

# ま え が き

日進月歩のごとく、今日の科学技術の進歩は目覚ましい。このことは、音響分野においても例外ではない。時にはエレクトロニクスを中心とした周辺・要素技術の影響を受け、また、時には相互に融合しながら、いままでに多くの研究と技術の成果を世に生み出してきた。そして、その成果は新しい音響製品の開発に結集され、われわれの生活を豊かにすると同時に生活の質の向上に役立ってきているし、この流れは今後もなお進み続けるであろう。

いうまでもなく、音響学の歴史は古く、弦や板の振動による音の発生と伝搬といった一連の研究を通して音響・振動の学問が体系化されてきた経緯から、物理の色彩の強い学問である。本書は、今日では多岐の分野にわたり学際的ともいわれる音響のなかでも、波動としての側面から音響を眺め、特に伝搬媒質の非線形性に起因して生じるさまざまな現象について、その理論と応用に焦点を絞りながらまとめた、非線形音響に関する解説書である。

ところで、われわれが経験する音の大きさは大気圧に比べればきわめて小さく、音波の伝搬過程を線形化して議論している。しかし、本来、音速は媒質の密度とともに増すので、波面は伝搬につれてしだいに急峻化して衝撃波が形成されるようになる。ことに、爆発に伴うような大きな圧力変化では急峻な波面が容易に形成され、その面を境に圧力や密度が急激に変化する極限領域ができる。このような強い衝撃波領域と、微小振幅の仮定から出発し、線形理論に立脚した従来の音響領域を補完する橋渡しの存在が、非線形音響の位置付けである。

新しい研究分野が誕生して一人前の科学として世に認知されるには、長い時間を要するのが常である。このことは非線形音響についてもいえる。20世紀前半までは、単なる学術的な興味の対象として、流体力学や数学を専門とする学

者が個別に音波の非線形現象に取り組んでいた。ところが、1960年のパラメトリックアレイに関する理論発表をはじめとして、その存在実証、工学的な応用の報告を契機に、非線形音響の研究者は世界的に爆発的に増え、音響の一つの重要な研究分野として確立されるまでに至った。そして、研究成果の世界的な情報交換の場として、非線形音響に関する国際シンポジウム (International Symposium on Nonlinear Acoustics) がほぼ3年ごとに世界の主要な国で開かれ、今日まで引き継がれてきている。


本書は非線形音響の研究領域をできるだけ多くの読者に知っていただき、音響全体、ひいては科学の今後の発展に少しでも役立ちたいとの願いから、各専門領域で活躍されている第一線の方々に執筆をお願いした。そして、これから非線形音響を勉強してみようという技術者や大学院生を対象として、線形理論についての予備知識があれば理解できるように内容を組み立てた。執筆内容としては、非線形性に起因する最たる現象の波形ひずみから出発して、音圧や粒子速度の2次的な直流成分としての音響放射圧や音響流の現象を中心にまとめた。これらの現象は、非線形音響のなかでもクラシカルな研究領域といえるが、これは研究が古くて陳腐ということではなく、理論がほぼ確立されて非線形音響の基礎となる領域であると理解していただきたい。また、章ごとの内容ができる限り関連付けられるように、細心の注意を払って内容を吟味し、そして物理量の記号や専門用語の名称を統一した。しかし、単純な誤謬<sup>びゅう</sup>が残っている可能性がある。読者の皆さんからご指摘やご意見を取り入れて、いっそう読みやすい内容に充実できれば幸いと思っている。

最後に、本書を上梓するにあたり、多くの先輩や同僚には多大にお世話になった。特に、日本音響学会の春季・秋季研究発表会や各種研究委員会、また長年にわたって続いている非線形音響研究会を通して、貴重なご意見やコメントを得て、これが本書の内容になっている。ここに関係者に深く感謝したい。

2014年2月


鎌倉 友男

# 目 次




## 1. 非線形音響を学ぶ前に

(鎌倉友男)




