

日本音響学会 編
音響テクノロジーシリーズ 26

超音波モータ

博士（工学） 中村健太郎

工学博士 黒澤 実 共著

博士（工学） 青柳 学

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

千葉工業大学
博士（工学） 飯田 一博

編集委員

東北学院大学
博士（情報科学） 岩谷 幸雄

甲南大学
博士（情報科学） 北村 達也

滋賀県立大学
博士（工学） 坂本 眞一

国立音楽大学
博士（工学） 三浦 雅展

千葉工業大学
博士（工学） 大川 茂樹

東京大学
博士（工学） 坂本 慎一

神戸大学
博士（工学） 佐藤 逸人

（五十音順）

（2021年3月現在）

発刊にあたって

音響テクノロジーシリーズは1996年に発刊され、以来20年余りの期間に19巻が上梓された。このような長期にわたる刊行実績は、本シリーズが音響学の普及に一定の貢献をし、また読者から評価されてきたことを物語っているといえよう。

この度、第5期の編集委員会が立ち上がった。7名の委員とともに、読者に有益な書籍を刊行し続けていく所存である。ここで、本シリーズの特徴、果たすべき役割、そして将来像について改めて考えてみたい。

音響テクノロジーシリーズの特徴は、なんといってもテーマ設定が問題解決型であることであろう。東倉洋一初代編集委員長は本シリーズを「複数の分野に横断的に関わるメソッド的なシリーズ」と位置付けた。従来の書籍は学問分野や領域そのものをテーマとすることが多かったが、本シリーズでは問題を解決するために必要な知見が音響学の分野、領域をまたいで記述され、さらに多面的な考察が加えられている。これはほかの書籍とは一線を画するところであり、歴代の著者、編集委員長および編集委員の慧眼の賜物である。

本シリーズで取り上げられてきたテーマは時代の最先端技術が多いが、第4巻「音の評価のための心理学的測定法」のように汎用性の広い基盤技術に焦点を当てたものもある。本シリーズの役割を鑑みると、最先端技術の体系的な知見が得られるテーマとともに、音の研究や技術開発の基盤となる実験手法、測定手法、シミュレーション手法、評価手法などに関する実践的な技術が修得できるテーマも重要である。

加えて、古典的技術の伝承やアーカイブ化も本シリーズの役割の一つとなる。例えば、アナログ信号を取り扱う技術は、技術者の高齢化により途絶の危

機にある。デジタル信号処理技術がいかに進んでも、ヒトが知覚したり発したりする音波はアナログ信号であり、アナログ技術なくして音響システムは成り立たない。原理はもちろんのこと、ノウハウも含めて、広い意味での技術を体系的にまとめて次代へ継承する必要があるだろう。

コンピュータやネットワークの急速な発展により、研究開発のスピードが上がり、最新技術情報のサーキュレーションも格段に速くなった。このような状況において、スピードに劣る書籍に求められる役割はなんだろうか。それは上質な体系化だと考える。論文などで発表された知見を時間と分野を超えて体系化し、問題解決に繋がる「メソッド」として読者に届けることが本シリーズの存在意義であるということ再認識して編集に取り組みたい。

最後に本シリーズの将来像について少し触れたい。そもそも目に見えない音について書籍で伝えることには多大な困難が伴う。歴代の著者と編集委員会の苦労は計り知れない。昨今、書籍の電子化についての話題は尽きないが、本文の電子化はさておき、サンプル音、説明用動画、プログラム、あるいはデータベースなどに書籍の購入者がネット経由でアクセスできるような仕組みがあれば、読者の理解は飛躍的に向上するのではないだろうか。今後、検討すべき課題の一つである。

本シリーズが、音響学を志す学生、音響の実務についている技術者、研究者、さらには音響の教育に携わっている教員など、関連の方々にとって有益なものとなれば幸いである。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厚く感謝する。

2018年1月

音響テクノロジーシリーズ編集委員会
編集委員長 飯田 一博

ま え が き

超音波モータは圧電素子により発生した数十 kHz の振動でロータやスライダを摩擦駆動する方式のモータである。コイルと磁石による電磁力を用いた一般的な電磁型モータと比べると、回転数は低いがトルクが大きい。このため、減速ギヤが不要、バックラッシュ（がたつき、あそび）がない、応答速度が速いなどの特徴を有している。また、薄型や円環型など電磁型モータでは実現しにくい形状に仕上げることができる。さらに、外部ブレーキ機構を設けなくとも電源を切れれば摩擦力で位置が保持されるため、位置決め制御用アクチュエータとして有用である。ある場所に素早く位置決めして、そこでしばらく位置を保つような動作に適している。コイルや磁石を用いないため、磁界を嫌う精密測定機器などにも利用できる。

