

日本音響学会 編
音響テクノロジーシリーズ 23

弾性表面波・圧電振動型センサ

博士（工学） 近藤 淳
博士（工学） 工藤すばる 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

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

八戸工業大学
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）

（2017年11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ろう。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を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」は人間の可聴周波数よりも高い音として広く知られている。その超音波の振動ならびに波動を利用した弾性波デバイスが、われわれの身のまわりで広く利用されていることについてどれだけ知られているであろうか。ほとんどは利用者の目に触れることのない「縁の下の力持ち」としての重要な役割を担っている。例えば、スマートフォンや携帯電話に代表される移動体通信機器において、情報通信用デバイスや信号処理デバイスは必要不可欠な電子部品であり、基準信号発生や周波数選択などの素子として弾性波デバイスが利用されている。また、ビデオカメラやデジタルカメラの手振れ検知あるいは物体の姿勢制御用の機能デバイスとして弾性波デバイスが使用されている。このように弾性波デバイスは、圧電効果を利用しているため電氣的に制御できるという特徴がある。さらに、波動や振動を利用していることから周囲の環境変化によりその特性が変化するため、各種のセンサデバイスとして利用することができる。現在、弾性波センサはいろいろな分野で利用されており、その応用分野は今後ますます拡大していくものと期待される。

本書は2部構成であり、第Ⅰ部では伝搬媒質表面近傍の振動を利用した弾性波デバイスとして「弾性表面波センサ」(担当：近藤)を、また、第Ⅱ部では固体振動を利用したバルク波デバイスとして「圧電振動型センサ」(担当：工藤)を取り扱う。

弾性表面波センサには、水晶振動子、横波型板波、ラム波、ラブ波、弾性表面波、横波型弾性表面波がおもに利用されている。これらの中で、水晶振動子、横波型板波、ラム波、弾性表面波を用いたセンサに関しては書籍などが出版されている。しかし、ラブ波や横波型弾性表面波を用いたセンサに関して

は、基礎理論から応用まで網羅した書籍はない。しかし、現在最も利用されているのは横波型弾性表面波、ならびに横波型弾性表面波が伝搬する基板上に薄膜を付けたラブ波を用いたセンサである。そのため、これらを用いたセンサの検出原理を理解することは重要である。以上のことを考慮して、第I部の「弾性表面波センサ」に関しては6章構成とした。1章では、弾性表面波ならびに弾性表面波センサの基礎について述べる。2章では、弾性表面波センサの構成ならびに代表的な測定法について記述する。3章から5章では、弾性表面波センサの基礎として数値解析法と摂動法の基礎を示す。6章では、ガスセンサ、バイオセンサ、液体センサなど各種弾性表面波センサの検出原理や測定例について具体的に述べる。

一方、固体振動を利用した電子デバイスの一つである水晶振動子や圧電振動子は、高い Q 値を持ち高安定で小型化が可能であるためエレクトロメカニカル機能デバイスとして広く実用化されている。また、これらの振動子を応用した圧電振動型センサの一例として、振動型力センサや加速度センサ、振動ジャイロ・角速度センサは、移動体通信機器や自動制御やナビゲーションシステムのキーデバイスとして使用されている。これらの圧電振動型センサの特性を理解し、小型化や高性能化、高機能化を図るためには、その基礎的事項である圧電現象ならびに各種振動子の特性と特徴を理解することが必要である。また、近年のコンピュータシミュレーション技術の発展と展開を考えると、回路シミュレータや有限要素法は設計、開発にはなくてはならないツールであり、圧電振動型センサの等価回路解析とシミュレーション法は必要不可欠な分野である。以上の点を踏まえて、第II部の「圧電振動型センサ」に関しては7章構成とした。7章では、弾性波機能デバイスの特徴と圧電デバイスの解析手法について述べる。8章では、圧電振動の基礎として圧電方程式とその等価回路について記述する。9章では、基本となる各種の振動子について解説する。10章では、コンピュータシミュレーションと関連するマトリクス法と有限要素法の具体的な使用方法について記述する。11章から13章では、圧電振動子の具体的な応用例として、各種の圧電振動型センサの原理や構成例ならびに特性などに

