柔軟ばりの曲げ波制御に関する研究*

(アクティブ・シンク系の基本的性質とその検証)

田 中 信 雄^{*1}, 菊 島 義 弘^{*1}

Flexural Wave Control of Flexible Beam (Fundamental Characteristics of an Active Sink System and Its Verification)

Nobuo TANAKA and Yoshihiro KIKUSHIMA

This paper deals with the flexural wave control of a flexible beam. It is the purpose of this paper to verify experimentally the existence of the active sink and to discuss the fundamental characteristics of the active sink system. First, for the purpose of observing the wave flow traveling along the beam, a visualization system is developed. Next, based upon the system, the experiment is carried out to verify the existence of the active sink. Then, from an analytical point of view, this paper further investigates the characteristics of the active sink system, showing that an active source also exists. It is also found that there are two patterns of the suppressed wave, that is, the progressive wave type and the standing wave type. Finally, by introducing both the phase distribution and the gain of the complex reflection coefficient over the beam, the generation mechanism of these patterns is clarified.

Key Words: Wave, Flexible Beam, Active Sink, Active Source, Active Control, Complex Reflection Coefficient

1. 緒 言

振動解析法⁽¹⁾に定在波形解法と進行波形解法があるように、振動制御法においても、定在波形のモード制御法と進行波形の波動制御法の2種類がある。従来の振動制御法を総括すると、そのほとんどが前者の定在波形^{(2)~(4)}に属し、後者の観点に立った報告^{(5)~(8)}が少ないのは、通常の振動現象において、純粋な進行波を観測することが極めて稀であることに大きな理由があるものと考えられる。

大形宇宙構造物(LSS)などに見られるように、柔軟かつ長大で、非常に数多くの微減衰な振動モードを有する構造物の振動制御問題を対象とする場合、これまでのモード解析を基礎とするモード制御法の適用に限界があることは既に述べた⁽⁸⁾。その構造物の大きさと波動の分散性を考慮すると、換言すれば、振動モード、とりわけ制御が困難とされている低周波振動モードの励起に費やされる時間を勘案すると、振動モードは既に励起されたものとして展開されたモード制御法(定在波形)を適用するよりも、振動モードの生成メカニ

ズムに踏み込んで対策が講じられる可能性のある波動制御法(進行波形)を適用するほうが有利であることは容易に想像されよう。

本研究は、従来形の振動モード制御法とは立場を異にし、波動制御の観点から振動制御法の体系化を志向するものであり、その一環として、これまでに構造物の境界条件を制御することにより、進行波の生成を促すことで、振動モードの励起を回避するアクティブ・シンク法の提案⁽⁸⁾を行い、かつ当該法が成立するための最適条件式を導出した。本論文の目的は、前報⁽⁸⁾で提案したアクティブ・シンクの実現を図り、モード周波数におけるモード励振の不活性化を立証するとともに、アクティブ・シンクによって達成される進行波形の振動制御パターン以外にも、定在波形の振動制御パターンが存在することを明らかにすることにある。

本論文の前半においては、アクティブ・シンクの存在を立証することに重点を置き、まず、曲げ波制御の実験にさきがけて、柔軟ばりにおける曲げ波を観測するためのシステムを構築し、進行波や定在波の状態を可視化できるように環境を整備することから始める。次に、全長2.77mの自由・自由ばりを対象とし、このはりの左端をアクティブ・シンクの設置点として、その実現を試みる。これにより、はり全体を進行波が穿

* 原稿受付 平成元年11月17日。

^{*1} 正員、工業技術院機械技術研究所(〒305 つくば市並木1-2)。

配し、たとえモード周波数でそのはりを励振しても、振動モードが励起されることがないと言う確証を得る。さらに、アクティブ・シンクをはり中央に移動し、加振源を含む部材、および含まない部材の2種類に分割した場合、各々の部材における反射波を除去することで達成されるアクティブ・シンク系の振動抑制効果を明らかにする。