1.1 線形性と非線形性	1
1.2 非線形と衝撃波	4
1.3 非線形音響の歴史	10
1.4 本書の構成	18
引用・参考文献	22





## 2. 音波の非線形伝搬

(斎藤繁実, 鎌倉友男)





2.1 非線形伝搬による波形ひずみ	27
2.1.1 支配方程式	27
2.1.2 線形な波動方程式	32
2.1.3 音速の粒子速度依存性	34
2.1.4 波形ひずみの発生	37
2.1.5 衝撃波	41
2.1.6 微小ひずみ	44
2.1.7 非線形伝搬の定式化	48
2.2 実在の流体中の音波	49
2.2.1 波動のモデル式	49
2.2.2 有限振幅音波のモデル式	52
2.2.3 吸収の影響	54

2.2.4	回折のひずみ波形への影響	58
2.3	N波および不規則音	60
2.3.1	N波の伝搬	60
2.3.2	不規則音の伝搬	62
	引用・参考文献	65

 **3. 非線形音波の応用**   
(斎藤繁実)

3.1	非線形パラメータ $B/A$	67
3.1.1	非線形パラメータの測定法	67
3.1.2	非線形パラメータの特性	71
3.1.3	生体関連試料の非線形パラメータ	72
3.1.4	非線形パラメータの混合則	74
3.1.5	非線形パラメータの画像化	75
3.2	パラメトリックアレイ	78
3.2.1	音波と音波の相互作用	78
3.2.2	Westervelt のモデル	80
3.2.3	モデルの一般化	83
3.2.4	パラメトリック音源における自己復調	87
3.2.5	パラメトリック音源の応用	89
3.2.6	パラメトリック受波アレイ	91
3.3	第2高調波の応用	94
3.3.1	第2高調波ビームの特徴	94
3.3.2	非線形高調波の利用	97
	引用・参考文献	99

 **4. 非線形音場の数値解析**   
(土屋隆生, 鎌倉友男)

4.1	差分法の導入	103
-----	--------	-----

4.1.1	放物形方程式の解法	103
4.1.2	非線形項の計算	109
4.1.3	Pestorius のアルゴリズム	113
4.1.4	KZK 方程式の解法への適用	119
4.1.5	変形ビーム方程式	123
4.1.6	時間領域での解析	126
4.1.7	その他の解析法	130
4.2	有限要素法による解析法	135
4.2.1	ガラーキソ法	135
4.2.2	離散化	137
4.2.3	非定常解析	140
4.2.4	計算例	142
4.3	CIP法	146
4.3.1	支配方程式	146
4.3.2	特性曲線法	147
4.3.3	CIP法の考え方	149
4.3.4	散逸項と非線形項の取扱い	150
4.3.5	計算例	151
	引用・参考文献	152



## 5.

## 音響放射力

(野村英之, 小塚晃透, 鎌倉友男)



5.1	音響放射力とは	156
5.2	ランジュバン放射圧の理論	159
5.2.1	流体力学的手法による導出	159
5.2.2	音響放射圧理論とエネルギー密度	163
5.3	平面波音場中の音響放射力理論	167
5.3.1	平面進行波音場	168
5.3.2	平面定在波音場	170

5.4 より現実的な音響放射力理論	174
5.4.1 粘性流体内における音響放射力	175
5.4.2 固体弾性球へ作用する音響放射力	176
5.4.3 超音波ビーム内の音響放射力	177
5.5 音響放射圧の実験的検証と応用	178
5.5.1 超音波放射圧および浮揚	178
5.5.2 水中超音波による微小物体の捕捉	180
5.5.3 定在波音場中での微粒子の操作	182
5.5.4 音源近傍における放射圧と近距離場音波浮揚	187
5.6 面積分の関係式	190
引用・参考文献	191

## 6. 音 響 流

(近藤 淳, 鎌倉友男)

