柔軟はりにおける波動フィルタリング法に関する研究* (ポイントセンサ群による波動フィルタの設計)

岩 本 宏 之^{*1}, 田 中 信 雄^{*2}

Wave Filtering Method for a Flexible Beam (Design of a Wave Filter Using Point Sensors)

Hiroyuki IWAMOTO and Nobuo TANAKA^{*3}

^{*3} Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo Metropolitan Institute of Technology,
6-6 Asahigaoka, Hino-shi, Tokyo, 191-0065 Japan

This paper deals with a wave filtering method for a flexible beam using point sensors for the purpose of implementing an active wave control system. It is the purposes of this paper to present the novel wave filter which can be located at any position of the beam. Firstly, the design procedure of the wave filter using two or four point sensors is presented. When introducing four point sensors, the wave filter may be placed at an arbitrary location of the beam, while an approach with two point sensors has limitation of the sensor placement. Next, from a viewpoint of numerical analysis, the effect of near-fields on the wave filter accuracy is investigated. It is found that the newly proposed wave filter may extract the designated wave no matter how strong the near-field effect is. Finally, experiment of the wave filter is carried out, the accuracy as well as robustness of the wave filter being demonstrated.

Key Words: Vibration, Flexural Wave, Flexible Beam, Active Wave Control, Wave Filter, Point Sensors

1. 緒言

受動・能動にかかわらず振動制御法の主流はモード制御法にその基礎を置いている。しかしながら、モード制御法^{(1)~(3)}は制御対象がバネ・マス系のように集中定数系の形態をとる場合は有効であるものの、柔軟はりや薄肉平板のように分布定数系の形態をとると、そこに存在する振動モード数は理論的には無限大となることから、その適用には限界がある。このことから、モード制御法にかわる新しい制御法が待望されてきた。この事情を背景に、分布定数系の運動方程式を低次元化することなくそのまま取り扱うことが出来る波動制御法^{(4)~(12)}が最近注目されている。当該手法は、従来のモード制御法が既に励起された振動モードを抑制するという立場をとるのに対し、振動モードの生成メカニズムに踏み込むことにより、構造物が固有に持つ振動モードを不活性化させるという考え方に立つので、非常に数多くの振動モードを僅少のセンサとアクチュエータで抑制し得る可能性を有している。代表的な例としては、田中らによって提案されたアクティブ・シ

ンク法^{(6)~(12)}が挙げられる。アクティブ・シンク法は、モード励振の元凶となる反射波を除去する手法であり、アクティブ・シンク系が実現すれば、理論的には全ての振動モードは励起されることなく、睡眠状態のままになっていることになる。

ところで、適応制御の観点から分布定数系構造物の波動制御問題を考える場合、波動解析の立場から振動現象を解析することが非常に重要となる。従来の振動計測においては、波動の重畳である振動変位に基づいた情報しか得られない。しかし、仮に純粋な進行波、反射波およびニア・フィールドの振幅を、ダイレクトにかつリアルタイムにセンシング（フィルタリング）できるならば、適応波動制御系が構築可能となる。波動フィルタリングを志向した報告は、これまでにいくつか発表されているが、そのほとんどが振動インテンシティ計測を基調とするものである。そこからさらに一歩踏み込んで制御用センサとしての波動フィルタの設計、さらには、制御系の構築を論じた報告は、Gibbsら^{(13) (14)}によるものが唯一である。彼らは柔軟はりを対象として、2組の矩形PVDFフィルムによる波動フィルタを提案しているが、当該手法はニア・フィールドを考慮していないため、センサの設置位置はファー・フィールドのみという制限を持つ。そこで、本論文は

