しい。

そこで、単純化した構造モデルの応答値を指標として用いることで地震動の評価を行う際に、構造パラメタの変動を考慮した解析を行う。上述のように構造系に不確実性があるために、個々の精緻な非線形動的解析の結果は信頼性が低いと思われるが、複数の動的解析のモンテカルロシミュレーション結果を用いて議論を行うことで地震動の評価の頑強さが増すことが期待される。

このとき、特徴指標として用いる構造モデルの応答値は確率分布として得られるが、確率的な変動を持つ

非線形構造系に対して地震動が持つ影響は、特徴指標の平均や分散ではなく確率分布の形状がその情報を有していると考えられる。そこで、地震動の評価に特徴指標を用いる際にはその値を平均値や分散などに単純化せず、確率分布そのものを用いることとする。

以上の考えから、本研究では不確実性を持つ構造系の非線形挙動に対する地震動の影響を評価するために、特徴指標の確率分布を用いることとし、確率分布のなす空間の中で地震動を考えることとする。

以下に、このような確率分布のなす空間を合理的に取り扱う方法論について、その概要を述べる。

### (1) 情報幾何空間

確率分布の空間を考える方法に、情報幾何<sup>11),12)</sup>の手法がある。これは、微分幾何の概念を確率分布の為す集合に適用し、空間の幾何的構造を解析する手法であり、確率分布のモデル選択の最適性に関する議論を行う統計的推論や、確率的な出力を持つニューラルネットワークシステムの学習則に関する分析を行う学習理論等の分野において、幾何的な概念を応用することで新たな視点や知見が得られている<sup>13),14),15)</sup>。

確率分布が為す集合を空間として考える際に、

1. 確率分布の位置を示す座標系  $\xi$  の取り方によらず、確率分布によって幾何構造が定まる
2. 確率変数  $x$  の変換に関して幾何構造が不変であるという要請を満たすよう幾何学的な特性を定めるとき、このような要請を満たすリーマン計量は次式で与えられる Fisher 情報量のみである<sup>12)</sup>。

$$g_{ij}(\xi) = E \left[ \frac{\partial}{\partial \xi_i} \log p(x, \xi) \frac{\partial}{\partial \xi_j} \log p(x, \xi) \right] \quad (1)$$

ここで、 $E$  は確率分布  $p(x, \xi)$  の下での期待値を表す。

Fisher 情報量によって空間上で近傍にある 2 点の距離を算出することができるが、確率分布の微分が必要であり、また空間上で離れた位置にある 2 点の距離を算出することができないことから、確率分布の数式表現が与えられず、また位置の比較を行う 2 点も必ずしも近傍にはない本研究において使用することは難しい。そこで、2 つの確率密度関数  $p, q$  の相違の量を以下のようにして定義する、KL ダイバージェンスを用いて確率分布の距離を定量化することとする。

$$D(p, q) = \begin{cases} \sum_i p(x_i) \log \frac{p(x_i)}{q(x_i)} & (\text{離散分布の場合}) \\ \int p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx & (\text{連続分布の場合}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $x$  は確率変数ベクトルである。

KL ダイバージェンスは対称性  $D(p, q) = D(q, p)$  を満たさないことから、数学上の意味での距離とはならないが、計算が容易であることや局所的には Fisher 情報量と一致すること、また確率密度関数の相違を測る尺度として統計解析や情報理論などの分野において広

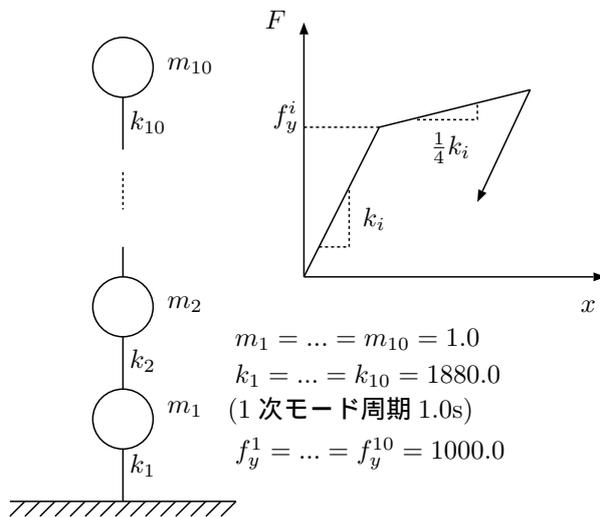


図-1 解析に用いる対象構造系

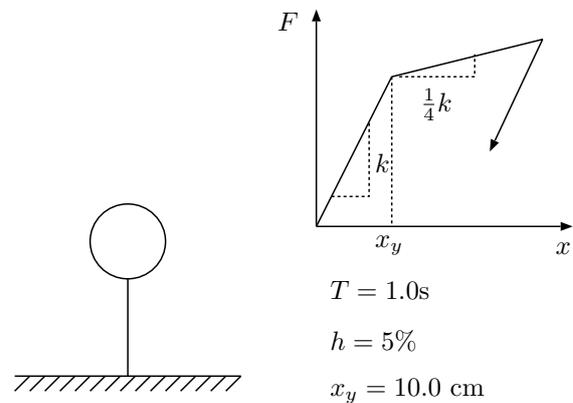


図-2 特徴指標の計算に用いる構造モデル

く利用されていることから<sup>13),15)</sup>、本研究においてもこれを用いることとした。なお、KL ダイバージェンスの計算の際、本稿では式 (2) における連続分布の場合の定義を用いている。

