壁面の騒音透過の能動制御*

秋下貞夫**

Active Control of Sound Transmission through Wall Plate /
Sadao AKISHITA

Key words: active sound transmission control, active vibration control, feed forward control, adaptive control, feedback robust control

1. はじめに

近年、電子機器の著しい進歩に伴い機械的な振動や騒音の制御に、能動制御を適用することが多くの注目を集めるようになった。本稿の主題は隔壁の騒音伝達の能動制御であるが、これに関連した音場の能動制御と振動の能動制御についてすでに専門書が出版されている¹⁾²⁾。隔壁の騒音伝達をもっとも真剣に追究されている対象は、航空機の客室内の騒音低減である。実際、ジェット旅客機に搭乗すればだれでも気付くように客室内の騒音レベルは高く、快適な乗り心地と程遠い状態である。この騒音の発生機構として以下の3つが考えられる。(1) ジェットエンジンの機械的振動が構造部材を通じて隔壁に伝搬し、隔壁の振動励起を通して客室内への騒音放射に至る。(2) ジェットエンジンから放射される音波が圧力変動として隔壁の振動を励起し、客室内への騒音放射に至る。(3) 隔壁外表面の高速気流の乱流境界層の圧力変動が隔壁の振動を励起し、客室内への騒音放射に至る。いずれの場合も客室内の騒音場は隔壁の振動によって励起され、隔壁の振動の制御はそのまま客室内の騒音の制御につながる。隔壁の振動の透過損失を増大するには、隔壁の曲げ振動の剛性と質量面密度の増強が有効であるが、重量制限の厳しい航空機ではいずれも実現困難で、低周波数領域にわたるまで十分な透過損失を確保できない。一方、能動制御が十分に機能する周波数領域

はアクチュエータや制御器の性能から低周波数帯域に限られる。このように、隔壁の受動的透過損失の周波数特性と能動制御系の周波数特性の両方から、騒音伝達の能動制御の周波数帯域は一般的に約1000 Hz以下に限られる。近年、欧米の航空機メーカーは客室内の騒音低減のための能動制御系の開発に意欲的に取り組んでおり、すでに多数機種にわたって騒音の能動制御システムが導入されているとの報告がある³⁾。このような騒音の能動制御技術に隔壁の騒音伝達の能動制御が大きな役割を果たしている。今後このような制御システムのコストが量産効果などにより大幅に低減すれば、自動車や鉄道車両などへの導入への基本的な障壁は取り払われると考えられる。以下では、このような見地から、隔壁の騒音伝達の能動制御技術について、基本的な技術の解説を試みる。

2. 音場の制御と振動制御

図1は音場の制御の代表的な例として、ダクトを伝播する騒音の能動制御システムの概念図を示す。騒音源の音波(一次音)が左側から右側に向かって伝播しており、出口のスピーカからの二次音により一次音による音波を打ち消

図1 1次元音場でのANC

* 原稿受付 平成10年1月23日
** 立命館大学理工学部(草津市野路東1-1-1)
1961年3月京都大学工学部航空工学科卒、
1961年4月から1964年2月までプリンス自動車工業(株)勤務、1964年3月三菱電機(株)中央研究所に転じる。1988年4月より立命館大学理工学部機械工学科教授、現在に至る。研究分野: 振動・騒音の能動制御、磁気浮上系の制御、移動ロボットの誘導制御

(a) フィードバック振動制御

(b) フィードフォワード振動制御

図2

す。この結果、出口付近では音圧レベルが大きく低下し、出口から放射される音響パワーを低減できる。一次音と二次音は、周期的な音の場合同一振幅・逆位相からはずれると打消し効果が低下する。スピーカの駆動系は必ず位相遅れや波形ひずみを誘起するので、これに対処するためにさまざまな工夫がなされる。相殺作用は、音響エネルギーが他の機械的エネルギーに比べて微少である場合には、制御コストの経済性をあまり損なわず、騒音伝達の能動制御にも応用できる。以下にその例を他の方法と対比して示す。図2(a), (b)では、閉じられた空間に音源があり、その境界の一部の柔軟構造体に振動が励起される。その構造体、例えば薄板の横振動が外部空間に音場をもたらす。この場合、外部の観測点における音響パワーを低減する制御手法には、2つの接近法がある。図2(a)のシステムでは、観測点の音響パワーの低減は、薄板の横振動の低減に依存するとみなし、横振動の低減を目指す。

すなわち最終的な制御目的は音響パワーの低減であっても、一次的な目標は振動の制御であるので、フィードバックによる振動制御システムを構成する。図2(b)のシステムでは、まず制御なしの場合の観測点での音を一次音とみなす。一方板の振動制御による音を二次音とみなし、板の振動レベルが大きくなり、線形的な振動のダイナミクスが支配的であれば、二次音を生むための振動は単純に元の振動に重ね合わせても良い。従って、この接近法では振動の重ね合わせによる相殺を行うことになる。すなわち上の音

場の制御と同じ手法を薄板の振動制御系に適用することになり、多くの場合、適応フィードフォワード制御システムが用いられる。以下では、このような音場の制御と振動制御との結びつきを考慮し、ロバストフィードバック制御と適応フィードフォワード制御をより詳しく検討する。

3. 制御システムのハードウェア構成

航空機の場合には客室の隔壁は単板ではなく二重壁になっており、二重壁の構造を制御系の構成にも活用できる。すなわち外壁で励起された振動が内壁に伝播する際にこれを低減するように、この空間にアクチュエータを持ち込む。この際隔壁はハニカム構造を持ち、低周波数領域では板の曲げ振動の固有モードを考慮する必要はなく、単純に隔壁板の1次元的な運動を制御するだけでよい⁴⁾⁵⁾。航空機の場合隔壁は平板で構成される場合はまれであり、円筒殻を形成する 경우가一般的である。そこでFullerらは航空機隔壁の騒音伝達の能動制御を単板の円筒殻の振動制御問題ととらえた⁶⁾。以下では問題を一般化かつ単純化して平板状の単板における騒音伝達問題ととらえることにし、単板における曲げ振動を通して振動励起と騒音伝搬が生じると見なす。

平板の曲げ振動を制御するアクチュエータとして電磁加振、油圧加振等の集中力方式が考えられる。この場合テンドン方式に代表されるように、板への作用力の反力を吸収するための支持構造が必要となる。一方、シート状の圧電素子を平板に接着し、厚さ方向に電圧を印加すれば、圧電素子面内での伸びひずみに伴う曲げトルクが生じる。これを曲げ振動の制御用アクチュエータとして利用すれば、支持構造も不要で軽量かつコンパクトなアクチュエータが得られる。図4に示す平板に接着したセラミックス圧電素子(PZT)は、このようなアクチュエータの一例である。動作の信頼性などから今後さらなる多用が予想される。圧電素子は板の曲げひずみセンサとしても利用でき、同一の圧電素子をアクチュエータおよびセンサとして同時使用することも可能である⁷⁾。特に高分子圧電素子(PVDF)などは、センサとしての高信頼性の点から有望視されており、さらなる多用が予想される⁸⁾。

4. ロバストフィードバック制御

フィードバック制御系にとって一般には、制御対象のダイナミクスを表す状態方程式のモデルが必要である。このような隔壁とアクチュエータ・センサを含む制御系のモデル化を、第1章(3)の発生機構の場合について、図3のブロック線図で示す⁹⁾。この場合の振動加振源は乱流境界層のランダムな圧力変動であるが、これを完全な白色雑音が成形フィルタ(Shaping filter)を経て有色化した周波数特性を持つものとする。隔壁の振動特性を曲げ振動の固有

図3 乱流の圧力励起騒音の能動制御系のブロック図⁹⁾

図4 薄板の騒音伝達の能動制御系

モードによって数量化するとし、この固有モードに基づく振動応答を励起フィルタ (Excitation filter) と称する。また加振力に応答する隔壁の振動を固有変数に関する状態方程式で表したものを状態空間モデル2 (State space model 2) と称する。隔壁の各振動モードは、固有振動モード関数に応じて自由空間での音場の圧力強度への寄与を生じる。この寄与の周波数特性を放射フィルタ (Radiation filter) と称する。岡本らはこのようなモデル化に基づいてステップ後流に置かれた平板による騒音伝達のロバスト制御系が設計できることを示した¹⁰⁾。

流れの圧力加振の代わりに入射音波による単板の加振問題を取り扱った著者らの制御実験の例を図4に紹介する¹¹⁾。装置の構成は、図2に類似であり、長方形断面のダクトに内蔵されたスピーカから薄板 (厚さ 0.6 mm) を介する音響伝達を、板の両面に貼付したセンサおよびアクチュエータとしての圧電素子により制御する。このシステムの状態方程式は、板の横振動の固有モード変数と操作入力フィルタの実現の状態量と合わせたものを、拡大系状態変数 $\bar{x}$ と定義すれば、以下のように表される。

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = A_x \bar{x} + B_x u + D_x w_d \\ y = C_x \bar{x}, z = C_z \bar{x} \end{cases} \quad (1)$$

ここに、 w_d は板の横振動を励起する音圧荷重であり外乱とみなされる。このシステムの制御則は、次のような評価

関数 J を最小化する最適レギュレータから得られる。

$$J = \int_{-\infty}^{\infty} [z^T(-\omega)z(\omega) + u^T(-\omega)R(\omega)u(\omega)]d\omega \quad (2)$$

ここに変数 z は制御量で、その2次形式 $\bar{z}^T z$ が振動モードを考慮した外部自由空間への騒音放射パワーを表すように、拡大系の状態変数 $\bar{x}$ との関係 $z = C_z \bar{x}$ を定めてある。制御則は状態フィードバック $u = -K\hat{\bar{x}}$ で表され、 $\hat{\bar{x}}$ の状態推定器を要する。なお、板の横振動のダイナミクスは有限要素モデルを使って導出されるが、そのモデル化誤差を補償するために、操作入力 u の前に高域遮断フィルタを挿入するので、式 (2) の行列 R は周波数重み特性を持つ。この制御実験の結果を図5に示す。ここでは、縦軸に圧電素子センサでの検出量から計算された音響パワーをとっているが、周波数領域 500 Hz までに生じる固有振動モードの内の2つのピークで、顕著なレベルの低減が得られた。

5. 適応フィードフォワード制御

上述のロバストフィードバック制御は制御対象のモデル化に基づいて、そのモデルの不確かさを見込んだうえで安定性を保証するように制御系を構築する。このような頑健さ (ロバスト性) を保証する反面、制御/コスト比に関し

図5 騒音パワーの伝達特性

図6 円筒殻の適応フィードフォワード制御システム¹²⁾

ては、高い性能を望めない。大雑把に言えば、モデルの不確かさの度合いと制御効率とは相反する関係にある。適応制御系は制御対象のシステム同定を実施したうえで制御系を構築し、システムのパラメータの変化に対応して制御系を適応させるという機能を持つ。適応制御では、この仕組みによりロバスト制御系に比べて高い制御効率を期待できる。

周期音の場合、音波の相殺効果には振幅と位相の調整誤差が大きく影響する。そのため、位相誤差の少ないフィードフォワード制御が有効であり、制御対象のパラメータ同定をリアルタイムで行う適応フィードフォワード制御がもっともよく追究されてきた。図6は航空機の胴体(fuselage)を想定した円筒殻(cylinder)の隔壁の騒音伝達の能動制御システムを表す¹²⁾。一次音の音源は円筒殻の外部に置かれたスピーカで、これによる音波は円筒殻の振動を通して内部音圧(一次音)をもたらす。円筒殻の一断面に設置された4個の誤差マイクロフォンの信号 $e_k(n)$ を小さくするように、この断面付近の円筒壁に接着された4枚の圧電セラミックス(PZT)をアクチュエータとして動作させる。この時4枚のアクチュエータの駆動は、基準(Reference)信号を基に個々の適応フィルタを経て変調された信号によってなされる。このような個々の適応フィルタの伝達特性は評価関数、

$$J(n) = E \left\{ \sum_{k=1}^4 e_k^2(n) \right\}; E\{\cdot\} = \text{期待値}$$

を最小に保つような2乗誤差最小化のアルゴリズムによって調整される。この制御システムでは、スピーカの駆動信

図7 2自由度騒音制御系のブロック線図¹³⁾

号がそのまま基準信号としても用いられており、典型的な適応フィードフォワード制御系を構成する。このような制御系によって円筒殻の固有振動数 210 Hz において約 2~5 dB の減音が、また円筒内部の共鳴振動数 305 Hz において約 2.0~2.5 dB の減音が得られた。

6. 2自由度制御

適応フィードフォワード制御は、周期音に関しては多大の成果を挙げたが、ランダムな騒音で基準信号の有効性が損なわれる場合には、性能が大幅に劣化する。乗用車の車室内騒音の能動制御(ANC)の分野では、こもり音のような周期音のみならず、連続周波数帯域騒音をも制御対象とするようになり、新しい制御アルゴリズムが要請されるようになった。現時点で制御帯域を低周波数領域に限る場合には、フィードフォワード制御系とフィードバック制御系を併用する2自由度制御系が有望と見られる。図7には、佐野ら¹³⁾の2自由度騒音制御系のブロック線図を示す。この図において、 r は一次音の駆動に関連した基準信号を、 e は車室内の空間においた誤差マイクロフォンの信号を、それぞれ表す。車室内の制御空間には、一次音圧 d と制御用スピーカから発せられる二次音が重ね合わさって誤差信号 e が生じる。 e を基にフィードバック制御器の伝達関数 $Q_d(s)$ を経た負帰還信号と、フィードフォワード制御器から得られた信号を重ね合わせてスピーカに入力する。この制御系のフィードバック制御系において、スピーカとマイクロフォンの距離が近いと信号雑音駆動によるハウリング現象が生じる。このように不安定なハウリングを回避するために、音波の伝播経路を持ち、むだ時間要素を含む制御対象の伝達関数 $P(s)$ の近似モデル伝達関数 $\bar{P}(s)$ のフィルタも並列に挿入する。この際、 $\bar{P}(s)$ は $P(s)$ の近似関数であり、モデル化の不確かさを含む。 $Q_d(s)$ はこのような不確かさをも補償するロバスト制御器とする。佐野らはこのような2自由度制御系が約 300 Hz までの連続周波数音の制御に有効であることをシミュレーションにおいて示した。中井らは同様の原理に基づくが、フィードフォワード制御系に別の工夫を盛り込んだ2自由度制御系を開発し、周期音を含む広帯域騒音に対して約 300 Hz までで、20 dB 近い減音の実験結果を得た¹⁴⁾。

4. お わ り に

上に紹介した2自由度制御はいずれもANCとしての騒音制御として用いられているが、騒音伝達における振動制御にもそのコンセプトを流用できるであろう。ただし、隔壁の振動制御系において複数のセンサとアクチュエータを用いる多入力多出力(MIMO)の系では、現在制御対象の同定法が確立されていない。今後このようなMIMOの系の同定に部分空間法¹⁵⁾の応用が盛んになると予想される。

参 考 文 献

- 1) P. A. Nelson and S. J. Elliot : Active Control of Sound, Academic Press, New York, N. Y., (1992).
- 2) C. R. Fuller, P. A. Nelson and S. J. Elliot : Active Control of Vibration, Academic Press, New York, N. Y., (1996).
- 3) C. F. Ross and M. R. J. Purver : Active Cabin Noise Control, Proc. Active '97, (1997) XXXIX.
- 4) D. R. Thomas and P. A. Nelson : Feedback Control of Sound Transmission through Stiff Lightweight Partitions, Proc. Internoise '94 (1994) 1283.
- 5) Y. Mitani, S. Akishita and P. A. Nelson : Self-Tuning Control for Sound Transmission through Double Panel by Using Piezoelectric Actuators, Proc. Internoise '97, (1997) 485.
- 6) C. R. Fuller, S. Snyder, C. Hansen and R. Silcox : Active Control of Interior Noise in Model Aircraft Fuselage Using Piezoceramic Actuators, AIAA Paper 90-3922, (1990).
- 7) 三谷祐一郎, 横井健二ほか: 圧電センサ/アクチュエータ同時使用による板の騒音伝達の能動制御, 日本機械学会論文集(C), **63**, 613 (1997) 3053.
- 8) 池田拓郎: 圧電素子材料学の基礎, オーム社, (1990).
- 9) D. R. Thomas and P. A. Nelson : Active Control of Turbulent Boundary Layer Noise in Aircraft, AIAA Paper 93-4423, (1993).
- 10) 岡本 健, 秋下貞夫: 隔壁上の流れの乱れによる騒音放射の能動制御, 日本機械学会関西支部講演論文集, No. 964-1, (1996) 708.
- 11) S. Akishita, T. Okamoto and Y. Mitani : Power Optimal Control of Sound Transmission through Plate by Use of Piezoelectric Elements, Proc. Internoise '96, (1996) 1207.
- 12) R. J. Silcox, K. H. Lyle, V. L. Metcalf and D. E. Brown : A Study of Active Structural Acoustic Control Applied to the Trim Panels of a Large Scale Fuselage Model, Proc. 1st CEAS/AIAA Aeroacoustics Conf., (1995) 1095.
- 13) 佐野 久, 宮本真一, 足立修一: フィードバック制御にIMCを用いた2自由度型アクティブ騒音制御に関する研究, 日本機械学会論文集(C), **63**, 608 (1997) 1208.
- 14) 中井英雄, 天野也寸志, 木村忠司, 長野 誠: アクティブノイズ制御系への二自由度制御手法の適用, 日本機械学会論文集(C), **63**, 608 (1997) 1214.
- 15) 片山 徹: 解説 部分空間法によるシステム同定-実現理論からの接近, システム・制御・情報, **41**, 9 (1997) 380.