

## 緒 言

本書は新制大学において主として電気通信工学を専攻する学生のための音響工学の教科書として編集したものである。現代の音響工学の主なる内容は電気音響理論および電気音響機器，室内音響，音響聴取および超音波工学などにあるのだが，これらの諸問題を十分に修得するためには，まず理論音響学として歴史的に展開された振動、波動および物理現象としての音波の性質を知っておかなければならない。このような必要性から音響工学の第一編として理論音響学(音響物理)を紹介した。

第一編で述べる理論音響学は大部分が既に古典に属するものであるが，現代の波動力学や量子力学が発祥した基礎として歴史的に重要なものであって，工学に志ざす者が常識として熟知していなければならぬ知識である。ここでは振動現象および波動現象の基本的な性質を理解することを第一の目標とし，ついでに近代物理学で慣用している技法“現象をいかに数式化し，それを解いた結果からいかに現象を解説するか”という方法を体得することを目標としている。このような技法は新しい問題を解決しようとする技術者にとって最も必要なものであるが，従来の電気工学の技術教育には欠けていた部分であろう。

第一章では振動現象の理論的取扱方法を述べると同時に，その基本的な性質を紹介している。これは後の波動現象を理解するための基礎的知見であると共に，発音体の振動理論や電気回路の交流現象理論などを理解するための基礎としても重要なものであり，かつ歴史的にも意義の深いものである。この章ではまた振動方程式の取扱方法およびその性質について十分な理解を与えることに重点を置いている。

第二章では，発音体の振動という標題の下に，絃の振動，膜の振動，弾性体棒の振動，環の振動，板の振動等について，その理論的な取扱方法を解説すると共に，その性質についても述べている。しかしこの部分では波動現象が初めて現われるので，波動について十分な理解を与えるような様々の説明が加えられている。殊に波動方程式の有するいろいろな性質を熟知することは，音波や電磁波および波動力学などを扱う技術者にとって重要なことであるから，波動現象および波動方程式の基本的性質を解説するためにかなりの紙数を費している。

絃の振動は一次元の波動を理解するためのよい実例であり，膜の振動は二次元の波動現象の例である。弾性体の中を伝わる弾性波動についての知識を得るために，棒の振動の節ではまず弾性理論を簡単に説明し，次いで弾性波について述べ，最後に棒の屈曲振動，環の振動，板の振動等についてその基本的性質を述べている。

第三章では音波の理論的取扱法およびその性質について述べてある。この部分は理論音響学の本領というべき部分であって，まず空気中を伝わる弾性縦波として音波が認識されることを述べ，次いで

## 音響工学原論(上巻)

単純な平面音波についての基本的な性質を明らかにした後、流体理論にしたがって流体の運動方程式から音波の一般式を導き、球面波音場に関する基本的性質を明らかにしている。この部分は波動の伝播現象を理解しようとする者は熟読して完全に理解しておくことが必要である。

第四章では、種々の境界条件を有する音場の基本的性質を述べると共に、それらの問題の取扱方法について述べている。この章に示したものは、いずれも実際問題として日常しばしば起る重要な現象であって、これらの現象およびその取扱方法を理解しておくことは音響技術者として必要なことである。しかし音響波動現象は複雑な様相を呈する場合が少なくないので、現今の理論的技法を用いても未だ解決できない問題も数多くあることを覚えておかなければならない。また第四章で述べる種々の技法は一般に波動現象を学究する者にも参考となるものが多いであろう。

本書は音響学を学ぼうとする入門者の手引ともなるようにと、最初はかなり平易な所から述べているが、微分、積分、微分幾何学および微分方程式の基本的事項には習熟していることを前提としている。また各節の末部にはかなり難解な問題や専門的の知識をも紹介してある。よって初学者は本書を通読せずに、最初は各節の基礎的な事項だけを修得しながら巻末まで学び、一応の知識を得てから改めて詳細な問題を学ぶようにしてほしい。

理論音響学を統一ある体系として著わした書物は、わが国では未だ見受けられないようである。本書は振動および音響波動現象を一貫した理論体系の下に解析し、その結果を使用に便利な形で示してある。ただし、規準となる単位系は後述する電気音響学との関連を考えて MKS 単位系を採用しているから、従来の cgs 単位系との換算の利便に供するために換算表を付した。なお誤植や誤謬等はできる限り訂正したが、完全に除去できたとは思われないし、また筆者浅学のため不備や誤記があることも否めない。これらの点については御気付の方々から御注意あるいは御叱正を戴ければ誠に有難い次第であります。

