

日本音響学会 編

音響テクノロジーシリーズ 9

新版

アクティブ ノイズコントロール

工学博士 西村 正治

工学博士 宇佐川 毅

博士(工学) 伊勢 史郎

博士(工学) 梶川 嘉延

共著

コロナ社

音響テクノロジーシリーズ編集委員会

編集委員長

東京大学
博士（工学） 坂本 慎一

編集委員

産業技術総合研究所
工学博士 蘆原 郁

東北学院大学
博士（情報科学） 岩谷 幸雄

山梨大学
博士（工学） 垣尾 省司

滋賀県立大学
博士（工学） 坂本 眞一

龍谷大学
博士（工学） 三浦 雅展

千葉工業大学
博士（工学） 飯田 一博

九州大学
博士（工学） 尾本 章

甲南大学
博士（情報科学） 北村 達也

株式会社 ATR-Promotions
工学博士 正木 信夫

（五十音順）

（2016年11月現在）

発刊にあたって

「音響テクノロジーシリーズ」の第1巻「音のコミュニケーション工学－マルチメディア時代の音声・音響技術－」が刊行されてから20年が経過した。本シリーズは、日本音響学会が刊行する書籍のシリーズとして、「音響工学講座」に続く2番目のシリーズである。またその後、日本音響学会では、新たに「音響入門シリーズ」、「音響サイエンスシリーズ」の編集が開始され、音の世界への入門から応用まで、科学から技術まで、広くウイングを広げつつある。

「音響工学講座」が、大学や専門学校で音響工学を学び、あるいは現場で音響学を応用した仕事に従事する研究者・技術者を対象として、学術分野別に筋の通った教科書として統一的に編集されたシリーズであるのに対して、「音響テクノロジーシリーズ」は、その時々々の音響工学に関係する最先端の分野をとりあげ、その技術を深く理解すべく編集されたシリーズである。東倉洋一初代編集委員長は、これを「従来の研究分野別の構成とは異なり、複数の分野に横断的に係わるメソッド的なシリーズ」と述べている。「音響工学講座」のように分野別のシリーズを縦糸、本シリーズのように分野は違えども共通に適用できる技法や手法をまとめたシリーズを横糸、と喩えられることもある。丈夫な縦糸と横糸が偏りなく、しっかりと組み合わせられることによって、直面する課題の解決に耐えうる盤石の知識基盤が構築できる。

「音響テクノロジーシリーズ」は、シリーズ名に「テクノロジー」をうたっている。テクノロジーとは、実用的な目的のために、知識を応用することやその方法、理論、体系を意味する。本シリーズが扱う音響学は、かかわる分野が非常に幅広い。音波の発生と伝搬は物理現象であり、音波の知覚と認識は、心理学や生理学の領域にある。音楽音響の分野に至っては、楽器の発音機構の理

ii 発刊にあたって

解には非常に高度な物理的知識が必要であると同時に、芸術の分野にまで踏み込むこともある。そのため、音響学は現代の科学技術の各所に役立てられ、応用されている。本シリーズではこれまで、音のトランスデューサやデジタル処理技術、心理学的測定法のように、音響工学や音響心理学の根幹をなすテーマから、音を用いたイメージング技術やアクティブコントロールのような音の工学的応用を深く掘り下げたテーマ、さらには非線形音響のように最新のトピックを取り扱ってきた。今後は、知識や技術のボーダーレス化に伴い、音響技術の国際化も重要な視点となるだろう。また、広く考えれば、音響学が担うべき役割は、単なる科学技術の領域にとどまらず、人間や社会のシステムにおける位置づけが重要となってくる。そのようなことも鑑み、今後も実学と直結した音響学の魅力を本シリーズで伝えていきたい。最後に、本シリーズの発刊にあたり、企画と執筆に多大なご努力をいただいた編集委員、著者の方々、ならびに出版に際して種々のご尽力をいただいたコロナ社の諸氏に深く感謝する。