振動から回転力を得るアイディアは 1 章で述べるように古くからいくつかある。今日につながる実用的な超音波モータは、1980 年頃の指田年生による研究が発端となり、1990 年代までは日本での実用開発が活発であった。それ以来、カメラの自動焦点合わせ機構を中心に応用されている。このほか、自動車内装品、コピー機、カードリーダー、ロールカーテン巻き上げなどについても多くの具体的な検討がなされ、その一部は実機に実装された。今後ロボットをはじめ、応用先の広がりが考えられる。1990 年前後の日本での超音波モータ開発ブームは今日では沈静化しているが、いくつかの企業では継続的に改良が加えられており、最近もカメラ用などで新モデルが登場している。一方、微小電気機械技術の発展に合わせてマイクロモータ実現の手法の 1 つとして日本や欧州で研究が進められた。超音波モータに関する学術論文の出版数は年々増加傾向にある。

超音波モータ技術は、電気・電子回路、圧電材料、機械システムの分野にま

たがっており、圧電振動や電気機械変換のさまざまな概念や解析法を学ぶためにも有効な題材である。このような電気系と機械系の境界領域・複合領域を勉強することは工学系の将来を担う学生諸君にとって重要なことであり、超音波モータはその教材としての価値も高いと考えられる。

本書では、超音波モータの歴史と特徴の解説に始まり、進行波型と定在波型という2つの代表的な超音波モータの原理と具体的な構成例について述べている。また、その基礎となる弾性体の振動、圧電現象、圧電振動子の電気等価回路などについてもまとめており、超音波振動子や圧電トランスデューサの入門書としての側面も有している。さらに、読者が実際に超音波モータを製作し、実験を行えるよう、駆動回路、モータ特性の評価法、超音波振動の測定法などについてもできる限り説明した。工学系の学生から超音波モータの概要を知りたい企業の開発者まで、本書を有効に利用いただければ幸いである。

なお、本書の執筆分担は以下のとおりである。

執筆分担

中村健太郎	2章, 5章, 6.5節, 6.6.2項, 6.8節~6.10節, 付録 (A.3.4項~A.3.5項 以外)
黒澤 実	1章, 4章, 6.7節
青柳 学	3章, 6.1節~6.4節, 6.6.1項, 付録 (A.3.4項~A.3.5項, A.4節)

2023年7月

著者を代表して 中村健太郎

目 次

1. 超音波モータの歴史と特徴

1.1 超音波モータの歴史	1
1.1.1 初期の研究	1
1.1.2 進行波型超音波モータ	3
1.1.3 定在波型超音波モータ（異形縮退モードの利用）	7
1.1.4 マイクロ超音波モータ	11
1.2 超音波モータの特徴と得られる性能	15
1.2.1 振動子に用いる圧電材料の特徴とモータ特性：変位量から速度へ	15
1.2.2 振動子に用いる圧電材料の特徴とモータ特性：力をどう捉えるか	17
1.2.3 エネルギーとパワー，そして変換効率	18
1.2.4 摩擦駆動：変換（伝達）効率と寿命	19
1.2.5 マイクロ化におけるメリットと可能性	22
1.3 超音波モータ概観	22
1.3.1 変換方式による分類	22
1.3.2 実用化が進んでいる応用事例	24
引用・参考文献	25

2. 弾性固体の振動の基礎

2.1 固体振動に関する基礎	29
2.2 振動子の電気等価回路の基礎	35
2.3 弾性固体の性質	43

2.4 細棒の縦振動	50
2.5 ねじり振動	57
2.6 たわみ振動	60
2.7 一般的な波動方程式	66
2.8 円板や円環の振動モード	68
引用・参考文献	71