本書の編集にあたり LORD RAYLEIGH, Sir Horace LAMB, PHILIP M.MORSE, Irving B. CRANDALL, John C.SLATER, Julius A.STRATTON 諸氏の著書を参照する所が多かったのでここにその名を掲げて謝意を表すると共に、また本書に示してある図表等の計算には早稲田大学工学部電気通信学科の学生諸君が努力を注いだ賜であることも併せ記して感謝のしるしとする。なお本書が出版の運びとなったことは、恩師故黒川兼三郎博士を始めとして早大電気通信学科教室の各位の多大の御後援による所であり、またコロナ社の甚大な御好意と御努力とによるものである。ここに併せて謝意を表明する。

昭和 30 年 4 月 1 日

著 者

---

Lord RAYLEIGH: "Theory of Sound " , .  
Sir H.LAMB : "Dynamical Theory of Sound" 1931.  
P.M.MORSE: "Vibration and sound " 1936.  
I.B.CRANDALL: "Theory of Vibrating System and Sound" 1926.  
J.C.SLATER : "Introduction to the Theoretical Physics "1933.  
J.A.STRATTON: "Electromagnetic Theory "1941.

## 第 6 版 の 序 文

本書第 6 版の出版にあたり，初版出版以来 12 年間の音響工学の進歩に順応するためと，実用的な面から見て表現が不適當と思われる箇所が生じたために，二，三の箇所を改訂し，かつ誤植誤記についても出来るかぎり訂正した．然し，完璧を期することは困難なことであるから，さらに御気付の方々からの御注意を頂ければ有難い次第であります．

昭和 42 年 4 月

著 者

## 第 10 版の序文

第 10 版を発行するにあたり、1960 年国際度量衡総会<sup>(1)</sup>で採用の決議がなされ、1973 年の ISO 出版物<sup>(2)</sup>によってその細部にわたって国際的同意の得られた国際単位系<sup>(3)</sup>を全面的に採用した。

この単位系は MKS 合理化単位系を基調とし、長さ(metre)、質量(kilogram)、時間(second)、電流(ampere)、熱力学温度(kelvin)、物質質量(mole)および輝度(candela)を基本単位とし、平面角(radian)と立体角(steradian)を補助単位として、物理的および化学的のすべての量をこれらの基本単位と補助単位との組合せによる誘導単位によって組織的に表現しようとする単位系であり、メートル法加盟国はこの単位系を採用する義務がある。

合理化単位系の採用によって、電気磁気においては単位量の電荷(1 C)から単位量の誘電束<sup>(4)</sup>(1 C)が出ることで、光においては単位光度の光源 1(cd)から単位量の光束<sup>(5)</sup> 1(lm)が発せられることになる。したがって単位の強さのエネルギー源(1 W)から放射されるエネルギー束<sup>(6)</sup>も 1(W)と言うことになり、従来エネルギー束を音の強さ、すなわちエネルギー流密度(W/m<sup>2</sup>)の意味に用いていたのとは異なる定義となり、エネルギー束が音源の音響出力を意味することになるので注意を要する。

また音響インピーダンス(Pa·s/m<sup>3</sup>)と比音響インピーダンス(Pa·s/m)とがはっきり区別されるようになって紛らわしさがなくなったが、従来比音響インピーダンスと呼ばれていた  $Z/p_0c$  (数値)との混同を避けるために、これを比音響インピーダンス比<sup>(7)</sup>と呼ぶことにする。

単位系の整理をしてみて、4·6·3 の熱伝導による音波の減衰定数の次元が違っていることおよび 4·6·6 の多層制動振動板の理論的誘導法の誤謬を見出し、これを訂正した。その他誤記や誤植はできる限り訂正したが、未だに完璧を期することは困難であるので、御気付の方々からの御注意を頂ければ幸と存じます。

昭和 49 年 6 月

著 者

---

(1) Conference Generale des Poids et Mesures.

(2) International Standard ISO 1000-1973 "SI units and recommendations for the use of their multiples and of certain other units".

(3) Systeme International d'Unites, SI units.

(4) electric flux, 非合理化系では単位電荷から 4 本の flux が出るものとしている。

(5) luminous flux.

(6) energy flux.

(7) specific impedance ratio, Leo L. BERANEK: "Acoustic Measurement" John Wiley & Sons 1949.

