

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2018年10月25日(25.10.2018)



(10) 国際公開番号

WO 2018/193564 A1

(51) 国際特許分類:  
G06F 17/50 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2017/015794

(22) 国際出願日: 2017年4月19日(19.04.2017)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(71) 出願人: 中国電力株式会社 (THE CHUGOKU ELECTRIC POWER CO., INC.) [JP/JP]; 〒7308701 広島県広島市中区小町4番33号 Hiroshima (JP).

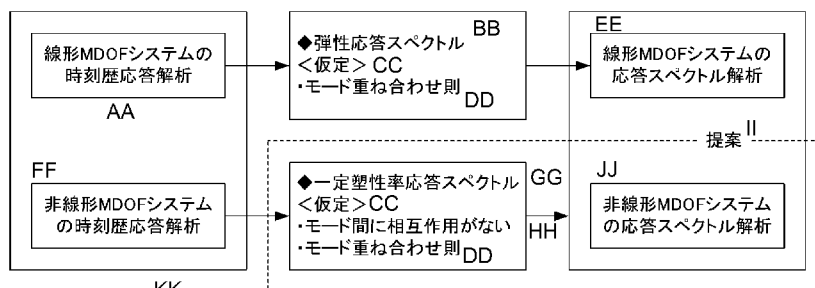
(72) 発明者: 田村 伊知郎 (TAMURA, Ichiro); 〒7308701 広島県広島市中区小町4番33号 中国電力株式会社内 Hiroshima (JP).

(74) 代理人: 正林 真之, 外 (SHOBAYASHI, Masayuki et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内1-7-12 サビアタワー Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA,

(54) Title: DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS METHOD FOR NONLINEAR MULTIPLE DEGREE OF FREEDOM SYSTEM

(54) 発明の名称: 非線形多自由度系の動的応答解析法



今回提案する応答スペクトル解析とMDOFシステムの時刻歴応答解析との関係

- AA Time history response analysis of linear MDOF system  
BB Elastic response spectrum  
CC Hypothesis  
DD Mode superposition principle  
EE Response spectrum analysis of linear MDOF system  
FF Time history response analysis of nonlinear MDOF system  
GG Constant ductility response spectrum  
HH No mode interactions  
II Proposed  
JJ Response spectrum analysis of nonlinear MDOF system  
KK Relationship between proposed response spectrum analysis and time history response analysis of MDOF system

(57) Abstract: Provided is a dynamic response analysis method for a nonlinear multiple degree of freedom system, said dynamic response analysis method providing relatively high analytical accuracy while incurring relatively low computational costs. In this method, a nonlinear multiple degree of freedom system is modally expanded on the basis of natural vibration modes in an elastic range, ignoring mode interactions in a ductile range and applying a hypothetical superposition principle to superposition of modes. The maximum distortion in each mode is found by using mode ductility rates

NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA,  
RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM,  
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,  
US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

- 国際調査報告 (条約第21条(3))

---

obtained from a constant ductility response spectrum that is created by time history response analysis of a nonlinear single degree of freedom system.

(57) 要約: 計算コストが比較的低い一方で、解析の精度が比較的高い非線形多自由度系の動的応答解析法を提供する。塑性領域におけるモード間の相互作用を無視し、モードの重ね合わせにモード重ね合わせ則を仮定した上で、弾性領域の固有振動モードにより非線形多自由度系をモード展開して、非線形一自由度系の時刻歴応答解析により作成した一定塑性率応答スペクトルから得たモード塑性率を用いることにより、各モードの最大変形を把握する。

## 明 細 書

**発明の名称：**非線形多自由度系の動的応答解析法

### 技術分野

[0001] 本発明は、非線形多自由度系の動的応答解析法に関する。より詳しくは、本発明は、一定塑性率応答スペクトルを用いた非線形多自由度系の動的応答解析法に関する。

### 背景技術

[0002] 地震等により弾塑性応答する機器・配管系の応答は、非線形多自由度系の応答解析により求める必要がある。非線形多自由度系の応答解析法には、応答の厳密解が得られる「直接積分法による時刻歴応答解析法」と簡易法である「等価線形化法を用いた応答スペクトル解析法」が代表的である。簡易法である「等価線形化法を用いた応答スペクトル解析法」は、系の弾塑性応答による剛性の低下と履歴減衰を、等価な線形剛性と線形減衰とで表わすことにより、非線形多自由度系をそれと等価な線形多自由度系に置き換え、線形多自由度系の応答スペクトル解析法を用いる方法である。「等価線形化法を用いた応答スペクトル解析法」については、例えば、特許文献1及び2に、等価な線形剛性と線形減衰の与え方の例が記載されている。

### 先行技術文献

#### 特許文献

[0003] 特許文献1：特開2001-132900号公報

特許文献2：特開2001-290848号公報

#### 非特許文献

[0004] 非特許文献1：Caughey, T. K., Sinusoidal excitation of a system with bilinear hysteresis, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 27 (1960a), pp. 640-643.

非特許文献2: Caughey, T. K., Random excitation of a system with bilinear hysteresis, Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol. 27 (1960b), pp. 649–652.

非特許文献3: Chopra, A. K., Dynamics of Structures, 4th ed. (2011), pp. 244–245, pp. 276–278, Prentice Hall, New Jersey, USA.

非特許文献4: 飯島唯司、小野悟、等価線形化法による配管系の簡易的な弾塑性地震応答解析、日本機械学会論文集、C編、Vol. 68, No. 673 (2002), pp. 2542–2548.

非特許文献5: Iwan, W. D. and Gates, N. C., Estimating Earthquake Response of simple hysteretic structures, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 105, No. 3 (1979), pp. 391–405.

非特許文献6: Jennings, P. C., Equivalent Viscous Damping for yielding structures, Proceedings of ASCE, Vol. 94 (1968), pp. 103–116.

非特許文献7: 浪田芳郎、川畑淳一、市橋一郎、福田俊彦、弾塑性ダンパ支持配管系の耐震設計手法の開発 : 第3報、三次元配管モデル試験とその応答解析、日本機械学会論文集 C編、Vol. 61, No. 590 (1995), pp. 3881–3888.

非特許文献8: Newmark, N. M., Inelastic design of nuclear reactor structures

and its implication on design of critical equipment, Proceedings of International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (1977), K 4/1.

非特許文献9：田村伊知郎、松浦真一、地震力に対する機器・配管系の弾塑性応答評価法（一自由度系の弾塑性応答特性の考察、日本機械学会論文集、Vol. 82, No. 835 (2016), DOI:10.1299/transjsme.15-00467.

非特許文献10：Tamura, I., Matsuura, S. and Shimazu, R., Yield strength reduction factor of nonlinear SDOF systems on the supporting structures, Proceedings of the ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference (2016), Canada, PVP2016-63944.

非特許文献11：Veletsos, A. S. and Newmark, N. M., Effect of inelastic behavior on the response of simple systems to earthquake motions, Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Vol. 2 (1960), pp. 895-912.

## 発明の概要

### 発明が解決しようとする課題

[0005] しかし、「直接積分法による時刻歴応答解析法」は、厳密解が得られるものの、機器・配管系を非線形の有限要素モデルにより詳細にモデル化するため、非線形有限要素モデルの直接積分法による解析は、多くの計

算量を必要とし、計算コストが大きなものとなる。

[0006] また、「等価線形化法を用いた応答スペクトル解析法」は、非線形多自由度系を等価な線形多自由度系に置き換えるため、「直接積分法による時刻歴応答解析法」に比較して、計算コストは少なくなるものの、その精度は明らかではない。

[0007] このため、非線形多自由度系の地震応答解析は、これまで、機器・配管系の耐震設計において実用化されておらず、線形多自由度系の地震応答解析法が用いられているのが現状である。

[0008] 本発明は、上記課題に鑑みてなされたものであり、計算コストが比較的低い一方で、解析の精度が比較的高い非線形多自由度系の動的応答解析法を提供することを目的とする。

### 課題を解決するための手段

[0009] 本発明は、塑性領域におけるモード間の相互作用を無視し、モードの重ね合わせにモード重ね合わせ則を仮定した上で、弾性領域の固有振動モードにより非線形多自由度系をモード展開して、非線形一自由度系の時刻歴応答解析により作製した一定塑性率応答スペクトルから得たモード塑性率を用いることにより、各モードの最大変形を把握する、非線形多自由度系の動的応答解析法に関する。

[0010] 更に、多自由度の非線形系に比べ、対応する線形系の塑性率が大きくなるか判定し、非線形応答解析の簡易法として、線形応答解析を用いることが好ましい。

[0011] また、上記の非線形多自由度系の動的応答解析法は、非線形多自由度系において、 $r$  次のモード変位によりばね  $i_1^r - j_1^r$  から、ばね  $i_n^r - j_n^r$  まで順次降伏する際、 $r$  次の各振動数を  $\omega_r$ 、 $r$  次のモード降伏変位を

[数1]

$$q_r y(i_1^r j_1^r)$$

、刺激係数を  $\beta_r$  としたとき、

[数2]

$$a_r^y = \omega_r^2 \frac{q_r^{y(l_1^r j_1^r)}}{\beta_r}$$

によって算出される  $r$  次のモード降伏加速度が、 $r$  次の固有周期を  $T_r$ 、減衰比を  $h_r$  としたときの弾性応答スペクトル  $a^e(T_r, h_r)$  以上であることを実施条件とすることが好ましい。

[0012] また、上記の非線形多自由度系の動的応答解析法は、線形一自由度系の塑性率を、

[数3]

$$\bar{\mu}_l$$

、剛性比を  $\gamma_r$ 、構築物床の最大応答加速度を  $A_0$  としたとき、構築物の一次固有周期以下の一自由度系に対して、

[数4]

$$\varepsilon(a_r^y) = \frac{(1 + (\bar{\mu}_l - 1)\gamma_r)a_r^y}{A_0}$$

によって定義される想定荷重係数  $\varepsilon(a_r^y)$  が、閾値  $\alpha$  以上であることを実施条件とすることが好ましい。

[0013] また、上記の非線形多自由度系の動的応答解析法は、系を支持する構築物の一次固有周期を  $T_s$ 、非線形多自由度系の  $r$  次の固有周期を  $T_r$  としたとき、 $T_s \leq T_r$  であることを実施条件とすることが好ましい。

## 発明の効果

[0014] 本発明により、計算コストが低い一方で、解析の精度が高い非線形多自由度系の動的応答解析法を提供することが可能となる。

## 図面の簡単な説明

[0015] [図1]本発明に係る解析法と時刻歴応答解析法の関係を示す図である。

[図2A]非線形一自由度系における降伏点を示す図である。

[図2B]線形一自由度系における降伏点を示す図である。

[図3]島根原子力発電所2号機原子炉建物で観測した鳥取県西部地震での床応答を示す図である。

[図4]島根原子力発電所2号機原子炉建物で観測した鳥取県西部地震での一定塑性率応答スペクトルを示す図である。

[図5A]弾性応答スペクトル解析法による一自由度系の最大変形の求め方を示す図である。

[図5B]弾塑性応答スペクトル解析法による一自由度系の最大変形の求め方を示す図である。

[図6]非線形N自由度系のモデル図の一例である。

[図7]多直線骨格曲線で表わされる荷重・モード変位関係を示す図である。

[図8A]弾性応答スペクトル解析法によって多自由度系の最大変形を求める際に用いる加速度応答スペクトルを示す図である。

[図8B]弾塑性応答スペクトル解析法によって多自由度系の最大変形を求める際に用いる一定塑性率応答スペクトルを示す図である。

[図9]一定塑性率床応答スペクトル上の弾完全塑性型の系の領域を示す図である。

[図10]非線形二自由度系の解析モデルと固有振動モードを示す図である。

[図11]非線形二自由度系のモデル図である。

[図12]一定塑性率床応答スペクトルに解析モデルの固有周期を追記した図である。

[図13A]Model Aの塑性率の計算結果を示す図である。

[図13B]Model Bの塑性率の計算結果を示す図である。

[図13C]Model Cの塑性率の計算結果を示す図である。

## 発明を実施するための形態

## [0016] &lt; 1. 発明の概要 &gt;

耐震設計において、機器・配管系は降伏後も剛性が低下しない仮想的な系、即ち、線形系として扱いその応答を線形応答解析により求めることが一般的である。線形多自由度系の応答解析法には、時刻歴応答解析法と応答スペクトル解析法がある。前者は系の最大応答の厳密解が得られるが、解析パラメータの変化が解析結果に及ぼす影響程度の予見性がない。後者は各モードが最大応答となる同時性について仮定し、モード重ね合わせ則を用いることにより系の最大応答が得られるため、厳密解は得られないが、解析に用いる加速度応答スペクトルから各モードの最大応答が把握でき、解析パラメータの変化が解析結果に及ぼす影響程度の予見性に優れている。また、加速度応答スペクトルへの保守性の付与も容易であり、機器・配管系の耐震設計においては、応答スペクトル解析法が広く用いられている。

[0017] 弾塑性応答する機器・配管系を線形系として扱うと解析は容易になるが、系に生じる履歴減衰や塑性変形による固有周期の変化が考慮できない等の課題がある。弾塑性応答する機器・配管系を実現象に即して降伏後に剛性が低下する系、即ち非線形として扱うと、その応答を非線形応答解析により求める必要がある。非線形多自由度系の応答解析法にも、時刻歴応答解析法と応答スペクトル解析法があるが、次に述べる課題がある。前者は系の最大応答の厳密解が得られるが、線形系と同じく解析パラメータの変化が解析結果に及ぼす影響程度の予見性がない。後者の代表例に等価線形化法を用いた応答スペクトル解析法がある。この解析法は系の弾塑性応答による剛性の低下と履歴減衰を、等価な線形剛性と線形減衰で表し、加速度応答スペクトルを用いて応答スペクトル解析を行う方法である。等価な線形剛性と線形減衰の与え方は幾つかの提案がなされているが、厳密解を与える時刻歴応答解析法との理論的な関係は明らかでない（非特許文献 1、5、及び 6）。

[0018] 発明者らは、機器・配管系の耐震設計に用いる弾塑性応答評価法を提案する。発明者らは、既に、その第一段階として、一定塑性率応答スペクトル（  
C o n s t a n t   d u c t i l i t y   r e s p o n s e   s p e c t r

u m) を分析し、地震による床応答に対する一自由度系の弾塑性応答特性について報告した（非特許文献 9）。本明細書では、その第二段階として、一定塑性率応答スペクトルを用いる非線形多自由度系の応答スペクトル解析法を提案する。一定塑性率応答スペクトルは、応答により非線形一自由度系に生じる塑性率を、ある特定の値に止めるために必要な系の降伏耐力が簡単に得られるスペクトルである（非特許文献 11）。弾塑性応答スペクトルの一つであるこの応答スペクトルには、以下の特徴がある。

（1）一自由度系の弾塑性応答は、剛性の低下や履歴減衰の影響を含め応答解析により厳密に計算されている。

（2）一自由度系の弾性応答の固有周期を横軸としており、弾塑性応答の程度に係わらず着目する系の弾性応答の固有周期により、応答スペクトル上で着目する周期を特定できる。

（3）一自由度系の降伏耐力（又はこれを系の質量で除した降伏加速度）を縦軸としており、これを与えることにより、弾性応答から弾塑性応答まで連続的に系の最大応答を塑性率という形で与える。

[0019] 非線形多自由度系の等価線形化法を用いた応答スペクトル解析法は、非線形多自由度系を等価な線形多自由度系に置き換え、これをモード展開して線形一自由度系の応答解析の結果を用いるものである（非特許文献 4 及び 7）。これに対し、提案する非線形多自由度系の応答スペクトル解析法は、非線形系から線形系への置き換えを行わず、非線形多自由度系をモード展開して非線形一自由度系の応答解析の結果を用いるものである。提案する解析法と厳密解を与える時刻歴応答解析法の関係を図 1 に示す。この解析法の構築に当たり用いた仮定は以下の二つであり、一つ目は解析法の基礎となる運動方程式を導出するための仮定、二つ目は応答スペクトル解析を行うための仮定である。

（1）弾性応答の固有振動モードでモード展開すると、弾塑性応答により剛性が低下した際にはモード間の相互作用を生じるが、これを無視する。

（2）一定塑性率応答スペクトルからは各モードの最大応答のみ得られるた

め、線形多自由度系の応答スペクトル解析と同様に、モードの重ね合わせにモード重ね合わせ則を仮定する。

[0020] 提案する解析法を用いると、解析に用いる一定塑性率応答スペクトルから各モードの最大応答が把握できるため、系の固有周期や地震動の変化が解析結果へ及ぼす影響程度の予見性に優れている。また、地震による床応答に対する各モードの弾塑性応答特性は、一自由度系の弾塑性応答特性として確認されている（非特許文献9）。従って、設計に用いる一定塑性率応答スペクトルへの保守性の付与や設計に用いる系の降伏耐力等の解析パラメータの保守的な設定が容易であり、この解析法を弾塑性応答する機器・配管系の耐震設計に用いることは有効であると考ええる。これ以降、提案する非線形多自由度系の応答スペクトル解析法を弾塑性応答スペクトル解析法といい、従来の線形多自由度系の応答スペクトル解析法を弾性応答スペクトル解析法という。

[0021] 弾塑性応答する機器・配管系を実現象に即して非線形系として扱うと、その応答を非線形応答解析により求める必要があるが、非線形応答解析より線形応答解析の結果が保守的である条件が明らかであれば、非線形応答解析の簡易法として線形応答解析を用いることができる。この非線形応答解析の簡易法としての線形応答解析は、非線形応答解析より保守的な結果が得られることを担保している点で、現在の耐震設計において線形応答解析を用いることと意味合いが異なる。非線形応答解析の簡易法としての線形応答解析の結果に対しては、非線形応答解析の結果に対して適用する許容基準を適用することができる。著者らは、一自由度の非線形系に比べ、対応する線形系の応答が大きくなるか判定する条件を明らかにしており（非特許文献10）、この知見に基づき、本報では多自由度の非線形系に比べ、対応する線形系の応答が大きくなるか判定する条件を提案する。非線形系に対応する線形系については後述する。

[0022] <2. 一自由度系の弾塑性応答と一定塑性率応答スペクトル>

### 2. 1 一自由度系の運動方程式

荷重・変形関係が二直線骨格曲線であり移動硬化則に従う復元力特性をもつ一自由度系を考える。応答が弾性領域にある系の運動方程式は次式となる。

[数5]

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) \quad (|x| \leq x^y) \quad (1)$$

ここで、 $x$  は変形、 $m$  は質量、 $c$  は減衰係数、 $k$  は初期剛性、 $t$  は時間、 $F(t)$  は外力、 $x^y$  は降伏変形である。

[0023] 変形  $x$  が降伏変形  $x^y$  を超えると、系が降伏する。応答が塑性領域にある系の運動方程式は次式となる。

[数6]

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k'x + (k - k')x^y = F(t) \quad (x > x^y) \quad (2)$$

ここで、 $k$  は二次剛性である。

[0024] 式(1)、(2)を質量  $m$  で除すと次式が得られる。

[数7]

$$\ddot{x} + 2h\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = -\ddot{x}_E \quad (|x| \leq x^y) \quad (3)$$

$$\ddot{x} + 2h\omega_n \dot{x} + \omega_n'^2 x + (\omega_n^2 - \omega_n'^2)x^y = -\ddot{x}_E \quad (x > x^y) \quad (4)$$

ここで、

[数8]

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

は固有角振動数、

[数9]

$$\omega_{n'} = \sqrt{\frac{k'}{m}}$$

は二次剛性に対応した固有角振動数、

[数10]

$$h = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

は減衰比、

[数11]

$$\ddot{x}_E = \frac{-F(t)}{m}$$

は入力加速度である。

[0025] 式(3)、(4)を降伏変形 $x^y$ で除すと、系の時間依存塑性率 $D = \dot{x} / \dot{x}^y$ に対する運動方程式が次の通り得られる。

[数12]

$$\ddot{D} + 2h\omega_n\dot{D} + \omega_n^2 D = -\omega_n^2 \ddot{x}_E / a^y \quad (|D| \leq 1) \quad (5)$$

[数13]

$$\ddot{D} + 2h\omega_n \dot{D} + \omega_n'^2 D + (\omega_n'^2 - \omega_n'^2) = -\omega_n'^2 \ddot{x}_E / a^y \quad (D > 1) \quad (6)$$

ここで、 $a^y = \omega_n'^2 x^y$  は系の降伏加速度である。

[0026] 式(5)、(6)より、系の塑性率  $\mu = x^{\max} / x^y = \max \{ |D(t)| \}$  は、与えられた外力  $F(t)$  に対し4つのパラメータ： $a^y$ 、 $T_n$ 、 $h$ 、 $\gamma$  により定まることがわかる。ここで、 $x^{\max}$  は最大変形、 $T_n = 2\pi / \omega_n$  は固有周期、 $\gamma = k' / k$  は剛性比である。

[0027] 本明細書で考える一自由度系は、剛性比の範囲が  $0 \leq \gamma < 1$  の非線形一自由度系及びこれに対応する線形一自由度系とする。ここで、対応する線形一自由度系とは、非線形一自由度系と質量、初期剛性、減衰比及び降伏点が等しく、剛性比を1とした系であり、変形が降伏変形を超えても剛性が低下しない仮想的な系である。非線形一自由度系は変形が降伏変形を超えると剛性が低下する系であるが、対応する線形一自由度系はこの剛性低下が極限まで小さくなった系と考えることができる。非線形一自由度系及び対応する線形一自由度系は、各々、図2A及び図2Bが該当し、いずれも降伏点を有する非弾性系である。従って、非線形一自由度系及び対応する線形一自由度系ともに、降伏変形を基準に系の最大変形の大きさを表す塑性率を用いて系の最大応答を表すことができる。このように、降伏点を持つ仮想的な線形一自由度系という概念を導入することにより、非線形一自由度系と対応する線形一自由度系の塑性率による応答の比較が可能となる。なお、塑性率  $\mu$  は、通常、弾塑性応答する系に対して用いる ( $\mu > 1$ ) が、弾性応答する系に対しても用いる ( $0 \leq \mu < 1$ ) ことができる。

## [0028] 2. 2 一定塑性率応答スペクトル

一定塑性率応答スペクトルは、外力  $F(t)$  が作用する減衰比  $h$ 、剛性比  $\gamma$  の一自由度系の降伏加速度  $a^y$  を、特定の塑性率  $\mu$  に対して固有周期  $T_n$  の関数  $a^y(T_n, h, \gamma, \mu)$  として図示するものである。この図は、固有周期  $T_n$  毎に、外力  $F(t)$  が作用する減衰比  $h$ 、剛性比  $\gamma$  の一自由度系に対し

て降伏加速度を変化させ時刻歴応答解析を行い、その応答が特定の塑性率 $\mu$ となる系の降伏加速度 $a_y$ を収束計算により求め、作成する（非特許文献3）。島根原子力発電所2号機原子炉建物で観測した鳥取県西部地震の床応答を図3に、この一定塑性率応答スペクトルを図4に示す。なお、式（5）、（6）より、系の降伏加速度 $a_y$ と入力加速度

[数14]

$$\ddot{x}_E$$

には次式の関係があり、一定塑性率応答スペクトルは系の降伏加速度に代えて入力加速度を変化させて計算することもできる。

[数15]

$$\mu(a_y/\kappa, \ddot{x}_E) = \mu(a_y, \kappa \ddot{x}_E) \quad (\forall \kappa) \quad (7)$$

[0029] 系の降伏耐力 $f_y$ とすると $f_y = m a_y$ であるため、一定塑性率応答スペクトルを用いると、系の固有周期、減衰比、剛性比及び系に許容する塑性率から、系に必要な降伏耐力を得ることができる。また、系の降伏耐力、固有周期、減衰比及び剛性比から、系に生じる塑性率を得ることができる。一定塑性率応答スペクトルは必要耐力スペクトルともいわれ、前者の使い方をすることが多いが、本明細書では後者の使い方をする。

[0030] 一定塑性率応答スペクトル $a_y(T_n, h, \gamma, \mu)$ と加速度応答スペクトル $A(T_n, h)$ の関係を考える。加速度応答スペクトル $A(T_n, h)$ は、外力 $F(t)$ が作用する減衰比 $h$ の線形一自由度系の最大応答加速度 $A$ を、固有周期 $T_n$ の関数として図示するものである。系が弾性に止まるために必要な降伏加速度 $a_e$ は、塑性率 $\mu = 1$ の一定塑性率応答スペクトルにより与えられる。このスペクトルを次式の通り弾性応答スペクトル $a_e(T_n, h)$ と定義する。

[数16]

$$a^e(T_n, h) \equiv a^y(T_n, \gamma, h; \mu = 1) \quad (8)$$

[0031] この弾性応答スペクトル  $a^e(T_n, h)$  は、次式の通り加速度応答スペクトル  $A(T_n, h)$  に一致する。（厳密には弾性応答スペクトルは疑似加速度応答スペクトルと一致する。疑似加速度応答スペクトルと加速度応答スペクトルは近似的に等しい（非特許文献3）。）

[数17]

$$a^e(T_n, h) = A(T_n, h) \quad (9)$$

[0032] 一定塑性率応答スペクトルは、通常、塑性率  $\mu$  が1より大きい弾塑性応答する系に対して描くが、塑性率  $\mu$  が1以下の弾性応答に止まる系に対しても描くことができる。弾性応答に止まる系の応答は線形応答であり、また、弾塑性応答するが降伏後も剛性が低下しない仮想的な系の応答も線形応答である。系が弾性に止まるために必要な降伏加速度  $a^e = \omega_n^2 x^{max}$  と系の降伏加速度  $a^y = \omega_n^2 x^y$  を用いると、線形応答する系の塑性率  $\mu = x^{max} / x^y$  は次式で与えられる。

[数18]

$$\mu = \frac{a^e}{a^y} \quad (\mu \leq 1 \text{ or } \gamma = 1) \quad (10)$$

従って、線形応答する系の一定塑性率応答スペクトル  $a^y(T_n, \gamma, h; \mu)$  は、弾性応答スペクトル  $a^e(T_n, h)$  を用いて次式で与えられる。

[数19]

$$a^y(T_n, \gamma, h; \mu) = \frac{a^e(T_n, h)}{\mu} \quad (\mu \leq 1 \text{ or } \gamma = 1) \quad (11)$$

[0033] 2. 3 応答スペクトル解析法

弾性応答スペクトル解析法と弾塑性応答スペクトル解析法による一自由度系の最大変形の求め方を図5 A及び図5 Bを用いて示す。

[0034] まず、弾性応答スペクトル解析法について説明する。図5 Aのグラフは、加速度応答スペクトルを示す。このスペクトルより、最大加速度  $A = A(T_n, h)$  が得られる。更に、最大加速度  $A$  から、最大変形量  $x^{max} = A / \omega_n^2$  が得られる。

[0035] 次に、弾塑性応答スペクトル解析法について説明する。図5 Bのグラフは、一定塑性率応答スペクトルを示す。このスペクトルより、塑性率  $\mu = \mu(a^y, T_n, h, \gamma)$  が得られる。更に、この塑性率  $\mu$  から、最大変形量  $x^{max} = \mu x^y$  が得られる。仮に系が線形であれば、  

$$x^{max} = \mu x^y = (a^e / a^y) x^y = a^e / (\omega_n^2)$$
となる。ここで、式(11)より  $\mu = a^e / a^y$  である。

[0036] なお、 $A$  は最大応答加速度、 $a^e$  は、弾性系に必要とされる降伏加速度、 $a^y$  は系の降伏加速度、 $h$  は、系の減衰比、 $T_n$  は系の固有周期、 $x^y$  は、系の降伏変形量、 $x^{max}$  は最大変形量、 $\mu$  は塑性率、 $\omega_n$  は系の固有角振動数である。

[0037] 系が線形である場合、式(9)より弾性応答スペクトル解析法と弾塑性応答スペクトル解析法から得られる結果は一致する。弾塑性応答スペクトル解析法を用いると、系の降伏加速度  $a^y$  が弾性系であるために必要な降伏加速度  $a^e$  を上回る場合、下回る場合のいずれにおいても、非線形一自由度系の時刻歴応答解析により作成した一定塑性率応答スペクトルから塑性率  $\mu$  が得られ、これより系の最大変形を求めることができる。

[0038] <3. 非線形多自由度系の弾塑性応答スペクトル解析法>

一定塑性率応答スペクトルは、一自由度系の弾性応答の固有周期と降伏加速度を与えることにより、弾性応答から弾塑性応答まで連続的に系の最大応答を塑性率という形で与える。この優れた特性を有する一定塑性率応答スペクトルを用いる非線形多自由度系の応答スペクトル法を考える。

[0039] 線形N自由度系をモード展開すると、式(3)の形式のモード変位に対する独立したN個の線形一自由度系の運動方程式が得られる。これらの式に基づき、各モードの最大応答加速度を加速度応答スペクトルから読み取り、モード重ね合わせ則を用いて系の最大応答を求める解析法が、従来の弾性応答スペクトル解析法である。著者らは、非線形N自由度系をモード展開し、モード座標系において新たに定義したモード降伏変位及びモード降伏加速度を用いて、式(5)、(6)の形式の時間依存モード塑性率に対する独立したN個の非線形一自由度系の運動方程式を得た。これらの式に基づき、各モードのモード塑性率を一定塑性率応答スペクトルから読み取り、モード重ね合わせ則を用いて系の最大応答を求める方法を開発した。開発した弾塑性応答スペクトル解析法を以下に示す。

### [0040] 3. 1 線形多自由度系のモード展開

N個の質点を線形ばねで、互いに又は床と結合した線形N自由度系を考える。質点iの質量を $m_i$ 、質点i-j間のばねi-jの剛性を $k_{ij}$ とすると、この系の運動方程式は次式となる( $i, j = 1, 2, \dots, N$ )。ただし、質点i-i間のばねi-iは質点iと床の間のばねを表す。

[数20]

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = -[M]\{\ddot{X}_E\} \quad (12)$$

ここで、

[数21]

$$\{X\} = (x_1 \ x_2 \ \dots \ x_N)^T, \quad \{X_E\} = (x_E \ x_E \ \dots \ x_E)^T \quad (13)$$

[数22]

$$K_{ij} = \sum_{i=1}^N k_{ij} \quad (i=1,2,\dots,N), \quad K_{ij} = -k_{ij} \quad (i \neq j, i=1,2,\dots,N, j=1,2,\dots,N), \quad k_{ij} = k_{ji} \quad (14)$$

$\{X\}$  は変位ベクトル、 $[M]$ は質量行列、 $[C]$ は減衰行列、 $[K]$ は剛性行列、

[数23]

$$\{\ddot{X}_E\}$$

は外力  $F(t)$  の加速度ベクトルを示す。

[0041] ここで、行列の各列が系の固有角振動数  $\omega_i$  に対応する固有振動モード  $[\Phi]_i = \{\phi_i\}$  である行列  $[\Phi]$  を定義する。N 自由度系の変位ベクトル  $\{X\}$  はモードの重ね合わせとして、次式で表すことができる。

[数24]

$$\{X\} = q_1 \{\phi_1\} + q_2 \{\phi_2\} + \dots + q_N \{\phi_N\} = [\Phi]q, \quad \{q\} = (q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_N)^T \quad (15)$$

[0042] 式 (12) と (15) より、モード座標  $\{q\}$  の運動方程式が次のように得られる。

[数25]

$$\ddot{q}_r + 2h_r \omega_r \dot{q}_r + \omega_r^2 q_r = -\beta_r \ddot{x}_E \quad (16)$$

ここで、 $\omega_r$ ,  $h_r$ ,  $\beta_r$  は、各々  $r$  次のモード角振動数、モード減衰比及び刺激係数である。

[0043] 式 (16) を  $\beta_r$  で除すとモード座標  $\{\eta\}$  の運動方程式が次のように得られる。ここで、 $\eta_r = q_r / \beta_r$  である。

[数26]

$$\ddot{\eta}_r + 2h_r\omega_r\dot{\eta}_r + \omega_r^2\eta_r = -\ddot{x}_E \quad (17)$$

## [0044] 3. 2 非線形多自由度系のモード展開

前節の線形N自由度系のばねを非線形ばねとした非線形N自由度系を考える。非線形ばねは、荷重・変形関係が二直線骨格曲線であり移動硬化則に従う復元力特性を持つとする。一例として非線形N自由度系のモデル図を図6に示す。応答が弾性領域である系の運動方程式は、式(12)、(16)及び(17)に等しい。次に、非線形N自由度系の応答が弾性領域から塑性領域に入り、ばね $i_1 - j_1$ からばね $i_n - j_n$ まで順次降伏する運動を考える。この運動は、ばね $i - j$ の降伏変形を $x_{ij}^y$ 、降伏したばねの二次剛性を $k'_{ij}$ とすると、以下のように記述することができる。

[0045] ばね $i_1 - j_1$ の変形が降伏変形

[数27]

$$x_{i_1 j_1}^y$$

となり非線形N自由度系に最初の降伏が生じる。次にばね $i_2 - j_2$ の変形が降伏変形

[数28]

$$x_{i_2 j_2}^y$$

となり系に2番目の降伏が生じる。そして、系の降伏が進みn番目の降伏がばね $i_n - j_n$ で生じる。このとき、非線形N自由度系のn箇所が降伏し塑性領域にある運動方程式は次式となる。

[数29]

$$\begin{aligned}
& [M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + \left[ K'^{(i_1 j_1) \cdots (i_n j_n)} \right] \{X\} + \\
& \left( [K] - \left[ K'^{(i_1 j_1)} \right] \right) \{X^{y(i_1 j_1)}\} + \cdots + \\
& \left( [K] - \left[ K'^{(i_n j_n)} \right] \right) \{X^{y(i_n j_n)}\} = -[M]\{\ddot{X}_E\} \quad (18)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& (|x_i - x_j| \leq x_{ij}^y (i \neq j) \ (i, j) \neq (i_1, j_1), \cdots (i_n, j_n), \\
& |x_i - x_j| > x_{ij}^y (i \neq j) \ (i, j) = (i_1, j_1), \cdots (i_n, j_n), \\
& |x_i| \leq x_{ii}^y \ (i, i) \neq (i_1, j_1), \cdots (i_n, j_n), \\
& |x_i| > x_{ii}^y \ (i, i) = (i_1, j_1), \cdots (i_n, j_n) )
\end{aligned}$$

ここで、

[数30]

$$\begin{aligned}
\{X^{y(ij)}\} &= (0 \quad \cdots \quad 0 \quad x_i \quad 0 \quad \cdots \quad 0 \quad x_j \quad 0 \quad \cdots \quad 0)^T, \\
x_i - x_j &= x_{ij}^y (i \neq j), \ x_i = x_{ii}^y (i = j)
\end{aligned} \quad (19)$$

[数31]

$$\begin{aligned}
K'_{\ddot{ii}}^{(i_1 j_1) \cdots (i_n j_n)} &= \sum_{j=1}^N k'_{ij}, \\
K'_{\ddot{ij}}^{(i_1 j_1) \cdots (i_n j_n)} &= -k'_{ij}, \\
k'_{ij} &= k'_{ji}, \\
k'_{ij} &= k_{ij} \ ((i, j) \neq (i_1, j_1), \cdots (i_n, j_n))
\end{aligned} \quad (20)$$

[0046] 式(18)の左辺の第3項以降のn+1個の項が、n箇所が降伏した系の

復元力を表す。モード座標  $\{q\}$  において、ばね  $i-j$  のモード降伏変位  $q_r^{y(ij)}$  を導入することとし、その定義は次式とする。

[数32]

$$q_r^{y(ij)} \equiv \frac{x_{ij}^y}{\phi_{ri} - \phi_{rj}} \quad (21)$$

[0047]  $r$  次のモード変位が  $q_r^{y(ij)}$  となると、 $r$  次の固有振動モード  $\{\phi_r\}$  の変位によりばね  $i-j$  が降伏する。式 (18) に式 (15) を代入し、式 (18) の各項に前から  $\{\Phi\}^T$  を乗じて式 (21) を用いると、モード座標  $\{q\}$  の運動方程式が次のように得られる。

[数33]

$$\begin{aligned} \ddot{q}_r + 2h_r \omega_r \dot{q}_r + \sum_{s=1}^N \frac{K_{\phi rs}^{(i_1 j_1) \cdots (i_n j_n)}}{M_{\phi r}} q_s + \frac{K_{\phi r} - K_{\phi rr}^{(i_1 j_1)}}{M_{\phi r}} q_r^{y(i_1 j_1)} \\ + \cdots + \frac{K_{\phi r} - K_{\phi rr}^{(i_n j_n)}}{M_{\phi r}} q_r^{y(i_n j_n)} = -\beta_r \ddot{x}_E \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、

[数34]

$$\begin{aligned} M_{\phi r} &= \{\phi_r\}^T [M] \{\phi_r\}, \\ K_{\phi r} &= \{\phi_r\}^T [K] \{\phi_r\}, \\ K_{\phi rs}^{(i_1 j_1) \cdots (i_n j_n)} &= \{\phi_r\}^T [K^{(i_1 j_1) \cdots (i_n j_n)}] \{\phi_s\} \end{aligned} \quad (23)$$

である。

[0048] 3. 3 モード間の相互作用のない非線形多自由度系の運動方程式

前節で得たモード座標  $\{q\}$  の塑性領域の運動方程式 (22) は、左辺第3項の総和のうち  $s \neq r$  である  $N-1$  個の項が、 $r$  次モードと他のモードの相互作用を表す。また、降伏したばね  $i_1 - j_1$  からばね  $i_n - j_n$  は、 $r$  次モードの応答のみにより降伏したものではなく、各モードの応答を重ね合わせた全応答により、各ばねがその降伏変位となり降伏したものである。

[0049] 最初に、モード間の相互作用を陽に含まないモード座標  $\{q\}$  の運動方程式を得るために次式の仮定をする。

[数35]

$$K_{\phi rs}^{(i_1 j_1) \cdots (i_n j_n)} = 0 \quad (r \neq s) \quad (24)$$

この仮定を用いると、式 (22) よりモード座標  $\{q\}$  の運動方程式が次のように得られる。

[数36]

$$\begin{aligned} \ddot{q}_r + 2h_r \omega_r \dot{q}_r + \omega_{rr}^{(i_1 j_1) \cdots (i_n j_n)2} q_r \\ + (\omega_r^2 - \omega_{rr}^{(i_1 j_1)2}) q_r^{y(i_1 j_1)} + \cdots \\ + (\omega_r^2 - \omega_{rr}^{(i_n j_n)2}) q_r^{y(i_n j_n)} = -\beta_r \ddot{x}_E \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、 $\omega_r^2 = K_{\phi r} / M_{\phi r}$ 、

[数37]

$$\omega_{rr}^{(i_1 j_1) \cdots (i_n j_n)2} = K_{\phi rr}^{(i_1 j_1) \cdots (i_n j_n)} / M_{\phi r}$$

である。

[0050] 式(25)を $\beta_r$ で除すと、モード座標 $\{\eta\}$ の運動方程式が次のように得られる。ここで、

[数38]

$$\eta_r^{y(ij)} = q_r^{y(ij)} / \beta_r$$

である。

[数39]

$$\begin{aligned} \ddot{\eta}_r + 2h_r \omega_r \dot{\eta}_r + \omega_{rr}'^{(i_1 j_1) \cdots (i_n j_n)^2} \eta_r \\ + (\omega_r^2 - \omega_{rr}'^{(i_1 j_1)^2}) \eta_r^{y(i_1 j_1)} + \dots \quad (26) \\ + (\omega_r^2 - \omega_{rr}'^{(i_n j_n)^2}) \eta_r^{y(i_n j_n)} = -\ddot{x}_E \end{aligned}$$

[0051] 次に、 $r$ 次モードのみ運動する非線形 $N$ 自由度系を仮想的に考える。この系の応答が弾性領域から塑性領域に入り、ばね $i_1^r - j_1^r$ からばね $i_n^r - j_n^r$ まで順次降伏する運動を考えると、この運動は以下のように記述することができる。

[0052]  $r$ 次モードによる非線形 $N$ 自由度系の変位は $\eta_r \beta_r \{\phi_r\}$ で与えられる。 $\eta_r$ を0から大きくすると、ばね $i_1^r - j_1^r$ の変形が降伏変形

[数40]

$$x_{i_1^r j_1^r}^y$$

となり系に最初の降伏が生じる。次にばね $i_2^r - j_2^r$ の変形が降伏変形

[数41]

$$x_{i_2^r j_2^r}^y$$

となり系の2番目の降伏が生じる。そして、系の降伏が進み $n'$ 番目の降伏がばね $i_{n'}^r - j_{n'}^r$ で生じる。非線形N自由度系の $n'$ 箇所が降伏し塑性領域にある運動方程式は次式となる。

[数42]

$$\begin{aligned} \ddot{\eta}_r + 2h_r \omega_r \dot{\eta}_r + \omega_{rr}'^{(i_1^r j_1^r) \cdots (i_{n'}^r j_{n'}^r)} \eta_r \\ + (\omega_r^2 - \omega_{rr}'^{(i_1^r j_1^r)}) \eta_r^{y(i_1^r j_1^r)} + \cdots \\ + (\omega_r^2 - \omega_{rr}'^{(i_{n'}^r j_{n'}^r)}) \eta_r^{y(i_{n'}^r j_{n'}^r)} = -\ddot{x}_E \end{aligned} \quad (27)$$

[0053] 式(26)と(27)において、 $(i, j)$ と $(i, {}^r j, {}^r)$ は各々系のうち○番目に降伏が生じるばねを表す。 $(i, j)$ は全てのモードの応答の重ね合わせにより降伏が生じるばねを表すのに対し、 $(i, {}^r j, {}^r)$ は $r$ 次モードのみの応答により降伏が生じるばねを表すため、両式は一般に等しくないが、式(26)をモード間の相互作用がない、即ち各モードの運動を独立して規定する式(27)に置き換えることとする。

[0054] 式(27)より、モード座標 $\{\eta\}$ の各モードは、荷重・モード変位関係が多直線骨格曲線であり移動硬化則に従う復元力特性を持つことがわかる。この復元力特性を単純化するため、多直線骨格曲線を図7に示すように弾性剛性が $K_{\phi r}$ で二次剛性が $K''_{\phi r}$ である二直線骨格曲線で近似する。この近似により式(27)から次式が得られる。

[数43]

$$\ddot{\eta}_r + 2h_r \omega_r \dot{\eta}_r + \omega''_r{}^2 \eta_r + (\omega_r^2 - \omega''_r{}^2) \eta_r^{y(i_1^r j_1^r)} = -\ddot{x}_E \quad (28)$$

ここで、

[数44]

$$\omega''_r{}^2 = \frac{K''_{\phi_r}(\eta_r^{\max})}{M_{\phi_r}} \quad (29)$$

[0055]  $\eta_r^{\max} = \max \{ |\eta_r(t)| \}$  は  $r$  次のモード変位  $\eta_r$  の最大値で、 $K''_{\phi_r}$  は  $\eta_r^{\max}$  の関数となる。式 (17) と (28) が  $\eta_r^{\max}$  を与えるため  $\eta_r^{\max}$  は収束計算により得ることができる。時間依存モード塑性率を

[数45]

$$D_r(t) = \eta_r(t) / \eta_r^{y(i_1^r j_1^r)}$$

とすると、式 (17) と (28) を

[数46]

$$\eta_r^{y(i_1^r j_1^r)}$$

で除すと、時間依存モード塑性率  $D_r(t)$  の運動方程式が次の通り得られる。  
。

[数47]

$$\ddot{D}_r + 2h_r \omega_r \dot{D}_r + \omega_r^2 D_r = -\omega_r^2 \ddot{x}_E / a_r^y \quad (|D_r| \leq 1) \quad (30)$$

[数48]

$$\ddot{D}_r + 2h_r \omega_r \dot{D}_r + \omega_r'^2 D_r + (\omega_r^2 - \omega_r'^2) = -\omega_r^2 \ddot{x}_E / a_r^y \quad (D_r > 1) \quad (31)$$

ここで、

[数49]

$$a_r^y = \omega_r^2 \eta_r^{y(i_1^r j_1^r)}$$

はモード降伏加速度である。 $D_r(t)$ と $a_r^y$ は各々 $r$ 次で最初に降伏するばね $i_1^r - j_1^r$ の時間依存モード塑性率とモード降伏加速度であるが、これを単に $r$ 次の時間依存モード塑性率とモード降伏加速度という。

[0056] 3. 4 弾塑性応答スペクトル解析法

式(30)、(31)より、ある外力に対する $r$ 次のモード塑性率 $\mu_r = \max \{ |D_r(t)| \}$ は次式で表される。

[数50]

$$\mu_r = \mu(a_r^y, T_r, h_r, \gamma_r) \quad (32)$$

ここで、

[数51]

$$a_r^y = \omega_r^2 \eta_r^{y(i_1^r j_1^r)} = \frac{\omega_r^2 q_r^{y(i_1^r j_1^r)}}{\beta_r} = \frac{\omega_r^2 x_{i_1^r j_1^r}^y}{\beta_r (\phi_{ri_1^r} - \phi_{rj_1^r})},$$

$$T_r = \frac{1}{\omega_r}, \quad (33)$$

$$\gamma_r = \frac{K''_{\phi_r} (\eta_r^{\max})}{K_{\phi_r}}$$

である。

[0057] 式(30)と(31)は式(5)と(6)と同じ形式である。従って、 $r$ 次のモード塑性率 $\mu_r$ は、モード減衰比 $h_r$ 、モード剛性比 $\gamma_r$ の一定塑性率応答スペクトルを用いて、モード降伏加速度 $a_r^y$ と固有周期 $T_r$ から得ることができる。ばね $i-r$ の $r$ 次の時間依存モード塑性率 $D_{r^{ij}}(t) = \eta_r(t) / \eta_r^{y(ij)}$ 及びモード塑性率 $\mu_{r^{ij}} = \max \{ |D_{r^{ij}}(t)| \}$ は、

[数52]

$$D_r(t) = \eta_r(t) / \eta_r^{y(i_1^r j_1^r)}$$

より次式で表すことができる。

[数53]

$$D_r^{ij}(t) = D_r(t) \frac{\eta_r^{y(i_1^r j_1^r)}}{\eta_r^{y(ij)}}, \quad \mu_r^{ij} = \mu_r \left| \frac{\eta_r^{y(i_1^r j_1^r)}}{\eta_r^{y(ij)}} \right| \quad (34)$$

[0058] ばね $i-j$ の時間依存塑性率 $D_{ij} = x_i - x_j / x_{ij}^y$ は、モード変位の定

義式(21)から、ばね  $i-j$  の  $r$  次の時間依存モード塑性率  $D_r^{ij}$  と次の関係にあることがわかる。

[数54]

$$D_{ij}(t) = \sum_r D_r^{ij}(t) \quad (35)$$

[0059] 従って、モード重ね合わせ則を用いると、ばね  $i-j$  の塑性率  $\mu_{ij} = \max \{ |D_{ij}(t)| \}$  は次の通り得ることができる。

[数55]

$$\text{絶対値和則: } \mu_{ij}^{ABS} = \sum_r |\mu_r^{ij}|, \text{ SRSS 則: } \mu_{ij}^{SRSS} = \sqrt{\sum_r (\mu_r^{ij})^2} \quad (36)$$

[0060] 以上が、発明者らが開発した非線形多自由度系の弾塑性応答スペクトル解析法である。この解析法は、弾性領域の固有振動モードにより非線形多自由度系をモード展開し、塑性領域においてもモード間の相互作用がないとの仮定及びモード重ね合わせ則の仮定を用いて導出したものであり、線形多自由度系の応答スペクトル解析法を、一定塑性率応答スペクトルを用いて非線形多自由度系の応答スペクトル解析法に拡張したものといえる。また、解析に用いる一定塑性率応答スペクトルにあわせて、荷重・モード変位関係は多直線骨格曲線を二直線骨格曲線で近似した。二直線骨格曲線の二次剛性の違いは一定塑性率応答スペクトルにさほど大きな影響を与えないため（非特許文献9）、解析に用いる二直線骨格曲線の解析結果への影響は小さいと考える。

[0061] 弾性応答スペクトル解析法と弾塑性応答スペクトル解析法による多自由度系の最大変形の求め方を図8A及び図8Bを用いて示す。

[0062] まず、弾性応答スペクトル解析法について説明する。図8Aのグラフは、加速度応答スペクトルを示す。このスペクトルより、 $r$  次の最大加速度  $A_r =$

$A(T_r, h_r)$  が得られる。更に、 $r$  次の最大加速度  $A_r$  から  $r$  次のモードでの質点  $i$  の変位  $x_{ij}^r = (A_r \beta_r \phi_{ri}) / \omega_r^2$  が得られる。また、モード重ね合わせ則により、ばね  $i-j$  の最大変形量

[数56]

$$x_{ij}^{\max} = \sum_r \left( \frac{A_r \beta_r (\phi_{ri} - \phi_{rj})}{\omega_r^2} \right)$$

が得られる。

[0063] 次に、弾塑性応答スペクトル解析法について説明する。図8Bのグラフは、一定塑性率応答スペクトルを示す。このスペクトルより、 $r$  次モードの塑性率  $\mu_r = \mu(a_r^y, T_r, h_r, \gamma_r)$  が得られる。更に、この塑性率  $\mu_r$  から、ばね  $i-j$  の  $r$  次モードの塑性率

[数57]

$$\mu_r^{ij} = \mu_r \left| \frac{\eta_r^{y(i_1' j_1')}}{\eta_r^{y(ij)}} \right|$$

が得られる。

[0064] モード重ね合わせ則により、ばね  $i-j$  の塑性率は、

[数58]

$$\mu_{ij} = \sum_r (\mu_r^{ij})$$

となる。

[0065] 塑性率  $\mu_{ij}$  から、ばね  $i-j$  の最大変形量

[数59]

$$x_{ij}^{\max} = \mu_{ij} x_{ij}^y$$

が得られる。

[0066] 仮に系が線形であるなら、

[数60]

$$x_{ij}^{\max} = \mu_{ij} x_{ij}^y = \sum_r \left( \frac{a_r^e \beta_r (\phi_{ri} - \phi_{rj})}{\omega_r^2} \right)$$

となる。ここで、式 (11) より、

[数61]

$$\mu_r = \frac{a^e(T_r, h_r)}{a_r^y} = \frac{a_r^e}{a_r^y}$$

である。

[0067] なお、 $A_r$ は  $r$  次モードでの最大応答加速度、 $a_r^e$ は弾性系に必要とされる  $r$  次モードの降伏加速度、 $a_r^y$ は系の  $r$  次のモード降伏加速度、 $h_r$ は系の  $r$  次のモード減衰比、 $i, j$ は質点の番号 ( $1 \cdots N$ )、 $r$ はモードの次数 ( $1 \cdots N$ )、 $T_r$ は系の  $r$  次の固有周期、 $x_{ij}^r$ は  $r$  次モードにおける質点  $i$  の変位、 $x_{ij}^{\max}$ は、ばね  $i-j$  の最大変形量、 $x_{ij}^y$ はばね  $i-j$  の降伏変形量、

[数62]

$$\sum_r$$

は、モード重ね合わせ則、 $\beta_r$ は、 $r$  次モードの刺激係数、 $\gamma_r$ は  $r$  次モードの剛性率、 $\eta_r^{y(ij)}$ は、ばね  $i-j$  の降伏時における  $r$  次モードの変位、

[数63]

$$\eta_r^{y(i_1^r j_1^r)}$$

は、ばね  $i_1 r - j_1 r$  の降伏時における  $r$  次モードの変位であり、ばね  $i_1 r - j_1 r$  は、 $r$  次モード変位により、系において最初に降伏するばねのことである。また、 $\mu_{ij}$  は、ばね  $i - j$  の塑性率、 $\mu_r$  は  $r$  次のモード塑性率、 $\mu_{r^{ij}}$  はばね  $i - j$  の  $r$  次のモード塑性率、 $\{\phi_r\}$  は系の  $r$  次の固有モード、 $\omega_r$  は系の  $r$  次の固有角振動数である。

[0068] 系が線形である場合、式 (9) より弾性応答スペクトル解析法と弾塑性応答スペクトル解析法から得られた結果は一致する。弾塑性応答スペクトル解析法を用いると、系のモード降伏加速度  $a_y$  が弾性系であるために必要な降伏加速度  $a^e$  を上回る場合、下回る場合のいずれにおいても、非線形一自由度系の時刻歴応答解析により作成した一定塑性率応答スペクトルからモード塑性率  $\mu_r$  が得られ、これより各モードの最大変形を求めることができる。

[0069] < 4. 床応答による非線形系と対応する線形系の塑性率 >

地震による床応答に対して、一自由度の非線形系より対応する線形系の塑性率が大きくなるか判定する条件が確認されている（非特許文献 10）。この一自由度系の判定条件を用い、地震による床応答に対して、多自由度の非線形系より対応する線形系の塑性率が大きくなるか判定する条件を検討する。

[0070] 4. 1 一自由度系の塑性率

地震による床応答により弾塑性応答する、即ち、降伏加速度  $a_y$  が

[数64]

$$a^e(T_n, h) > a_y \quad (37)$$

である非線形一自由度系の塑性率  $\mu$  と対応する線形一自由度系の塑性率

[数65]

$$\bar{\mu}_l$$

を比較する。非線形一自由度系の降伏加速度  $a^y$  及び固有周期  $T_n$  が

[数66]

$$\alpha \leq \varepsilon(a^y) \quad or \quad T_s \leq T_n \quad (38)$$

であるとき、

[数67]

$$\mu \leq \bar{\mu}_l \quad (39)$$

が成り立つ。この関係は、構築物の床応答に対する一定塑性率応答スペクトル（以下、一定塑性率床応答スペクトルという）と構築物の床応答に対する弾性応答スペクトル（以下、弾性床応答スペクトルという）を分析した結果から得られたものである（非特許文献10）。ここで、 $T_s$ は一自由度系を支持する構築物の一次固有周期、 $\varepsilon(a^y)$ は構築物の一次固有周期以下の一自由度系に対して、次式で定義する想定荷重係数である。

[数68]

$$\varepsilon(a^y) \equiv \frac{(1 + (\bar{\mu}_l - 1)\gamma)f^y}{F_0} = \frac{(1 + (\bar{\mu}_l - 1)\gamma)a^y}{A_0} \quad (T_n < T_s) \quad (40)$$

ここで、 $F_0 = \max \{F(t)\}$  は外力最大値、 $A_0$ は構築物床の最大応答加速度である。

[0071] 想定荷重係数  $\varepsilon(a^y)$  は、外力最大値  $F_0$  に対する想定荷重

[数69]

$$(1 + (\bar{\mu}_l - 1)\gamma)f^y$$

の比を表す。想定荷重は、非線形一自由度系に対応する線形一自由度系と同じ塑性率が生じると想定した場合の荷重の大きさを表す。想定荷重係数が1

より大きいということは、応答により系に作用する荷重が外力最大値  $F_0$  から増幅すると想定されることを意味し、その大きさが想定荷重の増幅の程度を表す。対応する線形一自由度系の塑性率

[数70]

$$\overline{\mu}_l$$

は次式で与えられる。

[数71]

$$\overline{\mu}_l = \frac{\overline{a^e(T_n, h)}}{a^y} \quad (41)$$

ここで、

[数72]

$$\overline{a^e(T_n, h)} = \max \left\{ a^e(T_n, h) \sim a^e(T_n(1+\Delta), h) \right\}$$

は、弾性床応答スペクトル  $a^e(T_n, h)$  を拡幅率  $\Delta (>0)$  で周期軸短周期方向に拡幅したスペクトルであり、塑性率

[数73]

$$\overline{\mu}_l$$

は

[数74]

$$\overline{a^e(T_n, h)}$$

に相当する床応答により、対応する線形一自由度系に生じる塑性率である。  
 図4より、塑性率 $\mu$ が1より大きい一定塑性率床応答スペクトルは、弾性床  
 応答スペクトルの応答増幅領域のうち長周期側に比べ短周期側で大きくなる  
 傾向があり（例えば、図4の0.2 s付近）、弾性床応答スペクトル $a^e(T_n, h)$ の周期軸短周期方向への拡幅はこれに対応するためのものである。発  
 明者らは地震観測記録の一定塑性率床応答スペクトルを検討し、想定荷重係  
 数の閾値 $\alpha$ 及び拡幅率 $\Delta$ として各々1.5及び0.1を推奨した（非特許文  
 献10）。

[0072] 式(38)の条件を満たす弾完全塑性型の系( $\gamma=0$ )の領域を図9の一  
 定塑性率床応答スペクトル上に示す。この図で、弾性床応答スペクトルより  
 上の領域は弾性応答領域であり、弾性応答スペクトルより下の領域は弾塑性  
 応答領域である。弾塑性応答領域は、式(38)の条件により領域Ⅰと領域  
 Ⅱに区分される。式(38)の条件を満たす領域Ⅰは、弾性床応答スペク  
 トルの応答増幅領域及び構造物の一次固有周期より長周期領域を示しており  
 、この領域にある系は

[数75]

$$\mu \leq \bar{\mu}_I$$

となる。一方、領域Ⅰとの境界に近い領域を除く領域Ⅱにある系は

[数76]

$$\mu > \bar{\mu}_I$$

となる。また、剛性比 $\gamma$ の系は想定荷重が降伏耐力 $f_y$ の  
[数77]

$$(1 + (\bar{\mu}_l - 1)\gamma)$$

倍となるため、図9の領域Ⅰと領域Ⅱの境界は  
[数78]

$$\alpha A_0 / (1 + (\bar{\mu}_l - 1)\gamma)$$

となる。

[0073] なお、地震による床応答により弾性応答する、即ち、降伏加速度 $a_y$ が  
[数79]

$$a^e(T_n, h) \leq a_y \quad (42)$$

である一自由度系の応答は線形応答であり、その塑性率 $\mu$ は式(10)により与えられるため式(39)を満たす。

[0074] 4. 2 多自由度系の塑性率

一自由度の非線形系と対応する線形系の塑性率の関係を、多自由度の非線形系と対応する線形系のモード塑性率の关系到当てはめる。式(37)から(42)より、モード降伏加速度 $a_{ry}$ 及び固有周期 $T_r$ が次の判定条件  
[数80]

$$a^e(T_r, h_r) \leq a_{ry} \quad \text{or} \quad \alpha \leq \varepsilon(a_{ry}) \quad \text{or} \quad T_s \leq T_r \quad (43)$$

を満足するとき、非線形多自由度系の $r$ 次のモード塑性率 $\mu_r$ は対応する線形多自由度系の $r$ 次のモード塑性率

[数81]

$$\bar{\mu}_{r,l}$$

以下となる。即ち、

[数82]

$$\mu_r \leq \bar{\mu}_{r,l} \quad (44)$$

が成り立つ。ここで、対応する線形多自由度系とは、非線形多自由度系の各非線形ばねを降伏後も剛性が低下しないばね、即ち剛性比 1 のばねとした系であり、そのモード塑性率

[数83]

$$\bar{\mu}_{r,l}$$

は次式で与えられる。

[数84]

$$\bar{\mu}_{r,l} = \frac{\overline{a^e(T_r, h_r)}}{a_r^y} \quad (45)$$

[0075] このとき、非線形多自由度系のばね  $i-j$  の  $r$  次のモード塑性率  $\mu_{r,i,j}$  は、次式に示す通り、対応する線形多自由度系のばね  $i-j$  の  $r$  次のモード塑性率

[数85]

$$\bar{\mu}_{r,l}^{ij}$$

以下となる。

[数86]

$$\mu_r^{ij} = \mu_r \frac{\eta_r^{y(i_1^r j_1^r)}}{\eta_r^{y(ij)}} \leq \bar{\mu}_{r,l} \frac{\eta_r^{y(i_1^r j_1^r)}}{\eta_r^{y(ij)}} = \bar{\mu}_{r,l}^{ij} \quad (46)$$

[0076] 以上より、各モードの固有周期 $T_r$ 及びモード降伏加速度 $a_{r,y}$ が式(43)の判定条件を満たすとき、非線形多自由度系の弾塑性応答スペクトル解析法により得られるばね $i-j$ の塑性率は、次式に示す通り、対応する線形多自由度系の弾性応答スペクトル解析により得られるばね $i-j$ の塑性率以下となる。

[数87]

$$\text{絶対値和則: } \mu_{ij}^{ABS} \leq \bar{\mu}_{ij,l}^{ABS}, \text{ SRSS 則: } \mu_{ij}^{SRSS} \leq \bar{\mu}_{ij,l}^{SRSS} \quad (47)$$

[0077] 従って、弾塑性応答スペクトル解析法がよい精度で解析結果を与える場合、式(43)の判定条件により、多自由度の非線形系より、対応する線形系の塑性率が大きくなるか判定することができる。この判定条件が有効であれば、この判定条件を満たす場合、多自由度系の線形応答解析を多自由度系の非線形応答解析の簡易法として用いることができる。

[0078] <5. 床応答に対する非線形二自由度系の動的応答解析>

機器・配管系の設計に適用する許容塑性率として、重量機器に対し1.2

～2、配管系に対し1.5～3、鋼材の引張りと曲げに対して2.5～10等が提案されている（非特許文献8）。この程度の塑性率を生じる系の動的応答解析に、弾塑性応答スペクトル解析法を適用することを想定し、その有効性を確認するため、床応答に対する非線形二自由度系の塑性率を弾塑性応答スペクトル解析法及び時刻歴応答解析法により計算する。また、対応する線形二自由度系の塑性率を、拡幅率 $\Delta = 0.1$ の弾性床応答スペクトルを用いて弾性応答スペクトル解析法により計算する。

#### [0079] 5. 1 解析モデルと条件

解析する非線形二自由度系は、2個の質点を非線形ばねで、互いに又は床と結合した系とし、非線形ばねは荷重・変形関係が二直線骨格曲線であり移動硬化則に従う復元力特性を持つとする。解析モデルと固有振動モード及びモデル図を図10、11に示す（ $m_1 = m_2 = 1 \text{ kg}$ ， $k_{11} = k_{12} = k$ ， $k_{22} = 2k$ ， $f_{11}^y = f_{12}^y = f_{22}^y = 2 \text{ N}$ ， $\gamma = 0.2$ ， $h = 0.02$ ）。外力は、図3に示す島根原子力発電所2号機原子炉建物（1次固有周期 $T_s$ ：0.21s，2次固有周期：0.13s）で観測した鳥取県西部地震の床応答（NS-2R/Bch24）を係数倍したものとした。床応答（NS-2R/Bch24）の一定塑性率床応答スペクトルに解析モデルの固有周期を追記した図を図12に示す。Model Aは建物の一次モードを超えた領域および建物の一次モードにより床応答の増幅が大きい領域（スペクトルの山領域）に固有周期を持つ系、Model Bは建物の一次及び二次モードにより床応答の増幅が大きい領域（スペクトルの山領域）に固有周期を持つ系、Model Cは建物の振動モードから外れ床応答の増幅が小さい領域（スペクトルの谷領域）に固有周期を持つ系である。これらのモデルで最初に降伏するばねは一次モード、二次モード共に、Spring 2-2である。

#### [0080] 5. 2 解析結果

Model A，B及びCの塑性率の計算結果を図13A～13Cに示す。EP-RSA（棒グラフとバー付き点線）、E-RSA（実線と一点鎖線）及びRHA（バー付き二点鎖線）は、各々、弾塑性応答スペクトル解析、弾

性応答スペクトル解析及び時刻歴応答解析から得られた塑性率を示す。弾塑性応答スペクトル解析から得られた一次と二次のモード塑性率を各々棒グラフの黒と白で示しており、モード重ね合わせ則を絶対値和則とした塑性率は積み重ね棒グラフで、モード重ね合わせ則をSRSS則とした塑性率はバー付き点線で示す。弾性応答スペクトル解析から得られた塑性率は直線であり、モード重ね合わせ則を絶対値和則とした塑性率は実線で、モード重ね合わせ則をSRSS則とした塑性率は一点鎖線で示す。塑性率はモード重ね合わせ則を絶対値和則とした値よりSRSS則とした値が小さい。また、 $E_L$ は系が弾性限界となる外力を示し、 $E_L \times 1.5, 2, 3, 6$ は系が弾性限界となる外力の各々1.5, 2, 3, 6倍の外力を示す。あわせて、Model Aについては2次の想定荷重係数 $\varepsilon_2 = \varepsilon(a_2^y)$ を、Model B, Cについては1次と2次の想定荷重係数のうち値が小さい1次の想定荷重係数 $\varepsilon_1 = \varepsilon(a_1^y)$ を、各ModelのSpring 2-2の図に白丸付き点線で示した。なお、Model Aの1次固有周期は $T_s < T_1$ であり想定荷重係数を定義していない周期帯にある。

[0081] 5. 3 弾塑性応答スペクトル解析法の有効性

Model A, Bは、時刻歴応答解析から得られた各ばねの塑性率が弾性応答スペクトル解析から得られた塑性率より小さく、地震力の増加に対する塑性率の増加が小さい傾向にある。これは、Model A, Bが床応答の増幅が大きい領域に固有周期を持つ系であり、履歴減衰の効果が大きいためであると理解できる。Model Cは、時刻歴応答解析から得られた各ばねの塑性率が弾性応答スペクトル解析から得られた塑性率より大きく、地震力の増加に対する塑性率の増加が大きい傾向にある。これは、Model