3. 圧電の基礎

3.1 圧電の基礎	72
3.1.1 圧電効果	72
3.1.2 圧電方程式	74
3.2 圧電横効果縦振動子と等価回路	77
3.2.1 圧電横効果の圧電方程式	77
3.2.2 振動モードの導出	79
3.2.3 等価回路	80
3.2.4 メイソンの等価回路（横効果の場合）	86
3.2.5 電気音響変換式との対応	90
3.2.6 インピーダンス形式の等価回路	92
3.3 たわみ振動子	94
3.3.1 運動方程式の誘導	94
3.3.2 両端自由振動子の共振周波数	99
3.3.3 入力アドミタンス	100
3.3.4 力係数	101
3.3.5 等価回路	102
3.4 ランジュバン型振動子	104
3.5 圧電振動子の電気的特性測定	107
3.5.1 等価回路による電気的特性	107
3.5.2 自由アドミタンス Y_f の周波数特性と電気的諸定数の測定（A 形共振）	

3.5.3 自由インピーダンス Z_f の周波数特性と諸定数の測定 (B 形共振)	111
3.5.4 力係数の測定法	113
引用・参考文献	114

4. 進行波型超音波モータの原理

4.1 進行波型超音波モータの動作原理	116
4.1.1 弾性波の伝搬と粒子の動き	116
4.1.2 波動と移動体の接触と摩擦駆動	118
4.2 回転型の進行波型超音波モータの動作原理	120
4.2.1 縮退モードとモードの回転	120
4.2.2 振動モードと励振方法	124
4.2.3 円型進行波型超音波モータの実例	124
4.3 リニア型の進行波型超音波モータの動作原理	130
4.3.1 たわみ波を励振する振動系	130
4.3.2 整合負荷条件	131
4.3.3 モータ特性	133
4.4 弾性表面波モータ	134
4.4.1 モータの構成と摩擦駆動	134
4.4.2 波動の駆動方法と弾性表面波素子	137
4.4.3 出力特性	140
4.5 動作解析	142
4.5.1 摩擦力伝達	142
4.5.2 予圧分布と駆動力	143
4.5.3 接触状態と摩擦駆動のモデル化	144
引用・参考文献	147

5. 定在波型超音波モータの原理

5.1 2つの振動による楕円振動の実現	150
---------------------	-----

5.2	モータの基礎動作	153
5.3	動作解析	155
5.4	回転型超音波モータの実現例と特性	162
5.5	摩擦力制御の改善	165
5.6	リニア型の高出力モータの実現例	168
	引用・参考文献	173

6. 超音波モータの実現例

6.1	進行波型回転モータ（面内振動利用）	175
6.2	セイコーの円板の定在波型超音波モータ	178
6.3	セイコーエプソン突つき型（L1-B2 結合，回転型）	183
6.4	L1-B2 リニアモータ	186
6.5	定在波型回転モータ	190
6.5.1	直径 5 mm の定在波型回転モータ	190
6.5.2	メガトルク定在波型回転モータ	193
6.6	多自由度モータ	196
6.6.1	円板型多自由度モータ	196
6.6.2	棒型多自由度モータ	201
6.7	2つのボルト締め振動子によるリニアモータ	206
6.7.1	振動子の構成と特性	206
6.7.2	重量ステージ駆動制御特性	208
6.8	単相駆動マイクロリニアモータ	209
6.9	大型リニアステージ	212
6.10	超音波モータの制御	213
6.10.1	超音波モータの開ループ特性	213
6.10.2	位置決め制御	215
6.10.3	回転数制御	216
6.10.4	駆動電流による回転速度制御	217

引用・参考文献	219
---------	-----

付 録

A.1 摩 擦 材 料	223
A.1.1 超音波モータの摩擦材料に望まれる特性	223
A.1.2 摩擦特性の評価方法	224
A.1.3 摩擦特性の特性例	225
A.2 超音波モータの駆動回路	226
A.2.1 リニア増幅器による方式	226
A.2.2 スイッチング回路による方式	227
A.2.3 スイッチング方式駆動回路の例	229
A.2.4 リニア増幅器方式のための信号発生回路	231
A.3 振 動 測 定 法	232
A.3.1 レーザドップラ面外測定	233
A.3.2 レーザドップラ面内測定	236
A.3.3 光ファイバ式変位計	237
A.3.4 電気容量変化法	238
A.3.5 渦電流検出法	239
A.4 負荷特性の測定法	239
A.4.1 超音波モータの負荷特性	239
A.4.2 回転数と出力トルクの測定法	240
A.4.3 過渡応答から負荷特性推定する方法	243
引用・参考文献	245
索 引	246