6.1 音響流の歴史	195
6.2 音響流の支配方程式	198
6.3 音響流の理論	202
6.3.1 エッカルト音響流	202
6.3.2 シュリヒイティング音響流	211
6.3.3 レイリー音響流	215
6.4 音響流に関連する現象	219
6.5 音響流の応用	221
引用・参考文献	225

## 7. 力学系としての非線形音響

(河辺哲次)

7.1 ハミルトン形式による音線方程式	231
7.1.1 幾何音響理論	232

7.1.2	波動方程式とアイコナル方程式	232
7.1.3	ハミルトニアン	237
7.1.4	音線のスタンダードハミルトニアン	239
7.1.5	力学系とカオス	241
7.2	海洋音響とスタンダードハミルトニアンの適用	245
7.2.1	パラボラ方程式	246
7.2.2	音速プロフィールとカオス	248
7.3	ビリヤードと音線軌道	250
7.3.1	長方形ビリヤード	250
7.3.2	スタジアム形ビリヤード	251
7.3.3	閉じ込めポテンシャル	252
7.3.4	ビリヤード境界に対する閉じ込めポテンシャル	254
7.4	室内音響への応用	256
7.4.1	矩形領域における音線軌道	256
7.4.2	残響室モデル	258
7.4.3	音線軌道のポアンカレ断面とリアブノフ指数	258
7.4.4	ビリヤードモデルによるリアブノフ指数	260
7.4.5	音の減衰時間	260
7.5	非線形音響の新しい見方	262
7.6	リーマン幾何学的なアプローチによる音線軌道の方程式	263
7.6.1	測地線とメトリック	263
7.6.2	最小作用の原理と音線軌道のメトリック	264
7.6.3	音線の測地線方程式	265
	引用・参考文献	266
	索引	269



# 非線形音響を 学ぶ前に

非線形音響の基礎と応用を取り上げる前の準備として、線形性、非線形性の用語の説明、身近で代表的な非線形問題、そして非線形音響の歴史を紹介する。最後に、本書の構成を述べる。

## 1.1 線形性と非線形性

マグローヒル社の『科学技術用語大辞典』によれば、非線形性 (nonlinearity) は“比例関係からのずれ”と説明されている。そして、非線形を接頭語にもつ 40 個ほどの用語があげられている。非線形の接頭語が付かないが、非線形性に密接に関係するカオスやフラクタルを含めれば、非線形性に起因する物理現象がいかに多いかが想像できるであろう。

非線形性の意味やそれに基づく現象を十分理解するには、一般に高等数学の予備知識が必要となる。しかし、そのような数学の記述は本書の目的ではないし、すべての現象を細かに紹介する紙面もなく、また著者らに数学的素養があるといえないので、ここでは波動に関連した非線形性の基礎的なことと現象的なことがらに焦点を絞り、大まかな紹介にとどめる。

ところで、非線形性に対比する線形性 (linearity) とは、換言すれば、重ね合せの原理 (principle of superposition) を満たす性質である。すなわち、あるシステムがあり、そのシステムへの入力信号と出力信号の関係を考える。もし、異なる二つの入力信号  $x_1$ ,  $x_2$  の和がそのシステムに入ったとき、出力信号が  $x_1$ ,  $x_2$  それぞれに対する出力信号  $y_1$ ,  $y_2$  の和になれば、この特性を線形



## 2 1. 非線形音響を学ぶ前に

性という。このことを式で与えるために、システムへの入力関数  $x$  とそれに対応する出力関数  $y$  の二つの間の関係を“変換”という概念で考え、この変換を演算子  $L$  で表す。この演算子が、次の二つの条件

$$L(x_1 + x_2) = y_1 + y_2 \quad (1.1)$$

$$L(ax) = ay \quad (1.2)$$

を満たすとき、 $L$  を線形演算子 (linear operator) という。ここで、 $a$  は任意定数である。

当然成り立つと考えがちで、しかも無意識のうちに利用するこの原理は、物理現象を観測するうえで、また定式化するうえできわめて重要である。例として、ばねにおもりを吊るしたときの、そのおもりに働く重力とばねの伸びの関係を考えてみる。1 kg のおもりに対し 1 cm 伸びたとき、2 kg のおもりでは 2 cm 伸びるであろうし、また、1 kg と 2 kg のおもりを同時に加えたとき、ばねは 3 cm 伸びることが予想される。事実、多くの実験でこの比例関係は成立し、フックの法則 (Hooke's law) として知られている。