ついで本論文の後半においては、振動制御の範疇におけるアクティブ・シンク法の位置づけについて言及するとともに、はりの曲げ波抑制に関して、進行波形抑制と定波形抑制の2種類が存在することを明らかにする。さらに、複素反射率⁽⁹⁾の位相分布と利得の観点より、振動パターンの生成機構について説明する。

2. アクティブ・シンクの実証

2.1 波動可視化システム 集中定数系の振動を測定する場合とは異なり、分布定数系を対象とする際には、はり全体の振動状態を捕捉する必要がある。そこで、本論文はまず図1に示すような波動可視化システムを構築することから始める。本システムの構成は以下のとおりである。全長2.77 m、幅5 cm、厚さ5.8 mmの鉄製はりの2箇所を柔らかなばねで吊し、自由・自由の境界条件を与える。このはりの右端($x=l$)には外力 f_{in} を与えるための動電形シェーカが設置され、シェーカ・はり間に取付けられたひずみ形力検出器(最大測定範囲4.9 N、重量5 g)により、外力 f_{in} が測定される。また、アクティブ・シンクの設置を想定するはりの左端、ないしは中央にも動電形シェーカが設置され、制御力 f_d を作用させる。この制御力は、外力発生信号を基本とし、フェーズ・シフトによってその位相および利得を変化させることで得られ、シェーカの先端に設置されたひずみ力検出器によって測定される。

次に、このはりに沿って13 cm 間隔に22個の非接

図1 波動可視化システムの構成図

触形変位形(有効測定範囲0.5 mm、分解能0.5 μm)を配置し、データ・ロガーによって変位を同時サンプリングする。次に、取り込まれたデータをマイクロ・コンピュータで信号処理し、さらに22点のデータをスプライン補間し、振動波形として出力する。

2.2 左端をアクティブ・シンクとした場合

図2は、はり右端における駆動点コンプライアンスを示している。図より明らかなように、100 Hz以下の周波数領域で7個の振動モードが観測される。また、図には示されていないが、0.8 Hz近傍に剛体モードも存在している。一例として、無制御状態における3次(20.5 Hz)モードの波動を可視化した結果が図3に示されている。横軸ははりの左端からの距離 x を表し、縦軸は時刻歴を示している。この際の加振力は0.149 Nであり、最大で376 μm の変位振幅が生じている。また、波動と横軸の交差点でモアレじまを成し、それが縦軸に平行に見えることから、定在波が形成されて

図2 はり左端における駆動点コンプライアンス

図3 無制御状態における波動の時刻歴応答実験結果（3次モード近傍）

いることが確認される。また、図の上部には波動包絡線が併記されており、この図からも、振動モードの腹と節が定在していることが確認される。

前報で提示した利得・位相条件⁽⁸⁾を考慮しながら、アクティブ・シンクの実現を図った。ここでは3次の振動モード(20.5 Hz)を例にとり、その結果を紹介することにする。図4は、はりの左端にアクティブ・シンクを設けた際に得られた波動を示している。図より明らかなように、右端(励振点)から、左端にあるアクティブ・シンクに向かって、波動が流れている様子が見える。この際の最大振幅は $49.0\ \mu\text{m}$ であり、加振力を考慮すると無制御状態の2.6%にまで抑制されている。また、波動包絡線を見ると明らかなように、図3の場合とは異なり、波動が定在することがないため、振動の節に相当する箇所がない。また、ニア・フィールドの影響がはりの両端に認められる。

2.3 中央をアクティブ・シンクとした場合

アクティブ・シンクの設置位置をはり中央に移動し、

図4 アクティブ・シンクを左端に設置した場合の波動の時刻歴応答実験結果(3次モード近傍)

図5 アクティブ・シンクを中央に設置した場合の波動の時刻歴応答実験結果(右部材に進行波を生成した場合、3次モード近傍)