2017年2月

音響テクノロジーシリーズ編集委員会

編集委員長 坂本 慎一

ま え が き

人の生活において、より快適な音環境を実現することが、ますます望まれるようになってきており、機械や住宅の静粛化が重要な課題となっている。そのような静粛化には、従来、物体形状や構造を最適化したり、吸音材、遮音材、防振材などを用いる受動騒音制御（passive noise control, PNC）技術が広く用いられている。しかし、PNCでは低周波音の対策が原理的に、大きく、重く、コスト高になる欠点があり、スピーカなどのアクチュエータを作動させて消音を実現する能動騒音制御（アクティブノイズコントロール：active noise control, ANC）技術が注目されている。アクティブノイズコントロールは波長の長い低周波音に対しては、アクチュエータやセンサの個数が少なく制御も容易であり、原理的に効果的である。

アクティブノイズコントロールはよく“逆位相の音を出してもとの音をキャンセル消音する技術”といわれるが、必ずしもそれだけではなく、本書に示すようにいろいろな物理メカニズムの消音を実現するものである。アクティブノイズコントロールの基本コンセプトは1936年に特許が取得されており、古いものである。その後なかなか実用化に至らなかったが、1970年代以降の急速な電子技術とデジタル技術の進歩により、研究開発が進み、実用化されるようになってきた。しかし、まだ一般に普及し日常的に使えるところまでは至っていないと考えられる。

本書は、アクティブノイズコントロールの消音原理から、制御アルゴリズム、実用例を体系的にまとめた専門書である。本書により、アクティブノイズコントロールはどのようなメカニズムに基づいたものかを理解していただくとともに、その制御ロジック、アクティブノイズコントロールの利点、限界など

を正しく理解していただければ幸いです。また多くの応用例を参考にして、種々の製品の騒音対策に活用していただくことを期待する。

1章ではアクティブノイズコントロールの概要として、その歴史や基本原理、基本構成と制御の概要、アクティブノイズコントロールの用途による分類などを述べた。2章ではアクティブノイズコントロールの物理と題して、音場の基礎方程式から、アクティブノイズコントロールの物理メカニズムについて解説した。3章ではフィードフォワード制御、フィードバック制御などアクティブノイズコントロールの制御アルゴリズムについてまとめた。4章では、ハードウェアとシステム構成と題して、制御システムを構築するうえでの留意点について述べた。センサやアクチュエータ、DSP (digital signal processor) などについては、それぞれの各専門書を参照されたい。5章ではアクティブノイズコントロールの適用例として、できるだけ多くの例を掲載した。

本書を執筆するにあたり、アクティブノイズコントロール適用例の紹介に快く同意していただいた多くの方々に感謝します。また、本書の出版の機会を与えていただいた日本音響学会およびコロナ社に対して心より感謝申し上げます。

2006年5月

著者

新版にあたって

本書の初版が発行されてから10年以上が経過した。その間に信号処理アルゴリズム、ハードウェアの進歩は著しく、また実用例も多方面に及ぶようになってきた。そこで、執筆陣を拡充し、3章：制御アルゴリズム、4章：ハードウェアとシステム構成、5章：アクティブノイズコントロールの適用例に最新の情報を取り入れた。また、近年注目を集めている音場再現技術は、アクティブノイズコントロールと類似の信号処理を行い、実用化の一展開ととらえることができる。そこで、6章：音場再現への展開を追加した。

2017年8月

著者

目 次

1. アクティブノイズコントロールの概要

1.1 騒音対策とアクティブノイズコントロール	1
1.2 アクティブノイズコントロールの歴史	3
1.3 アクティブノイズコントロールの基本原則	4
1.3.1 ホイヘンスの原理	4
1.3.2 消音のメカニズム	6
1.4 アクティブノイズコントロールの基本構成と制御手法	9
1.4.1 フィードフォワード制御	9
1.4.2 フィードバック制御	11
1.4.3 周期音の制御	12
1.4.4 多チャンネルシステム	14
1.5 アクティブノイズコントロールの用途による分類	14
1.6 アクティブノイズコントロールの特徴と課題	19
引用・参考文献	19