一方、非線形性とは上記の線形性に当てはまらない性質を示し、条件式 (1.1)、(1.2) に従わない演算子は非線形演算子で、2乗操作は非線形演算の代表格である。いま、入力  $x$  と出力  $y$  とに  $y = x^2$  の関係があるとしよう。 $x_1, x_2$  の入力それぞれに対して  $y_1, y_2$  の出力が得られるならば、 $x_1 + x_2$  の入力に対して、 $y_1 + y_2$  の出力が得られるだろうか。簡単な式の展開の  $(x_1 + x_2)^2 = x_1^2 + x_2^2 + 2x_1x_2 = y_1 + y_2 + 2x_1x_2$  からわかるように、二つの入力の積の項  $x_1x_2$  も現れるので、線形性の条件式 (1.1) は満たされないことになる。もちろん、式 (1.2) も満足しない。

ここに微分可能な任意関数  $Y = F(X)$  があり、この関数を次式のように  $X = X_0$  のまわりでテイラー級数に展開できたとする。

$$Y = Y_0 + F'(X_0)x + \frac{F''(X_0)}{2!}x^2 + \frac{F'''(X_0)}{3!}x^3 + \dots \quad (1.3)$$

ここで、 $Y_0 = Y(X_0)$  である。式 (1.3) で変動分  $x (= X - X_0)$  が十分小さ

いと、 $x$  の 2 乗以上のべき項はさらに小さくなって無視でき、 $Y$  の変動分の  $y(= Y - Y_0)$  と  $x$  は、微分係数  $F'(X_0)$  を傾きとした比例関係になる。したがって、関数が微分可能で連続である限り、微小な変動領域に限れば  $y$  と  $x$  の変量間に線形関係が成り立つ。しかし、変動分が大きくなってくると、式 (1.3) の展開式で第 3 項以降を加えなければ正しい  $y$  の値に近づかない。このことは、 $x$  の 2 乗、3 乗項などの非線形項を含めなければならないことになる。

2 次の非線形性がシステムの特性に大きく影響する好例として、1838 年に Verhulst が提唱したロジスティック方程式 (logistic equation) がある<sup>1)†</sup>。これは、時間  $t$  の経過とともに、生態系の個体数  $x(t)$  の増殖過程を予測する際に利用する最もシンプルなモデル式であって、次式で与えられる。

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon_1 x - \varepsilon_2 x^2 \quad (1.4)$$

ここで、 $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  はともに正の定数である。式 (1.4) において、右辺の第 2 項がない場合は、解は  $x|_{t=0} = x_0$  を初期値として  $x = x_0 \exp(\varepsilon_1 t)$  になる。したがって、個体数は時間とともに増加率  $\varepsilon_1$  で指数関数的 (いわゆる、ねずみ算式) に増殖することになる。現実の生態系ではこのようなことは起こりえず、例えば餌の枯渇に伴う増殖の抑制効果が働き、個体数の増加に歯止めがかかる。この抑制効果を Verhulst は  $\varepsilon_2 x^2$  の 2 次の非線形項で与えている。このような思考のもとで与えられた式 (1.4) において、その解は

$$x = \frac{x_0 e^{\varepsilon_1 t}}{1 - \kappa x_0 + \kappa x_0 e^{\varepsilon_1 t}} \quad (1.5)$$

になる。ここで、 $\kappa = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$  である。

図 1.1 は、式 (1.5) を描いたものである。式 (1.5) の一般的傾向として、個体数  $x(t)$  は初期値  $x_0$  から出発し、しばらく経過した後に急激に増加するが頭打ちになり、最終的には定常値の  $1/\kappa = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$  に落ち着く。このときの増加曲線をロジスティック曲線 (logistic curve) という。非線形問題では、往々にして