超音波モータの歴史と特徴

超音波モータの研究開発は、初期の欧米における駆動原理に関する研究からはじまり旧ソビエト連邦における軍事研究と実用化へと発展した。その後、バブル期における活発な研究開発意欲を背景として、本邦での意欲的な取組みがあり、実用化へと進んだ。1990年代にはヨーロッパでの研究が盛んになり、韓国での研究も増えた。近年では、中国において意欲的に研究開発が進められている。超音波モータの特徴を生かした実用化の進展が期待される。

1.1 超音波モータの歴史

1.1.1 初期の研究

欧米での超音波モータに関する研究の歴史は長く、古い文献も存在する。中でも最も古いとされるのは Williams と Brawn による 1948 年の特許で、正方形断面をもつ片持ちはりの直交縮退モードを、 90° 位相差で励振するものである。振動子の構造は図 1.1 に示すようになっており、片持ちはり先端での回転振動を用い圧電モータを構成している^{1)†}。

また、旧ソビエトにおける研究と応用に関する取組みがよく知られている^{2)~4)}。しかし、軍事研究との関連で、あまり公開されていない部分が多いといわれる。旧ソビエトでの研究成果は、ソ連および東欧諸国の政治体制が変革したのち、イスラエルのナノモーション社における超音波モータ開発に寄与したといわれている。

† 肩付き数字は、章末の引用・参考文献の番号を表す。

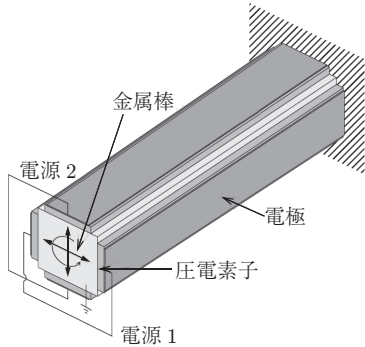


図 1.1 片持ちはりの直交縮退モードを利用する Williams らによる特許

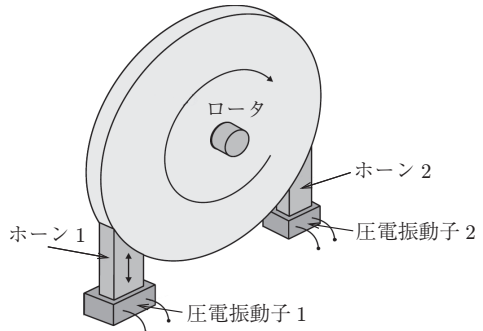


図 1.2 縦振動を用いて回転モータを構成する IBM による特許

西側諸国における超音波モータの開発に関しては、図 1.2 に示す IBM による超音波モータ特許がよく知られている⁵⁾。しかし、その後 IBM で研究された成果というのは知られていない。

IBM 特許を参考にしたと思われる研究成果としては、1980 年に発表された、図 1.3 の指田による回転型超音波モータが知られている⁶⁾。50 W の機械出力と 55% の電気機械変換効率を得ているが、動作音が小さくないのと摩耗が激しいということで、その後、このタイプのモータに関する研究は行われなかった。

指田によるモータを改良したタイプとしては、図 1.4 の熊田による超音波モータが 1985 年に報告されている⁷⁾。変換効率 80% を実現しており、出力 12 W

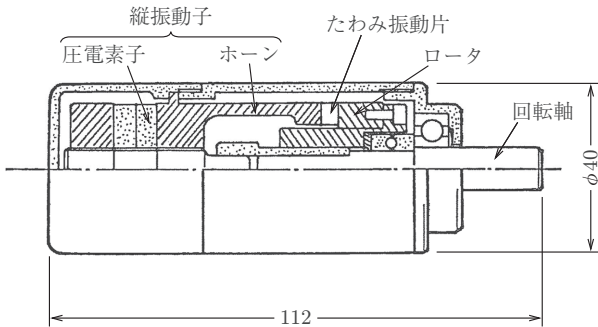


図 1.3 指田により試作された縦振動とたわみ振動片による超音波モータ

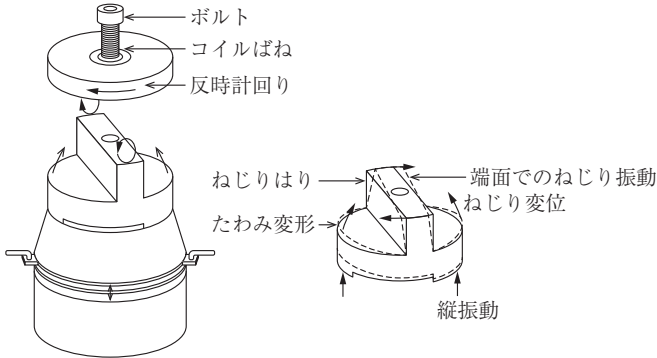


図 1.4 熊田により試作された縦振動とねじり振動変換による超音波モータ

と、超音波モータの可能性を示す初期の研究成果といえる。

1.1.2 進行波型超音波モータ

実用化につながる研究開発の始まりは、1980年代始め、新生工業の指田により試作された進行波型超音波モータの発表が大きな契機となった。ほぼ無音で動作する回転型モータと真鍮棒を伝送路とする大きな振動系をもつリニアモータが試作され、その動作の様子が公開された⁸⁾。当初、回転型モータにおいても効率（駆動電力に対する機械出力）は5%程度と低かったことや、摩擦駆動面での摩耗に対する懸念があった。しかし、好景気を背景とする活発な研究開発投資意欲をもった当時の日本企業の多くが研究に取り組み、新しいアクチュエータ技術の最有力候補として期待された。また、大学等での研究開発も開始されることとなった。

金属リングや円板状の振動体内に励振されたたわみ波の進行波を利用した、図 1.5 に示すような構造による進行波型回転モータは、新生工業とキヤノンおよび松下電器産業（現パナソニック）が中心となり開発が進み、いち早く実用化された。1986年には、新生工業による回転型超音波モータが駆動回路とともに市販されている。これまでに最も数多く製造されたのはキヤノンのよる一眼カメラ用の高級レンズに組み込まれたオートフォーカス用の超音波モータで、リ

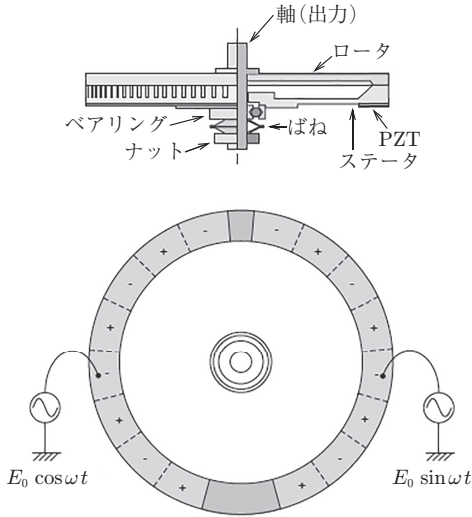


図 1.5 指田により提案された進行波型回転モータの構成例

リング形状のモータが 1987 年に実用化され交換レンズに実装する形で発売された。松下電器産業も円板形状とリング形状の超音波モータを開発し^{9), 10)}、ディスク型超音波モータを駆動回路とともに 1987 年にサンプル出荷を開始している。テレビコマーシャルまで放映していたが、社内事情により数年後には突然生産を中止している。

キヤノンにおける製品化は短期間のうちに成功を収めたが、その開発過程は必ずしも順調ではなかったようである。伝え聞くとところによると、リング状振動子に励振される進行波モードの周波数 f_0 とともに、隣接する共振周波数 f_1 のスプリアスモードが進行波として励振され、 $|f_0 - f_1|$ となる周波数の音が騒音として発生し、動作音がうるさいとして最終段階で開発中止となる寸前だったとのことである。2つの周波数 f_0 と f_1 はともに可聴帯域にはないが、空中放射音どうしの非線形作用により、差の周波数は数 kHz となり、可聴音となってしまっていた。幸いリング振動子のモード制御の研究が行われていたため¹¹⁾、スプリアスモードを制御することで騒音を防ぐことができた。キヤノンのリングモータをよくみると、図 1.6 に示すようにくし歯状となっている溝の深さは一定ではなく、一部の溝は深く削られていることがわかる。

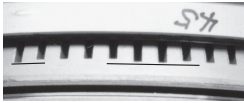


図 1.6 進行波型回転モータに刻まれたくし歯の拡大

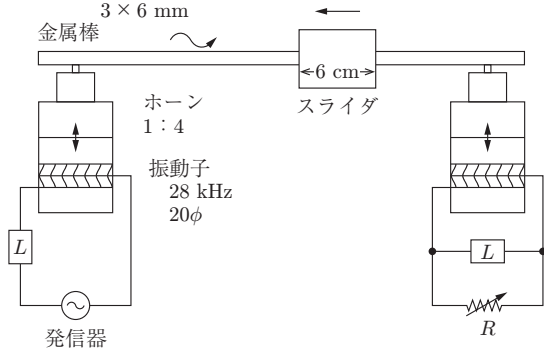


図 1.7 進行波型リニアモータの構成例

回転型とともに発表された進行波型リニアモータは、研究としては進展したが実用化には至らなかった。図 1.7 に示す棒状導波路へのたわみ進行波の励振条件は Kuribayashi らにより理論解析と実験が行われ¹²⁾、振動系としては設計理論が構築された。この研究成果を元に高速な大型化したモータも試作されている。移動速度を向上するため、大電力の進行波励振を目的として振動系の効率化と高出力化がほぼ理想的に実現された。しかし、進行波励振のため振動系が大型化し、移動速度 1 m/s とするには励振電力として 1 kW もの大電力を必要としたことから、効率は 1% 以下となってしまう、とうてい実用化できるモータではないことが明らかとなった¹³⁾。

進行波型回転モータの研究では、1980 年代終わり頃には電力から圧電変換器／固体振動／摩擦力を介して、機械出力への変換に関する研究も進められ、黒澤らによる論文¹⁴⁾ が出されている。さらに、キャノンにおいて前野らにより、有限要素法を用いた大規模な接触と駆動力伝達の解析と実験も行われている¹⁵⁾。この成果によると、キャノンがカメラレンズ用に開発したリング形状回転モータでは、駆動電力からモータ機械出力への変換効率が 35% であった。さらに、振動系保持に伴う損失を除けば、すでに効率 50% であったことがわかる。

接触と摩擦駆動に関しては、解析的な手法も研究されており、Hirata らにより摩擦駆動に関して詳細な検討と等価回路によるモデル化が行われており、実

索引

【あ】	運動方程式	30, 33, 79	機械損失	18
圧電応力定数	77	【え】	機械端子	101
圧電効果	72	エキスポネンシャルホーン	機械抵抗	36, 39
圧電材料	15		機械的 Q 値	16
圧電セラミックス	72	エネルギー保存	基本モード	53
圧電素子	6	円環型振動子	逆圧電効果	72
圧電縦効果	73	エンジニアリング	キャパシタ	36
圧電定数	16, 74	プラスチック	球面ボール軸受	198
圧電ひずみ定数	77	円筒型モータ	キュリー兄弟	72
圧電方程式	74		境界潤滑	167
圧電膜	12	【お】	共振角周波数	34, 39, 108
圧電横効果	73, 77	応力	共振周波数	29, 32, 35
圧電 d 形式	74	オートフォーカス	共振周波数定数	100
アドミタンス形式	92	音響インピーダンス	共振追尾	231
アブソリュート型	241	音速	強誘電体	72
アルミナ	140	【か】	虚ジャイレータ	93
【い】		回転型	【く】	
異形振動モード	106	回転型超音波モータ	矩形振動子	7, 151, 186
位相差	1		屈曲振動	7, 8
位相速度	79		屈曲振動モード	178
位相比較器	217	回転モード	クーロン摩擦	224
位相ロックループ	217	ガウスの定理		
異方性	46	角周波数	【け】	
インクリメンタル型	241	片振幅	結合振動	184
インダクタ	36	片端固定のはり	減衰振動	36
インピーダンス行列	89	片持ちはり		
インピーダンス形式	92	過渡応答	【こ】	
【う】		過渡応答法	工学的記法	47
渦電流	239	過渡状態	高次モード	53
運動エネルギー	30, 39	慣性モーメント	剛性率	45
運動の法則	29	【き】	交流回路	33
		機械インピーダンス	コニカルホーン	57
			固有音響インピーダンス	87

固有周波数 32, 35
 固有振動 32
 固有値 35
 固有ベクトル 35
 固有モード 35
 コルピッツ発振回路 182
 コンタクトメカニクス 143