ついて具体的に述べる。

本書は、弾性表面波デバイス、および圧電振動型デバイス分野の研究を志す方々、これらを必要とする他分野の方々を対象として書かれたものであり、読者の方々に少しでもお役に立てれば幸いである。本書の内容は、筆者らが直接携わってきた研究内容を中心にまとめたものであり、これまでご指導いただいた諸先生方には深く感謝の意を表する次第である。しかしながら、浅学非才ゆえ不完全な点や誤った記述もあることが危惧されるので、読者のご教示とご意見を仰げれば幸いである。

最後に、本書を執筆する機会を与えていただいた日本音響学会音響テクノロジーシリーズ編集委員会編集委員（当時）垣尾省司 山梨大学教授，ならびに筆者らの遅筆に付き合っていたいただいたコロナ社に厚くお礼を申し上げる。

2019年7月

近 藤 淳，工藤すばる

目 次

第 I 部 弾性表面波センサ

1. 弾性波センサ

1.1 弾性波デバイス	1
1.2 弾性波を用いた化学センサ, バイオセンサ	4
1.3 弾性波を用いた物理センサ	8
引用・参考文献	9

2. 弾性表面波センサおよび測定法

2.1 弾性表面波デバイス	11
2.2 代表的な測定システム	13
2.2.1 発振周波数法	13
2.2.2 位相差法	15
2.2.3 バースト法	17
2.2.4 ワイヤレス測定法	18
2.3 測定原理	19
2.4 共振子タイプと遅延線タイプ	21
2.5 検出限界	22
引用・参考文献	23

3. 弾性表面波センサの解析法

3.1 数値解析法	25
3.2 摂動法の基礎	32
3.2.1 基本解の導出	32
3.2.2 機械的摂動に対する基本解	34
3.2.3 電氣的摂動に対する基本解	35
3.3 速度変化および波数で規格化した減衰変化	35
引用・参考文献	36

4. 機械的摂動

4.1 空気中での質量負荷効果	37
4.2 ニュートン流体に対する機械的摂動	39
4.3 液体中での質量負荷効果	46
4.4 液体の密度と粘度分離測定	48
4.5 粘弾性流体	51
引用・参考文献	57

5. 電氣的摂動

5.1 伝搬面上が空気の場合の電氣的摂動	59
5.2 伝搬面上が液体の場合の電氣的摂動	62
5.3 比誘電率-導電率図表	66
5.4 比誘電率-導電率図表を用いた液体評価	67
5.4.1 導電率滴定	67
5.4.2 ミネラルウォーター測定	70
5.5 導電率と誘電率を用いた水評価	71

5.6 基準液体の導電率が無視できない場合	72
引用・参考文献	74

6. 弾性表面波センサを用いた応用測定

6.1 ガスセンサ	76
6.2 バイオセンサ	80
6.2.1 バイオセンサとは	80
6.2.2 免疫センサ	81
6.2.3 酵素センサ	84
6.3 多変量解析を用いた液体識別	87
6.3.1 多変量解析	87
6.3.2 多変量解析を利用した液体識別	88
6.3.3 多変量解析を利用した混合液体評価	95
6.4 ニューラルネットワークを用いた電解質水溶液識別	98
6.4.1 ニューラルネットワーク	98
6.4.2 液体フローシステムを用いた測定	99
6.4.3 ニューラルネットワークを用いた電解質の識別	102
6.5 センサ応答の推定	104
6.6 層状構造を用いた弾性波センサの高感度化	106
6.7 ワイヤレス SAW センサ	108
6.7.1 SAW 温度センサ	108
6.7.2 SAW ひずみセンサ	110
6.7.3 SAW 圧力センサ	111
6.7.4 SAW トルクセンサ	112
6.7.5 インピーダンス負荷 SAW センサ	112
引用・参考文献	114

