

設備騒音低減システム

ANC System for Insertion Machine

崎 山 和 広⁽¹⁾ 高 島 淳 行⁽²⁾
Kazuhiro Sakiyama Atsuyuki Takashima

佐 古 和 也⁽³⁾ 永 海 正 明⁽⁴⁾
Kazuya Sako Masaaki Nagami

要 旨

能動騒音制御技術（アクティブ・ノイズ・コントロール：ANC）とは、従来からの吸音、共鳴などを用いた受動型制御技術（パッシブ制御）に対して、騒音と同振幅、逆位相の音を人工的に生成し、干渉させることによって騒音を低減させようとする技術である。

当社では、騒音制御技術開発のひとつとしてDSP（ディジタル・シグナル・プロセッサ）を応用した設備騒音低減システムの開発を行っている。

本稿では、アクティブ制御、パッシブ制御の消音原理と現在のアクティブ騒音制御技術の開発状況について解説すると共に、設備騒音低減システムの基本となる処理内容および騒音制御を実施した事例として、当社中津川工場内のインサージョンマシンから発生する騒音の対策結果について報告する。

ANC (Active Noise Control) is based on technology for cancelling sound wave.
The noise is actively reduced by adding same amplitude but 180 degree phase shifted sound wave to the original sound wave.

We have developed ANC system using digital signal processor(DSP).

This report explains it's basic idea of noise control system and a outline of active signal processing, and also describes it's feature and that result of the experimental ANC system for THE INSERTION MACHINE.

(1)～(4) 開発本部技術開発部

1. はじめに

世界的な環境保護の高まりの中、大気や河川の汚染防止など生命に関わる問題の対策から、より身近な騒音問題まで総合的な改善が求められている。

騒音対策は、騒音規制条例¹⁾が制定された1968年以降本格化した。当初は顕著な騒音公害の対策に重点がおかれ行政指導主体で推進された。例えば住宅地域に隣接した工場・建設作業や幹線道路沿いの自動車騒音の対策など、生活環境保全に主眼がおかれていた。その後今日まで、人々の生活水準向上と共に生活環境の快適性、つまり質の向上を目指した改善に主眼がおかれるようになってきたのである。

当社においては1983年頃からDSPを用いて音楽信号の位相・振幅を調整して音の聞こえる方向を制御する音像制御²⁾や音場制御³⁾と音像制御を組み合わせ⁴⁾臨場感を高める開発に取り組んできた。最近ではこの技術を生かして、位相・振幅をリアルタイムに制御して、騒音を低減する技術開発に取り組んでいる。

本論文では1991年から実施したチップ部品実装機（インサージェンマシン）のモータ騒音低減実験について報告する。

2. 騒音制御

騒音を低減する方策として、パッシブ制御とアクティブ制御の2つのアプローチがある。

前章で記述した騒音公害対策として主に用いられてきたのがパッシブ制御であり、幹線道路沿いの防音壁設置や騒音を発生する装置のコンクリートブロック等による遮蔽、二重窓の設置、耳栓やイヤードیفンダの使用がこれにあたる。

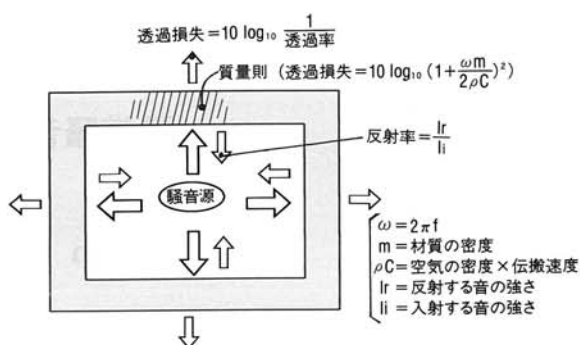


図-1 パッシブ対策と関連するパラメータ

Fig.1 A basic idea of passive system

図-1に最も単純な例を示す。同図は騒音源をある質量をもつパッシブ部材でとり囲んだ例を示したものである。パッシブ部材の効果は騒音源からの音が外部にどれだけ漏洩するかを示す透過損失によって表現でき、この値が大きいほど騒音低減効果がある。また透過損失は質量則によって拘束される。この質量則から、良好な騒音低減効果は密度が高く重いパッシブ部材を多量に使用することによって得られ、また騒音の周波数が高いほど少量のパッシブ部材でも効果が得やすく軽量化が可能なが分かる。

一方アクティブ制御は電子回路を用いて、騒音と逆位相の音を生成し、音波干渉によって騒音を低減しようとするものである。図-2に基本的な例

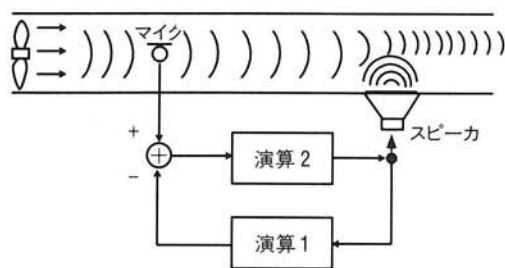


図-2 アクティブ制御の基本的な例

Fig.2 A example of active system

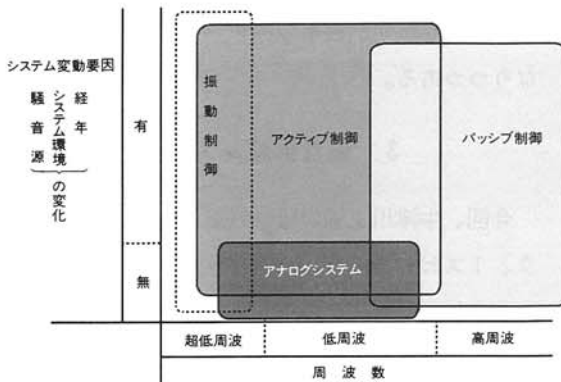


図-3 騒音低減のアプローチ

Fig.3 The relation between Active-system and Passive-system

を示す。この原理図ではマイクで先に收拾した騒音信号を演算処理によってスピーカ位置で逆位相になるように調節して騒音と干渉させ、それ以降に伝わる騒音を低減するものである。