2. アクティブノイズコントロールの物理

2.1 音の干渉	22
2.1.1 重ね合せの原理	22
2.1.2 逆システム	23

2.2	音響エネルギーを反射するアクティブノイズコントロール	25
2.2.1	一次元音場	25
2.2.2	モノポール音源	26
2.2.3	ダイポール音源	29
2.2.4	トリポール音源	31
2.3	音響エネルギーを低減するアクティブノイズコントロール	33
2.3.1	共鳴の制御	33
2.3.2	音響放射の制御	37
2.4	流体の基礎方程式	39
2.4.1	連続の方程式	40
2.4.2	オイラーの方程式 (流体の運動方程式)	42
2.4.3	エネルギー保存則	44
2.5	音の基礎方程式	46
2.5.1	波動方程式	47
2.5.2	グリーン関数と点音源	50
2.5.3	音響エネルギー	52
2.5.4	瞬時音響インテンシティと複素音響インテンシティ	55
2.5.5	キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式	57
2.6	三次元音場におけるアクティブノイズコントロールの物理	59
2.6.1	ホイヘンスの原理に基づいたアクティブノイズコントロール	59
2.6.2	境界音場制御の原理に基づいたアクティブノイズコントロール	64
2.7	ま と め	65
	引用・参考文献	66

3. 制御アルゴリズム

3.1	適応アルゴリズムの基礎	68
3.1.1	FIR 型適応デジタルフィルタ	68
3.1.2	最急降下法	70

3.1.3	LMS アルゴリズム	71
3.1.4	その他のアルゴリズム	73
3.2	広帯域フィードフォワード制御	75
3.2.1	広帯域フィードフォワード制御の基本構成	75
3.2.2	filtered-X LMS (FXLMS) アルゴリズム	76
3.2.3	一般的なフィードフォワード制御システムと制御効果	79
3.2.4	二次経路推定手法	82
3.3	周期性をもつ雑音に特化した制御アルゴリズム	86
3.3.1	外部同期型アルゴリズム I : WS	87
3.3.2	外部同期型アルゴリズム II : SFX	89
3.3.3	自己同期型アルゴリズム : DXHS	91
3.3.4	適応ノッチフィルタを利用した制御 : SAN	93
3.4	多入力多出力システム	94
3.4.1	MEFX-LMS アルゴリズム	97
3.4.2	ES-LMS アルゴリズム	98
3.4.3	周期性騒音の多チャンネル制御アルゴリズム	99
3.4.4	多点逆フィルタ理論	100
3.4.5	quiet zone	101
3.5	フィードバック制御	103
3.5.1	フィードフォワード制御との対比	103
3.5.2	フィードバック制御システムの基礎	104
3.5.3	状態変数表現による制御系設計	107
3.5.4	IMC 構成によるフィードバック制御	108
3.6	バーチャルセンシング	110
3.7	アルゴリズムの選択	113
	引用・参考文献	114

