

東海大学大学院 令和3年度 博士論文

超磁歪アクチュエータを用いた小型モビリティの車内音響制御に関する研究

指導 加藤 英晃 講師

東海大学大学院 総合理工学研究科

総合理工学専攻

加藤 太郎

# 目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景および目的	2
1.1.1 小型モビリティの普及と車内騒音による快適性の課題	2
1.1.2 小型モビリティの車内騒音対策の現状	3
1.1.3 本研究の目的	7
1.2 超磁歪アクチュエータを用いた小型モビリティのアクティブノイズコントロールシステムの提案	9
1.2.1 アクティブノイズコントロールの原理と基本構成	9
1.2.2 超磁歪アクチュエータによる壁面振動を利用した制御音波の出力	12
1.2.3 壁面の振動特性を考慮したアクティブノイズコントロールによる騒音制御	17
1.2.4 生体情報計測を用いた車内音響制御による快適性評価	18
1.3 従来の研究	19
1.3.1 超磁歪材料を用いた小型アクチュエータ	19
1.3.2 小型アクチュエータを用いた騒音低減に関する研究	20
1.3.3 自動車車室内の音響環境と快適性評価	21
1.4 本論文の構成および概要	24
第2章 低周波制御音波の出力を考慮した超磁歪アクチュエータ の設計	26
2.1 はじめに	27
2.2 超磁歪アクチュエータの構造と超磁歪材料が発生する力	28
2.2.1 超磁歪アクチュエータの構造	28
2.2.2 コイルに流れる交流電流に対する磁歪による発生力	32
2.2.3 解析モデルと超磁歪材料の材料特性	35
2.3 超磁歪アクチュエータモデルを用いた電磁界解析	39
2.3.1 永久磁石の有無による磁歪による発生力の比較	39

2.3.2	コイルに流れる交流電流値を変更した際の磁歪による発生力	41
2.4	電圧制御型アンプの使用を考慮したアクチュエータの電磁界解析	45
2.4.1	交流電流源の周波数変更による磁歪による発生力の比較	45
2.4.2	ロードノイズ周波数帯域の磁歪による発生力の結果と考察	45
2.5	まとめ	48

### 第3章 壁面の振動特性を考慮した超磁歪アクチュエータの設置

	位置による騒音低減効果	49
3.1	はじめに	50
3.2	消音実験用箱を用いたアクティブノイズコントロールによる騒音低減	51
3.3	超磁歪アクチュエータを設置する壁面の振動特性による騒音制御性能の向上	55
3.3.1	壁面の固有振動数の計測による制御対象周波数の決定	55
3.3.2	超磁歪アクチュエータの設置位置による制御音波の音圧レベルの比較	58
3.3.3	壁面の振動モードとアクチュエータの設置位置の関係	61
3.4	壁面の振動特性を考慮した超磁歪アクチュエータを用いたアクティブノイズコントロールの実験	63
3.4.1	消音実験のシステム	63
3.4.2	超磁歪アクチュエータの設置位置による消音量の比較	68
3.5	複雑な音場でのアクティブノイズコントロール	71
3.5.1	小型モビリティを用いた消音実験	71
3.5.2	アクティブノイズコントロールによる消音量	74
3.6	まとめ	76

### 第4章 心理状態推定による車内騒音に対する快適性評価

4.1	はじめに	78
4.2	生体情報計測による心理状態の推定	79
4.2.1	脳波測定による快適性評価	79
4.2.2	$\alpha$ 波出現率による快適性の評価指標	81
4.3	脳波測定による車内音響環境の定量的評価	84

4.3.1	実験条件および方法	84
4.3.2	乗員の好みの音楽による騒音のマスクング	86
4.3.3	$\alpha$ 波出現率による好みの音響環境の評価	87
4.4	乗員が不快に感じる騒音の周波数と音圧レベルの関係	89
4.4.1	ラウドネスによる周波数と音圧レベルの実験	89
4.4.2	実験結果および考察	91
4.5	車内騒音の低減を好む乗員の特徴	93
4.5.1	無響音室での脳波測定	93
4.5.2	結果および考察	95
4.6	まとめ	97
第5章 結論		98
謝辞		102
付録		103
参考文献		104

## 本論文で用いたおもな記号

$G(s)$	: 位相補償
$K$	: 超磁歪アクチュエータから出力する制御音波信号のゲイン
$d$	: 騒音が制御対象に透過して、消音量の計測用センサまでの伝達経路
$P$	: 壁面と消音量の計測用センサまでの伝達経路
$e$	: 騒音と制御音波の誤差信号
$\omega$	: 制御対象とする周波数[rad/s]
$\theta$	: 騒音計測用センサと消音量の計測用センサでの位相差[deg.]

# 第 1 章

## 序論

## 1.1 本研究の背景および目的

### 1.1.1 小型モビリティの普及と車内騒音による快適性の課題

近年、ガソリンエンジンなど内燃機関を搭載した自動車に代わる新たな交通手段の一つとして、1人もしくは2人乗りの小型モビリティが販売され始めている。小型モビリティはコンパクトで小回りが利き、環境への負荷が少ないことから都市部や公共交通機関の整備が不十分な地域での普及が進んでいる。また、日本の6つの地域で小型モビリティの導入に向けた実証実験が行われており、自動車メーカーと地方自治体が連携して、小型モビリティの更なる利用拡大の取り組みも盛んに行われている[1-1]。

小型モビリティは、電気モータが動力源であるため、従来のガソリン自動車に比べて運転中の静音性能は格段に向上している。しかしながら、小型モビリティは小型・軽量であるがゆえに外板の剛性が低い。このため、走行時にタイヤが回転することで発生するロードノイズや、車体の形状による突起物から発生する風切音などの雑音が車内に透過し、車内騒音による車室内の快適性劣化が問題となる [1-2]。

音響用語では、騒音とは不快なまたは望ましくない音、その他音声や音楽などの妨害や、生活に支障、障害を与える音と規定される[1-3]。騒音による人体への影響では睡眠障害[1-4]や日常生活、作業能率への影響[1-5]、最悪の場合聴力の損失[1-6]など深刻な被害をもたらす場合がある。聴力の損失では、一般的に騒音による難聴や聴力低下は 80 dB 以上の音を長時間連続で聴くと起こると言われている[1-7], [1-8]。

小型モビリティの車内騒音の音圧レベルは、難聴や聴力損失を引き起こす程ではないが、これまでエンジン音に隠れていたロードノイズや風切音など乗員にとって不快感を与える音が存在している。しかしながら、小型モビリティの車内騒音対策や、騒音制御技術に関する研究開発、車内騒音改善による快適性向上に関する研究例は極めて少ない。

## 1.1.2 小型モビリティの車内騒音対策の現状

図 1-1 に走行中の小型モビリティに発生する車内騒音の主な原因を示した。車内騒音は 100～500 Hz のロードノイズ[1-9]-[1-11]と 1000～5000 Hz の風切り音[1-12], [1-13]の透過が主な原因となる。また、図 1-2 に自動車の防音対策の一例を示す。同図は車内の天井の内装部に吸音材を貼り付けた例を示している。吸音材はグラスウール、ロックウールなどの繊維系材料や発泡金属、セラミック粒材を吸音材として用いて騒音の伝達経路における吸音を行って騒音の音圧レベルを低減させる[1-14], [1-15]。しかしながら、小型モビリティは図 1-3 のように車両の小型・軽量化にともない、小規模な車内空間であるため防音材を用いた対策が十分に施されていないのが現状である。小型モビリティの車内騒音対策を考えた場合、防音材や吸音材による車内騒音対策では風切音等の周波数帯域の騒音に対して、少量の材料で効果は発揮できるものの、ロードノイズ等の周波数帯域の騒音では、騒音の低減に多量な材料を使用しなければならない。そのため、車重や全幅、全長の規制により車内騒音対策に十分な防音材や吸音材が設置できないと考えられる。

また、小型モビリティに搭載可能なアクティブノイズコントロールシステムを構築する場合、小規模な車内への搭載を考慮してシステム全体の小型化を図る必要がある。特に制御音波を出力するためのスピーカは小型・軽量であるとともに広い帯域の制御音波を高出力かつ正確に出力できる性能が必要となる。アクティブノイズコントロールシステムにおいて、制御音波を出力するスピーカが騒音制御の効果に影響する[1-16]。そのため自動車の車内に設置するスピーカは運転中の振動や気温変化、制御信号を遅延なく出力できる性能が必要となる[1-17]。

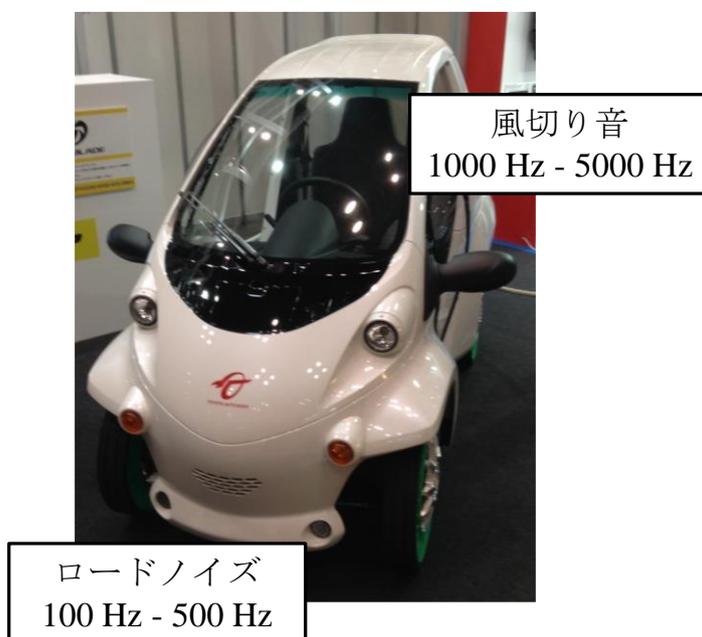


図 1-1 走行中の小型モビリティに発生する車内騒音の主な原因 [1-5]



図 1-2 車内の天井部に設置した吸音材による車内騒音対策



図 1-3 車内騒音対策がされていない小型モビリティの車内の様子

### 1.1.3 本研究の目的

前項で述べた通り小型モビリティは利用者の需要が増加することが予想されるが、車内騒音による快適性の欠如に対する対策が喫緊の課題である。とりわけ乗員の好みや心理状態に応じた車内音響環境を提供することができれば、近年の社会的要求から自動車の付加価値化が進む中で、より小型モビリティの利用拡大が進むと考えられる。

そこで本論文では小型モビリティの車内騒音対策として、図 1-4 に示すように車内スペースや車重への影響を少なくするために、超磁歪アクチュエータによる壁面振動を利用した制御音波の出力による新たなアクティブノイズコントロールシステムを構築し、様々な乗員に最適な車内音響環境を提供することを目的とする。

本研究では、まず小型モビリティに搭載可能なアクティブノイズコントロールシステムのアクチュエータとなる超磁歪アクチュエータについて、出力できる磁歪力や出力波形を電磁界解析により検討した。そのため、有限要素法を用いてモデル化し、そのモデルを用いてアクチュエータを構成する要素の変更や、印加電流源、電圧源の変更による出力性能や周波数特性について検討する。超磁歪アクチュエータについては後掲 1.2.2 項に詳細を記した。

次に、超磁歪アクチュエータを設置した壁面の境界面振動を利用したアクティブノイズコントロールシステムによる消音効果を検討した。特にロードノイズ周波数帯域の騒音制御に効果を発揮するアクティブノイズコントロール適用し、小型モビリティの車内騒音の中 100~500 Hz の騒音を制御対象とした消音実験を行った。実験では、超磁歪アクチュエータを設置した壁面の振動特性を考慮することにより、制御効果の向上を図った。壁面振動を利用したアクティブノイズコントロールによる騒音制御については後掲 1.2.3 項に詳細を記した。

さらに、乗員が快適に感じる車内音響について、人の生体情報の一つである脳波を測定することによる快適性の定量的な評価の検討した。また乗員によって異なる好みの車内音響環境をラウドネスや静寂な環境での脳波測定から明らかにした。生体情報計測を用いた車内の快適性評価については後掲 1.2.4 項に詳細を記した。



図 1-4 超磁歪アクチュエータを搭載したアクティブノイズコントロールシステム

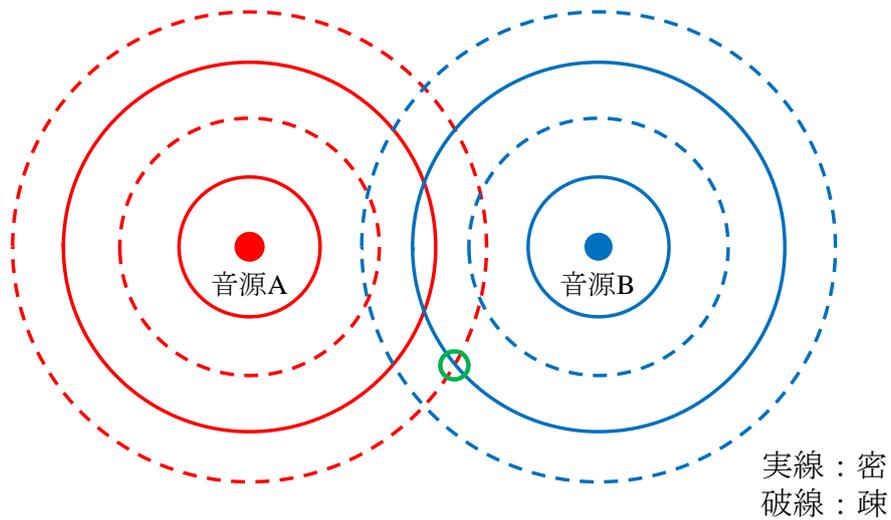
## 1.2 超磁歪アクチュエータを用いた小型モビリティのアクティブノイズコントロールシステムの提案

### 1.2.1 アクティブノイズコントロールの原理と基本構成

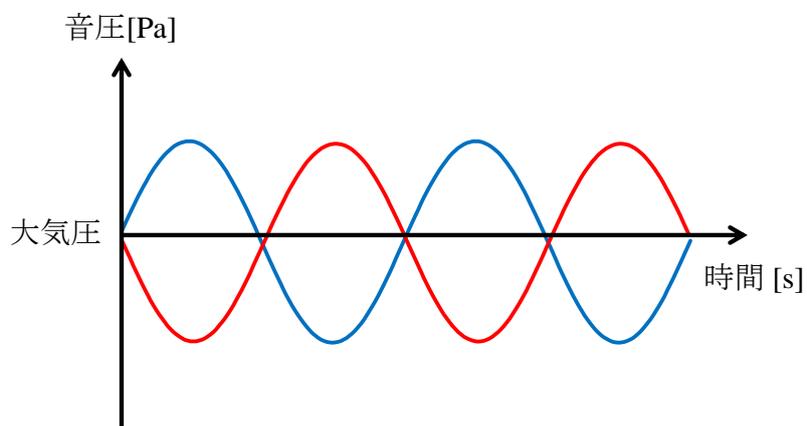
図 1-5 に音波の干渉による音圧低減の原理を用いたアクティブノイズコントロールの概念図を示す。同図(a)は 2 つの音源から同心円状に音波が広がっていく様子を表す。2 つの音源から出力されている音波において、実線は音圧が高い部分、破線は音圧が低い部分である。このように空気の密度の疎密による進行波を疎密波という。そして、図内の緑線の丸で示した赤い破線と青い実線が重なった位置における時刻歴を(b)に示す。(b)の赤線は音圧が低い疎の状態から時間経過とともに音圧が高い密の状態になる。一方、青線は音圧が高い密の状態から音圧が低い疎の状態となる。このように 2 つの音波の同振幅、逆位相になると図 1-5(a)の丸で囲んだ地点の音圧レベルは打ち消される。これが音波の干渉による音圧低減の原理である。この原理は 1930 年代には特許申請が出されており、古くから知られていた[1-17]。そしてデバイスやデジタル信号処理の一般化にともない、1980 年代に入ってからアクティブノイズコントロールとして実用化が進んできた。特に Digital Signal Processor (DSP) による信号処理技術や適応制御技術の急速な進歩が、アクティブノイズコントロールの発展に繋がった[1-18]。

図 1-6 にアクティブノイズコントロールの基本的なシステムを示す。同図よりアクティブノイズコントロールは、騒音源の放射音をとらえるためのノイズセンサ（デジタルセンサ）や騒音に対して同振幅、逆位相の制御音波を出力する 2 次音源、騒音低減の目的とする範囲における消音量を測定するエラーセンサおよびデジタル信号処理部で構成される。

現在では、自動車において制御音波を出力するスピーカを搭載し、騒音を制御するアクティブノイズコントロールに関する盛んに研究が行われているが[1-19]-[1-22]、自動車搭載用のアクティブノイズコントロールシステムでは、小型モビリティは小規模な車内空間であるため、システムの搭載が困難である。



(a) 2つの音源から同心円状に音波が広がっている様子



(b) 赤い破線と青の実線が重なっている緑の丸の部分の時刻歴

図 1-5 音波の干渉による音圧低減の原理

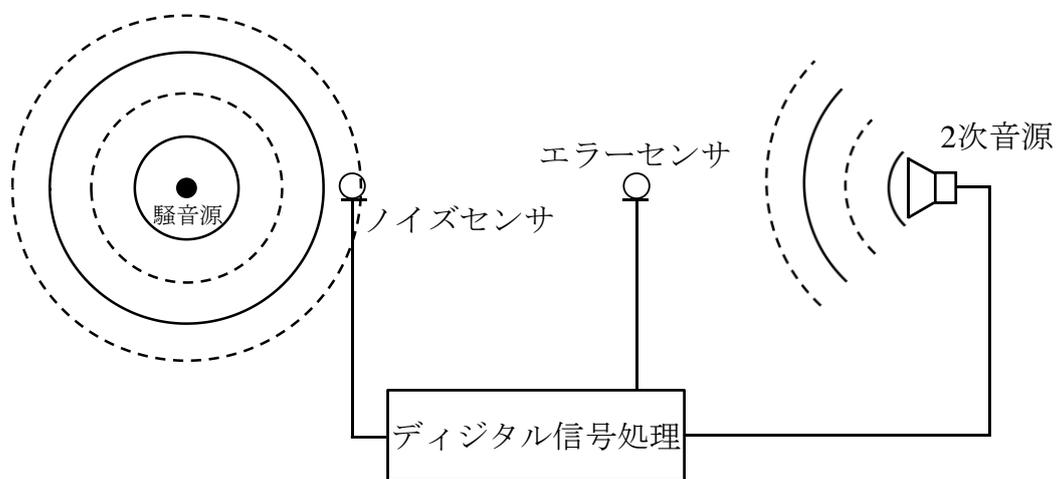


図 1-6 アクティブノイズコントロールの基本システム

## 1.2.2 超磁歪アクチュエータによる壁面振動を利用した制御音波の出力

小型モビリティに搭載可能なアクティブノイズコントロールシステムを構築するうえで、制御音波を出力するデバイスの選定が重要となる。小さな音の出力デバイスとして、一般的にボイスコイルモータを使用したコーン型スピーカがある。このスピーカはコーン紙に紙やポリプロピレンなど軽量で振動しやすい材料を使用し、ボイスコイルモータの振動によってコーン紙が振動して音を出力する。そのため、モータのコイルインダクタンスが小さく、動作応答性に優れ、高周波帯域まで出力が可能である。しかしながら、提案している小型モビリティ用のシステムで、壁面を振動させて音を出力する場合、ボイスコイルモータの可動子部が大きくなり、応答性や周波数特性の悪化が懸念される。そこで、本論文では数ある小型なアクチュエータから超磁歪材料を用いたアクチュエータ[1-23]-[1-25]を用いたアクティブノイズコントロールシステムを提案している。

超磁歪アクチュエータに使用されている超磁歪材料は、1000 ppm 以上の弾性変位があり機械的出力が大きい機能性材料である。また応答性が高く高耐久であるため、低周波から高周波帯域まで振動の出力が可能である[1-26]-[1-28]。図 1-7 に超磁歪アクチュエータを示す。提案するアクティブノイズコントロールシステムでは超磁歪アクチュエータを壁面に接触させることにより、アクチュエータの振動が壁面に伝達され、その振動によってアクチュエータが接触している面が振動して、音波として出力される。このように超磁歪アクチュエータを設置した壁面をスピーカのように音波を出力すると、通常の指向性を持つスピーカよりも小型・軽量のシステムの構築可能で、壁面全体から全方向に音場が作れること可能となる[1-29]。