## 記号表

<p>A 電流単位 ampere の単位記号 .</p> <p>A 点の位置, 任意定数 (積分定数). 点音源の強さ: p.198.</p> <p>a 振子の長さ, 円の半径, 矩形辺の長さ . 慣性係数: p.31,37. 弾性体内の縦波の伝播速度: p.131.</p> <p>da 微小面積: p.177.</p> <p>B レベルの単位 bell の単位記号 .</p> <p>B 点の位置, 任意定数 (積分定数). 二重音源の強さ: p.201.</p> <p>b 矩形辺の長さ, 距離等 . 消費係数:p.34. 横波の伝播速度: p.131.</p> <p>C 任意定数, 任意振幅 .</p> <p>c 波動の伝播速度, 安定係数: p.32. <math>C_p</math> 恒圧比熱, <math>C_v</math> 恒温比熱 :p.156.</p> <p>D 任意定数 .</p> <p>d 微分記号 .</p> <p>dB レベル単位デシベル .</p> <p>E 全エネルギー : p.35, (<math>\bar{E}</math>はその時間平均値), YOUNG の弾性率: p.125.</p> <p>e 自然対数の底: <math>e = 2.71828182846</math>. 楕円の離心率: p.259.</p> <p>F 力の大きさ, 任意函数 <math>F(x)</math>.</p> <p>F 第一種楕円積分:p.259.</p> <p>f 任意の函数, 強制項 .</p> <p>G 音源分布函数: p.209. 孔隙の導伝率: p.285.</p> <p>g 質量の単位 gram の単位記号 .</p> <p>g 重力恒数 . 音源分布函数:p.209.</p> <p>H HANKEL の函数 <math>H_n^{(1)}(z)</math> :p.231.</p> <p>h 球面 HANKEL 函数 <math>h_n^{(1)}(z)</math> : p.241.</p> <p>I ナシ</p> <p>i 虚数単位 <math>\sqrt{-1}</math> . 単位ベクトル <math>i_x, i_y, i_z</math> .</p> <p>J BESSEL 函数 <math>J_n(x)</math> .</p> <p>J 開口部の速度ポテンシャル:p.279.</p> <p>j 球面ベッセル函数 <math>j_n(z)</math> :p.236.</p> <p>K 温度の単位 kelvin の単位記号 .</p>	<p>K スティフネス, 応力の大きさ .</p> <p>K 応力のベクトル表示:p.121.</p> <p>kg 質量の単位 kilogram の単位記号 .</p> <p>k 制動係数:p.12.</p> <p>k 波長定数(位相定数). 固有値:p.63,65.</p> <p><b>k</b> 位相定数のベクトル表示: p.242.</p> <p>L 長さ . LAGRANGE 函数:p.45. <math>\frac{1}{e}</math> に減衰する距離:p.291.</p> <p>l 長さ . <math>x</math> 軸となす方向余弦:p.120.</p> <p>M 質量, 偶力 .</p> <p>m 長さの単位 meter の単位記号 .</p> <p>m 質量 . <math>y</math> 軸となす方向余弦 :p.120. 固有値:p.136.</p> <p>N NEUMANN の函数 <math>N_n(z)</math> . 力の単位 Newton の略 .</p> <p>n <math>z</math> 軸となす方向余弦:p.120.</p> <p>n 球面 NEUMANN 函数 <math>n_n(z)</math>:p.236</p> <p><b>n</b> 面の法線 : p.120.</p> <p>O 点の位置, 原点 .</p> <p>P LEGENDRE の函数 <math>P_n(x)</math> : p.235. <math>P_n^m(x)</math> : p.238.</p> <p>P 点の位置, 張力 .</p> <p>p 角周波数, 分離定数, 圧力 .</p> <p>Q LEGENDRE の函数 <math>Q_n^m(x)</math> :p.238.</p> <p>Q 一般化された外力:p.33. 体積 : p.225,272.</p> <p>q 一般座標: p.31. 剪断応力:p.124. flux <math>q</math> :p.258.</p> <p><math>q'</math> 空気の熱伝導率:p.293.</p> <p>R マサツ抵抗:p.11,300. 曲率半径:p.45,134,145. 気体定数:p.155. 反射係数:p.168, p.216. 音響抵抗:p.203. 径函数 : <math>R(r)</math> ,p.107,229,236.</p> <p><b>r</b> 極座標 : p.104,185,233.</p> <p><math>\bar{r}</math> 断面の回転半径, p.133.</p> <p>r 変位のベクトル表示:p.130.</p> <p>S 面積 .</p> <p>s 変位:p.36. 凝縮率 :p.158.</p> <p><math>\delta s</math> 微小の長さ .</p>
---	--