4. ハードウェアとシステム構成

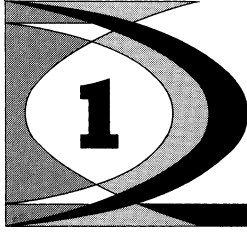
4.1 アナログシステム	118
4.1.1 ラプラス平面	119
4.1.2 回路理論	120
4.1.3 システムの安定性	121
4.1.4 ラプラス平面の幾何学的理解	122
4.1.5 ナイキスト安定判別法	123
4.1.6 フィードバック制御システムの安定性	125
4.2 デジタルシステム	126
4.2.1 DSP の一般的なアーキテクチャ	126
4.2.2 設計手順	130
4.3 アクティブノイズコントロールシステムの設置手順	132
4.3.1 アクチュエータとセンサの設置方法	132
4.3.2 コヒーレンス	133
4.3.3 因果律	133
4.3.4 フィルタタップ長	134
4.4 アクティブノイズコントロールシステムのモジュール化	134
4.4.1 複数の誤差信号をもつフィルタの性質	135
4.4.2 モジュール化の利点	137
4.5 FPGA を用いた高速信号処理	138
4.5.1 高速信号処理の必要性	138
4.5.2 FPGA コントローラの試作試験例	139
4.6 ま と め	142
引用・参考文献	143

5. アクティブノイズコントロールの適用例

5.1	ダクト消音への適用例	144
5.1.1	空調ダクト用アクティブノイズコントロール	144
5.1.2	ガスタービン排気音用アクティブノイズコントロール	148
5.1.3	ディーゼルエンジン排気音用アクティブノイズコントロール	151
5.1.4	送風機用アクティブノイズコントロール	153
5.2	耳元のアクティブノイズコントロール	154
5.2.1	アクティブノイズコントロール付きヘッドセット	154
5.2.2	クワイエットチェア	157
5.2.3	MRI騒音向けアクティブノイズコントロール	158
5.3	車内・機内音のアクティブノイズコントロール	160
5.3.1	航空機機内音のアクティブノイズコントロール	161
5.3.2	建設機械キャブ内音のアクティブノイズコントロール	162
5.3.3	自動車車内音のアクティブノイズコントロール	165
5.4	音場境界の制御	167
5.4.1	アクティブノイズコントロールによる壁吸音率の制御	167
5.4.2	アクティブノイズコントロールによる防音壁回折音の制御	172
5.4.3	アクティブノイズコントロールによる壁透過音の制御	176
5.4.4	アクティブ音響シールドリング	178
5.5	空力自励音の制御	184
5.6	その他の試み	187
5.6.1	ボイスシャッター	187
5.6.2	パラメトリックスピーカを用いたアクティブノイズコントロール	191
	引用・参考文献	194

6. 音場再現への展開

6.1 理 論	199
6.1.1 音場制御理論の歴史的背景	199
6.1.2 キルヒホッフ-ヘルムホルツ積分方程式の物理的解釈	200
6.1.3 二つの音場の相等性	202
6.2 音場再現システム	203
6.2.1 音圧による音場再現	203
6.2.2 離散点制御による二つの音場の相等性	204
6.2.3 音場再現システムの実現	204
6.2.4 逆システム的设计法	205
6.3 システムの実装	206
6.3.1 BoSC マイクロホン	206
6.3.2 音 響 樽	206
6.3.3 小型デジタルアンプの開発	207
6.4 システムの性能評価	209
6.4.1 物 理 評 価	209
6.4.2 音像定位実験	210
6.4.3 三次元音場による実在感の心理・生理評価	211
6.5 音響樽の応用	213
6.5.1 音場シミュレータ	213
6.5.2 サウンドテーブルテニス	214
6.5.3 音場共有システム	215
6.6 ま と め	217
引用・参考文献	218
索 引	221



アクティブノイズ コントロールの概要

アクティブノイズコントロール（active noise control, ANC と略す場合もある）は一般に“逆位相の音を発生してもとの音をキャンセル消音する技術”といわれている。本技術は一見夢のような技術に見えるが、実用面では限界も多い。その適用にあたっては消音のメカニズム，技術の限界などを十分理解しておく必要がある。

そこで本章では，まず機械の騒音対策を進めるうえでのアクティブノイズコントロールの位置付けを明確にする。その後，アクティブノイズコントロールの歴史，アクティブノイズコントロールの基本原理と構成について述べ，アクティブノイズコントロールの概要，限界などを解説する。最後にアクティブノイズコントロールを種々の観点で分類し，どのようなアクティブノイズコントロールがあるかを解説する。