表 1-1 に小型なアクチュエータに用いられている超磁歪材料と圧電材料の特性を比較した表を示す。この表では一般的な超磁歪材料 Terfenol-D と圧電材料 PZT を比較した。材料の形状変形は超磁歪材料の場合、外部磁界によって変形し、圧電材料は電圧によって形状が変化する。形状変化による応答速度は超磁歪材料も圧電材料も 1m/s 以下で、出力可能な周波数帯域も低周波から高周波まで出力することができる。しかしながら超磁歪材料は圧電材料に対してエネルギー密度は約 12 倍大きいいため、超磁歪材料の方が単位体積当たりの仕事率が

きいことが分かる。また歪みも超磁歪材料は圧電材料に対して約 10 倍大きいことからアクチュエーター一つ当たりの出力性能が小型モビリティへの搭載に適していると考えられる。圧電材料の欠点として圧電材料は絶縁体であるため、電圧を加えていくと発熱しやすく圧電材料の結晶構造が変化するキュリー温度も超磁歪材料に比べて低い。そのため長時間の動作では発熱によって動作しなくなる可能性がある。以上のことから、継続的な使用環境が想定される小型モビリティのアクティブノイズコントロールシステムのアクチュエータとしては不向きである。

さらに図 1-8 に超磁歪材料をはじめとする他の機能性材料のエネルギー密度と応答速度を示す。同図より、超磁歪材料は他の機能性材料と比較して、エネルギー密度と応答速度の両面で優れていることが分かる。

以上の特徴から、本研究は超磁歪アクチュエータを設置した壁面振動を利用した制御音波の出力による新たなアクティブノイズコントロールシステムの開発を試みた。この検討については 2 章の低周波制御音波の出力を考慮した超磁歪アクチュエータの設計で述べる。



図 1-7 超磁歪アクチュエータ

表 1-1 超磁歪材料と圧電材料の材料特性の比較

	超磁歪材料 (Terfenol-D)	圧電材料 (PZT)
形状変化の方法	外部磁界	電圧
応答速度	数 $\mu s \sim 100 \mu s$	0.1 ms $\sim$ 1 ms
出力可能な周波数	$\sim$ 高周波	$\sim$ 超音波
エネルギー密度	$14 \times 10^3 \text{ J/m}^3 \sim 19 \times 10^3 \text{ J/m}^3$	$0.6 \times 10^3 \text{ J/m}^3 \sim 1.6 \times 10^3 \text{ J/m}^3$
歪み	1400 ppm	140 ppm

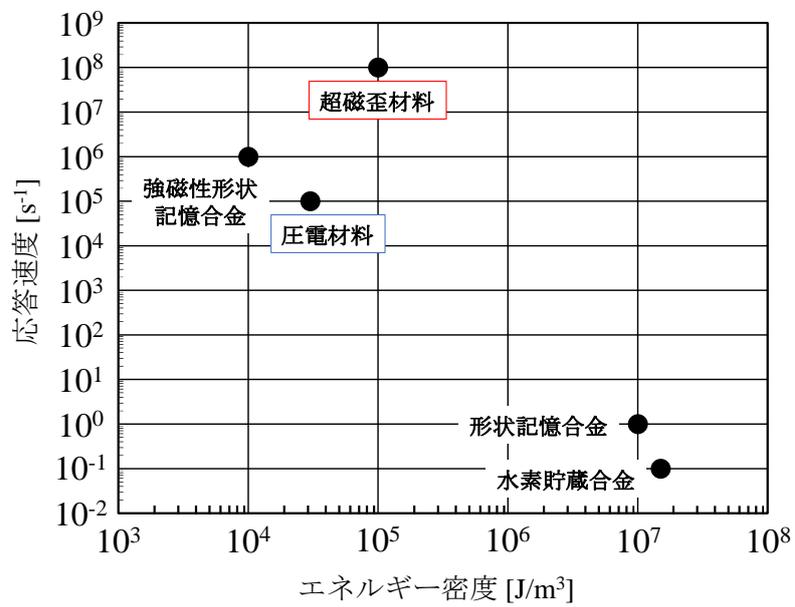


図 1-8 機能性材料におけるエネルギー密度と応答速の比較

### 1.2.3 壁面の振動特性を考慮したアクティブノイズコントロールによる騒音制御

小型モビリティは小型・軽量な車体を実現するために従来の自動車に比べて外板の剛性が低い。このため、走行時にタイヤが回転することにより発生するロードノイズや、車両の突起物から発生する風切り音などの騒音によって外板が大きく振動する。この振動が音源となり車内騒音となる。このとき、外板の形状や材質、固定条件によって加振された際に振動が大きくなる固有振動数が異なる。入力される騒音に、この固有振動数に近い周波数成分が含まれていると外板が共振し、騒音が増幅されて車内に伝わり快適性が劣化する[1-30]。

提案した超磁歪アクチュエータを用いたアクティブノイズコントロールシステムでは、車両の壁面に超磁歪アクチュエータを設置して、壁面振動により制御音波を出力する。そのため提案するシステムの騒音制御性能を向上する上で、アクチュエータを設置する壁面の振動特性を把握する必要がある。壁面の固有振動数に近い周波数の騒音は透過しやすい一方、振動モードの腹で大きな振幅が得られるため制御音波の音量を大きくでき、高い消音効果が得られると期待できる。本研究は制御対象とするロードノイズ周波数帯域の騒音が透過しやすい周波数を壁面の打撃試験により得て、消音実験の制御対象周波数とした。また、超磁歪アクチュエータの動作実験と壁面を透過しやすい周波数の振動モードの結果から、乗員の耳の位置を想定した制御点において最も効率よく制御音波を出力できるアクチュエータの設置位置を明らかにし、消音実験を行った。この検討については3章の壁面の振動特性を考慮した超磁歪アクチュエータの設置位置による騒音低減効果で述べる。

## 1.2.4 生体情報計測を用いた車内音響制御による快適性評価

自動車の車内騒音対策は防音材やアクティブノイズコントロールシステムによる騒音の低減が主流である[1-14], [1-31]. しかしながら, 車内騒音の低減による静音化が必ずしも最適な車内音響環境に繋がるわけではない. なぜならば, 乗員が快適に感じる車内の音環境は, 日々の体調や気分あるいは運転状況などで変わるためである[1-32]. 加えて, 乗員の音の感じ方は外的な要因や乗員の心理状態など様々な要因によって時間的に変化すると考えられる. すなわち車両が走行しているときは車内の音環境や乗員の心理状態が時々刻々と変化するため, 全ての乗員において常に快適な車内空間を実現することは難しい.

自動車の車内音環境の評価に関する研究は, これまでに多く行われており, アンケートを用いた主観評価が一般的であった[1-33]-[1-35]. しかしながらアンケートではリアルタイムに心理状態を評価することが困難である. 近年, 乗員の心理的な状態を計測・推定する手法として, 生体情報計測を用いた評価に関する研究が盛んに行われている[1-36]-[1-38]. 生体情報による車内音環境の評価は連続的に計測することができる上, 乗員が意識することなく心理状態を計測された生体情報を用いて, 正確性の高い心理状態の推定を行うことができる. 心理状態に応じて, 車内の音環境を提供するためには, 乗車中という状況を踏まえて, 運転操作に影響の影響や体動などによる計測信号にノイズが乗らず, 計測すること自体が心理的負担にならないような生体情報計測による評価が必要となる. 生体情報計測には様々なデバイスや計測方法, 評価方法が用いられている[1-39], [1-40]. その中でも人の感情を司る脳の前頭前野の活動を測定する脳波測定は簡易計測が可能であり[1-41], 音の刺激による思考で活動する脳で発生する電圧を連続して計測可能な生体情報である. そのため本研究では, 異なる音環境下における乗員の心理状態を推定する手法として脳波測定に着目し, 個々人の好みの音環境について検討した. この検討については 4 章の心理状態推定による車内騒音に対する快適性評価で述べる.

## 1.3 従来の研究

本研究で提案する超磁歪アクチュエータによる壁面振動を利用した小型モビリティ搭載用アクティブノイズコントロールシステムならびに生体情報を用いた快適性の定量的評価の特徴を明確にするために、従来行われてきた先行研究について本節で述べる。

### 1.3.1 超磁歪材料を用いた小型アクチュエータ

磁歪現象は、アクチュエータやセンサデバイスの機能性材料として活用されている。1970年代には室温で1000 ppm以上歪む超磁歪材料が開発され、1980年代後半には実用化された。超磁歪材料は1.2.2項で述べたように機械的出力が大きい機能性材料で、応答性が高く、低周波から高周波帯域まで振動の出力が可能である。そのため超磁歪材料を用いたアクチュエータの開発や超磁歪アクチュエータを用いた研究例について列記する。

- ・ 小林ら[1-42]は、アクチュエータ用の材料の観点から超磁歪材料の特性について述べている。アクチュエータの発生変位量は材料の長さや機構によって依存するが数百 $\mu\text{m}$ 程度であることを明らかにした。
- ・ 佐橋ら[1-43]は、超磁歪材料のスピーカや表面波素子への応用例について検討している。検討では超磁歪アクチュエータを試作し、変位特性について考察している。
- ・ 脇若ら[1-44]は、超磁歪材料の電気的な出力と機械的な出力について検討している。検討では最大出力限を考慮した計算と超磁歪振動子を用いた実験から最大出力限界について明らかにした。

上記の研究に加えて、本研究で提案するアクティブノイズコントロールシステムのように超磁歪アクチュエータを音源に用いた研究についても列記する。

- ・ 中村ら[1-45]は、海洋における音波の伝播時間から音質分布を計測する音響トモグラフィの音源に関する研究を行っている。長距離の伝播では出力する音波を低周波で出力する必要があるため、超磁歪素子を用いた音源を使用して実験的検討から。
- ・ 兪ら[1-46]は、超磁歪振動子を用いた平面スピーカの音圧レベル予測に磁界・構造・音場の連成解析手法を提案し、実機での実測と比較検証からその解析手法の有用性を示した。

- ・ 鈴木[1-47]は、音響システムの臨場感に関する研究を実施し、重量のある建材や床、壁に超磁歪材料を用いた平面スピーカを設置して大音量の音を高音質で出力できることを示した。

その他、アクチュエータ駆動時の省電力化[1-48]や熱膨張による超磁歪材料の伸縮に関する研究[1-49]など多岐にわたり研究が進められている。

しかしながら、音波の出力デバイスやスピーカの駆動に用いられている研究が多く、超磁歪アクチュエータを壁面に設置して、その壁面の境界面振動を利用した音波の出力に関する研究例は極めて少ない。また、能動騒音制御のように制御音波の出力に超磁歪アクチュエータを用いた研究は調査した限り見受けられなかった。

### 1.3.2 小型なアクチュエータを用いたアクティブノイズコントロールによる騒音低減に関する研究

前項で述べた超磁歪アクチュエータと同様に小型なアクチュエータとして圧電アクチュエータを用いた騒音制御に関する研究がある。圧電アクチュエータは、1.2.2 項で述べたように超磁歪アクチュエータよりも振動の出力性能が劣るため、壁面に複数のアクチュエータを設置したパネルを使用した騒音制御技術などが行われている[1-50]-[1-52]。圧電アクチュエータを用いたアクティブノイズコントロールの研究例について列記する。

- ・ 猿渡ら[1-53]は、壁の振動制御による遮音法に関する研究を行っている。構造物等の固体を通して伝達される振動エネルギーによって壁面が励振されて騒音を放射されるため、騒音制御の観点から平板構造物の振動制御に関する検討を行っている。平板に動吸振器をとして小型なボードスピーカを設置し、騒音による平板の振動を抑制することによって音響透過損失を向上させて遮音性を高める検討をしている。
- ・ 福田ら[1-54]は、居住空間を構築する窓ガラスの遮音性向上に関する研究を行っている。検討では窓ガラスに発現する連成現象の解明と強連成場における振動モードと音響モードについて検討している。振動制御と音響制御を併用することにより、各々の制御効果を相互補完する以上の相乗効果によって広周波数領域にわたる制御効果が得られた。

- ・ 眞田ら[1-55]は、精密機械による騒音を抑制するための防音ボックスに関する研究を行っている。低周波数の音は壁面を透過しやすいため、圧電素子を用いたアクチュエータを壁面に配置し、遮音制御に関する検討を行っている。アクチュエータの配置は、壁面の振動モードを考慮してアクチュエータと圧電フィルを併用して、透過しやすい周波数の抑制を行っている。特に 300 Hz 以下の周波数で騒音抑制効果が高くなっていることを実験的に証明している。

このように圧電アクチュエータを使用したアクティブノイズコントロールに関する研究が進められている。これらの検討では音源から出力される騒音が壁面を励振し、抑制することにより騒音低減を図る研究である。その理由として、圧電材料は超磁歪材料に比べてエネルギー密度と応答性が低く、単位体積当たりの仕事率が小さい。そのため騒音による壁面の励振を抑えるにも複数のアクチュエータが必要であり、さらに長時間の動作では発熱によって動作しなくなる可能性があるため、本論文で提案するシステムには不向きである。

### 1.3.3 自動車車室内の音響環境と快適性評価

従来 of 車内騒音対策では車内騒音の低減量によって評価されていた。しかし、静かな車内音響環境が必ずしも全ての乗員にとって快適な音響環境ではない。乗員が快適に感じる車室内の音響環境は、静かな空間だけでなく、乗員の状態や時々刻々と変わる状況によって変化してくる[1-56]。乗員の好みの車内音響環境に関する研究は、これまでも多く行われておりアンケート、SD (Semantic Differential Method)法、一対比較法など様々な手法で評価が行われている[1-57]-[1-59]。車室内の音響環境と快適性評価に関する研究を列記する。

- ・ 有光ら[1-60]は、自動車の加速音が心理および生理的な人への影響を検討するために、一対比較法に基づく主観評価を行った。検討では、「快適感が高い」を目的変数、心理音響評価量に対する形容詞「うるさい」、「甲高い」、「粗い」、「純音感が高い」を説明変数とした快適感の聴覚モデルを構築した。その結果、粗さが低く、また純音感の高さが快適感に寄与することが分かった。
- ・ 吉田ら[1-61]は、ハイブリッド車のエンジン音や騒音が乗員に及ぼす影

響について検討している。検討では印象評価用語として「非常に不快」、  
「不快」、「やや不快」、「不快」の4段階のカテゴリ評価を行った。その  
結果、エンジン始動時に音と振動が増幅された際に不快に感じる傾向  
を明らかにした。

- ・ 鳥居ら[1-62]は、自動車車室内の音質的観点から、音質評価にふさわし  
い語の選定と主観評価実験を行った。主観評価実験より得られた結果  
を用いた因子分析の結果、ガソリンエンジン車の車室内音は「粗っぱ  
い」や「激しい」の粗野因子と、「重みがある」や「迫力がある」の重  
厚感因子に影響されることが分かった。

以上のように自動車の車内音響環境において、アンケートなどの主観評価が  
一般的である。主観評価は個人的な価値判断には相当ばらつきがあることから  
[1-63]、統計的手法が多用される。しかしながら、自動車の走行中に車内に透  
過する騒音は加減速や路面状況など時々刻々と変化するため、車内騒音の周波  
数帯域や音圧レベルも変化する。そのため、乗員の快適性をリアルタイムの評  
価する手法が求められる。

そこで、生理心理学を考慮した生体情報による心理状態の評価が用いられる  
ようになってきている[1-64]。生体情報の計測によって心理状態を推定する手  
法には客観的、連続的、定量的に計測が行えること、余計な作業負担をかけな  
いこと、本人が意図しない変化を捉えられることなど、アンケートなどによる  
主観評価では得られない利点が多い。本論文では小型モビリティの車内音響制  
御による乗員の快適性評価を行う。そのため、音の刺激によって人の状態を推  
定する生体情報計測として、脳波測定が有効である。脳波測定の中でも人の感  
情を司る脳の前頭前野の活動を測定する脳波測定と測定される脳波から人の感  
情を定量的に評価する研究について列記する。

- ・ S. M. LEE ら[1-65]は、自動車の車内音響について脳波測定による定量的  
な評価を行った。検討では、実験協力者 34 人の脳波を測定し、測定時  
間内に出現する脳波の中  $\alpha$  波の割合を算出して、車内の音質評価を行っ  
た。
- ・ 平澤ら[1-66]は、生活している中で耳にする騒音を聴いた時の脳波を測  
定し、人がリラックスしているときに卓越する  $\alpha$  波の増減から評価を行  
った。実験では、 $\alpha$  波の増減が少ない音響環境は人がその騒音に慣れて

いることを示し、音の変化が大きい環境ほど、慣れが発生しにくいことを明らかにした。

- 西藤ら[1-67]は、音響環境が精神作業に与える影響について脳波測定による時間・空間特性に関する検討を行っている。検討では快音と不快音を聴取中に暗算課題を行った際の脳波を測定し、 $\alpha$ 波と $\beta$ 波の振幅の増減率を用いて評価を行った。その結果、不快音聴取時の暗算課題では $\alpha$ 波の抑制的効果があることが明らかとなった。
- 三宅ら[1-68]は、不快音とそうでない音を同一音圧で負荷した際の脳波反応の差について検討している。検討では、不快音、基準音、そうでない音の3種類を聴取し、それぞれ脳波測定を行った。その結果、刺激音の不快さは音の種類よりも刺激音を不快と感じるか、被験者の心理的反応に依存していることが明らかとなった。また、不快反応時には $\alpha$ 波が減少していた。
- 村上ら[1-69]は、脳波の変動特性を加味した波の音の快適性に関して検討している。検討では $\alpha$ 波周波数帯域の電圧値の比較を行い、快適性について定量的な評価を行った。その結果、波の音の強さがある値を超えると快適感心地よさから不快に変わることが分かった。しかし、波の音の強さや周期などによって測定される脳波に有意な差は見られず脳波に及ぼす影響は少ないことが分かった。

また、音の刺激だけでなく自動運転の自動車に乗車した際の影響[1-70]や、ステアリング把持や音声による周辺情報共有時における脳の覚醒度維持に関する研究も行われている、[1-71]。

以上のように生体情報を用いた評価手法が発展してきているが、自動車の車内騒音制御の観点では生体情報を使った定量的な評価は、 $\alpha$ 波出現率やパワー値の比較など評価方法が確立されていない。また小型モビリティの快適性に関する研究でも脳波測定を用いた定量的な評価に関する研究例が極めて少ない。

## 1.4 論文の構成および概要

本論文は「超磁歪アクチュエータを用いた小型モビリティの車内音響制御に関する研究」と題し、5章で構成されている。以下に各章における概要を示す。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について説明している。また小型モビリティ搭載用のアクティブノイズコントロールシステムの必要性と超磁歪アクチュエータを用いた壁面振動による制御音波の独自性について明らかにした。さらに本論文の構成および各章の概要を述べる。

第2章では小型モビリティに搭載可能なアクティブノイズコントロールシステムのアクチュエータとなる超磁歪アクチュエータについて、電磁界解析による出力性能について検討を行った。

まず、超磁歪アクチュエータについて有限要素モデルを構築し、電磁界解析によってコイルに音声信号となる正弦波を入力した際に超磁歪材料の磁歪による発生力を有限要素法の電磁界解析から求めた。得られた周波数応答から、本研究で設計した超磁歪アクチュエータはロードノイズの周波数帯域騒音制御対象とするロードノイズ周波数帯域の磁歪による発生力を明らかにする。

第3章では超磁歪アクチュエータによる壁面振動を利用したアクティブノイズコントロールによる騒音の低減について、消音実験用箱を用いた検討を行った。

検討では騒音制御性能を向上させるため、制御音波を出力するアクリル板の振動特性を考慮し、アクリル板の固有振動数および固有振動数における板の振動モードについて検討した。

消音実験では、100～500 Hz のロードノイズ周波数帯域で最もアクリル板を透過しやすい騒音に対して超磁歪アクチュエータを用いたアクティブノイズコントロールによる消音実験を行った。その際、超磁歪アクチュエータの設置位置についてアクリル板の振動モードを考慮して、設置位置の違いによる消音効果について比較検討した。

第4章では、小型モビリティを使用し、超磁歪アクチュエータ用いたアクテ

ィブノイズコントロールによる快適性評価について検討した。検討では、車内の音響環境をアクティブノイズコントロールによる騒音を制御した場合と乗員の好みの音楽を重畳したマスキングを行った場合とした。快適性の評価方法は車内の実験協力者の脳波測定を行い、測定された脳波の中、人がリラックスしたときに電圧が大きくなる  $\alpha$  波出現率を用いて快適性を評価した。また、実験協力者ごとの音の聞こえ方や感じ方に着目し、ラウドネスの実験と静粛な環境における脳波測定から、快適な音響環境の傾向を明らかにした。