s	時間の単位 second の単位記号 .	$\beta$	減衰定数 .
T	周期, 運動のエネルギー, 剪断応力 . 透過係数:p.168,216.	$\Gamma$	規準化因数:p.113.
t	時間座標 .	r	分離定数, 固有値 . 恒圧比熱と恒温比熱の比:p.156. EULER の定数 $r = 1.781072$ .
U	振動速度:p.220. 風速:p.309. 移動速度:p.313.	$r_n$	p.252
u	速度の x 成分:p.175. 径変位:p.144.	$\Delta$	行列式:p.46. 膨張率:p.157.
$u_m$	BESSEL 函数の根:p.109.	$\dot{\Delta}$	体積ヒズミ速度 $\dot{\Delta} = \frac{d\Delta}{dt}$ :p.289.
V	ポテンシャルエネルギー -, ポテンシャル函数, 体積, 速度の大きさ .	$\delta$	微小量 .
$\mathbf{V}$	速度のベクトル表示 .	$\delta_0$	壁面の粘性の影響の現われる層の厚さ:p.296.
v	速度の y 成分 :p.175. 角変位:p.144.	$\delta_n$	p.254
$v_{ns}$	球面 BESSEL 函数の根:p.268.	$\varepsilon$	ヒズミ:p.117.
W	エネルギー流の単位 watt の単位記号 .	$\zeta$	変位:p.97.
W	エネルギー流, 音響出力 . $\bar{W}$ はその時間平均値 .	$\eta$	変位 . 剪断ヒズミ:p.118.
w	速度の z 成分:p.175. 気体の仕事量 . 音波のエネルギー流密度(energy flux), $\bar{w}$ はその時間平均値 .	$\dot{\eta}$	剪断ヒズミ速度:p.289 .
X	x の函数 $X(x)$ . 応力の X 成分, $X_x, X_y,$ $X_z$ . 外力の大きさ:p.222. 音響リアクタ ンス:p.203.	$\Theta$	函数 $\Theta(\theta)$ :p.233.
x	変位, 座標 .	$\theta$	角度, 球座標の角度座標, 温度 .
$\dot{x}$	$\frac{dx}{dt}$	$\theta_0$	全反射臨界角:p.171.
Y	外力の分布函数 $Y(x, t)$ :p.78. 応力の y 成分:p.120.	$\kappa$	体積弾性率:p.124.160.
Y	球面調和函数 $Y(\theta, \varphi)$ :p.241.	$\Lambda$	円形膜の規準化因数に関係した定数 $\Lambda_{nm}$ : p.110.
y	変位, 座標 .	$\lambda$	任意定数, 波長 . LAME の定数:p.123.
$\dot{y}$	$\frac{dy}{dt}$	$\lambda'$	粘性係数: p.289.
$y'$	$\frac{dy}{dx}$	$\mu$	モーメントム:p.81. LAME の定数:p.123. コワサ, 剛性率 (rigidity):p.124. 空洞内のマサツ損失係数:p.204.
Z	外力の分布函数:p.111. 応力の z 成分:p.120.	$\mu'$	粘性係数:p.274,p.289.
$Z^A$	比音響インピーダンス:p.203, 302.	v	振動数:p.4.
$Z^M$	機械インピーダンス:p.302.	$\Xi$	振幅:p.265
z	変位, 座標 .	$\xi$	変位または変位の x 成分 .
z	球面 BESSEL 函数の一般的表示 $z_n(x)$ :p.237.	$\dot{\xi}$	振動速度 .
$\alpha$	位相角, 位相定数 . 加速度 (その座標成分は $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ ):p.176.	$\Pi$	積の記号 .
		$\pi$	円周率 3.14159265.
		$\rho$	線密度, 面積密度, 体積密度, 円筒座標の径座 標 .
		$\rho_0$	媒質の密度 .
		$\Sigma$	加算記号 .
		$\sigma$	POISSON 比:p.125, 音波の抵抗係数:p.206,293.

記 号 表

$\tau$	減衰率 : p.12, 35, 274, 277, 292.	$\ln$	自然対数 , $\ln x = \log_e x$ , $\ln x = \log_e 10 \cdot \log_{10} x = 2.30259 \log_{10} x$
T	ナシ	$\sin$	円函数 正弦 .
$\nu$	ナシ	$\cos$	" 余弦 .
$\Phi$	任意の定数または函数 .	$\tan$	" 正切 .
$\phi$	任意の位相角 , 初期分布函数 $\phi(x)$ . 速度ポテンシャル .	$\cot$	" 余切 .
$\varphi$	任意の位相角 , 極座標の方位角座標 .	$\sinh$	双曲線函数 正弦 .
$\chi$	初期分布函数 : p .187.	$\cosh$	" 余弦 .
$\Psi$	任意函数 .	$\tanh$	" 正切 .
$\psi$	初期分布函数 $\psi(x)$ . 波動函数 $\psi_n(x)$ .	$\coth$	" 余切 .
$\Omega$	抵抗単位 Ohm の略 .	$\Im m$	複素数の虚数部 .
$\Omega$	立体角 .	$\Re e$	" 実数部 .
$\omega$	振動角速度 , 固有値 .		
$\nabla$	微分演算子 .		
$\nabla^2$	"		