第 II 部 圧電振動型センサ

7. 圧電振動型センサ

7.1 弾性波機能デバイスの特徴	117
7.2 圧電デバイスの解析手法	120
引用・参考文献	122

8. 固体の振動

8.1 固体の弾性	123
8.1.1 ひずみと応力	123
8.1.2 弾性定数	126
8.1.3 圧電方程式の表現方法	128
8.2 圧電振動と等価回路	129
8.2.1 振動子の縦振動	129
8.2.2 Mason の等価回路	133
8.3 圧電振動子の等価回路	135
8.3.1 電気音響変換の基本式	135
8.3.2 簡易等価回路	137
引用・参考文献	139

9. 振動子

9.1 縦振動子およびねじり振動子	140
9.1.1 縦振動子	140
9.1.2 ねじり振動子	141
9.2 横振動子	145

引用・参考文献	149
---------	-----

10. マトリクス法と有限要素法

10.1 振動体のマトリクス表示と特性解析	150
10.1.1 振動体のマトリクス表示	150
10.1.2 片持ち複合棒・双共振子の解析	153
10.2 有限要素法	160
10.2.1 有限要素法の概要	160
10.2.2 双共振音片振動子の結合振動の有限要素法解析	161
10.2.3 圧電セラミック縦振動子の有限要素法解析	164
引用・参考文献	166

11. 振動型力センサ

11.1 弦の振動	167
11.2 複合音さ型振動子を用いた力センサ	170
11.3 各種構造の横振動子を用いた力センサ	172
11.3.1 振動子の構造と振動変位解析	172
11.3.2 力センサとしての特性解析	175
11.3.3 加速度センサへの応用	176
11.3.4 多軸加速度センサなどへの応用	178
引用・参考文献	180

12. 振動ジャイロ・角速度センサ

12.1 原理と構成	181
12.2 等価回路	183
12.3 感度特性	185

12.3.1	性能指数の導出と考察	185
12.3.2	回転角速度に対する出力電圧特性	187
12.3.3	感度の実験的検討	188
12.4	応答特性	189
12.4.1	周波数応答特性	189
12.4.2	過渡応答特性	192
12.5	漏れ出力特性	194
12.5.1	総合等価回路	194
12.5.2	漏れ出力の低減化	196
	引用・参考文献	197

13. 触覚センサ

13.1	接触インピーダンス法による触覚センサの原理	199
13.2	触覚センサの周波数変化率	201
13.2.1	軟らかい対象物の場合	201
13.2.2	硬い対象物の場合	202
13.2.3	実験的検討	202
13.3	振動子の質量と触覚センサの周波数変化率との関係	205
13.4	触覚センサの高感度化の検討	207
13.4.1	有限要素法によるホーン型縦振動子の等価質量の解析	207
13.4.2	触覚センサの構成例	209
13.4.3	実験的検討	210
	引用・参考文献	211

索引		213
----	--	-----

第 I 部 弾性表面波センサ

1 弾性波センサ

1.1 弾性波デバイス

われわれの身のまわりにあるさまざまなもの、例えばスマートフォン、自動車などには、**圧電効果** (piezoelectric effect) を利用した部品が至るところで使われている。しかし、一般の目に触れる機会は少ない。**弾性波センサ** (acoustic wave sensor) の動作原理は圧電効果に基づく。そこで、まずはじめに圧電効果に関する若干の説明から始める。

1880年キューリー兄弟は、**水晶** (quartz) や電気石に圧力を加えると電荷 (電気双極子) が発生する現象を見いだした。機械エネルギーから電気エネルギーへの変換であり、これが圧電効果である。1881年には外部から結晶に**電界** (electric field) を印加すると結晶に**ひずみ** (strain) が発生すること、つまり電気エネルギーから機械エネルギーへの変換効果がLippmannにより理論的に予測され、キューリー兄弟により実験的に確認された。これを**逆圧電効果** (inverse piezoelectric effect) という。現在では両者を区別せず、どちらも圧電効果と呼ぶことが多い。圧電効果は誘電体に属する**圧電材料** (piezoelectric material) または**圧電結晶** (piezoelectric crystal) で生じる。特に、電気エネルギーを機械エネルギーに変換できることは、振動が容易に電氣的に制御可能