第 5 章では本論文の結論を述べている。第 2 章、第 3 章、第 4 章で得られた成果を総合して述べるとともに、将来の展望についてまとめた。

また、本研究で参考にした参考文献は本論文の巻末に記載している。

## 第2章

低周波制御音波の出力を考慮した  
超磁歪アクチュエータの設計

## 2.1 はじめに

本章では小型モビリティ搭載用のアクティブノイズコントロールシステムにおける超磁歪アクチュエータについて検討を行う。本システムでは超磁歪アクチュエータを壁面に設置して制御音波の出力を行うため、超磁歪アクチュエータには制御音波の出力に必要な振動の発生力と、音波の歪みや遅れが少ない性能が求められる。そのうえで、超磁歪アクチュエータのコイルに流れる交流電流が入力された際の超磁歪材料の伸長による発生力から出力特性を把握する必要がある。

本検討では超磁歪アクチュエータの出力性能について有限要素モデルを用いた電磁界解析を行った。まず、電磁界解析を行うために既存の超磁歪アクチュエータの寸法、内部構造、各構成要素の材料を基に有限要素モデルを構築した。

次に、超磁歪アクチュエータを構成する要素の中、コイルによって発生した磁界を超磁歪材料に印加するためのバイアスマグネットとしての役割を持つ永久磁石に着目し、その有無によるアクチュエータの出力性能について検討した。また、超磁歪アクチュエータの高出力化と高音質化について検討するために、交流電流源に印加する電流値を変更し、磁歪による発生力の時刻歴から出力特性について検討を行った。

さらに実際のアクティブノイズコントロールによる制御音波の出力状況を考慮し、電圧制御型アンプを使用した際のインダクタンスの影響による出力性能について、電流電圧源の周波数を低周波数から高周波数まで変化させた際の出力される磁歪による発生力と時刻歴から、超磁歪アクチュエータの性能評価を行った。最後に、各周波数における磁歪による発生力の両振幅値について本システムで提案している 100~500 Hz のロードノイズ周波数帯域での磁歪による発生力について明らかにした。

## 2.2 超磁歪アクチュエータの構造と超磁歪材料が発生する力[2-1]

### 2.2.1 超磁歪アクチュエータの構造

本項では超磁歪アクチュエータの有限要素モデルを構築し、音波出力のための制御信号として正弦波の信号が加わった時の磁歪量について電磁界解析を行った。

まず図 2-1 に超磁歪アクチュエータの構造と各部の寸法を示す。超磁歪アクチュエータはアクチュエータの中心に柱状の超磁歪材料とその周りに永久磁石、ボビン、ソレノイドコイルで構成される。永久磁石は超磁歪材料にバイアス磁界を加えるために用いる [2-2]。また図 2-2 に超磁歪材料とコイルを示す。コイルには交流電流源を接続し、コイルに電流が流れることで磁界を発生させる。その磁界によって超磁歪材料が伸長し、それによってシャフトとスプリングによって壁面に振動を伝達し、制御音波を出力できる[1-66]。その他のアクチュエータの構成要素とその材質は表 2-1 の通りである。

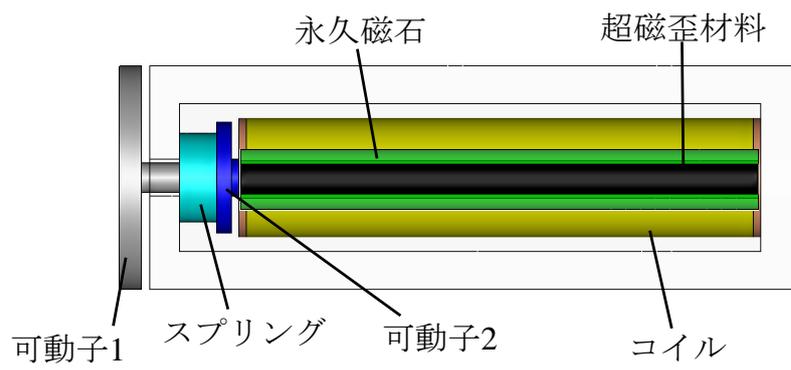


図 2-1 超磁歪アクチュエータの内部構造

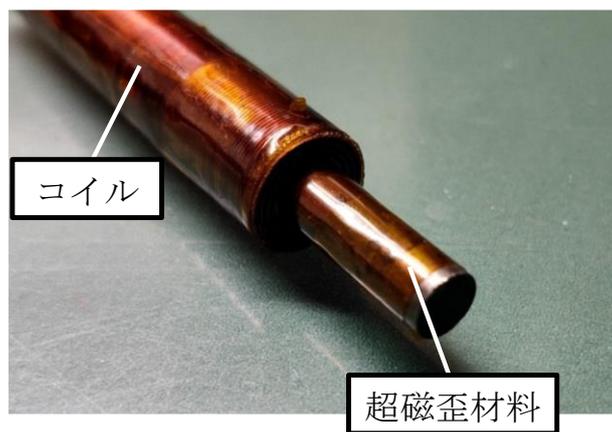


図 2-2 超磁歪材料とコイル

表 2-1 アクチュエータの構成要素と材質

構成	材料
永久磁石	フェライト
可動子1	炭素鋼
可動子2	プラスチック
コイル	銅
スプリング	ばね鋼
超磁歪材料	Terfenol-D

## 2.2.2 コイルに流れる交流電流に対する磁歪による発生力

図 2-3 に超磁歪アクチュエータの長手方向断面図を示す。超磁歪材料の周りにある永久磁石は、可動子 1 側が N 極で反対側が S 極である。なお、磁歪により超磁歪材料の可動子 2 と接触した面で発生した力の値がマイナスであるが、図 2-3 で示す通り、本解析における軸方向において  $x$  軸方向は可動子 1 側を原点として右方向をプラスとするため超磁歪材料の伸長によってシャフトが押し出される方向はマイナスとなる。

図 2-4 にコイルに流れる交流電流と超磁歪材料が発生する力を示す。超磁歪アクチュエータにはバイアスマグネットとして、永久磁石が用いている。そのため、超磁歪材料は永久磁石の磁場の影響により、コイルに交流電流が流れていない場合でも定常的に超磁歪材料が磁界による形状変形で発生する力が働いている。そして、コイルに交流電流が流れることにより、定常的に働いていた超磁歪材料が発生する力が増減し、超磁歪材料が発生させる力によって可動子 1, 2 がその振動を壁面に伝達することで壁面振動による音波を出力する。

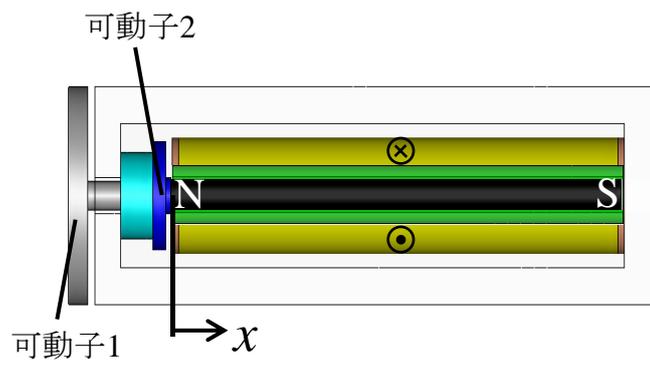
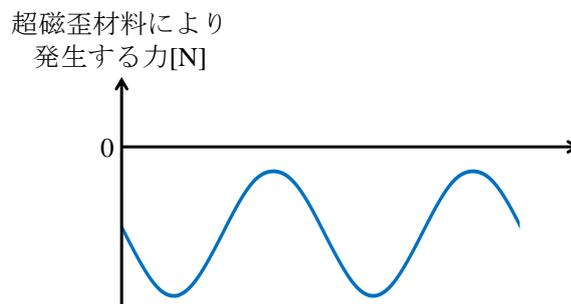
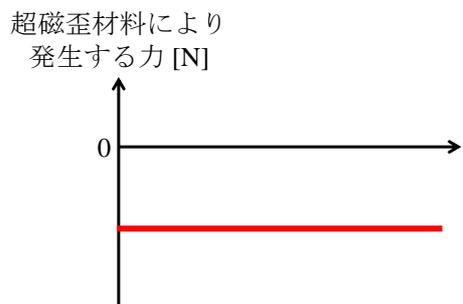
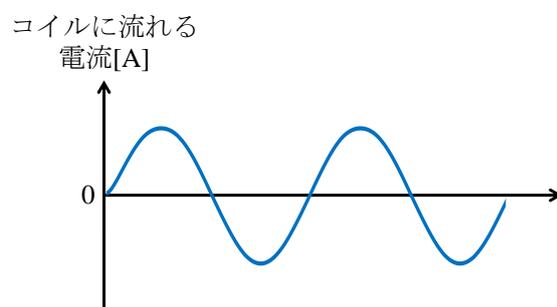
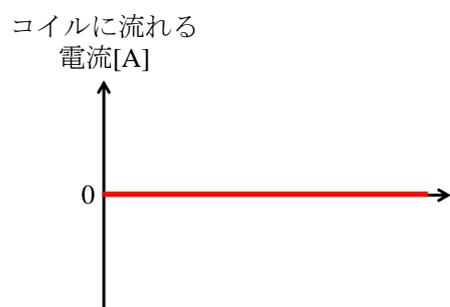


図 2-3 永久磁石の極性と超磁歪材料が発生する力の方向



(a) コイルに交流電流が流れていない場合 (b) コイルに交流電流が流れる場合

図 2-4 コイル電流に対する超磁歪材料が発生する力

### 2.2.3 解析モデルと超磁歪材料の材料特性

本章では図 2-5 に示す超磁歪アクチュエータの有限要素モデルを用いて、低周波の制御音波の出力について電磁界解析による磁歪による発生力の検討を行う。超磁歪アクチュエータは、超磁歪材料の軸方向のひずみによる変位が出力される。そのため、超磁歪材料は長さ 70 mm、直径 4 mm の Terfenol-D とし、永久磁石は 0.45 T のフェライト磁石とした。また永久磁石は超磁歪材料の軸方向に磁界が加わるように軸方向の着磁とした。超磁歪材料と永久磁石の間には 0.5 mm の空気領域を設けている。使用するコイルの導線径は 0.5 mm、巻数は 201 回とした。解析では 3 次元解析を行うものとし、分割要素数を 266855、節点数を 45689 とした。

本解析における超磁歪材料の材料特性は、菅原ら[2-2]の検討で用いられた磁界と磁束密度の値と森[2-3]の研究で用いられた正磁歪材料の外部磁界に対する寸法変化の結果を使用して材料特性を決定した。使用した超磁歪材料の B-H カーブを図 2-6 に、磁束密度と磁歪量の関係を図 2-7 に示す。なお超磁歪材料のヤング率は、本検討で用いた超磁歪材料 Terfenol-D の機械的性質から 26.5 GPa とした。また、図 2-7 において超磁歪材料の磁歪量と磁束密度が線形の領域でアクチュエータを動作させるため、残留磁束密度 0.45 T の永久磁石を使用した。

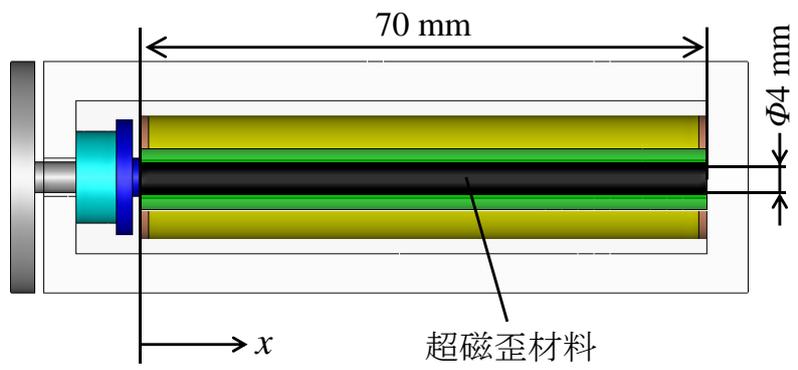


図 2-5 解析する超磁歪材料の寸法

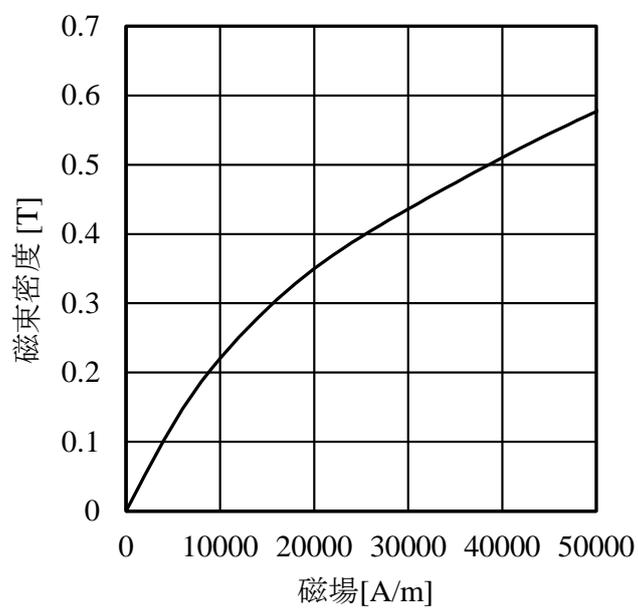


図 2-6 超磁歪材料の B-H カーブ [2-1]

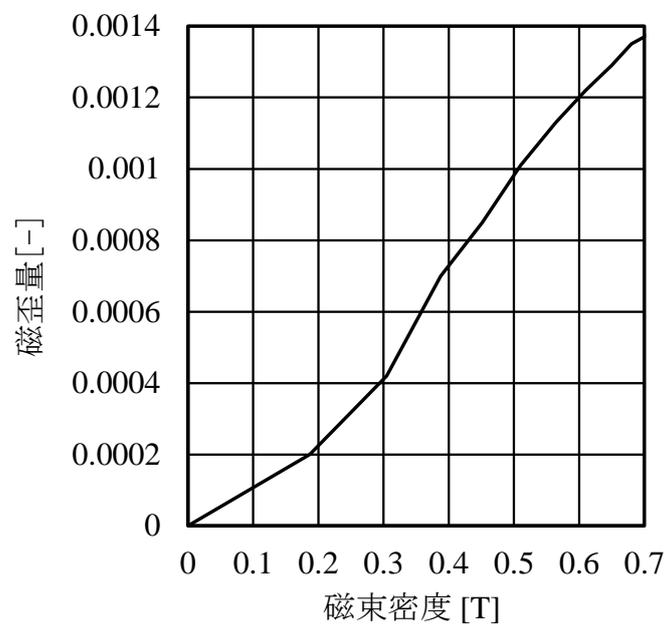


図 2-7 磁束密度に対する磁歪量 [2-1]

## 2.3 超磁歪アクチュエータモデルを用いた電磁界解析[2-1]

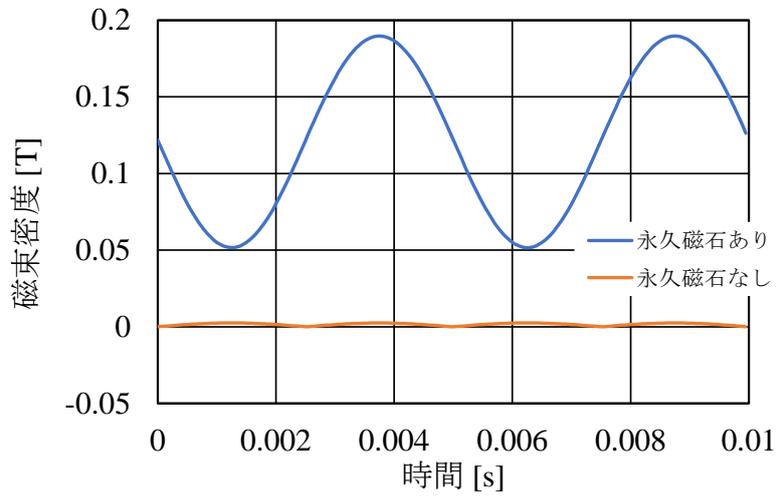
### 2.3.1 永久磁石の有無による磁歪による発生力の比較

本項では、磁界によって伸長する正磁歪の超磁歪材料が制御音波を出力させる力について検討する。2.2.2 項に述べたが超磁歪アクチュエータにはバイアスマグネットとして、永久磁石を用いている。このバイアスマグネットの有無による超磁歪材料が振動を発生させる力と、交流電流の周波数の歪みを明らかにするために検討を行った。

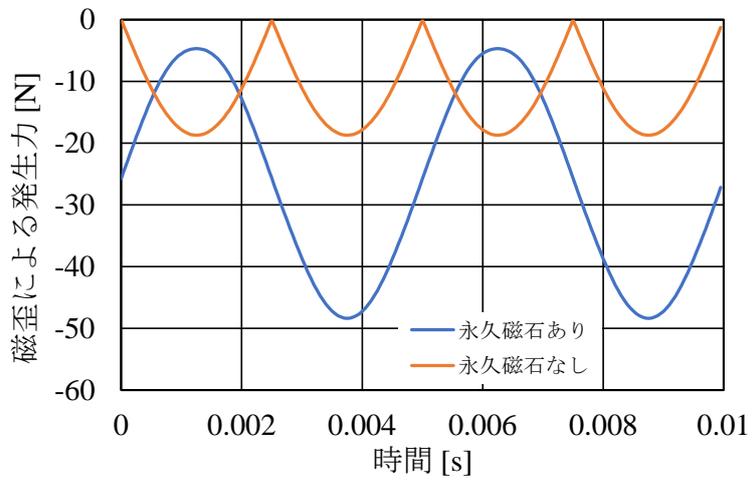
検討では、バイアスマグネットとした永久磁石の有無による磁歪による発生力と磁束密度の比較を行う。永久磁石が無い場合は、有限要素モデルにおいて永久磁石を絶縁体のプラスチックに変更して解析を行った。なお超磁歪材料が発生させる力は超磁歪材料の磁歪量と材料のヤング率、ポアソン比からフックの法則を用いて算出している。

図 2-8 にコイルに流す電流振幅を 1.0 A、周波数 200 Hz の正弦波としたときのバイアスマグネットの有無の解析結果の比較を示す。同図(a)に磁束密度、(b)に磁歪により超磁歪材料の可動子 2 と接触した面で発生した力の時刻歴を示す。(a)の磁束密度では永久磁石がないことで磁束密度がほとんど発生していないことが分かった。(b)では永久磁石なしの場合、磁歪による発生力は 0 から負の方向に増加しているが、0 N で折り返したような波形となり、200 Hz の正弦波状の力が発生していないことが分かった。

この結果から、超磁歪アクチュエータは静的な磁界を加える永久磁石によって電流値が 0 A 時でも、超磁歪材料は定常的にアクチュエータの軸方向に伸長する。そのため磁界に対して伸長する超磁歪材料でも、交流磁界を加えて半波整流されたような出力にならず、超磁歪アクチュエータのコイルに流れる交流値の増減に合わせて、超磁歪材料の伸長も増減し、電流の周波数を出力できることが明らかとなった。



(a) 磁束密度の時刻歴



(b) 磁歪による発生力の時刻歴

図 2-8 永久磁石の有無による比較 [2-1]

### 2.3.2 コイルに流れる交流電流値を変更した際の磁歪による発生力

本項では、コイルに流れる交流電流値と磁歪による発生力の関係について解析的な検討を行った。検討ではコイルに流す交流電流を 200 Hz とし、磁束密度と磁歪による発生力について検討する。

解析の条件はサンプリング周波数を 20 kHz とし、電流の片振幅が 0.5, 1.0, 1.5 A の 3 条件とした。なお電流値の上限を 1.5 A とした理由は実際に使用している超磁歪アクチュエータにおいて導線の発熱を考慮したためである。

図 2-9 に交流電流の片振幅値が 0.5 A のときの磁束密度のベクトルプロットを示す。超磁歪アクチュエータ全体の磁束密度は超磁歪材料と可動子の接している面と永久磁石で磁束密度の値が大きくなっていることが分かる。そこで図 2-10 に超磁歪材料と可動子付近を示す。(a)では交流電流の値が最も大きい時の磁束密度のベクトルプロットである。この結果より超磁歪材料と可動子付近全体で磁束密度の値が 0.2 T 程である。また(b)は交流電流値が 0 の時のベクトルプロットである。コイルに電流が流れていないため、永久磁石のみの磁束密度となり、(a)と比較して超磁歪材料と可動子付近の磁束密度の値が減少している。さらに(c)は交流電流の値が最も小さい時の磁束密度のベクトルプロットである。(c)では電流の値がマイナスとなるため、超磁歪材料と可動子付近の磁束密度も(a), (b)と比較して値が小さくなることが分かった。この結果より、交流電流の値によって超磁歪材料の磁束密度も増減することで、交流電流の周波数の振動を発生させる力となることが分かった。

図 2-11 にコイルに流れる電流の片振幅が 0.5, 1.0, 1.5 A の時刻歴を示す。同図より、超磁歪材料が伸長してシャフトを駆動する磁歪による発生力を発揮していることがわかる。しかし、印加電流 1.5 A の場合では磁歪による発生力が 0 N 程度となると波形に歪みが見られた。これは磁束密度が低下した際に超磁歪材料の非線形な領域で動作したためであると考えられる。