† 肩付き数字は、章末の引用・参考文献の番号を表す。なお、論文誌の巻番号は太字で表記する。

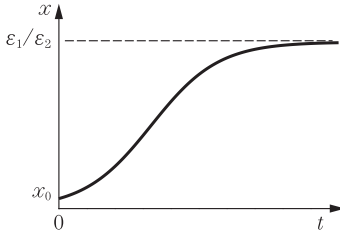


図 1.1 ロジスティック曲線

上記のように増加から定常値への移行，すなわち飽和 (saturation) がみられるが，この飽和の発生は非線形性が引き起こす現象の一つとみてよい。

## 1.2 非線形と衝撃波

われわれの生活環境を眺めてみると，興味深い現象が多々ある。次の問題は交通流 (traffic flow) をモデル化したもので<sup>2)</sup>，波動問題との対応が明らかになるであろう。

いま， $x$  軸に沿った高速道路上を 1 方向に走っている車の全体的な流れを考える。そして，時刻  $t$  において，道路に沿っての単位長，例えば，100 m 当りの車の台数を交通密度として  $\rho(t, x)$  で表す。また，この交通密度の動く速度を  $u(t, x)$  とおく。さらに，道路の横 1 点に立って車の流れを観測したとき，単位時間，例えば，1 分間当りの通過台数を交通量として  $q$  で表す。モデル化の第一歩は，車を何台かにまとめた連続体として交通流を考えることである。このような考えを連続体仮説 (continuum hypothesis) という。この考えにおいて， $q$ ， $\rho$ ， $u$  の三つの変量間に

$$q = \rho u \quad (1.6)$$

の関係が成り立つ。

ところで，いま，高速道路には出入口がないとする。そのとき，車の台数は保存されなければならない。つまり，区間  $[x_1, x_2]$  の間で単位時間に増加する車の台数  $\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} \rho dx$  は，単位時間に位置  $x_1$  に入り込む車の台数から，位置

$x_2$  を出ていく台数の差に等しい。これを式で表せば

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_1}^{x_2} \rho dx = q(t, x_1) - q(t, x_2) \quad (1.7)$$

になる。 $x_1 = x$ ,  $x_2 = x + \Delta x$  として  $\Delta x \rightarrow 0$  の極限をとれば

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (1.8)$$

が得られる。この式は車両の**保存則** (conservation law) を表している。

車の流れは場所的には変動していても、交通の難所はないとする。第1近似として、走行速度は交通密度によって決まるとみてもよい。すなわち

$$u = u(\rho) \quad (1.9)$$

とおく。交通密度が大きいほど速度は遅く、逆に、密度が小さいと速くなるので、 $u(\rho)$  は一般に  $\rho$  の増加に反して単調に減少する関数である。そして、 $\rho = 0$  の極限で速度は最大になる。

$$u(0) = u_{\max} \quad (1.10)$$

一方、交通渋滞では  $u = 0$  で、このときの密度を  $\rho_{\text{jam}}$  とすれば

$$u(\rho_{\text{jam}}) = 0 \quad (1.11)$$

を満たす。したがって、交通密度  $\rho$  と交通量  $q (= \rho u)$  の関係は、だいたいにおいて、**図 1.2** のように、ある密度  $\rho_c$  で最大  $q_c$  をとる形となる。

最も簡単なモデルとして、 $u$  が  $\rho$  の1次関数

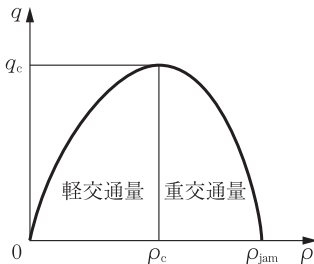


図 1.2 交通密度  $\rho$  と交通量  $q$  との関係<sup>2)</sup>

$$u(\rho) = u_{\max} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{jam}}} \right) \quad (1.12)$$