## (2) 自然勾配

リーマン空間上の関数の最適化問題においては、その勾配を自然勾配と呼ばれる形で考えることがふさわしいことが指摘され、数値解析によってもその有効性が確かめられている<sup>14)</sup>。これは、関数の定義される空間が曲がった構造をしているために、通常の微分演算によって求められる勾配が関数の最急降下方向を表していないためである。

ある関数  $\Psi(x)$  の最急降下方向は、 $x$  を微小量変化させたときの  $\Psi$  の変化

$$d\Psi = \Psi(x + dx) - \Psi(x) \quad (3)$$

が  $x$  の変化量に対して最大となる方向として通常定義される。このとき、 $dx$  のノルム  $\|dx\|$  が同じでなければ、様々な  $dx$  に対する  $d\Psi$  を比較する意味がないが、リーマン空間においては  $dx$  のノルムの値が空間の場所によって異なる。そこで、ノルムの変化を計算に採り入れ、 $\|dx\| = \text{const.}$  という制約条件の下で自然な勾配方向を定めるのが自然勾配の考え方である。

甘利は、いくつかの空間における自然勾配を導出している<sup>14)</sup>。自然勾配は信号処理や学習理論等の分野において積極的に応用されており、独立成分分析やニューラルネットワークシステムの学習則などに利用されている<sup>14),15),16)</sup>。

## 2.3 特徴指標のなす空間内における地震動の合成手法

設計地震動の時刻歴波形は、設計対象とする構造系の性質や重要度に応じて設定されることが望ましいと

考えられる。しかし、PGA や応答スペクトルといった指標による地震動の評価では非線形領域を含む構造系の特性を十分に考慮することができず、設計物に応じた設計地震動の設定という考え方は十分な形で達成されていない現状にあると言える。

そこで、2.1 節に述べた特徴指標を用いた地震動の評価に基づき、設計地震動を合成する手法を考える。構造物の特性に合わせ、指標の算出に用いる構造モデルや着目する値を変え、指標の値が大きき値をとるような地震動の合成を行うことで、構造系の特性に合わせた地震動の評価と合成を行うことがここでの目的である。

今、様々な地震動がなす集合を空間として捉え、個々の地震動による特徴指標の結合確率分布の KL ダイバージェンスによってこの空間の距離を規定することとする。この空間の中で地震動の特徴を考えると、地震動が構造物の非線形挙動に対する影響が大きくなるということは、特徴指標が大きき変化するというであり、これは空間内で大きく距離が移動するように地震動が変化することに相当する。したがって、特徴指標を用いて地震動の空間を考えることにより、地震動の構造系への影響の獲得を空間内での移動として捉えることができる。

ここでは、地震動の制約を振幅のパワーで与えることとし、パワーの増加を抑えながら特徴指標の空間を大きく移動するような地震動の変化方向を探索することを考える。特徴空間上の座標  $\xi$  に位置する地震動  $f(\xi)$  の持つパワーを  $P(f(\xi))$  で表し、座標の変化を  $d\xi$  とすると、上述の問題は  $|dP| = |P(f + df) - P(f)| = \text{const.}$  という制約の下で

$$|d\xi| = D(p(f + df), p(f)) \quad (4)$$

を最大化する問題として考えることができる。ただし、 $D(p, q)$  は確率分布  $p$  と  $q$  の KL ダイバージェンスを表し、 $p(f)$  は地震動  $f$  による特徴指標の確率密度関数を、 $df$  は地震動の微小変化を表している。

したがって、パワーの増加を抑えるという形で効率性を考えるとき、構造系に対して影響の大きい地震動の合成は、 $dP = \text{const.}$  という制約の下で KL ダイバージェンスの変化が最大となる  $df$  を求める操作を繰り返すことで目的の波形の探索を行う問題として定式化される。