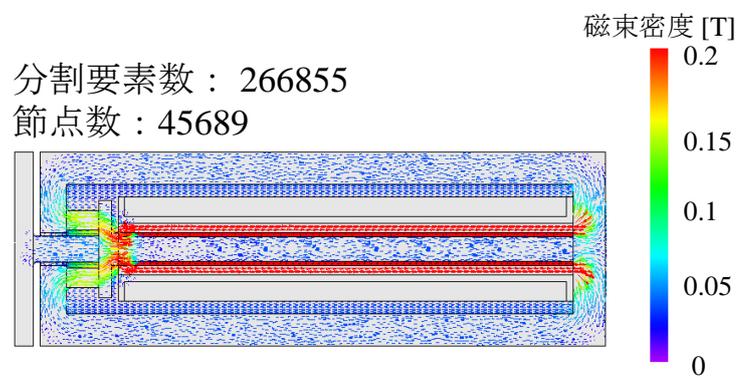
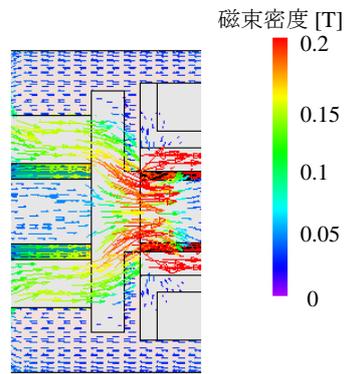
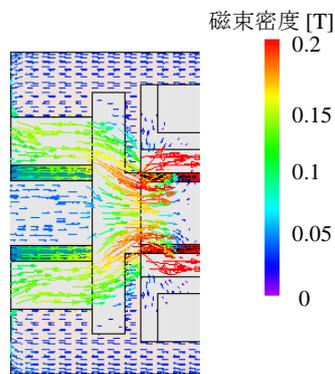


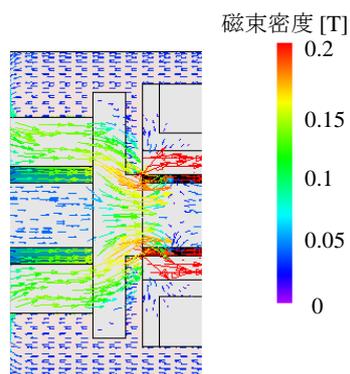
図 2-9 超磁歪アクチュエータ全体の磁束密度のベクトルプロット



(a) コイルに流れる交流電流が最大値

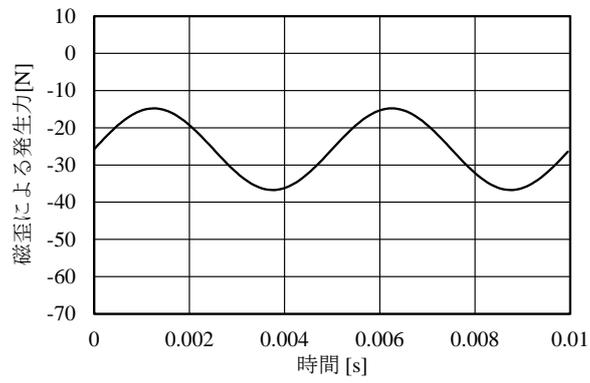


(b) コイルに流れる交流電流値が 0 A

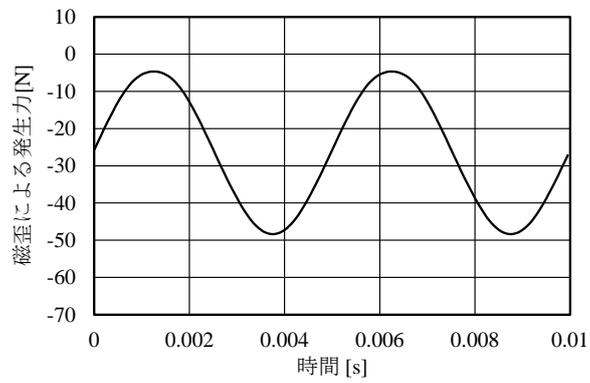


(c) コイルに流れる交流電流が最小値

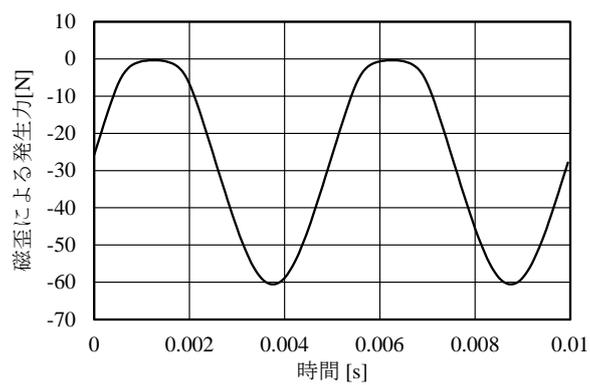
図 2-10 コイルに流れる電流に対する超磁歪材料と可動子付近の磁束密度



(a) コイルに流れた交流電流値 0.5 A



(b) コイルに流れた交流電流値 1.0 A



(c) コイルに流れた交流電流値 1.5 A

図 2-11 交流電流 200 Hz 時の磁歪による発生力の時刻歴 [2-1]

## 2.4 圧電制御型アンプの使用を考慮したアクチュエータの電磁界解析[2-1]

### 2.4.1 交流電流源の周波数変更による磁歪による発生力の比較

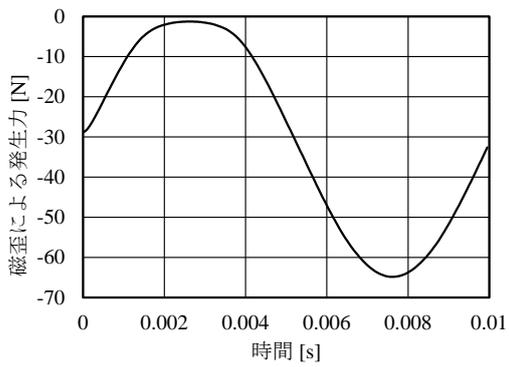
本論文で提案しているシステムでは、超磁歪アクチュエータを壁面に設置して制御音波を出力する際、電圧制御型のアンプを使用することを想定している。電圧制御型のアンプを用いるとアクチュエータのインダクタンスの影響を受けるため、本項では低周波から高周波までの磁歪による発生力について検討を行った。検討ではコイルに流す電流の電圧を 3V 一定として、電流の周波数を 100Hz から 10000Hz まで変更した解析を行った。なおその他の解析条件は前章の電磁界解析で用いた有限要素モデルと同様とした。

### 2.4.2 ロードノイズ周波数帯域の磁歪による発生力の結果と考察

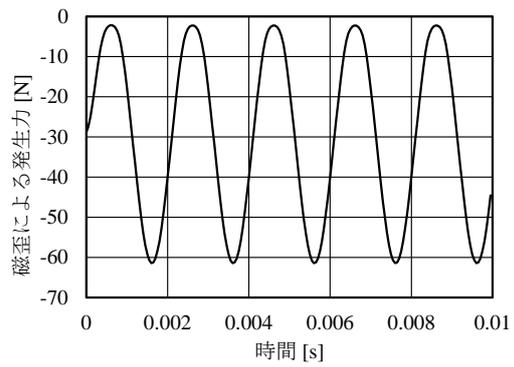
磁歪により超磁歪材料の可動子 2 と接触した面で発生した力の時刻歴を図 2-12 に示す。同図(a)は 100 Hz, (b)は 500 Hz, (c)は 1000 Hz, (d)は 5000 Hz の結果である。周波数の増加に伴い、振幅が減少していく傾向が確認できた。同図の(a)のように 100 Hz では磁歪による発生力が-3 N 以上になった際に、波形に歪みが見られた。本研究では永久磁石に残留磁束密度 0.45 T のフェライト磁石を使用して検討を行ったが、より残留磁束密度の高い永久磁石を用いることで波形の歪みを改善できると考えられる。

各周波数における磁歪による発生力の両振幅値を図 2-13 に示す。永久磁石を用いることで 100 Hz~500 Hz までは磁歪による発生力の振幅は約 60 N とほぼ一定であるのに対し、1000 Hz 以上では振幅が減少し、10000 Hz で約 9 N まで減少した。

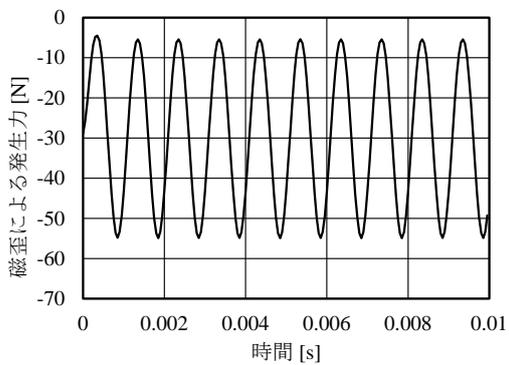
本システムで提案するアクティブノイズコントロールシステムは 100 Hz~500 Hz のロードノイズを対象としている。そのため、騒音制御対象とする周波数帯域において、磁歪による発生力は制御音波の出力に十分な性能であることが明らかとなった。



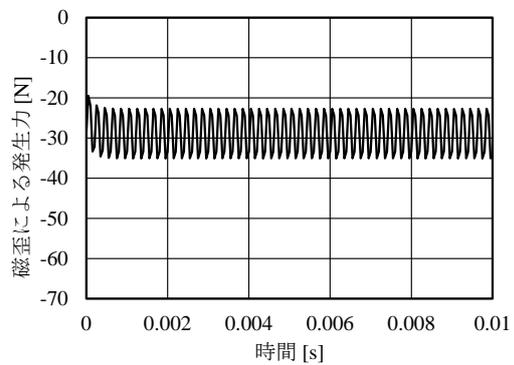
(a) 100 Hz



(b) 500 Hz



(c) 1000 Hz



(d) 5000 Hz

図 2-12 各周波数の磁歪による発生力の時刻歴 [2-1]

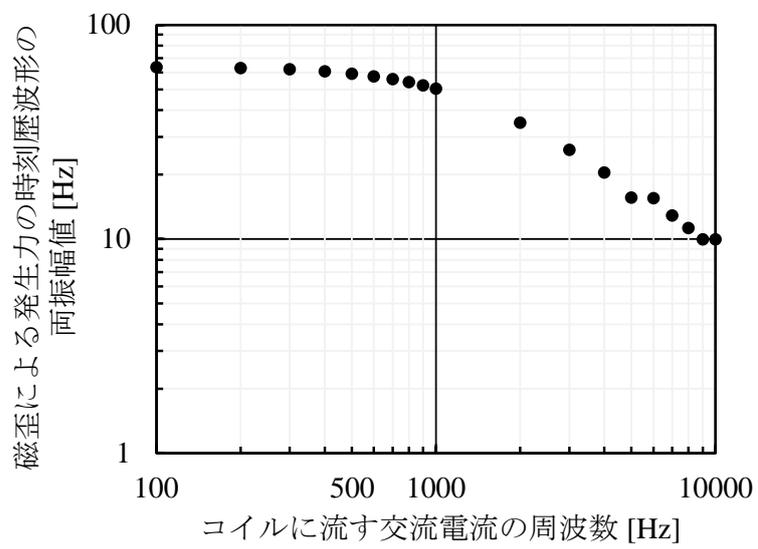


図 2-13 各周波数の時刻歴波形より磁歪による発生力の両振幅値 [2-1]

## 2.5 まとめ

本章では、小型モビリティ搭載用アクティブノイズコントロールシステムの超磁歪アクチュエータについて、超磁歪アクチュエータが振動を発生させる力について解析的に検討した。解析では超磁歪アクチュエータモデルを使用し、永久磁石の有無や印加交流電流値の変更による磁歪による発生力について比較検討を行った。また、実用を考慮して交流電圧源の周波数変更による磁歪による発生力について検討した。検討によって得られた成果は以下の通りである。

1. バイアスマグネットの設置によって指令電流と同一の波形を出力でき、アクチュエータの動作を確認した。
2. 印加電流値を 1.5 A とした場合、磁歪による発生力が 0 N 程度に減少して波形に歪みが見られた。この原因は磁束密度が低下した際に超磁歪材料の非線形な領域で動作したためと考えられる。
3. 交流電圧源の周波数 100 Hz では、磁歪による発生力が -3 N 以上になった際に、波形に歪みが見られた。この原因を解決するためには、使用している永久磁石の磁束密度を高いものに変更することで改善できると考える。
4. 磁歪により超磁歪材料の可動子 2 と接触した面で発生した力は 100~500 Hz までほぼ一定であることから、本システムで提案するアクティブノイズコントロールシステムにおいて制御対象とするロードノイズ周波数帯域に対して十分な性能を持っている。

以上の結果を踏まえて、次章では超磁歪アクチュエータによる壁面振動を利用したアクティブノイズコントロールにおいて、低周波騒音の消音効果について検討を行う。

## 第3章

壁面の振動特性を考慮した超磁歪アクチュエータによる騒音制御

### 3.1 はじめに

前章の検討より，本研究で提案する超磁歪アクチュエータを用いたアクティブノイズコントロールシステムにおいて，使用する超磁歪アクチュエータが騒音の制御対象としている低周波帯域の出力に十分な性能があることが明らかとなった．そこで本章では，超磁歪アクチュエータによる壁面振動を利用したアクティブノイズコントロールの消音効果について，実験的な検討を行う．

検討では，小型モビリティの 1/8 サイズの消音実験用箱を使用し，超磁歪アクチュエータを設置する壁面の振動特性を明らかにし，騒音制御性能を向上させることを目的とした．壁面の振動特性を明らかにするために 2 つの検討を行った．まず，制御対象とするロードノイズ周波数帯域で最も壁面を透過しやすい周波数が車内騒音となるため，壁面の固有振動数を明らかにし，騒音として透過しやすい周波数について検討した．次に超磁歪アクチュエータの設置位置と消音実験用箱内の消音効果について，超磁歪アクチュエータから出力される制御音波が最も箱内部で音圧レベルが大きくなる設置位置を実験的に検討した．さらに，超磁歪アクチュエータの壁面によって出力する制御音波の音圧レベルが最も大きくなる設置位置と，アクリル板の固有振動数での振動モードとの関係について明らかにした．

最後に，超磁歪アクチュエータの設置位置を検討することにより超磁歪アクチュエータを用いたアクティブノイズコントロールについて消音量の観点から騒音制御性能について考察した．

## 3.2 消音実験用箱を用いたアクティブノイズコントロールによる騒音低減[3-1]

2章より、騒音制御対象とする周波数帯域において、磁歪による発生力は制御音波の出力に十分な性能であることが明らかとなった。そのため、2章の結果を受けて図 3-1 に示す超磁歪アクチュエータを使用し、アクティブノイズコントロールによる騒音低減の実験的検討を行う。

本研究では図 3-2 示す小型モビリティの約 1/8 サイズの消音実験用箱（縦 530 mm，横 430 mm，奥行き 630 mm，板厚 15 mm，材質：木製合板）を使用して消音実験を行った。箱の 1 つの面には車両のフロントウィンドウを模擬したアクリル板を設ける。2 枚のアルミ合金製の枠（縦 610 mm，横 510 mm）を取り付け、その間にアクリルが縦（y 方向）450 mm，横（x 方向）350 mm となるように、アルミ合金製の枠の周辺をボルト固定している。設置するアクリル板は厚さ  $t = 3$  mm，4 mm，5 mm とした。また騒音はアクリル板からのみ透過し、箱内部における反射などは考慮しないものとするため図 3-3 のように内面には厚さ約 30 mm の吸音スポンジを貼り付けた。



図 3-1 超磁歪アクチュエータ

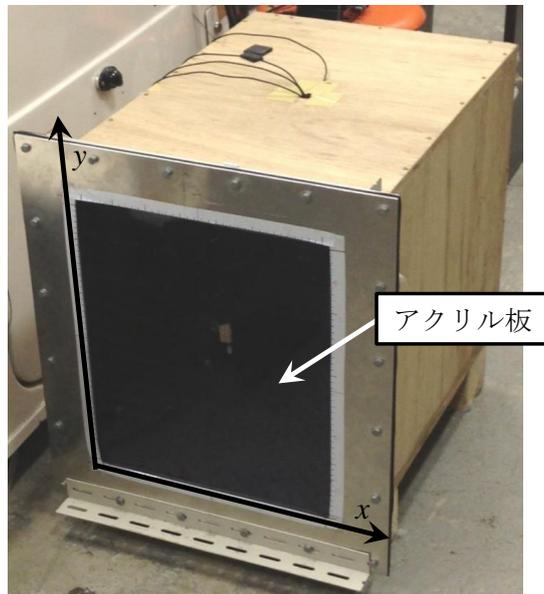


図 3-2 消音実験用箱 [3-1]

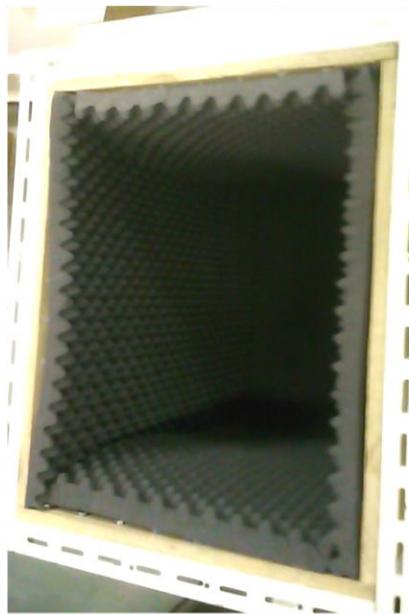


図 3-3 音の反響を抑制するため吸音スポンジを貼付した消音実験用箱の内部

### 3.3 超磁歪アクチュエータを設置する壁面の振動特性による騒音制御性能の向上 [3-1]

#### 3.3.1 壁面の固有振動数の計測による制御対象周波数の決定

小型モビリティの車内騒音は、車両の外部で発生した騒音によって壁面が振動することで騒音が透過する。外部の騒音によって壁面がする壁面の固有振動が引き起こす共振によって、その周波数の音が車内騒音となる。このことから、騒音制御対象とするロードノイズ周波数帯域で最も壁面を透過しやすい周波数が車内騒音となるため、壁面の固有振動数を明らかにし、最も騒音として透過しやすい周波数の低減を図ることが重要である。

本項では小型モビリティのフロントガラスを模擬したアクリル板の固有振動数を測定した。図 3-4 実験ではインパルスハンマ（小野測器社製 GK-3100）と加速度ピックアップ（小野測器社製 NP-3211）を用いた打撃試験を行った。なお前述の実験装置に各アクリル板を固定して実験を行っている。

図 3-5 に各板における周波数と伝達率の関係を示す。同図よりいくつかの周波数において比較的鋭いピークが確認できる。また同図の赤いハッチング部は制御対象であるロードノイズ周波数を表す。ロードノイズがアクリルを通して入力される場合、アクリル板の固有振動数付近では振動が減衰しにくいため他の周波数に対して車両内へ騒音が透過しやすく、さらに超磁歪アクチュエータを用いたアクリル板の加振による消音制御の効果も高いと考えられる。

以上の結果より、本章における消音実験では 100～500 Hz のロードノイズ範囲の中でアクリル板の周波数応答が最も大きい値を示した周波数を騒音として消音実験を行った。