2 1. 弾性波 センサ

であることを意味する。このため、圧電材料は**超音波** (ultrasonics) の発生や検出のために利用されるようになった。1917年ランジュバンは**ランジュバン振動子** (Langevin type transducer) と呼ばれる探針用の振動子を考案した。これは、現在でも**ボルト締めランジュバン振動子** (bolt-clamped Langevin type ultrasonic transducer) として利用されている。

1922年に Cady は圧電結晶である水晶を用いた**共振子** (resonator) に関する発表を行った^{1)†1}。これが現在の圧電効果を利用した電子デバイスの礎である。日本においても昭和9年(1934年)には文献²⁾が出版されており、この文献の4章で水晶を利用した振動子に関する詳しい説明がなされている。水晶薄板上下に電極を設け、電極に交流信号(交番電界)を印加することにより一定の**周波数** (frequency) で振動する。1932年に古賀により見いだされた**ATカット水晶** (AT cut quartz)³⁾ は、室温付近で安定した温度特性を持つため現在でも広く利用されている。

弾性表面波^{†2} (surface acoustic wave : SAW) とは、弾性体表面にエネルギーを集中して伝搬する波である。SAW は、イギリスの物理学者レイリー卿により解析的に見いだされた波である⁴⁾。このため、**レイリー波** (Rayleigh wave または Rayleigh-SAW) とも呼ばれる。SAW は、伝搬方向に振動成分を持つ **L波** (longitudinal wave) と、表面に垂直な振動成分を持つ **SV波** (shear vertical wave) の二つの振動成分の合成した波であり、表面の質点は後方楕円回転している。また、表面に集中して伝搬する波のため、変位は表面から離れると小さくなる。

1960年代半ばまで、SAWはおもに地震学などの分野で研究が行われていた。転機となったのは、1965年の山之内ら、ならびに White らによる**すだれ状電極** (interdigital transducer : IDT) の報告である^{5).6)}。図 1.1 (a) に示

†1 肩付き数字は章末の引用・参考文献を表す。

†2 表面弾性波と呼ばれることもある。国際電気標準会議 (International Electrotechnical Commission : IEC) の Electropedia (<http://www.electropedia.org/>) では“弾性表面波”と定義されているので本書ではこれに従う。

(注) 本書に掲載されている URL は、編集当時のものであり、変更される場合がある。

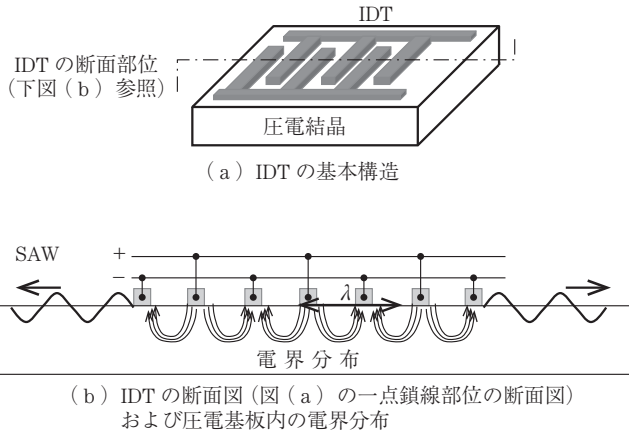


図1.1 IDT (すだれ状電極)の基本構造と電界分布

す構造を圧電結晶上に作成することにより, SAW の送受信を電気的に行えるようになった。その後, SAW デバイス (SAW device) は信号処理用デバイス, 特にフィルタ (filter) やデュプレクサ (duplexer) として研究, 開発が進められている^{7)~9)}。例えば, 図1.2は, SAW デバイスを用いたスマートフォンや携帯電話などの回路構成例である。スマートフォンや携帯電話などで利用される周波数は, 通信企業ごとに異なる帯域が割り当てられている。また, 送信, 受信の周波数もその割り当てられた周波数帯の中で分けられている。SAW 共振子 (SAW resonator) を用いたデュプレクサは, 送信信号と受信信号を切り分けるスイッチの役割を果たしている。また, 特定の信号のみを通過