* 原稿受付 2002 年 3 月 15 日。

^{*1} 正員, 東京都立科学技術大学大学院工学研究科(〒191-0065 日野市旭が丘 6-6)。

^{*2} 正員, 東京都立科学技術大学工学部。
E-mail: ntanaka@cc.tmit.ac.jp

センサの設置位置に制限されない振動制御用波動フィルタリング法を提案する。まず、オイラー・ベルヌーイはりを対象に進行波解を求めることから始め、次いで、ポイントセンサ群による波動フィルタの設計法を提案する。さらに、数値解析によりニア・フィールドのフィルタリング精度に対する影響を考察するとともに、波動フィルタの可検出条件を明らかにする。最後に、両端固定はりを対象に本論文で提案した波動フィルタを用いた波動分離の実験を行い、その有為性を実証する。

2. ポイントセンサ群による波動フィルタ

本章では適応波動制御系構築の際に必要な波動フィルタの提案を行う。なお、著者らが提案する、センサの設置位置に制限のない波動フィルタをTYPE1, Gibbsらが提案した波動フィルタをTYPE2と呼ぶこととする。

2・1 波動フィルタTYPE1 通常の振動現象においては、進行波等の波動成分はほとんど観測されないことから、はりの運動方程式の解は定在波解によって表されるのが一般的である⁽¹⁵⁾。しかし、本論文においては波動の観点から振動現象について考察する都合上、はりの進行波解を導出することから始める必要がある。任意の境界条件を有する柔軟はりに、分布力 $f(x,t)$ が作用する場合、オイラー・ベルヌーイはりの運動方程式は次のように記述される。

$$EI \frac{\partial^4 \xi(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 \xi(x,t)}{\partial t^2} = f(x,t) \quad (1)$$

ここで、運動方程式(1)を解くために、その斉次方程式を考え、その解を $\xi(x,t) = \xi(x)e^{j\omega t}$ と置き、式(1)に代入すると次のようになる。

$$\frac{d^4 \xi(x)}{dx^4} - k^4 \xi(x) = 0 \quad (2)$$

ただし、

$$k^4 = \rho A \omega^2 / EI \quad (3)$$

ここで、 $E, I, \xi, x, t, \rho, A, \omega, j$ は、各々縦弾性係数、断面二次モーメント、曲げ振動の変位、はりの左端からの距離、時間、密度、断面積、角振動数、虚数単位を表す。すると、式(2)の一般解は次のように求まる。

$$\xi(x) = C_1 e^{-jkx} + C_2 e^{-kx} + C_3 e^{jkx} + C_4 e^{kx} \quad (4)$$

ただし、 C_1, C_2, C_3, C_4 はそれぞれ進行波振幅、はりの左端におけるニア・フィールドの振幅、後退波振幅、はりの右端におけるニア・フィールドの振幅を表す。

次に、波動フィルタTYPE1の構成式を導出する。ま

ず、図1に示すように、はりに4個の変位センサを等間隔に設置する。また、各センサの座標を左側から x_1, x_2, x_3, x_4 とする。すると、この時の各センサの出力は次のように表される。

$$-\xi(x_1) = C_1 e^{-jkx_1} + C_2 e^{-kx_1} + C_3 e^{jkx_1} + C_4 e^{kx_1} \quad (5)$$

$$-\xi(x_2) = C_1 e^{-jk(x_1+L_s)} + C_2 e^{-k(x_1+L_s)} + C_3 e^{jk(x_1+L_s)} + C_4 e^{k(x_1+L_s)} \quad (6)$$

$$-\xi(x_3) = C_1 e^{-jk(x_1+2L_s)} + C_2 e^{-k(x_1+2L_s)} + C_3 e^{jk(x_1+2L_s)} + C_4 e^{k(x_1+2L_s)} \quad (7)$$

$$-\xi(x_4) = C_1 e^{-jk(x_1+3L_s)} + C_2 e^{-k(x_1+3L_s)} + C_3 e^{jk(x_1+3L_s)} + C_4 e^{k(x_1+3L_s)} \quad (8)$$