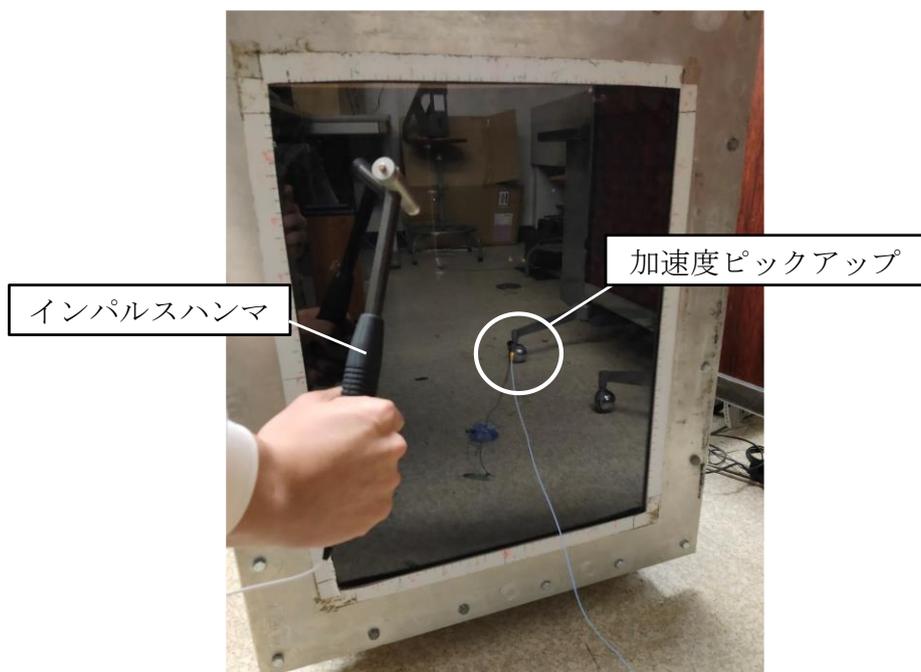
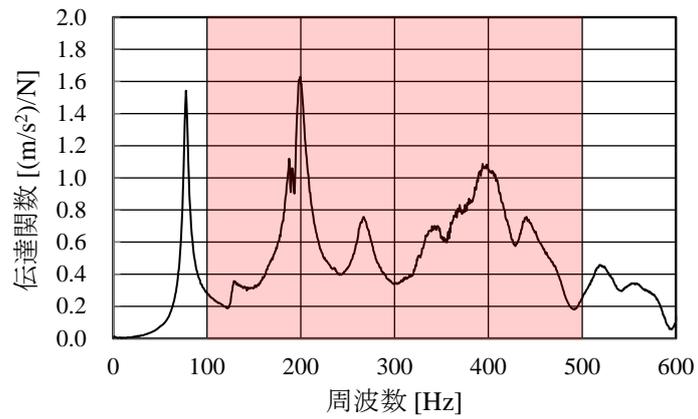
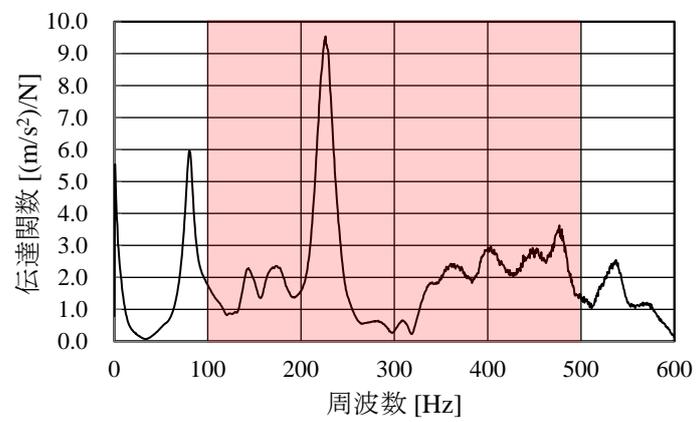


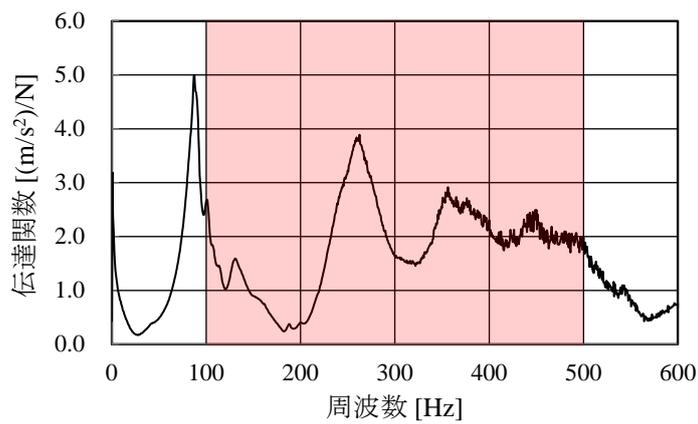
図 3-4 インパルスハンマと加速度ピックアップを用いた打撃試験



(a)  $t = 3 \text{ mm}$



(b)  $t = 4 \text{ mm}$



(c)  $t = 5 \text{ mm}$

図 3-5 アクチュエータを設置する各アクリル板の周波数応答

### 3.3.2 超磁歪アクチュエータの設置位置による制御音波の音圧レベルの比較

消音実験を行うにあたり，超磁歪アクチュエータを使用したアクティブノイズコントロールにおいて最も消音効果が大きくなる設置位置を検討する必要がある．そのため，超磁歪アクチュエータによってアクリル板を振動させて最も音を大きく出力できる加振位置について実験的に検討を行う．検討ではアクリル板に対して  $x$  方向は 20 mm 間隔， $y$  方向は 30 mm 間隔ごとに合計 169 か所に超磁歪アクチュエータの加振位置を設定し，図 3-6 に示すように，各加振位置位置において出力される音圧レベルを消音実験用箱内に設置した計測用マイク Sensor 2 にて測定した．なお超磁歪アクチュエータから出力される音波は前掲 3.3.1 項の検討により，各アクリル板の板の厚さ 3 mm，4 mm，5 mm において 100～500 Hz のロードノイズ周波数帯域で最も伝達関数の値が大きかった周波数を出力した．そのため，アクリル板の板の厚さ 3 mm では 200 Hz，4 mm では 230 Hz，4 mm では 260 Hz，の音波を電圧一定で消音実験用箱内に向けて出力した．

図 3-7 に各アクチュエータの加振位置における，消音実験用箱内で測定された音圧レベルをアクチュエータの加振位置ごとに表した図をしめす．同図より全てのアクリル板において出力される音圧レベルにはアクチュエータの設置位置の違いによって最大で 25 dB 程度の差があることが確認できた．さらにすべての板において板の中心から 80 mm 上の位置に，超磁歪アクチュエータを設置することにより出力される音圧レベルが大きくなることが確認できた．

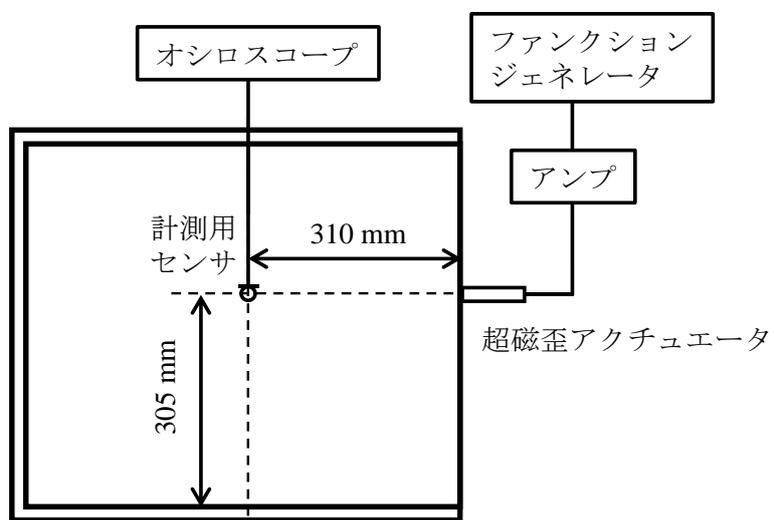
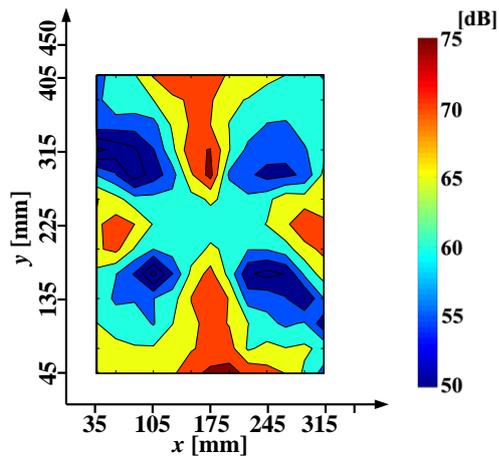
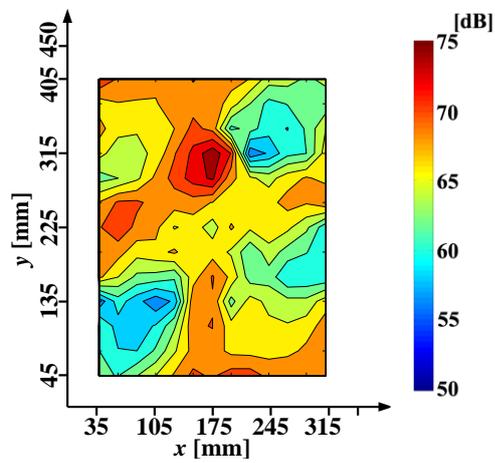


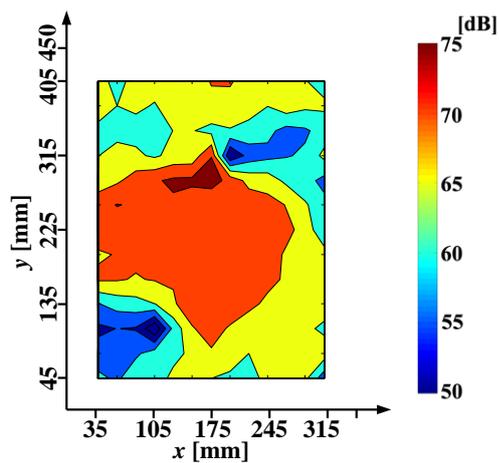
図 3-6 超磁歪アクチュエータと箱内のセンサの位置



(a)  $t = 3$  mm



(b)  $t = 4$  mm



(c)  $t = 5$  mm

図 3-7 各アクリル板の板厚におけるアクチュエータの加振位置に対する音圧レベル[3-1]

### 3.3.3 壁面の振動モードとアクチュエータの設置位置の関係

3.3.2 項にて決定した超磁歪アクチュエータの設置位置と各アクリル板で最も伝達関数の値が大きかった周波数におけるアクリル板の振動モードとの関係について考察する。

前述のインパルスハンマによる打撃試験結果より算出したアクリル板の振動モードを板厚ごとに図 3-8 に示す。同図はアクリル板の長手方向から見た図である。全アクリル板の振動モードは  $y$  軸方向に見て 3 つの腹があり、中央の腹とこれを挟む上下の腹はその振幅が逆方向となることが確認できる。ここで、箱内のセンサで音圧レベルが最も音圧が大きくなった位置を A 部 ( $y = 305 \text{ mm}$ ) として矢印にて示した。すべてのアクリル板において A 部は振動モードの腹となっている。当初、振動モードの腹にアクチュエータを接触させることは加振を行うと同時に振幅を抑制する原因となることも懸念された。本実験の条件においては腹にアクチュエータを設置することが最も効果が高くなることが確認できた。また、対象とした騒音の周波数においてはすべてのアクリル板においてその振動モードに 3 つの腹があるが、板の中心や板の下部における腹の部分では A 部と比較して大きな音圧レベルとならなかった。中央の腹においては超磁歪アクチュエータを設置するとアクリル板全体の振動を抑制してしまうことを確認している。さらに測定に用いた箱内の評価用の Sensor 2 の位置が  $y$  方向に対して中央よりも高い位置に設置 ( $y = 225 \text{ mm}$ ) していたため、アクリル板下部の腹では音圧レベルが高くならなかったものと考えられる。

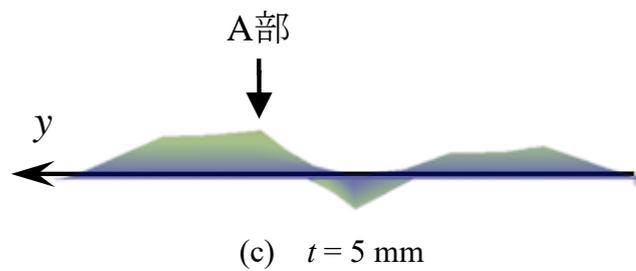
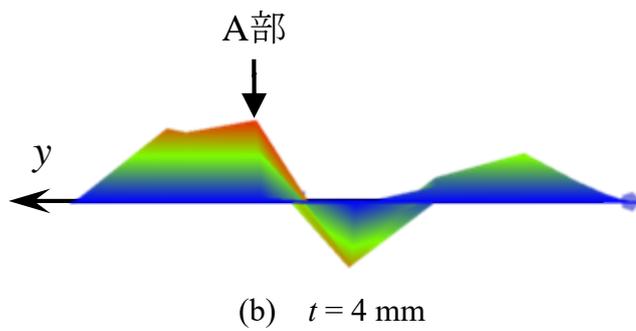
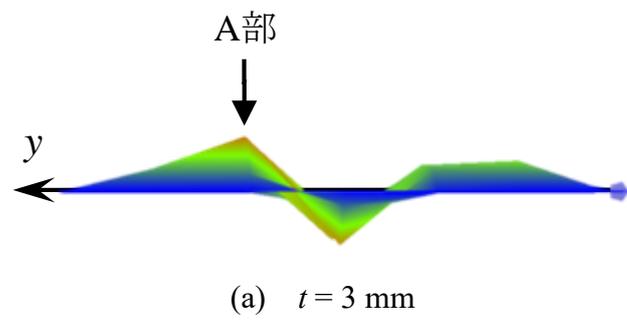


図 3-8 各アクリル板の板厚で固有振動数の値が大きくなった周波数の振動モード [3-1]

### 3.4 壁面の振動特性を考慮した超磁歪アクチュエータを用いたアクティブノイズコントロールの実験 [3-1], [3-2]

#### 3.4.1 消音実験のシステム

図 3-9 に消音実験のシステムを示す。本消音実験ではアクリル板の前に設置したスピーカから前掲 3.3.1 で明らかにした各アクリル板の板厚で透過しやすい周波数の騒音を出力する。スピーカとアクリル板の間に設置した Sensor 1 で騒音を測定し、Digital Signal Processor (DSP)を介して制御信号を出力する。制御音波の信号は、超磁歪アクチュエータによるアクリル板の加振により、制御音波として出力させて騒音制御を行う。小型モビリティは 1 人もしくは 2 人乗りの座席配置であることから、フロントガラスから見て車両横方向においては中央付近に乗員の耳があるものと考えられる。そこで消音量はサイズを小さくした箱において実車両と概ね相似するような乗員の位置を想定し、 $x = 175 \text{ mm}$ ,  $y = 300 \text{ mm}$ , 箱の奥行きに対して中央付近（アクリル板から 310 mm）に設置した Sensor 2 により評価した。

アクリル板に設置する超磁歪アクチュエータは、図 3-10 に示すように可動部分である直径 10 mm のアクチュエータの先端をアクリル板に接触させた。前章で述べたが、超磁歪材料はアクチュエータの軸方向に磁歪による発生力が働くため、アクチュエータの可動部がアクリル板に垂直になるように設置した。またアクリル板  $x$ ,  $y$  座標上における設置位置に関しては全掲 3.3.2 項により決定した。

さらに実用を考慮すれば車両内部や窓部分にて騒音の取得を行うべきであるが、本実験では提案するシステムの最も基礎的な制御性能のみを対象とし、騒音信号の取得については車両を模擬した箱の外側で行うフィードフォワード制御とした。

ここで図 3-11 にシステムのブロック線図を示す。スピーカから出力される騒音をアクリル板の直前に設置した Sensor 1 で参照信号  $a$  を検出し、その信号をもとにオールパスフィルタによる位相補償  $G(s)$  とゲイン  $K$  により制御信号  $b$  を生成し、箱内に設置した Sensor 2 で消音できるようにアクリル板に設置した超磁歪アクチュエータより制御音波を出力する。図において  $d$  は騒音が Sensor 1 から伝達経路  $P$  を通って Sensor 2 に至る音圧信号であり  $P$  は設置したアクリル

板と Sensor 2 までを表している[3-3]. フィードフォワード制御では Sensor 2 で騒音と制御音波の和である誤差信号  $e$  が最小になるように制御することとなる. さらに本研究では位相特性のみ変化させるオールパスフィルタを用いて位相補償し, 消音制御を行った[3-4]. またゲイン  $K$  は実験によって試行錯誤的に探索し, アクチュエータの性能の範囲において最も消音効果が高くなる値である 80 を採用した.

次に, 本研究では騒音が最も透過しやすい周波数を制御対象とするため, オールパスフィルタを用いて位相のみ補償し, 消音効果を改善することが出来る. オールパスフィルタは,  $0 \sim 180^\circ$  の時は反転し,  $180 \sim 360^\circ$  の時は反転させない.

$$G(s) = \pm \left( \frac{s+z}{s-p} \right) \quad (1)$$

$z$  がオールパスフィルタ位置が 0 の時で,  $p$  がオールパスフィルタが 0 とは対極の位置にある値である. オールパスフィルタは  $z = p$  でなければならない.  $0 < \theta < 180$  の場合は, 以下の計算式を用いる.

$$p = z = \frac{\omega}{\cot\left(\frac{\pi\theta}{360}\right)} \quad (2)$$

また,  $180 < \theta < 360$  の場合は, 以下の計算式を用いる.

$$p = z = \frac{\omega}{\cot\left(\frac{\pi\theta}{360}\right)} \quad (3)$$

ただし,  $\theta$ : 位相差,  $\omega$ : 対象とする周波数[rad/s]とする.

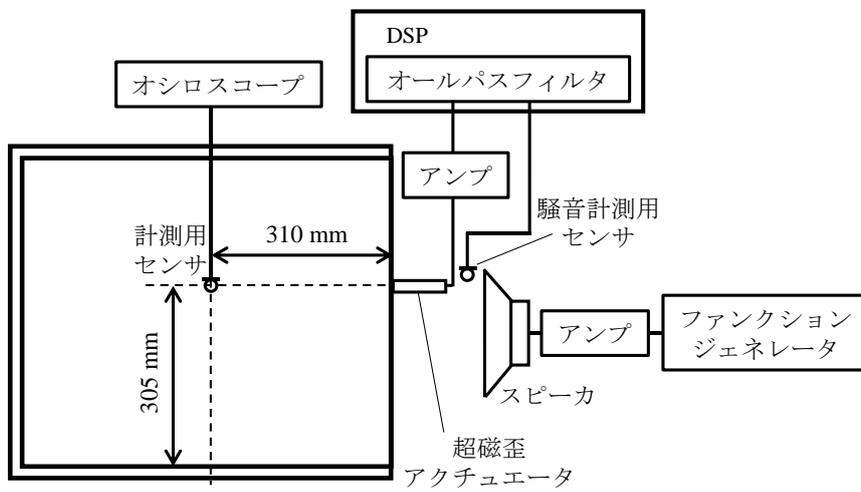


図 3-9 消音システム

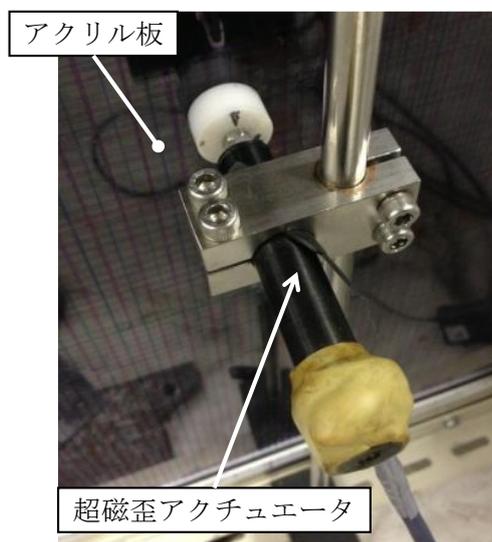


図 3-10 超磁歪アクチュエータの設置

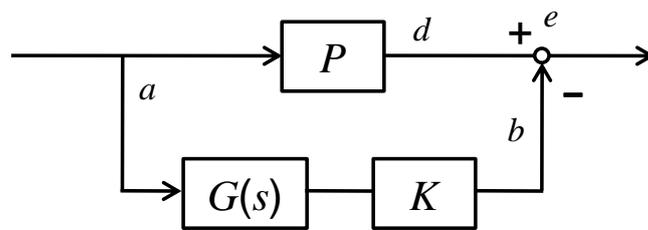
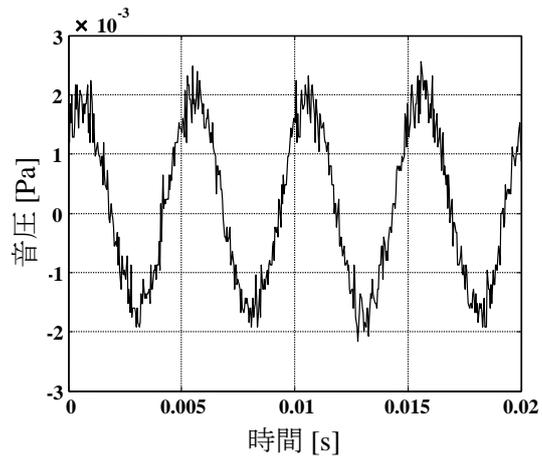


図 3-11 位相補償を用いたフィードフォワード制御システムのブロック線図  
[3-1], [3-2]