まず、加振源を内蔵するはりの右側の部材において、進行波を生成させた場合の波動状態を示すと図5になる。右の部材においては、モアレじまが斜めに走っており、進行波がはり中央にあるアクティブ・シンクに向かって流れ込んでいる様子がわかる。一方、左の部材においては、モアレじまが上下に走っており、定在波が立っている。この場合の振動抑制効果をみると、加振力 $f_{in}=0.748\ \text{N}$ に対して、最大変位で $53.8\ \mu\text{m}$ にまで抑制されており、オープン状態の加振力が $0.149\ \text{N}$ であったことを勘案すると、無制御状態の2.8%にまで振幅が抑制されていることになる。

次に、アクティブ・シンクにより、加振源を含まない左側の部材に進行波を生成させた場合の波動を図6に示す。右の部材においては定在波が観測され、加振点のある右端で最大変位を呈している。この場合の加振力が $0.746\ \text{N}$ であることを考慮すると、オープン状態と比較してわずか1.9%にまで振幅が減少している。一方、左側の部材では、進行波の存在を認めることができないほど、振動が抑制されている。このように、加振源を内蔵しない部材に関しては、進行波と反射波とは相対関係にあり、片方を抑制すると、他方も抑制されることになり、その結果振動もなくなることが、この実験により立証されたと言える。これに対して、加振源を内蔵する部材で進行波のみを生成させても、進行波は加振エネルギーの関数として存在し、それに伴う変位応答は残留することになる。

3. アクティブ・シンク系の基本的性質

3.1 アクティブ・シンクの位置づけ 前章において、アクティブ・シンクの存在が実証されたので、本章では、アクティブ・シンク系の特性に関する考察

図6 アクティブ・シンクを中央に設置した場合の波動の時刻歴応答実験結果(左部材に進行波を生成した場合、3次モード近傍)

をさらに深めることにしよう。そこで、まず、アクティブ・シンク法以外の手法によって達成される振動抑制効果とアクティブ・シンク効果との比較検討を通じて、振動制御の範疇におけるアクティブ・シンク法の位置づけを明らかにすることから始める。なお、前報で提示された資料をそのまま利用することを考えて、ここでは、アクティブ・シンクをはりの左端に設置し、外力 f_{in} は、はりの右端 ($x=l$) に作用するものとする。また、本論文で使用するはりの仕様は前報⁽⁸⁾と同じであるので、それを参照願いたい。

アクティブ・シンクをはりの左端に設置した場合のアクティブ・シンクの成立条件⁽⁸⁾は、外力 f_{in} とアクティブ・シンクの発生する制御力 f_d との利得が、全周波数領域で 1.0 と一定で、位相だけが遅れるむだ時間特性である。そこで、ここでは制御力 f_d と外力 f_{in} との関係を

$$f_d = f_{in} \exp[j\theta] \dots\dots\dots (1)$$

とおき、位相差 θ だけを任意に変化させて、アクティブ・シンクが生成していく過程を見ることにする。図 7 および図 8 は、1 次の曲げモード周波数近傍 4.03 Hz において、位相差 θ を 0° から 360° まで変化させ

図 7 位相差 θ に対する複素反射率の利得 η

図 8 位相差 θ に対する変位振幅比 w

た場合の、アクティブ・シンク点 ($x=0$) での複素反射率⁽⁹⁾の利得 η 、および外力作用点 ($x=l$) での、オープン状態 ($f_d=0$) における変位 ξ_0 に対する変位振幅比 w をプロットしたものであり、 η および w は次のように定義される。

$$\eta = \left| \frac{C_1 \exp[-j k x]}{C_3 \exp[j k x]} \right| \dots\dots\dots (2)$$

$$w = \left. \frac{\xi_{\max}}{\xi_0} \right|_{x=l} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、式(2)の分子および分母は、オイラー・ベルヌーイばりの波動方程式の一般解

$$\begin{aligned} -\xi(x) = & C_1 \exp[-j k x] + C_2 \exp[-k x] \\ & + C_3 \exp[j k x] + C_4 \exp[k x] \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

の第 1 項 (x の正方向に伝搬) および第 3 項 (x の負方向に伝搬) を表している。また、 ξ , x , k および j は各々はりのたわみ、はり左端からの距離、波数および虚数単位を表す。