ただし、 L_s はセンサ間隔である。上式群をマトリックス形式にまとめると次のようになる。

$$\xi = L \cdot w(x_1) \quad (9)$$

ただし、

$$\xi = (-\xi(x_1) \ -\xi(x_2) \ -\xi(x_3) \ -\xi(x_4))^T \quad (10)$$

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ a & b & c & d \\ a^2 & b^2 & c^2 & d^2 \\ a^3 & b^3 & c^3 & d^3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$w(x_1) = (C_1 e^{-jkx_1} \ C_2 e^{-kx_1} \ C_3 e^{jkx_1} \ C_4 e^{kx_1})^T \quad (12)$$

ただし、 T はベクトル転置を表す。さらに、

$$a = e^{-jkL_s} \quad (13)$$

$$b = e^{-kL_s} \quad (14)$$

$$c = e^{jkL_s} \quad (15)$$

$$d = e^{kL_s} \quad (16)$$

ここで、 w は波動ベクトル⁽¹¹⁾である。式(9)において波動ベクトルに関して解くと次のようになる。

$$\begin{aligned} w(x_1) &= L^{-1} \cdot \xi \\ &= (G_{11}/M_1 \ G_{12}/M_2 \ G_{13}/M_3 \ G_{14}/M_4)^T \end{aligned} \quad (17)$$

Fig. 1 Beam model with point sensors

ただし,

$$G_{11} = -\xi(x_4) + (b+c+d)\xi(x_3) - (bc+cd+1)\xi(x_2) + c\xi(x_1) \quad (18)$$

$$G_{12} = -\xi(x_4) + (a+c+d)\xi(x_3) - (cd+ad+1)\xi(x_2) + d\xi(x_1) \quad (19)$$

$$G_{13} = -\xi(x_4) + (a+b+d)\xi(x_3) - (ab+ad+1)\xi(x_2) + a\xi(x_1) \quad (20)$$

$$G_{14} = -\xi(x_4) + (a+b+c)\xi(x_3) - (ab+bc+1)\xi(x_2) + b\xi(x_1) \quad (21)$$

また,

$$M_1 = (a-b)(a-c)(a-d) \quad (22)$$

$$M_2 = (b-a)(b-c)(b-d) \quad (23)$$

$$M_3 = (c-a)(c-b)(c-d) \quad (24)$$

$$M_4 = (d-a)(d-b)(d-c) \quad (25)$$

これにより, $x=x_1, x_2, x_3, x_4$ における変位情報から $x=x_1$ における各波動成分を抽出することが出来る.

2・2 波動フィルタ TYPE2 一般に, 境界から十分遠い場所 (ファー・フィールド) では, ニア・フィールドの影響を無視できる. この場合, ファー・フィールドにおいては式 (4) は次式で近似できる.

$$-\xi(x) = C_1 e^{-jkx} + C_3 e^{jkx} \quad (26)$$

上式を基に波動フィルタを設計する場合, センサの数は2個必要となり, その出力は次のように表される.

$$-\xi(x_1) = C_1 e^{-jkx_1} + C_3 e^{jkx_1} \quad (27)$$

$$-\xi(x_2) = C_1 e^{-jk(x_1+L_s)} + C_3 e^{jk(x_1+L_s)} \quad (28)$$

式 (27), (28) をマトリックス形式にまとめると, 次のようになる.

$$\begin{bmatrix} -\xi(x_1) \\ -\xi(x_2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 e^{-jkx_1} \\ C_3 e^{jkx_1} \end{bmatrix} \quad (29)$$

波動フィルタTYPE1の場合と同様に, 波動ベクトルの要素について解くと次のようになる.

$$\begin{bmatrix} C_1 e^{-jkx_1} \\ C_3 e^{jkx_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-\xi(x_1) + a\xi(x_2))/(1-a^2) \\ (-\xi(x_2) + a\xi(x_1))/(c-a) \end{bmatrix} \quad (30)$$

式 (30) の右辺が, ファー・フィールドにおいてのみ適用可能な波動フィルタの構成式である.