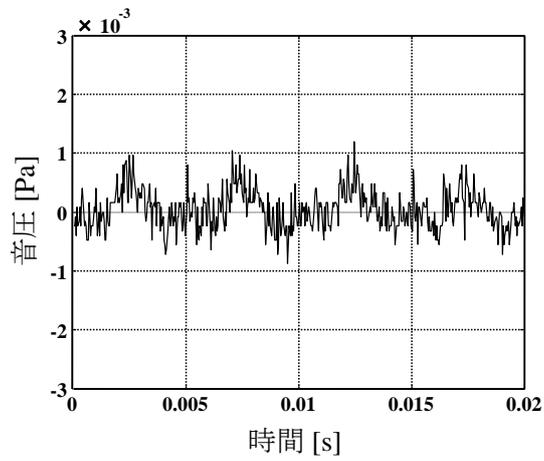
### 3.4.2 超磁歪アクチュエータの設置位置による消音量の比較

消音実験の結果の一例として図 3-12 に  $t=3$  mm における Sensor 2 にて取得した音圧レベルのパワースペクトルを示す。同図(a)は未制御, (b)は 3.3.2 項において最も大きな音圧の出力が確認できた A 部に超磁歪アクチュエータを設置した場合の結果である。なお騒音の音圧レベルは車外から入力されるロードノイズとして最悪の環境を想定した約 80 dB が箱内 Sensor 2 に到達するように設定した[1-41]。同図より入力された消音対象周波数の騒音である 200 Hz では未制御の 78.5 dB に対して制御時には 18.3 dB の消音効果が確認できた。

超磁歪アクチュエータの設置位置の違いによる消音量を板厚ごとに比較する。図 3-13 にアクチュエータの設置位置が A 部の場合と板の中心である B 部の場合における未制御に対する制御時の消音量を示す。 $t=3$  mm では 18.3 dB,  $t=4$  mm では 15 dB,  $t=5$  mm では 27.0 dB であり, 高い消音効果が得られた。一方, アクリル板の中心である B 部の場合における未制御に対する制御時の消音量を示す。この結果より各板厚において A 部では高い消音効果が得られるのに対し, B 部では効果が得られるものの消音量は 5 dB 以下となり, 壁面の振動特性を考慮することの有用性が明らかとなった。



(a) 未制御



(b) 制御

図 3-12 アクリル板の板厚 3 mm における消音実験の結果 [3-1]

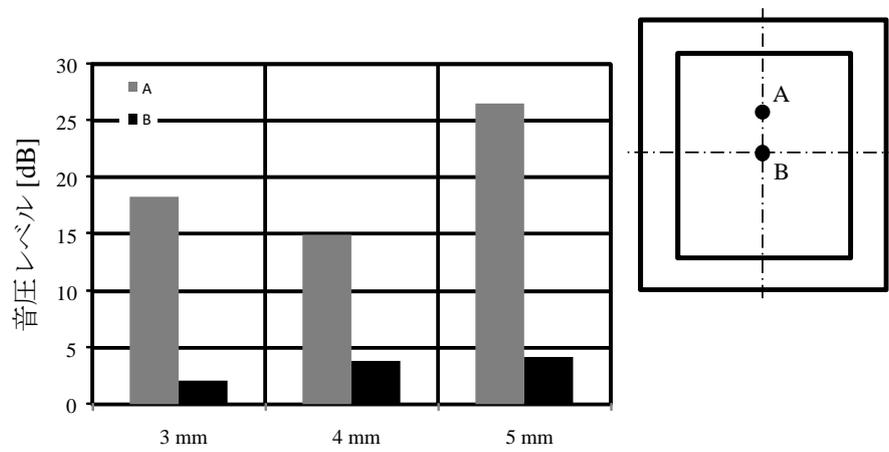


図 3-13 各アクリル板の板厚における加振位置の違いによる消音量[3-1]

## 3.5 複雑な音場でのアクティブノイズコントロール[3-1], [3-2]

### 3.5.1 小型モビリティを使用した消音実験

前節の検討により，超磁歪アクチュエータを設置する，壁面の振動特性を考慮することによる制御性能の向上について検討した．その結果，壁面の固有振動数やアクチュエータの設置位置を検討することにより，大きな消音量となることが明らかとなった．

そこで本節では，消音実験用箱よりも大きく複雑な音場での消音実験を行う．消音実験では図 3-14 に示すようなタケオカ自動車工芸社製小型モビリティ（全長 2020 mm，全幅 1200 mm，全高 1590 mm）を使用し，超磁歪アクチュエータの消音効果について検討した．本研究では車体の中でも形状が単純であるフロントウィンドウからのみ低周波帯域であるロードノイズが透過するものとし，それ以外の車内壁面は吸音スポンジ（厚さ約 30 mm）を貼り付けることで反射や共鳴の影響を少なくした．なお対向車や並走する車両からのロードノイズも考慮した場合フロントウィンドウをはじめとする窓ガラスからの騒音の透過が大いに懸念されることを付言する．

消音実験のシステムを図 3-15 に示す．消音実験では騒音源としてスピーカからフロントウィンドウに向けて対象としているロードノイズ範囲（100～500 Hz）の周波数[4-2]，のうち 200 Hz の騒音を出力し，ルーフ部に設置した Sensor 1 で騒音を計測する．なおフロントガラスの固有振動数はアクリル板のように明確なピークが測定出来なかった．そのため，固有振動数に近い周波数である 200 Hz を騒音とした．測定した騒音は DSP を介して制御信号を出力し，超磁歪アクチュエータによるフロントウィンドウの加振により，制御音波を出力させて騒音制御を行う．騒音低減の消音量は乗員の耳の位置を想定し JIS 規格を参考として設置した Sensor 2 により評価した．Sensor 2 は車幅方向では中央とし，床面より 1450 mm，前後方向は後方から 300 mm とした．

さらに実用を考慮すれば車両内部や窓部分にて騒音の取得を行うべきではあるが，本実験では提案するシステムの最も基礎的な制御性能のみを対象とし，騒音信号の取得については車両の外側で行うフィードフォワード制御とした．



図 3-14 タケオカ自動車工芸社製小型モビリティ

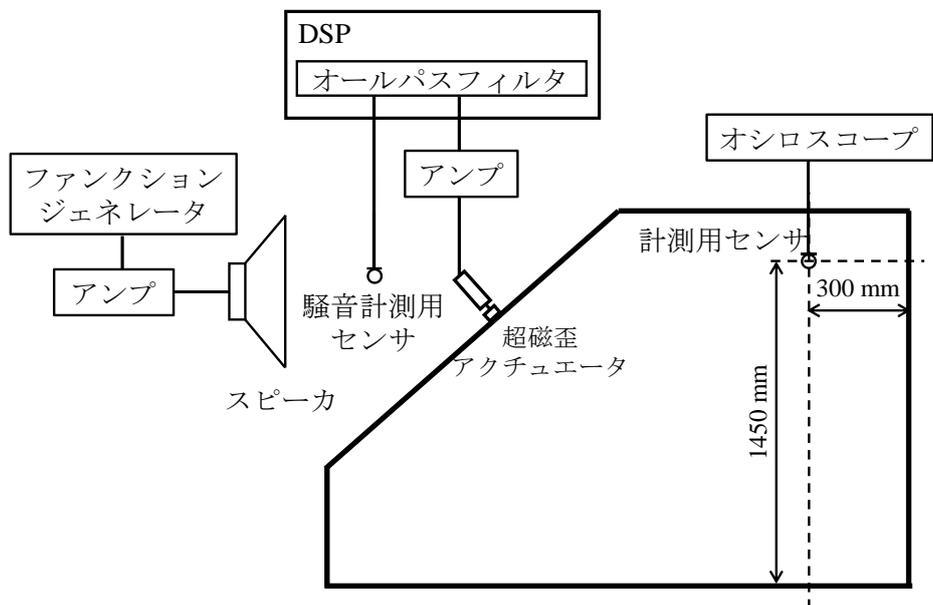
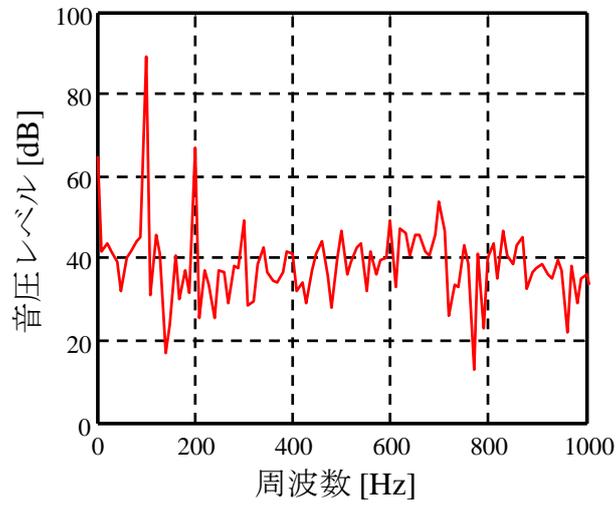


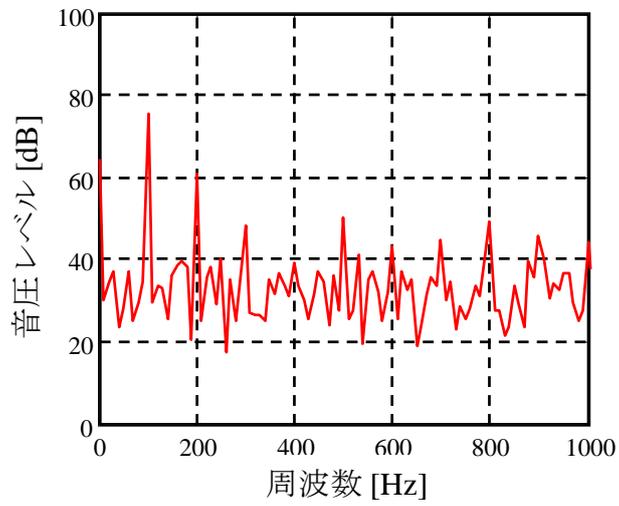
図 3-15 消音システム

### 3.5.2 アクティブノイズコントロールによる消音量

図 3-16 に Sensor 2 にて取得した音圧レベルのパワースペクトルを消音実験の結果として示す。同図(a)は未制御、(b)は制御時である。騒音の音圧レベルは車外から入力されるロードノイズとして想定した約 70 dB が車内 Sensor 2 に到達するように設定した。また、制御時の超磁歪アクチュエータに印加する電圧のサイン波最大片振幅値は約 1.5 V であった。同図より入力された消音対象周波数の騒音である 200 Hz では未制御の 66.3 dB に対し、制御時には 46.4 dB となり、19.9 dB の消音効果を確認できた。



(a) 未制御



(b) 制御

図 3-16 Sensor 2 にて取得した音圧レベル[3-2]

## 3.6 まとめ

本章では超磁歪アクチュエータを設置する壁面の振動特性を明らかにし、騒音制御性能の向上を目的とした検討を行った。検討では消音実験用の箱を使用し、アクリル板の固有振動数を測定し、透過しやすい周波数を明らかにした。また、超磁歪アクチュエータの設置位置と制御点で測定される音圧レベルから、最適なアクチュエータ設置位置を明らかにした。以上の検討によって得られた成果は以下の通りである。

1. 壁面の振動特性を考慮することで、消音量が大きくなり騒音制御性能の向上を明らかにした。
2. アクリル板よりも大きく硬い材質の平板部でも、固有振動数の測定や超磁歪アクチュエータを設置する位置を検討することで大きな消音量となることを確認した。
3. 実際の走行環境においても、壁面を透過しやすい周波数の騒音を低減することで快適性を向上できると考える。

本章で構築した手法を用いることで、形状や材質が変化しても同様のシステムを構築できる。さらに壁面の振動特性を考慮することによってフロントガラスだけでなく、天井など他の大きさや材質でも応用ができると考えられる。

## 第4章

# 心理状態推定による車内騒音に対する 快適性評価

## 4.1 はじめに

前章では、超磁歪アクチュエータを用いたアクティブノイズコントロールによる消音実験を行った。その結果、超磁歪アクチュエータの設置位置を考慮すると高い消音効果が得られることが明らかとなった。

そこで本章では、超磁歪アクチュエータを用いたアクティブノイズコントロールシステムを適用し、脳波測定による快適性評価と好みの車内音環境の傾向について検討を行った。検討では、車内の音響環境をアクティブノイズコントロールによる騒音を制御した場合と乗員の好みの音楽を重畳したマスキングを行った場合とした。快適性の評価方法は車内の実験協力者の脳波測定を行い、測定された脳波の中、人がリラックスしたときに電圧が大きくなる  $\alpha$  波出現率を用いて快適性を評価した。また、実験協力者ごとの音の聞こえ方や感じ方に着目し、ラウドネスの実験と静粛な環境における脳波測定から、快適な音響環境の傾向を明らかにした。

## 4.2 生体情報計測による心理状態の推定 [4-1], [4-2], [4-3]

### 4.2.1 脳波測定による快適性評価

乗り心地評価を定量的に行う方法の一つとして乗員の脳波を測定する研究が行われている[4-4]。脳波は脳の神経細胞の活動に伴って発生する微弱な電気変動であり、精神活動や感覚刺激、意識水準に伴って変動するため人間がどのような精神状態にあるのかを知ることができる。

本研究では生体情報の一つである脳波を測定し快適性評価を行った。本検討では図 4-1 に示す脳波計（株式会社脳波開発研究所製アルファテックIV）を使用した。使用した脳波計は人の額部に 2 つの電極があり、脳の前頭葉の活動を測定している。この前頭葉を含む大脳皮質は、思考や判断など高度な知的活動の中枢であり、運動を司る一次運動野でもある。そのため、車内の音響環境が人に与える影響について人の状態を定量的に評価することが可能である。

脳波計では 1 秒間の脳波を 0~23 Hz の範囲で測定し、 $\theta$  波（4~6 Hz）、 $\alpha$  波（7~14 Hz）、 $\beta$  波（15~23 Hz）の 3 種類に分類した。また脳波測定は 0 Hz~23 Hz の範囲で 1 秒ごとに最も強く（電圧が高い）計測された周波数を 1 分間でどのような割合になったかを示している。脳波を用いて快適性を評価する研究では測定される脳波のうち精神がリラックスしているときにその周波数帯域の電圧の値が大きくなる  $\alpha$  波を評価基準として採用している[4-5]-[4-7]。

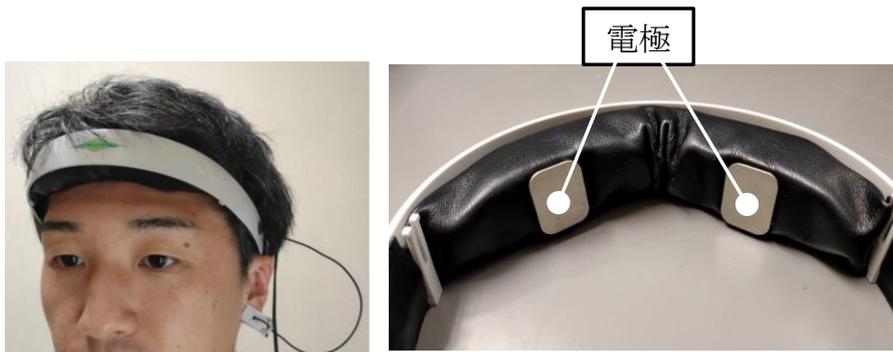


図 4-1 音の刺激による思考で活動する前頭葉の電圧を測定する脳波計

#### 4.2.2 $\alpha$ 波出現率による快適性の評価指標

図 4-2 にある  $x$  秒時の脳波測定の結果を一例として示す。縦軸が電圧、横軸が周波数である。この  $x$  秒時の脳波は 20 Hz が最も電圧が高くなっている。この時 11 Hz は  $\alpha$  波の範囲なのでこの時間での脳波は  $\beta$  波にカウントされる。このように 1 秒ごとに最も電圧が高かった周波数を測定し、その周波数をそれぞれの脳波に分けてカウントしていく。

そして本検討では図 4-3 に示す計算式によって脳波の測定時間内の各周波数帯における構成比から、全体に対する  $\alpha$  波の割合を  $\alpha$  波出現率と定義し、評価指標として用いた。

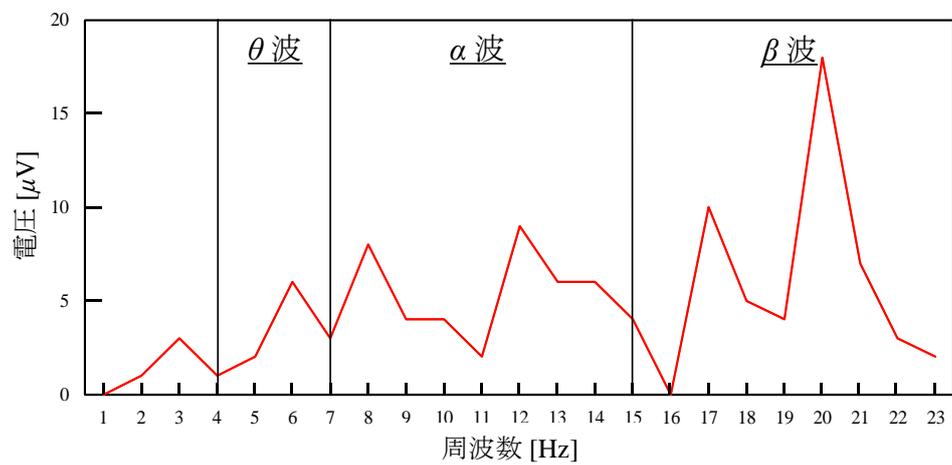
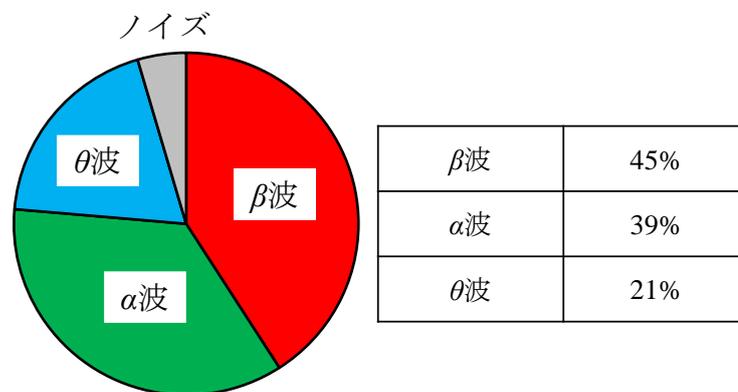


図 4-2  $x$  秒時の測定された脳波の電圧を周波数分析した結果の一例 [4-3]

$$\alpha\text{波出現率 (\%)} = \frac{\alpha\text{波}}{(\beta\text{波} + \alpha\text{波} + \theta\text{波})} \times 100$$

例)



$$\frac{39}{(45 + 37 + 21)} \times 100 = \underline{\underline{38.5\%}}$$

図 4-3  $\alpha$ 波出現率の計算方法

## 4.3 脳波測定による車内音響環境の定量的評価[4-1]

### 4.3.1 実験条件および方法

車内の音響環境による快適性の研究として乗員の脳波測定による評価と乗員の車内音響環境の傾向について検討する。

実験では図 4-4 に示すように車内に実験協力者がフロントウィンドウ向きに開眼安静状態で着座し、フロントガラスの前に設置したスピーカから 200 Hz の騒音を車内で 70 dB となるよう出力する。脳波測定を行う車内の音響環境は、(1) 未制御、(2) 制御、(3) 実験協力者の好みの音楽を超磁歪アクチュエータより出力した騒音のマスクングの 3 条件にて測定を行った。なお制御は、実験協力者の耳の位置において 12 dB 程度の消音効果があることを確認した。また騒音のマスクングは、実験協力者の好みの音楽をフロントガラスに設置した超磁歪アクチュエータより出力した。

脳波測定時間は各条件 3 分間とし、実験協力者は男子大学生および大学院生計 20 名で実験を行った。本実験に関しては東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会にて承認を得ている。なお後掲の実験結果から上記実験協力者にて十分考察可能であることを確認している。



図 4-4 脳波計を装着した状態で車内に着座した実験協力者 [4-1]

### 4.3.2 乗員の好みの音楽による騒音のマスクング

車内騒音に対して逆位相の制御音波を出力して騒音の低減を図るアクティブノイズコントロールは自動車の車内音響システムとして用いられている。一方、室内空間では制御音波ではなく音楽や音声信号によって騒音が認識されにくくなる聴覚上の現象を利用したマスクングが用いられている[4-8], [4-9].