従ってアクティブ制御の場合は音波の波長が長い（低い）周波数の場合、騒音低減効果の得られる範囲が広がるが、周波数の高い騒音においては効果範囲が狭くなり良好な結果が得られなくなる。

図-3に示すようにパッシブ制御とアクティブ制御は得意とする周波数が異なり、互いに補完する関係になっている。騒音を合理的に対策するため

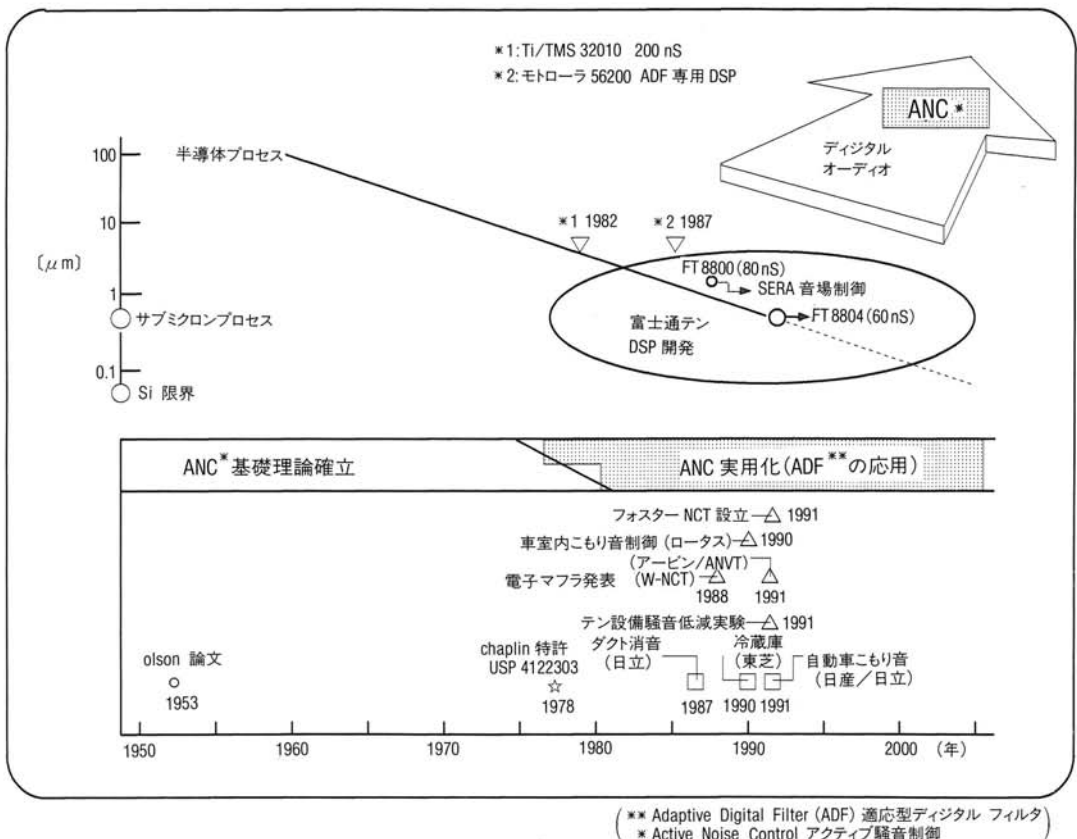


図-4 LSI技術と騒音制御開発

Fig.4 Histry and future view of Active noise control technologies

には、これら2つの制御技術を効果的に使い分ける必要がある。経済的にも、また小型化・軽量化のためにも、可能な限り少量のパッシブ部材によって比較的高い周波数の騒音を対策すると共に、パッシブ対策では効果的な対策が困難な低い周波数の騒音をアクティブ制御によって低減することが必要になってくる。なお、一般的にアクティブ制御とパッシブ制御を効果的に切り分ける周波数は500Hz～700Hzとされている。

さて、つぎにアクティブ制御の開発動向について記述する。アクティブ制御のアイデアは古くから存在し、既に1953年には基本原理を示した論文が発表され、1980年代にはいくつかの基本的な特許⁵⁾が権利化されている。

しかし具現化のためのLSI技術が伴わなかったために実用化されたのは、ほんの数年前である。

図-4にLSI技術の進歩とアクティブ騒音制御技

術開発の関連を示す。1987年以降、DSP技術を応用した製品開発が日本の各メーカによって活発になりつつある。

3. 騒音低減システム

今回、中津川工場の騒音対策用として、1マイク、1スピーカのフィードバック型騒音低減システムを試作した。このシステムはマイク位置での騒音を低減するものであり、これを個々のチップ部品実装機に設置することにより工場内の騒音低

表-1 システム機能概要

名 称	機 能 概 要
①システム電源部	②、③、④に直流電源(DC12V)を供給
②センサマイク部	騒音を検出して③に入力
③コントローラ本体部	②からの入力信号をもとに、騒音を低減するためのキャンセル音を生成して④に入力
④パワーアンプ部	③から入力された信号を電力増幅して⑤に入力
⑤スピーカ部	④からの電気信号を音に変換