図 7 より明らかなように、 $\theta=180^\circ$ の近傍を除くほとんどの位相差 θ に対して、複素反射率の利得 η はほぼ 1.0 であることから、この領域では入射波と同レベルの反射波が発生していることがわかる。これは、進行波(入射波)と後退波(反射波)の干渉によって定在波が生じ、その結果 1 次の振動モードが励起されていることを意味する。また、位相差 180° 近傍の複素反射率の利得 η を示したのが図 9 であり、位相差 θ が 179.94° という極めて 180° に近接した位置で η は無限大となり、また 180.06° で η は零となっている。ここで $\eta=0$ となる状態が、アクティブ・シンクを表し、この点に向かって進行波が流入する現象が現れることになる。他方、 $\eta=\infty$ の状態では逆に外力の作用点に向かって波動が流れる、いわばアクティブ・ソースの

図 9 位相差 $\theta=180^\circ$ 近傍における振動インテンシティ比、変位振幅比および複素反射率の利得

状態となる。換言すれば、はり右端の加振点がアクティブ・シンクとなる。

図8の振幅比 w を見るとわかるように、 $\theta=0^\circ$ では振幅比 w が2.0となり、この場合の制御力 f_d は外力 f_{in} と同様に加振源として作用し、それらによる応答が重畳されて、振動振幅も制御無補償状態の2倍となっている。またこの状態は、進行波と反射波によって生成される定在波が最も大きくなる状態でもある。位相差 θ を増大するに従い、振動モードを励起する元凶の定在波自体も小さくなることから、振幅比 w も減衰していく様子が理解されよう。しかしながら、図8から明らかなように、 θ が 0° から約 120° および 240° から 360° の範囲では、振幅比 w が1.0以上であることから加振状態にあることがわかる。また、図7の複素反射率 η がこれらの領域では依然としてほぼ1.0であることから、 θ を増加するに従い振動は小さくなるものの、振動モードは定在波に同調して励起された状態であるので、1次の曲げモードのパターンのまま、全体の振動が小さくなっていく。

θ が 120° から 240° の範囲が、振幅比 w が1.0以下になる、いわゆる振動抑制領域であるが、複素反射率 η が $\theta=180^\circ$ 近傍を除いてほぼ1.0であることから、依然として振動モードの形を踏襲しながら振動が抑制されていくことが理解されよう。はりの左端がアクティブ・ソースとなる状態に近づくにつれ、ようやく複素反射率 η も1.0以上の値となり、入射波と反射波のバランスがくずれ始め、その結果振動モードを励起していた定在波の形状も変わることになる。したがって、振動モードの励振率は減少し、これまで定在していた振動パターンが変化し、反射波 (x の負方向に伝搬) が支配的になるとともに、振動比 w も急減し、波動は進行を始める。さらに、アクティブ・ソースとなる状態で、はりには一方向の波動(この場合は反射波)しか存在しなくなり、振動モードは完全に睡眠状態に入ることになる。

図10 種々の条件下での波動包絡線

図9に示されている複素反射率 η をみると、前述のようにこの状態で η は無限大を呈するが、位相差 θ をさらに増加すると η は減少を始め、 θ が 180° で η は1.0となり、再び進行波と反射波によって定在波を生成する。しかしながら、この定在波は振動モードを励振することなく、振幅比 w はその間さらに減少し、 180° で最小となる。これまでとは一見矛盾するこの現象の解明は、3.2節で行うことにする。さらに、位相差 θ を 180.0° より増加すると、これまでとは全く逆の現象が得られ、アクティブ・シンクの状態においては、外力作用点からはりの左端に向かって、進行波がはり全域を支配するようになる。

以上の様子を波動包絡線で示したのが図10である。無制御状態(最上左図)で最大振幅が58.4 mm あったものが、 $\theta=179.5^\circ$ の状態では $513 \mu\text{m}$ にまで抑制され、かつ振動の節に当たる部分が膨らみをもつようになり、定在波から進行波へ遷移していく様子が観察される。この状態とアクティブ・ソースの場合とでは、これらの位相差はわずか 0.44° に過ぎないのにもかかわらず、進行波が完全にはり全体を支配すると、振動抑制効果はこの間に急激に加速され、最大変位はわずか $82.5 \mu\text{m}$ にまで減少する。これを図11の波動で示すというそう明瞭となり、無制御状態では x 軸と曲げ波形の作り出すモアレじまが上下に走っていたのが、アクティブ・ソース系では左から右へ、またアクティブ・シンク系ではその逆に走っている。

3.2 進行波抑制と定在波抑制 さて、アクティブ・ソースとアクティブ・シンクのちょうど中間の位置 $\theta=180.0^\circ$ に、複素反射率 η が完全に1.0となり、定在波が発生しているにもかかわらず、アクティブ・シンクやアクティブ・ソースを講ずる以上の振動抑制効果が得られている状態がある。すなわち、図9

図11 1次モード近傍における進行波形および定在波形抑制波動の時刻歴応答

に示されているアクティブ・シンクを基準とする振幅比(図8では無制御状態に対する比が記載されていることに注意)を見てもわかるように、この箇所では、アクティブ・シンクないしアクティブ・ソースの状態より、最大振幅でさらに30%程度抑制されている。また、同図には、アクティブ・シンクを基準とする振動インテンシティ比も記載されており、 $\theta=180.0^\circ$ でこの値が0.0であることからして、この状態では振動エネルギーの移動が全く行われておらず、完全な定在波が立っていることがわかる。

定在波と振動モードとが同調された場合に、振動モードが励起されることは前報⁹⁾で知った。ここでいう同調とは、以下の2点を満たすことを言う。

①モード周波数で励振される。

②定在波と振動モードの形状が合致する。

すなわち、 $\theta=180.0^\circ$ の状態では、②の条件が満たされていないのである。すなわち、図10の波動包絡線を見ると明らかなように、最上左図の包絡線が振動モードを表し、一方、 $\theta=180.0^\circ$ の包絡線が定在波の形状を示し、これらは完全に不一致なのである。したがって、完全な定在波($\eta=1.0$)が発生し、かつモード周波数で励振されているにもかかわらず、これらのパターンの不一致により、振動モードはなんら刺激を受けることなく睡眠を続けているのである。すなわち、定在波の存在、ひいては反射波の存在は、振動モードを励起するための必要条件ではあっても、十分条件ではないのである。

これまでに明らかにされた振動抑制のパターンには、アクティブ・シンクやアクティブ・ソースを適用することで得られる進行波形振動抑制パターンと、振動モード形状とは異なる定在波を発生させて振動抑制を行う、2種類のパターンがあることを知った。そこで、本論文では前者を進行波形抑制、後者を定在波形抑制と呼ぶことにする。

図12は1次モード周波数近傍における進行波形抑

図12 1次モード近傍での進行波形波動と定在波形波動包絡線

制効果と定在波形抑制効果を比較したものであり、例えば3Hzの励振周波数の場合、進行波形と定在波形を与える位相差には 36.6° の相違がある。また、最大変位を見ると、多少ではあるが定在波形のほうが優っていることがわかる。いずれの場合も、モード周波数をはさんで同様なパターンの波動包絡線を呈しており、進行波形では当然のことながら節は存在せず、はりの両端でニアフィールドの影響が認められる。一方、定在波形では中央に節が存在している。

図12を見るとわかるように、モード周波数はずれた励振周波数においても、位相差 θ を 180.0° とすることで定在波形抑制を得ることがわかった。そこで次に、2次以上の振動モードに対して定在波形抑制を得ることを考えよう。図13は、はりの右端に外力 f_{in} が作用している場合の、1次の振動モード近傍から2次の振動モード近傍に至るまでの波動包絡線を示しており、実線と波線とは半周期ずれた状態を示している。はりの左端には制御力 f_d が作用することを想定すると、制御力 f_d と外力 f_{in} を常に逆相の状態に保つためには、駆動点コンプライアンスにおいてノッチが生ずる9Hzを境として、位相差 θ を 180.0° から 0.0° に切り替える必要がある。