Table 1 Design parameters of a beam

total length	thickness	width
1.105 m	1.5 mm	4.5 cm
Young's modulus	density	material
7.4×10^{10} N/m ²	2770 kg/m ³	duralumin

3. 波動フィルタの数値解析

3・1 ニア・フィールドの影響

前章では, センサの設置位置に制限のない波動フィルタをTYPE1として提案し, Gibbsらが提案したファー・フィールドにおいてのみ適用可能な波動フィルタをTYPE2として説明した. ファー・フィールドとはニア・フィールドの影響の少ない領域のことを指すが, その明確な定義は存在しない. これは, ニア・フィールドの影響をどこまで許容できるかによってその定義が変化するためである. そこで本節では波動フィルタの数値解析に先立ち, 各モード周波数におけるニア・フィールドの影響について, 表1に示されているはりの諸元を用いて具体的な考察をすすめる. なお, 境界条件は固定・固定と固定・自由の2種類のケースを取り上げる. ニア・フィールドの影響は各波動成分の絶対値の和に対する各ニア・フィールド絶対値の和の割合として次式で評価する. すなわち,

$$E_n(x) = 100 \times (|C_2 e^{-kx}| + |C_4 e^{kx}|) / A_w \quad (31)$$

ただし,

$$A_w = |C_1 e^{-jkx}| + |C_2 e^{-kx}| + |C_3 e^{jkx}| + |C_4 e^{kx}| \quad (32)$$

なお, 本論文では数値解析において, 損失係数0.001を与えて計算を行う.

まず, 固定・固定はりの場合について考える. この場合の1次から3次の振動モードにおけるニア・フィールドの影響 E_n が図2に示されている. 図より明らかなように, 1次モードから3次モードへと次数が高くなるにつれ, はりの中央を中心に E_n は減少し, 特に3次モードになると, 10%を下回る領域は, はり全体の6割以上になる. また, E_n の最小値について注目すると, 1次モードにおいては11.7%であるが, 2次モードでは2.7%, 3次モードになると0.6%にまで減少している. 次に, E_n

Fig. 2 Near field effect along a clamped-clamped beam at the 1st, 2nd and 3rd modal frequencies

の最大値について注目する。 E_n の最大値は境界において出現するが、その値はモードの次数に関係なく約41.4%であることが分かる。図には示されていないが、さらに高い次数になってもこの値は変わらない。この現象は以下のように説明できる。

固定・固定はりが任意のモード周波数で加振される際、境界では跳躍現象⁽⁷⁾が発生し、進行波と反射波の位相差は 90° または -90° となる。すると、境界点における進行波振幅と反射波振幅の重畳は、それぞれの波動振幅の $\sqrt{2}$ 倍となる。さらに、固定端において、ニア・フィールドは変位を零とするように振舞うことから、当該地点におけるニア・フィールド振幅は、進行波振幅と反射波振幅の重畳そのものとなる。したがって、進行波振幅および反射波振幅の絶対値を A_m とすると、式(31)より次式が成り立つ。

$$E_n(x) = 100 \times \sqrt{2} A_m / (2 A_m + \sqrt{2} A_m) = 100(\sqrt{2} - 1) \quad (33)$$

以上のことから、固定・固定はりの境界におけるニア・フィールドの影響は、モードの次数によらず約41.4%となることが分かる。

次に、境界条件が固定・自由の場合について考える。この場合の1次から3次の振動モードにおけるニア・フィールドの影響が図3に示されている。1次モードについて注目すると、はり全体にわたりニア・フィールドの影響が大きいことが分かる。この時、 E_n の最大値は44.6%、最小値は35.4%となっている。また、2次モードについて注目すると、1次モードに比べて格段にニア・フィールドの影響が小さくなっている。さらに、固定・自由の2次、3次モードの E_n と、固定・固定はりの1次、2次モードの E_n が一致している点に留意されたい。これは、低次モードにおいて、固定・自由はりにおけ

Fig. 3 Near field effect along a clamped-free beam at the 1st, 2nd and 3rd modal frequencies