で与えられる場合を考える。このとき、 $q$  は  $\rho$  の 2 次式

$$q(\rho) = u_{\max} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{jam}}} \right) \rho \quad (1.13)$$

になり、最大の交通量  $q_c$  を与える  $u_c$ 、 $\rho_c$  はそれぞれ

$$\rho_c = \frac{\rho_{\text{jam}}}{2}, \quad u_c = \frac{u_{\max}}{2}, \quad q_c = \frac{\rho_{\text{jam}} u_{\max}}{4} \quad (1.14)$$

になる。つまり、交通量の最大は渋滞密度の車が最大速度で走行しているときの容量の 1/4 倍である。

さて、ここで人為的な効果をモデルに含める。いままでは、特にドライバーの心理効果を入れていなかった。多くの場合、前方の車両が多くなり混んできるとスピードを落とす。逆に、空いてくるとスピードを上げる傾向にある。そこで、前方の混み具合を微分係数  $\partial\rho/\partial x$  で与え、 $q$  を

$$q = q_0(\rho) - \nu \frac{\partial\rho}{\partial x} \quad (1.15)$$

とおく。ここで、 $q_0(\rho)$  は式 (1.13) で与えた

$$q_0(\rho) = u_{\max} \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_{\text{jam}}} \right) \rho \quad (1.16)$$

である。式 (1.15) の  $\nu$  は正の定数で、この値が大きいかほど前方の混み具合に敏感に反応してスピードを上げ下げすることを意味する。前方が混んで  $\partial\rho/\partial x > 0$  ならば  $q < q_0$  に、また、前方が空いて  $\partial\rho/\partial x < 0$  になると  $q > q_0$  になる。式 (1.8) の車両保存則と式 (1.15) から、密度  $\rho$  に関する非線形方程式

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + u_{\max} \left( 1 - \frac{2\rho}{\rho_{\text{jam}}} \right) \frac{\partial\rho}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2\rho}{\partial x^2} \quad (1.17)$$

を得る。

速度  $u_{\max}$  で動く座標で車の流れを観測するとして

$$\xi = x - u_{\max} t, \quad y = -\frac{2u_{\max}}{\rho_{\text{jam}}} \rho \quad (1.18)$$

# 索引

<b>【あ】</b>	
アイコナール	233
アイコナール近似	236
アイコナール方程式	237
<b>【い】</b>	
位相比較法	69
井戸形ポテンシャル	252
移流項	29
<b>【う】</b>	
渦なし場	34
運動量の流束密度	161
運動量密度	161
<b>【え】</b>	
エックハルト音響流	196, 202
演算子分離法	113
<b>【お】</b>	
オイラーの運動方程式	30
重み関数	136
重み付き残差法	136
音 圧	28
音響インテンシティ	166, 204
音響エネルギー密度	156
音響放射圧	10, 157
音響放射力関数	169
音響放射力	156, 157
音響マッハ数	33
音響流	10, 195

<b>【か】</b>	
カオス	241
——の海	243
カオス軌道	245
カオス系	252
拡散の式	9
重ね合せの原理	1, 34
可積分系	248
仮想音源	48
ガラーキン法	135
<b>【き】</b>	
擬 音	47
幾何音響理論	232
擬可積分系	254
擬似スペクトル法	134
軌 道	242
基本テンソル	263
吸収係数	52
強力集束超音波	98
近距離場音波浮揚	187
近軸近似	59
<b>【く】</b>	
駆動力	204
クリストッフエルの記号	264
<b>【け】</b>	
計 量	263
決定論的な力学系	241
減衰時間	260