なお、これは空間内における移動距離が一定のときに地震動のパワーの増加を最小にすることと同値であるから、自然勾配と同様の考え方をを用いて  $|d\xi| = \text{const.}$  の制約の下で

$$dP = P(f(\xi + d\xi)) - P(f(\xi)) \quad (5)$$

を最小にする問題と考えることもできるため、自然勾配による探索問題と同値であるとみなすことができる。

### 3. 数値シミュレーション

本節では、前節による考え方にに基づき、設計対象とする構造系に対し影響の大きな地震動の合成手法を構築し、その有効性を検証する。

本手法は、特徴指標の種類や値という形で設計地震動の条件を表現し、空間の範囲の制約という形で設計地震動の解の範囲を表現することで、課せられた条件と制約に対応した地震動の合成手法の構築を行う。したがって、設計地震動に求められる様々な要件に対し、本手法は幅広い要求に応えられるものであると考えられる。ただし、具体的な性能要件の設定は本論文の主旨ではないため、ここでは 10 自由度系構造物を想定し以下のような検討を行った。

#### 3.1 解析条件

##### (1) 地震動の合成手法

地震動の合成は、波形の微小変化を繰り返し行う反復試行によって行う。

今、第  $n$  ステップにおける入力地震動を  $f_n(t)$  とおき、その特徴指標  $\xi_n$  の確率密度関数を  $p(\xi_n)$  とする。地震動のパワーを  $P(f(t))$  で表すこととし、 $\alpha$  を定数として

$$\begin{aligned} dP &= P(f_{n+1}(t)) - P(f_n(t)) \\ &= P(f_n(t) + df) - P(f_n(t)) = \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

の制約の下で地震動に変化  $df$  を与え、KL ダイバージェンス

$$D(p(\xi_{n+1}), p(\xi_n)) \quad (7)$$

を最大化することがここでの目的となる。

今、地震動の変化  $df$  を、ウェーブレット変換<sup>18),19)</sup>によって与えるとする。

$$df = \eta \cdot c \cdot \psi_{a,b}(t) \quad (8)$$

$\psi_{a,b}(t)$  は、シフトが  $a$ 、スケールが  $b$  の解析信号ウェーブレット<sup>20),21)</sup>であり、 $a, b, \eta$  は実数とする。また、

$$c = \int f_n(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (9)$$

とする。式 (8) は、 $c$  を乗じたウェーブレットを足し合わせることで  $f_n(t)$  の該当するウェーブレット変換の成分を大きくすることを意味する。

$df$  を加えたときの地震動  $f_{n+1}(t)$  の実数値部分のパワーは、

$$\begin{aligned} P(f_{n+1}(t)) &= \int \left( \text{Re}(f_n(t) + \eta \cdot c \cdot \psi_{a,b}(t)) \right)^2 dt \\ &= \int (f_n(t) + \eta \cdot \text{Re}(c \cdot \psi_{a,b}(t)))^2 dt \\ &= \int f_n(t)^2 dt \\ &\quad + 2\eta \int f_n(t) \cdot \text{Re}(c \cdot \psi_{a,b}(t)) dt \\ &\quad + \eta^2 \int \left( \text{Re}(c \cdot \psi_{a,b}(t)) \right)^2 dt \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

ここで、

$$\int f_n(t)^2 dt = P_n \quad (11)$$

$$\int f_n(t) \cdot \text{Re}(c \cdot \psi_{a,b}(t)) dt = P_{\text{cross}} \quad (12)$$

$$\int \left( \text{Re}(c \cdot \psi_{a,b}(t)) \right)^2 dt = P_w \quad (13)$$

とおくと、 $df$  を加えたときのパワーの増分値は

$$\begin{aligned} P(f_{n+1}(t)) - P(f_n(t)) &= P(f_{n+1}) - P_n \\ &= \eta^2 P_w + 2\eta P_{\text{cross}} \end{aligned} \quad (14)$$

と表すことができる。この値が  $\alpha$  となれば良いので、

$$\eta = \frac{-P_{\text{cross}} + \sqrt{P_{\text{cross}}^2 + \alpha \cdot E_w}}{P_w} \quad (15)$$

として  $\eta$  を求めることができる (ただし、簡単のため  $\eta$  を正の数であるとした)。

以上のようにして求められた  $\eta$  と解析信号ウェーブレット  $\psi_{a,b}(t)$  を用いて、

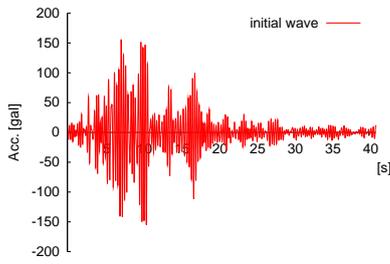
$$f_{n+1}(t) = f_n(t) + \eta \cdot c \cdot \psi_{a,b}(t) \quad (16)$$

として合成される  $f_{n+1}(t)$  を、解析信号ウェーブレットのシフトとスケールをランダムに変化させて複数合成し、それらの中から式 (7) を最大にするものを第  $n+1$  ステップにおける地震動として採用する。