【さ】

歳差運動 199
 最大出力トルク 158
 最大トルク 155
 最大摩擦力 142
 参照光 233

【し】

時間応答 42
 質点 38
 質量行列 34
 時定数 42, 244
 シフト周波数 235
 自由アドミタンス
 92, 108, 109

周期 31
 自由振動 32
 縦続行列 53, 54
 自由度 35
 周波数 31
 周波数方程式 53
 自由容量 81
 縮退 7, 121
 縮退モード 1, 122, 196
 瞬時トルク 157
 瞬時予圧 157
 象限角周波数 110
 自励発振回路 182
 進行波 3, 121, 130
 進行波型 3, 7
 進行波型超音波モータ
 106, 116
 進行波型超音波リニアモータ
 130
 伸縮振動 7, 8, 120

振動角速度 57
 振動軌跡 151
 振動振幅 31
 振動速度 31
 振動の節 69
 振動変位振幅 31
 振動モード 29, 35, 53

【す】

垂下特性
 133, 143, 155, 239, 240
 水晶 72
 スイッチング回路 227
 水熱合成法 128
 ステップ応答 171
 ステップホーン 55
 ストライバック曲線 167
 滑り 20
 滑り速度 156, 167, 224
 滑りひずみ 73

【せ】

正圧電効果 72
 整合条件 131
 静的予圧 154
 制動アドミタンス
 81, 108, 110
 制動容量 81, 107, 155
 積層圧電アクチュエータ 8
 節円 69
 接触時間 157
 節線 69
 せん断応力 45
 せん断ひずみ 45
 せん断力 61

【そ】

速度-負荷特性 133
 速度負荷特性 143
 ゴル-ゲル法 12

【た】

対称伸び振動 70

楕円軌跡 152
 楕円振動軌跡 9, 71, 159
 多関節アクチュエータ 204
 多自由度 35
 多自由度振動系 33
 多自由度モータ 25, 196
 縦振動 50
 縦波の伝搬速度 51
 たわみ進行波 5
 たわみ振動 14, 60, 120, 130
 ——の波動方程式 61
 たわみ振動子 6, 94
 たわみ波 3
 単振動 31
 弾性エネルギー 30, 40
 弾性行列 34
 弾性スティフネス 74
 弾性接触 143
 弾性定数 44
 弾性定数テンソル 48
 弾性表面波素子 134
 弾性表面波モータ 134
 弾性表面波リニアモータ 14
 弾性流体潤滑状態 168
 単相駆動 181
 ダンパ 35, 38
 単振子 31
 断面 2 次極モーメント 58
 断面 2 次モーメント 61

【ち】

力係数 17, 83, 87, 101, 107,
 113, 132
 チタン酸ジルコン酸鉛
 72, 163

超音波リニアモータ 186
 調和振動 33

【て】

抵抗 36
 定在波型超音波モータ 150
 低周波近似 63
 定電流駆動 218

手ぶれ防止 24
 手ぶれ補正 188
 電気音響変換式 90
 電気機械結合係数 16, 81, 97, 108
 電気機械変換 6
 電氣的等価抵抗 107
 電気等価回路 37, 38
 電気分極 72

【と】

動アドミタンス 81, 92, 108
 等価インダクタンス 107
 等価回路 5, 80
 等価機械抵抗 107
 等価コンプライアンス 107
 等価質量 107, 123
 等価ステイフネス 83
 等価容量 107
 動的予圧 154, 157
 等方性 46
 ドップラ効果 233
 ドップラシフト 233, 236
 トラクション係数 167
 トルク 57
 トルク係数 156
 トルク重量比 199

【に】

ニオブ酸リチウム 14, 17, 135
 入力アドミタンス 80

【ね】

ねじり振動 57, 153
 ねじり振動子 9

【は】

波数 51
 バックラッシ 213
 波動方程式 51, 79
 ばね 38
 ばね定数 30, 36

ばね振り子 31
 ハーフブリッジ構成 229
 パワーレート 213
 反共振角周波数 84, 108
 反射波 131

【ひ】

非磁性材料 170
 ピストン振動 164, 194
 ひずみ 44, 72

【ふ】

フィードバック制御 214
 フォトダイオード 233
 付加質量 123
 負荷特性 239, 243
 不感帯 141, 160, 216, 218
 複合振動子型 9
 フッソ樹脂 198
 分極 73
 分散性 62
 分布定数線路 86, 89

【へ】

ヘテロダイン干渉計 235
 ヘルツの接触理論 142
 ベルヌイ・オイラーの仮定 63
 変位ベクトル 34
 変成比 56, 164

【ほ】

ポアソン比 44
 棒のインピーダンス 52
 細棒の縦波音速 67
 ポテンシャル 97
 ホモダイン干渉 234
 ボルト締め 126
 ボルト締め振動子 163
 ボルト締めランジュバン型振動子 6, 104, 132
 ホーン 130, 132