国際単位系<sup>(1)</sup>と cgs 単位系との対照表

名 称	SI units	cgs	cgs	SI units	次 元
平 面 角	1radian(rad)=57.296 degree		1grade=1gon= /200 rad		0
立 体 角	1steradian (sr)				0
長 さ	1m=10 <sup>2</sup> cm		1cm=10 <sup>-2</sup> m		L
質 量	1kg=10 <sup>3</sup> g		1g=10 <sup>-3</sup> kg		M
時 間	1s=1s		1s=1s		T
角 速 度	1 rad/s				T <sup>-1</sup>
速 度	1m/s=10 <sup>2</sup> cm/s		1cm/s=10 <sup>-2</sup> m/s		L T <sup>-1</sup>
加 速 度	1m/s <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> cm/s <sup>2</sup>		1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>		L T <sup>-2</sup>
周 波 数	1hertz(Hz)= 1cycle/second		1c/s=1Hz		T <sup>-1</sup>
体 積 密 度	1kg/m <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> g/cm <sup>3</sup>		1g/cm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>		M L <sup>-3</sup>
面 積 密 度	1kg/m <sup>2</sup> =10 <sup>-1</sup> g/cm <sup>2</sup>		1g/cm <sup>2</sup> =10 kg/m <sup>2</sup>		M L <sup>-2</sup>
線 密 度	1kg/m=10 g/cm		1g/cm=10 <sup>-1</sup> kg/m		M L <sup>-1</sup>
力	1newton(N)=10 <sup>5</sup> dyne		1dyne=10 <sup>-5</sup> N		M L T <sup>-2</sup>
表 面 張 力	1N/m=10 <sup>3</sup> dyne/cm		1dyne/cm=10 <sup>-3</sup> N/m		M T <sup>-2</sup>
圧 力	1pascal (Pa)=1N/m <sup>2</sup> =10dyne/cm <sup>2</sup>		1Barye=1dyne/cm <sup>2</sup> =10 <sup>-1</sup> Pa		M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
応 力	1Pa または 1 N/m <sup>2</sup>				M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
運 動 量	1kg・m/s=10 <sup>5</sup> g・cm/s		1g・cm/s=10 <sup>-5</sup> kg・m/s		M L T <sup>-1</sup>
角 運 動 量	1kg・m <sup>2</sup> /s=10 <sup>7</sup> g・cm <sup>2</sup> /s		1g・cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-7</sup> kg・m <sup>2</sup> /s		M L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>
慣 性 能 率	1kg・m <sup>2</sup> =10 <sup>7</sup> g・cm <sup>2</sup>		1g・cm <sup>2</sup> =10 <sup>-7</sup> kg・m <sup>2</sup>		M L <sup>2</sup>
粘 性 係 数 <sup>(2)</sup>	1Pa・s=10 dyne・s/cm <sup>2</sup>		1dyne・s/cm <sup>2</sup> =10 <sup>-1</sup> Pa・s		M L <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup>
動 粘 度 <sup>(3)</sup>	1m <sup>2</sup> /s =10 <sup>4</sup> cm <sup>2</sup> /s		1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s		L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup>
エ ネ ル ギ ー	1 joule (J)=10 <sup>7</sup> erg		1erg=10 <sup>-7</sup> J		M L <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>
エ ネ ル ギ ー 流 <sup>(4)</sup>	1 watt(W)=10 <sup>7</sup> erg/s		1erg/ s =10 <sup>-7</sup> W		M L <sup>2</sup> T <sup>-3</sup>
エネルギー流密度	1W/m <sup>2</sup> =10 <sup>3</sup> (erg/s)/cm <sup>2</sup>		1(erg/s)/cm <sup>2</sup> =10 <sup>-3</sup> W/m <sup>2</sup>		M T <sup>-3</sup>
機械インピーダンス	1N・s/m=10 <sup>3</sup> g/s		1g/s=10 <sup>-3</sup> N・s/m		M T <sup>-1</sup>
比音響インピーダンス <sup>(5)</sup>	1Pa・s/m=10 <sup>-1</sup> cgs Rayls		1cgs Rayls=10Pa・s/m		M L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup>
音響インピーダンス <sup>(6)</sup>	1Pa・s/m <sup>3</sup> =10 <sup>-5</sup> acousticΩ		1acoustic Ω =10 <sup>5</sup> Pa・s/m <sup>3</sup>		M L <sup>-4</sup> T <sup>-1</sup>

空気の音響特性インピーダンス<sup>(7)</sup> (0 , 101.4kPa):  $\rho_0 c = 428 \text{ Pa} \cdot \text{s/m} = 42.8 \text{ cgs Rayls}$ ,

圧力の実用単位: 1bar=10<sup>5</sup>Pa=10<sup>6</sup>dyne/cm<sup>2</sup> ,

重力恒数:  $g = 9.7805 + 0.0517 \sin^2 \phi - 3.1 \times 10^{-6} h$  (m/s<sup>2</sup>),

$\phi$ は緯度,  $h$ は海拔標高(m).