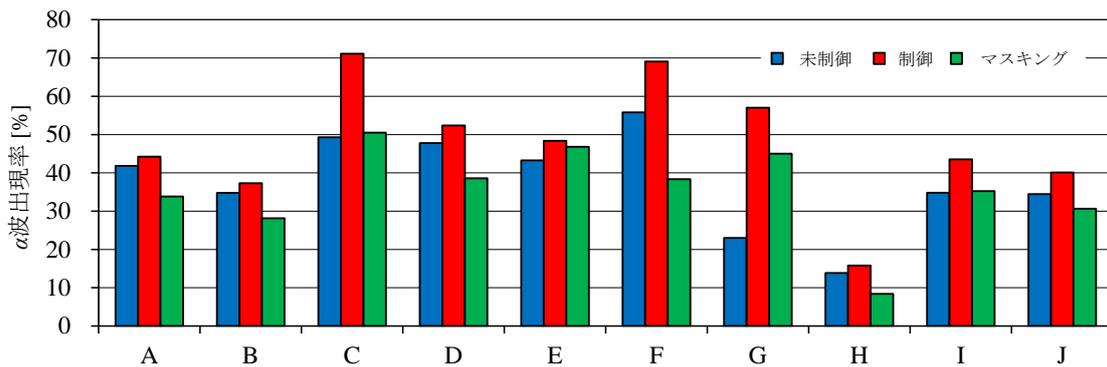
マスクングとは着目している信号音 A に対し別の信号音 B が存在すると、信号音 A の最小可聴値が上昇し、聞き取りにくくなる聴覚上の現象であり、マスクングによって信号音 A が聞こえなくなる場合は完全マスクング、聞こえにくくなる場合は部分マスクングと呼ばれる[4-10]。マスクングを利用した騒音に対する快適性向上の検討はアクティブノイズコントロールと同様の歴史があり工学的には異なる発展が見込める技術である。マスクングを利用した騒音による快適性向上に関する研究は数多く行われている。Shu らは都市の騒音に対して音楽や水が流れる音などを重畳することによって騒音を目立たなくさせることで、人の不快感の減少を報告している[4-11]。また西浦は騒音に対して複数の音源によってマスクングすることで、マスクングに使用する音源による快適性について主観評価を行い、不快感が抑制されることを報告している [4-12].

本研究で提案している超磁歪アクチュエータは低周波から高周波まで出力が可能であることから、音声信号も高音質で出力することが可能である。この点も踏まえると、超磁歪アクチュエータを用いた小型モビリティの車内音響はアクティブノイズコントロールによる車内騒音の低減だけでなく、乗員の好みの音声信号を用いたマスクングの提供も可能なシステムの構築が可能である。

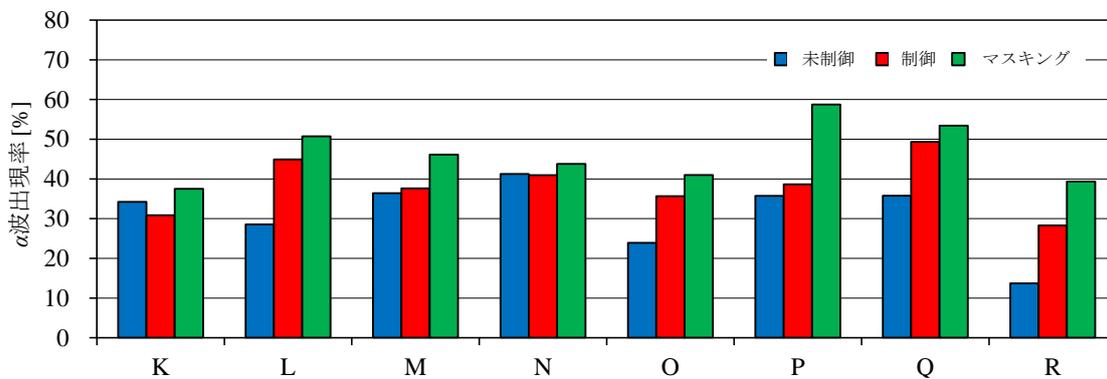
### 4.3.3 $\alpha$ 波出現率による好みの音響環境の評価

図 4-6 に 3 条件における各 3 分間の脳波により算出した  $\alpha$  波出現率を (a) 制御にてリラックスした実験協力者, (b) マスキングにてリラックスした実験協力者に分類して示す. なお  $\alpha$  波出現率は実験協力者間での定量的な比較には適していないため, 各実験協力者における条件の差に対し, 定性的な比較を行った. 3 条件のうちリラックス状態を表す  $\alpha$  波出現率が最も高い音響環境がその実験協力者にとっての快適な空間であると考えられ, 実験協力者 20 名のうち 200 Hz 騒音を制御した時にリラックスした実験協力者は全体の 50% であり, 消音するよりも好みの音楽にてマスキングした方がリラックスする実験協力者も 40% いることから 2 つのグループに分かれることが分かった.

なお同図に示さなかった 20 名のうち 2 名は未制御において最もリラックスする結果となった.



(a) 制御時のリラックス群 (実験協力者 10名)



(b) マスキングのリラックス群 (実験協力者 8名)

図 4-6 各実験協力者の脳波測定による  $\alpha$ 波出現率 [4-1]

## 4.4 乗員が不快に感じる騒音の周波数と音圧レベルの関係 [4-1]

### 4.4.1 ラウドネスによる周波数と音圧レベルの実験

前章の実験結果から乗員の好みによって快適に感じる環境に違いがあることが明らかとなり、乗員に応じた騒音の制御を提供することが必要となってくる。本章では好みの分かれた乗員をグループ分けしてそれぞれのグループの特徴を把握することを試みた。

ISO の規格では周波数を変化させたときに等しいラウドネス（人間の聴覚による音の大きさ、騒音のうるささ）になる音圧レベルを測定し、等高線として結んだものが提供されている。しかしながら各周波数に対する感度は個人によって異なり、同じ音圧であっても周波数によって感じる音の大きさには個人差がある。そこで本節では被験者が不快に感じる各周波数に対する音圧レベルを実験的に取得、整理した。

図 4-7 に実験環境を示す。実験方法は小型モビリティに実験協力者を乗車させ、乗員から 50 cm 離れたところに設置したスピーカから出力される音を聴くよう教示した。なおスピーカから出力する音は 100 Hz ごとにロードノイズ範囲を含む 100~1000 Hz の単一周波数を低周波音から順に出力する。実験協力者は車内に設置したスピーカ用アンプの出力ゲインを次第に大きくしていき、実験協力者が不快と感じるゲインまで調整するものとした。このときの実験協力者が限界と感じた音圧レベルとし、実験協力者の耳の位置に設置した騒音計にて音圧レベルを測定した。なお実験協力者は前章の脳波測定による実験で騒音制御時にリラックスを示した 10 名とマスキング時にリラックスを示した 8 名の合計 18 名とした。



図 4-7 小型モビリティの車内に設置したスピーカと実験協力者の位置関係

#### 4.4.2 実験結果および考察

図 4-9 に縦軸に音圧レベル，横軸に周波数を取り実験協力者が限界と感じた音圧レベルを，騒音制御時にリラックスした 10 名の平均値およびマスクング時でリラックスした 8 名の平均値として示す．同図よりマスクングでリラックスした実験協力者の平均値は消音でリラックスした実験協力者の平均値よりも全ての周波数で音圧レベルが大きくなることが分かった．消音でリラックスする実験協力者は音圧レベルに対する感度が高く不快に感じやすい傾向にあると考えられる．

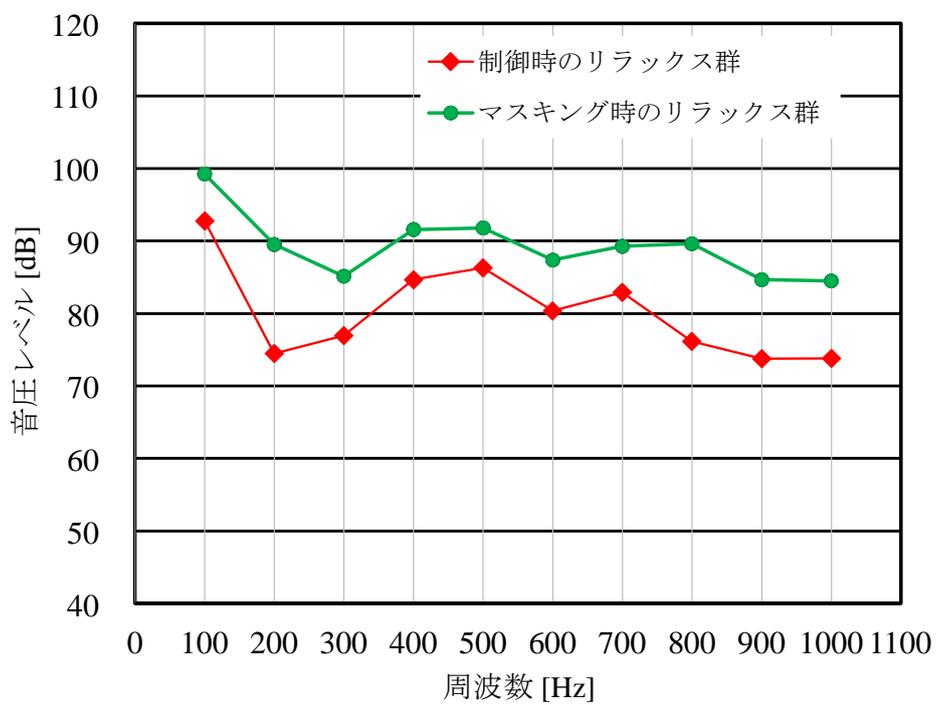


図 4-9 消音とマスクングでリラックス実験協力者のラウドネス

## 4.5 車内騒音の低減を好む乗員の特徴[4-1]

### 4.5.1 無響室での脳波測定

前節の結果より消音にてリラックスする実験協力者は比較的静かな環境を好むことが予想できるが、この検証のために無響室における脳波の測定を行った。

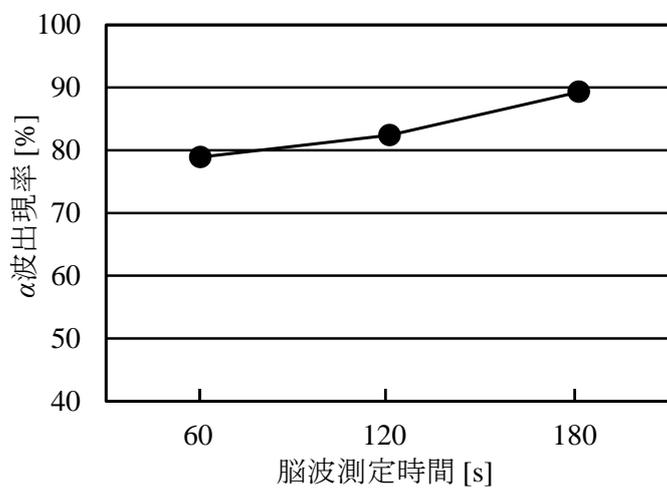
一般的に生活環境においては 60 dB 程度の音圧レベルが常にあるが、本実験では無響室（室内音圧レベル約 35 dB）にて、座位安静開眼状態の脳波を 3 分間測定した（図 4-10）。なお実験協力者は 4.3 節の実験における各条件にてリラックスとなったそれぞれ 5 名とした。



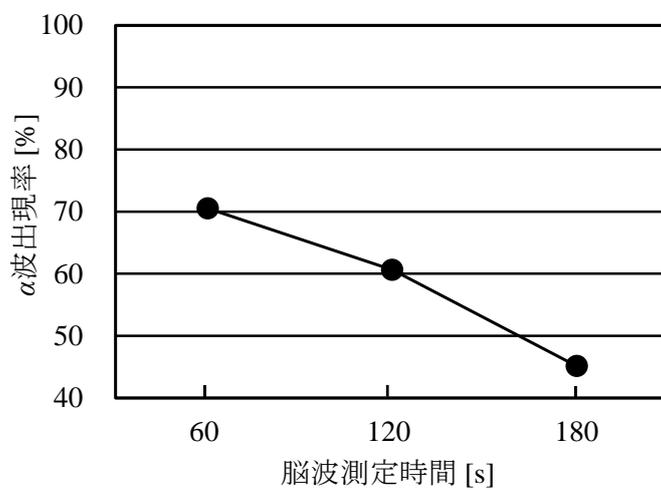
図 4-10 無響室内で脳波計を装着した実験協力者 [4-1]

## 4.5.2 結果および考察

図 4-11 に(a) 制御時にリラックスした実験協力者, (b) マスキング時にリラックスした実験協力者の  $\alpha$  波出現率の一例を示す. 同図より制御にてリラックスする実験協力者は無響室にいる時間が長くなると  $\alpha$  波出現率が増加しリラックスするのに対し, マスキングにてリラックスする実験協力者は無響室にいる時間が長くなると  $\alpha$  波出現率は減少することが分かる. なお  $\alpha$  波出現率に個人差はあるが, 同様の傾向が各実験協力者群において確認できた. これより消音にてリラックスした実験協力者は静寂な環境を好み, マスキングでリラックスする実験協力者は静寂な環境ではリラックスすることができないことが明らかとなった.



(a) 消音でリラックスする実験協力者



(b) マスキングでリラックスする実験協力者

図 4-11 無響室で測定した脳波の  $\alpha$  波出現率 [4-1]

## 4.6 まとめ

本章では小型モビリティのカウル部分を使用し、フロントウィンドウに超磁歪アクチュエータを設置して壁面振動を利用したアクティブノイズコントロールによる消音実験を行った。また車内騒音制御による車内音響制御による快適性の向上を目的として、人の生体情報の一つである脳波を測定し、人のリラックス時にその周波数帯域の電圧の値が大きくなる  $\alpha$  波着目して快適性の定量的な評価を行った。さらに実験協力者の好みの音響環境の傾向を把握するためラウドネスと無響音室での実験を行った。検討によって得られた成果は以下の通りである。

1. アクティブノイズコントロールによる騒音低減を好む実験協力者と好みの音楽でマスキングを好む実験協力者は同程度の割合となった。
2. ラウドネスの実験では車内騒音を好みの音楽でマスキングすると  $\alpha$  波出現率が高くなる実験協力者は騒音低減を好む実験協力者よりも全ての周波数で音圧レベルが大きくなる傾向となった。
3. 車内騒音の低減を好む実験協力者は音圧レベルに対する感度が高く不快に感じやすい傾向にある。
4. 無響音室での実験では好みの音楽で騒音をマスキングすることを好む実験協力者は静寂な環境では  $\alpha$  波出現率が減少する。
5. 無響音室での実験ではアクティブノイズコントロールによる騒音低減を好む実験協力者は静寂な環境では脳波測定時間の経過とともに  $\alpha$  波出現率が増加する。

人が快適に感じる車内音響環境には人それぞれ違いがあり、アクティブノイズコントロールによる騒音低減とマスキング効果によって表す  $\alpha$  波出現率が異なり、この違いを実験協力者のラウドネスによる感じ方や静寂な環境に対する脳波信号の違いが生じることが確認された。

## 第 5 章

### 結論

本研究では超磁歪アクチュエータを用いた小型モビリティの車内音響制御に着目し、超磁歪アクチュエータを用いた壁面振動によるアクティブノイズコントロールの消音効果について研究を行った。さらに小型モビリティの車内騒音改善による快適性向上に関して、脳波測定による評価と乗員の好みの車内音響環境の傾向について検討した。

以下に各章において得られた研究成果について述べる

## 第1章 序論

本章では本論文にて行った研究の背景となる小型モビリティの利用状況や応用事例、ロードノイズや風切音による車内騒音の問題について述べた。その解決方法として小型モビリティの車内スペースの確保や車両重量を考慮し、小型で高出力な超磁歪アクチュエータを用いたアクティブノイズコントロールシステムを提案した。さらに、車内音響制御における車内の快適性について生体情報計測による定量的な評価手法について述べた。

## 第2章 低周波制御音波の出力を考慮した超磁歪アクチュエータの設計

本章では小型モビリティの車内騒音対策として超磁歪アクチュエータによる壁面振動を利用したアクティブノイズコントロールシステムの構築に向けて超磁歪アクチュエータの有限要素法による電磁界解析から検討を行った。

コイルに印加する交流電流の周波数を単一周波数とした際のバイアスマグネットの有無や電流振幅が出力に与える影響について検討を行った。検討の結果、バイアスマグネットの設置によって指令電流と同一の波形を出力でき、アクチュエータの動作を確認した。また電流振幅値に関する検討から、制御出力を歪ませずに出力できる電流を得ることができた。

さらに実機を想定した電圧源を用いた検討ではアクチュエータの周波数特性を得、検討したモデルがロードノイズに対するアクティブノイズコントロールシステムのアクチュエータとして有効であることを示した。

### 第3章 壁面の振動特性を考慮した超磁歪アクチュエータによる騒音制御

本章では近年その需要が高まっている小型モビリティの車室内騒音低減を目的として小型かつ高出力である超磁歪アクチュエータを用いた車両窓板の境界面振動によるアクティブノイズコントロールによる車内騒音の低減に関して提案を行った。本検討では車両を模擬した箱を用い、窓板の振動特性に対する超磁歪アクチュエータの設置位置を考慮することにより高い消音効果が得られることを示した。なお振動特性を把握することができれば、フロントウィンドウばかりでなく種々の窓板や車両天板などといった車内外の境界面においても適用していくことが可能である。さらに小型モビリティを使用し、超磁歪アクチュエータを設置したフロントウィンドウの振動を利用したアクティブノイズコントロールの実験を行った。その結果、制御対象が複雑な音場でも約 20 dB の消音量があることが分かった。

### 第4章 心理状態推定による車内騒音に対する快適性評価

本章では近年その需要が高まっている小型モビリティの車室内騒音低減を目的として小型かつ高出力である超磁歪アクチュエータを用いた車両窓板の境界面振動によるアクティブノイズコントロールシステムと車内音による快適性向上に関して基礎検討を行った。

車内騒音制御による乗り心地の基礎検討として乗員の生体情報を用いた快適性評価を行った。

人が快適に感じる車内環境には人それぞれ違いがありアクティブノイズコントロールによる騒音低減とマスキング効果によってリラックスを表す  $\alpha$  波出現率が異なり、この違いを実験協力者のラウドネスによる感じ方や静寂な環境に対する脳波信号に違いが生じることが確認された。

以上の研究成果により、超磁歪アクチュエータを用いた小型モビリティの車内音響制御システムを提案し、制御音波を出力する超磁歪アクチュエータに関して電磁界解析による出力特性の検討により、アクチュエータの周波数特性を

得、検討したモデルがロードノイズに対するアクティブノイズコントロールシステムのアクチュエータとして有効であることを明らかにした。また車両を模擬した箱を用い、窓板の振動特性に対する超磁歪アクチュエータの設置位置を考慮することにより高い消音効果が得られることを明らかにした。さらに実車両を用いた検討ではフロントウィンドウに設置した超磁歪アクチュエータにより制御音波の出力により騒音低減とマスキング効果による快適性向上について明らかにした。

本研究の今後の展望として超磁歪アクチュエータの設計も個々の要素の固有振動数が出力特性に影響があると考えられるため、今後はアクチュエータの大きさや重量、形状や構成要素の変更やより透磁率の高い材質に変更しての検討を考えている。また、新たな超磁歪アクチュエータは既存のアクチュエータの磁歪による発生力や磁束密度よりも高い値を目標とするが、電磁界解析と構造解析を連成させ超磁歪アクチュエータの設置位置やより効率よく音波を出力できる壁面の検討も行うことにより、アクチュエータの駆動に必要なエネルギーを減らして大きな音圧レベルの音が出力できると考えている。また本研究で対象としたロードノイズは本来であればさまざまな帯域の周波数の騒音が入力される。また自動車のフロントウィンドウに設置することを想定した、ロバスト性および視認性を考慮したアクチュエータ設置位置の検討および制御アルゴリズムの確立をしていくことが今後の課題である。さらに乗員の性格や聴覚感覚を考慮し、より乗員が快適に感じる車内音響環境を構築するため、生体情報を測らずとも分類できる乗員の年齢や性別、性格診断等の生体計測をせずに分類する方法について研究し、本論文で提案したシステムに応用することでより乗員一人ひとりに最適な乗り心地を提供できるような高性能な乗り心地制御の実現が期待できる。

## 謝辞

本研究を行うにあたり多大なるご指導，ご鞭撻ならびにお尽力を賜りました本学 工学部動力機械工学科 加藤英晃 講師ならびに成田正敬 講師に心からお礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたっては本学 工学部原子力工学科 松村義人 教授，工学部動力機械工学科 森山裕幸 教授，工学部機械工学科 落合成行 教授に細部にわたってご査読，ご叱正をいただきました。ここに紙面を借りて深謝いたします。

最後に本学の諸先生，諸先輩，同僚，大学院生ならびに加藤・成田研究室の諸氏に感謝いたします。

令和3年1月

加藤 太朗

## 付録 本論文に記載された内容の引用元

本論文では参考文献[2-1], [3-1], [3-2], [4-1], [4-2], [4-3]に掲載された内容を基に構成されている。日本磁気学会論文特集号に掲載された内容[2-1]は第 2 章, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* に記載された内容[3-1]は第 3 章 3.1 節～3.4 節, *actuators* に記載された内容[3-2]は第 3 章 3.5 節, 日本 AEM 学会誌に記載された内容[4-1]は第 4 章, *Applied science* に記載された内容[4-2]と *Proceedings of the School of Engineering of Tokai University, Series E* に掲載された内容[4-3]は第 4 章 4.2 節を構成している。

## 参考文献

## 第1章 序論

- [1-1] 国土交通省自動車局, 地域から始める超小型モビリティ導入ガイドブック (2014).
- [1-2] 国土交通省自動車局, 超小型モビリティの利活用に関する実証実験等による調査業務 (2011).
- [1-3] 日本音響学会編, 新版音響用語辞典, コロナ社, (2003), p. 210.
- [1-4] 田鎖順太, 松井利仁, 我が国における道路交通騒音による健康リスク (欧州環境騒音ガイドラインに基づく推定), 日本衛生学雑誌, Vol. 76 (2021), doi: <https://doi.org/10.1265/jjh.19014>
- [1-5] 羽田正伸, 西原直枝, 田辺新一, 道路交通騒音が知的生産性に与える影響に関する被験者実験, 日本建築学会環境系論文集, Vol. 73, No. 625 (2008), pp. 355-362.
- [1-6] 山村晃太郎, 騒音の聴力損失及びその他に及ぼす影響, 日本騒音制御工学会, Vol. 3, No. 6 (1979), pp. 7-14.
- [1-7] 北村音一, 音と人間, 日本機械学会誌, Vol. 92, No. 845 (1989), pp. 274-277.
- [1-8] 和田哲郎, 騒音性難聴の最近の知見 (疫学, 基礎など), 日本耳鼻咽喉科学会会報, Vol. 120, No. 3 (2017), pp. 252-253.
- [1-9] 湯川直樹, 特殊吸音スポンジ技術, 日本機械学会誌, Vol. 112, No. 1086 (2008), p.78.
- [1-10] Daniel Flo, Danilo Pena, Luan Pena, Vicente A. de Sousa Jr, Allan Martins, Characterization of Noise Level Inside a Vehicle under Different Conditions, sensors, Vol. 20, No. 2471 (2020), doi.org/10.3390/s20092471.
- [1-11] Zibin Jia, Xu Zheng, Quan Zhou, Zhiyoug Hao, Yi Qiu, A Hybrid Active Noise Control System for the Attenuation od Road Noise Inside a Vehicle Cabin, MDPI sensors, Vol. 20, No. 7190, (2020), doi: 10.3390/s20247190.
- [1-12] 星野博之, 小沢義彦, 車内音を構成する音の要素とその評価, 豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol. 30, No. 3 (1995), pp. 29-38.
- [1-13] Yinzhi He, Simon Schroder, Zihan Shi, Reinhard Blumrich, Zhigang Yang, Jochen Wiedemann, Wind noise Wind noise source filtering and transmission study through a side glass of Driver model, ELSEVIER Applied Acoustics, Vol.