る i 次のモード周波数が、固定・固定はりの $i-1$ 次のモード周波数とほぼ一致することに起因している。

3・2 波動フィルタの精度の検証 本節では数値解析により、波動フィルタリング精度の検証を行う。対象構造物のパラメータは表1に示されているものを使用し、境界条件は固定・固定、対象振動モードは3次モード、センサ間隔は5cmとする。位相差に関する波動フィルタの精度の検証は、図3で示される複素反射率⁽⁷⁾の位相分布によって検証する。

まず、外乱点(加振力は1N)を右端から5cmの位置に置き、はりの中央(この点におけるニア・フィールドの影響は、前述の通り0.6%であるので、ファー・フィールドとみなすことが出来る)における波動振幅をセンシングした場合について考える。この時の波動

Fig. 4 Phase distribution of complex reflected waves around the 3rd modal frequency of a beam

Fig. 5 Wave filter output of TYPE1 and TYPE2 at $x=1.105/2$ around the 3rd modal frequency without active sink

フィルタTYPE1, TYPE2の出力を示したのが図5である。図より明らかなように, TYPE1, TYPE2ともに同様の出力波形を示し, 特に位相差に注目すると, 進行波と反射波が同位相になっているのが分かる。これは図4において, はりの中央における複素反射率の位相が 0° であること一致しており, 各波動フィルタにおいて, 位相情報が正確にセンシングされていることを示している。次に, はりの左端から5cmの位置にアクティブ・シンク^{(6)~(12)}を適用した場合の波動フィルタの出力について考える。この場合, 制御領域において反射波は除去され, 進行波のみが存在することになる。したがって, この際のフィルタの出力も進行波成分のみが存在し, 反射波成分の出力は零でなければならない。この場合の, はりの中央における各波動フィルタの出力を示したのが図6である。図より明らかなように, TYPE1, TYPE2ともに進行波成分の出力は存在するが, 反射波成分の出力は零となっていることが分かる。

以上の結果から, 波動フィルタTYPE1, TYPE2ともにファール・フィールドにおいては変位情報から各波動成分を正確に抽出できることが検証された。

次に, ニア・フィールドの影響の強い境界近辺での, TYPE1とTYPE2のフィルタリング精度について考察する。アクティブ・シンク成立時において, はりの左端から5cmの位置を観測点として波動フィルタを設置した場合のTYPE1とTYPE2の出力を図7に示している。

Fig. 6 Wave filter output of TYPE1 and TYPE2 at $x=1.105/2$ around the modal frequency with active sink

TYPE1の出力をみると, はりの中央に波動フィルタを設置した場合と同様に, 進行波成分は存在するが, 反射波成分の出力は零になっていることが分かる。このことは, TYPE1のフィルタが境界近辺でも正確に機能することを意味している。一方, TYPE2の出力を見ると, アクティブ・シンクによって反射波が除去されているにもかかわらず, 反射波成分の出力が存在している。これは, TYPE2のフィルタにおける境界近辺のフィルタリング精度が低下していることを意味している。以上のことから, 境界から十分遠い位置, すなわち, ファール・フィールドにおいてはTYPE1, TYPE2ともに各波動成分を正確に抽出できるが, 境界近辺, すなわち, ニア・フィールドの影響の強い位置では, TYPE1のみが各波動成分を正確に抽出可能であり, TYPE2は機能しないことが示された。

3・3 センサ間隔と可検出性 本節ではセンサ間隔と波動フィルタの可検出性の関係について明らかにする。式(17)に注目すると, L が正則であることが波動フィルタが可検出であることの必要十分条件となる。そこで, 波動フィルタの設計パラメータであるセンサ間隔 L_s と L の行列式の関係について考察する。

式(11)に定義される L は, 4行4列のVandermonde行列であり, その行列式は次のように表される。

$$\det L = (a-b)(a-c)(a-d) \cdot (b-c)(b-d)(c-d) \quad (34)$$

Fig. 7 Wave filter output of TYPE1 and TYPE2 at $x=0.05$ around the 3rd modal frequency with active sink