平面角: 1 degree= /180 rad=10/9 gon .

(1) Systeme International d'Unites. ISO 1000-1973 .

< 単位名の後の括弧内にあるのは単位記号 >

(2) dynamic viscosity

(3) kinematic viscosity

(4) power.energy flux

(5) specific acoustic impedance

(6) acoustic impedance

(7) acoustic characteristic impedance

国際単位系で表わした電気磁気，熱および光の単位

名称	S I units	cgs 電磁単位	次 元
電流	1ampere (A)		I
電流密度	1A/m <sup>2</sup>		I L <sup>-2</sup>
電荷	1coulomb (C)=1A・s		IT
電位	1volt (V)=1J/C		I <sup>-1</sup> ML <sup>2</sup> T <sup>-3</sup>
電界強度	1V/m		I <sup>-1</sup> MLT <sup>-3</sup>
抵抗	1ohm (Ω)=1V/A		I <sup>-2</sup> ML <sup>2</sup> T <sup>-3</sup>
容量	1farad (F)=1C/V		I <sup>-2</sup> M <sup>-1</sup> L <sup>-2</sup> T <sup>2</sup>
インダクタンス	1henry (H)=1Wb/A		I <sup>-2</sup> ML <sup>-2</sup> T <sup>-2</sup>
導電率	1siemens/meter(S/m)	=1Ω <sup>-1</sup> ・m <sup>-1</sup>	I <sup>2</sup> M <sup>-1</sup> L <sup>-3</sup> T <sup>3</sup>
磁位差	1A	=4 × 10 <sup>-1</sup> gilbert	I
磁界強度	1A/m	=4 × 10 <sup>-3</sup> oersted	I L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup>
磁束	1weber(Wb)	=10 <sup>3</sup> maxwell	I <sup>-1</sup> ML <sup>2</sup> T <sup>-2</sup>
磁束密度	1tesla(T) = 1Wb/m <sup>2</sup>	=10 <sup>4</sup> gauss	I <sup>-1</sup> MT <sup>-2</sup>
誘電率 <sup>(8)</sup>	ε = κ <sub>e</sub> ε <sub>0</sub> F/m		I <sup>-2</sup> M <sup>-1</sup> L <sup>-3</sup>
真空の誘電率	ε <sub>0</sub> = 8.854×10 <sup>-12</sup> F/m		I <sup>-2</sup> M <sup>-1</sup> L <sup>-3</sup>
物質の比誘電率	κ <sub>e</sub>		数 値
透磁率	μ = κ <sub>m</sub> μ <sub>0</sub> H/m		I <sup>-2</sup> MLT <sup>-2</sup>
真空の透磁率	μ <sub>0</sub> = 4π×10 <sup>-7</sup> H/m		I <sup>-2</sup> MLT <sup>-2</sup>
物質の比透磁率	κ <sub>m</sub>		数 値
熱力学温度	K (kelvin)		
CELSIUS 温度	(degree celsius), 0 =273.15 K		
温度間隔	1 K		
線膨張係数	K <sup>-1</sup>		
熱量	J		
熱流	W		
熱伝導率 <sup>(9)</sup>	W/(m・K)		
熱伝導係数 <sup>(10)</sup>	W/(m <sup>2</sup> ・K)		
熱容量	J / K		
比熱	J/(Kg・K)		
エントロピー	J / K		
比エントロピー <sup>(11)</sup>	J/(kg・K)		
比エネルギー <sup>(12)</sup>	J/kg		
潜熱 <sup>(13)</sup>	J/kg		
光度 <sup>(14)</sup>	candela (cd)		
輝度 <sup>(15)</sup>	cd/m <sup>2</sup>		
光束 <sup>(16)</sup>	1lumen (lm) = 1 cd・sr		
光量	lm・s		
光束発散度 <sup>(17)</sup>	lm/m <sup>2</sup>		
照度 <sup>(18)</sup>	1lux(lx)=1lm/m <sup>2</sup>		
露光量	lx・s		
放射強度 <sup>(19)</sup>	W/sr		
発光効率	lm/ W		