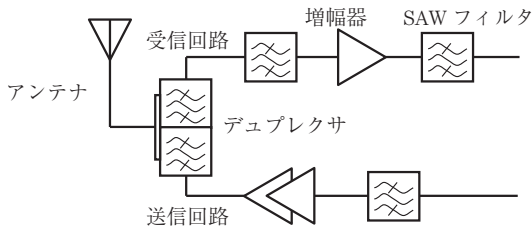


図1.2 SAW デバイスを用いたスマートフォンや携帯電話などの回路構成例

させるフィルタとして SAW デバイスが利用されている。このように、現在のスマートフォンや携帯電話には SAW デバイスが複数個利用され、欠かすことのできない電子部品となっている。

振動している面に物質が付着するとその振動特性が変化することは容易に想像できる。ドイツの Sauerbrey は、**水晶振動子** (quartz resonator) の電極上に厚さが均一な薄膜を装荷すると振動周波数が変化することを報告した¹⁰⁾。これが**弾性波デバイス** (acoustic wave device) を用いた**センサ** (sensor) の最初の報告である。1.2 節では弾性波センサの研究および開発の大まかな流れについて説明する。

1.2 弾性波を用いた化学センサ、バイオセンサ

1959 年に Sauerbrey は、**厚みすべり振動** (thickness shear mode : TSM) する振動子上に、厚さ h の**等方性薄膜** (isotropic thin film) が装荷されたときや微小質量が付着したときに生じる、周波数変化を表す式 (1.1) を導出した¹⁰⁾。

$$\Delta f = -\frac{2f_0^2}{\sqrt{\rho_q \mu_q}} \rho h \quad (1.1)$$

ここで、 Δf は**周波数変化** (frequency change), f_0 は水晶振動子の**共振周波数** (resonance frequency), ρ と h は電極上に装荷された膜の**密度** (density) と**膜厚** (thickness), ρ_q と μ_q は水晶の密度と**ずり弾性率** (shear modulus) である。膜の密度と膜厚の積、すなわち ρh は**面密度** (surface mass density) を表している。周波数変化より電極上の質量変化を検知できるため、水晶振動子を用いた質量センサは**水晶微量天びん** (quartz crystal microbalance : QCM) と呼ばれる。この原理に基づいた水晶振動子は、**化学センサ** (chemical sensor) や**バイオセンサ** (biosensor) だけでなく**物理センサ** (physical sensor) にも応用されている。ガス種や生体分子を検出する場合は化学センサまたはバイオセンサ、真空装置内で膜厚を測定する場合は物理センサである。

Sauerbrey の報告以降, 弾性波デバイスのセンサ応用が始められたとあってよい。なお, 弾性波デバイスを利用したセンサの一般通則と化学センサ, およびバイオセンサに関する国際標準が 2017 年 12 月に発行された[†]。

1964 年, 水晶振動子の**ガスセンサ** (gas sensor) への応用が King により示された¹¹⁾。この報告は, 水晶振動子の化学センサ応用の始まりと位置付けることができる。一方, レイリー波の化学センサ応用に関する最初の報告は, 1979 年に Wohltjen らによってなされた^{12)~14)}。また, Wohltjen は Auld の**摂動法** (perturbation theory) を利用して, SAW センサの**負荷質量** (loaded mass) に対する理論式 (1.2) を導出している¹⁵⁾。

$$\Delta f = -(k_1 + k_2)\rho h f_0^2 - \left(\frac{4\mu}{V_R}\right)\left(\frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu}\right)k_2 h f_0^2 \quad (1.2)$$

ここで, k_1 と k_2 は使用する圧電基板に依存した係数, V_R は使用する圧電基板を伝搬するレイリー波の伝搬速度, λ と μ は装荷された膜の**ラメ定数** (Lamé's constants) である。式 (1.1), (1.2) のどちらも, 水晶振動子や SAW デバイスを発振回路に組み込んで動作させることを考えている。このため, 周波数変化 Δf [Hz] に対する表現式となっている。両式より負荷質量に対する周波数変化は, デバイスの励振周波数の 2 乗に比例することがわかる。つまり, 高周波デバイスほど同じ負荷質量に対する周波数変化量は大きくなる。