ここで、式(34)の右辺にある(a-c)に注目すると、この部分は次のように表すことができる。

$$a-c = -2j \sin kL_s \quad (35)$$

式(35)より明らかのように、(a-c)は $kL_s = n$ (n は任意の整数)となる場合、すなわち、 $L_s = n\lambda/2$ (λ は波長)となる場合に零となる。また、(a-c)以外の部分はセンサ間隔が零となる場合を除いて非零である。以上のことから、センサ間隔が波長の2分の1の整数倍と一致する場合に L の行列式は零となり、波動フィルタは不可検出となる。よって、センサ間隔を、対象周波数帯域の上限における波長の2分の1より小さく設定すれば、波動フィルタは帯域全体において可検出となる。

次に、具体的な例として、対象周波数帯域を100Hzまでとした場合について考える。図8はセンサ間隔を20cm、16cmとした場合の、周波数に対する $|\det L|$ の変化を示したものである。センサ間隔が20cmの場合に注目すると、周波数が零、センサ間隔が零の場合以外にも87.9Hzにおいて $|\det L|$ は零となり、不可検出となっている。これはセンサ間隔が波長($\lambda=0.4\text{m}$)の2分の1と

Fig. 8 Absolute value of determinant L vs. frequency with parameters of L_s

Fig. 9 Schematic diagram of wave filter using point sensors

一致する場合である。ここで、対象帯域の上限である100Hzにおいては、センサ間隔が18.8cmの場合に波動フィルタは不可検出である。したがって、センサ間隔が18.8cm未満であれば、この波動フィルタは100Hzまでの帯域全てにわたり可検出となる。例えば、図より明らかのように、センサ間隔を16cmとした場合は、100Hz以下において $|\det L|$ は非零となっており、対象帯域全てにわたり可検出となっている。

4. 波動フィルタによる波動分離の実験

4・1 波動フィルタの構成 本節では、実験の準備段階として、波動フィルタの構成について説明する。波動フィルタは式(17)の右辺によって構成できる。すなわち、 $x=x_1, x_2, x_3$ における各センサ出力にそれぞれサブフィルタを通した後、 $x=x_4$ におけるセンサ出力を含む4つの信号を加減演算し、その出力にさらにサブフィルタを通す。すなわち、波動フィルタの構成図は図9のようになる。図より明らかのように、波動フィルタは4つの変位センサと4つのサブフィルタで構成される。例えば $-x$ 方向に伝播する波動の振幅をセンシングする波動フィルタの構成式は G_{13}/M_3 で示される

Fig. 10 Frequency characteristics of subfilter F1

Fig. 11 Frequency characteristics of subfilter F2

ので、サブフィルタF1, F2, F3, F4の伝達要素はそれぞれ a , $ab+ad+1$, $a+b+d$, $1/M_3$ となる。この時、センサ間隔を5.5cmとした場合の各サブフィルタの周波数特性を図10～図13に示す。なお、本実験においては変位センサは非接触型のギャップセンサ(有効範囲2.0mm, 分解能0.5 μ m)を使用する。

4・2 実験方法 図14に実験装置の概念図を示している。境界条件は固定・固定とし、はりの右端から5cmの位置にピエゾアクチュエータ貼付し、外乱力を与える。波動フィルタは、はりの左端から3cmの位置をセンシングするように設置され、センサ間隔は5.5

cmとする。当該領域は図2において示した通り、ニア・フィールドの影響が大きい領域である。波動フィルタは進行波振幅と反射波振幅を出力し、その出力はデータ・ロガーによってサンプリングされる。なお、サンプリング周波数は1000Hzとする。

4・3 実験結果 図15は、はりを3次モード周波数(35.2Hz)加振した際に、波動フィルタTYPE1によって得られた波動成分を示している。進行波と反射波の位相差について注目すると、進行波に対して反射波が126°進んでいるのが分かる。これは図4において $x=0.03$ mでの複素反射率の位相が-126°であることと一致している。また、この場合の最大振幅は0.31mmである。

Fig. 12 Frequency characteristics of subfilter F3

Fig. 13 Frequency characteristics of subfilter F4

Fig. 14 Schematic diagram of experimental setup

Fig. 15 Experimental results of wave filter output TYPE1 at $x=0.03$ around the 3rd modal frequency