1.1 騒音対策とアクティブノイズコントロール

機械の騒音対策は，その音源となる圧力変動を引き起こす気流の乱れや振動を引き起こす加振力を低減する，いわゆる音源対策が最も効果的である。しかし，それらは機械の性能確保と相いれない場合も多く，空気伝播や固体伝播の伝播経路対策が多く用いられる。

図 1.1 は，ガスタービン発電ユニットを例に取った場合の各種騒音伝播経路対策を示したものである。エンクロージャ，消音器，防振マウント，遮音壁，防音ラギングなどの対策があるが，それらはいずれも吸音，遮音，音の反射，

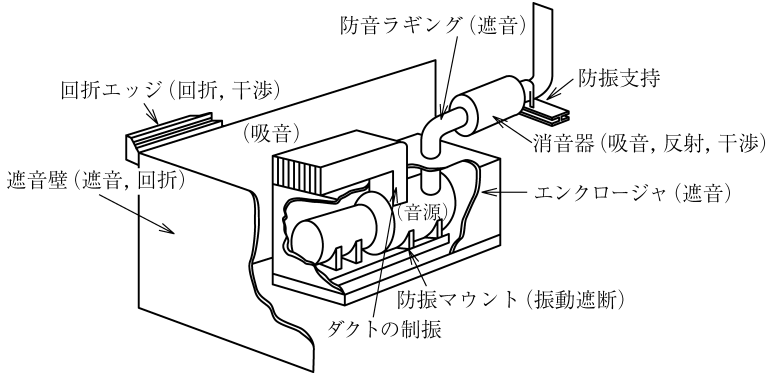


図 1.1 各種騒音伝播経路対策

干渉、制振、防振などを利用したものである。これらの対策は通常、吸音材、遮音材、制振材、防振材などを利用したり、形状を適正化することによって行われる。これらは特に動くものをもたないことから**受動騒音制御**（passive noise control, **PNC**と略す場合もある）と呼ばれている。しかし、これらの対策は一般的に高周波音成分に関しては有効であるが、低周波音成分に対しては減音効率が悪く、大きな減音効果を得るには一般に大きく、重い、コスト高の対策となる。

アクティブノイズコントロールはこれらの騒音対策を、何かを動かして実現しようとするものである。**アクチュエータ**（actuator, **駆動部**）としては、スピーカや加振器が通常用いられるが、空気流量などをバルブでコントロールしてもよい。稼動部があることから**能動騒音制御**（アクティブノイズコントロール）と呼ばれている。アクティブノイズコントロールは後述のように原理的に波長の長い低周波音対策に効果的であり、PNCの不得意な領域をカバーする技術として注目されている。

アクティブノイズコントロールは原理的には上記すべての騒音対策に適用することが可能であるが、現在では消音器、エンクロージャ、遮音壁、防振マウントの性能向上などにより効果的に使われている。PNCとアクティブノイズコントロールの効果的な周波数範囲は対象とする機械によって変わってくる

が、一般的にアクティブノイズコントロールのメリットが出てくるのは 500 Hz 以下といわれている。

本書ではアクティブノイズコントロールは音の伝播経路対策と位置付けているが、後述の分類で示すように、アクティブノイズコントロール自体は流れの制御や加振力の制御など音源対策にも広く用いられることを付記しておく。