ガスセンサは気相系で動作するセンサである。野村らは, 水晶振動子を液体中の測定に初めて応用した¹⁶⁾。厚みすべり振動を利用した水晶振動子は表面の振動変位が横振動であるため, 振動面上に液体を載せても振動可能である。野村らによる液体環境下の実験でも水晶振動子が動作可能であるという報告以降, 水晶振動子センサを用いた液体中での測定が行われるようになった。振動表面の面内方向の振動振幅が $1/e$ となる距離は**粘性侵入度** (viscos penetration depth) δ と呼ばれている (式 (1.3))¹⁷⁾。

$$\delta = \sqrt{\frac{2\eta_{\text{liq}}}{\rho_{\text{liq}}\omega}} \quad (1.3)$$

† IEC 63041-1 Piezoelectric sensors — Part 1 : Generic specifications
IEC 63041-2 Piezoelectric sensors — Part 2 : Chemical and biochemical sensors

索引

【あ】		【か】		【く】	
圧電結晶	1	階層型ニューラルネット		駆動点インピーダンス	155
圧電効果	1	ワーク	98	グルコースオキシダーゼ	84
圧電材料	1	回転角速度	181	【け】	
圧電定数	26	化学センサ	4	検出限界	22
厚みすべり振動	4	角周波数	6	検出用 SAW センサ	14
アドミッタンスマトリクス	150	角速度センサ	181	減衰	19
【い】		拡張カルマンフィルタ	106	減衰変化	20
位相	19	加水分解酵素	84	【こ】	
位相差	15	ガスセンサ	5	抗原	80
位相差法	13	カット水晶	2	抗原抗体反応	6
位相特性	11	過渡応答	99	剛性率	127
インピーダンス負荷 SAW		過渡応答特性	192	酵素センサ	81
センサ	18	感度	22, 186	抗体	80
インピーダンスマトリクス	150	緩和時間	53	コリオリ力	181
インピーダンス類推	121	【き】		【さ】	
【う】		機械的摂動	33	酸化還元酵素	84
浮き電極を持つ一方向性		規格化表面インピーダンス	61	参照用 SAW センサ	14
電極	11	疑似弾性表面波	7	サンドイッチ法	82
ウレアーゼ	84	基本周波数	169	【し】	
【お】		基本モード	169	軸力	170
応力	25	逆圧電効果	1	自己較正型レシオメト	
遅い横波	28	逆問題解析	51	リック法	103
音さ型振動子	149	キュリー温度	108	実効誘電率	61
		競合法	82	実時間測定	6, 81
		共振子	2	質量負荷効果	37
		共振子タイプ	11	時定数	186
		共振周波数	4	自由アドミッタンス	137
		共振尖鋭度	132		