(8)permittivity

(9)thermal conductivity

(10)coefficient of heat transfer

(11)specific entropy

(12)specific energy

(13)specific latent heat

(14)luminous intensity

(15)luminance

(16)luminous flux

(17)luminous existence

(18)illuminance

(19)radiant intensity

単位の前に付記して倍率を表わす記号

接 頭 語		倍 率
名 称	記 号	
tera	T	$10^{12}$
giga	G	$10^9$
mega	M	$10^6$
kilo	k	$10^3$
hecto	h	$10^2$
deca	da	10
deci	d	$10^{-1}$
centi	c	$10^{-2}$
milli	m	$10^{-3}$
micro	$\mu$	$10^{-6}$
nano	n	$10^{-9}$
pico	p	$10^{-12}$
femto	f	$10^{-15}$
atto	a	$10^{-18}$

種類の量の規準レベル<sup>(20)</sup>

名 称	規 準 レ ベ ル
音圧レベル	$2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} = 20 \mu \text{ Pa}$
加速度レベル	$10^{-5} \text{ m/s}^2$
速度レベル	$10^{-8} \text{ m/s}$
力のレベル	$10^{-6} \text{ N}$
エネルギー流レベル	$10^{-12} \text{ W}$
エネルギー流密度レベル	$10^{-12} \text{ W/m}^2$
エネルギーレベル	$10^{-12} \text{ J}$
エネルギー密度レベル	$10^{-12} \text{ J/m}^3$

(20) ISO R 1683

# 目 次

## 第一章 振 動 の 理 論

1・1 振子の微小振動，振動方程式	1
1・2 振子の強制振動	6
1・3 減衰振動をする振子	10
1・3・1 減衰振子の自由振動	11
1・3・2 減衰振子の強制振動	14
1・4 自由度の多い振動系の振動	24
1・4・1 1本の絃に2個の質点を吊した振動系の自由振動	24
1・4・2 二重振子	26
1・4・3 3質点を吊した絃	28
1・5 自由度1なる振動系の一般理論	30
1・5・1 自由振動	30
1・5・2 強制振動	33
1・5・3 減衰振動系	34
1・6 自由度の多い系の一般理論	36
1・6・1 多次元系の運動方程式の概要	36
1・6・2 多次元系の自由振動	39
1・6・3 規準振動姿態，固有値およびエネルギー	40
1・6・4 規準姿態の静定性	43
1・6・5 強制振動，可逆定理	46
1・6・6 結合振動系の基本的性質	48
1・6・7 リザジウ図形	50

## 第二章 発 音 体 の 振 動

2・1 絃の振動	53
2・1・1 絃の運動方程式・波動	53
2・1・2 両端固定絃の規準振動態・倍音	60
2・1・3 マサツ損失のある両端固定絃の自由振動	68
2・1・4 絃の強制振動	70
2・1・5 槌で打った絃の自由振動	78
2・1・6 錘りの付いた絃の自由振動	82

2・1・7 吊した鎖の振動	84
2・1・8 密度および張力の変化する絃の振動	85
2・1・9 フーリエの定理	88
2・1・10 持続正弦波形の外力が作用する絃の定常解	95
2・2 膜の振動	96
2・2・1 理想的な膜と膜の張力	96
2・2・2 膜の運動方程式	97
2・2・3 矩形膜の規準振動姿態	99
2・2・4 円形膜の規準振動姿態	103
2・2・5 膜の強制振動	111
2・2・6 二次元空間内の自由進行平面波	113
2・3 棒の振動	116
2・3・1 弾性理論・ヒズミ・応力および弾性定数	117
2・3・2 棒の縦振動	126
2・3・3 弾性体内の平面波・縦波・横波・表面波	130
2・3・4 棒の屈曲振動	132
2・3・5 棒の振動の一般的性質	142
2・3・6 棒の屈曲振動の応用	142
2・3・7 永久張力の影響	143
2・4 環の振動	143
2・5 板の屈曲振動	149

### 第三章 音波

3・1 気体の弾性	154
3・2 平面波	158
3・2・1 波動方程式	158
3・2・2 音の伝播速度	159
3・2・3 エネルギー	161
3・2・4 反 射	166
3・2・5 空気柱の振動	171
3・3 流体理論	175
3・3・1 流体粒子の加速度	175
3・3・2 Flux および Divergence	177

3・3・3 流体の運動方程式	179
3・3・4 速度ポテンシャル	180
3・3・5 循環	181
3・4 音波の一般式	183
3・4・1 平面波	184
3・4・2 対称球面波	184
3・4・3 POISSON-STOKES の定理	191
3・4・4 点音源	192
3・4・5 二重音源	193
3・5 単絃振動音波	193
3・5・1 複素数形の導入	194
3・2・2 単絃振動音波	196
3・5・3 対称球面波	197
3・5・4 二重音源から輻射される音場	200
3・5・5 音響インピーダンス	203
3・6 エネルギー損失のために減衰する音波	206
3・7 音源からの輻射音場を求める KIRCHHOFF の方法	209