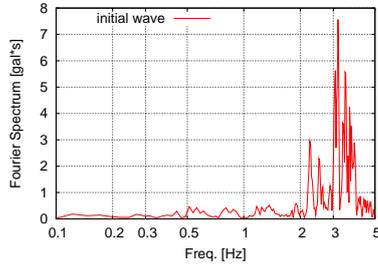
以上の操作を繰り返すことによって、対象構造系に対して効率的に影響を獲得するように波形を探索的に合成する。

##### (2) 対象構造系

対象構造系として、図-1 に示す非線形 10 自由度系を用いた。各バネの復元力特性はパイリニアモデル<sup>24)</sup>に従い、1 次モードの固有周期は 1.0s である。



(a) 時刻歴波形



(b) フーリエスペクトル

図-3 波形合成に用いた初期波形

構造パラメタの変動を考慮した解析を行うため、モンテカルロシミュレーションを行う。初期剛性  $k_i (i = 1, \dots, 10)$  および初期降伏力  $f_y^i (i = 1, \dots, 10)$  の2種の構造パラメタに対し、設定値を中心として20%の一様変動を  $i$  ごとに独立に与えて構造系を100体作成し、この100体に対する動的解析結果をもって、対象構造系に対する地震動の影響を議論することとした。

### (3) 特徴指標

地震動の特徴を表現する特徴指標の計算のために、バイリニア1自由度系を用いた。対象構造系の1次モードの固有周期が1.0sであることを考慮し、固有周期が1.0sとなるようばね定数を設定し、減衰は5%とした。図-2に、構造モデルの諸特性を示す。

設計構造系である10自由度系の非線形挙動と関連性の高い指標は複数考えられるが、構造系の破壊に変位応答の関連が高いと考えられること、および地震時保有耐力法などにおいて考慮されているように構造系が応答履歴の中で吸収するエネルギーが重要と考えられることから、本解析では上記のように設定したバイリニア1自由度系の最大応答変位と履歴吸収エネルギーの2種の応答値を用いた。

特徴指標の計算の際に構造パラメタの不確実性の影響を考慮するため、構造モデルと同様に初期剛性  $k_0$  および初期降伏変位  $x_y$  にそれぞれ独立に  $\pm 20\%$  の一様変動を与えたモデル1000体を作成し、動的解析のモンテカルロシミュレーションを行い、上記の2指標の結合確率密度関数を特徴指標とした。

### (4) 地震動

波形の合成を行う際の初期波形として、図-3に示す波形を用いた。この波形は2007年新潟県中越沖地震時

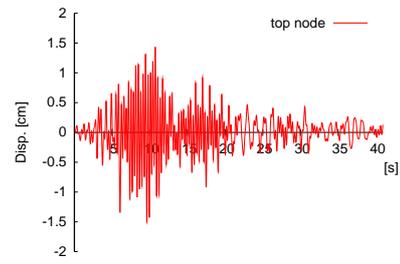


図-4 初期波形による10自由度系の最上部のノードの応答値の例

表-1 波形合成の解析における諸条件

変化させる時間領域	5.0 - 20.0 [s]
変化させる周波数領域	0.3 - 1.2 [Hz]
パワー増分の制約 $dP$	$0.02 \cdot P(f_0(t))$
1ステップにおける波形候補数	30波
波形探索の総試行回数	50回

にK-NET観測点小千谷で観測された記録を元に経験的グリーン関数法により合成された波形であり、同図下に示す周波数特性を有している。この波形による対象構造系の変位応答の例を図-4に示した。対象構造系は1次モード周期が1.0sであるのに対し、解析に用いた初期波形は振幅が小さいことに加え短周期成分が卓越した波形であるため、構造系の挙動は小さな値にとどまっている。

この初期波形を用いて、上述の手法による波形の探索を行った。構造系の1次モードの固有周期が1.0sであること、また降伏後に剛性が  $\frac{1}{4}$  に低下することから、波形の変化に用いた解析信号ウェーブレットのスケールの変動範囲をウェーブレットの卓越周波数帯が0.3 - 1.2Hzに相当する範囲に、振幅の大きな箇所が構造系の挙動に重要であると考えられることからシフトの変動範囲を卓越時刻帯が5.0 - 20.0sに相当する範囲に定めた。

また、地震動の制約として、ここでは初期波形のパワーの200%を制約として考え、1ステップにおける波形のパワーの増分を初期波形のパワー  $P(f_0(t))$  の2%に定めて50回の反復を行うこととした。各ステップで合成する波形の候補を30波として、この30波の中から式(7)を最大にする波形を選ぶ操作を反復した。表-1に、以上の解析条件をまとめる。

なお、1ステップにおける波形のパワーの増加は初期波形のパワーの2%としたが、実際の解析において各ステップにおける波形候補の作成の際には、一度この制約を10%として計算を行い、波形の候補が決まった際に、すなわち波形の変化に用いる解析信号ウェーブレットが決まった際に、改めてパワーの制約を2%として式(15)の  $\eta$  を求め、その後波形を変化させている。これは、波形の変化に用いるウェーブレット関数

表-2 入力地震動による，10 自由度系の最上部のノード応答値の平均値の比較

	最大変位 [cm]	最大速度 [cm/s]	靱性率 $\mu$
提案手法	20.6	80.7	7.31
比較手法 1	25.7	75.5	9.27
比較手法 2	14.0	81.5	5.29
比較手法 3	10.8	46.1	5.04

を，制約の下で波形を最大に変化させる方向とみなし，一度波形を大きく変化させることでその方向を定めた後に同一の方向に波形を微小に変化させることで，各ステップにおける勾配方向の変化をより精度良く追従しようとするという考えに基づいており，勾配の方向のみを考慮している自然勾配の導出や，最急降下法を用いた学習則における学習係数の利用と発想を同じくしている．

### 3.2 提案手法による波形の変化過程

前節に述べた条件の下で，提案手法による波形の合成を行った．

図-5 は，初期波形，15 ステップ後，30 ステップ後，50 ステップ後の 4 つの段階について，提案手法における波形の変化の様子を時刻歴波形とその時間周波数特性の観点から比較したものである．波形の時間周波数特性の表現には，Morlet ウェーブレットを用いた連続ウェーブレット変換<sup>19)</sup>から得られるスカログラムを利用している．波形の変化を行う前の初期波形は，3.0Hz 付近の周波数成分を 10.0 s 前後の時間に有しており，この波形による 10 自由度系の変位応答の平均値  $E(x)$  は小さく 0.82cm となっている．これに対し，15 ステップ後の波形は 10 自由度系の 1 次モード周期に相当する 1.0Hz 付近の周波数成分を獲得しており，その結果， $E(x)$  は 12.5cm と初期波形に比較して大きな値をとる．更に波形の変化が進む 30 ステップ，50 ステップ後では，波形が獲得する周波数成分が更に低周波成分へと移行しているが，これは部材の降伏に伴う構造系の長周期化に対応しているものと考えられる．このように，提案手法による波形の合成においては，波形の強度に応じて波形の獲得する特性が変化していることが分かる．

### 3.3 他の手法により合成された波形との比較

提案する波形の合成手法の効率性を検証するために，KL ダイバージェンスの最大変化方向を波形の探索に用いる提案手法に加え，下記の 3 種の手法を用いて波形の合成を行い，提案手法との結果の比較を行った．

- 比較手法 1: 解析信号ウェーブレットの足し合わせによって合成された複数の波形候補の中から最適な波形を選択する際，特徴指標の KL ダイバージェンスを用いずに，特徴指標のうち変位の平均値の変化が最大となる波形の変化方法を採用すること

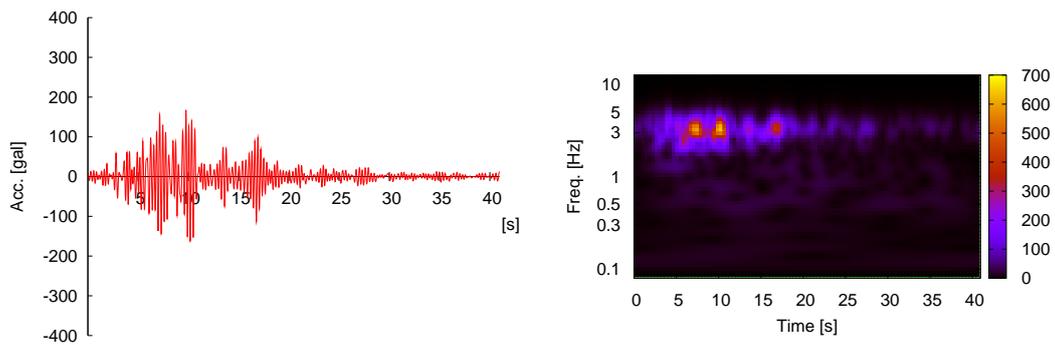
とした．すなわち，提案手法に比較して，特徴指標を一つしか用いておらず，波形の変化量の定量的な評価を平均値の差によって定義していることに特徴を持つ．

- 比較手法 2: 波形の変化の際に足し合わせる解析信号ウェーブレットのシフトやスケールを変えず，波形合成の試行を通じて同じウェーブレット関数を足し合わせることにした．ウェーブレット関数の卓越時間帯と卓越周波数は，初期波形の振幅が大きい時間帯や構造系の 1 次モードの固有周期を鑑みてそれぞれ 12.0s と 1.0Hz とした．
- 比較手法 3: 解析信号ウェーブレットのシフトとスケールを表-1 の範囲でランダムに決定した．提案手法に比較して，KL ダイバージェンスを用いた最適な変化方向の選択を行わず，ランダムに波形が変化していく．

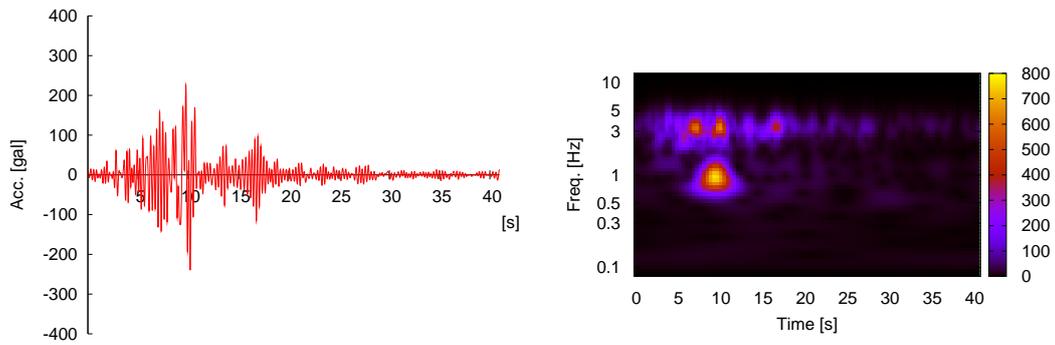
提案手法に加えて上記の 3 種の手法を用いた波形の合成を， $dP = 0.02 \cdot P(f_0(t))$  の制約の下で行った．

各手法による波形の合成を行った際の波形の変化の様子を図-6 に示す．提案手法，および変位の平均値を波形の変化方向の選択に用いた (a)，(b) の場合は，10.0s の付近で振幅が卓越し，一箇所の振幅がパルス的に大きくなるよう波形が選択的に変化する様子が見られる．同図 (c) における手法においても，同じウェーブレット関数を意図的に繰り返し足し合わせているために一箇所の振幅が同様に卓越している．これに対し，ランダムに波形を変化させた手法である同図 (d) は一箇所の振幅が卓越することはなく，変動が与えられた 5.0 - 20.0s の範囲で一様に変化している．

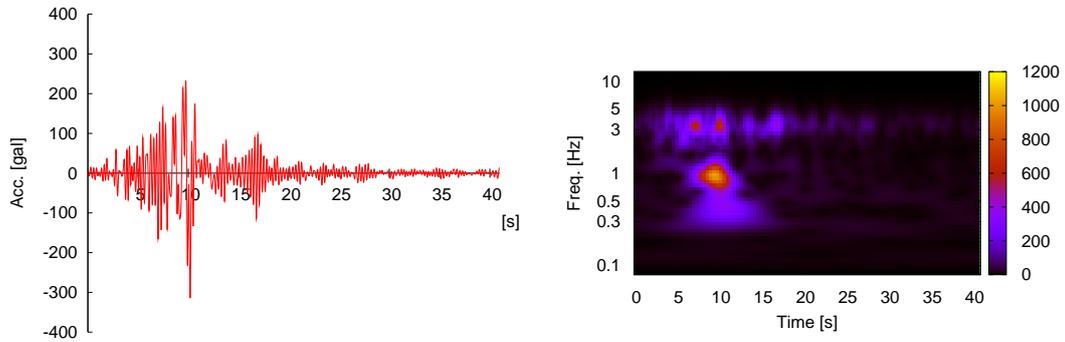
また，各手法によって 50 ステップ後に合成された波形を用いて，1 自由度系の動的解析を行った際の特徴指標の確率密度関数を図-7 に示す．波形をランダムに変化させた場合の応答値である同図 (d) に比較して，KL ダイバージェンスや変位の平均値の変化量を用いて選択的に波形の変化を行った (a) や (b) の手法は最大変位や履歴吸収エネルギーが大きな値をとっていることが分かる．また，これらの手法は一箇所の時間周波数特性を集中的に変化させた (c) の手法と比較をしても大きな指標値をとっていることから，波形の一箇所の振幅をパルス的に大きくすれば地震動の影響が大きくなるわけではなく，他の重要な波形の要因が (a) や (b) の手法によって選択されたと考えられる．



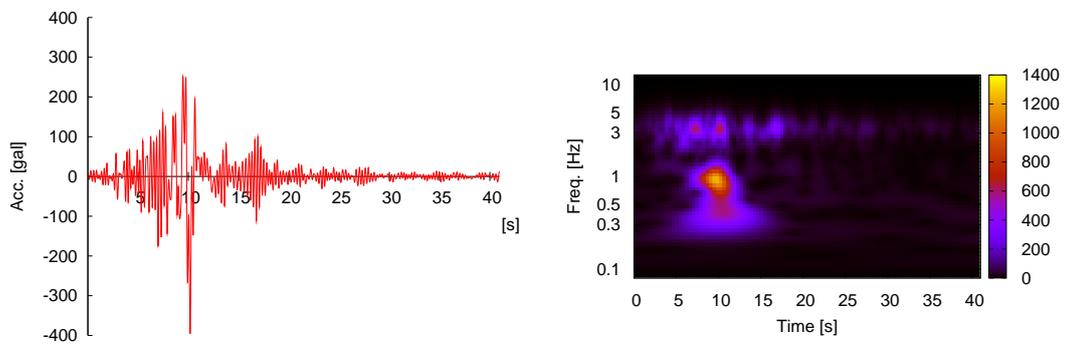
(a) 初期波形 ( $E(x) = 0.82\text{cm}$ )



(b) 15 ステップ後 ( $E(x) = 12.5\text{cm}$ )



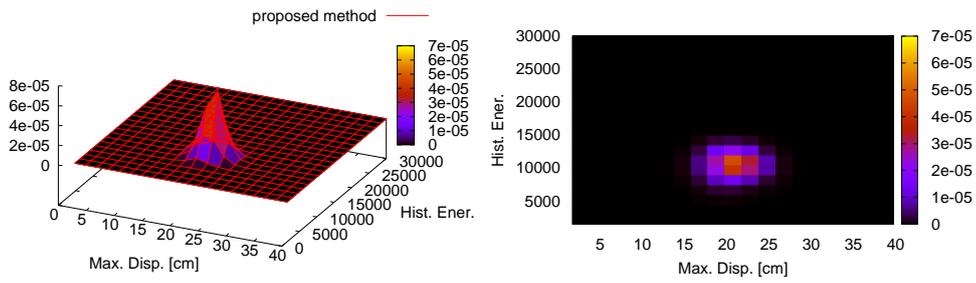
(d) 30 ステップ後 ( $E(x) = 15.4\text{cm}$ )



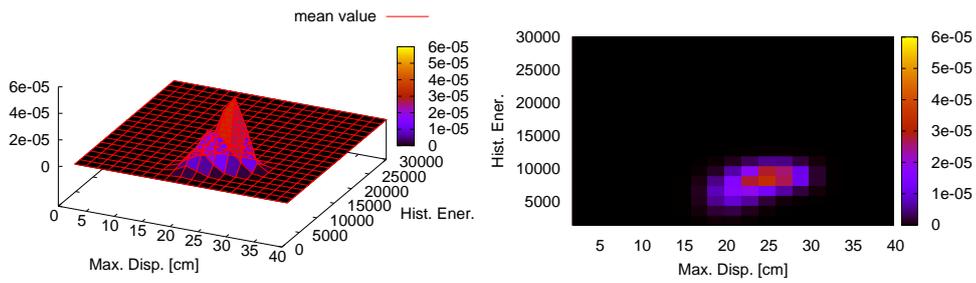
(d) 50 ステップ後 ( $E(x) = 20.3\text{cm}$ )

図-5 KL ダイバージェンスを用いた探索手法による波形の変遷 (左:時刻歴波形, 右:スカログラム (等高線),  $E(x)$  は波形による 10 自由度系の変位応答の平均値を表す)

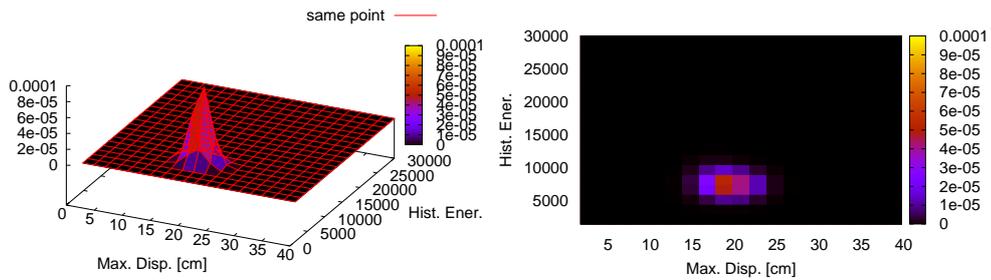




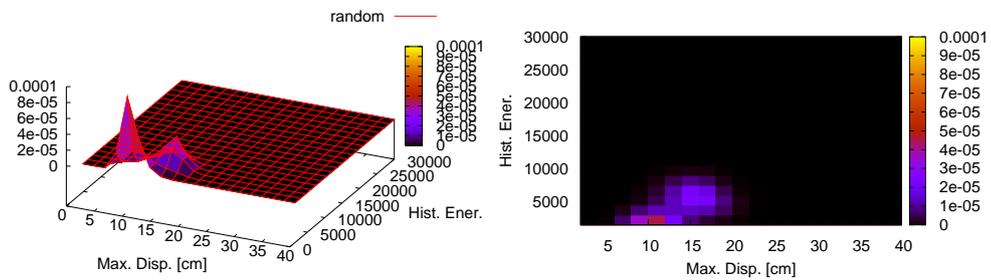
(a) 提案手法 (KL ダイバージェンスを用いた場合)