<b>【こ】</b>	
交通流	4
コール-ホップ変換	9, 55
混合則	74
コントラストハーモニックイ メージング	95
<b>【さ】</b>	
最小作用の原理	264
最大リアプノフ指数	245
差分法	103
作 用	264
作用積分	264
散逸性流体	49
残響時間	260
<b>【し】</b>	
自己集束	221
自己復調	89
自然境界条件	143
質量の保存則	28
弱形式	136
周期軌道	251
集束利得	133
自由度	242
シュリヒイティング音響流	197, 211
準周期軌道	251
衝撃波	9, 39
衝撃波形成距離	42
初期値敏感性	251
ショックパラメータ	39
自律系	248

人工粘性	141			非線形パラメータ	32
<b>【す】</b>		<b>【て】</b>		比熱比	11
数値散逸	149	ティッシュハーモニックイメー		ビリヤード系	250
スキューズ効果	189	ジング	95	ビリヤード問題	250
スタジアム形ビリヤード	252	<b>【と】</b>		<b>【ふ】</b>	
スタンダードハミルトニアン	239	動粘性係数	51	フェルマーの原理	264
ストークスドリフト	201	特性曲線法	148	フックの法則	2
ストークス流	217	閉じ込めポテンシャル	253	物質微分	30
ずり粘性	49	<b>【な】</b>		プローブ波	75
<b>【せ】</b>		内挿関数	137	分散式	234
線形近似	234	ナビエ-ストークスの式	49	<b>【へ】</b>	
線形性	1	<b>【に】</b>		ヘノン-ハイレスマodel	242
<b>【そ】</b>		ニューマーク $\beta$ 法	141	ヘルムホルツ方程式	52, 135
双曲形ビリヤード	260	<b>【ね】</b>		変形ビーム方程式	123
相空間	242	熱線流速計	201	変分原理	264
相 図	242	熱伝導の式	9	<b>【ほ】</b>	
測地線	263	熱力学的法	68	ポアンカレ断面	243
速度ポテンシャル	34	粘性境界層	168, 175, 212	等エントロピー位相法	69
ソニックブーム	60	<b>【は】</b>		放射応力	161
<b>【た】</b>		バーガース方程式	7, 55	放物近似	59
体積粘性	49, 196	波形ひずみ	10	放物形ビリヤード	260
対流項	29	波動方程式	34	飽 和	4, 44
多角形ビリヤード	254	ハミルトン-ヤコビ方程式		補関関数	148
タルティーニ音	13		241	保存則	5
弾性表面波	219	ハミルトンの原理	264	ポンプ波	75
断熱方程式	31	ハミルトンの正準方程式	238	<b>【ま】</b>	
<b>【ち】</b>		パラボラ方程式	246	マイクロストリーミング	219
遅延時間	38	パラメトリック	79	<b>【ゆ】</b>	
逐次近似	44	パラメトリックアレイ	16, 78	有限振幅音波	12, 34
蓄積効果	41	パラメトリック音源	78	有限振幅法	71
超音波ピンセット	187	パラメトリック受波アレイ	92	<b>【よ】</b>	
超音波マニピュレーション	187	パラメトリックソナー	78	弱い衝撃波理論	17, 42
超音波モータ	189	<b>【ひ】</b>		<b>【ら】</b>	
初期値感性	251	非自律系	249	ラグランジアン	
		非線形吸収	44		46, 159, 203
		非線形係数	37	ラグランジュ微分	30
		非線形性	1, 242		

ランジュバン放射圧	158	粒子速度	27	レイリー放射圧	158
<b>【リ】</b>		流 体	27	レギュラーな軌道	245
リアプノフ指数	244	流体粒子	27	連続体仮説	4
リーマン空間	263	<b>【れ】</b>		連続の式	28
リーマン計量	263	レイノルズ応力	162, 201	連続力学系	241
リーマン多様体	263	レイリー音響流	197, 215	<b>【ろ】</b>	
力学系	231	レイリー角	219	ロジスティック曲線	3
離散化方程式	138	レイリー長	84		
離散力学系	241	レイリー板	178		