## 第四章 音場に関する諸問題

4・1 反射および鏡像	211
4・1・1 平面波の反射および透過	211
4・1・2 対称球面波の完全反射・鏡像の原理	213
4・1・3 二重音源より輻射される音波の完全反射	215
4・1・4 平坦な境界面上の輻射音場	216
4・2 固体の振動によって生ずる音場	219
4・2・1 非圧縮性流体内の固体球の振動	220
4・2・2 球の振動によって生ずる音場	222
4・2・3 媒体に局部的に集中して作用する交番力により輻射される音場	224
4・2・4 任意の形の固体の振動によって生ずる音場	224
4・2・5 気体に伝達される振動の強さ	226
4・2・6 円筒状音源から輻射される音場の一般的解法	228
4・2・7 球状音源から輻射される音場の一般的解法	233
4・3 障害物による音波の散乱	243

4・3・1 剛体障碍物による散乱	243
4・3・2 密度および弾性の異なる障碍物による散乱	247
4・3・3 円筒による散乱音場の一般的解法	251
4・3・4 球による散乱音場の一般的解法	254
4・4 孔隙から輻射される音場	257
4・4・1 小さな孔隙の近傍の音場	257
4・4・2 大きな孔または障碍物による散乱音場	261
4・4・3 RAYLEIGH 板	265
4・5 共鳴器および音響管	267
4・5・1 短形空洞の規準振動姿態	267
4・5・2 球形空洞の規準振動姿態	268
4・5・3 円錐管内の音場	270
4・5・4 円筒形空洞の規準振動姿態	270
4・5・5 共鳴器の固有振動	272
4・5・6 管の開口端の補正	274
4・5・7 共鳴器の外部音源による強制振動	277
4・5・8 共鳴器の内部音源による強制振動	284
4・5・9 2個の孔を有する共鳴器	287
4・5・10 結合共鳴器	288
4・6 音波の減衰および吸収	289
4・6・1 粘性	289
4・6・2 粘性流体内の平面波	291
4・6・3 空気の熱伝導および熱輻射による減衰	293
4・6・4 実測による抵抗係数の決定および応用例	293
4・6・5 細い管または狭い間隙の中の音波の減衰	295
4・6・6 多層制動振動板による音波の吸収	301
4・7 有限振幅音波	304
4・8 風の影響・温度の影響	309
4・8・1 風の影響	309
4・8・2 温度の影響	309
4・8・3 層状に温度勾配のある大気中の音波の通路	310
4・9 音源および受音点の移動・DOPPLER 効果	313
問 題	315
索 引	325

## 下巻主要目次

### (第二編 応用音響学)

#### 第五章 電気音響理論

- |                            |             |
|----------------------------|-------------|
| 5・1 電気振動回路・機械振動系・音響振動系の類似性 | 5・3 音響伝送系   |
| 5・2 音響輻射系の音響輻射インピーダンス      | 5・4 音響回路    |
|                            | 5・5 電気音響変換系 |

#### 第六章 聴覚

- |             |                 |
|-------------|-----------------|
| 6・1 音の基本的性質 | 6・5 結合音         |
| 6・2 耳の構造と機能 | 6・6 空間知覚・定位     |
| 6・3 聴覚の限界   | 6・7 音の協和・不協和・音程 |
| 6・4 陰蔽作用    |                 |

#### 第七章 電気音響機器

- |                  |               |
|------------------|---------------|
| 7・1 振動系の制御方式     | 7・4 受話器・スピーカー |
| 7・2 電気音響機器の性能の基準 | 7・5 録音機器      |
| 7・3 送話器・マイクロホン   | 7・6 立体音響再生    |

#### 第八章 建築音響

- |               |                  |
|---------------|------------------|
| 8・1 遮音・防振     | 8・3 矩形室内の音響波動の解析 |
| 8・2 室内音響の古典理論 | 8・4 波動音響学的室内音響調整 |

#### 第九章 補遺

- |  |                                      |
|--|--------------------------------------|
| 9・1 任意に分布する音源から輻射される音場を求める KIRCHHOFF の方法 | 9・4 空気中の音波の減衰係数                      |
| 9・2 東京都内の騒音レベル                           | 9・5 打絃用ハンマーの打絃位置および接触時間と振動絃の倍音構成との関係 |
| 9・3 自由音場内の純音に対する両耳等感度曲線と騒音レベルの評価法        |                                      |