【ま】

マイクロ超音波モータ 12
 マイクロマシン 12
 曲げ振動 60
 曲げ変形 61
 曲げモーメント 61
 摩擦駆動 20, 144
 摩擦係数 120, 158, 167, 223
 摩擦材料 225
 摩擦力制御 165
 摩擦粉 225

【み】

ミッタク・レフラーの定理 102

【む】

無負荷回転角速度 158

【め】

メイソンの等価回路 86
 メガトルク 193
 面外変位 233
 面内振動 69
 面内振動計 236
 面内振動モード 68
 面内たわみ振動モード 175
 面内変位 233

【も】

モード回転 14, 23, 120

【や】

ヤング率 44

【ゆ】

誘電損失角 16
 誘電体損失 18
 誘電率 74

【よ】

予圧 119, 137, 223

容量比	104
横波の伝搬速度	59
【ら】	
ラグランジュ・マクスウェル の方程式	90
ラメ定数	47
ランジュバン	104
ランジュバン型	153
ランジュバン型振動子	104

【り】	
リアクティブエネルギー	40
離散振動系	29, 33, 43
リニア増幅器	226
リニアモータ	3, 168
流体潤滑	167
流体抵抗	36
両端自由のはり	65

【れ】	
レイリー波	14, 117, 134
レーザドップラ振動計	232
【ろ】	
ロータリエンコーダ	215, 240
ロボットハンド	204

【A】	
A 形等価回路	107
AC サーボモータ	213
【B】	
B 形共振	107
BLT	104, 132
【D】	
d 形式	74
d 定数	17
D フリップフロップ	241
DC サーボモータ	213
DDS	232
d ₁₅	163
【E】	
e 形式	75
e 定数	17
e ₁₅	163
【F】	
F 行列	93
【G】	
g 形式	76

【H】	
h 形式	76
【I】	
IDT	14, 135
IDT 型反射器	137
【K】	
K 行列	54
k ₃₁	97
【L】	
L1-B2 モード	8, 152, 189
【M】	
MEMS	11
MOSFET	227
【P】	
P 波	68
PAM	228
PLL	217
PTFE	198
PWM	229
PWM インバータ制御	182
PZT	14, 163
PZT 膜	128

P+SV 波	68
【Q】	
Q 値	18, 39
【S】	
S 波	68
SH 波	68
SiC	136, 140
SRJ	198
SUS304	199
SUS440C	206
【T】	
T 型回路	89
【Z】	
ZnO	12
~~~~~	
<b>【数字・ギリシャ文字】</b>	
1 次遅れ系	171
1 次元縦波	67
1 次元縦波の伝搬速度	67
1 次モード	34
2 次モード	34
2 相電源	226
π 型モータ	7

—— 著者略歴 ——

中村 健太郎（なかむら けんたろう）

- 1987年 東京工業大学工学部電気電子工学科卒業
- 1989年 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了（電子システム専攻）
- 1992年 東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了（電子システム専攻）、博士（工学）
- 1992年 東京工業大学助手
- 1993年 東京工業大学講師
- 1996年 東京工業大学助教授
- 2010年 東京工業大学教授
- 現在に至る

黒澤 実（くろさわ みのる）

- 1982年 東京工業大学工学部電気電子工学科卒業
- 1984年 東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了（電子システム専攻）
- 1984年 東京工業大学助手
- 1990年 工学博士（東京工業大学）
- 1992年 東京大学助教授
- 1999年 東京工業大学助教授
- 2006年 東京工業大学准教授
- 現在に至る

青柳 学（あおやぎ まなぶ）

- 1989年 山形大学工学部電気工学科卒業
- 1991年 山形大学大学院工学研究科修士課程修了（電気工学専攻）
- 1991年 山形大学助手
- 1998年 博士（工学）（東京工業大学）
- 2003年 室蘭工業大学助教授
- 2009年 室蘭工業大学准教授
- 2010年 室蘭工業大学教授
- 現在に至る

超音波モータ  
Ultrasonic Motors

© 一般社団法人 日本音響学会 2023

2023年9月28日 初版第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 三美印刷株式会社  
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 <https://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01165-4 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。