1.2 アクティブノイズコントロールの歴史

アクティブノイズコントロールのアイディアは古く、すでに 1936 年に P. Lueg によって米国特許が取得されている^{1)†}。そこには、ダクト内を伝播してくる音を検出し、それに基づいて制御音を作成放射するフィードフォワード制御 (feed forward control) の考え方が図示されている。また、音が伝播してくる空間に制御音を放射し、その後方に静粛領域を形成する考え方も示されている。その後、H. F. Olson らが 1953 年に電子吸音器なる概念を発表している²⁾。これは、制御スピーカのすぐ前に誤差マイクロホンを設置し、誤差マイクロホンの信号をフィードバック制御 (feedback control) することにより、誤差マイクロホンの周囲に静粛領域を形成しようとするもので、いわゆる TCM (tight coupled monopole) である。制御は当時のことでアナログ制御であるが、現在最も広く使われているアクティブノイズコントロールイヤーマフはまさにこれを実用化したものである。日本では 1969 年に城戸ら³⁾が変圧器の消音対策にアクティブノイズコントロールの適用を提案したのが最初といわれている。これは、変圧器から発生する 100 Hz とその倍音を特定の方向に伝播しないように、そのまわりに設置したスピーカで制御したものであり、バンドパスフィルタで発生音を周波数帯域ごとに分離し、その帯域ごとにゲインと位相をマニュアルで調整している。この結果、制御方向では減音は得られているが、他の方向で増音が見られた。これらの先駆的研究は実験としては成功

† 肩付数字は章末の引用・参考文献番号を示す。

しているが、当時のアナログ電子技術では限界があり、実用化には至っていなかった。

アクティブノイズコントロールの研究開発が活発化したのは、1970年代に入り電子技術や制御技術が急速に進歩し始めた時期からである。まずイギリス、フランスで研究が進み^{4)~7)}、デジタル技術が世に出てきた1970年代後半からしだいに研究の輪が広がった。1980年代初めにはChaplinらにより、波形同期法を用いたアクティブノイズコントロールを船用エンジンに適用した例⁸⁾や、Rossがランダム音制御アルゴリズム⁹⁾に基づいて11 MWのガスタービン排気低周波音を制御した例が発表されている。

1980年代後半に入り、デジタル信号処理技術、適応制御技術が発展すると、アクティブノイズコントロールの研究も大きく加速され論文の数も急速に増加した。特にDSP (digital signal processor) の飛躍的な発展は音響領域の周波数のリアルタイム信号処理を可能にし、アクティブノイズコントロールを一気に実用化に導いた。

その後、種々の制御アルゴリズム、信号処理手法が発案され、種々の機械に適用されるようになり、アクティブノイズコントロールのメリット、デメリット、アクティブノイズコントロールの限界も明確になってきた。本書では、その内容について以後の章で紹介、解説していく。アクティブノイズコントロールは一時のブーム的な研究開発時期は去ったものの、各方面で地道な実用化研究が行われ、すでに種々の分野で実用化、商品化が実現されている。PNCと同様、騒音対策の一つの道具として定着しつつある。

1.3 アクティブノイズコントロールの基本原則

1.3.1 ホイヘンスの原理

アクティブノイズコントロールの消音原理についてはいろいろな説明がなされるが、波の重ね合せで説明するのが最もわかりやすい。ホイヘンス

(Huygen's) の原理によると、図 1.2 において、一次音源 (primary source, 騒音源) のまわりに形成される音場とまったく同一の音場 Ω を、一次音源を取り囲む空間に閉じた面 Σ 上に分布した二次音源 (secondary source) によって形成することが可能である。そこで、二次音源の位相を反転させた場合、 Ω 内では一次音源で形成される音場と、二次音源で形成される音場が同一ゲイン・逆位相となり、重ね合せにより完全にキャンセルされ音圧が 0 になる。これが音場のアクティブノイズコントロールの基本原理である。図 (b) に示すように、制御対象空間 Ω を囲むように Σ を選ぶと、 Ω 内の音圧を 0 にすることができる。