Fig. 16 Experimental results of wave filter output TYPE2 at $x=0.03$ around the 3rd modal frequency

次に、波動フィルタTYPE2の出力について考察する。当該フィルタの出力は図16に示されている。進行波と反射波の位相差をみると、進行波に対して反射波が 101° 進んでいる。これは位相差において波動フィルタTYPE2の精度がTYPE1に比べ劣化していることを示している。さらに振幅について注目すると、最大振幅は0.028mmとなっており、TYPE1の出力に比べ約10分の1になっている。これは、境界条件が固定の場合、境界近辺において、ニア・フィールドが振動変位を零に収束するように振舞うことに起因している。このことは振幅に関しても波動フィルタTYPE2の精度がTYPE1に比べ減少していることを示している。

以上のことから、ニア・フィールドの影響の強い領域では、TYPE1のみが変位情報から各波動成分を正確に抽出できることが実証された。

5. 結言

本論文は、一次元柔軟構造物の波動制御系構築を指向し、センサの設置位置に制限のない、ポイントセンサ群による波動フィルタリング法を提案することを目的とした。本論文で得られた成果を要約すると次のようになる。

1. ファー・フィールドにおいてのみ適用可能な波動フィルタリング法 (TYPE2) に対して、4個のポイントセンサを使用することにより、センサの設置位置に制限のない波動フィルタ (TYPE1) の構成式を導出した。
2. 波動フィルタの数値解析に先立ち、各モード周波数におけるニア・フィールドの影響について、固定・固定はりと固定・自由はりを対象に検証した。固定・固定はりにおいては、モードの次数に関係なく、境界におけるニア・フィールドの影響は約41.4%であることを証明した。また、固定・自由はりの1次モードでは、ニ

ア・フィールドの影響が非常に大きいことを明らかにした。

3. 数値解析により、波動フィルタの正当性を検証すると共に、センサ間隔と波動フィルタの可検出性の関係を明らかにした。すなわち、センサ間隔が対象周波数帯域の上限における波長の2分の1未満であれば、波動フィルタは帯域すべてにわたり可検出である。

4. 固定・固定はりを対象とした波動フィルタリング法の実験により、従来の波動フィルタリング法 (TYPE2) の限界を示すとともに、本研究において提案したニア・フィールドを考慮した波動フィルタ (TYPE1) の有為性を立証した。

文 献

- (1) Balas, M.J., *J.Guidance*, 6-5(1983), 351.
- (2) Meirovitch, I., and Baruh, H., *J.Guidance*, 8-6(1985), 706.
- (3) Kosut, R.L., *J.Guidance*, 6-2(1983), 104.
- (4) Procopio, G.M., and Hubbard, J.E., *1987 ASME Design Technology Conference*, (1987), 35.
- (5) von Flotow, A.H., and Shafer, B.E., *J.Guidance*, 9-6 (1986), 673.
- (6) 田中信雄・菊島義弘, 機論, 56-522, C(1990), 351.
- (7) 田中信雄・菊島義弘, 機論, 56-530, C(1990), 2575.
- (8) 田中信雄・ほか2名, 機論, 57-537, C(1991), 1548.
- (9) 田中信雄・ほか2名, 機論, 58-546, C(1992), 360.
- (10) 田中信雄・ほか2名, 機論, 58-552, C(1992), 2403.
- (11) 田中信雄・ほか2名, 機論, 58-552, C(1992), 2578.
- (12) Tanaka, N., and Kikushima, Y., *ASME, J. Vib. Sound.*, 121 April, (1999), 174
- (13) Gibbs, G.P., and Fuller, C.R., *AIAA Journal*, 30(2), (1992), 457.
- (14) Gibbs, G.P. et al., *Proc. of 2nd conference on Recent Advances in Active Control and Vibration*, (1993), 909.
- (15) Snowdon, J.C., *Vibration and Shock in Damped Mechanical Systems*, (1986), 201, John Wiley & Sons.