この位相調整を施すことによって得られた駆動点コンプライアンスが、図14の一点鎖線で示されている。ちなみに、実線は無制御状態を表し、100Hz以下の周波数領域では剛体モードを除いて6個の振動モードがノッチと交互に現れている。波線はアクティブ・シンク系の駆動点コンプライアンスを表し、振動モードを励振することなく、 -30 dB/dec の傾きで減衰している。進行波形(アクティブ・シンク系)の特性と定在波形とを比較するとわかるように、無制御状態におけるノッチ周波数で定在波形と進行波形の利得が合致する以外、定在波形の利得のほうが下回っており、進行波

図13 1次モードから2次モード近傍に至る波動包絡線(波線は半波長ずれた状態)

形では存在しなかったノッチが現れている。

図 15 は、各振動モードにおける定在波形抑制パターンと無制御状態の振動パターンとの比較を示している。縦軸の尺度が、mm から μm に変化していることに注意してほしい。ここで興味深いのは、定在波形の包絡線パターンが 1 次低い無制御形のそれに対応していることである。したがって、1 次モード近傍における 4.03 Hz の定在波形のパターンは、剛体モード(コニカルモード)に対応がつく。

3.3 複素反射率の位相分布 進行波形抑制においては、はりには進行波か後退波のいずれしか存在しないため、それらの間の位相差 ϕ を定義することはできないが、それ以外の状態では位相差 ϕ を定義するこ

とができる。すなわち、

$$\phi = \angle \frac{C_1 \exp[-j k x]}{C_3 \exp[j k x]} \dots\dots\dots (5)$$

式(5)を式(2)と比較すれば、位相差 ϕ は複素反射率の位相にほかならないことがわかる。この位相分布を各振動モード周波数に対して示したのが図 16 である。この図は、各々の励振周波数に対して、2 種類の位相分布しか存在しないことを意味している。すなわち、定在波形抑制を含むアクティブ・シンク、アクティブ・ソース間の領域(これをケース II と呼ぶ)における位相分布であり、もう一つは、それ以外の領域(ケース I)での位相分布である。

次に一例として、1 次の振動モード近傍(4.03 Hz)における進行波と後退波の位相差 ϕ について考察してみよう。ケース I の場合、はりの左端では、進行波($C_3 \exp[j k x]$)に対して後退波($C_1 \exp[-j k x]$)の位相は -90° の跳躍現象⁽¹⁰⁾が生じており、他方、はりの右端(加振点)についても、この点からみた入射波と反射波として波動を定義すると、同じように -90° の位相の跳躍現象が生じている。また、はりの中央で位相差 ϕ が 0.0° 、はり端点から 46 cm 離れた位置で位相差 ϕ が 180.0° となっていることから、それらの位置で波動包絡線の腹および節が形成されると考えられる。しかしながら、図 15 の最上左図を見ても明らかなように、はり中央における腹の位置は $\phi=180.0^\circ$ となる点と一致しているが、節の位置と $\phi=0.0^\circ$ となる点の間には約 15 cm の差異がある。これは境界で発生するニアフィールドの影響のためであり、はり端点でその

図 14 進行波形抑制および定在波形抑制における駆動点コンプライアンス

図 15 各振動モード近傍における定在波形波動包絡線と無制御状態の波動包絡線

図 16 各振動モード近傍における複素反射率の位相分布

値を100%とした場合、これより46cmの位置では45.5%、はり中央では9.4%の影響がある。したがって、たとえ位相差 $\phi=180.0^\circ$ の位置において進行波と後退波が相殺し合っても、ニアフィールドの存在のため、その点では節にはならず、それよりは多少離れた位置で節が生成されるものと考えられる。一方、はり中央でニアフィールドの影響が9.4%あるにもかかわらず、位相差 $\phi=0.0^\circ$ の位置と腹の位置が合致しているのは、はり両端からはり中央点に及ぼすニアフィールドの影響が等しいためである。