- 160, No. 107161 (2020), doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107161.
- [1-14] 萬菜穂子, 福原千絵, 加村孝信, ロードノイズ吸音技術 (内装部材を用いた粒子速度低減), 自動車技術会論文集, Vol. 39, No. 3 (2008), pp. 23-28.
- [1-15] 黒沢良夫, 山口誉夫, 笹島学, 吸音材が配置された自動車車内空間の減衰音響解析, 自動車技術会論文集, Vol. 44, No. 5 (2013), pp. 1233-1240.
- [1-16] 栗栖清浩, アクティブ消音用スピーカシステム, 日本音響学会誌, Vol. 58, No. 8 (2002), pp. 518-523.
- [1-17] 西村正治, アクティブノイズコントロールの現状, 計測制御工学会, 計測と制御, Vol. 51, No. 12 (2012), pp. 1105-1109.
- [1-18] 加川幸雄, 戸井武司, 安藤英一, 堤一男, 快音のための騒音・振動制御, 丸善出版, (2021), pp. 25-53.
- [1-19] A. Y. Atmojo, Z. Masfuri, M. Sabrina, A. Basuki, Y. Feriadi, Suwarjono, Sugianto, BBTA3-BPPT 1<sup>st</sup> Prototype of Active Noise Control for Vehicle Cabin Noise, Journal of Pyysics: Conference Series, Vol. 1951, (2021), doi: 10.1088/1742-6596/1951/1/012030.
- [1-20] Prasanga N. Samarasinghe, Wen Zhang, Thushara D. Abhayapala, Recent Advances in Active Noise Control Inside Automobile Cabins, IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 33, No. 6 (2016), pp. 61-73.
- [1-21] Zibin Jia, Xu Zheng, Quan Zhou, Zhiyoug Hao, Yi Qiu, A Hybrid Active Noise Control System for the Attenuation od Road Noise Inside a Vehicle Cabin, MDPI sensors, Vol. 20, No. 7190, (2020), doi: 10.3390/s20247190.
- [1-22] Hisashi Sano, Toshio Inoue, Akira Takahashi, Kenichi Terai, Yoshio Nakamura, Active Control System for Low-Frequency Road Noise Combined With an Audio System, IEEE Transactions on Speech and Audio Processing Magazine, Vol. 9, No. 7 (2001), pp. 755-763.
- [1-23] Zhen Yu, Tao Wang Min Zhou, Study on the Magnetic-machine Coupling Characteristics of Giant Magnetostrictive Actuator Based on the Free Energy Hysteresis Characteristics, sensors, Vol. 18, No. 3070 (2018), doi: 10.3390/s18093070
- [1-24] Jingtao Zhou, Ahongbo He, Ce Rong, Guangming Xue, A giant magnetostrictive rotary actuator: Design, analysis and experimentation, ELSEVIER Sensors and

- Actuators, Vol. 287, No. 1 (2019), pp. 150-157.
- [1-25] Zhaoshu Yang, Zhongbo He, Dongwei Li, Ce Rong, Bias Magnetic Field of Stack Giant Magnetostrictive Actuator: Design, Analysis, and Optimization, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2016 (2016), pp. 1-14. doi.org/10.1155/2016/1704594.
- [1-26] 江田弘, 山本佳男, 超磁歪アクチュエータ・センサ, 計測自動制御学会誌, 計測と制御, Vol. 38, No. 3 (1999), pp. 197-201.
- [1-27] 松井康浩, 超磁歪アクチュエータ, 日本機械学会誌, Vol. 111, No. 1072 (2008), pp. 188-189.
- [1-28] A. E. クラーク, 江田弘, 超磁歪材料, 日刊工業新聞社, (1995), p. 168.
- [1-29] 兪炳振, 平田勝弘, 大西敦郎, 超磁歪アクチュエータを用いた平面スピーカーの磁場・構造・音場の連成解析手法に関する研究, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 130, No. 12 (2010), pp. 1315-1322.
- [1-30] 眞田明, 振動音響連成現象のメカニズムを利用したアクティブ遮音制御, 日本音響学会誌, Vol. 72, No. 11 (2016), pp. 715-720.
- [1-31] Gunnar Gabel, Jonathan Millitzer, Heiko Atzrodt, Sven Herold, Development and Implementation of a Multi-Channel Active Control System for the Reduction of Road Induced Vehicle Interior Noise, *actuators*, Vol. 7, No. 3, (2018), 52, doi.org/10.3390/act7030052
- [1-32] 伊勢友彦, 齊藤望, 音環境としての車室内の課題, 日本音響学会誌, Vol. 66, No. 6 (2010), pp. 282-287.
- [1-33] Ricardo Penna Leite, Stephan Paul, Samir N.Y. Gerges, A sound quality-based investigation of the HVAC system noise of an automobile model, *ELSEVIER Applied Acoustics*, Vol.40, Issue4 (2009) ,doi: https:// doi.org/ 10.1016/j.apacoust. 2008. 06. 010.
- [1-34] 吉田準史, 助川吉行, 吉岡叡二, 車速認知と車内快適性の両立を目的とした車内音・振動に関する検討, 自動車技術会論文集, Vol. 52, No. 1 (2019), pp. 171-176.
- [1-35] Kun Qian, Zhichao Hou, Intelligent evaluation of the interior sound quality of electric vehicles, *ELSEVIER Applied Acoustics*, Vol. 173, No. 107684 (2021), https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107684.

- [1-36] 内田公一, 花輪和人, 有光哲彦, 戸井武司, 生体情報に基づく音質評価のためのタスクの検討, 自動車技術会論文集, Vol. 46, No. 6 (2015), pp. 1111-1116.
- [1-37] 中村哲夫, 中村壮亮, 寺田雅英, 橋本英紀, 車載生体情報計測システムの信号処理方法, 計測自動制御学会論文集, Vol. 52, No. 4 (2016), pp. 228-233.
- [1-38] 茂木勇祐, 佐藤歩, 有光哲彦, 戸井武司, 脳活動計測に基づく車室内警報音の音像定位による危険認知支援, 自動車技術会論文集, Vol. 46, No. 6 (2015), pp. 1093-1098.
- [1-39] 福田紘子, 加納慎一郎, 脳波の試行間位相同期度による運転時の危険感知の検出, 生体医工学, Vol. 58, No. 1 (2020), pp. 21-27.
- [1-40] 館泉雄治, 鐘ヶ江正巳, シート型圧電センサを用いた無拘束での生体信号計測, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 1 (2020), 40-49.
- [1-41] 石磊, 張珏, 山中敏正, 原田昭, 脳前頭葉  $\alpha$  波によるドライバーの感情測定, 日本デザイン学会, Vol. 53, No. 5 (2006), pp. 21-28.
- [1-42] 小林忠彦, 酒井勲, 超磁歪材料とアクチュエータへの応用, 精密工学会誌, Vol. 60, No. 12 (1994), pp. 1695-1698.
- [1-43] 佐橋政司, 小林忠彦, 超磁歪合金とその音響素子への応用, 日本音響学会誌, Vol. 46, No. 7 (1990), pp. 591-598.
- [1-44] 脇若弘之, 青木健剛, 坂野一成, 吉川隆, 山田一, 超磁歪振動子の最大出力限界の考察, 日本応用磁気学会誌, Vol. 22, No. 4-2 (1998), pp. 929-932.
- [1-45] 中村敏明, 中埜岩男, 海洋音響トモグラフィのための長距離伝搬実験, 日本音響学会誌, Vol. 58, No. 4 (2002), pp. 244-249.
- [1-46] 兪炳振, 平田勝弘, 大西敦郎, 超磁歪アクチュエータを用いた平面スピーカーの音響特性解析, 日本 AEM 学会誌, Vol. 19, No. 1 (2011), pp. 9-13.
- [1-47] 鈴木陽一, 超臨場感音響システム実現への課題と動向, 電気学会誌, Vol. 129, No. 8 (2009), pp. 538-541.
- [1-48] 佐藤恭一, 岡田和輝, 超磁歪アクチュエータの省電力駆動, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 77, No. 775 (2011), pp. 681-690.

- [1-49] 辰巳義和, 大嶽和之, 高橋良太, 江田英之, 田代晋久, 脇若弘之, 矢島久志, 藤原伸広, 超磁歪アクチュエータの熱膨張補償の検討, 日本磁気学会, Vol. 33, No. 5 (2009), pp. 421-424.
- [1-50] 背戸一登, 小淵信夫, 能動的要素による遮音の研究 (第1報, ボードスピーカによる板の振動制御), 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 48, No. 426 (1983), pp. 205-214.
- [1-51] 三谷祐一朗, 横井健二, Chris C. H. MA, 秋下貞夫, 青山悟, 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編), Vol. 63, No. 613 (1997), pp. 87-92.
- [1-52] 角張勲, 水野耕, 寺井賢一, 山本克也, 田川直人, 山下恭弘, 壁面入射音の能動制御による壁面透過音低減, 日本騒音制御工学会, Vol. 29, No. 3 (2005), pp. 224-231.
- [1-53] 猿渡克巳, 背戸一登, アクティブ遮音のための非番の振動制御法, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 60, No. 579 (1994), pp. 183-189.
- [1-54] 福田良司, 田中信雄, 窓ガラスを構成要素とする直方体キャビティにおける強連成モードとその制御, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 830 (2015), doi:10.1299/transjsme.15-00075.
- [1-55] 眞田明, 東山孝治, 田中信雄, 能動制御型防音ボックスに関する研究 (ポイントアクチュエータと圧電フィルムセンサによるアクティブ遮音制御の適用), 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 79, No. 805 (2013), pp. 69-78.
- [1-56] 星野博之, 自動車車室内騒音の音質評価, 日本音響学会誌, Vol. 53, No. 6 (1997), pp. 462-465.
- [1-57] Mohd Jailani Mohd Nor, Mohammad Hosseini Fouladi, Hassan Nahvi, Ahmad Kamal Ariffin, Index for vehicle acoustical comfort inside a passenger car, ELSEVIER Applied Acoustics, Vol. 69, No. 4 (2008), pp.343-353.
- [1-58] M. de Diego, A. Gonzalez, G. Pinero, M. Ferrer, J.J. Garcia-Bonito, Subjective evaluation of actively controlled interior car noise, IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Proceedings, (2001), pp. 3225-3228.
- [1-59] Sang-Kwon Lee, Objective evaluation of interior sound quality in passenger cars

- during acceleration, ELSEVIER Journal of Sound and Vibration, Vol. 310, No. 1-2 (2008), pp. 149-168.
- [1-60] 有光哲彦, 相澤快, 花輪和人, 戸井武司, 主観および客観評価に基づく自動車加速音と楽器音との類似性評価, 自動車技術会論文集, Vol. 45, No. 1 (2014), pp. 115-120.
- [1-61] 吉田準史, 櫻本睦貴, ハイブリッド車のエンジン始動音・振動が運転者の不快音に及ぼす影響について, 日本音響学会誌, Vol. 74, No. 4 (2018), pp. 194-197.
- [1-62] 鳥居一平, 吉田準史, 長谷川光司, 春日正男, 自動車走行時における車室内音の主観評価実験, 社団法人映像情報メディア学会技術報告, Vol. 34.44 (2010), pp. 25-28.
- [1-63] 西村武, 主観評価の理論と実際, 社団法人映像情報メディア学会技術報告, Vol. 31, No. 5 (1977), pp. 369-377.
- [1-64] 大須賀美恵子, ドライバ状態評価のための生理心理計測 (自律神経指標を中心に), 自動車技術会心地よい音をはかる技術・つくる技術シンポジウム資料 (2013), pp. 40-45.
- [1-65] S. M. Lee, S. K. Lee, Objective evaluation of human perception of automotive sound based on physiological signal of human brain, International Journal of Automotive Technology, Vol. 15, No. 2 (2014), pp. 273-282.
- [1-66] 平澤瞬, 渡邊鉄也, 田中基八郎, 脳波を用いた環境音の快適性評価, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 76, No. 771 (2010), pp. 130-136.
- [1-67] 西藤聖二, 佐藤政宏, 舞野大輔, 田中正吾, 音環境が精神作業時の脳波に与える影響について, ライフサポート学会, Vol. 22, no. 3 (2010), pp. 96-104.
- [1-68] 三宅晋, 田中豪一, 斎藤和雄, 不快音の脳波に及ぼす影響, 日本衛生学雑誌, Vol. 39, No. 2 (1984), pp. 523-534.
- [1-69] 村上仁士, 伊藤禎彦, 細井由彦, 荒木秀夫, 小藪剛史, 脳波の変動特性を加味した波の音の快適性に関する基礎的考察, 海岸工学論文集, Vol. 42 (1995), pp. 1156-1160.
- [1-70] 芝崎智貴, 吉原健太, 鋤柄あかね, 倉橋貴彦, 池田富士雄, 脳波測定結果を用いた自動車の乗り心地評価, 長岡工業高等専門学校紀要, Vol. 55 (2018), pp. 12-17.

- [1-71] 阿部晃大, 古谷涼, 伊東敏夫, 自動運転時のドライバ覚醒維持を目的とした各種タスク効果の脳波解析による比較, 自動車技術会論文集, Vol. 49, No. 2 (2018), pp. 422-427.

## 第2章 低周波制御音波の出力を考慮した超磁歪アクチュエータの設計

- [2-1] 加藤太朗, 北村拓也, 前原史弥, 中山弘也, 池田圭吾, 遠藤文人, 加藤英晃, 成田正敬, 壁面振動を利用した超小型モビリティの騒音制御システムの開発 (超磁歪アクチュエータの性能に関する基礎的検討), 日本磁気学会特集号, Vol. 5, No. 1 (2021), pp. 44-49.
- [2-2] 菅澤昌之, 荒井政大, 超磁歪素子の高調波印加電圧に対する渦電流特性評価, 計算数理工学論文集, Vol. 7, No. 2 (2008), 論文 No. 11-090317.
- [2-3] 森輝夫, 超磁歪アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 3 (1997), pp. 334-337.

### 第3章 壁面の振動特性を考慮した超磁歪アクチュエータによる騒音制御

- [3-1] Taro Kato, Ryosuke Suzuki, Takayoshi Narita, Hideaki Kato, Yoshio Yamamoto, Basic study on active noise control for considering characteristics of vibration of plate by giant magnetostrictive actuator, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 52, No. 1-2 (2016), pp. 153-160.
- [3-2] Taro Kato, Ryosuke Suzuki, Rina Miyao, Hideaki Kato, Takayoshi Narita, A Fundamental Consideration of Active Noise Control System by Small Actuator for Ultra-Compact EV, actuators, Vol.7, No. 3 (2018), 49.
- [3-3] 西村正治, 伊勢史郎, 宇佐川毅, アクティブノイズコントロール, コロナ社, (2006), pp. 9-10.
- [3-4] J.B. Bisnette, A.K. Smith, J.S. Viperman, D.D. Bundny, Active Noise Control Using Phase Compensated, Damped Resonant Filters, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 128, No. 2 (2005), pp. 148-155.

## 第4章 心理状態推定による車内騒音に対する快適性評価

- [4-1] 石塚公平, 加藤太朗, 加藤英晃, 成田正敬, 小島淳, 森山裕幸, 超磁歪アクチュエータを用いた超小型車両のアクティブノイズコントロール (脳波測定による車内騒音に対する快適性評価), 日本 AEM 学会誌, Vol. 25, No. 2 (2017), pp. 88-93.
- [4-2] Ryosuke Suzuki, Rina Miyao, Taro Kato, Hideaki Kato, Takayoshi Narita, Hisao Kikugawa, Yoshihito Matsumura, Proceedings of the School of Engineering of Tokai University, Series E, Vol. 44 (2019), pp. 21-26.
- [4-3] Taro Kato, Hiroya Nakayama, Hideaki Kato, Takayoshi Narita, A Basic Study on Sound Control System for Ultra-Compact Electric Vehicle by Using Masking, applied sciences, Vol. 10, No. 10 (2020), 3412.
- [4-4] Akio Horii, Chigusa Yamamura, Tomomichi Katsumata, Akihiko Uchiyama, Physiological Response to Unpleasant Sounds, Journal of International Society of Life Information Science, Vol. 22, No. 2 (2004), pp. 536-544.
- [4-5] 原田隆郎, 横山功一, 生体脈波を用いた道路の乗り心地評価に関する基礎的検討, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol. 68, No. 1 (2012), pp. 40-51.
- [4-6] 北川かおる, 岡崎美智子, 古賀美紀, 開眼状態におけるたし算・音楽刺激が及ぼす生理的反応 (脳波の周波数解析から), 日本看護研究学会雑誌, Vol. 28, No. 1 (2005), pp. 115-120.
- [4-7] 知念葉子, 伊神久美子, 木岡悦子, 着衣色によるイメージ形成と着装感 (脳波からみる快適因子との関りから), 日本家政学会誌, Vol. 55, No. 11 (2004), pp.845-851.
- [4-8] 政倉祐子, 一川誠, 騒音のある環境の印象改善と音楽提示の諸要因, 日本基礎心理学会, Vol. 23, No. 2 (2005), pp. 139-150.
- [4-9] Yuanyuan Zhang, Dayi Ou, Shengxian Kang, The effects of masking sound and signal-to-noise ratio on work performance in Chinese open-plan office, ELSEVIER Applied Acoustics, Vol. 172, No. 107657 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107657>.
- [4-10] 宮島徹, 位置情報を活用したサウンドマスキングシステムの開発, 清水建設研究報告, No. 90 (2013), pp.125-131.

- [4-11] Haiyan Shu, Yimg Song, Huan Zhou, Assessment of Music and Water Sounds for Urban Noise Masking, Proceedings of TENCON 2018, 2018 IEEE Region 10 Conference 2018, (2018), pp. 1451-1455.
- [4-12] 西浦敬信, 聴覚マスキングに基づく騒音の不快感抑制, 日本音響学会誌, Vol. 70, No. 12 (2014), pp. 652-657.