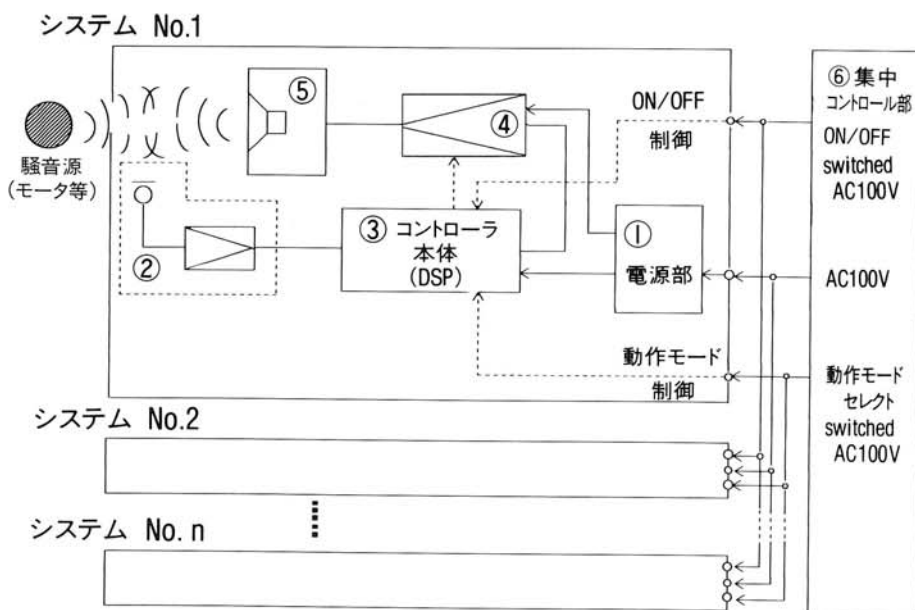


図-5 システム構成

Fig. 5 Structure of ANC system

減を実現するものである。

以下に構成、仕様、信号処理内容、およびその特徴を示す。

3.1 システム構成

システムは表-1の5つのユニットによって構成されている。

これらを1システムとし、複数台のシステムを同時に制御できるよう、集中コントロール部を設けている。図-5システム構成を示す。



図-6 コントローラ本体

Fig.6 Controller of ANC system



図-7 集中コントロール部

Fig.7 Control panel

センサマイク、スピーカは騒音源近くに設置されるため耐環境性（温度、ガス、風等）に注意が必要である。

図-6にコントローラ本体の写真を、また図-7に集中コントロール部の写真を示す。

3.2 仕様

表-2にシステムの仕様を示す。

周波数範囲の高周波限界は空間消音の物理的な制約（周期が短くなるほど空間全体に効果を得るのは困難となる）からくるもので一般的な騒音制御装置と同等である。

また低周波数はスピーカの音圧限界からくるものであり使用するスピーカを低周波数用とすれば低周波特性は改善出来る。同様に音圧限界もスピーカの再生能力により限界が設定されるものである。したがって、対象騒音が低周波数で大音圧の場合、大型のスピーカが必要となる。

効果量は対象騒音のレベル、種類によって影響

表-2 システム仕様

項 目	仕 様	備 考
制御周波数範囲	100Hz～500Hz	
制御音圧範囲	105dB SPL 以下	
標準効果量	10dB～30dB	センサマイク位置での測定値 変化速度 10Hz/sec以下
制御入力電圧	AC100V	
動作保証環境	腐食物質等を含まない雰囲気中	
動作温度範囲	－30℃～85℃	
動作湿度範囲	85%以下	相対湿度
動作保証時間	5000h程度	
電源電圧	AC100V	
消費電流	50W (100V)	
重量	30kg	
外形	W452×H471×D350	単位：mm
DSP	24ビット浮動小数点演算	FT8802
A/D・D/A	16ビット固定	
サンプリング周波数	1.5kHz	

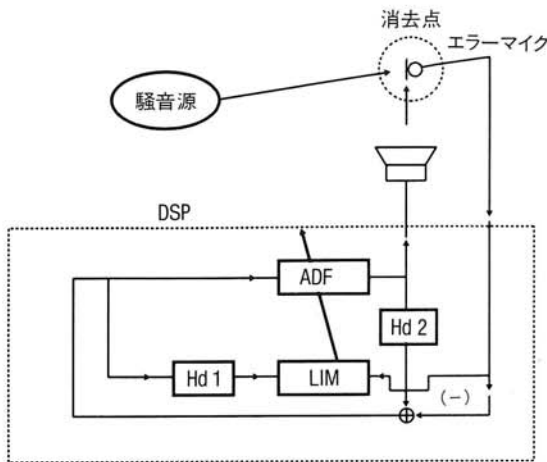


図-8 信号処理概略

Fig.8 Outline of signal processing

表-3 各処理の機能概要

ADF : 適応フィルタ	騒音源に対応してセンサマイク点の騒音が最小となるように動作する
LIM : 学習同定法 (=NLMS)	適応フィルタの係数更新アルゴリズム 騒音レベルに応じて更新定数を変更されるもので非定常な騒音レベルの消音で安定な適応速度が得られる
Hd : 消音スピーカ系伝達関数	DSP出力よりDAコンバータ、アンプ、スピーカ、空間、マイク、ADコンバータなどを通過してDSP入力までの伝達関数
Hd1 : (=Hd) 疑似消音スピーカ系伝達関数	適応フィルタ係数更新補正系 (Filtered X の適応フィルタへの応用)
Hd2 : (=Hd) 疑似消音スピーカ系伝達関数	フィードバック型ANCシステムの安定動作 (消去音のセンサマイクへの回り込み防止)

を受けるものであり、本システムでは定常的な周期性騒音ほど効果大となる。

3.3 信号処理内容

本システムではDSPを用いた適応信号処理により精密な制御を行い消去音を生成している。以下にその処理内容を示す。

3.3.1 信号処理概要

図-8に信号処理概略をまた表-3に各処理の機能概略を示す。

消去音を生成する制御部は適応フィルタを用い

ているので騒音源の変化(振幅、周波数等)に対応可能である。また係数更新方法は騒音源レベルに対応した更新定数をもつLIM(学習同定法)で安定した制御効果を得る。適応フィルタを騒音制御へ応用するために伝達関数Hd1を用い、消音スピーカ系(アナログ部、スピーカ、空間、マイク等)による制御遅れを補正している。参照信号を安定して得るために消去音のセンサマイクへの回り込みを伝達関数Hd2により防いでいる。

3.3.2 適応フィルタ

適応信号処理とは信号処理課程で必要に応じてシステムの変化する機能を備えた信号処理である。

そのシステムを適応フィルタといい、またシステムの特性を変化させる方法を適応アルゴリズムという。

図-9に入力信号に対する最適な処理を行う適応信号処理システムのブロック図を示す。入力信号 $x(n)$ に対する応答を $y(n)$ とすると、希望する応答 $d(n)$ との差(誤差信号) $e(n)$ を利用して、処理システムパラメータを自動的に更新して最適なシステムを構成する。これによって構成されたフィルタは希望する応答 $d(n)$ への伝達関数 H_c と同様

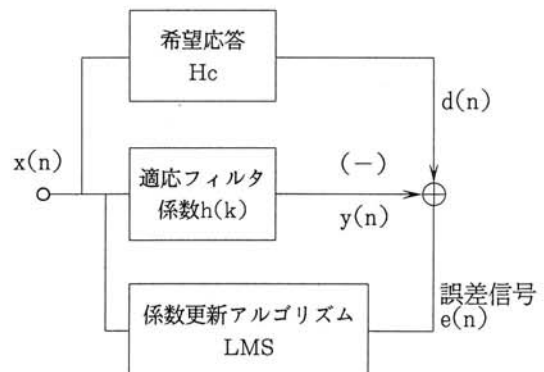


図-9 適応信号処理システムのブロック図

Fig.9 Block diagram of adaptive signal processing

の伝達関数となるものである。

ここで適応フィルタについての概要を述べる。

適応フィルタは誤差信号を小さくするようにタップ重み $\{h(k)\}$ (フィルタ係数) を逐次調整するものである。

適応フィルタの構成をFIR (非再帰型) フィルタとすると(1)式のように示される。

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k) x(n-k) \quad \cdots(1)$$

また、誤差信号 $e(n)$ は(2)式に示されるものである。

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad \cdots(2)$$

そしてこの誤差を最小に導く方法として一般に用いられているのがLMS (least Mean Square : 最小平均二乗) アルゴリズムであり、(3)式で示されるものである。

$$h(k+1) = h(k) + 2\mu \cdot e(k) x(k) \quad \cdots(3)$$

また、これを入力信号で正規化したNLMS (Normalized LMS : 正規化LMS=LIM : 学習同定法) を用いることにより非定常なレベルの騒音信号に対しても一定の応答速度を得られる。

3.3.3 適応フィルタの応用

この適応フィルタをアクティブ低減システムへ応用するための手法を述べる。

まず、アクティブ低減の原理的な構成図を図-10に示す。これは騒音源マイクにより参照信号を入

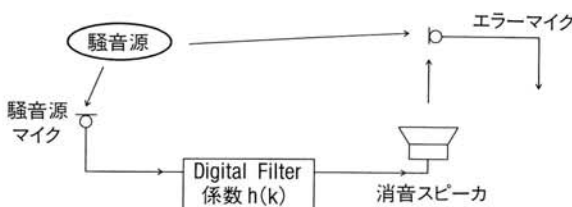


図-10 アクティブ低減の原理的な構成図

Fig.10 Elements of basic adaptive system

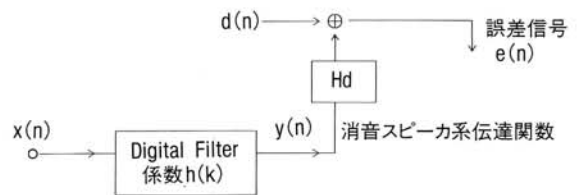


図-11 アクティブ低減システムのモデル化

Fig.11 ANC system modeling

手しDSPにより処理を行い、スピーカより消音を出力しエラーマイク位置で消音するものである。またこれをモデル化したものが図-11である。

エラーマイクの位置での音圧を小さくするためにはデジタルフィルタの係数 $h(n)$ を最適に決めることである。ここで図-11の $h(n)$ と Hd を入れ換え図-12のようにすることにより適応フィルタの理論を応用できる。

図-12の適応フィルタにLMSアルゴリズムを用いる場合、図-13のように適応フィルタの入力信号 $v(n)$ はフィルタ Hd の出力信号となる。

$$v(n) = Hd \cdot x(n) \quad \cdots(4)$$

そこで(3)式の係数更新式は(4)式を代入すると、

$$h(k+1) = h(k) + 2\mu \cdot e(k) (Hd \cdot x(k)) \quad \cdots(5)$$

となる。

このアルゴリズムが“filtered x”アルゴリズム

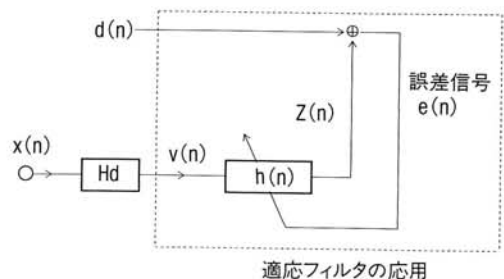


図-12 適応フィルタの応用

Fig.12 Application of adaptive filter

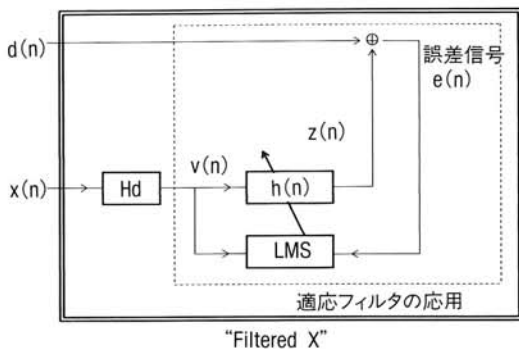


図-13 “filtered x” アルゴリズム

Fig.13 Block diagram of ANC system based on Filtered X' algorithm

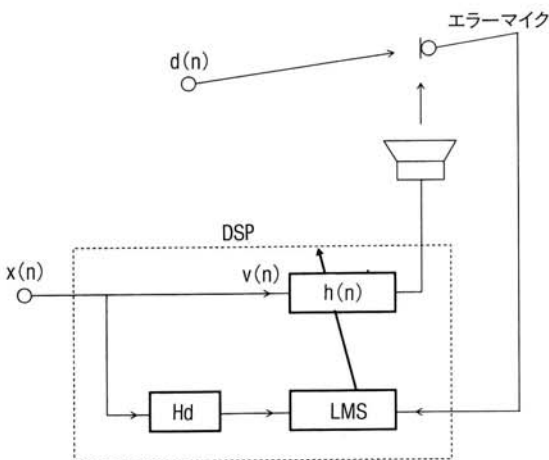


図-14 適応フィルタの応用

Fig.14 Application of adaptive filter for ANC system

と呼ばれるものである。⁶⁾

この(5)式より図-13に適応アルゴリズムを応用するためには図-14のようなシステムとなる。

なお、このスピーカ系伝達関数 H_d はシステム作動前に測定しておく必要がある。

3.3.4 伝達関数の測定方法（初期等化）

スピーカ系伝達関数 H_d はインパルス応答であるので、測定方法はいろいろな方法が考えられるが、本システムでは適応フィルタを応用した図-15のシステムにて測定している。⁷⁾

参照信号としてDSP内でランダムノイズを発生しスピーカ、マイクを通過した信号にて適応フィルタを作動させることにより $h(n)$ が H_d と同等のものとなる。

3.3.5 本システムへの応用（フィードバック専用系）

図-14のシステムでは騒音源マイクとエラーマイクが必要となる。本システムではそのマイクを共通化し一つのマイクで実現することでハードのコンパクト化、および設置の簡易化を図っている。その方法としてまず図-16のようにエラーマイ

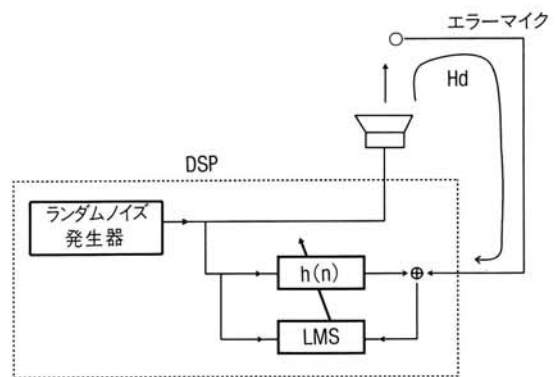


図-15 伝達関数の測定システム

Fig.15 Measuring system for transfer function

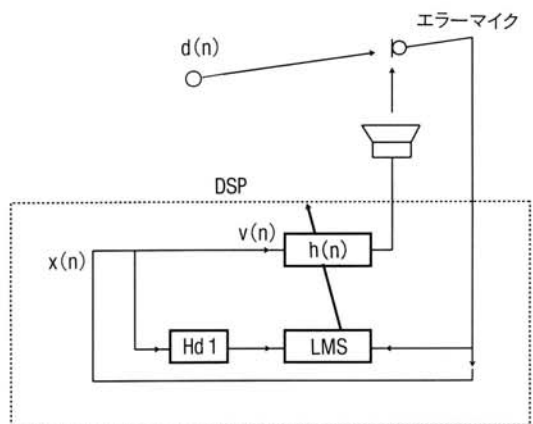


図-16 フィードバック型ANCシステム

Fig.16 Type of feed back block diagram

ク信号を参照信号としてそのまま使用することを考える。この場合、動作開始時にはエラーマイクは騒音をそのまま捕らえるため参照信号として使用できるが、消音効果が得られたときにはエラーマイク信号は減少し、参照信号も無くなるものである。これにより消音波が影響され消音効果が減少する。この動作を繰り返すことにより不安定な系となってしまう。

そこでこの消音波の影響を無くすために図-17のようにもう一つのHdを持ち、エラーマイク信号から消音波を引くことにより安定した参照信号として騒音信号を得ている。

3.3.6 本システムの特徴

以上のように本システムは構成されているが、ここにその特徴をまとめる。

- 1) 騒音源センサ、エラーセンサを共通化しているためマイクが一つであり、ハード規模が小型化できる。
- 2) 騒音源センサが不要であるため、騒音源信号（モーター回転信号など）が要らず、設置が簡易である。

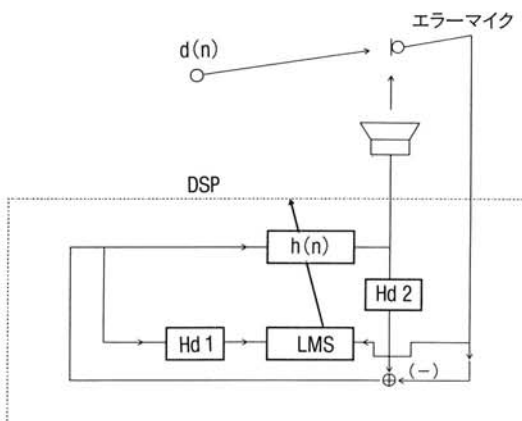


図-17 フィード・バック型ANCシステム
Fig.17 Configuration of ANC system for mechanical equipment

- 3) 消音位置での騒音を参照信号として用いているためモーター回転に無い高調波などの騒音にも対応可能である。
- 4) スピーカ系伝達関数の測定モード（初期設定）をシステム内にもっていることにより騒音状況の変化に対応可能である。（再設定可能）
- 5) 対応フィルタにより騒音の周波数、振幅変化にも対応可能である。

4. 実施例

中津川工場内のインサージョンマシンを対象に騒音制御を行った事例について述べる。

4.1 インサージョンマシンの騒音

インサージョンマシンの概略構造を図-18に示す。インサージョンマシンから発生する騒音は断続的な比較的周波数の高いメカニカル音と、電源周波数に起因した低周波数騒音（モータ音やトランスから発生する騒音）からなる。特にモータから発生する騒音は図-19に示すように低周波数に高い音圧ピークを持ったものである。

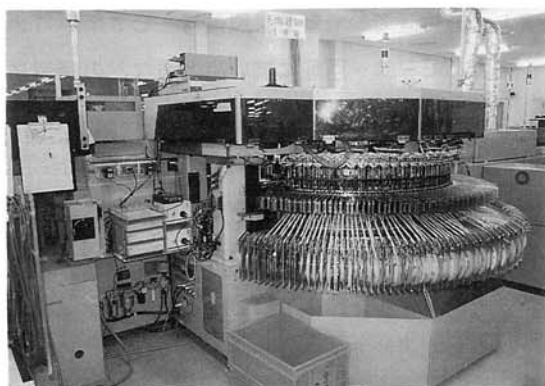
工場内作業者の多くは騒音対策のため耳栓を使用しているが、このモータから発生する低周波数の騒音には耳栓の特性上ほとんどその役目を果たしていない。そこで今回実施した騒音制御は、この低周波数領域の騒音低減を狙った。

4.2 騒音対策事例

インサージョンマシンから発生する騒音の具体的な対策内容について述べる。

4.2.1 騒音低減システムの適用

モータが設置されているのは図-20、図-21に示すようにロータ下部のモータ室内であるが、放熱性を考慮すると密閉による遮蔽はできない。そこでアクティブ制御を用いた騒音低減システムにより対策を行った。システム設置に際して、キャン



平面図

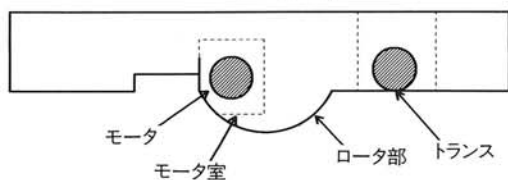


図-18 インサクションマシン

Fig.18 Insertion machine

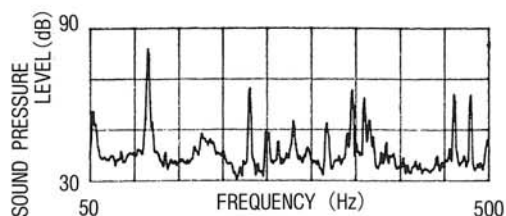


図-19 インサクションマシンの騒音

Fig.19 Insertion machine's noise

セルスピーカとセンサマイクを騒音源であるモータに極力近づけ、制御時の位相ズレによる音圧悪化を避けるよう配置した。

また、システム本体はモータの発熱による熱影響を避けるためインサクションマシンのロータ上部に設置した。(図-22)

これらシステムの設置方法を検討し、常に安定した効果が得られるよう配慮した。また、工場全体での騒音低減効果を得るためインサクションマ

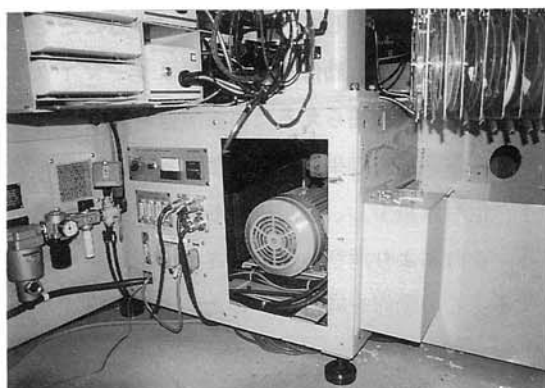


図-20 モータ室

Fig.20 motor chamber

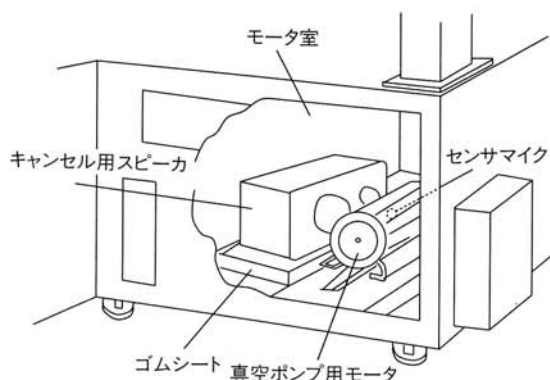


図-21 モータ室の構造

Fig.21 Structure of motor chamber



図-22 騒音低減システム

Fig.22 ANC system for mechanical equipment

シン8台全てに対して本システムを適用した。

4.2.2 パッシブ制御対策方法

硬化装置内トランス部から発生する騒音は、側面カバー用金属パネルの振動による共振音であり音響的に制御を行う本騒音低減システムでは対策困難なため、図-23に示すように制振材（ブチルゴムシート）によるパッシブ対策（振動抑制）を適用した。

カバーパネルの内側全面に制振材を貼付し、パネルの固有振動数を変化させることにより共振音の低減を行った。

4.3 効果

アクティブ制御、パッシブ制御の騒音対策によって得られた効果について述べる。

4.3.1 アクティブ制御による効果

騒音低減システムの制御を作動させる場合とさせない場合の、モータ室より1mの位置での騒音スペクトル比較を図-24に示す。

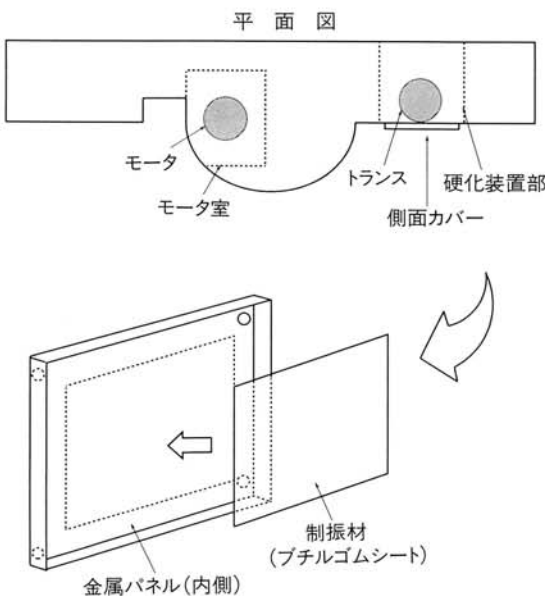


図-23 パッシブ制御対策方法

Fig.23 Measurement of passive control

このようにモータから発生する低周波数騒音の1次成分および2次成分（117.5Hz&235Hz）は騒音低減システムにより低減されている。図-25に示すインサクションマシン本体のインテンシティ解析・ベクトル線図の結果からも容易に効果を確認することができる。（ベクトル線の長さや方向が変化）

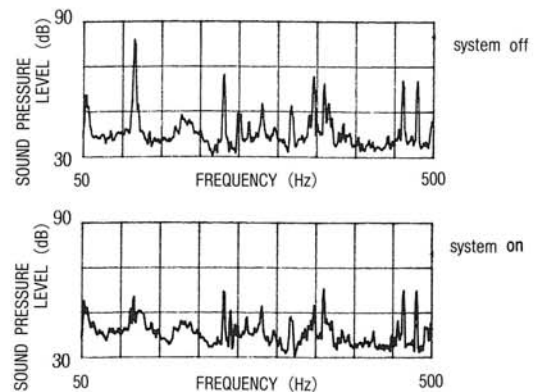


図-24 騒音スペクトル比較 (off/on)

Fig.24 Comparison of noise spectrum (off/on)

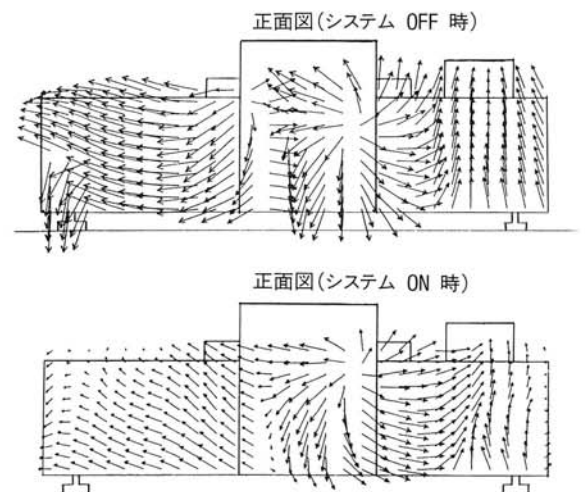


図-25 インテンシティ測定・ベクトル図比較

Fig.25 Comparison of sound intensity level (on 117.5Hz)

4.3.2 パッシブ制御による効果

硬化装置内トランス部から発生する騒音を制振材の貼付により対策した結果、120Hzのピーク騒音に対し、23.6dB（パネル前面5cmの位置）の騒音低減効果が得られた。（図-26）

4.3.3 工場内通路での効果

また、工場内通路（集中コントロールパネル位置）での騒音スペクトル比較を図-27に示す。アクティブ、パッシブ両制御を行った結果、オーバ

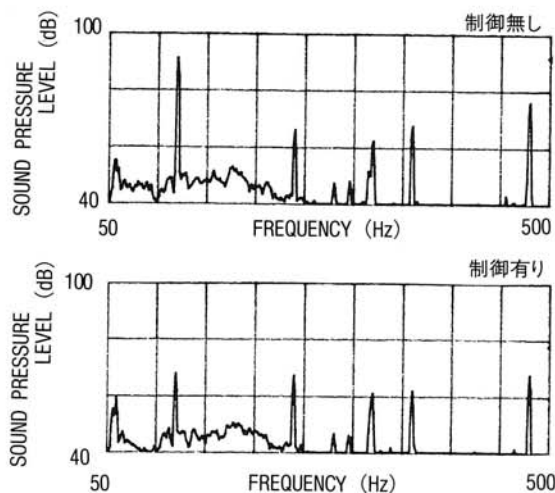


図-26 騒音スペクトル比較

Fig.26 Comparison of noise spectrum

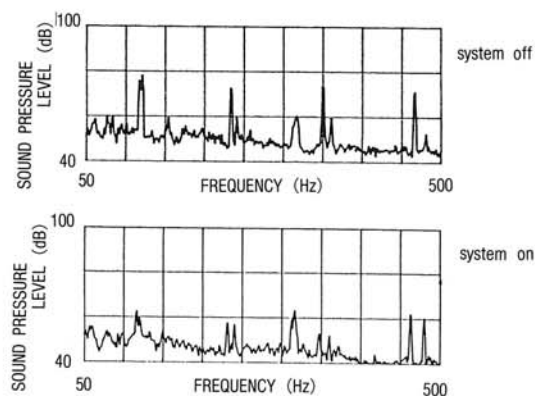


図-27 騒音スペクトル比較 (off/on)

Fig.27 Comparison of noise spectrum (off/on)

オールA特性レベルで約7 dBAの騒音低減効果を得ることができた。

4.3.4 官能評価

定量評価の裏付けとして、工場内作業者に対し形容詞尺度を用いた評価語による心理的効果の調査⁸⁾を行った。その評価語の中から騒音に対する迫力性因子および金属性因子に関わる語句の評価結果を図-28に示す。

対策する前後を比較すると騒音の“迫力”が減少し“かん高さ”が増加している。このことから推測すると、今回の騒音制御により低周波数騒音が改善され、対策されていない比較的高い周波数騒音（メカニカル音など）の影響が大きくなったと解釈することができる。また、“騒々しさ”および“大きさ”の結果がほとんど変化していないのは、騒音の絶対レベル（オーバオールレベル）の変化量が比較的少なかったためであろうと推測する。

これらの結果は定量評価によって得られた騒音低減効果量結果に合致している。

5. 今後の展開

今回の一連の実機実験を通して①騒音の基本的な測定評価技術（本社工場および中津川工場の実

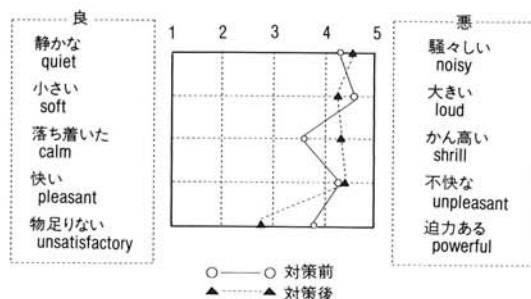


図-28 評価結果

Fig.28 Result of valuation

情調査含む)、②フィードバック型アクティブ騒音低減技術の応用技術、③パッシブ部材の最適配置によるパッシブ基本技術(パッシブ部材の調査・効果確認含む)、④騒音の官能評価の実施方法(一例)など今後の騒音制御を進める上で貴重なデータや技術の一部を獲得することができた。

ただし、官能評価結果にも現れたように騒音低減効果は認知できるが、工場内で作業される方々に十分なメリットとして捉えて頂くまでに至っていないのも事実である。

これは、騒音に対する評価がオーディオと同じく多分に人間の感性や精神状態、そして環境(暗騒音レベル)などの影響を受けるためである。

これらを受けて今後の展開としては、①製品化ターゲットの明確化と早期製品展開(工場や住宅設備騒音への適用・実用化の推進)、②騒音制御用DSPや、センサ、アクチュエータなどデバイス開発と実機レベルでの最適用法の確立、③騒音の音色評価含む騒音評価技術の確立(快適な騒音の音質目標設定など)、④パッシブ制御技術の蓄積と整理、⑤振動のアクティブ制御の要素技術確立(騒音源でのアクティブ制御を効果的にするための技術確立)等を強力に推進していきたい。

6. お わ り に

最近の騒音制御関連の学会発表等の盛況ぶりを見ると、騒音に対する関心の根強さと各社の騒音制御応用製品市場に対する期待を痛感する。

同時に騒音制御関連応用製品の実用化が始まったのがごく最近であることから考えて解決すべき

課題の多さを知ることができる。

将来的に当社の騒音低減技術が多くの人々の快適性向上に貢献できるよう、また騒音制御分野の先行者のポジションを獲得することが出来るよう、製品化に根ざした要素技術開発を継続したい。

最後になりましたが実機実験および評価にご協力頂いた中津川工場の皆さんに感謝します。

参 考 文 献

- 1) 騒音規制法(昭43法律98, 改正昭46法律88)
- 2) 大和 他: “車室内における非対象性音場の改善方法”, 日本音響学会講論集 1-5-14, (1988. 3)
- 3) 長野 他: “汎用信号処理LSI(FDSP-3)を用いた残響付加方式の一検討”, 電子通信学会全国講論集371(1985. 11)
- 4) 藤本 他: “デジタル信号処理LSIを用いた音場制御装置の一検討”, 電子情報通信学会 EA87-59(1987. 11)
- 5) USP4122303(1978. 10), Chaplin 他
- 6) HAMADA, “SIGNAL PROCESSING FOR ACTIVE CONTROL”, ASJ Symposium 91.Active Control of Sound and Vibration(1991. 4)
- 7) 浜田、三浦: “騒音のアクティブコントロールに関する現状と課題”, 電子情報通信学会 EA88-25(1988. 6)
- 8) 難波: “音色の測定・評価法とその適用例”, 応用技術出版, (1992. 7)