ケースIIの位相分布は、ケースIの場合とちょうど 180° の差があり、この場合、位相差 ϕ が 180.0° となる位置がはりの中央になることから、ここで振動包絡線の節ができることになる。位相分布は各周波数に対してケースIおよびIIの2種類しかないことは既に述べたが、ケースIIの場合はケースIとは異なり、図7に示すように複素反射率の利得 η は大きく変動するため、振動抑制のパターンにも変化が生じ、利得 η が ∞ から1.0に近づくにつれて、はり中央に生ずるくびれが深まり、 η が1.0になる位相差、すなわち $\phi=180.0^\circ$ で完全な定在波形抑制パターンが生成される。

4. 結 言

本論文は、構造物の境界を制御し進行波の生成を促すことにより、振動モードの励振を回避するアクティブ・シンク法の実現を図るとともに、その基本的特性を明らかにすることを目的として行われた。本論文で得られた成果を要約すると次のようになる。

(1) アクティブ・シンクの生成を立証するための道具だてとして、はりを伝搬する波動の可視化システムを開発した。

(2) 柔軟ばりの左端にアクティブ・シンクの生成を試みたところ、はり右端の加振源から左端のアクティブ・シンクに向かう進行波をはり全域に造りだすことに成功した。この状態では、解析結果から予想したとおり、モード周波数で加振しているにもかかわらず、振動モードは励起されることはなく、3次の振動モードを例にとるならば、最大変位振幅で無制御状態の2.6%にまで抑制することができた。

(3) アクティブ・シンクをはりの中央に設置し、加振源を内蔵する部材において、進行波の生成を図つ

たところ、当該部材では進行波が発生し、加振点での変位振幅は2.8%にまで抑制された。ついで、加振源を内蔵しない部材での進行波生成を試みたところ、反射波を除去することで進行波も抑制されるという論理により、この部材では振動をほぼ完全に抑制できることが立証された。

(4) 制御力をはり左端に設置し、はり右端に設置した励振力との位相差を変化させることで得られる振動抑制効果とアクティブ・シンクとの関係を明らかにした。その結果、アクティブ・シンク以外にも、振動抑制効果は全く同一であるが、はりの左端から逆に励振点に向かう進行波が発生する、いわばアクティブ・ソースが存在することが判明した。

(5) 進行波をはり全域にわたって発生させるアクティブ・シンク法(アクティブ・ソース法も含む)を進行波形抑制法と呼ぶならば、その対立概念としての定在波形抑制法が存在することを明らかにした。この場合、複素反射率の利得は1.0となり、完全な定在波が立っているにもかかわらず、定在波パターンと振動モードが不一致なため振動抑制が達成されることを示した。

(6) 複素反射率の位相分布は、アクティブ・シンクおよびアクティブ・ソースを境界として、2種類しか存在しないことが判明した。また、複素反射率の位相分布および利得によって、振動パターンが決定されることが明らかにされた。

文 献

- (1) Snowdon, J. C., *Vibration and Shock in Damped Mechanical Systems*, (1968), 200, John Wiley & Sons Inc.
- (2) Balas, M. J., *J. Guidance*, 6-5(1983), 361.
- (3) Meirovitch I. and Baruh, H., *J. Guidance*, 8-6(1985), 706.
- (4) Kosut, R. L., *J. Guidance*, 6-2(1983), 104.
- (5) Vaughan, D. R., *Trans. ASME, Ser. D*, (1968), 157.
- (6) Procopio, G. M. and Hubbard, J. E., 1987 *ASME Design Technology Conference*, (1987), 35.
- (7) von Flotow, A. H. and Shafer, B. E., *J. Guidance*, 9-6(1986), 673.
- (8) 田中・菊島, 機論, 56-522, C(1990), 351.
- (9) 有田, 振動・波動, (1980), 201, 裳華房.
- (10) Cremer, L. and Heckl, M., *Structure Borne Sound*, (1972), 123, Springer-Verlag.