集中定数回路	121	弾 性	123		
周波数	2	弾性スチフネス	26	【に】	
周波数応答特性	189	弾性定数	126	入力層	98
周波数変化	4	弾性波センサ	1	ニュートン流体	39
主成分分析	87	弾性波デバイス	4	ニューラルネットワーク	78
出力層	98	弾性表面波	2	尿 素	84
触覚センサ	199			【ね】	
信号雑音比	23	【ち】		ねじり振動	141
人工知能	98	遅延線タイプ	11	粘性侵入度	5
振動子	135	力係数	135	粘弾性流体	52
振動ジャイロ	181	中間層	98	粘 度	6
振 幅	19	超音波	2		
振幅変化	19			【は】	
【す】		【て】		バイオセンサ	4
水 晶	1	テクスチャ構造	48	波 数	33
水晶振動子	4	デバイ長	72	——で規格化した減衰	
水晶微量天びん	4	デバイ・ヒュッケルの理論	72	変化	20
すだれ状電極	2	デュプレクサ	3	バースト法	13
スムーズな面	49	電 界	1, 26	バックプロパゲーション法	
ずり弾性率	4	電気回路網	120		99
		電気機械結合係数	8	発振周波数法	13
【せ】		電氣的摂動	33	速い横波	28
静電波	28	電束密度	25	腹	169
静電ポテンシャル	26	伝達マトリクス	152	判別分析	87
制動容量	137	伝搬定数	199		
性能指数	186			【ひ】	
接触インピーダンス	199	【と】		非水相液体	105
摂動解	32	等価インダクタンス	137	ひずみ	1
摂動法	5	等価回路	137	非摂動解	32
センサ	4	等価機械抵抗	135	非対称0次モードラム波	7
		等価キャパシタンス	137	非ニュートン流体	39
【そ】		等価質量	135	比誘電率	62
双共振子	182	等価スチフネス	135	比誘電率-導電率図表	66
挿入損失	11	等価電気抵抗	137	表面インピーダンス	60
速度変化	20	導電率	62	表面音響インピーダンス	34
その場診断	82	導電率測定	67		
		導波型 SH-SAW	106	【ふ】	
【た】		等方性薄膜	4, 37	フィルタ	3
体積弾性率	29	特性インピーダンス	199	フォークトモデル	52
縦振動	140	トランスデューサ	80	負荷質量	5
多変量解析	78			複素相反定理	32

複素伝搬定数	33
複素誘電率	30
節	169
フックの法則	123
物理センサ	4
分布定数回路	121
分布定数線路	199

【ほ】

ポアソン比	127
ボルト締めランジュバン振動子	2

【ま】

膜厚	4
マクスウェルモデル	52

【み】

密度	4
----	---

【め】

メカニカルフィルタ	147
免疫センサ	6
免疫反応	6
面密度	4

【も】

モード結合理論	11
モビリティ類推	121

【や】

ヤング率	127
------	-----

【ゆ】

有限要素法	121
誘電率	26

【よ】

容量比	138
-----	-----

横波型弾性表面波	7
----------	---

【ら】

ラブ波	7
ラメ定数	5
ランジュバン振動子	2

【り】

粒子速度	32
粒子変位	25

【れ】

レイリー波	2
-------	---

【ろ】

漏洩弾性表面波	6
---------	---

【わ】

ワイヤレス SAW センサ	9
---------------	---

【I】	
IDT	2
【L】	
LoD	22
LSAW	6
L波	2
【M】	
Mason の等価回路	133

MEMS	176
【P】	
PSAW	7
【S】	
SAW 圧力センサ	111
SAW 温度センサ	9
SAW 共振子	3
SAW デバイス	3
SAW トルクセンサ	112

SAW ひずみセンサ	110
SH-SAW	7
SH 板波	7
Smith の等価回路	11
SN 比	23, 197
STW	112
SV 波	2

— 著者略歴 —

近藤 淳 (こんどう じゅん)

1990年 静岡大学工学部光電機械工学科卒業
1993年 静岡大学大学院工学研究科修士課程
修了(光電機械工学専攻)
1995年 静岡大学大学院電子科学研究科
博士課程修了(電子応用工学専攻)
博士(工学)
1995年 日本学術振興会特別研究員(PD)
1996年 カールスルーエ研究所(現KIT)
研究員
1997年 静岡大学助手
2003年 静岡大学助教授
2010年 静岡大学教授
現在に至る

工藤 すばる (くどう すばる)

1982年 山形大学工学部電気工学科卒業
1984年 東北大学大学院工学研究科修士課程
修了(電気及び通信工学専攻)
1984年 横河電機株式会社勤務
1989年 石巻専修大学助手
1995年 博士(工学)(東北大学)
1996年 石巻専修大学講師
2002年 石巻専修大学助教授
2008年 石巻専修大学教授
現在に至る

弾性表面波・圧電振動型センサ

Surface Acoustic Wave and Piezoelectric Vibrational type Sensors

©一般社団法人 日本音響学会 2019

2019年9月2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 新日本印刷株式会社
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 978-4-339-01138-8 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。