Cが床応答の増幅が小さい領域に固有周期を持つ系であり、履歴減衰の効果が小さいためであると理解できる。

[0082] 弾性応答スペクトル解析と弾塑性応答スペクトル解析の結果を比較すると、弾塑性応答スペクトル解析の結果は、いずれのモデルにおいても時刻歴応答解析から得られた各ばねの塑性率に近く (Model CのSpring

1-2を除く)、前述の時刻歴応答解析から得られた地震力の増加に対する各ばねの塑性率の増加の傾向を表している。これは、弾塑性応答スペクトル解析の結果に履歴減衰等の弾塑性応答特性が適切に反映されていること、従って、非線形系の弾塑性応答を弾性領域の固有振動モードにより理解できることを示している。

[0083] 線形多自由度系のモードの重ね合わせでは、絶対値和則は時刻歴応答解析の応答値以上の値を与える。しかし、非線形多自由度系の弾塑性応答スペクトル解析において絶対値和則を用いた各ばねの塑性率は、時刻歴応答解析から得られた塑性率を概ね上回るが、一部に下回るものがある。これは、この解析法の構築に当たり用いたモード間の相互作用がないと仮定した影響と考えられる。時刻歴応答解析に対する弾塑性応答スペクトル解析（モード重ね合わせ則：絶対値和則）の塑性率の比の最低値は、Model Aで0.97（Spring 2-2, EL×1.5）、Model Bで0.84（Spring 2-2, EL×6）、そしてModel Cで0.73（Spring 2-2, EL×3）である。

[0084] 本章で実施した非線形二自由度系の弾塑性応答スペクトル解析（モード重ね合わせ則：絶対値和則、SRSS則）が、以下の解析モデル、解析条件及び解析結果であることを考えると、耐震設計に弾塑性応答スペクトル解析（モード重ね合わせ則：絶対値和則、SRSS則）を用いる場合、塑性率の算出結果は最大3割程度非保守的になることがあると考える。

- (1) 系が弾性限界となる外力の6倍までの外力で加振していること
- (2) Model A, B, Cは各々床応答スペクトルの特徴的な領域に固有周期を持つ系であること
- (3) これらの解析結果にはばね1か所が降伏する応答、ばね2か所が降伏する応答、ばね3か所全てが降伏する応答を含んでいること
- (4) 機器・配管系の耐震設計に適用する上限程度までの塑性率が系に生じていること

[0085] 耐震設計において、応答値である塑性率の3割程度の過小評価は、一定塑

塑性率応答スペクトルの拡幅や許容値に考慮する安全率等により設計上の保守性は十分担保することが可能であり、弾塑性応答スペクトル解析法は耐震設計に用いる機器・配管系の動的応答解析法として有効であると考える。

[0086] また、弾塑性応答スペクトル解析の塑性率が過小となり、比較的精度が悪くなる Model C、外力  $EL \times 2 \sim 6$  の解析ケース (Spring 2-2) は、いずれも 1 次の想定荷重係数  $\varepsilon_1$  が 1.5 以下と他の解析ケースに比べて小さい。また、Model A, B の解析ケース (Spring 2-2,  $EL \times 6$ ) においても、想定荷重係数の低下に伴い、時刻歴応答解析の塑性率に比べ弾塑性応答スペクトル解析の塑性率が過小となる傾向がある。想定荷重係数が小さい、即ち構造物の一次固有周期以下のモードに作用する荷重の増幅が小さい場合、モード間の相互作用がないと仮定した影響により、弾塑性応答スペクトル解析法の精度が非保守側に悪くなる。

[0087] 5. 4 簡易法としての線形応答解析の有効性

多自由度の非線形系より対応する線形系の塑性率が大きくなるか、判定する条件の有効性を解析結果から確認する。解析モデルと外力毎に（系が弾性限界である  $EL \times 1$  は除く）、判定条件式 (43) への適合性を確認した結果を表 1 に示す。ここで  $\alpha = 1.5$  とした。Model A, B の全ての外力の解析ケース及び Model C の  $EL \times 1.5$  の外力の解析ケースが判定条件式 (43) を満たす。図 13 A ~ 13 C より、これら判定条件を満たす全ての解析ケースで、弾塑性応答スペクトル解析より弾性応答スペクトル解析が大きな塑性率を与える（同じモード重ね合わせ則で比較）こと、さらに、時刻歴応答解析より弾性応答スペクトル解析が大きな塑性率を与えることがわかる。なお、Model A,  $EL \times 1.5, 2$ , Model C,  $EL \times 1.5$  の弾塑性応答スペクトル解析においてモード重ね合わせ則が SRS 則の塑性率は、時刻歴応答解析の塑性率より少し小さいが、これは SRS 則の精度の影響と考える。

[0088]

[表1]

| モデル     | 外力        | 1st mode                      | 2nd mode                     | Total       |
|---------|-----------|-------------------------------|------------------------------|-------------|
| Model A | EL×1.5, 2 | 領域I( $T_s < T_r$ )            | 弾性領域( $a^* < a_2^*$ )        | Satisfy     |
|         | EL×3, 6   |                               | 領域I( $1.5 < \varepsilon_2$ ) | Satisfy     |
| Model B | EL×1.5-6  | 領域I( $1.5 < \varepsilon_1$ )  | 弾性領域( $a^* < a_2^*$ )        | Satisfy     |
| Model C | EL×1.5    | 領域I( $\varepsilon_1 = 1.5$ )  | 弾性領域( $a^* < a_2^*$ )        | Satisfy     |
|         | EL×2-6    | 領域II( $\varepsilon_1 < 1.5$ ) | 弾性領域( $a^* < a_2^*$ )        | Not Satisfy |

## [0089] &lt; 6 本実施形態の効果 &gt;

発明者らは、非線形多自由度系の動的応答解析法として弾塑性応答スペクトル解析法を開発した。この解析法は、線形多自由度系の動的応答解析法である弾性応答スペクトル解析法を、一定塑性率応答スペクトルを用いて非線形多自由度系の動的応答解析法に拡張したものであり、新たに定義した時間依存モード塑性率に対する非線形一自由度系の運動方程式を基礎とするものである。荷重・変形関係が二直線骨格曲線である非線形二自由度系について、弾塑性応答スペクトル解析法と時刻歴応答解析法により動的応答解析を行った結果は、一定の精度で合致した。弾塑性応答スペクトル解析法は、弾塑性応答する多自由度系の動的応答解析法として、また、このような系の応答を弾性領域のモード概念により理解する上で有効であると考えられる。

[0090] さらに発明者らは、多自由度の非線形系に比べ、対応する線形系の塑性率が大きくなるか判定することのできる判定条件を提案した。この判定条件を満たす場合、多自由度系の線形応答解析を多自由度系の非線形応答解析の簡易法として用いることができる。

[0091] とりわけ、機器・配管系は、耐震設計において降伏後も剛性が低下しない仮想的な系、即ち、線形系として扱いその応答を線形応答解析により求めることが一般的であるが、系に生じる履歴減衰を考慮できないため、過度に保守的な耐震設計となることが多い。本手法による耐震設計が可能となれば、系に生じる履歴減衰を考慮した合理的な耐震設計が可能となる。また、本解析法は地震応答解析だけでなく、非線形多自由度系の動的応答解析全般に適用可能な解析法である。

[0092] 以上、本発明の好適な実施形態について説明したが、本発明は、上述した

実施形態に限定されることなく、種々の形態で実施することができる。

## 請求の範囲

[請求項1] 塑性領域におけるモード間の相互作用を無視し、モードの重ね合わせにモード重ね合わせ則を仮定した上で、弾性領域の固有振動モードにより非線形多自由度系をモード展開して、非線形一自由度系の時刻歴応答解析により作製した一定塑性率応答スペクトルから得たモード塑性率を用いることにより、各モードの最大変形を把握する、非線形多自由度系の動的応答解析法。

[請求項2] 更に、多自由度の非線形系に比べ、対応する線形系の塑性率が大きくなるか判定し、非線形応答解析の簡易法として、線形応答解析を用いる、請求項1に記載の動的応答解析法。

[請求項3] 非線形多自由度系において、ばね  $i_1^r - i_1^r$  から、ばね  $i_n^r - j_n^r$  まで順次降伏する際、 $r$  次の各振動数を  $\omega_r$ 、 $r$  次のモード変位を

[数1]

$$q_r^{y(i_1^r j_1^r)}$$

、刺激係数を  $\beta_r$  としたとき、

[数2]

$$a_r^y = \omega_r^2 \frac{q_r^{y(i_1^r j_1^r)}}{\beta_r}$$

によって算出される  $r$  次のモード降伏加速度が、 $r$  次の固有周期を  $T_r$ 、減衰比を  $h_r$  としたときの弾性応答スペクトル  $a^e(T_r, h_r)$  以上であることを実施条件とする、請求項1又は2に記載の動的応答解析法。

[請求項4] 線形一自由度系の塑性率を、

[数3]

$$\bar{\mu}_l$$

、剛性比を  $\gamma_r$ 、構築物床の最大応答加速度を  $A_0$  としたとき、構築物の一次固有周期以下の一自由度系に対して、

[数4]

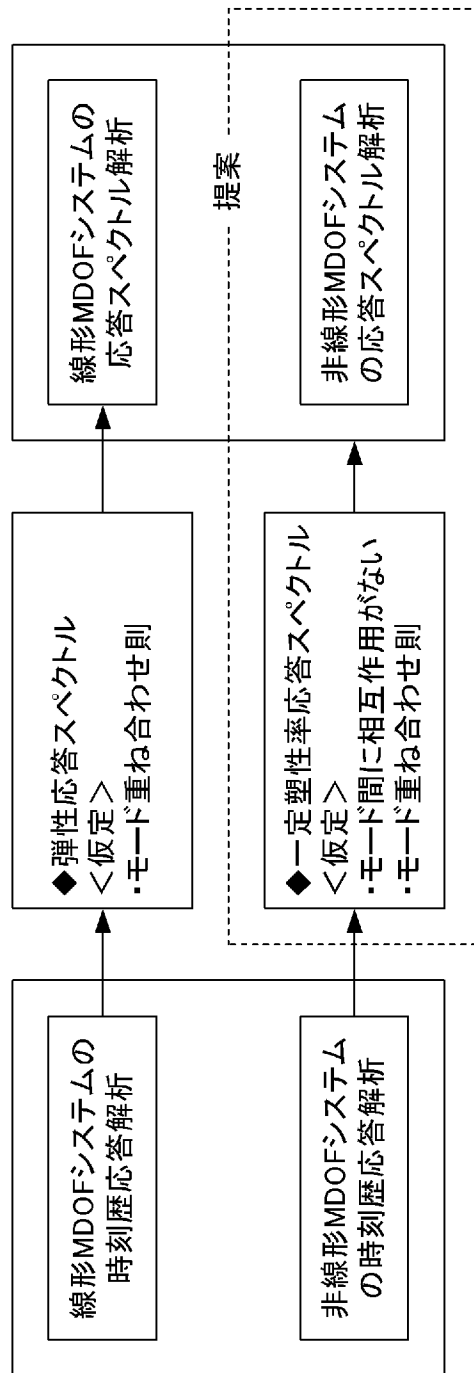
$$\varepsilon(a_r^y) = \frac{(1 + (\bar{\mu}_l - 1)\gamma_r)a_r^y}{A_0}$$

によって定義される想定荷重係数  $\varepsilon(a_r^y)$  が、閾値  $\alpha$  以上であることを実施条件とする、請求項 1 又は 2 に記載の動的応答解析法。

[請求項5]

系を支持する構築物の一次固有周期を  $T_s$ 、非線形多自由度系の  $r$  次の固有周期を  $T_r$  としたとき、 $T_s \leq T_r$  であることを実施条件とする、請求項 1 又は 2 に記載の動的応答解析法。

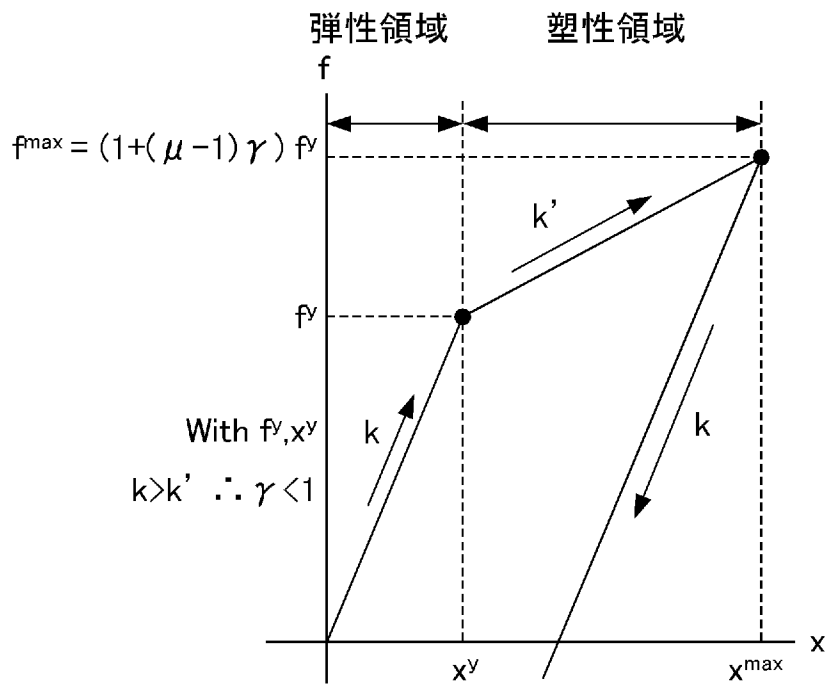
[図1]



今回提案する応答スペクトル解析とMDOFシステムの時刻歴応答解析との関係

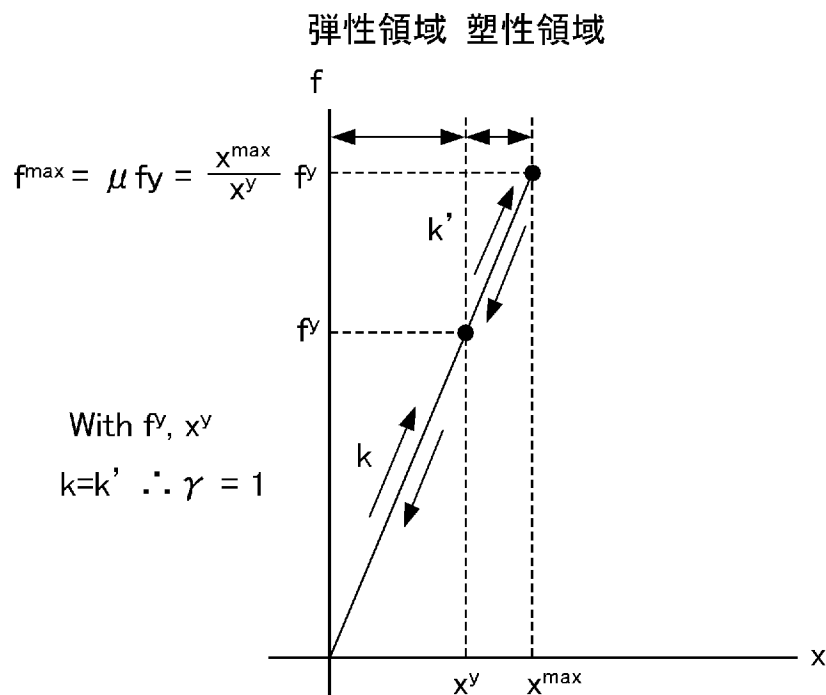
[図2A]

## 非線形一自由度系

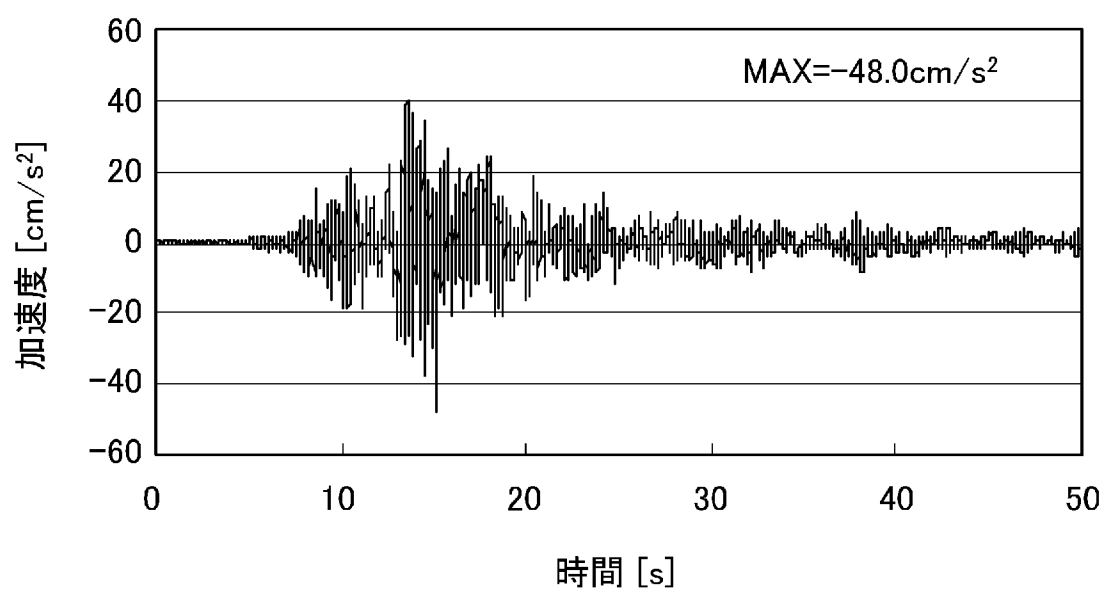


[図2B]

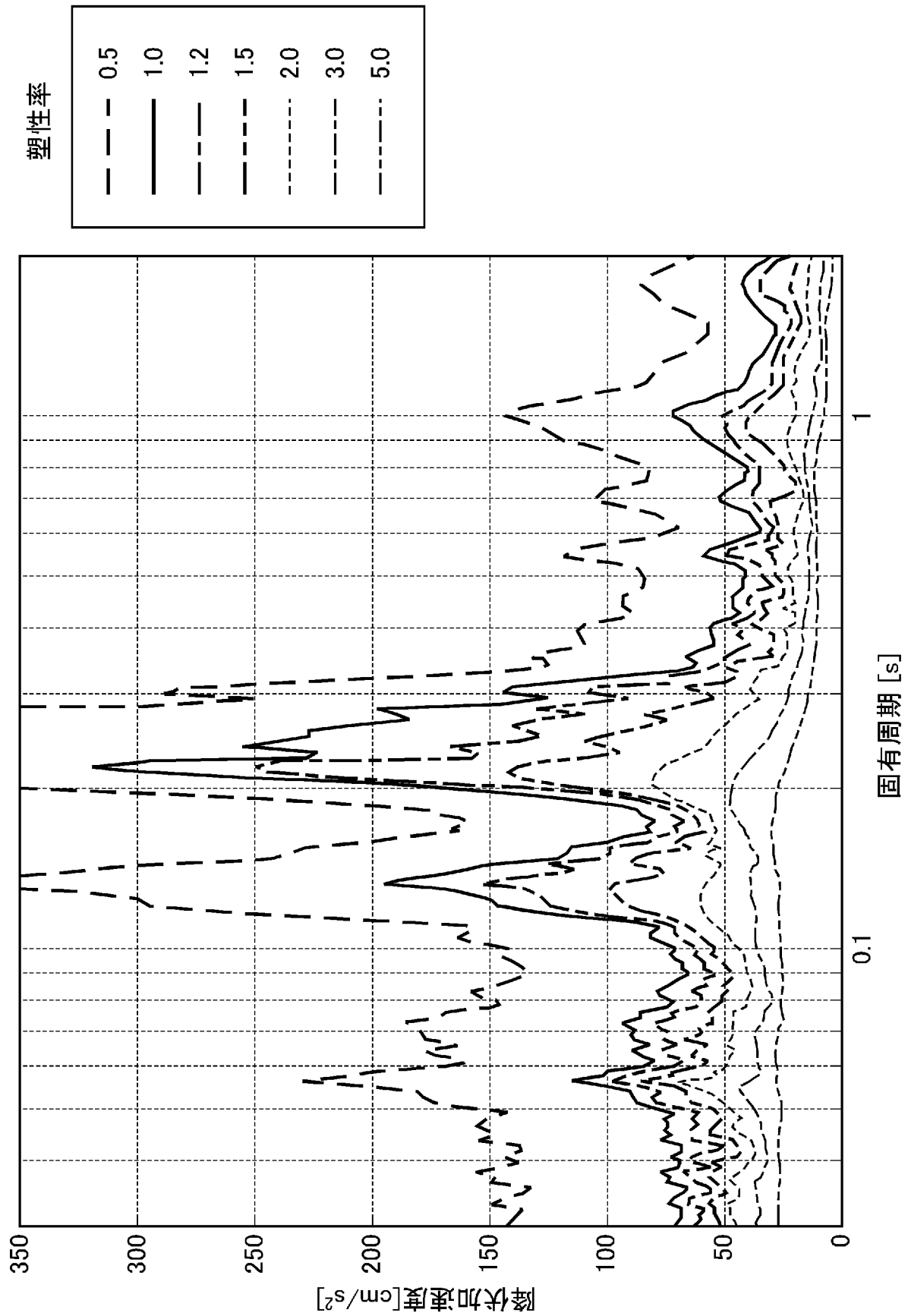
## 対応する線形一自由度系



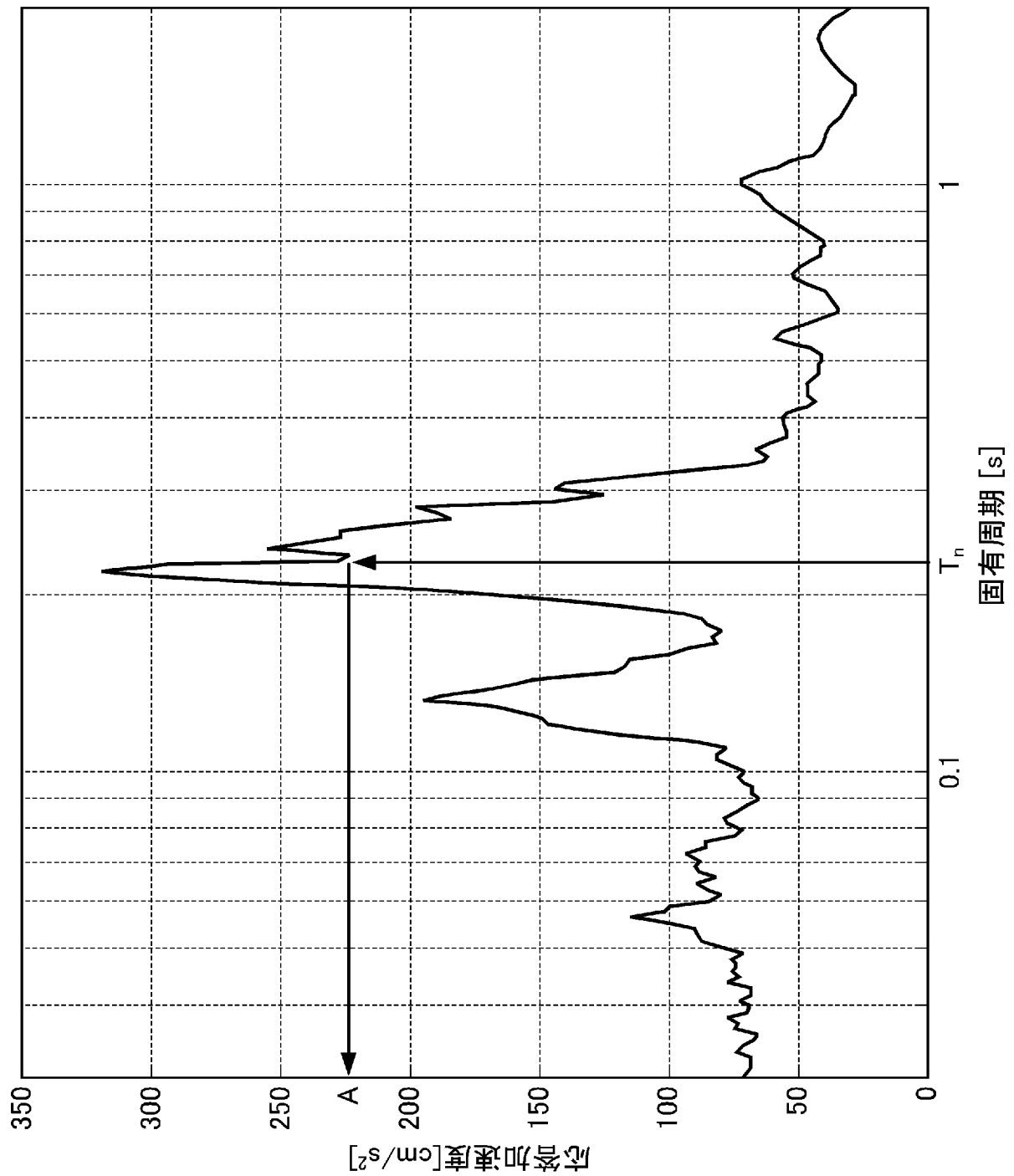
[図3]



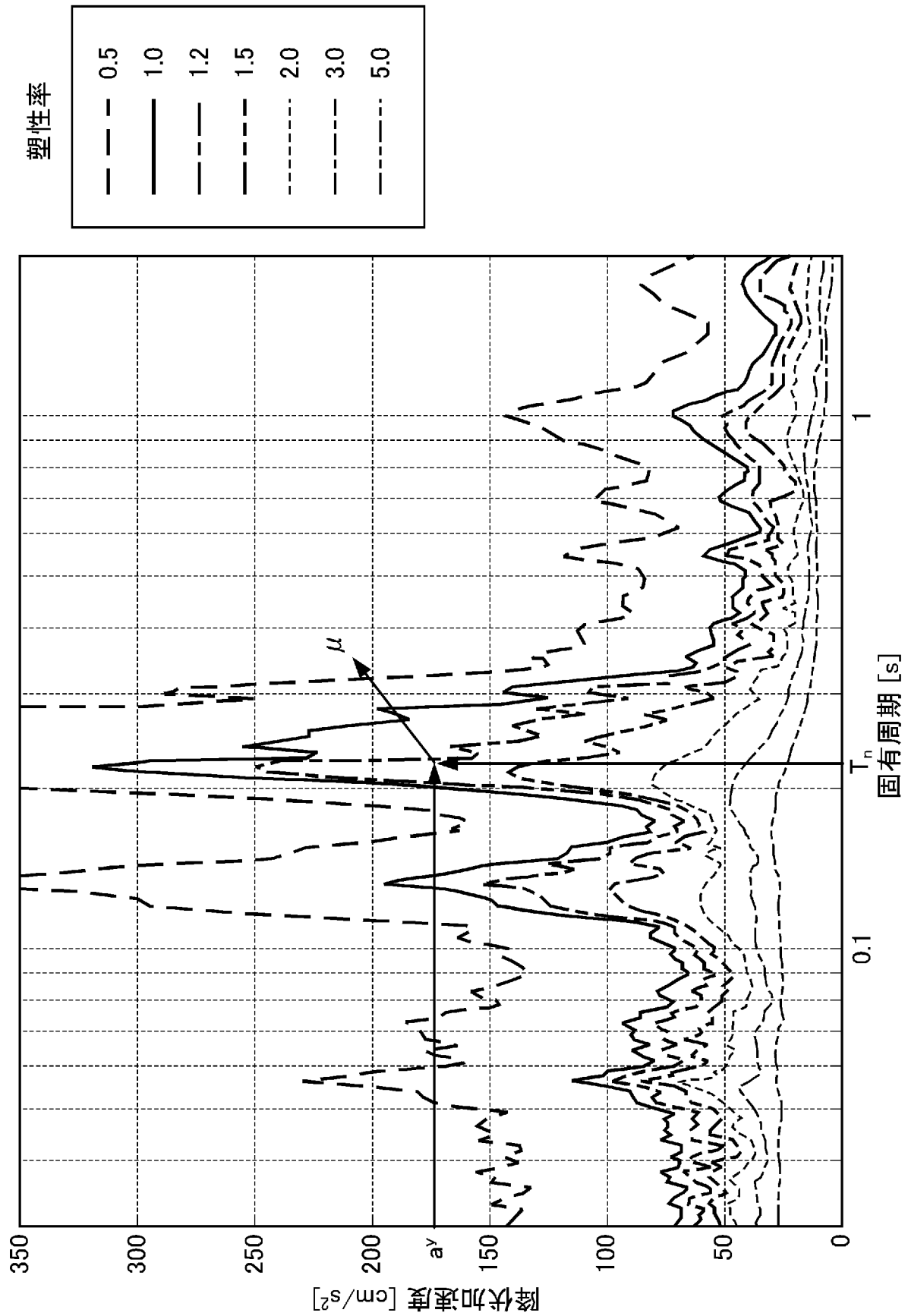
[図4]



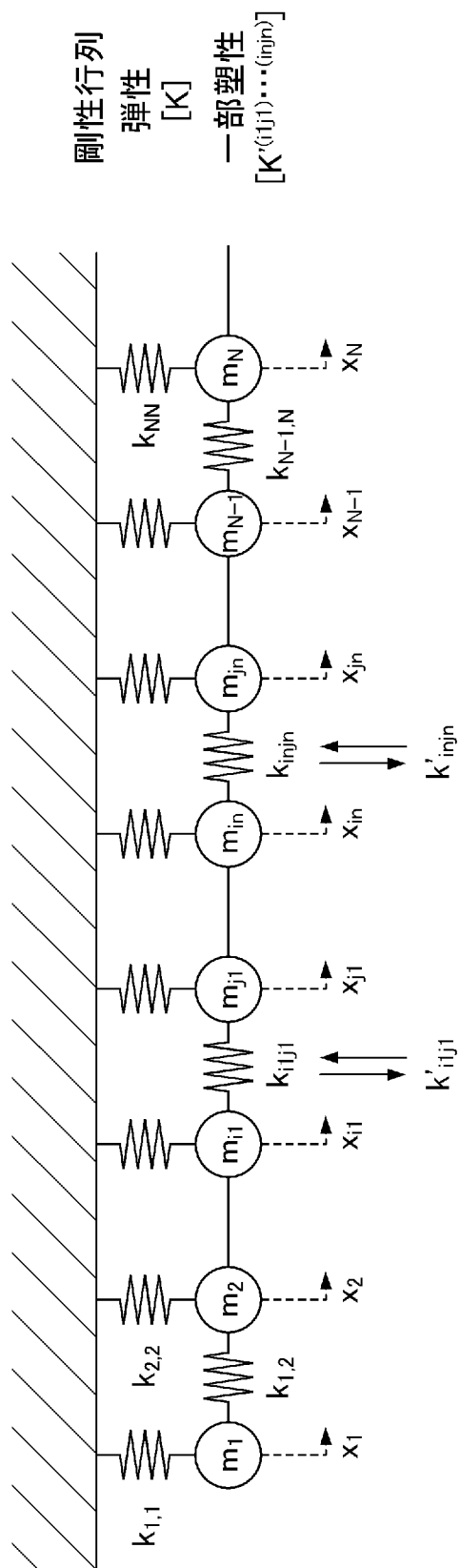
[図5A]



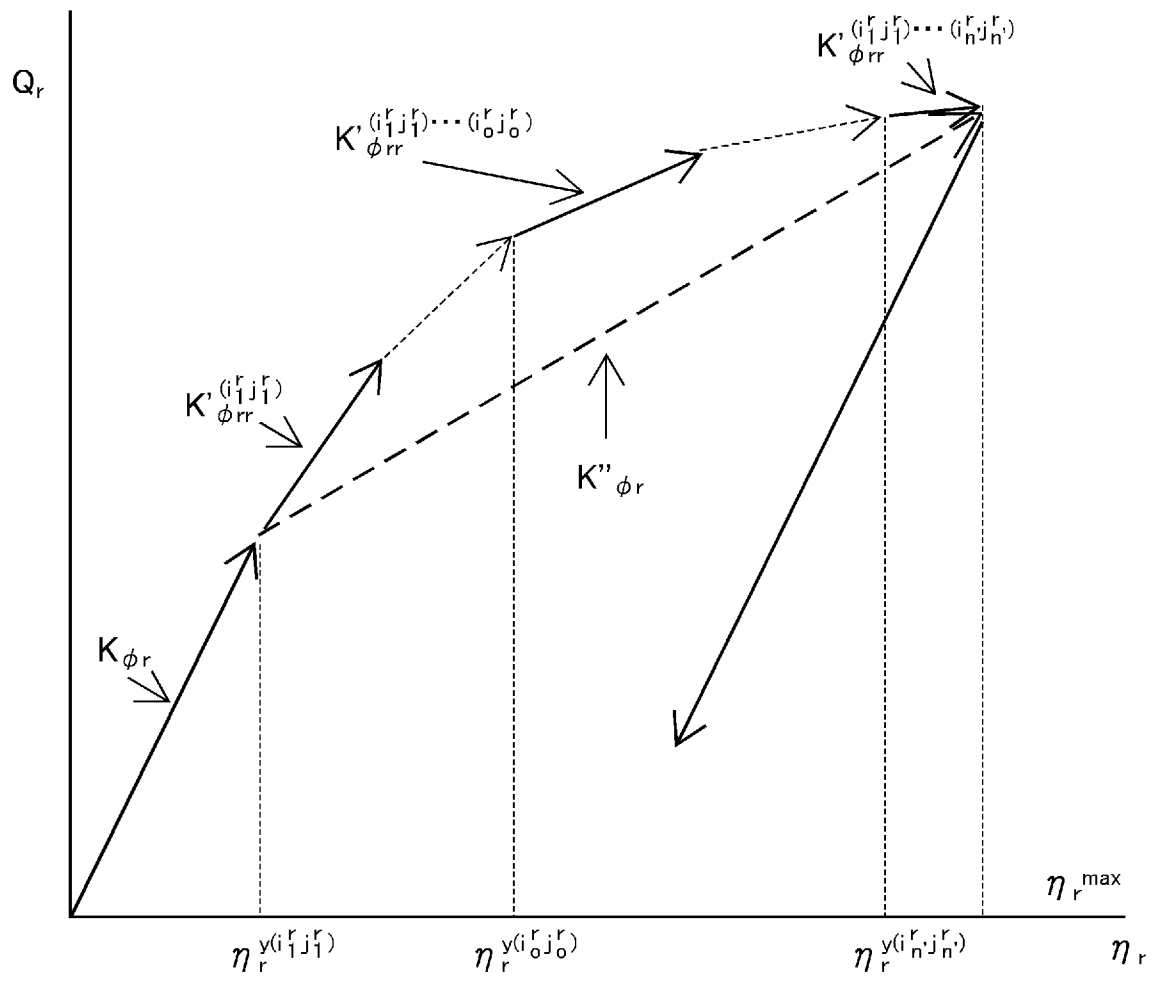
[図5B]



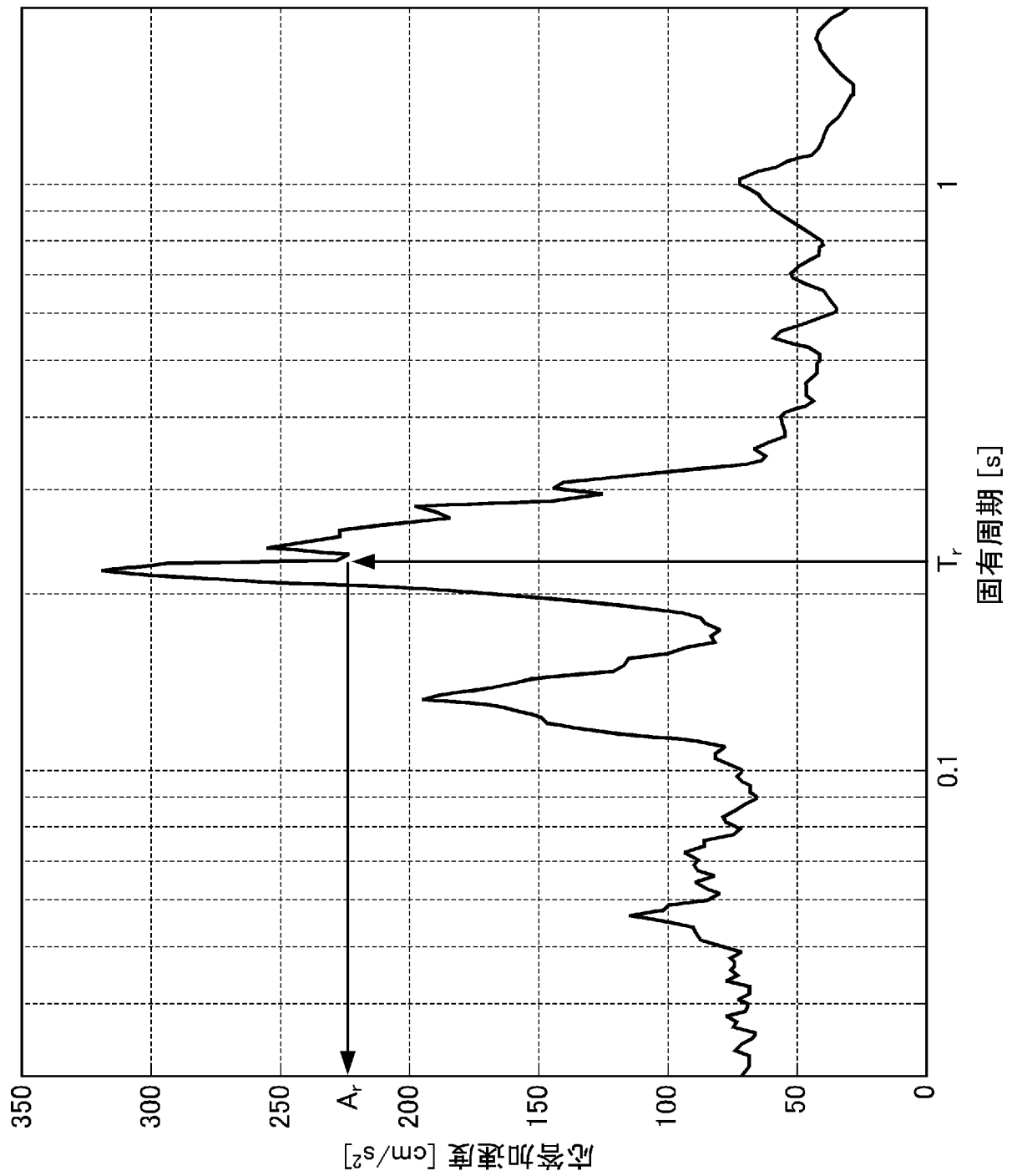
[図6]



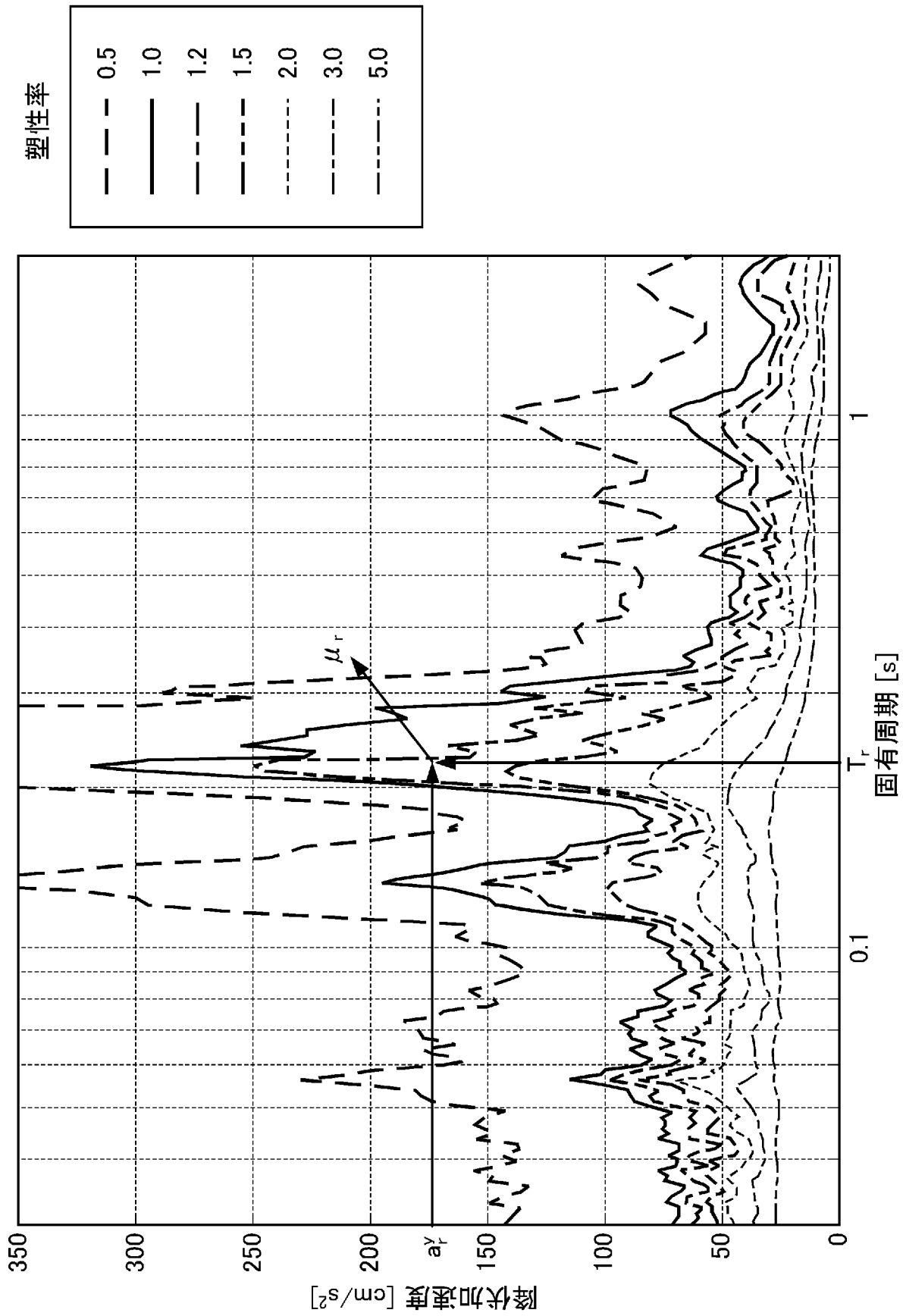
[図7]



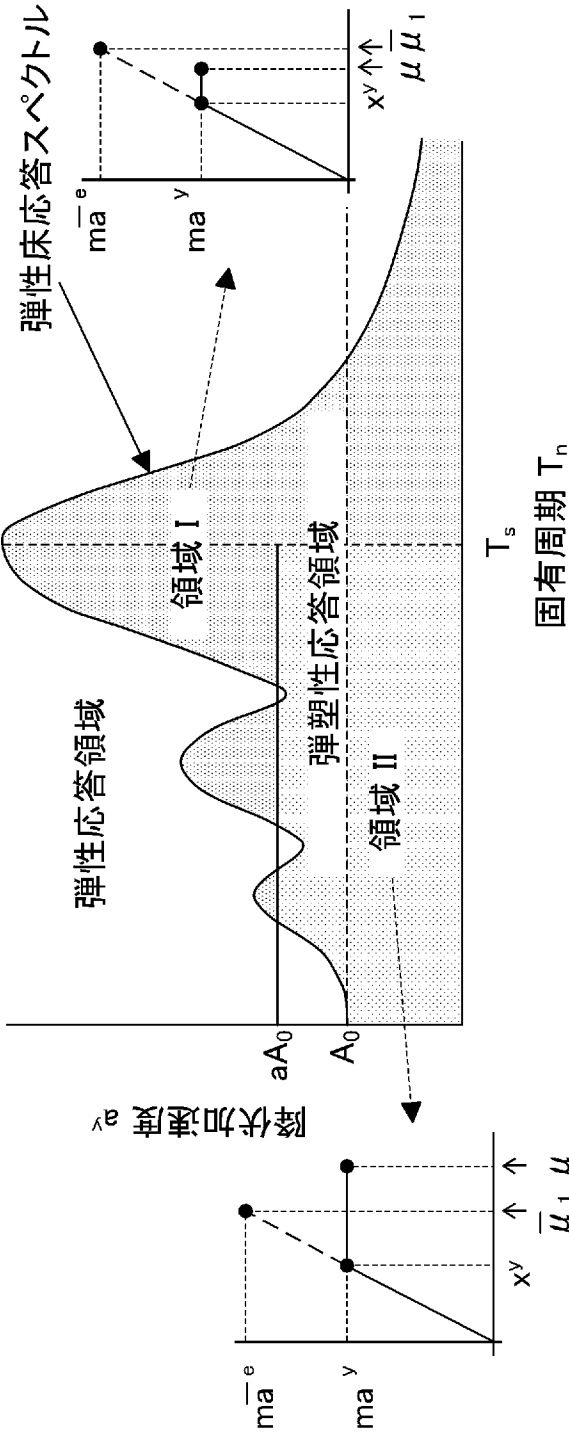
[図8A]



[図8B]

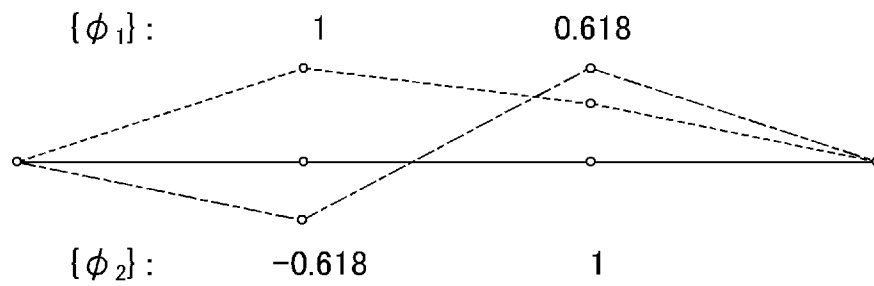


[図9]

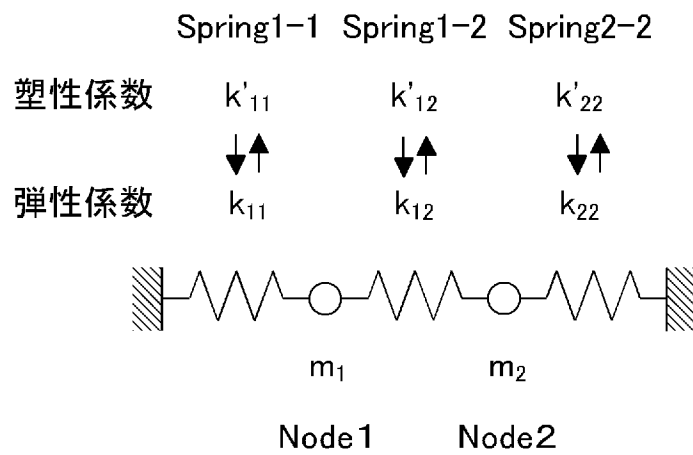


[図10]

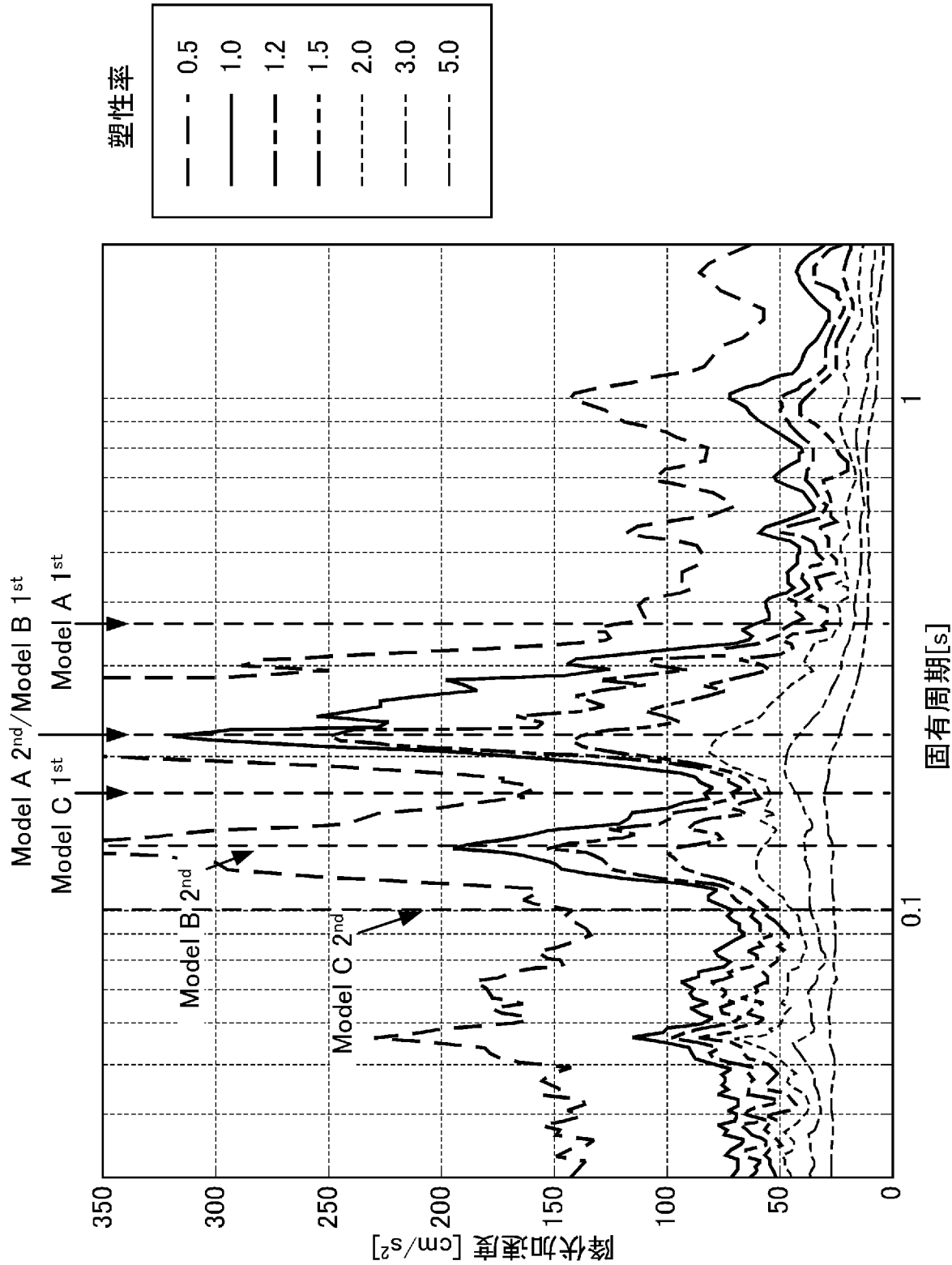
| Models | Model A            | Model B           | Model C           |
|--------|--------------------|-------------------|-------------------|
| k      | 230N/m             | 600N/m            | 1000N/m           |
| $T_1$  | 0.35s<br>Over Peak | 0.22s<br>1st Peak | 0.17s<br>Not Peak |
| $T_2$  | 0.22s<br>1st Peak  | 0.13s<br>2nc Peak | 0.10s<br>Not Peak |



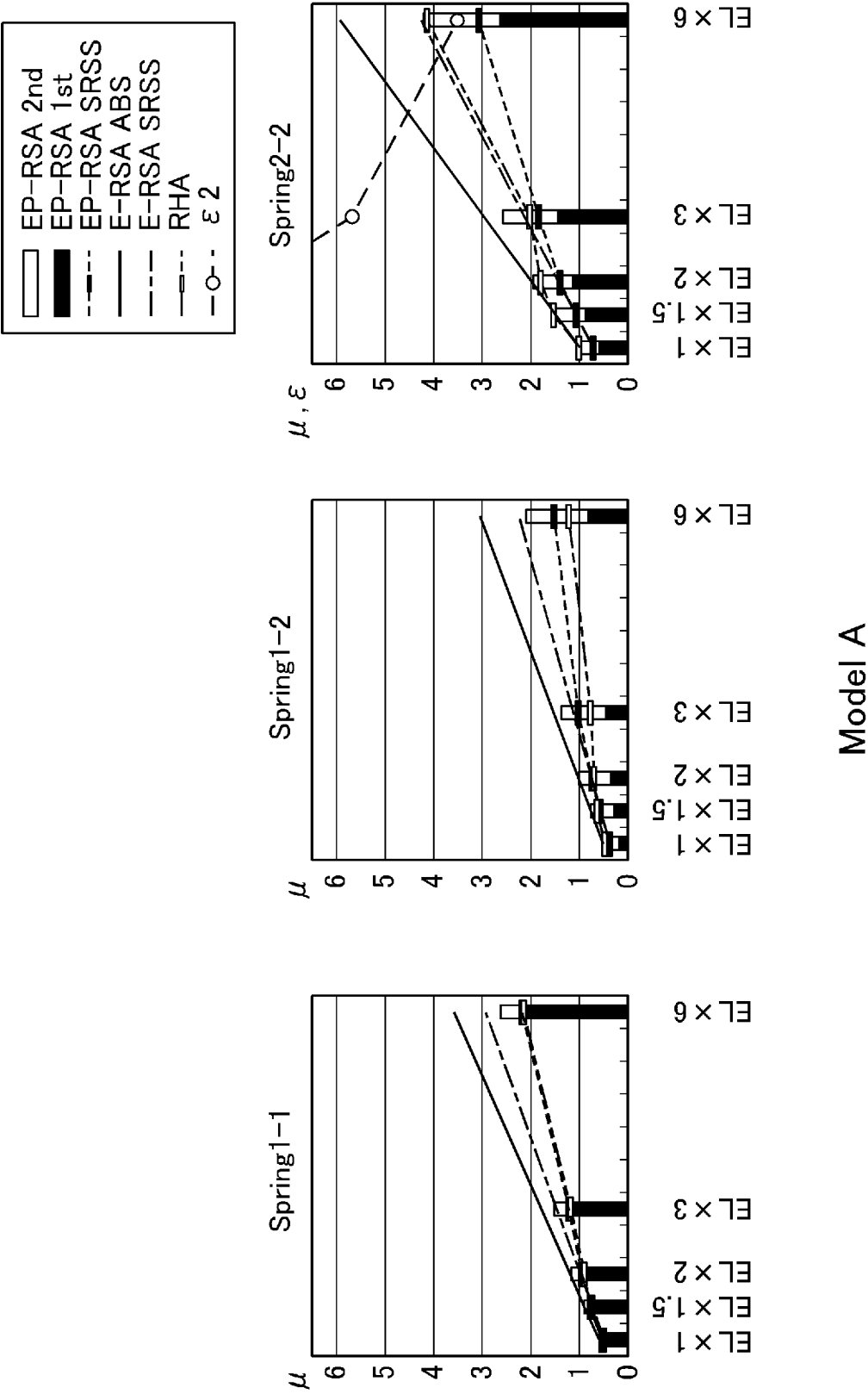
[図11]



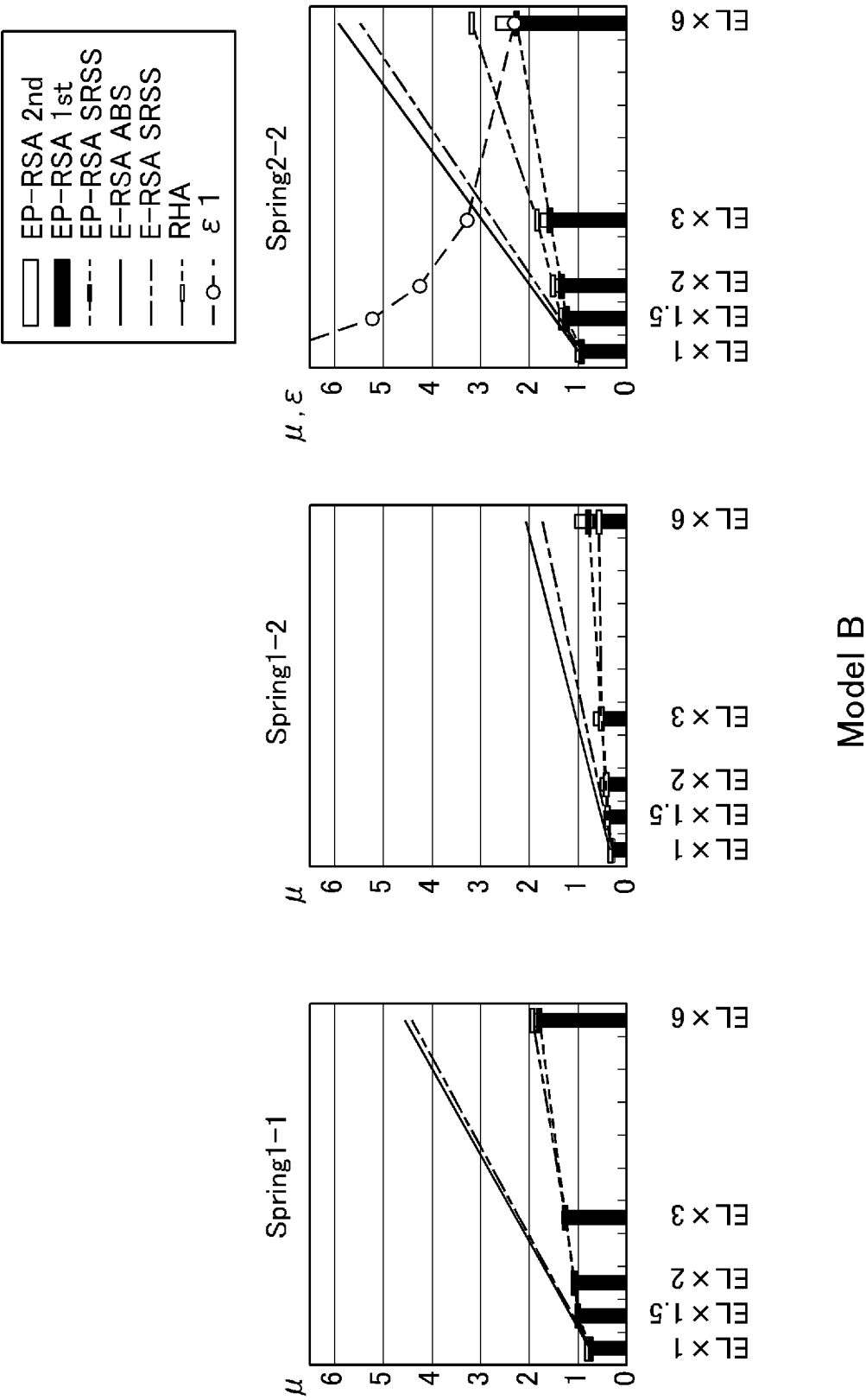
[図12]



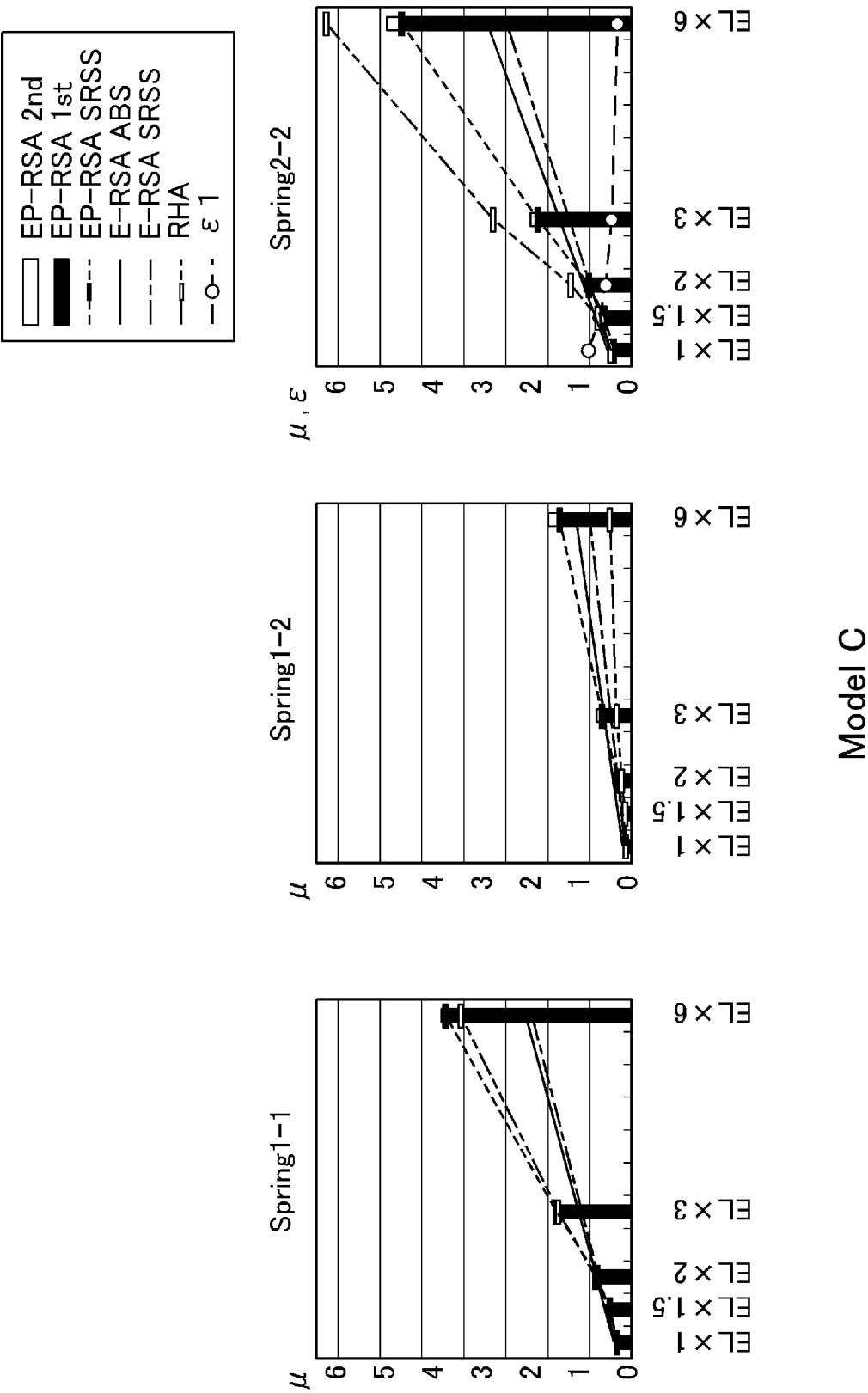
[図13A]



[図13B]



[図13C]



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/015794

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F17/50(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F17/50, G01H1/00-17/00, G06Q50/04-50/08

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

|                           |           |                            |           |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Jitsuyo Shinan Koho       | 1922-1996 | Jitsuyo Shinan Toroku Koho | 1996-2017 |
| Kokai Jitsuyo Shinan Koho | 1971-2017 | Toroku Jitsuyo Shinan Koho | 1994-2017 |

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

Google Scholar

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Relevant to claim No. |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | Ichiro TAMURA et al., "Evaluation methods of elastoplastic response of components to earthquake motions", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers [online], 25 March 2016 (25.03.2016), vol.82, no.835, [retrieval date 14 July 2017 (14.07.2017)], Internet: <URL:https://www.jstage.jst.go.jp/article/transjsme/82/835/82_15-00467/_article/-char/ja/>, <DOI:10.1299/transjsme.15-00467> | 1-5                   |
| A         | JP 2001-290848 A (Hitachi, Ltd.), 19 October 2001 (19.10.2001), paragraphs [0001] to [0004] (Family: none)                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 1-5                   |

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance  
 "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date  
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)  
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means  
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention  
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone  
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art  
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
18 July 2017 (18.07.17)

Date of mailing of the international search report  
25 July 2017 (25.07.17)

Name and mailing address of the ISA/  
Japan Patent Office  
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,  
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2017/015794

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                       | Relevant to claim No. |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | JP 2015-222232 A (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.),<br>10 December 2015 (10.12.2015),<br>paragraphs [0001] to [0045]<br>(Family: none) | 1-5                   |

## A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G06F17/50(2006.01)i

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. G06F17/50, G01H1/00-17/00, G06Q50/04-50/08

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

|             |            |
|-------------|------------|
| 日本国実用新案公報   | 1922-1996年 |
| 日本国公開実用新案公報 | 1971-2017年 |
| 日本国実用新案登録公報 | 1996-2017年 |
| 日本国登録実用新案公報 | 1994-2017年 |

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

Google Scholar

## C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の<br>カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示                                                                                                                                                                                                                           | 関連する<br>請求項の番号 |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| A               | 田村伊知郎 外1名,<br>地震力に対する機器・配管系の弾塑性応答評価法,<br>日本機械学会論文集 [online], 2016.03.25, Vol. 82, No. 835,<br>[検索日 2017.07.14], インターネット:<br><URL:https://www.jstage.jst.go.jp/article/transjsme/82/835/82_15-00467/_article/-char/ja/>,<br><DOI:10.1299/transjsme.15-00467> | 1-5            |

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）  
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

18.07.2017

国際調査報告の発送日

25.07.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

松浦 功

5M

9181

電話番号 03-3581-1101 内線 3599

| C (続き) . 関連すると認められる文献 |                                                                            |                |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 引用文献の<br>カテゴリー*       | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示                                          | 関連する<br>請求項の番号 |
| A                     | JP 2001-290848 A (株式会社日立製作所) 2001. 10. 19,<br>[0001] - [0004]<br>(ファミリーなし) | 1-5            |
| A                     | JP 2015-222232 A (三菱重工業株式会社) 2015. 12. 10,<br>[0001] - [0045]<br>(ファミリーなし) | 1-5            |