(b) 比較手法 1 (変位の平均値を用いた場合)



(c) 比較手法 2 (1 箇所の時間周波数特性のみを変化させた場合)



(d) 比較手法 3 (ランダムに波形を変化させた場合)

図-7 変化後の地震動による特徴指標の 2 次元確率密度関数 (左:鳥瞰図, 右:等高線)

(a) と (b) の結果を比較すると、変位の平均値の変化量を波形の変化方向の選択基準に用いた手法による結果である (b) は、(a) に比較して変位量は大きな値を取る一方で、履歴吸収エネルギーは相対的に低くなっている。これに対し、2 指標値の KL ダイバージェンスを波形の変化方向の選択基準に用いた提案手法では、波形が変化した結果、変位と履歴吸収エネルギーの両方の値が大きくなっている。

各波形による 10 自由度系の最上部のノードの最大変位と最大速度、最大靱性率の値について、全 100 体の構造モデルに対する結果の平均値をとったものを表-2 に示す。同表の結果を見ると、変位の平均値の変化量を用いて波形の変化の選択を行った比較手法 1 による波形は、10 自由度系の変位応答が最も大きな値をとっている一方で、速度応答は提案手法や比較手法 2 よりも小さい値を取っている。これに比較して、KL ダイバージェンスを用いて 2 つの特徴指標を考慮しながら波形の合成を行った提案手法による波形は、変位と速度の両方において大きな値をとっている。これは、構造系に対する波形の強度の評価を 2 指標を用いて行うことによって非線形挙動が多面的に評価された結果、変位応答のみではなく速度応答も大きな波形が合成された結果であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究は、設計対象とする構造系に対応する、非線形構造モデルの応答値の確率分布を地震動の特徴指標としてとらえ、特徴指標の確率分布のなす空間の中で地震動を考慮し、対象構造系に対し影響の大きな波形を合成する手法の提案を行った。同手法の有効性を検証するための数値解析を行った結果、提案手法により合成された波形は対象構造系に対して影響の大きな特性を選択的に獲得することにより、効率的に強度を得ていくことが確認された。

対象構造系が 1 ケースのみであったため、事例の蓄積が必要であることが今後の課題として考えられる。また、複数の特徴指標を考慮することで地震動の強度の評価が多面的なものとなり、その結果、構造系の多様な挙動に対する影響が大きくなる波形を合成することができると考えられるが、特徴指標の数を増やし構造系もより詳細なモデルを用いて検討を行うことで、提

案手法による合成波形の性能の評価をより詳細に行うことも必要である。

#### 参考文献

- 1) 日本地震工学会 編:性能規定型耐震設計 現状と課題, 鹿島出版会 2006
- 2) K.R.Mackie, B.Stojadinovic:Performance-based seismic bridge design for damage and loss limit states, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* Vol.36, 2007
- 3) 大崎順彦:新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994
- 4) Mihailo D. Trifunac:Early History of Response Spectrum method, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 28, pp.676-685, 2008
- 5) 理論地震動研究会 編著:地震動 その合成と波形処理, 鹿島出版会, 1994
- 6) C.Allin Cornell:Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968
- 7) 星谷勝:確率論手法による振動解析, 鹿島出版会, 1974
- 8) 星谷勝, 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986
- 9) 本田利器, 岡元良輔, 澤田純男:構造系の非線形応答特性に基づいた地震動の類似性の評価, 地震工学論文集 pp146-152, 2007
- 10) 宮本 崇, 本田 利器:非線形応答値を特徴指標とした, 構造系に与える影響の観点からの地震動の類似性評価, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集 (投稿中), 2009
- 11) 甘利俊一, 長岡浩司:情報幾何の方法 岩波講座 応用数学, 岩波書店, 1993
- 12) 甘利俊一:情報幾何, 別冊 数理科学 多様体の広がり, pp130-137, サイエンス社, 2008
- 13) 村田昇:情報理論の基礎, サイエンス社, 2005
- 14) S.Amari:Natural Gradient Works Efficiently in Learning, *Neural Computation* 10, pp.251-276, 1998
- 15) Hyeyoung Park:勾配学習の幾何学, 数理科学 No501 MARCH 2005, pp.10-15, サイエンス社, 2005
- 16) Aapo Hyvarinen et al.:詳解独立成分分析, 東京電機大学出版局, 2005
- 17) 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/>
- 18) Charles K.Chui:ウェーブレット入門, 電機大出版局, 1993
- 19) Christopher, Gilbert:A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bulletin of the American Meteorological Society* Vol. 79, No.1, pp.61-78, 1998
- 20) 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
- 21) 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
- 22) 甘利俊一, 村田昇:独立成分分析, サイエンス社, 2002
- 23) 村田昇:入門独立成分分析, 東京電機大学出版局, 2004
- 24) 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

(2009 年 4 月 9 日 受付)