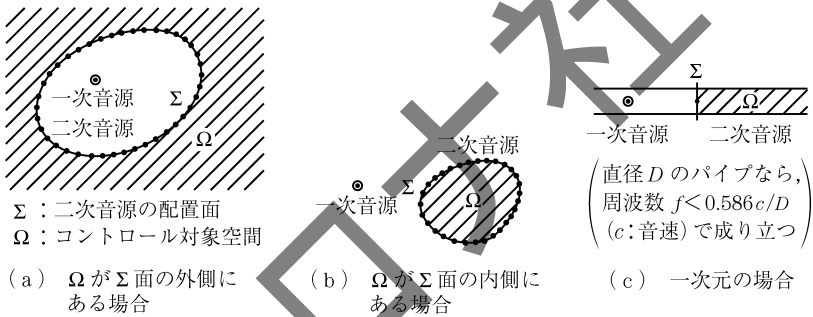


図 1.2 アクティブノイズコントロールの基本原理

対象領域が三次元の場合は境界が面になり、理論的には無数の二次音源が必要になるが、実際には対象音の波長に比べて十分短い間隔で二次音源を配置すれば十分である。よって波長の長い低周波音では粗い間隔の配置で十分であるが、波長の短い高周波音を対象とする場合はより密な配置が必要になる。アクティブノイズコントロールが低周波音に対して実現しやすく、高周波音に対して難しいのはこのような原理によるものである。

図 (c) のようなダクトでは、断面寸法が対象音の半波長より短い場合は平面波のみが伝播し、一次元的な取扱いが可能である。厳密には、長辺が l の矩形断面ダクトでは、 $f < 0.5c/l$ の周波数範囲で、直径が D の円形断面では $f < 0.586c/D$ の周波数範囲で平面波のみが伝播する。ここで、 c は音速である。

— 著者略歴 —

西村 正治 (にしむら まさはる)

1970年 京都大学工学部航空工学科卒業
1972年 京都大学大学院工学研究科修士課程
修了(航空工学専攻)
1972年 三菱重工業株式会社勤務
1990年 工学博士(姫路工業大学)
2002年 鳥取大学教授
2013年 鳥取大学特任教授
Nラボ代表
現在に至る

宇佐川 毅 (うさがわ つよし)

1981年 九州工業大学工学部情報工学科卒業
1983年 東北大学大学院工学研究科博士前期
課程修了(情報工学専攻)
1983年 熊本大学助手
1988年 工学博士(東北大学)
1988年 熊本大学講師
1990年 熊本大学助教授
2003年 熊本大学教授
現在に至る

伊勢 史郎 (いせ しろろう)

1984年 早稲田大学理工学部電子通信学科卒業
1984年 株式会社コルグ勤務
1988年 早稲田大学大学院理工学研究科修士
課程修了(電気工学専攻)
1991年 東京大学大学院工学系研究科博士課程
修了(建築学専攻), 博士(工学)
1991年 財団法人建設工学研究会主任研究員
1993年 早稲田大学理工学総合研究センター
客員講師
1994年 奈良先端科学技術大学院大学助手
1996年 ケンブリッジ大学客員研究員
1998年 京都大学大学院助教授
2007年 京都大学大学院准教授
2013年 東京電機大学教授
現在に至る

梶川 嘉延 (かじかわ よしのぶ)

1991年 関西大学工学部電子工学科卒業
1993年 関西大学大学院工学研究科博士前期
課程修了(電子工学専攻)
1993年 富士通株式会社勤務
1994年 関西大学助手
1997年 博士(工学)(大阪大学)
1998年 関西大学専任講師
2001年 関西大学助教授
2007年 関西大学准教授
2009年 関西大学教授
現在に至る

新版 アクティブノイズコントロール

Active Noise Control (New Edition)

©一般社団法人 日本音響学会 2006, 2017

2006年7月7日 初版第1刷発行
2008年7月10日 初版第2刷発行
2017年10月6日 新版第1刷発行

検印省略

編者 一般社団法人 日本音響学会
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 壮光舎印刷株式会社
製本所 牧製本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10
発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.
Tokyo Japan

振替00140-8-14844・電話(03)3941-3131(代)
ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01134-0 C3355 Printed in Japan

(新宅)



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。
購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。