<b>【C】</b>		<b>【G】</b>		<b>【S】</b>	
CIP 法	146	Gol'dberg 数	55	SAW ストリージング	220
<b>【F】</b>		<b>【H】</b>		<b>【W】</b>	
Fay の解	56	HIFU	98, 221	Westervelt 方程式	54
Fubini の解	40	<b>【N】</b>			
<b>【K】</b>		N 波	60	<b>【数字】</b>	
KAM 曲線	243	NPE	131	1 次波	41
KZK 方程式	17, 58	<b>【P】</b>		1 次ビャークネスカ	174
		PIV	201	2 次波	41
				2 次ビャークネスカ	174



— 編著者・著者略歴 —

鎌倉 友男 (かまくら ともお)

1976年に名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了(工学博士)。名古屋大学助手、講師、電気通信大学助教授を経て、1997年より電気通信大学教授。現在に至る。

音響エレクトロニクス、波動情報処理の研究に従事。

著書に「電気・電子工学のための応用数学」、「非線形音響学の基礎」(以上、愛智出版)、「電気回路」、「音響エレクトロニクス」(以上、培風館)などがある。

土屋 隆生 (つちや たかお)

1989年に同志社大学大学院工学研究科博士後期課程修了(工学博士)。富山大学助手、岡山大学助教授、秋田県立大学助教授を経て、2004年より同志社大学教授。現在に至る。

数値音響工学の研究に従事。

著者に「FEM プログラム選 1, 2, 3」、「等価回路網法入門」(以上、森北出版)などがある。

小塚 晃透 (こづか てるゆき)

1986年に愛知工業大学電気工学科卒業。通商産業省工業技術院名古屋工業技術試験所を経て、2001年より(独)産業技術総合研究所主任研究員。現在に至る。

博士(工学)(名古屋大学)。

超音波の力学応用、計測、数値シミュレーション、などの研究に従事。

河辺 哲次 (かわべ てつじ)

1977年に九州大学大学院理学研究科博士課程修了(理学博士)。文部省高エネルギー物理学研究所助手、九州芸術工科大学助教授、教授を経て、2003年より九州大学大学院教授。現在に至る。

素粒子論、場の理論におけるカオス現象、および非線形振動・波動現象の研究に従事。

著書に「スタンダード力学」、「ベーシック電磁気学」、「工科系のための解析力学」(以上、裳華房)、翻訳書に「マクスウェル方程式-電磁気学がわかる4つの法則」、「物理のためのベクトルとテンソル」(以上、岩波書店)がある。

斎藤 繁実 (さいとう しげみ)

1976年に東北大学大学院工学研究科博士課程修了(工学博士)。東北大学助手、東海大学講師、助教授、教授を経て2013年に定年退職。

水中音響の研究に従事。

著書に「超音波便覧」(丸善、分担執筆)、「音響バブルとソノケミストリー」(コロナ社、分担執筆)、「微分積分学教程」(森北出版、共訳)などがある。

野村 英之 (のむら ひでゆき)

2001年に電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程修了[博士(工学)]。金沢大学助手、助教、電気通信大学助教授を経て、2012年より電気通信大学准教授。現在に至る。

音響エレクトロニクスの研究に従事。

近藤 淳 (こんどう じゅん)

1995年に静岡大学大学院電子科学研究科修了[博士(工学)]。静岡大学助手、助教授を経て、2010年より静岡大学教授。現在に至る。

表面波動エレクトロニクス工学の研究に従事。

著書に「弾性波デバイス技術」(オーム社、分担)、「Sensors Update Vol. 6」(WILEY-VCH, Chap. 4)、「食と感性」(光琳、分担)などがある。

# 非線形音響

— 基礎と応用 —

Nonlinear Acoustics

— Fundamentals and Applications —

© 一般社団法人 日本音響学会 2014

2014年3月31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  
東京都千代田区外神田2-18-20  
ナカウラ第5ビル2階

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

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 978-4-339-01119-7 (新井) (製本: 牧製本印刷)

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上の例外を除き禁じられております。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おりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします