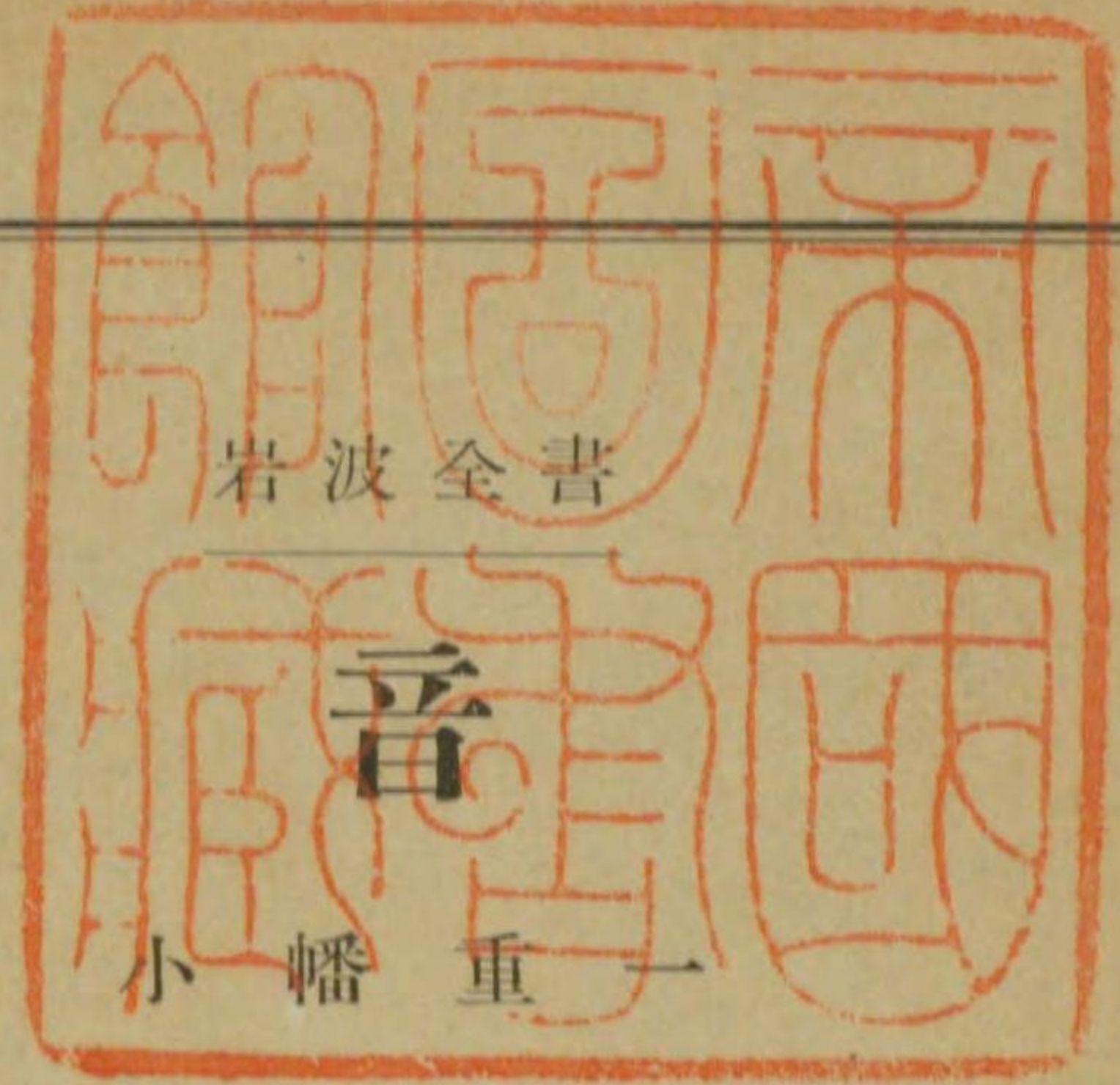


646  
4

33.6.24

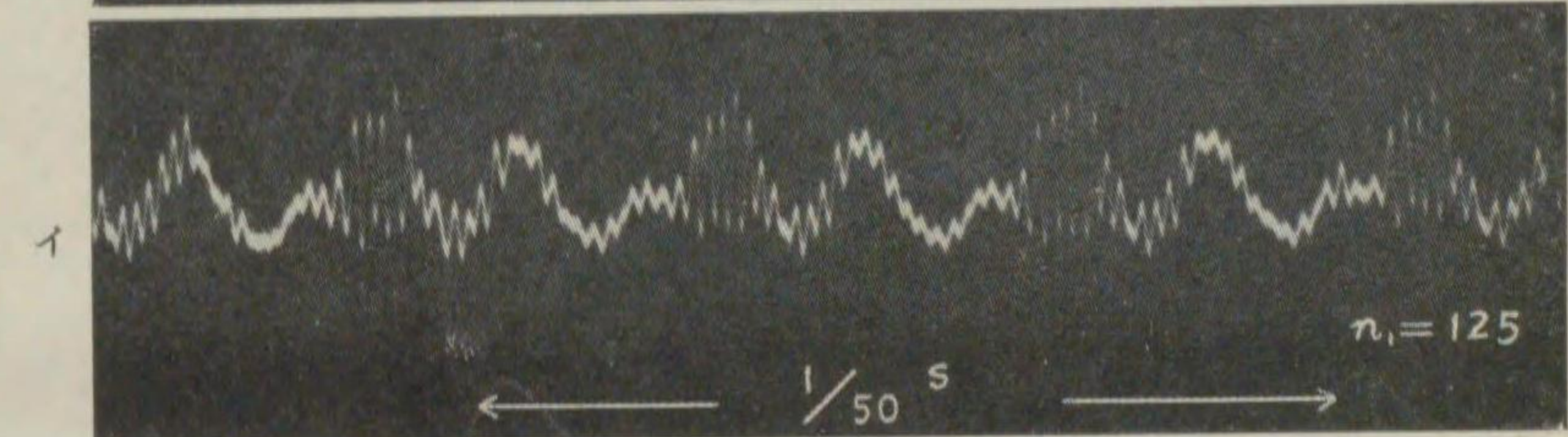
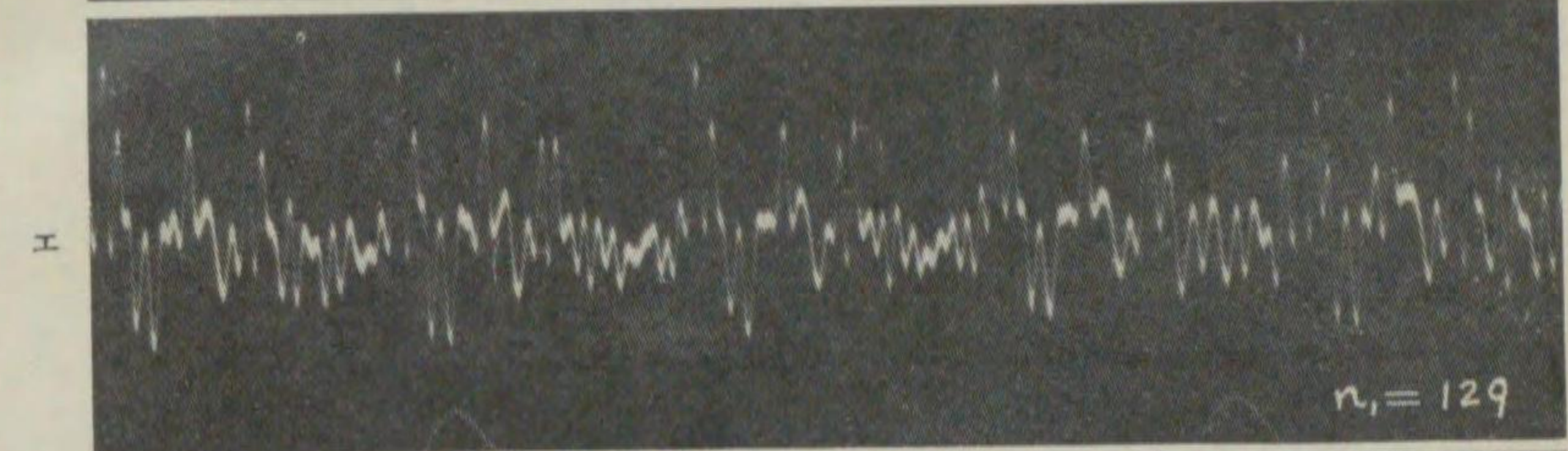
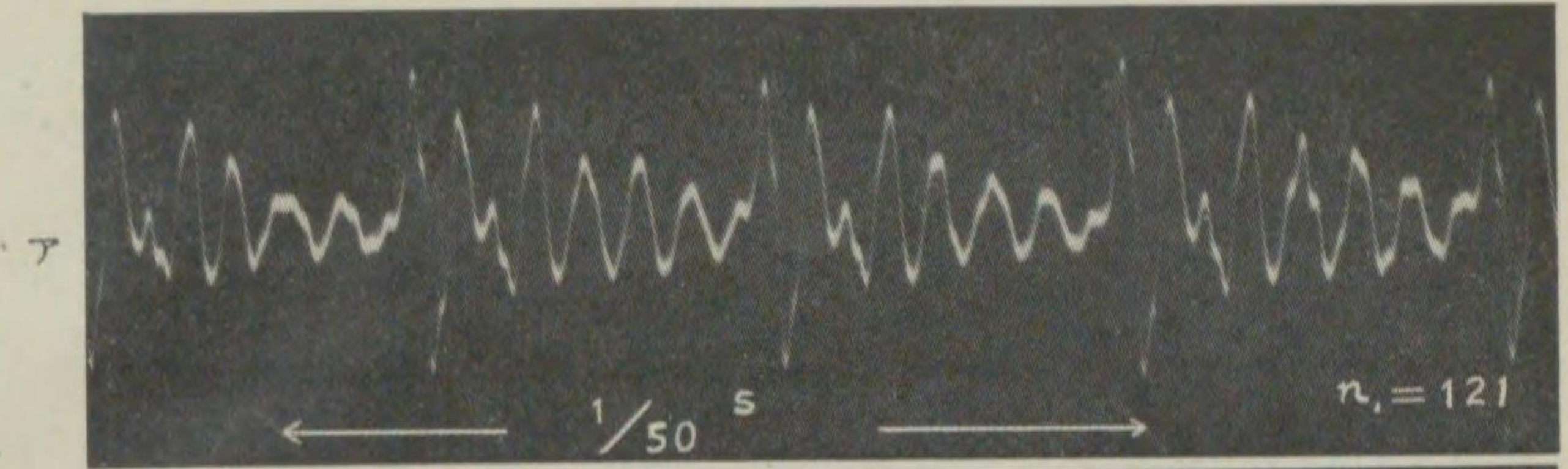
64  
4



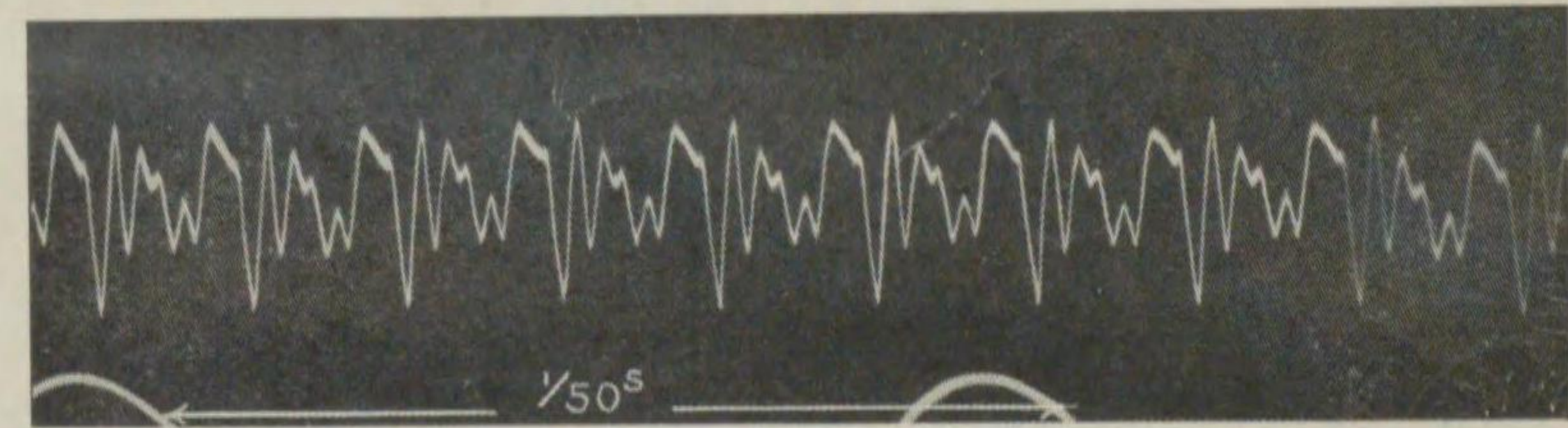
岩波書店



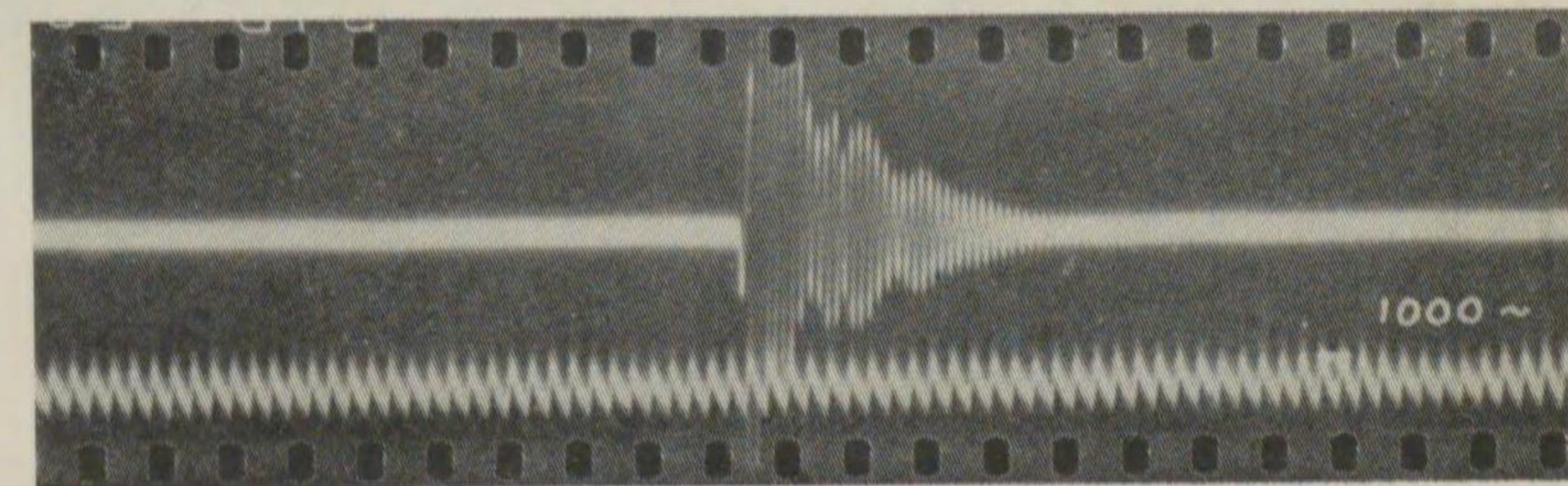
64  
4



日本語母音(男聲)



尺八の音



拍子木の音

音の波形

64  
4

6464

## 序

本書は最近急速なる發達を成し殆んど面目を一新するに至つた音響學全般に互つて出来るだけ平易な説明を試みたものである。

岩波全書刊行の趣旨に基づいて、記述は平易を旨としたが、最近研究された事項をも重要なものは總て網羅することを努めた。また單に學理の説明として乾燥無味に陥らない様に吾々が日常遭遇する實例と結び付ける事をも精々努めた積りではある。然しながら著者の非才に加ふるに何分小冊子の事とて十分その意を盡せなかつた點も多々在る様に思ふ。若し一層詳細なる知識を要求されるならば拙著“實驗音響學”(岩波書店發行)を参照されたい。

又音響學書としては音樂及び樂器の性質をも述べる必要があり、殊に樂器の性質は和洋共最近詳しく研究されてあるが、是等音樂や樂器の性質に就ては別に拙著“音樂愛好者の爲の音響學”(内田老鶴圃發行)があるので、音階の一通りの説明以外には極めて特殊な場合を除き觸れない事にした。例へば太鼓の皮の振動やその音の性質が比較的詳しく述べてあるなどは斯かる特殊例の一つで、是れに依つて聯成振動の概念を與へようとしたのに外ならない。

64  
4

猶本書の印刷, 校正に際しては, 理學士雨宮綾夫, 同吉田梅次郎兩君の協力を煩はした. 茲に記して厚くその勞を謝する次第である.

昭和十年晩秋

著者識す

## 目次

第一章 總説	1
1. 音, 音響, 音響學	1
2. 樂音, 噪音及び騒音	3
3. 純音及び複合音	4
4. 樂音の三要素	5
音の高さ, 強さ(大きさ)及び音色	5
5. 基音, 部分音, 上音, 倍音	7
6. 音の感覺と物理的性質との關係	9
第二章 音程及び音階	11
7. 音程	11
8. 音の調和, 協和, 不協和	12
音程と音の調和	12
9. 西洋の音階	13
(a) 自然長音階	13
(b) 平均率音階	17
(c) 日本の音階	21
10. 音名及び振動數の實數	21
第三章 波動の一般性質	25
11. 波長	25
音の速さと波長及び振動數との關係	25

12. 音波と水波	26
13. 波動の組合せ	27
(a) 干渉	27
(b) 定常波	30
(c) 唸り	32
第四章 音の傳播	35
14. 空気中の音の速度	35
15. 大氣中の音の速度	37
16. クントの實驗	38
17. 大氣中の音の速度と氣象要素との關係	40
18. 音の異常傳播	43
19. ドップラー効果	44
20. 水中の音の速度, 反響測深法	46
21. 固體中の音の速度	49
22. 音の反射, 屈折及び廻折	50
第五章 發音體	54
23. 總説	54
24. 絃の横振動	55
モノコード或はソノメーター	58
25. 絃及び棒の縦振動	60
26. 棒の横振動	62
27. 音叉の振動	64
28. 膜の振動	66

29. 太鼓の音, 聯成振動	67
30. 板の振動	71
31. 鐘の振動	73
32. 管中の空氣の振動	76
開口端に於ける修正	80
33. 固有振動, 固有音	80
34. 共鳴及び共鳴器	81
第六章 音源	85
35. 眞空管發振器	85
36. 擴聲器	88
高音擴聲器	92
擴聲器の試験	94
37. 音樂の立體的再生	96
38. 渦流に依る音	97
第七章 音響の分析	100
39. 總説	100
40. 電氣的音波形記録方法	103
41. 音響スペクトル	105
42. 樂器の音色	110
第八章 音の強さ及び高さの測定	112
43. 音の強さの測定	112
44. レイリー盤	113
45. 音の高さの測定	118

(a) 絶対測定	118
(b) 比較測定	119
第九章 マイクロフォン	122
46. 各種のマイクロフォン	122
(a) ライス型炭素マイクロフォン	123
(b) コンデンサー・マイクロフォン	124
(c) ムーヴィング・コイル・マイクロフォン	125
(d) リボン・マイクロフォン或は速度マイクロフォン, 及びバンド・マイクロフォン	126
47. 小型マイクロフォン, 襟付けマイクロフォン	129
48. マイクロフォンと耳との相違	130
49. マイクロフォンの校正 (Calibration)	131
第十章 音 聲	134
50. 音聲の高さの範囲	134
51. 音聲の勢力	135
52. 音聲の音色	135
(a) 母音及び子音の一般性質	135
(b) 子音の性質	139
53. 發聲器官, 聲帯の振動	140
第十一章 聽 覺	142
54. 聽覺の一般性質	142
55. 音として聞える振動数の範囲	142
音の強さ及び高さの差の辨別界限	147

56. 聽覺の隠蔽作用	148
57. 耳の構造及び聽覺の原理	149
58. 音の物理的強さと感覺上の強さ(音の大きさ)との關係	153
デシベル	154
音の強さと大きさとの關係	156
59. 音の強さと高さとの關係	159
60. 結合音	161
第十二章 騒音及び其測定	163
61. 總 説	163
62. 騒音の大きさ	163
63. 騒音測定の基準, デシベル及びフォンの定義	166
64. 騒音の測定方法, 騒音計	168
(a) バルクハウゼン騒音計	169
(b) ウェスターン・オーディオメーター	171
(c) 音叉に依る測定方法	173
(d) マイクロフォンを使用する測定法, 指示騒音計	174
第十三章 建築と音響	176
65. 總 説	176
66. 反響及び残響	177
67. 残響時間, 損率	180
68. 残響時間の測定	183
69. 建築材料その他の損率の値	188
70. 残響時間の最適値	189



室の容積と最適残響時間との関係	189
71. 劇場, 音楽堂の設計	192
72. 材料の損率の測定	196
(a) 残響時間の測定に依る方法	196
(b) 定常波法	197
73. 音響の絶縁, 或は遮音	199
74. 室内の静かさ	201
75. 音響研究所	202

## 索引



## 1. 音, 音響及び音響學

音おと或は音響と云ふ言葉は通常二様の意味に用ひられる。その一つは“音とは聴覺に於ける特殊の感覺である”とするもので、云はば主觀的の意味である。是れに對し、他の一つは“音とは吾々の聴覺に特殊の感覺を與へる外界の刺戟である”とするもので、客觀的の意味である。而して此刺戟は通常空氣の振動として與へられるから、此第二の方の意味では“音とは聴覺に特殊の感覺を與へる空氣の振動である”と云ふ事になる。物理學では總ての事物を客觀的に觀察するものであるから、音と云ふ言葉を此第二の方の意味に用ひる。即ち音とは吾々の感覺以外の外界の現象とするものである。従つて、吾々に聞えない音、所謂不可聽音或は超可聽音と云ふ様なものも考へられる譯である。

又上に述べた様に音と云ふ刺戟は通常吾々に空氣の振動として與へられるが、音は單に空氣中を傳はるばかりでなく、水中でも、又固體の中でも傳はつて行く事は勿論である。

茲に音と云ふ文字の讀み方に就て一言するの必要があらう。音と云ふ漢字はオト、オン、ネ等と幾通りも讀み方がある。然し以上述べた様な定義に従つて其性質を論ずるに當

つて、單獨に音と云ふ文字を用ひた場合には總てオトと發音する事にする、例へば大砲の音、樂器の音の如くである。

次に此文字を音響、音階、樂音、噪音、半音等と云ふ様に熟語として用ひた場合には、音色(ネイロ)以外は總てオンと讀む事にする。

詩歌其他文學上では“蟲の音、”“鐘の音”などと云ふ様に音と云ふ文字をネと讀む場合が屢々あるが、本書に於ては是れをネと讀むのは音色(ネイロ)の場合だけに限る事とする。

**音響學** 音響學とは上に述べた様な意味に於ける音の色々な性質を研究する物理學の一部門であるが、色々な物體の振動と密接な關係があるので、音響學の理論的方面は振動の學問として古くから研究され、近年に於けるその進歩は頗る遅々たるものであつた。

然るに讀者諸君のよく知られる様に、ラヂオ、トーキー、蓄音器レコードの電氣吹込乃至は電氣蓄音器等、音響學の實用方面への應用は最近實に目覺しいものである。而して是等の技術の驚くべき進歩、發展の主なる原因は實に眞空管の出現であつて、是れに依つてラヂオとか、トーキーとか前人の夢想だもよくしなかつた事柄が普く行はれるに至り、又音樂の干物との謗りを免れなかつた蓄音器が電氣吹込及び再生に依つて全く面目を一新するに至つた次第であ

る。然しながら斯かる驚異的進歩は單に音響學の實用方面のみに止まらず、その基礎的方面も亦眞空管の利用従つて各種の電氣的實驗及び測定方法の採用に依つて最近躍進的進歩をなした。即ち斯かる新方法に依つて各種の實驗及び測定は在來の方法を以てしては到底企て及ばない精度を以て行はるゝに至り、又音色、聽覺等に關する吾人の知識は頓にその深さを増加した次第である。又或る場合に於ては電氣方面に於て既に發達した理論を適用し、電氣と音響との類推により音響の問題を解決したものもある。

斯くして音響學は最近全く面目を一新するに至つたが、此進歩は主として電氣學との聯繫に依つて行はれたもので所謂“電氣音響學”(Elektroakustik)と呼ばれるもの是れである。

## 2. 樂音、噪音及び騒音

音響を分つて樂音及び噪音 (Musical sound and noise) の二種とする事は在來普通に行はれた所である。樂音とは普通の樂器の發する音の様な規則正しく且一定の週期を持つた振動が繼續して起る場合の音である。是れに反して噪音とは不規則な振動或は無關係の週期を有する數多の振動が同時に起る場合の音である。

以上は樂音及び噪音の定義であるが、樂音と噪音とは實は相對的の言葉であつて極端な場合には以上の様に畫然と

區別する事が出来るが、實際に於てその何れに屬するか判別し難い場合も尠くない。

殊に最近問題とせられる都市の噪音と言ふ様な場合、例へば擴聲器に依るラヂオの如き、その性質の上からは明かに樂音であるが、餘りに強烈であるが爲めに近隣の住民の勉強の妨害となり或は作業能率を低下させて問題を惹き起す様な場合もあるので、斯様な場合には特に騒音と云ふ文字を用ひて上記の定義による噪音と區別する事もある。即ち騒音とは樂音たると噪音たるとを問はず、餘りに強烈であるか或は不快の感を與へるなどで、その結果に於て吾々の作業の能率に影響妨害を及ぼす様な音響である。

茲に噪音と騒音とが読み方が同じであるのは甚だ不都合であつて將來ラヂオの利用が益々普及され又ローマ字書きが弘まつた場合には特に不便を感ずるであらうが、噪音と云ふ熟語は古くから物理學で慣用されて居るものであり、一方に於て騒音と云ふ文字は上述の様な在來の噪音とは違つた意味に於て近頃屢々使用されるから、暫く此儘にして置く事にする。獨逸でも近來噪音 (Geräusch) に對し茲に述べた様な意味の騒音 (Lärm) なる文字を用ひる。

### 3. 純音及び複合音

純音 (Pure tone) とは最も單純な音と云ふ意味で、音を軽く叩いた時の音、オルガン管 (パイプ・オルガン) に使ふ

様な) を軽く吹いた場合の音、或は適當に設計された眞空管發振器 (第35節参照) で優秀な擴聲器を鳴らした場合に出る様な音である。その波の形は最も簡單で、後に述べる様に所謂正弦波 (Sine wave) である。吾々の日常遭遇する音は大抵は幾つかの純音が集合した複雑な音である。依つて純音に對して是れを複合音 (Composite tone) と呼ぶ。

### 4. 樂音の三要素

樂音は高さ (Pitch)、強さ (Intensity) (或は高低、強弱)、及び音色 (Quality or timbre) の三つの性質を持つて居る。

音の高さ ピアノの鍵盤を左から右に弾いて行くと低い音から順次に高い音が出る。此高低の違ひは振動の遲速に依る。高い音とは速い振動による音であり、低い音とは遅い振動による音である。依つてこの振動の速さを表す爲めに1秒間に何回振動するかと云ふ數を用ひる。是れを音の振動數と云ふ。即ち高い音とは振動數の大きい音であり、低い音とは振動數の小さい音である。ピアノの中央のcは振動數259の音である。獨逸にては近頃振動數の單位としてヘルツ (Hertz) を用ひる。N ヘルツの音とは毎秒往復振動の數Nなる音である。

吾々に音として聞える振動數の範圍に就ては第十一章聽覺の項で詳しく述べるが、大體に於て16ヘルツから20,000ヘルツ位の範圍である。是れより低い音、或は高い音は吾

吾に音と云ふ感覺を與へない。

**音の強さ及び大きさ** 音の強弱は振幅の大小による。強い音とは振幅の大なる音である。こゝに言ふ強さとは所謂物理的の強さで、感覺上の強さと區別さるべきものである。物理的の強さ、感覺上の強さと一々形容詞を付けて呼ぶ事は煩雜であるから、物理的の強さのことを單に**強さ**、感覺上の強さのことを**大きさ** (Loudness) と呼ぶ事にする。音の強さと大きさ、即ち強弱と大小との關係は第58節に於て詳しく述べる。

次に俗語に於ては音の高低と強弱(或は大小)とが屢、混同される事があるから大に注意を要する。

**音色** ピアノにはピアノの音色があり、尺八とフルートとでは何れも笛であるが夫々獨特の音色を持つて居る。斯様な音色の違ひは何に依るかと言ふに、一言にして云へば音の波の形の相違による。音色の相違は波形の違ひに依ると云ふ言ひ表し方は嚴密に言へば正しくないが、先づさう理解して置いて差支ない。

上述の様に吾々の日常遭遇する音は大抵複雑な音であつて是れを分析すると幾つかの純音即ち成分から成り立つて居る事を知る事が出来る(第七章音響の分析の項参照)。而して此成分の違ひに依つて音の波形が違ふ譯であるから、通常音色の相違は波形の相違に依ると言はれるが、成分は

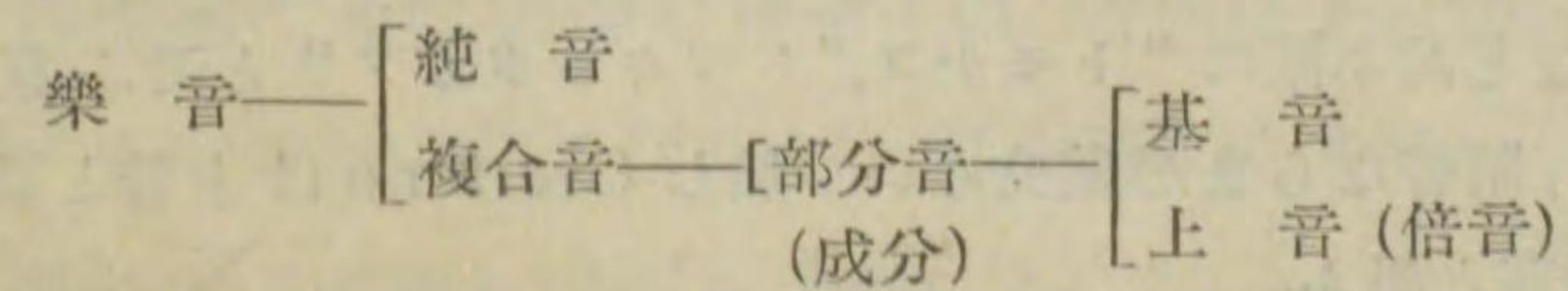
同一で従つて吾人の聽器官には全く同じ音色の感覺を與へる音でも成分の間の位相の相違で波形の異なる場合がある。依つて嚴密に言へば音色の相違は波形の違ひに依ると言はずに成分の相違に依ると言ふ方が正しい。此事に就ては第41節に詳しく説明する。

5. 基音,部分音,上音,倍音

最も規則正しい振動と考へられる各種の樂器の音も、多くは單一なる音ではなく、幾つかの純音の集つたものである。總て複雑な音を斯く分析して考へる場合に、成分たる是等の純音を部分音 (Partial tone, Partialton) と云ひ、其中で振動數の最も小さい音を基音或は原音 (Fundamental tone, Grundton, 或は略して Fundamental) と云ひ、その他を上音 (Overtone, Oberton) と云ふ(第39節波形分析の項参照)。

上音の振動數は基音の振動數の丁度整數倍(2倍, 3倍, 4倍等と云ふ様に)である場合と、さうでない場合とがある。前者即ち丁度整數倍である場合には是れを調和倍音或は單に倍音 (Harmonics) と云ふ。

依つて是等の分類を表を以て示せば次の如くである。



基音, 部分音, 上音等と云ふ言葉は言ふ迄もなく音に關した言葉であるが, 便宜上各種の振動體の振動に就ても同じ言葉を用ひる. 例へば絃の振動の基音, 倍音, 或は音叉や膜の振動の基音, 上音等と云ふ様な言葉を使ふ事がある.

部分音を斯様に分類する場合に, 屢々上音は總て倍音である様に誤解される事があるが決してさうとは限らない, 大に注意を要する點である.<sup>(1)</sup>

後に述べる様に各種の發音體の振動の中で上音が倍音であるのは絃及び管中の空氣の振動で, 棒や板及び張つた膜の振動では上音は倍音ではない. 従つて色々な樂器の音の中で絃樂器, 管樂器の音は前者に屬し上音は倍音であるが, 是れに反し音叉, 木琴, 鐘, 鼓, 太鼓の類の音では上音は倍音ではない.

倍音は其振動數が基音の振動數の 2, 3, 4, ……倍なるものを夫々第二倍音, 第三倍音, 第四倍音…(Second harmonics, third harmonics, etc.)と呼ぶ. 是れに反し上音は其振動數の順序に従ひ夫々第一上音, 第二上音, 第三上音等と云

(1) Overtone の譯語として倍音と云ふ字を用ひる人があるが, これは正しくない. 古い音響學書には陪音と云ふ字が屢々用ひられてあるが, “倍”と“陪,”讀み方は等しくバイであるが, 後者は陪食, 陪審など云ふ様に“トモナフ,”“ツキシタガフ”と云ふ意味であるから, 陪音ならまだ差支ない. 然し Overtone は上音と譯すのが最も至當と思ふ.

ふ. 即ち第一上音が第二倍音に當るので第一倍音と云ふ術語は稀に使はれる.

### 部分音の分類

{	一般の場合	基音…第一上音…第二上音…第三上音
	上音が倍音の場合	基音…第二倍音…第三倍音…第四倍音

基音の強さは必しも他の總ての部分音より強いとは限らない. 後に複雑なる音を分析した結果に就て多くの實例を擧げる様に, 各種の樂器や工場の汽笛の音等では倍音の方が基音より強い場合が屢々ある. 寧ろさう云ふ場合の方が多と言ふ方が至當である位である.

### 6. 音の感覺と物理的性質との關係

以上述べた所に依つて樂音の高さ, 強さ及び音色と云ふ性質の意味は一通り了解された事と思ふ. 然し此事柄に就ては猶もう少し詳しく述べる必要がある.

元來吾々は樂音に對して高さ, 強さ及び音色の三つの違つた感覺を持つて居る. 而して在來は是等三種の感覺は夫々獨立に音の強さ, 基音の振動數及び成分(詳しく言へば上音構成即ち各成分の振動數及び強さ)に依るものとされて居つた. 即ち音の大きさは音の強さだけにより, 高さは基音の振動數のみによつて決せられ, 音色は上音構成だけに關係するものとされて居つた. 第4節にもさういふ意味に於て樂音の三要素を説明して置いた.

感 覺		物理的性質	
音の大きさ (Loudness)		音の強さ (Intensity)	
高 さ (Pitch)		基音の振動數 (Frequency)	
音 色 (Timbre)		上音構成 (Overtone-structure)	

然るに最近の精密な研究の結果によれば、後に逐次詳しく説明する様に(第58, 59節参照)、音の大きさ、高さ及び音色と云ふ主観的三要素の何れの一つも音の全體としての強さ、基音の振動數及び上音構成なる客観的三要素全部に關係するものであり第4節に述べた様な簡単な説明では不充分である事が知られるに至つた。

## 第二章 音程及び音階

### 7. 音程

二つの音の高さの隔りを音程と云ふ。音程を表すには二つの音の振動數の比を以てする。例へば振動數200と云ふ音と300と云ふ音との間の隔り即ち音程は、 $\frac{300}{200}$  即ち  $\frac{3}{2}$  である。この分數を音程比と云ふこともある。音程を表すに茲には振動數の比を以てする事にしたが、此外にも色々な方法が在る。英國の音響學者エリス(A. I. Ellis)の創案による方法では1オクターヴ(Octave)を1,200に分け其一つをセントと呼ぶ。

**音程の加減** 甲乙丙の三つの音が在つて甲と乙との音程が  $a$  で、乙と丙との音程が  $b$  である場合に甲と丙との音程を  $c$  とすれば  $c$  は  $a+b$  ではなくて  $a \times b$  である。

又甲と丙との音程  $c$  と、甲と乙との音程  $a$  から乙と丙との音程を求めるには  $c-a$  ではなくて  $c \div a$  である。

實際の數を用ひて是れを説明すれば例へば音樂で言ふ四度と五度と加へるには四度は  $\frac{4}{3}$ 、五度は  $\frac{3}{2}$  であるから：  
四度と五度との和 =  $\frac{4}{3} \times \frac{3}{2} = 2$ 、即ち八度或はオクターヴである。逆に四度下げるとは音程比を  $\frac{4}{3}$  で割る、即ち  $\frac{3}{4}$  を乗ずる事である、オクターヴ下げるとは2で割る事である。

## 8. 音の調和, 協和, 不協和

高さの違つた二つの音を同時に出した場合には是等の音が融け合つて、恰も一つの音である様な滑かな快い感を與へる時と、二つの音が別々になつてガサガサした様な不快な感を與へる時とがある。初めの場合に二つの音はよく調和する或は協和<sup>けふくわ</sup>すると云ひ、二つの音を協和音と云ふ。後の場合には二つの音は不協和<sup>ふけふくわ</sup>であると云ひ、是等の組合せを不協和音と言ふ。

**音程と音の調和** 如何なる音程の音が良く調和するかと云ふに、振動数の比の簡単なもの程良く調和する。次表に西洋音楽で用ひられる簡単な音程及び其名稱を掲げる。音

第 1 表 音 程 表

振動数の比	音程名	
1 : 1	一度(即ち同音)	絶対協和音
2 : 1	八度(即ちオクターヴ)	
3 : 2	五度	完全協和音
4 : 3	四度	
5 : 3	長六度	中庸協和音
5 : 4	長三度	
6 : 5	短三度	不完全協和音
8 : 5	短六度	

の調和の程度により是等の協和音に夫々絶対, 完全等の名が附せられて居る。

上表に依つて明かな通り振動数の比1:1及び2:1即ち同音及びオクターヴの場合最も良く調和し、3:2及び4:3、即ち五度、四度はこれに次ぎ、振動数の比が複雑になるに従ひ協和の程度減じ、上表以外のものは總て不協和音である。

却説音楽に於ては協和音ばかりを用ひるかと云ふに、決してさうではなく、協和音、不協和音を相交へて用ひ、協和音の美しさを一層發揮させるもので、その例は西洋音楽に於ては隨所に見出される所である。

## 9. 西洋の音階

(a) **自然長音階** 吾々は約 16 ヘルツから 20,000 ヘルツに至る總ての音を連続的に聴く事が出来るが、音楽には決してあらゆる高さの音を用ひるものではなく、振動数の間に簡単な關係を持つ比較的少數の音のみを用ひるものである。依つて音楽に用ひる所の音をその高さの順に列べたものを音階といひ、古今東西の音楽の特色は主として音階の差に歸せられるものである。

然らば振動数の間に如何なる關係を持つた音が音楽に用ひられるか、即ち音階を構成するかと云ふ事は、前に述べた二つの音の調和と密接な關係があるもので、調和の良いものが用ひられる。即ち音楽に用ひられる音の振動数の比は

極めて簡単なもので、自然数の初めの四つの素数 1, 2, 3, 5 及びその冪を色々に組合せたものである。(1)

今是等の数を組合せて如何にして音階が出来ると云ふ事を示さう。

音の高さの隔りを音程と云ひ、通常二つの音の振動数の比を以て表すことは前に述べた。

(i) 二つの音の振動数  $n_1, n_2$  が全く等しい場合 ( $\frac{n_2}{n_1}=1$ ) は同音の場合で最も簡単な音程で音楽では是れを一度音程と云ふ。

(ii) 次に最も簡単な音程は  $\frac{n_2}{n_1}=2$  の場合で此音程を八度或はオクターヴ (Octave) と云ふ。

或る音に對し 1 オクターヴ高い音とは振動数の 2 倍の音である。更にもう 1 オクターヴ昇る、即ち初めの音に對して 2 オクターヴ高くなると振動数は  $2 \times 2 = 4$  倍になる。従つて次に示す様にオクターヴが 1, 2, 3, 4, …… と算術級数的に昇ると、振動数は 2, 4, 8, 16, …… 倍と幾何級数的に増すものである：

オクターヴ数	0	1	2	3	4	5	…
振動数	1	2	4	8	16	32	… 倍

(1) 音階の構成に關しては茲に述べるよりも、もつと和聲學的に行ふ方法があるが、音楽に餘り興味を持たれぬ讀者のために茲には單に數字の組合せとして述べる事とした。

オクターヴの音は基音の再現とも看做すべきもので吾々に基音と同等の感覺を與へるものであるから、或るオクターヴ間の音の配列が確定すれば其前後のオクターヴ間の配列も亦きまるものである。従つて音階と云ふ時は 1 オクターヴ間の音楽用の音を高さの順序に配列したものである。

(iii)  $\frac{n_2}{n_1}=3$ 、即ち振動数の比が 3 と云ふ音程は是れを十二度音程 (Twelfth) と云ふ。此音程は已に 1 オクターヴの外に出るから是れを 1 オクターヴ下げる。即ち 2 で割れば  $\frac{n_2}{n_1}=\frac{3}{2}$  なる音程が出来る。是れを五度音程 (Fifth) と云ふ。

(iv)  $\frac{n_2}{n_1}=5$  なる音程は別に名稱はない。此音程は初めのオクターヴより 2 オクターヴも外に出て居るから是れを 2 オクターヴ下げる即ち 4 で割ると  $\frac{n_2}{n_1}=\frac{5}{4}$  なる音程が出来る。是れを長三度音程 (Major third) と云ふ。

(v)  $\frac{n_2}{n_1}=\frac{5}{3}$  を長六度 (Major sixth) と云ふ。

(vi)  $\frac{n_2}{n_1}=\frac{2 \times 3}{5}=\frac{6}{5}$  を短三度 (Minor third) と云ふ。

(vii)  $\frac{n_2}{n_1}=\frac{2 \times 2}{3}=\frac{4}{3}$  を四度 (Fourth) と云ふ。

(viii)  $\frac{n_2}{n_1}=\frac{9}{8}$  を二度 (Second) と云ふ。此音程は如何にして出来るかと云ふに原音を五度高め (即ち振動数に  $\frac{3}{2}$  を乗ずる) 更に五度高めると  $\frac{3}{2} \times \frac{3}{2} = \frac{9}{4}$  となり 1 オクターヴ



の外に出るから是れをオクターヴ下げると  $\frac{9}{4} \times \frac{1}{2} = \frac{9}{8}$  となる。

(ix)  $\frac{n_2}{n_1} = \frac{15}{8}$  或は  $\frac{3}{2} \times \frac{5}{4}$  は原音を五度上げ  $(\times \frac{3}{2})$  たものの長三度  $(\times \frac{5}{4})$  と看做すべきもので是れを七度音程 (Seventh) と云ふ。

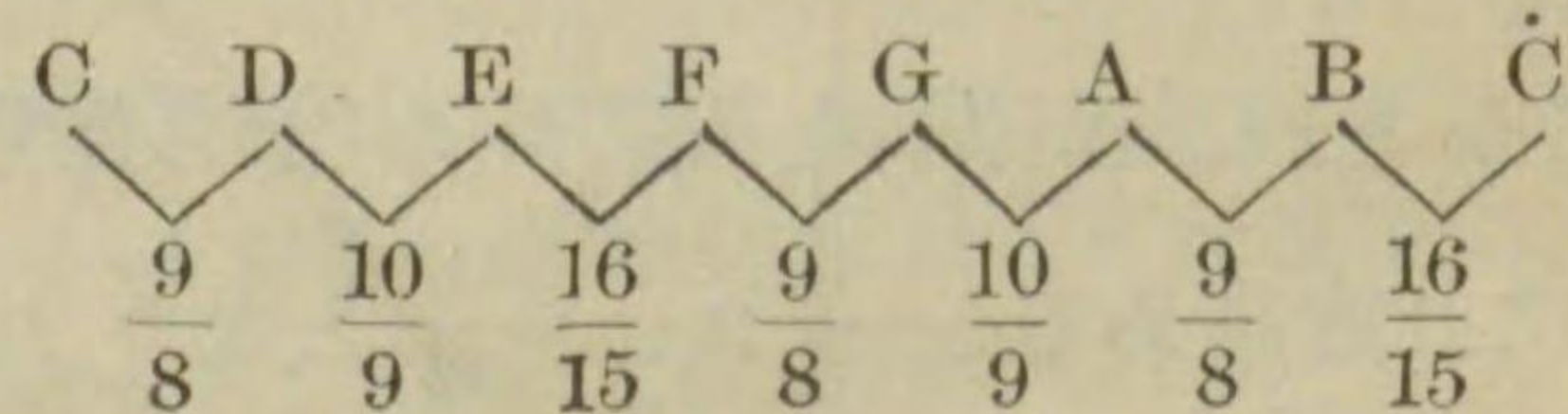
以上の音程の中でオクターヴ以外では四度  $(\frac{4}{3})$  及び五度  $(\frac{3}{2})$  は最も主要なる音程である。

扱以上で1オクターヴの音域間に現れる簡単な音程は盡した譯であるから、假りに原音をCとしその他の音を高さの順にD, E, F, G, A, Bと名づけ順次に是れを配列してみると次の様になる：

	C	D	E	F	G	A	B	Ċ
Cに對する音程	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
	1	1.125	1.250	1.333	1.500	1.667	1.875	2.000

是れを自然長音階或は和聲的長音階 (Major or diatonic scale) と云ふ。

次に此音階で各隣音間の音程を計算してみるには、各々の音の原音に對する音程の比をとればよいから、



となる。是れに由つて觀るに、此音階では、各隣音間の音程には

$$\frac{9}{8}, \frac{10}{9}, \frac{16}{15}$$

の三種類の音程が在る事が認められる。而して最後の  $\frac{16}{15}$  なる音程は前二者に比して遙に狭いものである。即ち此音階ではEとF及びBとĊとの間が他の音の間より著しく狭いものである。

次に  $\frac{9}{8}$  及び  $\frac{10}{9}$  なる音程は、かなり似寄つた音程ではあるが今其差を求めんに、音程の加減は音程比の乗除に當るから

$$\frac{9}{8} \div \frac{10}{9} = \frac{81}{80}$$

となる。此小さな音程をコンマ (Syntonic comma 略して comma) と呼び音階の理論では要なるもので、良い耳ではコンマの違ひを聴き別けられるものである。

(b) 平均率音階 以上自然長音階の説明で音階が如何にして出来るかと云ふ事は了解された事と思ふから、次に此自然長音階と今日西洋音楽で用ひられる所謂平均律音階 (Equal-tempered scale) と如何に違ふかを述べよう。

曩に述べた自然長音階の原音を五度上げる、即ちCの代りにGを原音として (音樂的の辭を以てすればハ調からト調に移調して) 同じ音階を作つてみると

C	D	E	F	G	A	B	Ċ	
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2	
				C'	D'	E'	F'	G'
				1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$ .....

依つて、

$$D' = \frac{3}{2} \times \frac{9}{8} = \frac{27}{16} = 1.686 \dots A \left( \frac{5}{3} = 1.667 \right) \text{ と少し違ふ}$$

$$E' = \frac{3}{2} \times \frac{5}{4} = \frac{15}{8} \quad B \text{ と同じ}$$

$$F' = \frac{3}{2} \times \frac{4}{3} = 2 \quad Ċ \text{ と同じ}$$

となるから B 及び Ċ は前の儘で今度の E', F' として用ひられるが、A は今度の D' として用ひる事は出来ない。即ち茲に初めの C に對して  $\frac{27}{16}$  なる新しい音程の音が必要になつて來た譯である。此音は A とどの位違ふかといふに  $\frac{27}{16} \div \frac{5}{3} = \frac{81}{80}$  で丁度コンマだけ違ふ。

次にト調の代りにニ調に移して見ると又新しい音が必要になつて來る。ヴァイオリンの様な押へ所の加減で任意の高さの音が出せる樂器では如何様な音でも出せるが、ピアノ、オルガンの様な定まつた調子を持つ有鍵樂器では無数の違ふ高さの音を出す事は不可能である。此不便は何に依つて生ずるか云ふに上に述べた音階では 1 オクターヴの間が D, E, F, G, A, B によつて均一に別けられてなく、

或る所は  $\frac{9}{8}$  と云ふ一音、他の所は  $\frac{10}{9}$  と云ふ一音、又他の所では  $\frac{16}{15}$  と云ふ半音に別けられて居り、而も此半音が丁度一音の半分でない爲めに外ならない。そこで此不便を除くため 1 オクターヴの間を 12 の半音に均等に別けると、音程の分割であるから、その一つの音程は  $\sqrt[12]{2}$  となる。前の自然長音階中で、 $\frac{9}{8}$  及び  $\frac{10}{9}$  の所は  $\sqrt[12]{2}$  の二倍(二乗)即ち  $\sqrt[6]{12}$  (一音) とし、 $\frac{16}{15}$  の所を  $\sqrt[12]{2}$  (半音) とすると次の様な形となる:

C	D	E	F	G	A	B	Ċ
1	$2^{\frac{2}{12}}$	$2^{\frac{4}{12}}$	$2^{\frac{5}{12}}$	$2^{\frac{7}{12}}$	$2^{\frac{9}{12}}$	$2^{\frac{11}{12}}$	2

是れを平均律音階と云ひ、今日の西洋音樂で用ひられて居る音階である。此平均律音階の半音は  $\sqrt[12]{2} = 1.059$  である。

要するに自然音階では完全に移調する爲めにはオクターヴの間に無数の音を必要とするが、平均律音階では是れを僅に 12 箇の音で代表せしめるもので、ピアノ、オルガン等で 1 オクターヴの間に 7 箇の白鍵と 5 箇の黒鍵とが在るのが是れである。

次に此平均律音階を自然音階と比較してみると次の様になる:

	C	D	E	F	G	A	B	C
自然音階	1.000	1.125	1.250	1.333	1.500	1.667	1.875	2.000
平均律音階	1.000	1.122	1.260	1.325	1.498	1.682	1.888	2.000

即ち差の最も著しいのは E で、その差は  $\frac{1.26}{1.25} = \frac{126}{125}$  であるから曩に述べたコンマより稍、小さいが、音楽的の耳によつて充分認められる。

G は最も良く一致しその差  $\frac{1.500}{1.498}$  は  $\frac{882}{881}$  より小さく、到底辨別し難い。

斯く E の音が著しく自然音階とはずれて居る爲めに、音楽上もつとも重要な主和絃 (Principal chord, C. E. G.) の如きを現在の有鍵楽器で奏すると餘り清澄の感を與へない。これを自然音階に近からしめるには、要するに 1 オクターヴの間の鍵の數をもつと増加すればよいわけであるが、吾々の耳で判別し得る最小音程にはおのづから限りがあるから、この鍵の數も無數に増加する必要はなく (實際出來もしないが)、茲に詳しい計算は省略するが、前述の様に自然音階を色々に移調して澤山出て來る新しい音の中で吾々の判別し得ない小さな違ひのものを捨てると、1 オクターヴの間に 53 の音が出せれば有鍵楽器で完全に自然音階が奏せる事がわかる。斯くしてボサンケ (Bosanquet) は 53 箇の鍵のある風琴を製作した。又我田中正平博士の考案に係る純正調風琴ではこの 53 の音から更に實際の楽曲に必要なものを除き 1 オクターヴに 20 箇の鍵で特殊の構造によつて 36 箇の音が出る様になつて居る。田中博士は 1890 年此楽器を製作され、獨逸皇帝の天覽に供して

賞讃を博された。

(c) **日本の音階** 日本音楽の音階には宮中に傳はつた雅樂の音階と民間に存在する地方俚謡或は長唄、浄瑠璃の音階とあるが、何れも一種の自然音階である。従つて西洋の平均律音階に調律したピアノやオルガンでは完全に日本音階を奏する事は出來ない。

### 10. 音名及び振動數の實數

1 オクターヴ間に含まれる各音を言ひ表す仕方は次に示す様に國々により多少の相違がある。

英國式	c	d	e	f	g	a	b
獨逸式 <sup>(1)</sup>	c	d	e	f	g	a	h
佛國式	ut	ré	mi	fa	sol	la	si

又音の絶対の高さを表す記號は：

中央の  
c

英國式	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C	c	c'	c''	c'''	c <sup>IV</sup>	c <sup>V</sup>	c <sup>VI</sup>
獨逸式	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C	c	c <sup>1</sup>	c <sup>2</sup>	c <sup>3</sup>	c <sup>4</sup>	c <sup>5</sup>	c <sup>6</sup>
米國式	C <sub>-1</sub>	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>8</sub>

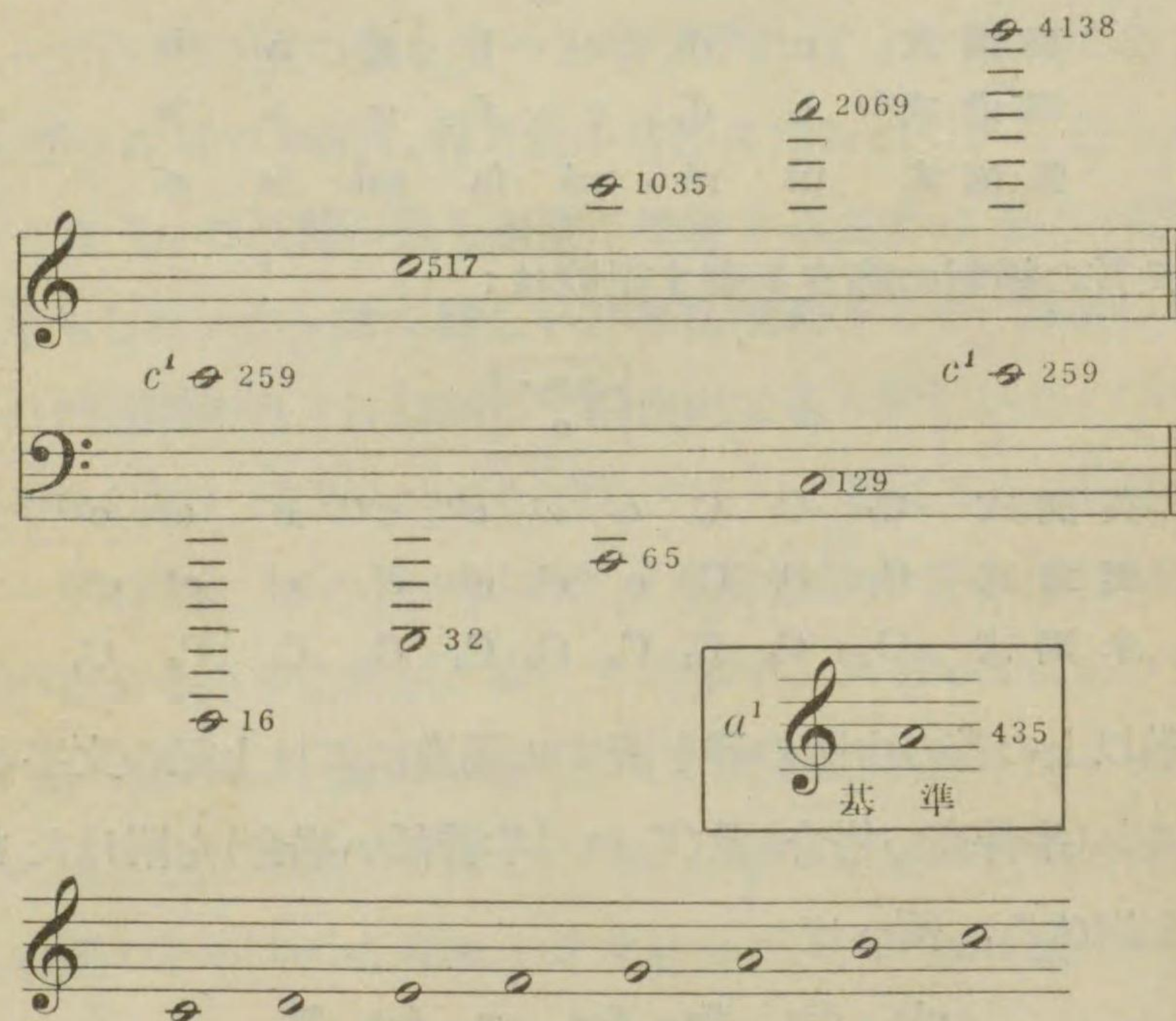
猶以上の音の中間の音を表すに獨逸にては上記の文字の次に is (半音高い場合) 及び es (半音低い場合) を附けたものを用ひる。例へば

cis, dis, fis, des, es, fes 等。

<sup>(1)</sup> 獨逸式では a より半音高い音を b と書く。

従つて前記の平均率音階では cis と des, fis と ges 等は夫々同じ高さの音である。

次に音の振動数の絶対値に就ては物理學者の用ひるものと音樂家の使用する値と少しく違ひがある。音樂の方では  $a^1$  の音即ちヴァイオリン a 線の放絃音の振動数を 435 とする事に決定されて居るが近頃は是れを 440 にする音樂家が多い。今在來の規定の様に  $a^1=435$  とすると中央の c 即ち  $c^1$  の振動数は 259 となる。猶其他の c の振動数を示せば第 1 圖の様になる。



第 1 圖

第 2 表 平均律音階振動數(一)  
基準  $c^1=256$  [物理學調]

	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C	c	c <sup>1</sup>	c <sup>2</sup>	c <sup>3</sup>	c <sup>4</sup>
C	16	32	64	128	256	512	1024	2048
C#	16.95	33.90	67.81	135.61	271.22	542.45	1084.89	2169.78
D	17.96	35.92	71.84	143.68	287.35	574.70	1149.40	2298.80
D#	19.03	38.05	76.11	152.22	304.44	608.87	1217.75	2435.50
E	20.16	40.32	80.63	161.27	322.54	645.08	1290.16	2580.32
F	21.36	42.71	85.43	170.86	341.72	683.44	1366.88	2733.75
F#	22.63	45.25	90.51	181.02	362.04	724.08	1448.15	2896.31
G	23.97	47.95	95.89	191.78	383.57	767.13	1534.27	3068.53
G#	25.40	50.80	101.59	203.19	406.37	812.75	1625.50	3251.00
A	26.91	53.82	107.63	215.27	430.54	861.08	1722.16	3444.31
A#	28.51	57.02	114.04	228.07	456.14	912.28	1824.56	3649.12
*B	30.20	60.41	120.82	241.63	483.26	966.53	1933.05	3866.11

第 3 表 平均律音階振動數(二)  
基準  $a^1=435$  [國際調]

	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C	c	c <sup>1</sup>	c <sup>2</sup>	c <sup>3</sup>	c <sup>4</sup>
C	16.17	32.33	64.66	129.33	258.65	517.31	1034.61	2069.22
C#	17.13	34.25	68.51	137.02	274.03	548.07	1096.13	2192.26
D	18.15	36.29	72.58	145.16	290.33	580.66	1161.31	2322.62
D#	19.22	38.45	76.90	153.80	307.59	615.18	1230.37	2460.73
E	20.37	40.74	81.47	162.94	325.88	651.76	1303.53	2607.05
F	21.58	43.16	86.31	172.63	345.26	690.52	1381.04	2762.08
F#	22.86	45.72	91.45	182.89	365.79	731.58	1463.16	2926.32
G	24.22	48.44	96.89	193.77	387.54	775.08	1550.16	3100.33
G#	25.66	51.32	102.65	205.29	410.59	821.17	1642.34	3284.68
A	27.19	54.38	108.75	217.50	435.00	870.00	1740.00	3480.00
A#	28.80	57.61	115.22	230.43	460.87	921.73	1843.47	3686.93
*B	30.52	61.03	122.07	244.14	488.27	976.54	1953.08	3906.17

第 4 表 平均律音階振動數(三)  
基準  $a^1=440$  [演奏會調]

	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C	c	c <sup>1</sup>	c <sup>2</sup>	c <sup>3</sup>	c <sup>4</sup>
C	16.35	32.70	65.41	130.81	261.63	523.25	1046.50	2093.00
C#	17.32	34.65	69.30	138.59	277.18	554.37	1108.73	2217.46
D	18.35	36.71	73.42	146.83	293.66	587.33	1174.66	2349.32
D#	19.45	38.89	77.78	155.56	311.13	622.25	1244.51	2489.02
E	20.60	41.20	82.41	164.81	329.63	659.26	1318.51	2637.02
F	21.83	43.65	87.31	174.61	349.23	698.46	1396.91	2793.83
F#	23.12	46.25	92.50	185.00	369.99	739.99	1479.98	2959.96
G	24.50	49.00	98.00	196.00	392.00	783.99	1567.98	3135.96
G#	25.96	51.91	103.83	207.65	415.30	830.61	1661.22	3322.44
A	27.50	55.00	110.00	220.00	440.00	880.00	1760.00	3520.00
A#	29.14	58.27	116.54	233.08	466.16	932.33	1864.66	3729.31
*B	30.87	61.74	123.47	246.94	493.88	987.77	1975.53	3951.07

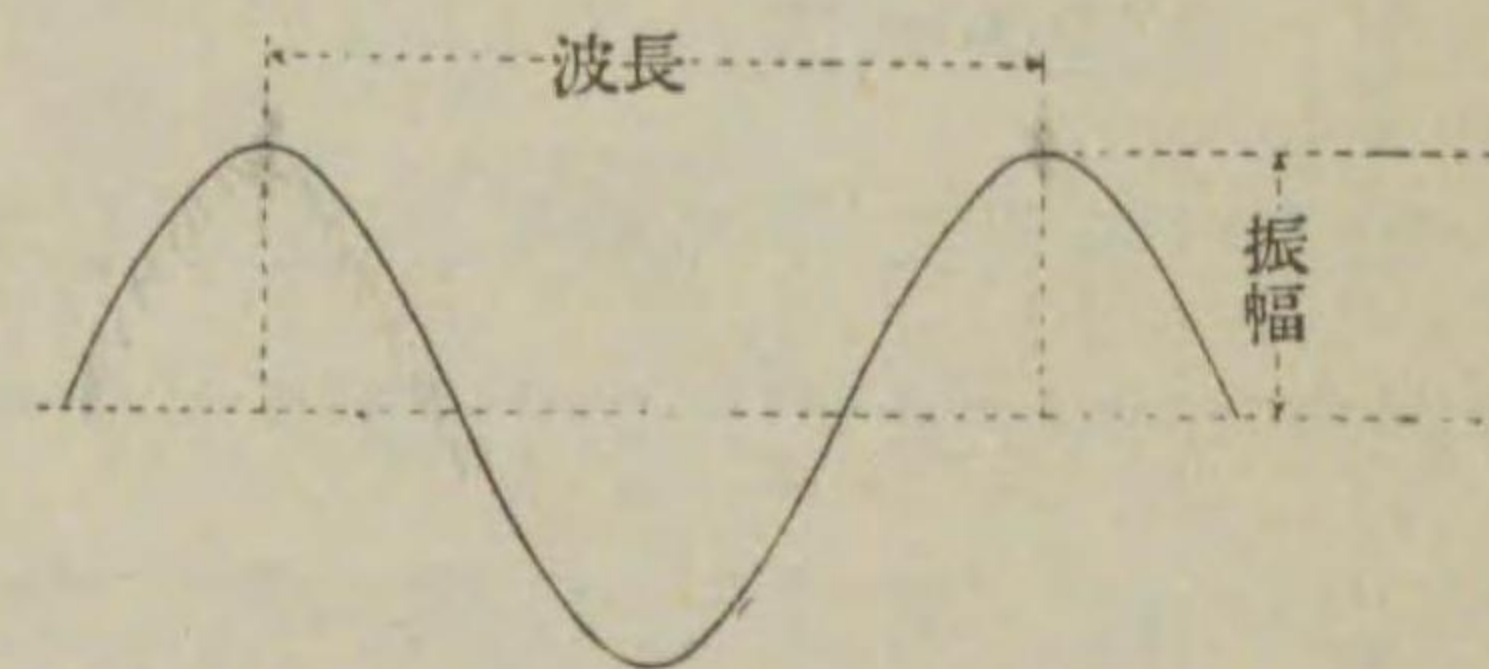
\* 獨逸式では此 B の代りに H と書き, A# を B と書く。

音楽に於ては音の比較的高さが重要な問題であつて音の絶對的高さを定める事は副である。是れに反して音響學に於ては音の絶對的高さを定める事が必要である。従つて音響學では振動數の計算の便宜上  $e^1$  を  $2^8$  即ち 256 とする。依て音響學の實驗に使用する音叉の振動數は總て  $e^1=256$  とした場合に調律してある。以上三種の場合の各音の振動數を第 2, 3, 4 表に示す。

### 第三章 波動の一般性質

#### 11. 波長

一般に振動數, 振幅と共に波に関する大切な量は波長である。波の谷から峯迄の距離の半分が振幅



第 2 圖

であるが, 横に峯から峯, 或は谷から谷迄の距離を波の長さ即ち波長と云ふ。

**音の速さと波長及び振動數との關係** 音はその強さ, 高さ及び音色の如何に拘らず同一の速さを以て傳播する。茲に音の傳播して行く速さとは音が 1 秒間に進む距離である。一方に於て音は一振動でひと波, 二振動でふた波進んで行くから 1 秒間に振動する數即ち振動數に波の長さをかけたものが丁度 1 秒間に進む距離即ち音の速さとなる譯である。

今音の速さを  $V$ , 波長を  $\lambda$ , 振動數を  $N$  とすれば

$$V = \lambda N$$

なる關係がある。空氣中に於ける音の速さは常溫に於て約 340 メートルであり, ピアノの中央の  $c$  即ち  $e^1$  の音の振動數は約 259 であるから, 此關係に依つて計算すれば,  $e^1$  の

音の波長は約  $340/259=131$  cm である事が知られる。光の波長はミリメートルの 1,000 分の 1 以下と云ふ短いものであるが、音の波長は通常斯く何十センチメートル或は何メートルと云ふ程度である事を記憶されたい。

## 12. 音波と水波

本書の各所に音の波形がはけい圖示してあるが、かやうな音の波形は直ちに水面の波を聯想させるであらう。しかしながら水面の波と音波とは、根本的に性質の異なるものである。水面の波では水面は上下に上つたり下つたりして、その波動は是れと直角の方向に進行して行く。音は通常物體の振動によつて起るもので、音の源である振動體に接した空氣は振動によつて壓縮され、次に膨脹する。即ち濃厚になつたり稀薄になつたり、密になつたり疎になつたりし、この行程を繰り返すものである。この疎密の波が四方八方に傳はつて吾々の耳に達するものである。此時、空氣中の或る一點の空氣層は交互に壓縮され、膨脹し、疎密の行程を繰り返すものである。従つて斯く空氣が密になつたり疎になつたりするために起る空氣分子の運動の方向と波動の傳はる方向とは同一である。一言にして云へば、音波は空氣の疎密の波である。分子の運動の方向と波動傳播の方向とは同一である。即ち音波は一種の縦波である。水面の波のやうに分子の運動の方向が波動の進行方向に直角なるものを横波

P27-P34

落丁



## 第四章、音の傳播

### 14. 空気中の音の速度

赫々たる太陽の表面にも猶幾多の黒點が発見されるやうに、ニュートン (Issac Newton) の卓抜なる業績の中にも、亦二、三の瑕瑾が見出される。茲に述べようとする空氣中に於ける音の傳播速度の理論的計算に於て、ニュートンのなした誤謬はその最も著名なものである。

一般に弾性率  $E$ 、密度  $\rho$  なる媒質内を縦波の傳播する速度  $v$  は次の式に依つて與へられる。

$$v = \sqrt{E/\rho}.$$

瓦斯の場合には  $E$  は體積弾性率であるが、ニュートンは音波に於ける氣體の壓縮、膨脹の際の壓力と容積との間には彼のボイルの法則が成り立つものと假定した。即ち壓力を  $P$ 、容積を  $V$  とすれば、 $PV = \text{const.}$  であるとした。

此關係が成り立つとすると、氣體の體積弾性率に該當する  $E$  は  $P$  に等しい事が容易に證明される。従つて音の傳播速度は

$$v = \sqrt{P/\rho}$$

となる。然るに  $0^\circ\text{C}$  に於て

$$P = 76 \times 13.6 \times 981 \doteq 10^6 \text{ ダイン/平方 cm,}$$



$$\rho = 0.00129 \text{ グラム/立方 cm}$$

であるから、是等の値を  $v$  の式に入れると、 $0^\circ\text{C}$  に於ける音の傳播速度は

$$v = 278 \text{ m/秒}$$

となり、當時知られて居つた音の速度の實測値  $332 \text{ m/秒}$  に比して遙かに小さいものとなつた。

このニュートンの音の速度の計算値は何故に實測値と合はないのであらうか。此疑問は爾後百餘年の長日月の間解決されずに残されてあつたが、遂にフランスのラプラス (Laplace) に依つて解決が與へられた。即ちラプラスに依れば音波中の壓縮、膨脹は極めて短時間の中に起り、従つて壓縮の際に發生する熱或は膨脹の際に起る冷却は、周圍に傳達される暇なきものである。換言すれば此變化はボイルの法則の成り立つ恆溫變化 (Isothermal change) ではなくして、所謂斷熱變化 (Adiabatic change) である。依つて此場合に壓力と容積との間に成り立つ關係は  $PV = \text{const.}$  ではなくして

$$PV^\gamma = \text{const.}$$

であり、従つて  $v = \sqrt{\gamma P / \rho}$  である。茲に  $\gamma$  は瓦斯の定壓比熱  $c_p$  と定容比熱  $c_v$  との比  $c_p / c_v$  であつて、空氣の場合には  $1.408$ 、水蒸氣の場合には  $1.26$  である。

此値を上記の式に入れると、 $0^\circ\text{C}$  に於ける音の速度は  $332$

$\text{m/秒}$  となり、實際測定した結果と極めて良く一致する。

### 15. 大氣中の音の速度

大氣中の音の速度の大規模なる測定は、1738年フランスの學士院の人々に依つて行はれたものが最も古いものであると思はれる。此測定は風の影響を除くため交互觀測法により極めて慎重に行はれたものである。即ち18哩を隔てた二點間に於て一定時間毎に交互に大砲を發射し、その閃光と音との間の時間を交互に精密に測定したもので、その結果として  $0^\circ\text{C}$  の乾燥した空氣中に於ける音の速度として  $332 \text{ m/秒}$  なる値が得られた。

大氣中に於ける音の速度の測定はその後多くの人々によつて行はれたが、就中特筆すべきは1864年ルニョー (V. Regnault) の測定と、歐洲大戰中音により敵砲の所在を探知する方法に關聯して1917-18年エスクランゴン (E. Esclangon) の行つた測定である。ルニョーは上述の交互觀測法を改良し、個人誤差を避けるため音を受けるに耳の代りに電氣的方法を用ひ細心の注意の下に測定を行つた結果、 $0^\circ\text{C}$  に於ける値として  $329.9 \text{ m/秒}$  を得た。エスクランゴンは此方法を更に改良し最新の電氣測定器を利用し、同一線上  $1,400$  及び  $14,000 \text{ m}$  なる二種の距離に於て  $0^\circ, 20^\circ\text{C}$  間の色々な溫度、並びに風及び濕度の色々な状態の下に於て多數の測定を行ひ、 $15^\circ\text{C}$  に於ける乾燥した無風大氣中の音の



速度として 339.8 m/秒なる結果を得た。前記のルニョーの値を此溫度に換算すると 339.7 m/秒となる。

歐洲大戰中獨逸側に於ても亦アンゲレル及びラーデンプルグ (E. v. Angerer und R. Ladenburg) は同様な精密な測定を行つた結果, 0°C に於ける値として  $330.8 \pm 0.1$  m/秒なる結果を得た。

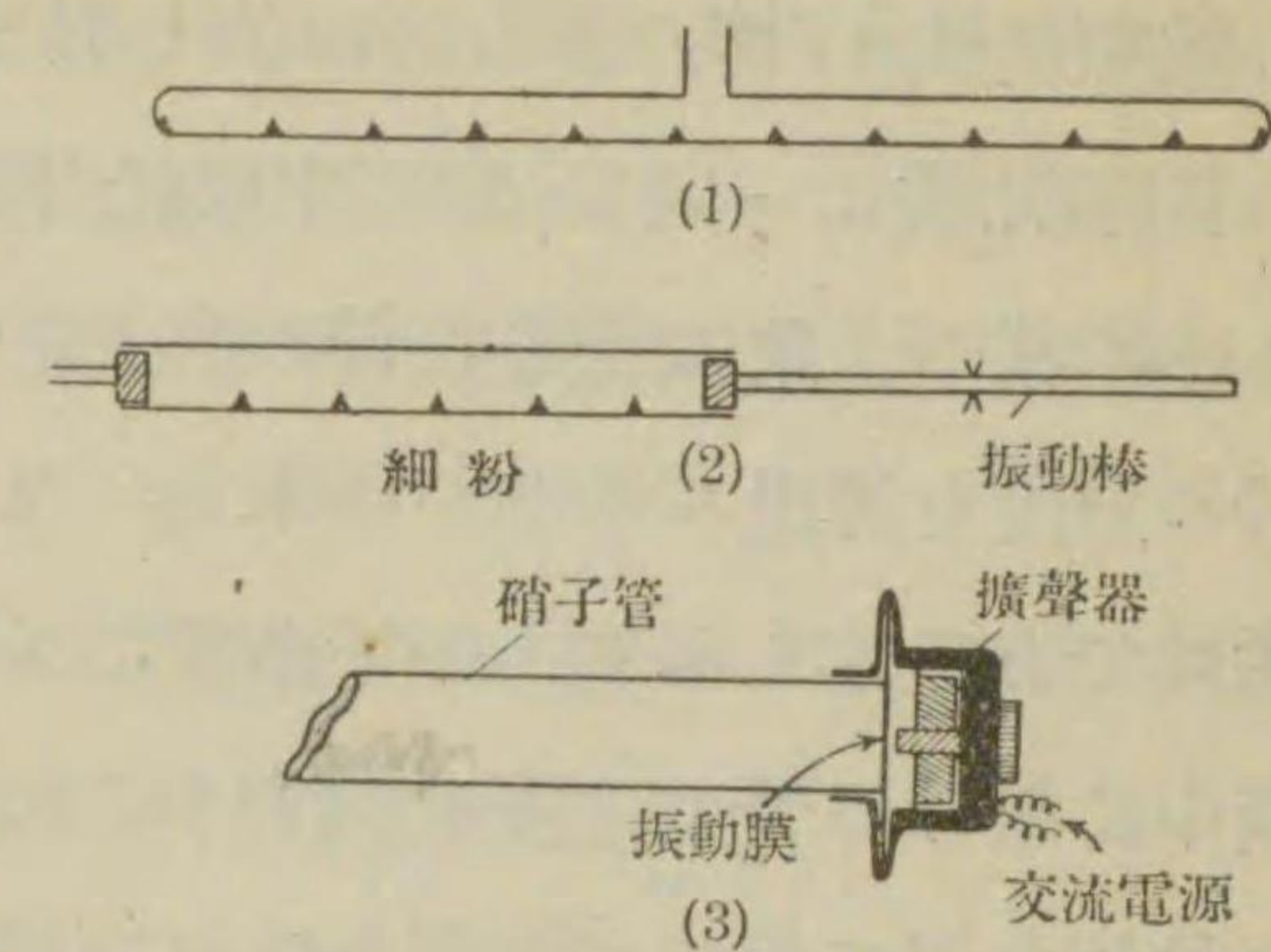
是れを要するに普通の計算には, 大氣中の音の速度は 0°C にて 331 m/秒, 常溫にて 340 m/秒 (或は 1,100 呎) と記憶すればよい。<sup>(1)</sup>

### 16. クントの實驗

クントの實驗, 即ち所謂クント管とは實驗室内で短い管を用ひて音の速度を測定する方法で, 内徑約 5 cm, 長さ約 1.5 m の硝子管中に定常波を生ぜしめるもので, 豫め細粉を管中に入れ空氣の振動の模様を肉眼に見える様にしたものである。管中に定常波を生ぜしめるには, 第 9 圖 (1) に示す様に硝子管自身を濡れた布で摩擦するか, 或は (2) に示す様に硝子又は金屬棒の縦振動を利用するかであるが, 猶一層便利なのは (3) に示す様に受話器若しくは擴聲器を使用するにある。(2) の様に硝子或は金屬棒を使用する場合には

(1) 大氣中の音の速度の測定は此外にも多數あるが International Critical Table VI によればその平均値 (Weighted mean) は 0°C にて 331.45 m/秒である。

其一端に硝子管の内徑より稍、小さいコルク又は厚紙製の栓を附し, 棒は其中點を固く支へ, アルコールを以て<sup>しめ</sup>濡らせた布, 又は松脂を附した<sup>なめし</sup>鞣皮の類を以て摩



第 9 圖

擦し, 縦振動を生ぜしめる。管の長さを此栓によつて加減する時は, 管の長さが音の半波長の整數倍になる時, 定常波が生ぜられ, 細粉は半波長毎に特殊の線條(縞)を生ずる。是れに使用する細粉としてはリコポディウム (Lycopodium) と稱する植物の花粉,<sup>にはとこ</sup>接骨木粉 (Pithdust), 珪酸粉或は是等の代用としてコルク粉が使用される。而して是等の細粉を管中に挿入するには, 細長き<sup>ものさし</sup>尺度の類の上に撒布し, 管中に挿入して, 一様に撒布する。猶音を發せしめる前に硝子管を其軸の周りに四, 五十度廻轉し細粉が硝子壁の斜面に在る様にして置くと, 縞の形成を一層容易ならしめる事が出来る。

クント管内に於て細粉によつて線條(縞)若しくは波紋の形成される模様<sup>に就ては色々議論があるが, 茲に是れを詳しく述べる追はない。</sup>然しながら要するに縞の模様は細粉

の種類に依り、棒の擦り方に依り異なるが、一群の縞と縞との間隔は常に一定で、音の半波長( $\lambda/2$ )に該当するものである。従つて此の長さと言の高さを測定する事によつて音の速度を算出する事が出来る。又此實驗は音が空氣中の縦波である事を示すものである。又クント管は種々なる瓦斯中に於ける音の速度を測定するに利用される。即ち同一の装置を以て管中に空氣を入れた場合と他の瓦斯を充した場合と、音の波長即ち縞の間隔を比較すればよい。

#### 17. 大氣中の音の速度と氣象要素との關係

溫度、壓力、濕度及び風等の氣象要素の中で、音の傳播速度に影響あるは溫度と風とである。

先づ濕度の影響に就て言へば、氣體中の音の速度は上述の通り  $v = \sqrt{\gamma P / \rho}$  で與へられるが、水蒸氣の  $\gamma$  は 1.26 であり、又其密度  $\rho$  は同じ溫度及壓力に於ける乾燥した空氣の密度の  $5/8$  倍であるから、水蒸氣の  $\gamma P / \rho$  の値は同じ溫度及び壓力に於ける空氣に對する値の 1.43 倍となる。従つて音の速度は水蒸氣の存在によつて増加する譯であるが、其影響は極めて僅かで水蒸氣で飽和した  $10^\circ\text{C}$  の空氣中の速度は乾燥した空氣中に於けるより 2~3 呎/秒大なるに過ぎない。

次に溫度及び壓力の影響に就て考へるに、ボイルの法則によれば、溫度が一定ならば一定量の瓦斯の壓力と容積と

の相乗積は一定である ( $PV = \text{const.}$ )。然るに一定量の瓦斯に就ては容積は密度に逆比例するから、一定溫度に於ては  $P/\rho$  は一定である。従つて音の速度は、壓力の影響を蒙る事はない。

次に密度は溫度によつて變化する、即ち  $0^\circ$  及び  $t^\circ\text{C}$  に於ける密度を夫々  $\rho_0$  及び  $\rho$  とすれば

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \alpha t},$$

茲に  $\alpha = \frac{1}{273}$  である。

従つて  $0^\circ\text{C}$  及び  $t^\circ\text{C}$  に於ける音の速度を夫々  $v_0$  及び  $v$  とすれば

$$v = v_0 \sqrt{1 + \alpha t}$$

或は

$$v = v_0 \left( 1 + \frac{t}{546} \right)$$

なる關係が得られる。

今  $0^\circ\text{C}$  に於ける空氣中の音の速度を 33,150 cm/秒 或は 1,088 呎/秒 とすれば  $t^\circ\text{C}$  に於ける速度  $v$  は

$$v = (33,150 + 61 t) \text{ cm/秒}$$

或は

$$v = (1,088 + 2 t) \text{ 呎/秒}$$

となる。

大氣中の音の速度は斯く溫度の高い程大きい。然るに氣

音は通常地上から高所に行くに従つて降るから、音の速度は高所に行くに従つて減少し、爲めに音線は屈折して漸次上方に向ふ。砲聲の様な地上から發する音が比較的高所に達するは、主として斯かる空氣中に於ける音の屈折による。

一般に曇天或は夜間の方が日射ある晝間に比して音が遠距離に達する事は良く知られた現象であるが、是れは晝間は日射に依つて地面に接觸した氣層中の空氣の密度が甚しく齊一を缺き、密度の異なる氣層が相錯雜して存在して居るためである。音波が斯様な氣層を通過する際には不規則な反射によつて其強さを著しく減殺される事は、光が氷の層を通過し得るも、細かく粉碎した氷の堆積を通過し得ないのと同理である。

風のある時は音の傳播の速さは靜穩な大氣中に於ける速さと風速との合成であるから、音が風に伴はれて進む時は速度は増し、風に逆つて進む時は減ずる事は明かである。

然しながら實際の場合には一般に風は地上から高所に行くに従つて其方向も變り、又速さも増すものである。今方向は一定で風速だけが高所に昇るに従つて増す場合を考へてみるに、地上附近に發した音が風と同じ方向に進行する時は、音の速さに加はる風速が高所に行く程増加するため、音の波面の上部は下部に比して速かに進行し、従つて音線は漸次下方に傾いて地上に對して凹形となる。是れに反し

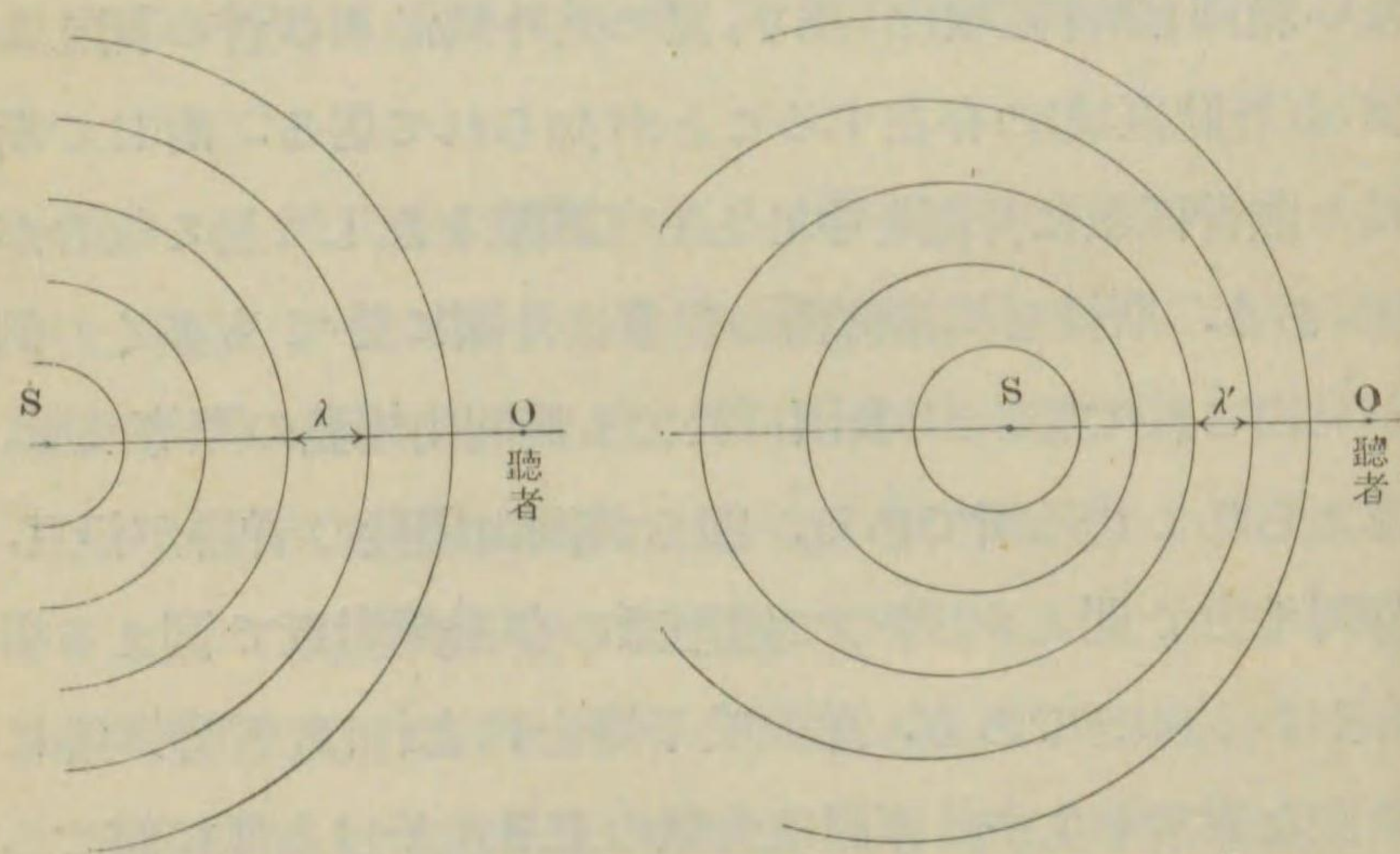
音が風と反對の方向に進む時は音線は漸次上方に傾き地面に對し凸形となる。従つて此場合音は音源から遠距離にある觀測者の頭上遙か上方を通過し去る事となる。音源が地上に近い場合、その風下では風上に於けるより遙かに良く聞えるのは以上の理由によるものである。

### 18. 音の異常傳播

火藥や火山の爆發、或は發砲の際に生ずる様な強い音響は極めて遠距離迄も達するが、此場合各地で其音響を聞いた報告を蒐集し研究した結果によると、一般に斯様な場合、音源の附近で音の聞える範圍(内聽區域)の外側に音の聞えない範圍(無音區域)が在り、更に其外側に再び音の聞える區域(外聽區域)の存在することが知られて居る。而して斯様な無音區域は音源を中心として環状をなして居る場合が屢々ある。斯様な異常傳播の現象は外國に於ても多くの例が見出されて居るが、我國に於ても淺間山爆發の際等に屢々認められて居る所である。即ち淺間山爆發の音響が伊豆、静岡地方で聞えず、却つて遠距離の伊勢灣附近で聞える場合がある如きである。藤原咲平博士によれば、音響傳播に斯様な異常を生ずる原因は大氣の上層に於ける風に歸せられ、而して無音區域が時として環状をなすのは風の速度のみならず方向も亦上層に於て變化して居るためであると云ふ。

## 19. ドップラー効果

音源と聴者とが互に近づき或は遠ざかりつゝある場合には、音の振動数即ち高さが見掛け上變化する。互に近づきつゝある場合には音は高くなり、遠ざかりつゝある時は低くなる事が知られて居る。此現象をドップラー効果 (Doppler Effect) と云ひ、1842年ドップラーが二重星の光に關する論文に於て星が視線の方向に運動して居る時、其色(光の振動数)の變化を來す事を指摘したるにより斯く名づけられたもので、光、音響等總ての波動現象に於て認められる現象である。



第 10 圖

第 11 圖

今媒質は静止して居るものとし、此中に於ける静止音源の出す音の振動数を  $N$ 、波長を  $\lambda$ 、速度を  $c$  とすれば、第 11

節に述べた通り、 $c, N, \lambda$  の間には次の關係がある。

$$c = N\lambda \quad \text{或は} \quad N = \frac{c}{\lambda}$$

此場合、音源  $S$  は第 10 圖に示すやうに波長  $\lambda$  の波を毎秒  $N$  箇宛出して居る譯であるが、若し此音源が静止せず、速度  $v$  を以て聴者に近づきつゝある場合には、第 11 圖に示すやうに波長(即ち同一位相の波面間の距離)が見掛け上  $\frac{c-v}{c}$  だけ小さくなる譯である。即ち  $\lambda' = \frac{\lambda(c-v)}{c}$ 、従つて此場合の振動数は  $N$  より大きく、

$$N' = \frac{Nc}{c-v}$$

となる。即ち音の高さが高くなつた様に感じられる。同様にして音源が速度  $v$  を以て遠ざかりつゝある場合には

$$N' = \frac{Nc}{c+v}$$

となり、音の高さが低くなつた様に感じられる。

又同様にして若し音源が静止し、聴者が是れに向つて  $u$  なる速度で動いて居れば

$$N'' = \frac{N(c+u)}{c}$$

となり、音は高くなり、反對に音源から遠ざかりつゝあれば

$$N'' = \frac{N(c-u)}{c}$$

となり、音は低くなる。

茲に注意を要する事は、音の高さは音源と聽者との相對運動のみによると考へては誤りである事である。何となれば、音源が靜止して居て聽者が音源から音の速度  $c$  に等しい高速度で遠ざかるとすれば ( $u=c$  の場合)、此聽者には何等の音も聞えないが、反對に聽者が靜止して居る場合には音源がいくら高速度で遠ざかつて、聽者には音が聞える筈である。此差異の原因は音の傳播に空氣が媒質として重要な役目をして居る事にある。

ドップラー効果の實例としては汽車や自轉車がすれ違ふ時に、汽笛或は警笛の高さがすれ違ふ瞬間に突然變化する事など、總て音源が大きな速度で運動して居る時に屢々認められるものである。

## 20. 水中の音の速度, 反響測深法

水中に於ける音の速度は既に百餘年前、1826 年にコラドン及びシュツルム (Colladon & Sturm) の二人が瑞西ゼネヴァ湖に於て測定し、 $8^{\circ}\text{C}$  に於て  $1,435\text{m/秒}$  なる値を得て居る。其後多數の人々が主として海中にて測定を行ひ、大略同様な數値を得て居る。

海水中の音の速度は溫度、壓力(深さ)、及び鹽分の量に依り多少異なるが、大凡  $1,500\text{m/秒}$ 、即ち空氣中に於ける約 4.5 倍と記憶すればよい。

**反響測深法** 海の深さを測定する普通の方法は重錘を吊

した繩を船上から海底に達せしめ、繩の長さによつて海深を知るものであるが、船が進行して居る場合には繩は垂直に海底に達しないから精密な測定を行ふ事は出来ない。然るに海中の水壓は深さに比例するから、海底に於ける水壓を測定する事に依つて深さを求める事が出来る。此方法が所謂水壓測深法で、水壓を簡単に測定するためにケルヴィン卿 (Lord Kelvin) の考案に係る “Chemical tube” なるものが屢々用ひられる。Chemical tube とは長さ 2 尺位の一端を閉ざした細い硝子管で、内壁に褐色のクローム酸銀が塗つてある。此管を金屬製の支持器に取り付け、閉ざした端を上にして重錘と共に鋼線の一端に縛り付け、垂直に海水中に沈めて行く。水壓によつて海水は深さに應じて管内に進入して來るが、クローム酸銀は海水中の鹽分と化合して白色の鹽化銀に變ずるから、重錘を海底に到着せしめた後引き上げて見れば管内の空氣の壓縮された量が判るから、従つて海深が算出される譯である。實際に用ひる水壓式測深器では管の支持器に直ちに海深が目盛りしてある。

以上何れの方法に於ても、船の速度が 10 ノットを超え、或は 50 尋 (約 90 m) 以上の深さになると、重錘が海底に達した瞬間を判定する事が困難となり、充分精密なる結果が得られない。而も一回の測定に少くも 3 人の人手と 15 分の時間を必要とし、連續測定を行ふに不便が尠くない。

依つて海中の反響を利用する方法、即ち船底から強い音を發し、是れが海底で反射されて戻つて來る時間を測定して海深を求めようとする案はかなり古くからあつた。是れを反響測深法 (Echo-sounding) と云ふ。船底から音を發してから反響が戻つて來る迄の時間の  $\frac{1}{2}$  に海水中の音の速度を乗じたものが深さとなる譯であるが、海水中の音の速度は前述の通り約 1,500 m/秒であるから

$$\begin{aligned} \text{水深 (m)} &= \frac{1}{2} \times 1,500 \times \text{反響時間} \\ &= 750 \times \text{反響時間} \end{aligned}$$

である。但し精密なる目的には海水の鹽分、溫度等を考慮に入れた音の速さの値を用ひる必要がある。

反響測深法としては反響の戻つて來る迄の時間を測定するのが最も普通の方法で、従つて此時間の測定方法として種々なる考案が行はれて居るが、又反響の強さ或は來る方向を測定して深さを算出する方法もある。反響測深の音源としては可聴音並びに超可聴音何れも用ひられるが、前者は厚い鐵製振動板を電磁氣的に振動させるもので、後者は水晶のピエゾ電氣を利用して發せられる。水晶のピエゾ電氣による方法は佛國ランデュヴァン (P. Langevin) の考案に係るもので、厚さ約 2 mm, 均等の組織を有する小水晶片十數枚を特殊のセメントに依り mosaic 式に繼ぎ合せ、面積約 75 平方 cm の板となし、是れを圓板で挟み蓄電器を構

成し、此水晶振動板の固有振動に等しい約 30,000 サイクルの高壓振動電壓を兩極板に加へ、音 (超可聴音) を發せしめるものである。

此反響測深法によれば現在 1,000 m 迄の海深を測定する事が可能であり、航海用として賞用されて居る。我が郵船秩父丸に設備されてあるものは上記のランデュヴァン式反響測深機である。

### 21. 固體中の音の速度

ヤングの彈性率  $E$ , 密度  $\rho$  なる物質の棒の中の音 (縦波) の速度は  $v = \sqrt{E/\rho}$  に依つて與へられる。依つて今眞鍮の棒に就て音の速度を計算して見るに、此場合

$$E = 10^{12} \text{ ダイン/平方 cm}$$

$$\rho = 8.4 \text{ グラム/平方 cm}$$

であるから、

$$v = 3,450 \text{ m/秒}$$

となり、空氣中に於ける約 10 倍であることが知られる。

固體中の音の速度を測定するには、中央を固定した長さ  $l$  の棒を摩擦して是れに縦振動を起させ

第 5 表 固體中の音の速度

物 質	音 の 速 度
アルミニウム	5100 m/秒
鉛	1320
鐵	5000
銅	3900
眞 鍮	3580
象 牙	3010
硝 子	5950
同	5190

ると(第25節参照),その基音の振動数は  $N = \frac{1}{2l} \sqrt{E/\rho}$  で與へられるから,此振動数  $N$  を測定することに依つて  $\sqrt{E/\rho}$  即ち音の速度が求められる.

第5表に種々なる固體中の音の速度を掲げる.

## 22. 音の反射,屈折及び廻折

音波が違つた媒質の境界面に到達すると反射,屈折の現象を生ずる事は光の場合と同様である. 元來音の場合と光の場合とで最も著しい相違は,其波長が非常に違ふ事である. 即ち光の波長は1mmの數千分ノ一といふ微細なものであるが,音の場合では振動數300ヘルツのもので波長は1m餘といふ大きなものであり,振動數1,000ヘルツになつても猶34cmの波長を持つて居るから,餘程大きな面積がないと音波を十分に反射しない. 面積さへ相當あれば,一見極めて粗な面でも音の波長の大きさに較べれば猶頗る平滑なものであるから良く音を反射する.

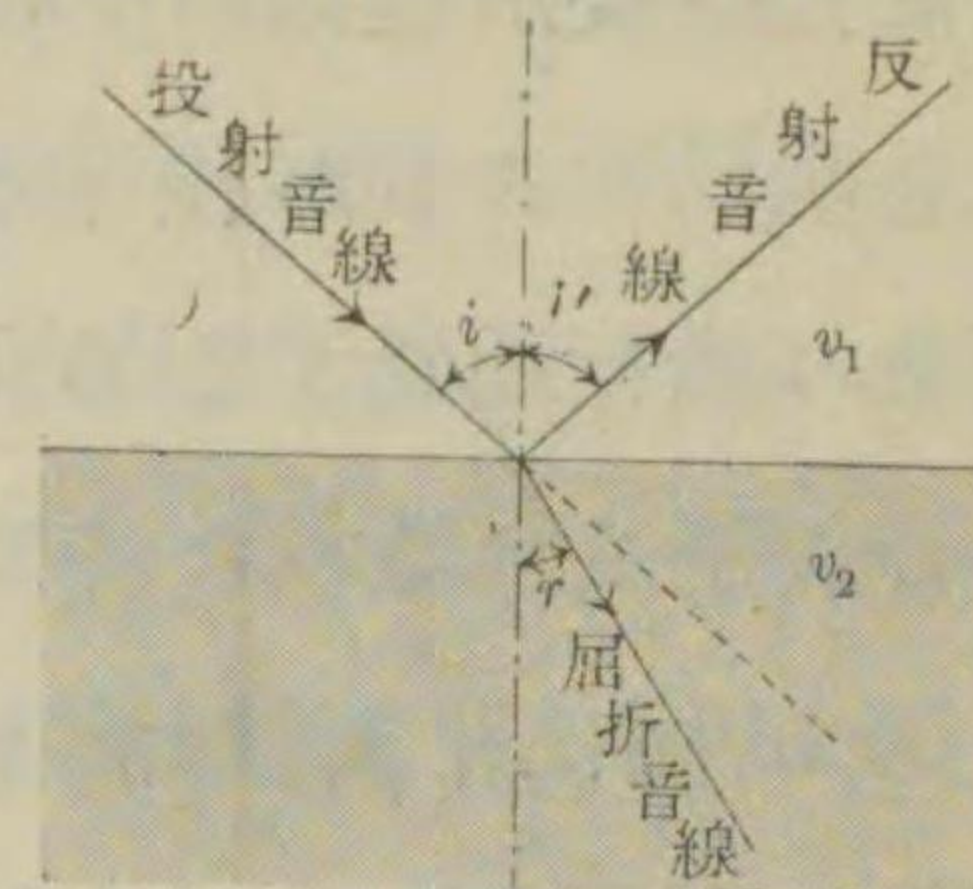
斯様な場合に行はれる音の反射,屈折の法則は全く光の場合と同様である. 即ち(1)反射音線と投射音線とは同一平面上にあり,反射角と投射角とは相等しく,(2)屈折音線と投射音線とは同一平面上にあり,投射角と屈折角の正弦の比は一定である. 此一定なる比を屈折率と呼び,兩媒質中に於ける音の速度の比に等しい. 第12圖に依り,是等反射及び屈折の法則を式を以て表せば次の様になる.

反射の法則

$$i = i',$$

屈折の法則

$$\frac{\sin i}{\sin \gamma} = \mu = \frac{v_1}{v_2}.$$



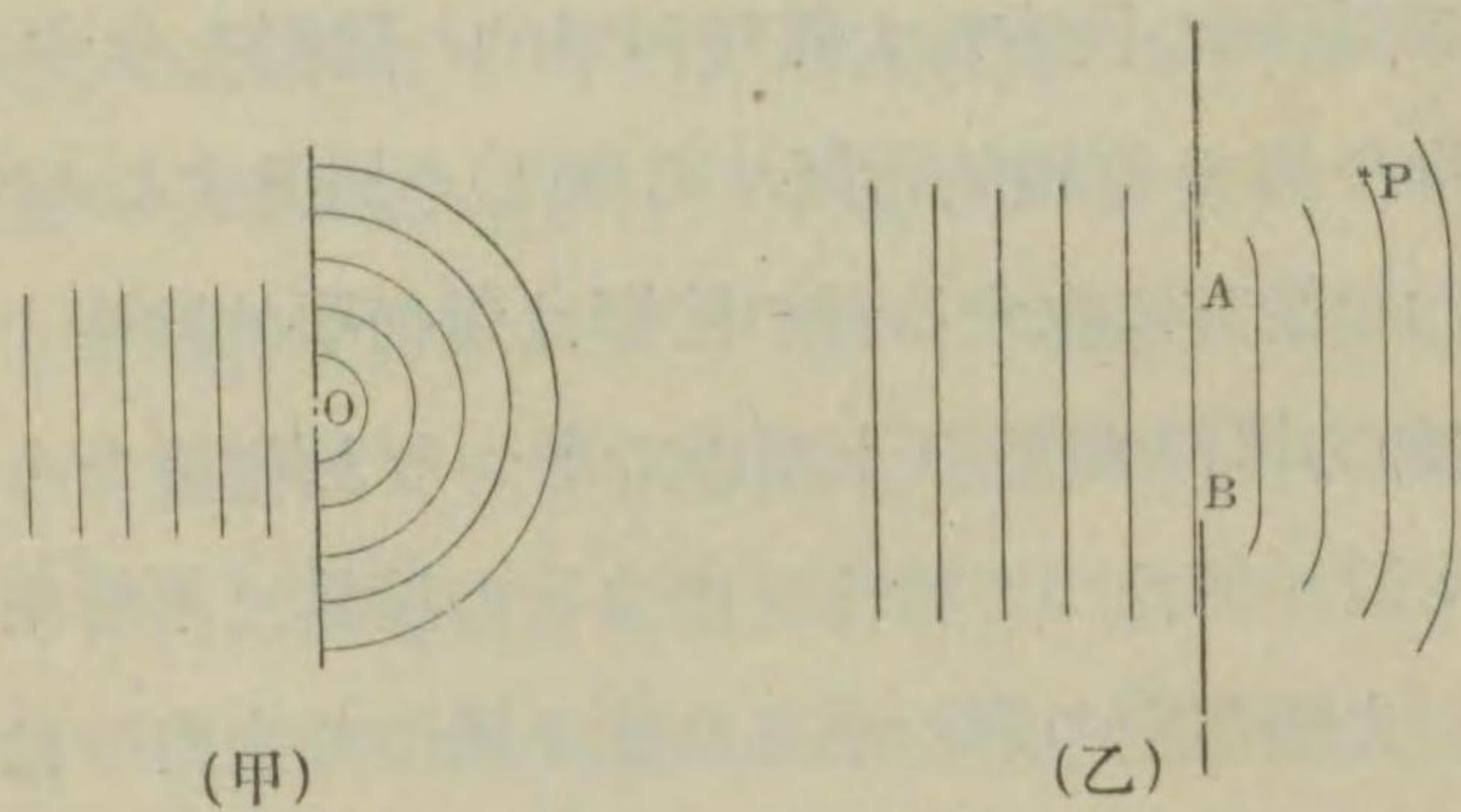
第12圖

茲に  $v_1, v_2$  は夫々兩媒質内に於ける音の速度である.

廻折 音の波長が大きい事に基づく音と光との相違は廻折(Diffraction)の現象に於て殊に顯著となる. 光はその傳播の途中に置かれた障礙物の縁を殆んど直線的に通過するから,障礙物の後方に大體幾何學的の陰影を生ずるが,音は障礙物の縁で直線的行路から著しく屈曲するので,一般に障礙物の後方に生ずる音の陰影は幾何學的陰影より遙かに狭く(即ち單に圖形の上だけで考へると陰になりさうな場所へも波が傳はつて行く),而もその境界は不鮮明なものである. 光線が室の戸の小さな孔を通つて室内にはひつて來る場合には光線は略,その孔の形と同じ廣さで入つて來るが,音が小さな孔を通過して室内にはひつて來る時は殆んど室内の全部に擴がる. 斯く波動が孔を通過する場合或は障礙物の縁に當る場合に直線的行路から屈曲する現象を廻折と云ふ. 而して此廻折なる現象は水面の波,音,光,電磁波等總ての波動に於て認められる現象であるが,光の場

合には波長が短いので特に注意深い實驗に依らなければ是れを明示する事が出来ないが、音の場合には小さな孔や障礙物の縁を通過する場合或は波長に較べて餘り大きくない面で反射される様な時に極めて顯著に現れる。

第13圖は平面波(波面が平面になつて居る波)が非常に大きな面に穿たれた孔を通過する場合に起る廻折の様を示したものである。(甲)は孔の大きさが波長に較べて非常に小さい場合で、孔を通過した後は波の性質が變化して恰も波動が孔を源として新たに出来た様な形になる、即ち孔を中心とする球面波の如き形となつて四方にひろがつて行



第 13 圖

く。此場合本當の源が孔の處にある時と違ふ事は波の強さは四方に一様ではなくて初め波が進んで來た正面が最も強く、是れより遠ざかるに従つて段々弱くなつて居る事である。建物の窓、通風孔等に於て此種の廻折が起る。(乙)は孔の大きさが波長に較べて相當大きい場合、例へば劇場の舞

臺と觀覽席との境界の如き場合で、平面波の中央の一部は矢張り平面波として孔を通過して行く、唯その周邊の近くで波面が僅かに屈曲する。此屈曲の程度は波長と孔の大きさとの割合によつて定まるものである。以上は孔の場合に就て説明したが、衝立の様な一枚の板の場合でも、その縁の處で同様な廻折の現象が起る。

斯く音の場合には廻折の現象が著しいので、第十三章に述べる様な建築物に關する音響的設計に當つても、音が光と同様に反射或は傳播するものと假定すると、時に大なる誤を生ずる事がある。又音を遮斷するに小さな衝立をたてたり、或は音源を口の開いた箱等で覆ふ事が殆んど何等の効果のないのも全く廻折の現象の著しいのに原因する。光を反射、集中させるには拋物線反射鏡が頗る有効であるが、元來斯様な鏡の反射、集中作用は鏡の面積が波長に較べて數倍以上頗る大きい場合にのみ有効であるので、音の場合に同じ目的に拋物線反射鏡を使用するにはその大きさは頗る大なる事を必要とする。従つて直徑1~2mの拋物線反射鏡では低い音に對しては殆んど集中作用はない。



## 第五章 發音體

### 23. 總說

笛, ラッパの類の管樂器の音は管中の空氣の振動に基き, 三味線, ヴァイオリン等の絃樂器の音の源は絃の振動にある。又木琴, 拍子木等の音は棒の振動によつて發せられ, 鼓, 太鼓の類の打樂器の音は強く張つた膜の振動によるものであり, 釣鐘の音は曲つた板の振動によつて出るものである。依つて斯様な空氣柱(管中の空氣), 絃, 棒, 膜, 板等を發音體と云ふ。而して是等發音體の性質の理論即ち絃, 棒, 膜, 板或は管中の空氣の振動等の理論的研究は, 既に數十年前に殆んど餘蘊なき迄に研究され, 其結果はレイリー卿, ラム, クランドル等の書籍に<sup>(1)</sup>詳細に述べられてある。

而して音響學は所謂“電氣音響學”として最近躍進的の進歩を遂げ全く面目を一新したが, 是等の進歩は主として實驗及び應用的方面に於てであつて, 音響學の根本とも言

(1) Lord Rayleigh, Theory of Sound, 2 volumes.

Horace Lamb, The Dynamical Theory of Sound.

Irving B. Crandall, Theory of Vibrating Systems and Sound.

以上の書より平易なものとしては:

Edwin H. Barton, A Text-Book on Sound.

ふべき振動の理論に就ては多くの進歩は見出されない。従つて今日音響學の絢爛たる發展の中に於てもレイリー卿の‘Theory of Sound’は依然として不朽の名著であり, 是れを稍、簡略にしたラムの‘Dynamical Theory of Sound’は少しも其價値を減少されるものではない。依つて詳細の事項は是等の書籍に譲り, 茲には以上述べた様な各種の發音體の性質を理解し, 又各種の實驗, 測定を行ふに必要な要點のみを述べるに止める。

### 24. 絃の横振動

絃の横振動即ち長さ $l$ に直角の方向に於ける振動を起させるに三つの方法が在る。その第一は絃を弾じく方法で, 實際の樂器としては三味線, 箏, ハープ, マンドリン等に於て行はれるものである。第二は絃を槌を以て叩く方法で, ピアノに於て行はれるもの, 第三は絃を弓を以て擦る方法で, 胡弓及びヴァイオリン族の樂器等に於て行はれるものである。

絃の横振動の性質即ち倍音の現はれ方等は以上の起動方法に依つて大に異なるものであり, 従つて是等の樂器の音色の相違を生ずる根本的原因等も詳しく明かになつて居るが, 茲にはその一々に就て詳しく述べる違はないから, 主として基礎的性質のみを述べる事にする。

先づ長さ $l$ の二點間に張力 $S$ を以て線密度(單位の長さ

の質量)  $\sigma$  の絃を張り、此絃の一端に近い點をはじいて振動させた場合の基音及び上音の振動數を求めんに、今  $\lambda$  を波長、 $N$  を振動數、 $v$  を傳播速度とすれば一般に

$$N = v/\lambda$$

なる關係が在り、又此絃の場合には

$$v = \sqrt{S/\sigma}$$

である。

此場合はじいた最初の瞬間の絃の形が一つの方向に傳はり、一端で反射されて絃の變位が逆になり、再び他の端で反射され初めて原形に復する。即ち波動が絃の長さの二倍を傳播して初めて原形に復するのであるから、此間の時間が正に振動の週期であり、其逆が振動數である。

依つて基音の振動數  $N_1$  及び波長  $\lambda_1$  は次の式で與へられる：

$$N_1 = \frac{v}{2l} = \frac{1}{2l} \sqrt{S/\sigma}, \quad \lambda_1 = 2l.$$

即ち絃の横振動の振動數は

- (i) 絃の長さに逆比例し、
- (ii) 張力の平方根に正比例し、
- (iii) 密度の平方根に逆比例する。

絃の振動に關する是等の法則は總て絃樂器に於て應用されて居る所である。即ちヴァイオリン、三味線等に於ては

何れも指頭を以て、所謂<sup>かんどころ</sup>勘所を押へ絃の振動部の長さを調節して、同一の絃から種々の高さの音を出し、又絃の張力を變化して高さを加減する事は周知の通りである。又ヴァイオリンの G 線に銀線を巻き、ピアノの低音部の絃は鋼線の上に銅線を巻いたものを用ひるのは、何れも絃の彈性を變ずる事なく密度を増大せんが爲めである。

次に絃の其他の振動様式を考へるに、二等分點を節として二つの部分に分れて振動する仕方、三等分點を節として三つの部分に分れて振動する仕方、三

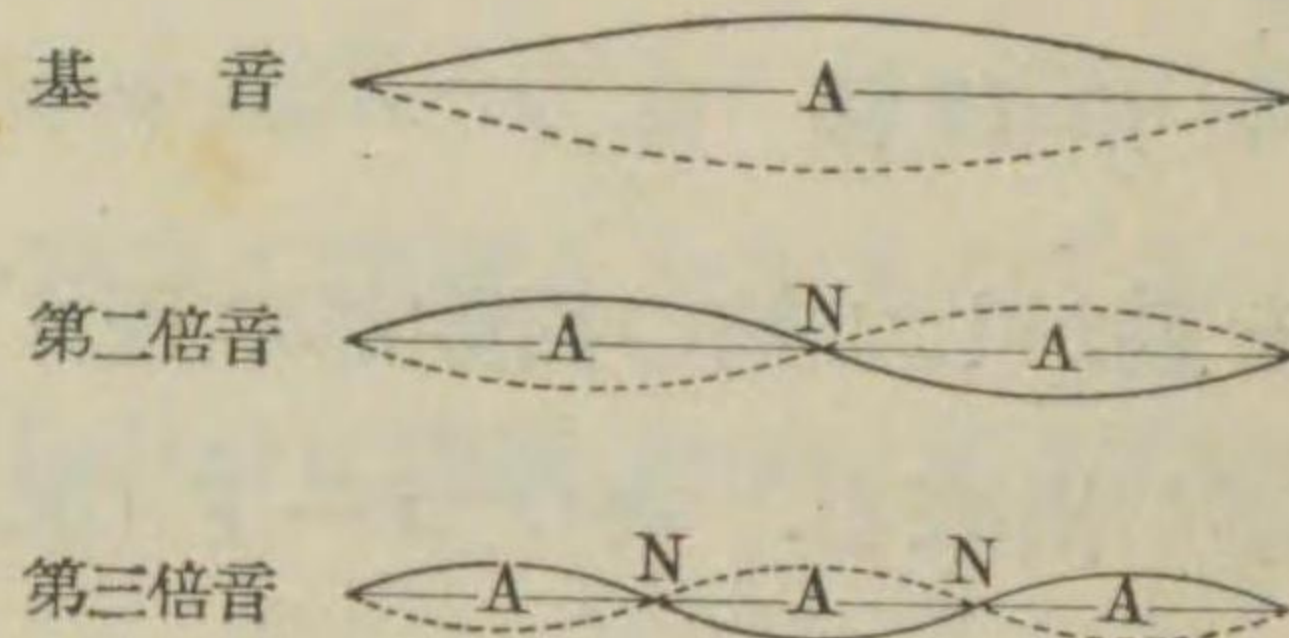
等分點を節として三つの部分に分れて振動する仕方等が可能であるから、 $N_2, N_3, N_4, \dots, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \dots$  等を夫々上音の振動數及び波長とすれば、明かに

$$N_1 = \frac{N_2}{2} = \frac{N_3}{3} = \frac{N_4}{4} = \dots$$

$$2l = \lambda_1 = 2\lambda_2 = 3\lambda_3 = \dots$$

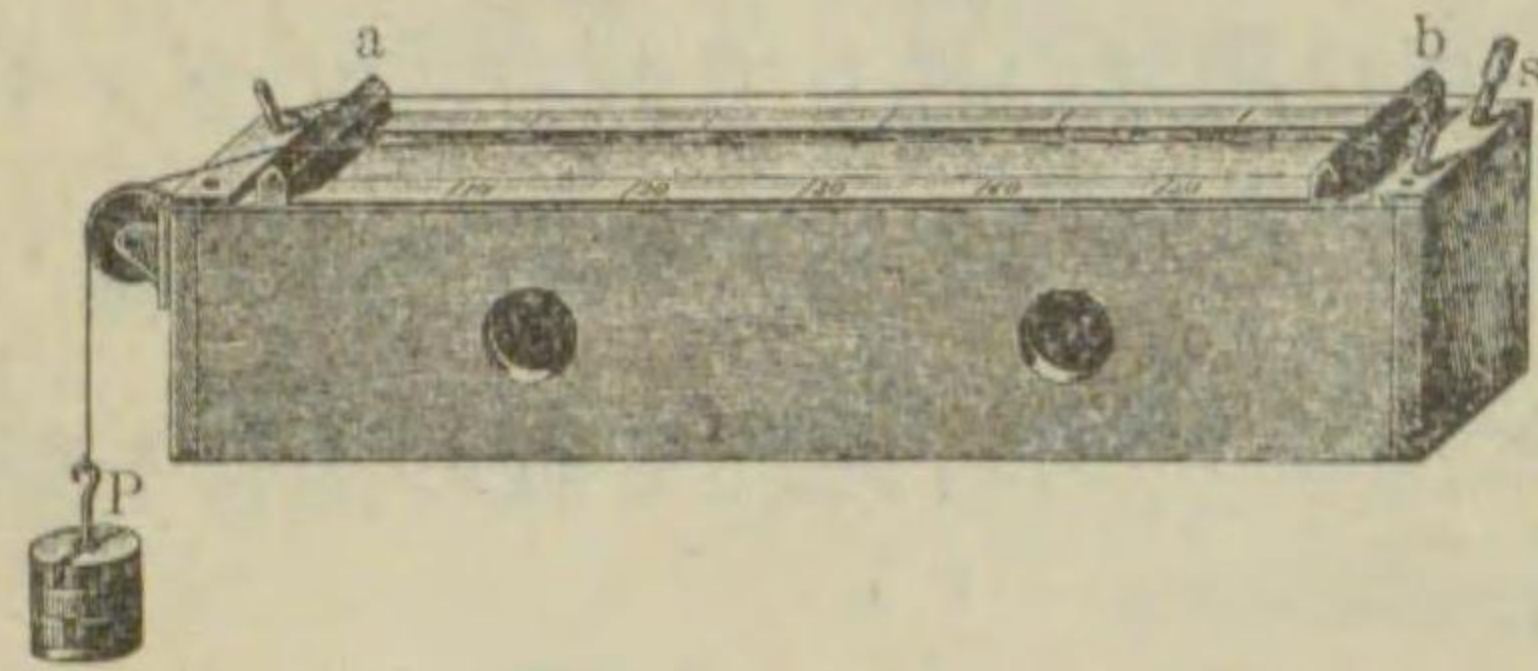
である。

即ち絃の横振動に於ては部分音は、調和倍音であり、且つ奇數、偶數總ての倍音が現れる。而して實際の絃の振動に於ては一般に是等色々な振動様式が同時に起り、色々な倍音が基音に交じつて現れるものである。



第 14 圖 絃の振動様式

**モノコード或はソノメーター** モノコード (Monochord) 或はソノメーター (Sonometer) は音響學の實驗に屢使はれる



第 15 圖 モノコード

一種の箏で、二箇の柱(駒)の上に金屬線を張り重錘若しくは發條で絃に張力を加へたものである。駒を動かして絃の振動部の長さを加減して任意の音に合わせる事が出来る。モノコード(單一絃の意)とは稱するが、第 15 圖に示す様に通常第二の絃を備へ、一方の絃の長さ及び張力を一定にし高さの標準として使ふもので、上に述べた様な絃の振動の諸性質は總てモノコードで實證される。

但し絃の振動數を表す前記の式は高さの絶對値を表すものとしては嚴密ではない。絃の張力は駒の兩側にて完全に等しくないから、是れを精密に測定する事は困難であり、又絃の剛性の影響で振動部の長さが駒と駒との間隔と僅少の差があり、又駒が完全なる剛體でないために絃の振動數に影響を及ぼす。

次に均しく絃の横振動でも起動方法による倍音の現れ方の相違、従つて音色の相違に就て少くし述べよう。

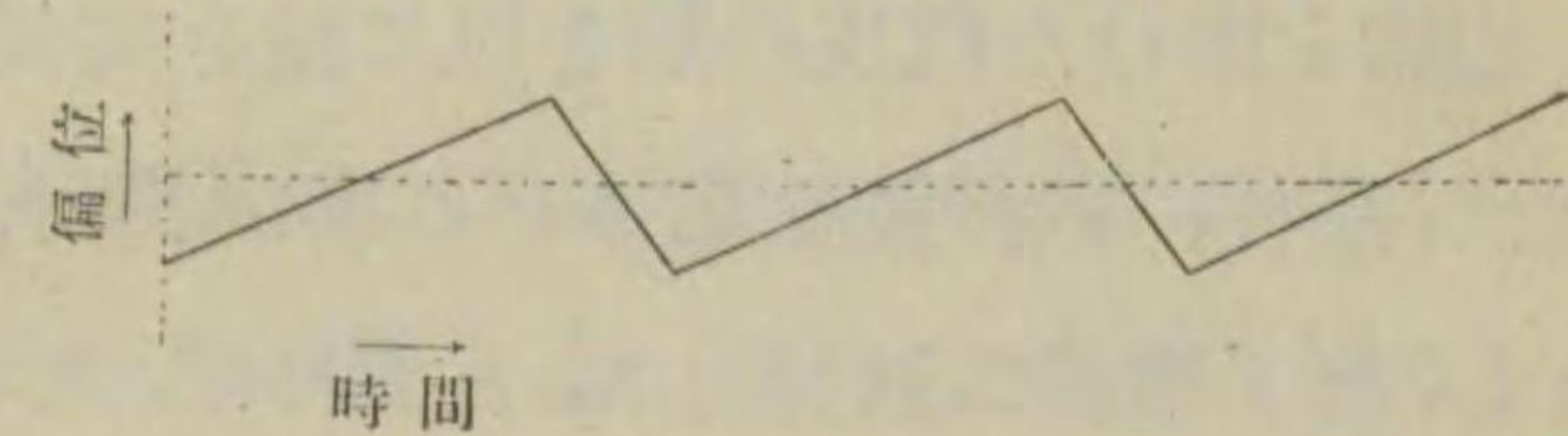
ピアノに於ける様に打撃によつて絃を振動させる場合には絃をはじいた場合に比して高次の倍音迄現れる。然るに

一般に高次の倍音が餘計現れると音が粗野になるから、ピアノでは堅い槌で絃の一點を叩く代りに柔いフェルトを以て被はれた丸い槌で絃の或る長さに互つて衝擊を與へる。且つピアノの低音部及び中音部に於ては製造者の多年の經驗に基いて絃長の  $\frac{1}{7}$  乃至  $\frac{1}{9}$  の點を叩いて、第 7 倍音以上が現れない様に造られて居る。

又胡弓或はヴァイオリン族の樂器のやうに弓を以て絃を摩擦する場合には絃は頗る特殊の振動をなすものである。

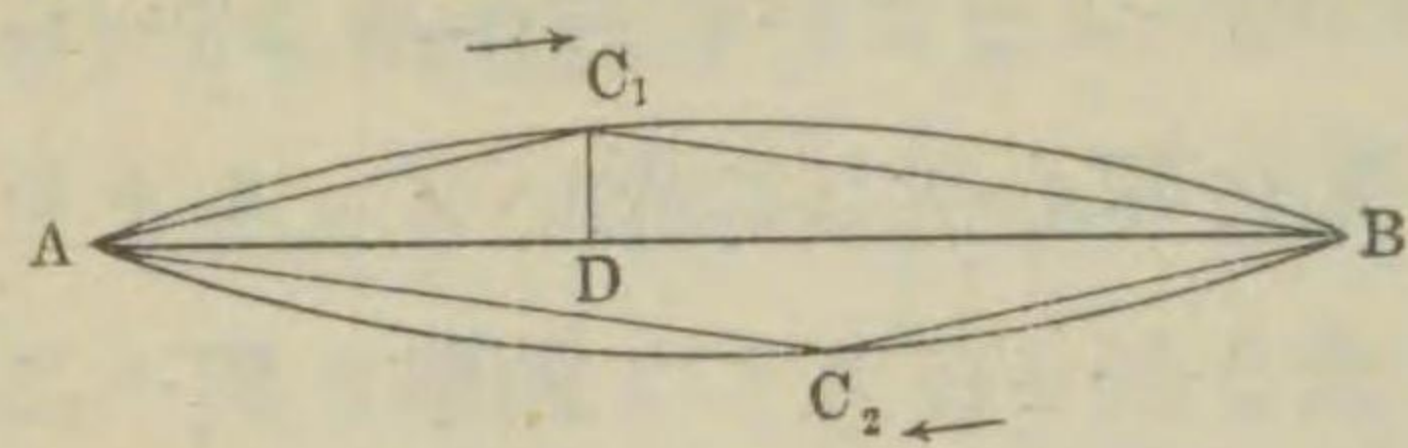
ヘルムホルツ (H. v. Helmholtz) は理論並びに振動顯微鏡

に依つてヴァイオリンの絃の振動を研究したがその結果に依れ



第 16 圖

ば、絃の一點は第 16 圖に示す様に直線運動をなす。此結果を考へてみるに絃は弓に引かれて漸次靜止の位置(圖に點線を以て示してある)から遠ざかるが、遂に其彈性によつて弓を離れ(一般に引かれる時と違つた速さで)前と反對の方向に動き、靜止の位置を越え反對側に行き、再び弓の他の部分に捕へられて同一の運動を繰り返すものであらう。以上は絃の或一點の運動の有様であるが、此場合に絃全體は第 17 圖に示す様な運動をする。即ち振動の各瞬間に於て絃の形は頂點が一組の拋物線上に在る三角形をなす。



第 17 圖

絃が斯様な振動をなす結果として、是れに依つて生ぜられる音波の形も亦鋸齒状を呈する筈であるが、實際の樂器の音に於ては胴の影響其他に依り波形は大體に於て鋸齒状ではあるが頗る複雑な形を呈するものである。斯くしてヴァイオリン族の樂器の音は一般に頗る高次の倍音迄も含んで居るものである。

### 25. 絃及び棒の縦振動

樹脂を附けた鞣皮の類を以て絃を其長さの方向に摩擦すれば、是れに縦振動を起させる事が出来る。絃の長さを  $l$  とし、第  $i$  倍音の波長を  $\lambda_i$  とすれば、次の關係が在る：

$$2l = \lambda_1 = 2\lambda_2 = 3\lambda_3 = \dots \quad (1)$$

又  $E$  を絃のヤングの彈性率、 $\rho$  を密度とすれば、絃の中の音の傳播速度  $v$  は

$$v = \sqrt{E/\rho} \quad (2)$$

にて與へられ、従つて振動數  $N_i$  は

$$N_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{E/\rho}, \quad (3)$$

$$N_i = iN_1 \quad (4)$$

である。

此  $v$  の値は頗る大きく、従つて一般に縦振動の音は同長

の絃の横振動の音に比して頗る高い。従つて絃の縦振動にて中音部の音を發せしめるには、長さ數  $m$  の絃を使用することが必要である。かの初心者 of 弾くヴァイオリンの音が屢々所謂鋸の目立式の不快なる音となるは、主として弓の取扱方不良にて弓が絃に直角ならざる爲め、絃の縦振動を伴ふに依る。

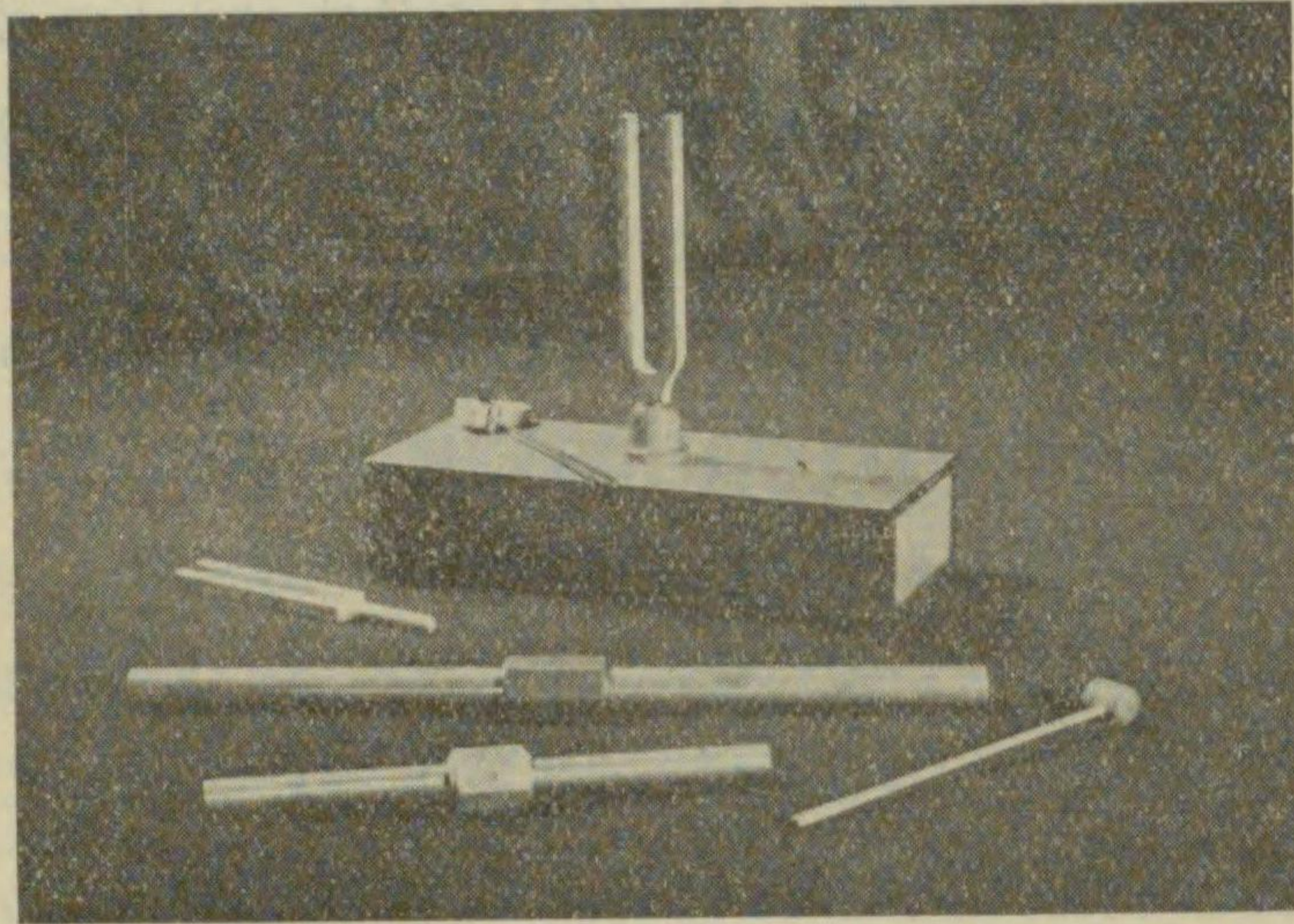
耳鼻科醫が最高可聽界限を測定するために使用するモノコードは、長さ 30 cm 許りの鋼絃を摩擦して縦振動を起し振動數 20,000 ヘルツ程度に至る高音を簡單に出すものである。

縦振動に就て更に注意すべき事項は、(3) 式に依つて明かなる様に、音の高さが絃の張力及び太さに無關係である事である。

また是等 (3), (4) 兩式は棒の縦振動の性質をも表す。

普通の音叉では三、四千ヘルツ以上の高音を出す事は容易くないが、斯様な高音は棒の縦振動を利用して簡單に出す事が出来る。太さ約 2.5 cm, 長さ數十 cm のデュラルミン或はアルミニウム等の棒の中點を支へ、その一端を木槌にて叩けば、棒の長さに應じて任意の高音が得られる。是れは音叉でなくして音棒とも云ふべきものである。斯様な音棒の音は縦振動に依つて生ぜられる結果として、普通の音叉の様な横振動の場合と違ひ抵抗が少ないので非常に長く

繼續する。但し音叉の場合には第一上音は基音の6倍餘の振動數を持つた極めて高いものであるから、極めて強く叩かない限り現れる事はないが、第18圖に示した様な中心を



第18圖 音叉及び音棒

支へた音棒では中心は常に節であり、従つて棒の全長の $\frac{1}{2}$ が $\frac{1}{4}$ 波長に該當し、理論上奇數倍音が容易く現れる筈である。然し10,000ヘルツの音棒では第一上音は30,000ヘルツとなり可聽界限の外に出るから邪魔にはならない。

26. 棒の横振動

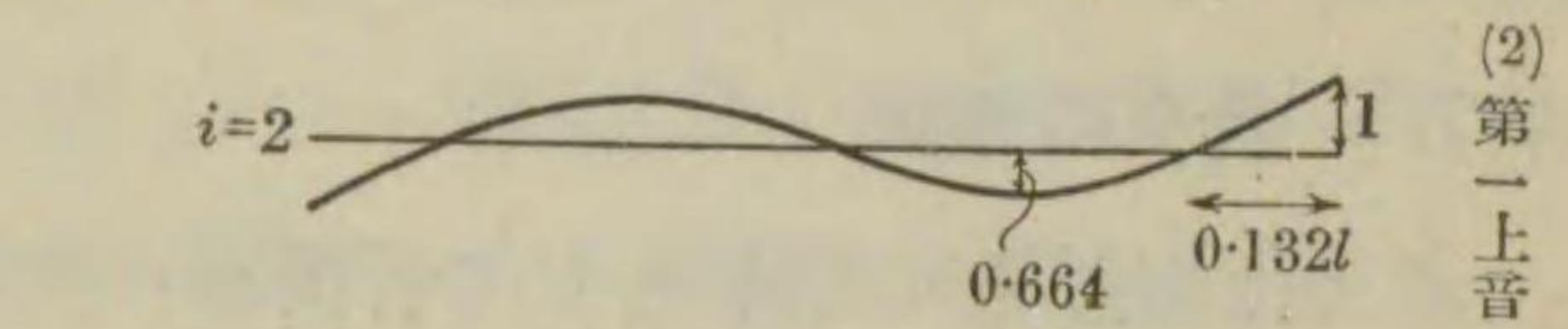
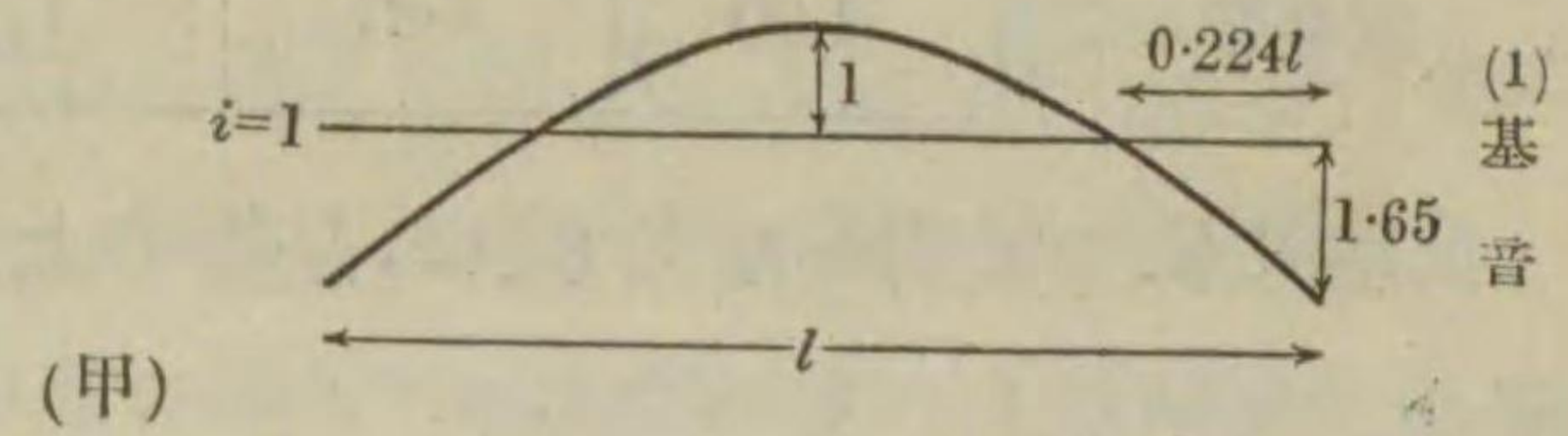
棒の縦振動は實際問題として現れる事は稀であるが、横振動は屢々起り又色々の目的に利用もされ、従つて單に棒の振動と言へば横振動を意味すると考へてもよい位である。

棒の横振動は棒を保持する方法によつて次の三つの場合

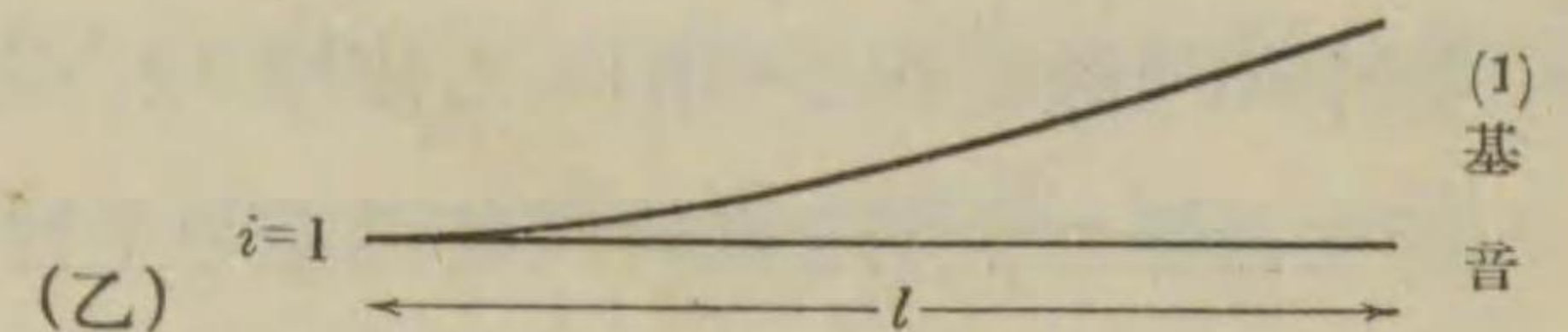
に區別される。第一は棒の兩端を固定する場合、第二は一端を固定し、他の端を自由に振動させる場合、第三は棒のどの點も固定する事なく適當な二點で支へ兩端は共に自由に振動させる場合である。然し何れの場合に於ても、棒の横振動の特色は弦の振動或は棒の縦振動の場合と異り、上音が總て基音の振動數に對して非整數倍の振動數を持つて居る。即ち弦の振動及び棒の縦振動に於ては上音は倍音であるが、棒の横振動の上音は倍音ではない。

第19圖は(甲)兩端自由の場合、(乙)一端固定した場合に

棒の横振動の基音及び第一上音の振動の有様を示すものである



兩端自由



一端固定

第19圖 棒の振動様式

が、(甲)の(1)は棒の兩端より全長の $\frac{1}{5}$ より稍、内側(詳しく云へば全長の0.22倍の點)を支へて棒を振動させた場合に、是等の支點だけが節

(振動しない點)となつて振動して居る場合、即ち基音の振動を現す。(2)は第一上音で、その振動數は基音の振動數の2.75倍である。猶その他の上音の振動數を示せば次表の如くである：

第 6 表 棒の横振動に於ける部分音の振動數

兩端自由(二點で支へた場合)				
部分音	基音	第一上音	第二上音	第三上音
振動數の比	1.00	2.75	5.4	8.9
一端固定の場合				
振動數の比	1.00	6.27	17.6	34.4

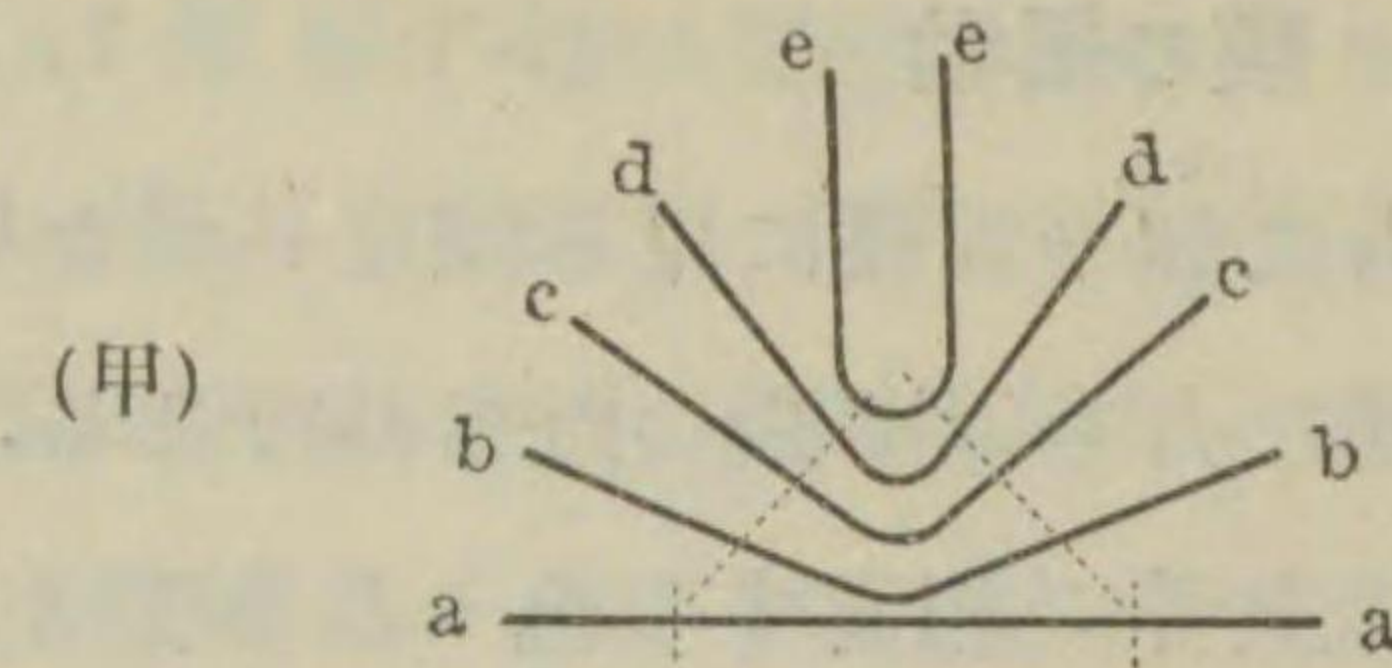
此表に依つて明かなる様に、是等の上音の高さは倍音の場合より早く上るものである。

27. 音叉の振動

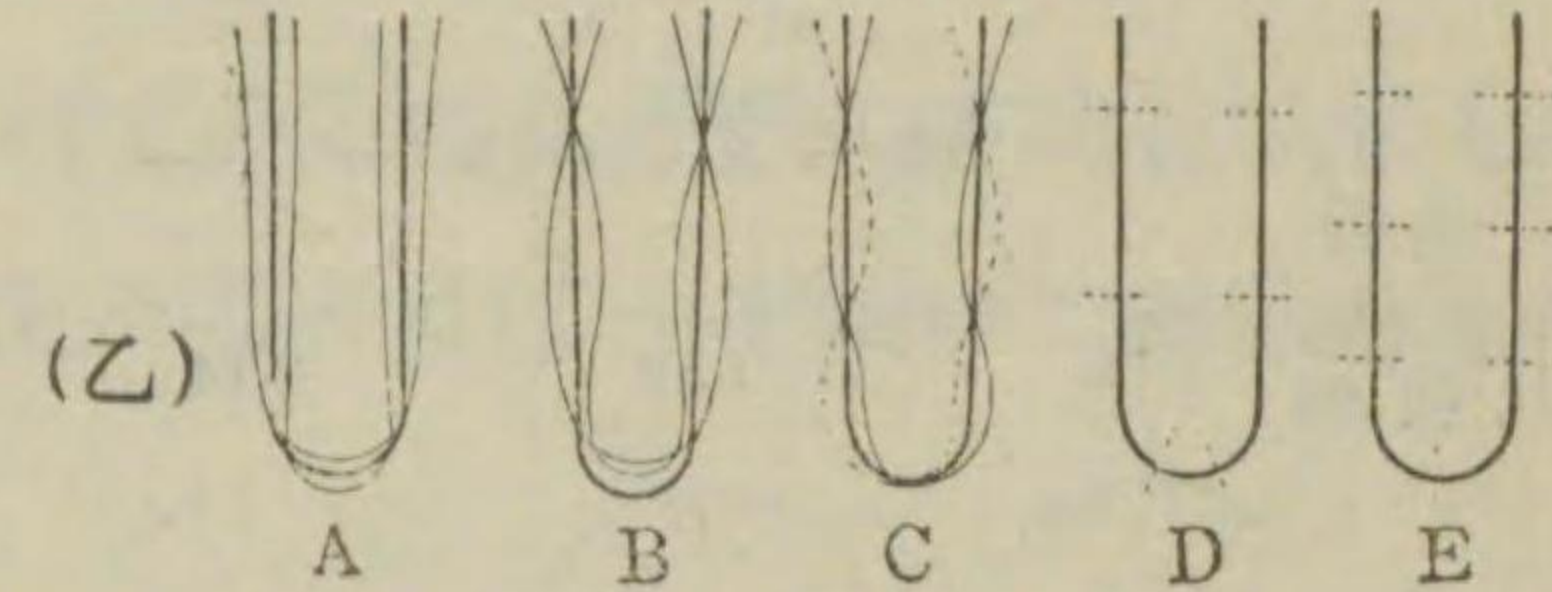
音叉は振動數の標準として音響學の實驗には缺くべからざるものであるが、近頃は是れによつて電氣回路を調節して標準周波數を得る目的にも使用される。

音叉は棒の中間を曲げて其兩端を平行にしたものと看做す事が出来る。兩端を自由に支へた棒の振動の節は棒の兩端から棒の長さの 0.22 倍の點にある事は前に述べたが、斯かる棒を屈曲するに従つて是等二つの節は漸次相接近するものである。第 20 圖(甲)は此模様を示すもので、是

れは基音に相當するものである。而して第 20 圖(乙)は音叉の上音の節及び振動の模様を示す。



音叉は純粹な音を出すものとして知られて居り、是れを軽く叩いた場合の音は基音丈けで一つも上



第 20 圖

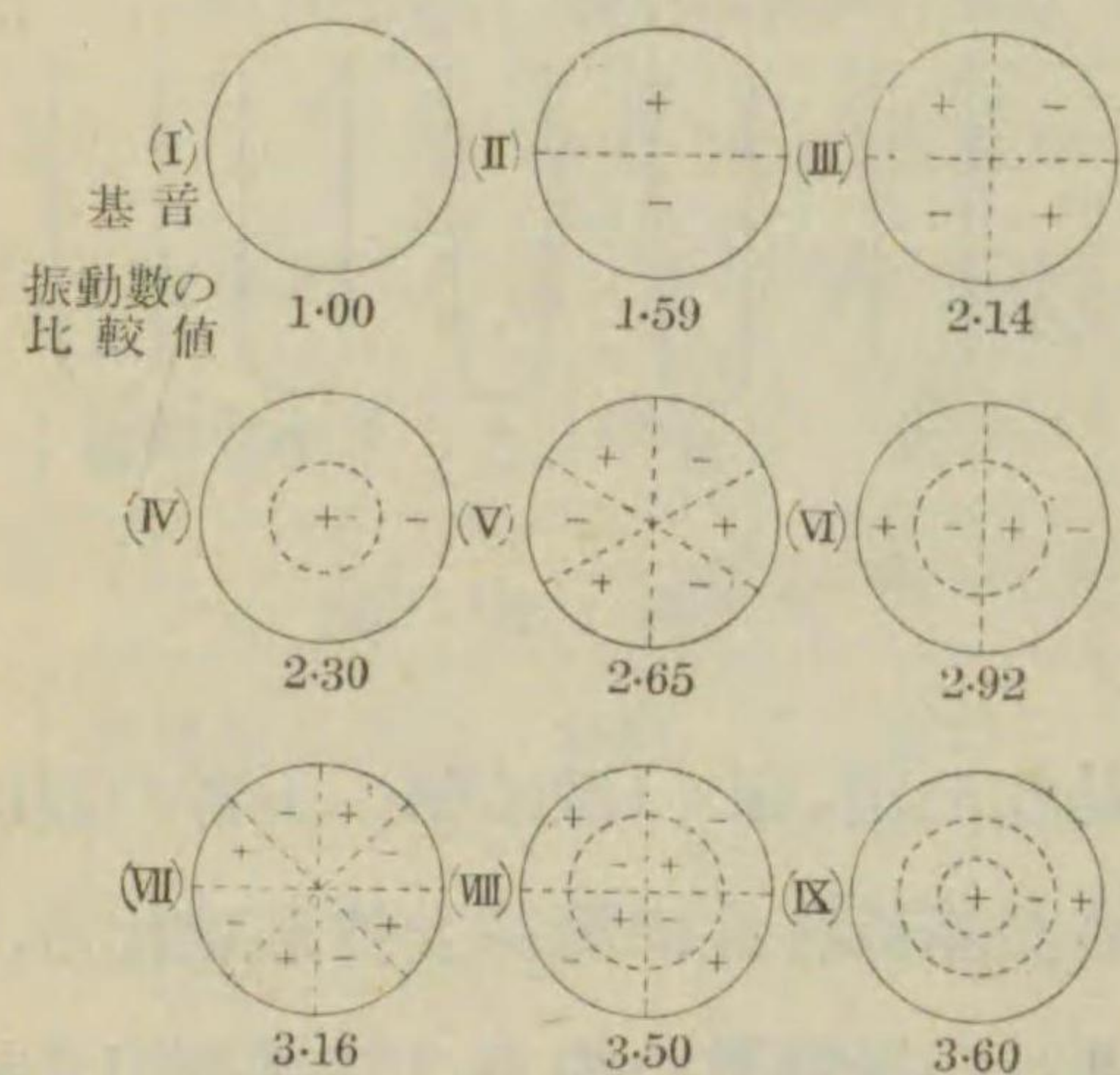
音を含まない。然るに是れを稍強く(殊に第一上音の腹に當る附近を)叩くと、初めて基音と共に第一上音が現れる。此第一上音の振動數は基音の振動數の約 6 倍に相當し、基音とは相當隔つて居るから、音叉を強く叩いた場合、第一上音の交じつて居る事は耳によつて容易く認められる。

音叉の振動數の溫度による變化 音叉の振動數は其寸法、密度及び彈性に關係するものであるから、溫度の變化の影響を受ける。但し鋼鐵音叉の振動數の溫度係數は微小なもので、音樂等に於ては無視して差支ないが、嚴密な實驗では次の式によつて更正する。 $N_t, N_0$ を夫々  $t^\circ$  及び  $0^\circ\text{C}$  に於ける鋼製音叉の振動數とすれば、

$$N_t = N_0(1 - 0.000112t).$$

### 28. 膜の振動

膜とは鼓や太鼓に見る様な一様な厚さの膜をその周邊から一様な力を以て張つたものである。絃や棒の振動に基音の外に上音に相當する色々な振動が在つて、實際の振動に



第 21 圖 膜の振動様式

於ては夫等幾多の振動が相交じつて現れる様に、膜の振動に於ても亦多種多様の振動様式がある。第 21 圖は夫等色々な振動様式を示すもので、その中で最も簡単なものは言ふ迄もなく (I) に示した様に周邊が節となつて膜全體が一つとなつて振動する仕方で、是れが基音に相當する。次に第一上音である (II) は周邊と唯一つの直徑とが節線 (振動しない線) となり、左右の半分半分が交互に上下に (膜が水平に張られてあるとして) 振動する仕方で、其振動数は基音の 1.59 倍である事が理論的に算出されて居る。第三音は周邊の外に二つの互に直角になつて居る二本の直徑が節線となり膜は四つの部分に分れて夫等が交互に對稱的に上下に振動するものである (第

21 圖 III)。第四音は第 21 圖 IV の様に周邊の外に是れと同心の圓が節線となるものである。而して其振動数は基音の 2.30 倍であり、且つ理論的計算に依れば此節線たる圓の直徑は膜の直徑の 0.436 倍である。以下第五音、第六音等漸次頗る複雑なる振動となる事は圖に示した通りである。此圖に +, - の符號を付けてあるのは振動の方向を示すもので + を付けた部分が上る場合には - を付けた部分が下るのである。

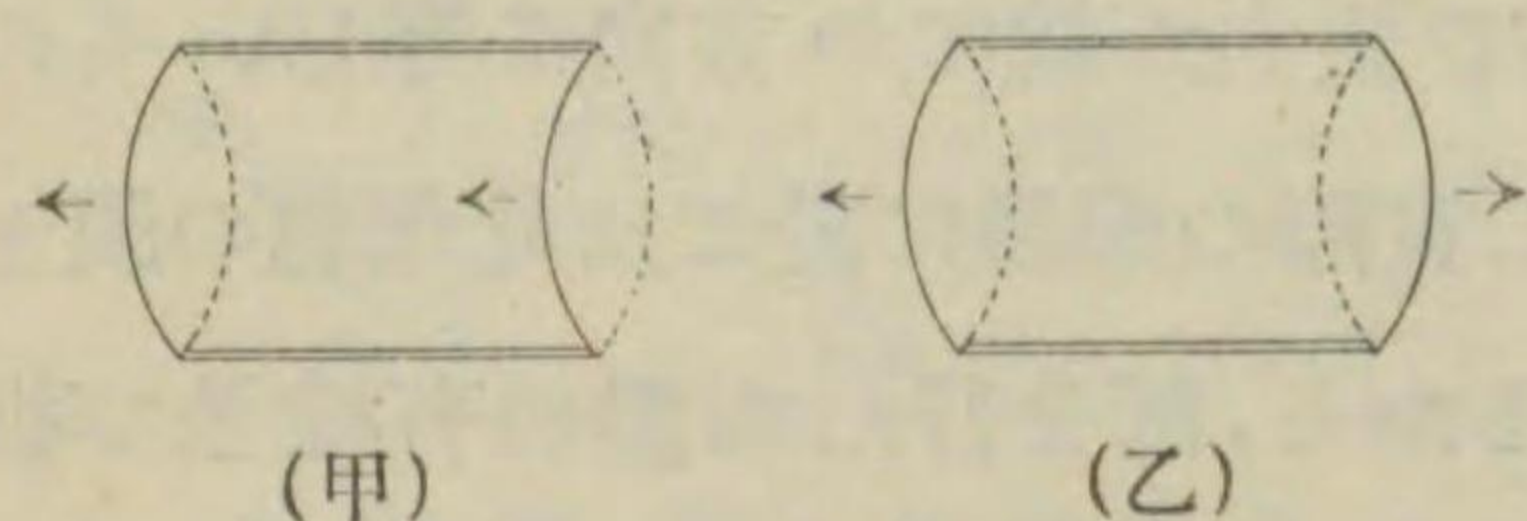
以上のように理論的に膜の振動の有様を算出するには、膜を理想の膜、即ち全部等質で完全な可撓性を有し非常に薄いもので、膜の總ての點で張力が總ての方向に等しいものであると假定する。然し實際の樂器に於ては此理想の膜とはかなり違ふものであるから、部分音の振動の有様及び振動数は此圖に示した算出の結果と多少の相違を免れない。且つ實際の樂器では唯一枚の膜を使用するものは日蓮宗徒の用ふる團扇太鼓位に止まり、普通に用ひられる太鼓、鼓の類では何れも胴があるので事情が頗る複雑になる。依つて次に斯様な太鼓の振動を説明しよう。

### 29. 太鼓の音, 聯成振動

太鼓には我國にも雅樂に用ひるもの、俗樂に使ふもの其他陣太鼓、團扇太鼓等色々な種類のものがあるが、西洋にも大きな鍋形の胴の上面に皮を張つたケトル・ドラム 或は

ティムパニーを始めとして種々なものがある。然し是等色色な太鼓の中で、その音の性質が複雑で理論的に最も興味のあるのは、木製中空の胴の両面に獸皮を張つた大太鼓の音である。依つて茲に斯かる太鼓の音の性質に就て著者の研究した結果の要點を述べよう。

太鼓の音の主要部分は、叩いた皮と叩かない方の皮即ち裏皮との両方の振動が、胴内の空氣で結合された所謂聯成振動 (Coupled oscillation) に依つて生ぜられるものである。今太鼓の両方の膜に錫箔の細いバンドを貼り、是れを一つの電極として電氣的方法で、兩膜の振動の様を同一

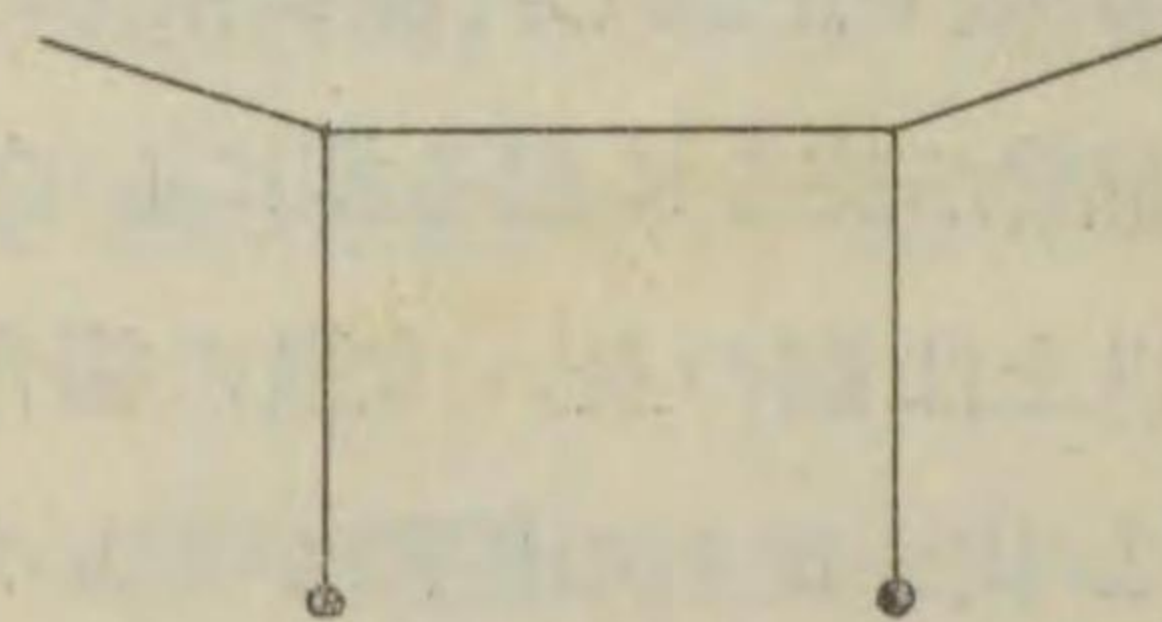


第 22 圖

のフィルム上に記録して調べてみると、先づ叩いた極の初めには表皮は凹み、裏皮は凸出し、第 22 圖 (甲) に示した様な振動が起るが、兩方の皮の振動の時期 (或は位相) が段々ずれて、後には (乙) の様に兩方の皮が同時に凹み、若しくは凸出する振動となることが認められる。(甲) の場合には兩方の皮は同じ方向に振動し、(乙) の場合には反對の方向に振動して居る譯である。而も斯る聯成振動の特色として、兩振動系 (太鼓の場合なら皮) の自己振動が相等しいか或は極めて似寄つて居る場合には振動の勢力は一方の振動系から他の振動系に傳は

り、又暫時の後には元の振動系に戻つて來るもので、斯様な勢力のやり取りが何回も行はれ、時間的には一種の唸りの現象を呈すべき事は一般に聯成振動の性質として理論的に證明されて居り、また次に説明する様な簡単な實驗によつても容易に示される。

第 23 圖に示したものは二つの大體等しい振子を水平の絲に吊り下げたもので、振子の一つを手で少し許り静止點から動かした後、離して振動させてやると、振動は初めは大きい段々弱つ



第 23 圖

て來、今度は他方の振子が獨りで振動を始め、その振動は一旦増大した後漸次弱つて來ると、又初めの振子が振れ出し、而も斯様な振動の起伏、消長が數回繰返して行はれることが認められるが、猶此際兩振子の振動の方向を詳細に觀察してみると、時として一致し、又時として相反して居るのが認められるであらう。大太鼓の場合にも兩方の膜は正に斯様な振動をして居るのである。胴の兩端に皮を張つた太鼓が良い音を出すには兩方の皮が満足に張れて居る事が必要で、裏皮が破れて居ると音がまるで出なくなる事は誰でも知つて居る事であるが、太鼓の音が極めて豊富であるためには、上に述べた様な兩方の皮の聯成振動が長く繼續す



る事が必要で、是れがためには兩方の皮の自己振動が一致して居る事が必要なのである。専門の太鼓屋は多年の経験に基いて皮の厚さに應じ張り方を加減して斯様な調節方法を不知不識の裡に實行して居るものである。又謡曲や長唄の囃子こつみに使ふ小鼓も亦太鼓の一種であつて、鼓の打ち手が小紙片を濡らし裏皮の中央に貼り付け音を豊富にするのも、矢張り上述した様に兩方の皮の自己振動を一致させ、聯成振動が完全に起る様にして居るのに外ならない。

以上は胴の長い太鼓の場合で、館屋の使ふ様な薄い太鼓では、皮と皮との距離が近い為所謂兩振動系の“結合が密”になり第22圖(甲)に示した様な兩方の皮が常に同じ方向に振動する仕方だけしか起らない。従つて唸りの現象も現はれず音が貧弱であるのを免れない。

茲には太鼓の音の性質に關聯して聯成振動を説明したが、聯成振動は決して太鼓の皮に限つた譯ではなく、一般に機械的振動系、電氣的振動系に於て屢々起る極めて大切な現象である。

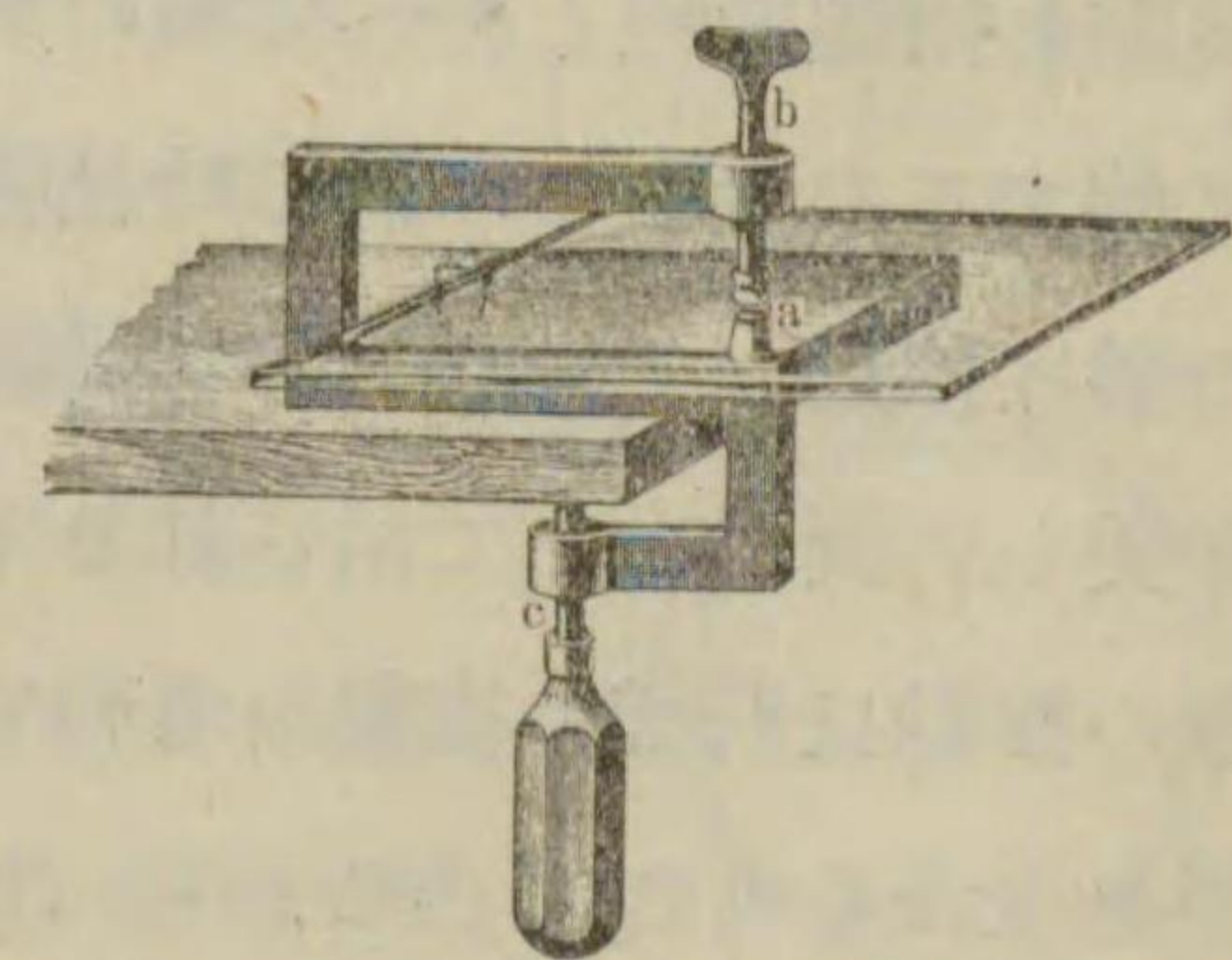
太鼓の音の基音即ち皮が全體として出たり這入つたりする振動は、上述の様に聯成振動を起すものであるが、叩かれた方の皮は此外にも尙複雑な振動をして居るものである。上記の膜の振動の項に述べてある直徑の一つを節線とし、其兩側の部分が交互に出入りする第一上音を始めとして、

第21圖に示してある様なもつと澤山の直徑や同心圓を節線とする高次の上音を發して居るものである。是等多くの上音の中で、一番簡単なもの即ち前記の一本の直徑節線を持つ振動は、中心から少しはづれた所を叩くと最も著しく現れるものであつて、耳で聴いただけでも直ちに認められる。西洋のケトル・ドラムの音は主として此種の振動に依るものである。又雅樂に使ふ大太鼓の打ち方に就て古書に“革面の眞心を打つと音が鼓内に籠つて響が無い。眞心から一寸ばかり下を打つ様に”

と注意してあるのも、全く此一本の直徑節線を持つ第一上音をよく出さうとした用意に外なるまい。

### 30. 板の振動

絃の振動では長さだけが問題であるから、其振動の有様は理論的に簡単に算出する事が出来る。棒及び膜の振動となると、事柄が相當複雑になるが、兎も角も振動の様を理論的に明示する事が出来、既に數十年前に詳しく研究されて居る。然るに板の振動となると、是れを嚴密に數式

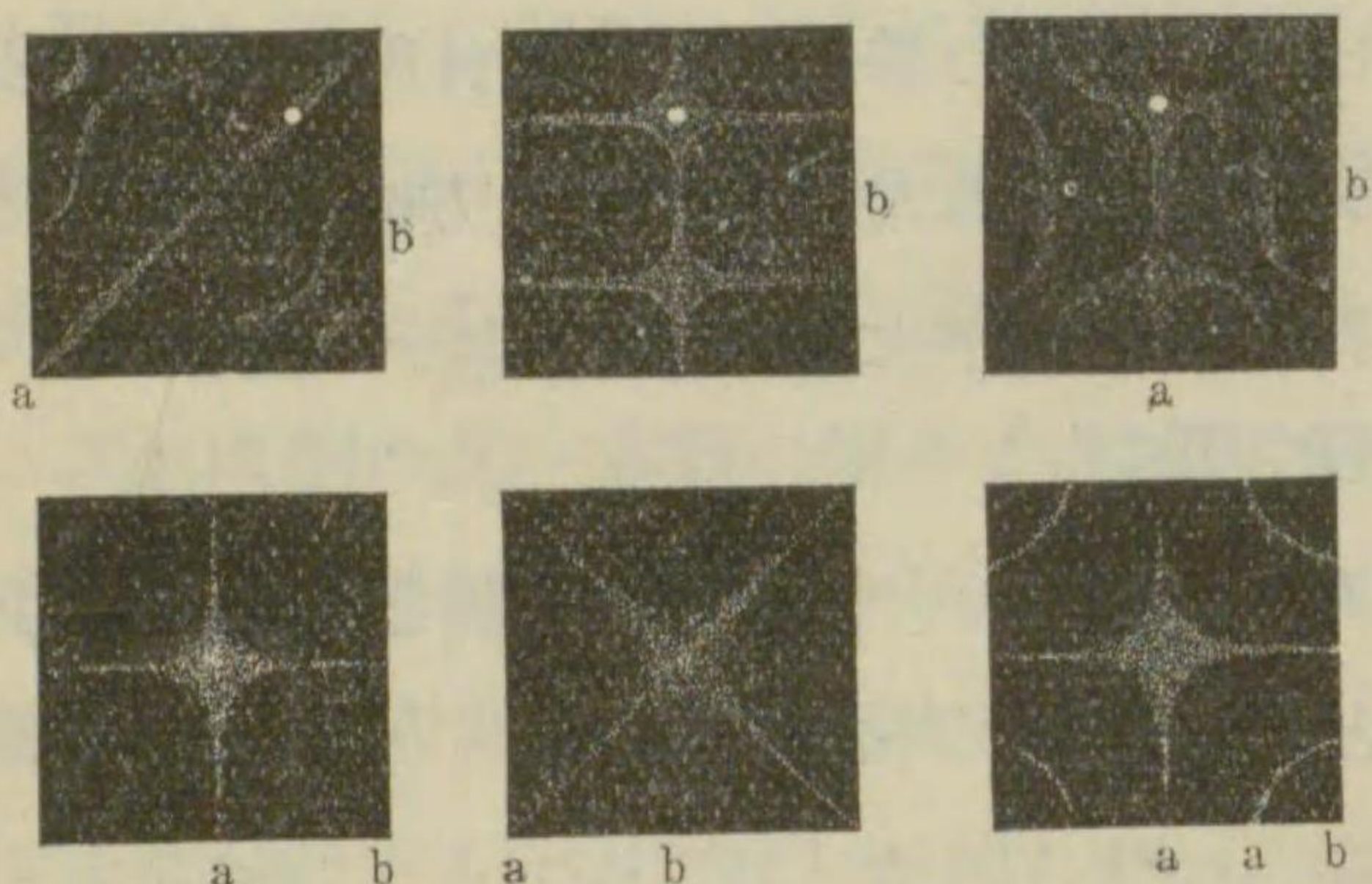


第24圖

を以て示す事は頗る困難で、唯圓形の板の場合だけが解か

れて居り、其他の場合には近似的に大要を示し得るに過ぎない。然るに實驗的に板の振動を研究する方法は既に百餘年前にクラドゥニ(Chladni)の創案した砂圖によつて與へられて居る。

クラドゥニの砂圖を作るには、第24圖に示す様に例へば



正方形なり圓形なり所要の形の硝子或は眞鍮板の中心を固定し、板の上に乾いた細かい砂又は

第25圖 クラドゥニの砂圖

リコポディウ

ムと稱する細粉(第16節参照)を一様に振り撒きおき、節を作る點を指頭で軽く押へて板の周邊をヴァイオリンの弓を以て擦るのである。然る時は振動の最も激しい場所即ち腹の砂は移動して、振動しない線即ち節線に集り、節線の所在が美しい圖形として示される(第25圖)。

板の振動は斯様に複雑なもので直線節の外に種々なる曲線節を生ずるものであるから、比較振動數を簡単に言ひ表はす事は困難である。

クラドゥニの砂圖によつて板の振動様式を求める事は勿

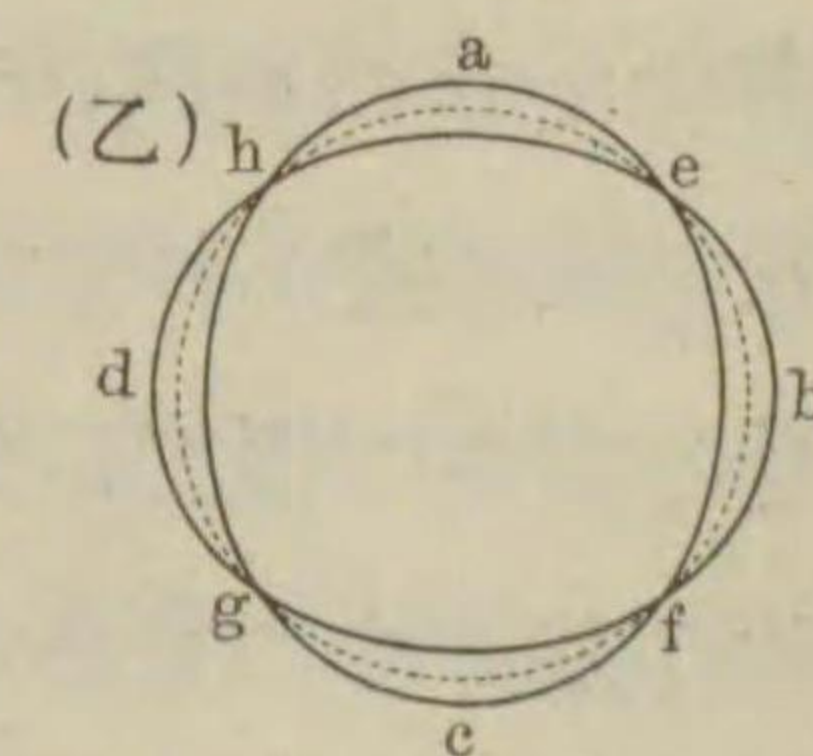
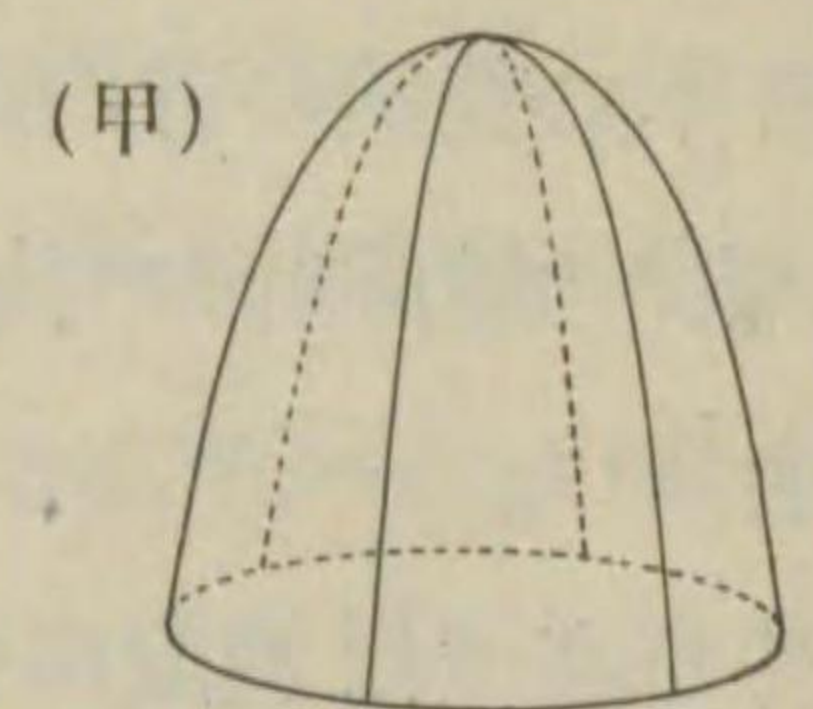
論板が平面の場合のみに限られるが、最近電氣的方法によつて樂器の胴の様な曲面をなした板の振動の様式をも研究する事が出来る様になつた。

### 31. 鐘の振動

音叉が曲つた棒と看做し得るのと同様に鐘は曲つた板と考へて差支ない。一樣な厚さを持ち且つ圓形とか正方形とかいふ様な最も簡単な形の板でも、前述の通り其振動の様式は頗る複雑なものであるから、鐘の様な曲つた板で而も厚さが場所によつて大に違ふ物の振動が、如何に複雑であるかは想像に難くない所であらう。

圓板の振動に於て多くの直徑及び周邊と同心の圓が節線となる事から考へて、鐘の振動に於ては其頂點から周邊即ち開口端に向ふ子午線的節線と、是

れに直角な圓形の節線とが出来事豫想する事が出来る。鐘の振動の最も簡單なる様式は第26圖(甲)に示す様に四つの子午線的節線を生ずる場合で、是れが基音である。(乙)は此場合鐘の周邊或は截口の變形の様式を誇張して示したものである。6本、8本の子午線的節線も現れる事が認められて居るが、圓形節線は現



第26圖 鐘の振動様式

れにくい。

古來“<sup>ぎ おんしやうじや</sup>祇園精舎の鐘の音、諸行無常の響あり”等と稱し、東洋の寺院の梵鐘即ち釣鐘の音色は平穩にして宗教的信念を喚起するに效あらしめるものである。日本の梵鐘の形は所謂釣鐘形で深い圓壙形(高さ<sup>と</sup>と口径との比は平均142:100)をなして居るが、西洋の教會堂の釣鐘は我梵鐘に比して丈は低く、且つ朝顔形に開いて居るので鐘内の空氣の共鳴音高く、従つてその音色は遙かに明快である。

又材質及び各部寸法の割合は同じで唯大きさだけが違ふ鐘では、その音の高さは直径に逆比例する。即ち大きい鐘ほど高さ(調子)が低い。古來日本で巨大な梵鐘を鑄るのは必ずしもその調子を低くするためのみではなからうが、一般に日本の梵鐘の音の調子は西洋の鐘よりも低いのを通例とし、彼の兼好法師の徒然草にも鐘の調は<sup>わうじき</sup>黄鐘調(音の高さの名稱)なるべき事が述べられてある。而も徒然草には鐘の音の高さは温度に依つて變化するから、二月涅槃會から聖靈會までの氣候の音を標準とすべしと、ちやんと科學的用意を以て書かれてある事は誠に面白いが、實を言へば鐘の音の高さの温度に依る變化は主として鐘の材質の弾性の變化に基くものであるから、そんなに著しいものではない。

鐘の振動従つてその音は曩に述べた様に多數の部分音から成り立つて居るが、西洋の鑄物師は鐘を鑄るに當つて各

部の厚さを調節し、低い部分音を出来るだけ調和倍音となし、従つて音色が音樂的になる様に努める。又釣鐘の音の一大特色は各部の材質や厚さの不均一によつて唸りを生ずる(即ち音の強さが起伏消長する)事であるが、西洋では音色を音樂的にすると同時にまた出来るだけこの唸りが出ない様に努めるものである。

日本の釣鐘に就ては幸か不幸か何等斯様な小細工が施されて居ないので、却つて音色が素朴で殊に低い部分音には常に著しい唸りを伴ひ、莊重、幽玄所謂陰に籠つた音を發するものである。

西洋の釣鐘の振動に就ては古くレイリー卿の有名な研究があり、更にその後多數の人々に依つて研究された。

西洋の釣鐘の音でも亦日本の梵鐘の音でも、その中に含まれる多數の部分音の中で、基音が必ずしも最強の音でない事も鐘の音の一つの特徴である。

著者は最近電氣的方法(ラヂオに使ふ様な眞空管を利用して振動體に觸れる事なく振動を測定する方法)に依つて小型の釣鐘の振動を詳しく調べてみたが、その結果に依れば釣鐘の振動は多數の分振動から成り立つて居るが、それ等の分振動の振動数は2:5:7:9……と云ふ極めて特殊の比をなして居る事を知つた。我釣鐘の振動従つて音を構成して居る基音及び上音の振動数が、偶然斯様な特殊の比を



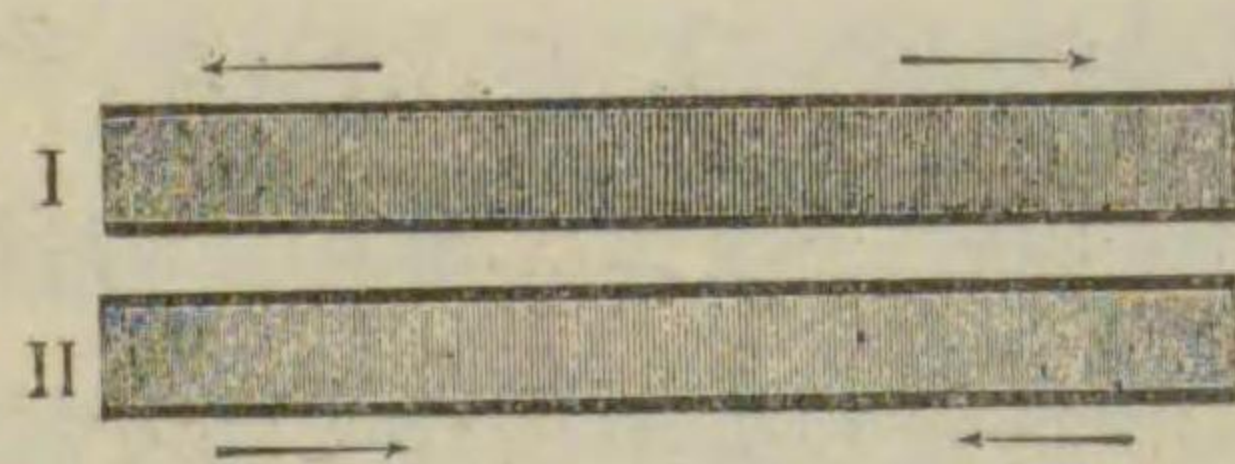
なして居る事は我釣鐘の音色の特色の一原因と看做すべきであらう。

鐘の音は聽く場所や鐘からの距離及び氣象狀態即ち天候の如何によつて大に音色を異にするものである事は世人の熟知する所であらうが、これは鐘の音が上に述べた様に頗る複雑な構成から成り立つて居るものであり、色々な部分音の傳播の狀況等が上記の諸因子に依つて左右される結果に外ならない。

### 32. 管中の空氣の振動

管中の空氣、即ち空氣柱は一つの發音體であるが、茲に管と云ふのは詳しく言へばきりくち截口の一様な眞直な管と云ふ意味で、管には兩端開いた管と、一端閉ぢ一端丈け開いた管とがあり、夫々發音の狀態を異にする、即ち倍音の現れ方が違ふものである。簡單のために前者を開管(Open pipe)、後者を閉管(Stopped pipe)と呼ぶ。今是等開管及び閉管の性質を述べよう。

(a) 開管 管中の空氣が繼續して振動する場合、即ち管中の空氣の振動が兩端で反射され管中に定常波(第13節(b)



第 27 圖

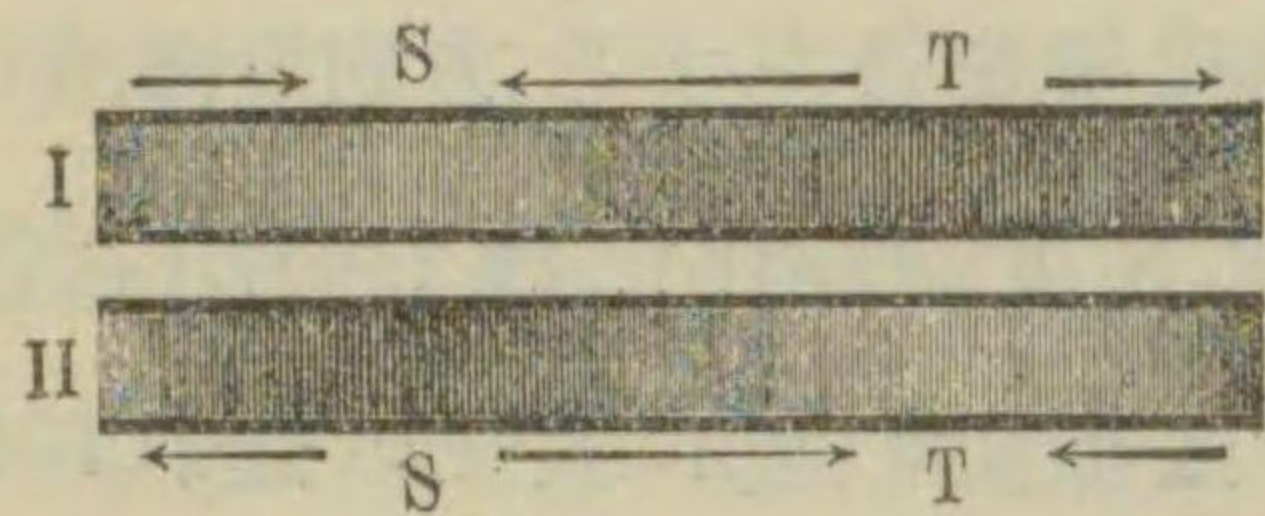
参照)が出来た場合を考へてみるに、兩端は常に大氣に接して居るから空氣の密度に變化なく一定

である。是れに反し管の中央の點では空氣は交互に壓縮され膨脹する。第27圖は此模様を示したものでIは管の中央が最大密度となつた場合で、IIは最小密度となつた場合であり、矢の方向は空氣が將に進まうとする方向を示すものである。斯く管の中央では密度の變化は激しいが、空氣分子の運動はない、即ち此所は振動の節に當る。是れに反し管の兩端では密度の變化はないが、空氣の振動は最も甚しい、即ち兩端は常に振動の腹である。

以上は最も簡單な振動の仕方であり、即ち此振動様式が基音であるが、此場合兩端が腹で中央が節であるから、管の長さは基音の波長の半分に該當する。即ち兩端開いた管では基音の波長は管の長さの2倍に當る。例へば長さ50cmの兩端開いた管の基音の波長は1mである。従つて其振動數は第11節に述べた所により  $340 \div 1 = 340$  ヘルツで大凡  $f^1$  の音である。

以上の説明によつて管の長さが短くなれば、音が高くなり、詳しく言へば音の振動數が管の長さに逆比例して増加する事も了解されよう。茲に注意を要するは上の例の様に管の長さが與へられれば、それを鳴らした時の音の振動數は340mを管の長さの2倍で割つて直ちに算出されるが、嚴密に云へば斯様にして計算した振動數には後に説明する様に開口端の修正と云ふ些少の修正を要するものである。

次に斯様な兩端開いた管ではどう云ふ倍音が出るかと云ふに、第28圖に第二倍音だけが出て居る場合を示す。この場合兩端と中央とが腹で、その中間の點 *S* 及び *T* は節である。即ち管の長さが丁度波長に該當する。斯くして開いた管では基音のほかに第二、第三、第四、第五……等すべての倍音が現れ得るものである。管の長さを *l* とすれば、基音、第二、第三、第四……倍音の波長は  $2l$ ,  $l$ ,  $\frac{2}{3}l$ ,  $\frac{1}{2}l$ ……である。



第 28 圖

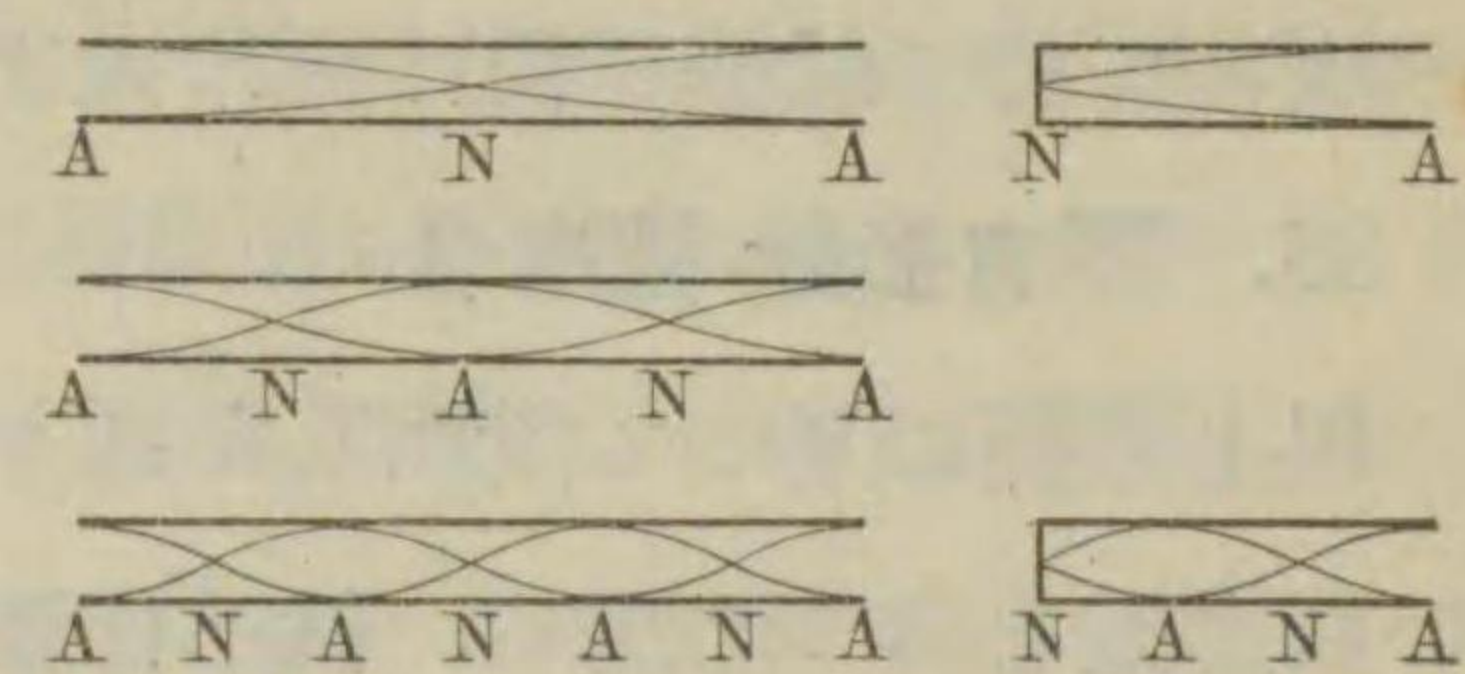
(b) 閉管 一端閉じた管では、閉じた端は常に節であり、開口端は常に腹である。従つて最も簡単な振動様式即ち基音は一端が腹で、一端が節の場合、即ち管の長さの4倍が波長になる場合である。例へば長さ50 cmの一端閉じた管の基音の波長は2 mであり、従つてその振動数は  $340 \div 2 = 170$  ヘルツであつて、丁度同長の開管の基音よりオクターヴだけ低い。

閉管の場合にも管の長さが短くなると、音が高くなる事は勿論開管の場合と異なる事はない。化學實驗に使用する硝子製試験管は一つの閉管であり、その口を靜に息で吹くと音を發するが、管内に水を入れて氣柱の長さを短くすると、音の高さが昇る事も容易に實驗出来る。

次に開管ではどう云ふ倍音が出るかと云ふに、閉じた端は常に節であり、開いた端は常に腹でなければならない性質上、第二、第四倍音と云ふ様な偶數倍音は現れず、第三、第五と云ふ様な奇數倍音だけが現れる。管の長さを *l* とすれば基音、第三、第五……倍音の波長は夫々  $4l$ ,  $\frac{4}{3}l$ ,  $\frac{4}{5}l$ ……である。

斯く開管と閉管とでは、基音の高さも亦倍音の現れ方も大に異なるものである。

以上の結果を一層明かにするために、第29圖に開管及び閉管内の定常波の基音及び上音の腹及び節の位置が示してある。Aは腹であり、Nは節である。但し茲に大いに注意を要するは、斯く定常波の振動様式を曲線を以つて表す結果、音波の様な定常縦波の腹、節と、水波の様な進行



第 29 圖

横波の峯、谷とを混同して、屢々縦波の腹は横波の峯に相當し、又縦波の節は横波の谷に相當すると誤解することである。縦波の腹は決して横波の峯に該當するものではなく、前にも述べた様に縦波に於て最大の疎密は不動の節に於て代る代る起るものであり、従つて疎密の變化即ち壓力變化は節に於て最大であるが、腹に於ては甚だ小であり、其代り

層の往復即ち空氣分子の速度は最大である。

**開口端に於ける修正** 以上述べた管の長さと言の波長との關係を求めると當つて、管の開口端に於て波動は完全に反射され定常波は管の中だけに起るものと考へたが、嚴密に言へば管中の空氣の振動は管の端より少しく大氣中に出て後に初めて反射されるものであるから、波長の計算には管の長さが實際より少しく長いと考へる必要があり、所謂開口端の修正を必要とする。

此開口端の修正に就ては多くの學者の理論及び實驗的研究があるが、その結果に依れば半徑  $R$  の管の鏜なき開口端の修正は  $0.6R$  だけ管の長さを増すものとす。オルガン管の吹口に於て此修正値は更に大きく  $2.7R$  に等しい。

### 33. 固有振動, 固有音

以上數節に互つて説明した通り總ての振動體は夫々特定の振動數を持つて居る。例へば張つた絃は其長さと張力とに依つて定められる一定の振動數を持つて居る。従つて斯様な絃に外力を與へて振動させればその特定の振動即ち固有振動 (Proper oscillation) をなし、固有音 (Proper tone) を發する次第である。又化學實驗用の試験管や空罎等の口を唇に當てて靜に吹けば夫々特定の振動數(高さ)の音を發する。此音が試験管なり空罎なりの固有音であつて、其高さは試験管の場合には管の長さに依り、空罎の場合で

は罎の容積, 形, 口の大きさ等に依つて定まるものである。一般に振動體の固有振動は單に一つではなく、幾つもあり、その中で最も低いものが基音である。

又適當な外力を繼續して加へれば振動體をして固有振動以外の振動をさせる事も不可能ではない。然し與へられる外力の振動數が振動體の固有振動數に一致する時は所謂共鳴の現象を惹き起し、振動は最も激しく起される。

### 34. 共鳴及び共鳴器

元來<sup>ともなり</sup>共鳴とは一つの發音體が出して居る勢力を他の發音體が吸収して共に鳴り出すと云ふ意味で、音響學上の言葉であるが、是れが一般に感情の一致等を表す場合にも用ひられるに至り、現今では<sup>きようめい</sup>共鳴と發音される場合が多い。通常共鳴の理を示すには振動數の相等しい二つの音又(下に共鳴函の付いて居る)を二、三尺隔てて机の上に置き、其一つを強く鳴らして數秒の後、是れに手を觸れて音を止めると、手を觸れない他の方の音又が鳴つて居るのを以て示す。然しこれだけの實驗を行つたのでは共鳴は單に教室内で實驗される一現象に過ぎない様に思はれる虞れがあるが、共鳴の現象は音樂、音響學のみならず、一般の機械的振動、電氣振動に於ても極めて重要なる現象であつて、無線電信、ラヂオ等にも此原理が大に應用されて居るのである。

音響學に於ける共鳴の應用例は到る處に發見されるが、

一、二の例を挙げれば音響學の實驗に使用する音叉には第18圖に示す様に屢々下に一端の開いた大きな木製の函が附いて居るのが見られるであらう。是れは單に音叉だけを鳴らしたのでは音が小さいから下の函の内部の空氣の共鳴によつて是れを強大にする爲めに外ならない。三味線、箏、ヴァイオリンの胴も亦同様な役目をするもので、三味線やヴァイオリンの絃を堅い板に打ちつけた釘の類に張つたのでは、是れを撥いても幽かな貧弱な音を出すに過ぎない。

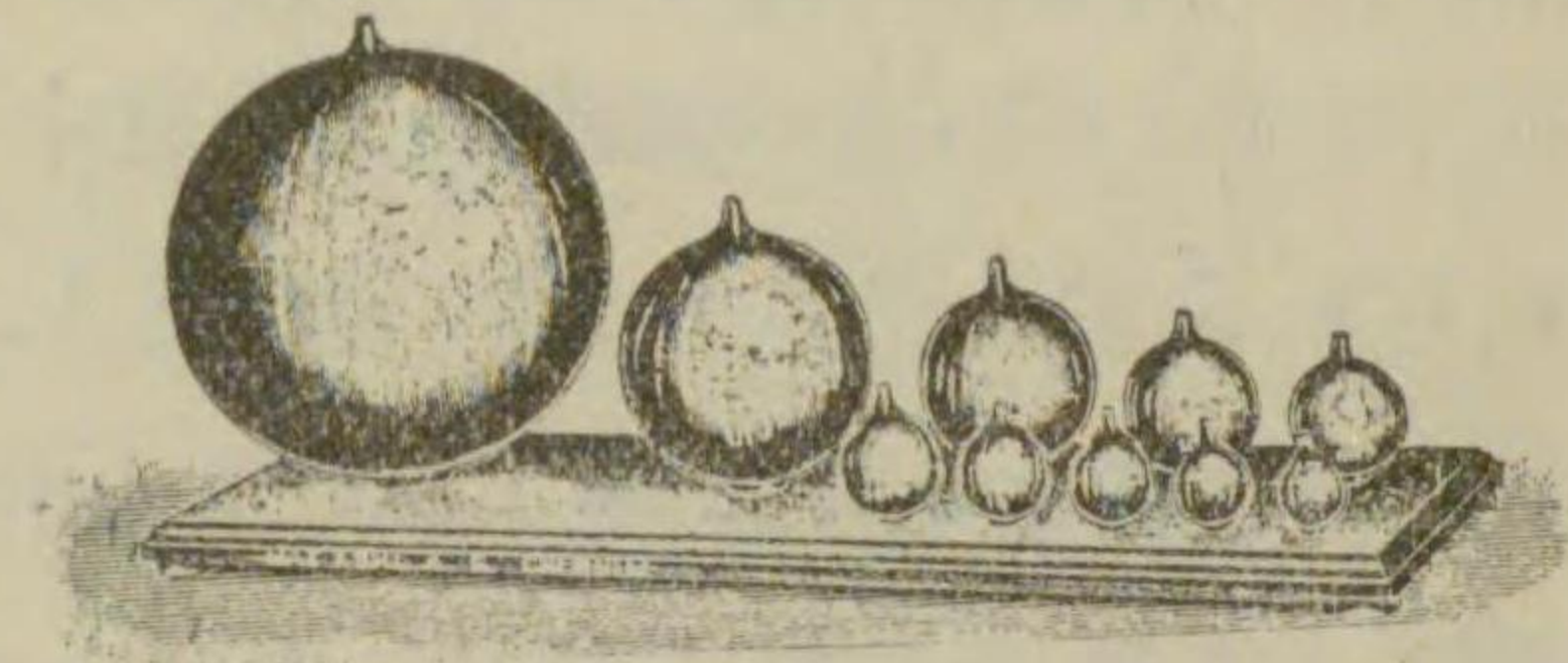
音叉に附ける共鳴函の寸法は、其固有振動が音叉の固有振動と精密には一致しない様に造られてある。若し此兩振動が精密に一致して居る時は、音は強大にはなるが、振動のエネルギーが速に消費されて、音が永く繼續しない。斯く音叉と共鳴函との振動数が少しく違つて居るために、共鳴函を附した音叉の音の振動数は音叉の固有振動数とは少しく異なるも、其差は僅々千分の二、三の程度である。

音叉の共鳴函は二つの目的に役立つて居るものである。その一つは上に述べた様に音を強大にする事であるが、他の一つは音叉の上音と共鳴函の上音とは振動数が著しく異なるため、共鳴函を附する事に依つて音叉の基音だけが強められ、従つて音が純粹になることである。是れ共鳴函を附けた音叉の音が純音の代表とされる所以である。

共鳴器 (Resonator) 音叉の共鳴函、三味線、ヴァイオリン

等絃樂器の胴も勿論一種の共鳴器で共鳴りに依つて音を強めるものであるが、共鳴器と云ふ言葉はヘルムホルツ共鳴器、エーデルマン共鳴器の如く音色の分析用に使用される特殊の器具を意味する事がある。

ヘルムホルツ共鳴器とは寶珠の玉の様な形をした、大小二つの孔を持つた硝子製若しくは金屬製の内空の球形器である。第30圖は色々な大きさのヘルムホルツ共鳴器を示すものであつて、大



第30圖 ヘルムホルツ共鳴器

さは直徑八寸位より一寸位迄種々ある。是れを使用するには二つの孔の中小さい方を耳に

當てて音を聴くのである。共鳴器はその大きさ及び口の面積に依る一定の固有音を持つて居るから、外界に其固有音と同じ高さの音が存在する時は共鳴によつて特に其音を強めるものである。従つて色々な大きさの共鳴器を順次耳にあて(一方の耳は閉ぢて)、分析せんとする音を聴くときは、その中に含まれて居る部分音に相當する共鳴器を用ひた場合だけ音が大きく聞えるから、是れによつて部分音の高さ及び大凡の強さを知り分析の目的を達する事が出来る。ヘルムホルツは斯様な共鳴器を利用して母音を始め種々な樂器の

音色の性質を明かにした。

斯様な共鳴器の理論は頗る六ヶ敷いもので、共鳴器の固有音の高さの理論的計算には或る假定を要するので、その結果は實驗と半音程度の相違を生ずる事が知られて居る。

猶斯様な分析用の目的に使用するため、ヘルムホルツ共鳴器を多少變形して取扱を一層便利にしたものが、現今販賣されて居るが、精確な電氣的分析方法の進歩した今日分析用として共鳴器を用ひる事は頗る稀になつた。

## 第六章 音 源

### 35. 眞空管發振器

音響學の各種の實驗に於て振動數の一定な簡単な音源としては周知の通り音叉が最も輕便である。然し音叉では繼續した大きな音を得る事は出來ないので、斯様な場合には在來は壓搾空氣でオルガン管 (Organ pipe. パイプ・オルガンに使用する様な木製或は金屬製の管、音の高さにより大小種々あり) を鳴らしたものである。然し乍らオルガン管の音は吹く空氣の壓力を少しく増加すると忽ち倍音を含む音となり、純音でなくなる。又音の高さや強さの調節が簡單に行はれない等の不便がある。是れに反し、眞空管發振器で交流を發生し、是れで擴聲器を鳴らす方法では音の高さ及び強さの調節が簡單且つ自由に行はれるので、最近では専ら此方法が音源に利用される。建築音響學 (第 13 章 參照) の開拓者たるセイビン はオルガン管を音源として多くの測定を行つたので、最近迄此方面に於てはオルガン管が屢々見受けられたが、眞空管發振器及び擴聲器の優良なものが續々と市場に現れた結果、今日ではオルガン管の音源は殆んど影を潜めたと言つてもよい。

眞空管發振器とは眞空管を含む發振回路の中の自己誘導



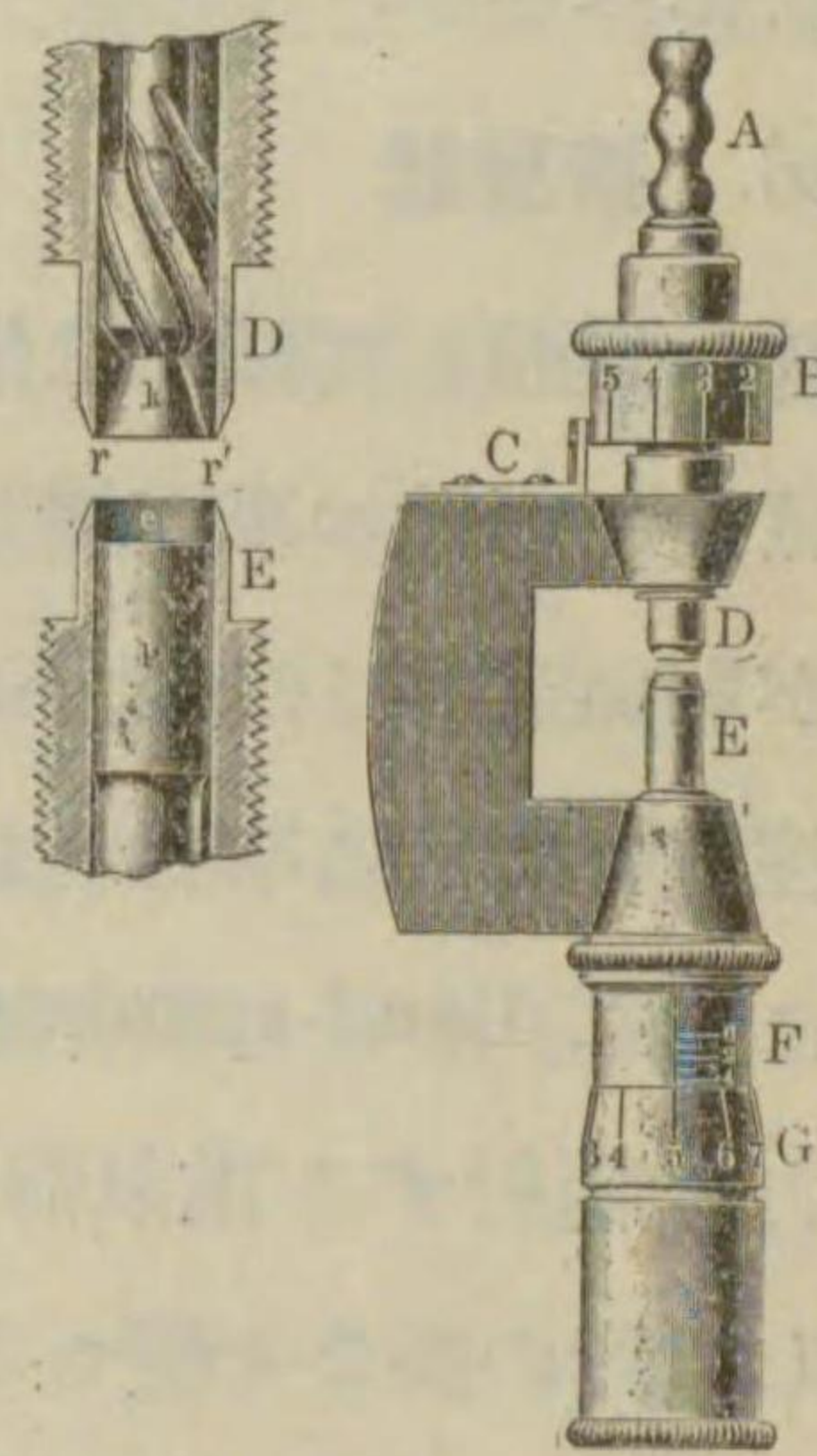
及び電気容量を變化して任意の周波数の交流を得るもので、一箇の真空管を用ひ單一發振回路に依るものと、二つの發振回路を使つて其間の唸り (Beat) を利用する所謂唸り發振器 (Beat frequency oscillator) とがある。何れにしても真空管のフィラメントの加熱電流の僅かな變化も出て來る交流の周波數に影響するから、加熱電流は常に一定に保つ事を要し、又交流の周波數は折々周波計或は波形の記録 (オッシログラム) に依つて測定してみる必要がある。發生される交流で擴聲器を鳴らした場合の音の高さを標準音又は比較してみてもよい。

真空管發振器の發生する交流の波形は單一發振回路のものとは勿論、唸り發振器のものでも純正弦波形ではない。此缺點を除くため種々の考案が施されてあるが、猶且つ低周波に於ては倍音の發生を免れ難いから、極めて純粹な正弦波を必要とする場合には是非電気濾波器を用ひて倍音を除去する事を要する。猶真空管發振器の出す交流はいくら純正弦波形であつても、是れで擴聲器を鳴らす場合に屢々波形の歪みを生ずる事があるから、精密な測定に於ては音の波形をオッシログラフにて検査するの必要がある。

斯くして今では真空管發振器と擴聲器とによつて、振動數 100 乃至 5,000 ヘルツの任意の高さ及び強さの音が容易に得られるが、通常擴聲器では振動板の質量の影響等

に依つて振動數 5,000 以上の高音を相當の強さで得る事は困難である。依つて斯様な目的のためには特殊の高音擴聲器が考案されて居る (第 36 節参照)。

**極めて高い音の發生器** 電氣的方法に依らないで極めて高い音を出す音源として在來最も普通に用ひられたものはゴルトン笛 (Galton whistle) である。ゴルトン笛は取扱い頗る簡單であるから教授用等には便利であるが、數量的結果を得るためには取扱いに細心の注意を以てする必要がある。第 31 圖は其外觀及び斷面を示すもので、A から壓搾空氣を吹込 (口にて吹いてもよい) めば空氣は環狀の細隙 D から吹出し、圓形の刃形 E に當つて音を發する。上下のマイクロメーター B, G によつて管の長さ及び細隙と刃形との距離を變化し音の高さが變へられる。ゴルトン笛によつて發せられる音の高さは最高 50,880 (gis<sup>8</sup>) 附近迄達せられる事が知られて居る。



第 31 圖  
ゴルトン笛

曩に絃の縦振動の項で述べたやうに耳鼻科醫は屢々耳の最高可聽音の高さを測定する必要上、強く張つた鋼線を縦に摩擦し縦振動によつて約 20,000 ヘルツ迄の高音を發す

る器械を使用する。是れも一種の高音發生器である。

電氣的方法に依らずに簡単に高音を得るには以上の様な方法による外はないが、最近では耳の可聽範圍以上の超可聽音或は不可聽音の研究が盛んになつた結果として、眞空管を利用し、水晶、ロッセル鹽の壓電氣、或は磁歪 (Magnetostriction) 等によつて容易に數萬ヘルツの空氣振動を得る事が出来る。但し是等の空氣振動は勿論吾々に音と云ふ感じは與へない。

### 36. 擴聲器

音の強弱と高低とは俗語に於て屢々混同され、強い音若しくは大きい音の事が屢々高い音と呼ばれ、又低い音と云ふ言葉が弱い音若しくは小さい音の意味に誤用されるから、大に注意を要する事は曩に第4節に述べた所である。ラヂオ等に使ふ Loud-speaker は室内若しくは戸外に向つて音の勢力を輻射する電氣器具(詳しく云へば變成器)であつて、決して音の高さを變へる器械或は高い聲を出す器械ではない。然るに誤つて是れを高聲器と呼ぶ事が現今かなり廣く行はれて居るのは誠に遺憾である。是れは是非擴聲器又は放聲器と呼ぶ様にしたい。

マイクロフォンは音響勢力を電氣勢力に變へる器具であるが、擴聲器は逆に電氣勢力を音響勢力に變へる器具である。而して今日マイクロフォンは餘程理想に近いものが作

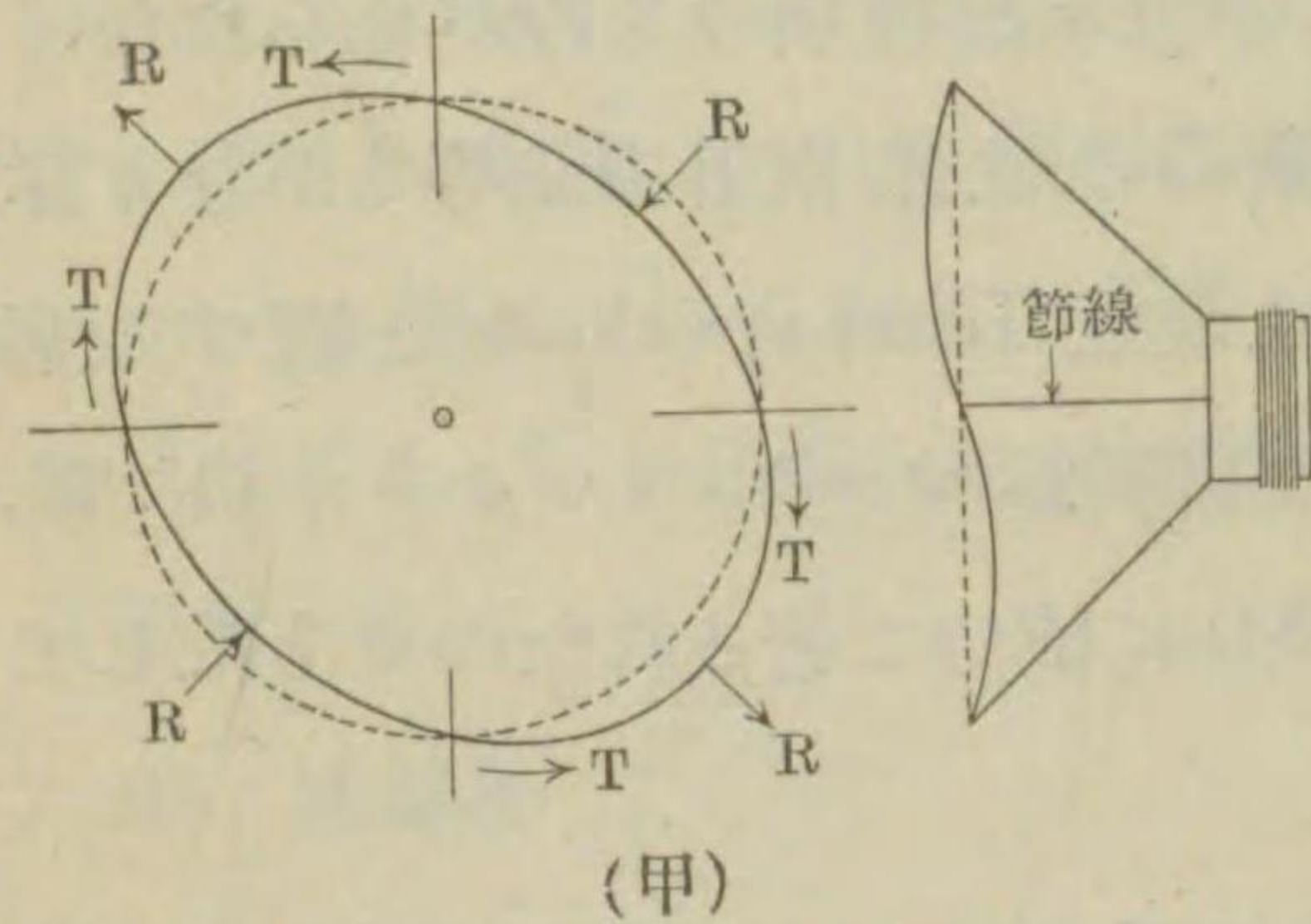
られてあるが、擴聲器の方は猶理想とはかなり遠いもので研究改良の必要がある次第である。

ラヂオの出現以來マイクロフォンも随分色々な型のものが作られたが、擴聲器も亦色々な種類のものが作られた。而して斯く多種類の擴聲器の性質、設計方法等もかなり詳しく研究されて居る事は最近 Loud-speakers と題する菊版380餘頁に亙る老大な書籍がマック・ラックラン (N. W. McLachlan, Oxford, 1934) に依つて著されたのでも推して知る事が出来よう。

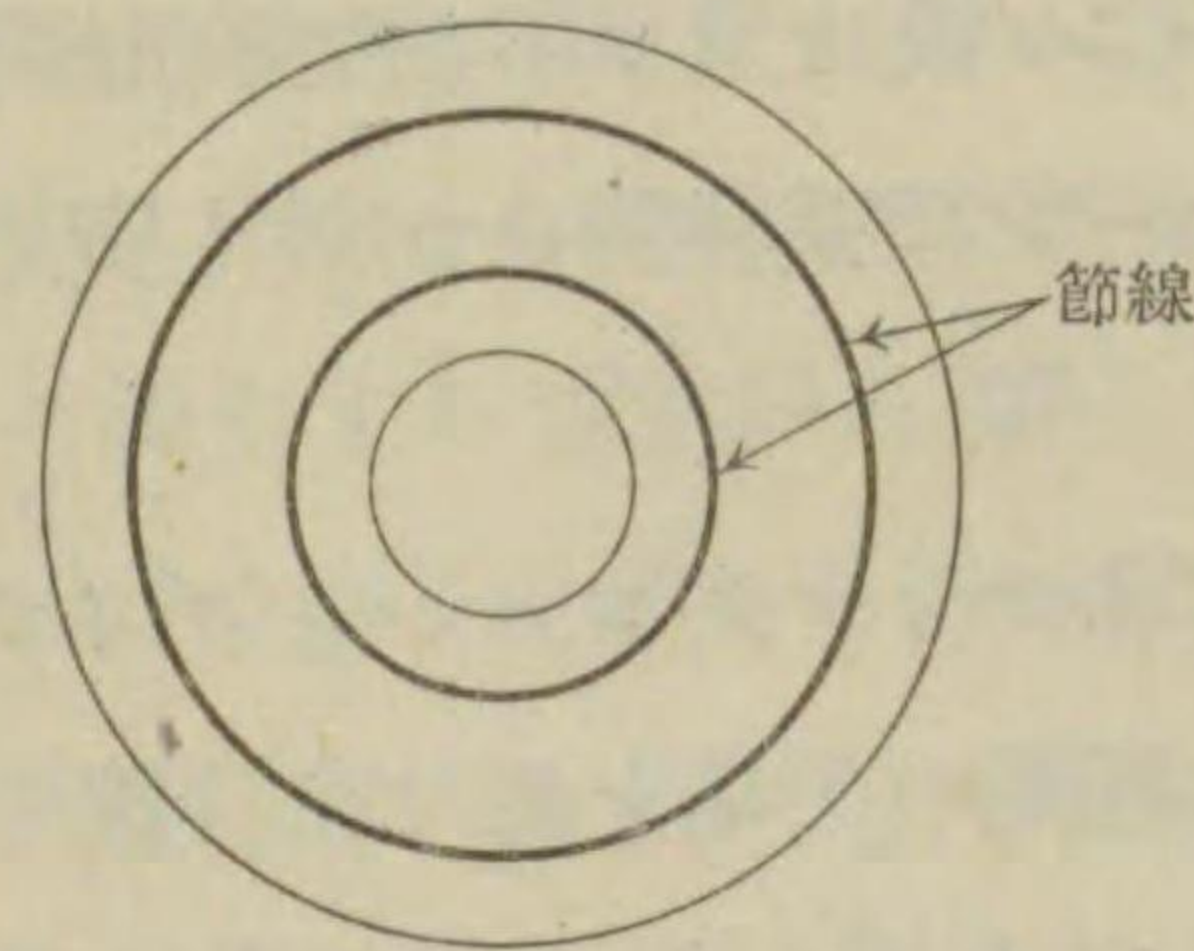
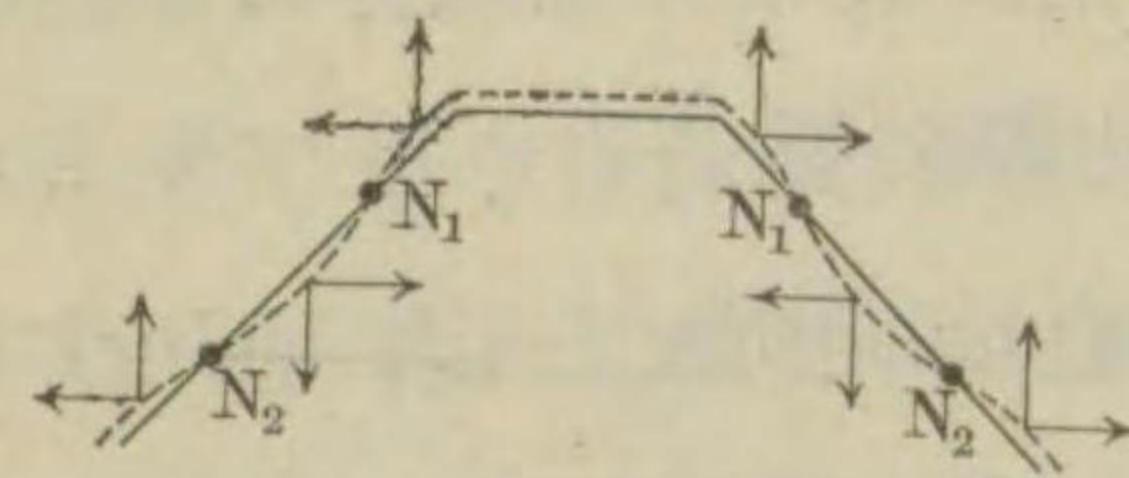
殆んど總ての擴聲器は振動板によつて電氣勢力を音響勢力に變化するものであるが、此際紙製若しくはアルミニウム製の圓錐(或は截頭圓錐)を直接振動板として使用する所謂コーン型擴聲器と、ホーン(或はラツパ、通常朝顔型)の首に振動板を取り付けるホーン型擴聲器とが最も廣く行はれて居る。

コーン型擴聲器にはマグネティック・コーンとダイナミック・コーンとがある。前者は圓錐の尖端を鐵片に接續し是れを永久磁石に依る磁界内に挿入するもので、後者は截頭圓錐の一端にコイルを取り付け是れを強磁界内で振動させるものである。而して斯かる擴聲器の考案された初めに當つては圓錐の周邊を枠に固定したものであるが、斯ういふ構造では低い音が出難いので、現在用ひられて居るものでは

總て圓錐の周邊をゴム若しくは皮の類で枠に取り付け圓錐が全體として前後に振動する事を得、従つて低音が出易い様にしてある。然し何れにしても圓錐の一部(或は一點)に



(甲)



(乙)

第 32 圖

起動點があるので圓錐は全體として前後に振動する外に、圓錐それ自身が頗る複雑な振動をする。即ち圓錐の振動に於ては第31節に述べた釣鐘等の場合と同様に多數の直線の節線の外に周邊と同心圓の節線が現れる。第32圖(甲),(乙)は夫等の簡単な場合を誇張して示したものである。(甲)に示した様な4本の直線節線の

現れるのは此振動様式の最も簡単な場合で基音に相當する。而して斯様な直線節線の出現は圓錐の彎曲(Bending)に基くものであるから材料の厚さの増加に依つて防ぐ事を

得るものであるが、又普通の擴聲器に屢々見受けられる様に周邊と同心圓の襞を付ける事は多數の斯かる直線節線の出現により擴聲器の周波數特性に多數のピーク(共鳴點)の現れるのを防ぐに効果あらしめんとしたものである。

現今ラヂオ用として最も廣く用ひられるマグネティック・コーン及びダイナミック・コーンは何れも圓錐をその一端に付けた原動力によつて振動させるものであり、而も斯かる場合の圓錐の振動は上述の如く複雑なものであるから、此種の擴聲器の周波數特性を良好ならしめるには茲に根本的の困難が横たはつて居る次第である。斯様な根本的の缺陷を免れるには振動板全部に互つて起動力が加はる様にするればよいので、此點に於て蓄電器型擴聲器(靜電型擴聲器)及びブラット・ハラール(Blatt-haller)の如きは理論的には確に長所を持つて居る。

蓄電器型擴聲器とは丁度コンデンサー・マイクロフォン(第46節参照)を逆にした様なもので、振動板と固定板とで一つの蓄電器を形造るものであるが、此擴聲器は振動板全體が一定の高電壓を加へられ乍ら力を受けて振動するものであるから、其構造上種々の困難があり、擴聲器としての性能は現在市販のものでは必ずしも圓錐型に勝つて居ない。

ブラット・ハラールとは一種の電磁型擴聲器で、薄い絶縁物(Pertinaxの類)の振動板が全面積に力を受けてピストン

の様な振動をなすものであるが、其構造上家庭用の小型のものとなす事は困難なので、主として獨逸で演説等を擴大して多數の聴衆に聴かせる所謂 Public address 用に用ひられて居る。

マグネティック・コーン及びダイナミック・コーンの如きコーン型擴聲器に於ては圓錐形振動板の前後兩面から音が出る。而して前面から出る音波と背面から出る音波とは丁度位相が反對になつて居るから、背面からの音は前面の音を打消す様に働き、殊に此作用は低音に於て著しく現れる。此缺點を除くためにコーン型擴聲器は通常木函の側面に取付けるか、或は所謂バッフル盤(Baffle board)を附し前後兩面間の音響的通路を長くする事が行はれる。色々な形及び大きさのバッフル盤の擴聲器の周波數特性に及ぼす影響を實驗的に調べる事は容易いが、是れは理論的には中々複雑で猶充分解決されない問題である。

**高音擴聲器** 通常の擴聲器では振動板の質量の影響等に依つて振動數 5,000 以上になると其能率は著しく低下し、斯かる高音を出す事は殆んど不可能である。然るに斯かる高音は或る種の音響を再生するに當つて原音の自然性を失はないために極めて必要であり、トーキー等に於ては是非斯かる高音域に於ける成分をも忠實に再生するの必要がある。従つて一方に於ては建築材料等の斯様な高音に對する

性質等をも亦試験する必要を生ずる次第で、是等二つの目的の爲には是非特殊の高音擴聲器を必要とする譯である。

依つて最近ポストウィック(L. G. Bostwick)は斯様な目的の爲に第33圖に示す様な高音擴聲器を考案した。振動

板は厚さ 0.05 mm

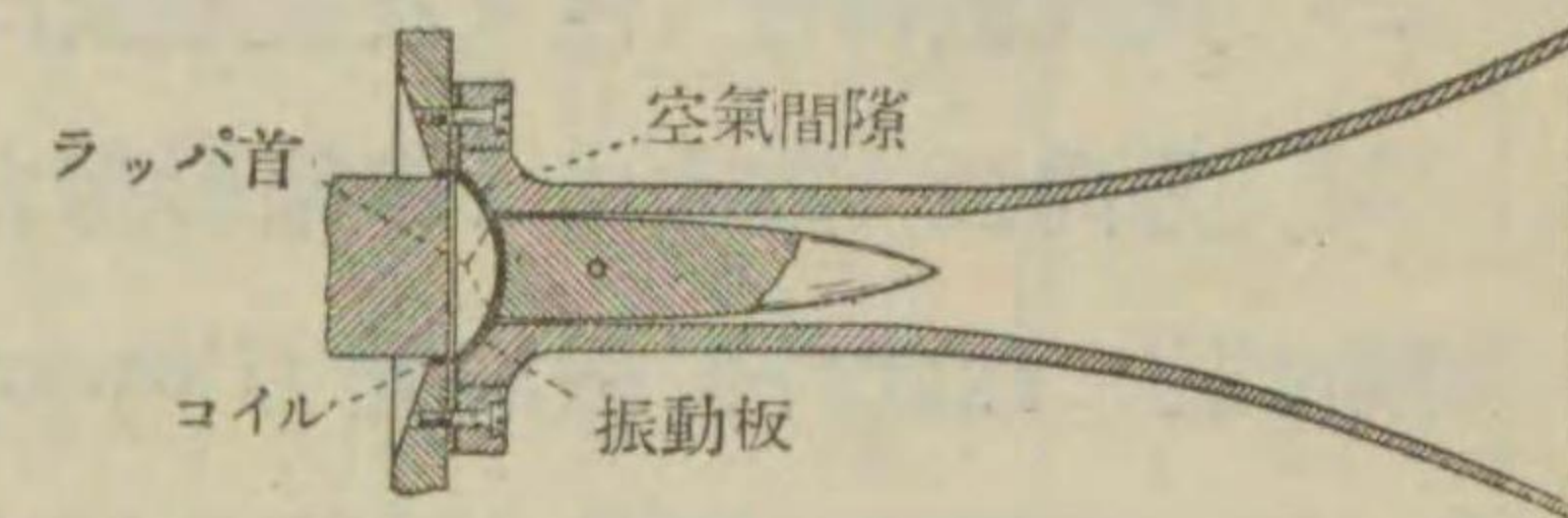
のデュラルミン板

で、中央部を直径

2.5 cm の球形に型

で押し出して剛性

が與へられて居り、アルミニウム製リボンでつくつたコイルが振動板の球形部と縁の平面部との境界に取り付けられ強磁界内に置かれてある。振動板とコイルとの總重量は僅に 0.16 グラムに過ぎない。猶ラッパと振動板との間の空氣間隙を出来るだけ小さくする事によつて音響損失を極度に小さくし、振動數 12,000 の高音をも良く發生し得るものである。



第 33 圖  
ポストウィック高音擴聲器

トーキー映寫場、劇場等に用ひられる米國ウェスタン式發生装置では此ポストウィック高音擴聲器と大型の低音擴聲器とを併用して居る。又獨逸ゲーメンス製の同種の發聲装置でも同様に二種の擴聲器を併用して居り、斯かる米國式及び獨逸式何れの發聲装置も既に我國で各所に用ひられて居る。猶小型の擴聲器でも斯く二種の擴聲器を組合せ

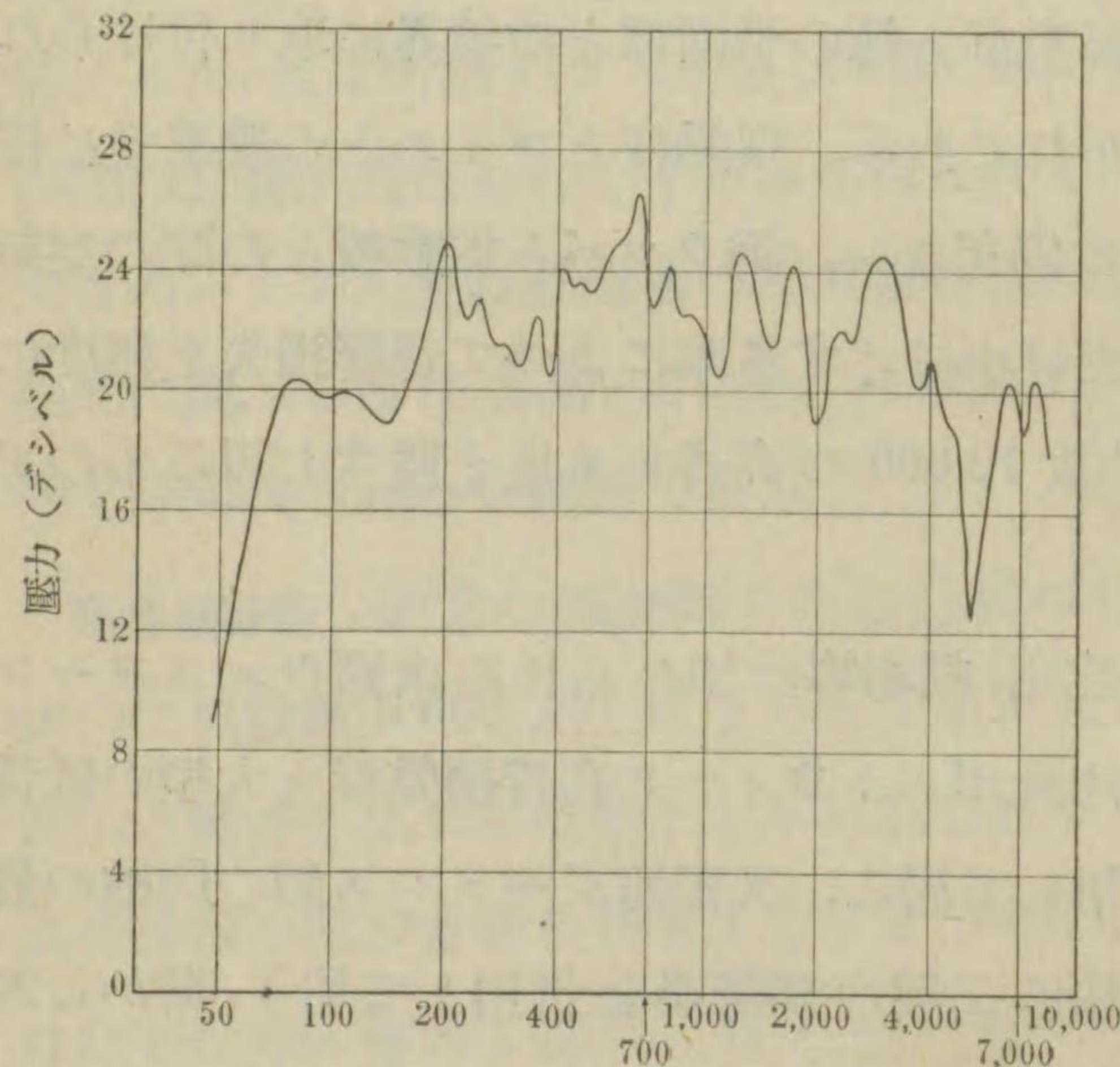
音質を良好にしたものが近頃色々販賣されて居る。

**擴聲器の試験** 擴聲器の性能を試験するには次の諸點を調べるべきである。

- (1) 能 率
- (2) 周波數特性 (色々な振動數に於ける能率)
- (3) 方向性 (方向による輻射勢力の變化)

米國に於ては此外に猶容量 (Power handling capacity) を調べる。擴聲器の容量とは或る周波數で音響出力に歪みを生ずる事なしに擴聲器に供給され得る最大入力である。

以上の四性質は何れも直接レイリー盤(第44節参照)に依

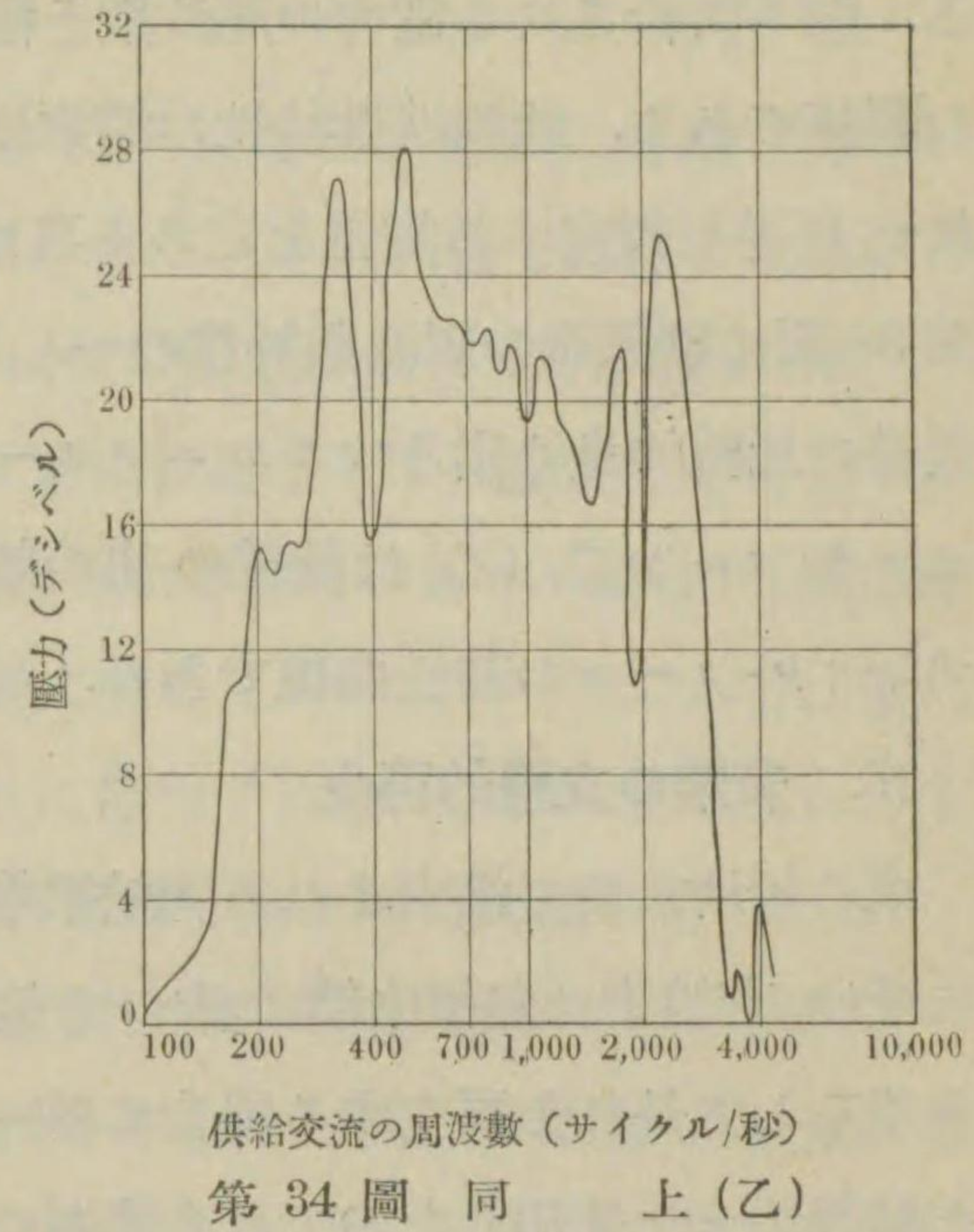


供給交流の周波數 (サイクル/秒)  
第 34 圖 擴聲器の周波數特性 (甲)

るか或は豫めレイリー盤, その他の方法で性能を調べたマイクロフォンを使用して測定することが出来る。

擴聲器の能率, 即ち

供給された電力に對する輻射される音響勢力の割合は一般に頗る小さいもので, 擴聲器が共鳴を起す周波數以外では數パーセントを出ないものである。従つて實用上擴聲器の能率は左程問題ではない。又方向性に就



供給交流の周波數 (サイクル/秒)  
第 34 圖 同 上 (乙)

ても, 何れの型も大差なく, 高調波に於てはかなり著しい指向性を示す。即ち, 低い音は殆んど方向に依つて變りなく一様に放射されるが, 高い音は正面から少し左右に片寄ると著しく強さを減ずる。室内でラヂオを聴く場合等では, 四壁の反射によつて擴聲器の方向性は目立たないが, 野外で擴聲器を通じて音楽を聴く場合には, 擴聲器の正面と側面とでは音色が著しく違ふことに氣が付くであらう。是れ低調波と高調波とでは擴聲器の方向性が著しく違ふためである。

擴聲器の性能として最も問題となるのは周波數特性であ

る。即ち供給される電力の周波数と輻射される音響勢力との関係である。此周波数特性の測定は容易く行はれるが是れが良否を判定する規格を定める事はかなり困難である。第34圖に擴聲器の周波数特性の一、二の例を示す。(甲)は低音の比較的良く出るマルコニフォン No. 195 型ダイナミック・コーンで、(乙)は低音の出の頗る悪い國産のマグネティック・コーンの特性曲線である。

### 37. 音樂の立體的再生

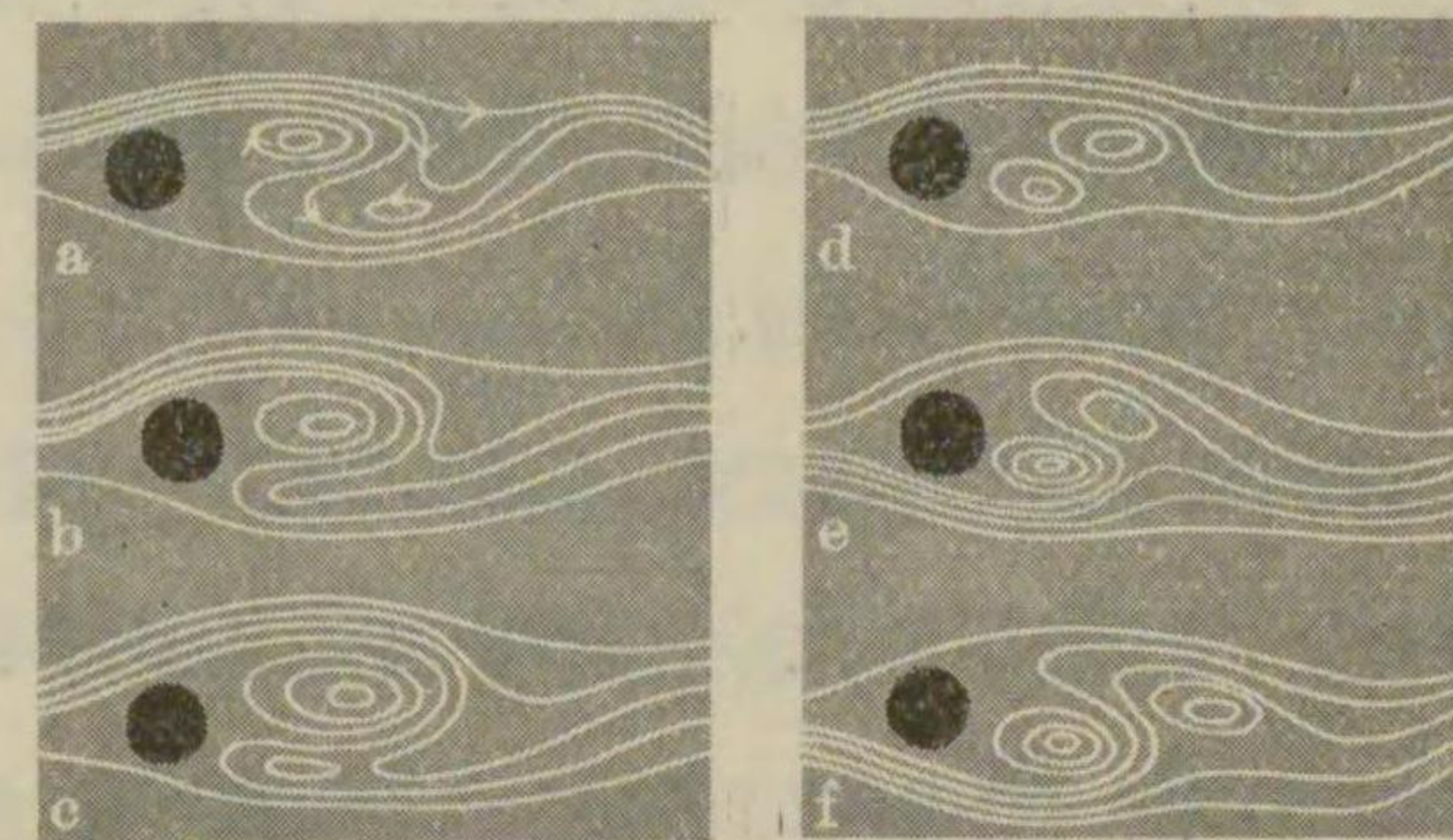
或る場所に於て演奏される管絃樂等をマイクロフォンにて受け、有線或は無線中繼に依つて他の場所に於て擴聲器を鳴らして是れを再生する場合に唯一組のマイクロフォンと擴聲器とを使用したのでは各樂器の空間的位置の相違に基く音樂の立體感 (Auditory perspective) を與へるに不充分である。此場合完全なる立體感を得るには理想としては無限数のマイクロフォンと擴聲器の組を必要とする譯であるが、實際問題として此組数を何程迄減少し得るかを知るために1933年春米國に於て大規模なる試験が行はれた。フィラデルフィヤ市に於けるストコフスキー指揮の大管絃樂を有線に依りワシントン市にて再生し種々試験を試みた。その結果によれば音樂の立體感を與へるには充分注意して設計された二組のマイクロフォン及び擴聲器で差支ない事が確められた。

### 38. 渦流に依る音

音は空氣の振動であるから、是れを起すには通常何等かの振動體を必要とする。ピアノや三味線では絃の振動が音源であり、太鼓や鼓では皮の振動に依つて音が發せられる。然しながら音を發生するには必ずしも振動體を必要としない、渦<sup>うず</sup>に依つても音が起される場合がある。鞭の音、或は細い棒を速く振り廻す時に出るヒュー・ヒューと云ふ音は鞭の革紐或は細い棒の周りに發生する渦によつて生ぜられるものである。木枯しの音、電線の唸り等も此種の音である。

一般に流體の一樣な流れの中に障礙物が在ると、屢々その後部に渦流が發生されることは河流の中に立つ杭、或は岩の類に其實例を見受ける所であるが、空氣中に於ても同様の現象が認められる。一樣に流れる空氣の流れの中に棒のやうな障礙物を置くと、氣流は是れによつて一旦二つに分れるが棒の背後で再び合流する。而して氣流の速さが遅い間は特別に變つた

ことはないが、或る速さを超すと第35圖に示すやうに棒の背後の氣壓の低くなつたところに外側から空氣



第 35 圖

が流れ込む際に渦が生ぜられる。猶此渦は障礙物の後部兩側に交互に發生されるもので、兩側の渦の廻轉方向は互に反對になつて居る事が認められて居る。斯様な渦が唯一つでは單に周圍の空氣に唯一回の刺戟が與へられるだけで、吾々に音と云ふ感を與へる事はないが、氣流の速さが増加して一秒間に渦の出来る數が増して來ると吾々に繼續した音として感じられるに至る。以上は靜止して居る棒に氣流が當る場合であるが、逆に棒を靜止した空氣中を速く動かす場合も全く同じである。

シュトロウハル(V. Strouhal)は、古く色々な太さの針金を空氣中を速く動かして針金の太さ  $d$ 、速さ  $v$  と、發生される音の振動數  $N$  との間には次の様な關係が在る事を見出した：

$$N = 0.185 \frac{v}{d}.$$

即ち障礙物が丸い棒である場合には此渦による音の高さ(振動數)は大體風の速さを棒の直径の5倍で割つたものであると記憶すればよい。

靜かな田舎路等でよく聽かれる電線の唸りに就て此結果を應用してみるに、今電線の太さを2mm、風速を毎秒3mとすれば、發せられる音の振動數は約  $300 / (0.2 \times 5) = 300$  であるから、ピアノの中央の  $c$  即ち  $c^1$  より稍、高い音で

ある。電線から生ぜられる唸りの強さは勿論極めて微弱なものであるが電柱が共鳴して音の強さを著しく増して居る事は、電線の唸りは電柱の傍で最も明瞭に聞える事によつて理解されよう。

此シュトロウハルの實驗式は音の高さの概略を與へるに過ぎないが、元來此種の渦は流體が粘性に依つて障礙物の表面から引かれる爲めに生ずるもので、レイリー卿は此粘性(従つて温度の影響)をも考慮に入れ、上述のシュトロウハルの實驗式よりも一層よく實驗と一致する式を誘導した。

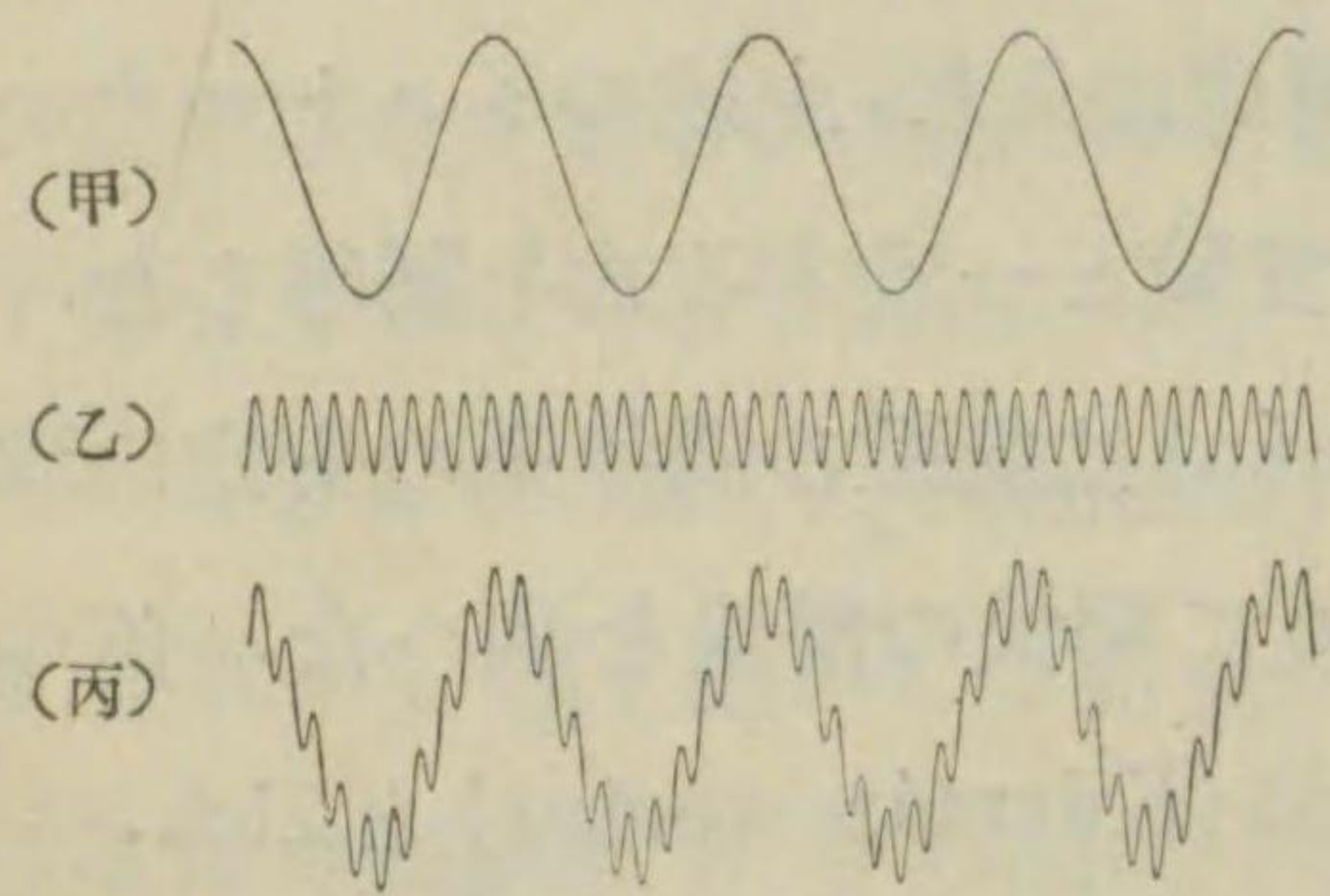
猶カルマン(Th. v. Kármán)は此種の渦流系の安定の理論的研究をなし、是れに極めて明快の解決を與へた。依つて通常此種の渦をカルマン渦(Kármán vortex)と云ふ。

狭い間隙或は細い孔から吹き出される氣流が鋭い刃形の障礙物に當る時に發せられる音も矢張障礙物の兩側に生ぜられるカルマン渦に歸せられる。實例としてはオルガン管(パイプ・オルガン)、尺八其他の笛類の發音の源は何れも此音である。是等の樂器の吹口には何れも鋭い刃形が造られてあり是れに細隙(オルガン管の場合)或は口唇(笛類の場合)から逆り出る空氣が當つて渦を生じ、音を發するもので、詳しく言へば渦流發生の週期と管内の空氣の固有振動の週期とが一致すれば共鳴によつて音が永續されるのである。

## 第七章 音響の分析

### 39. 總説

ピアノにはピアノ獨特の音色があり、ヴァイオリンにはヴァイオリン獨特の音色がある。樂器でも音聲でもすべて

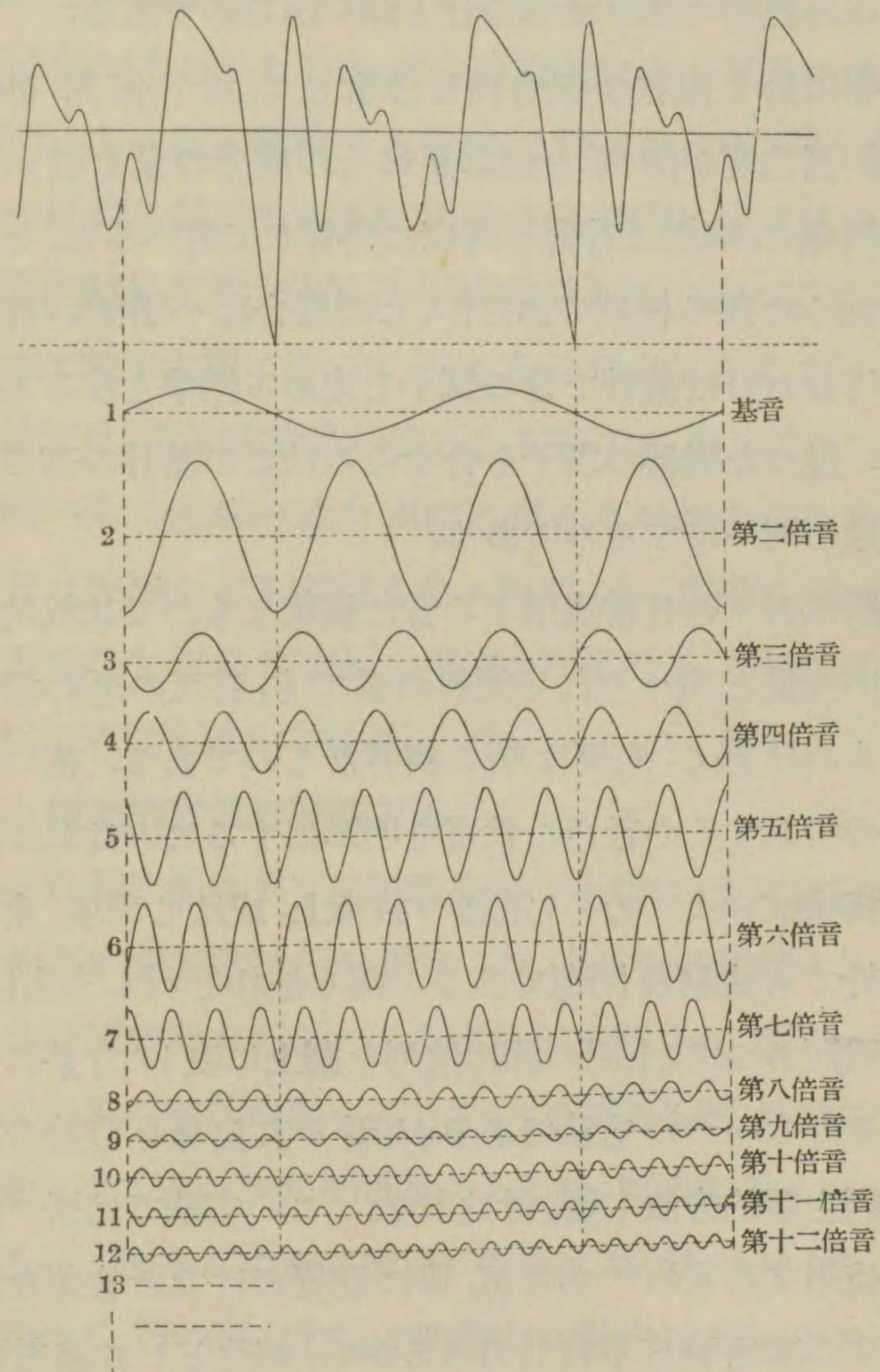


第 36 圖

色々な音の音色の特色は其波形に依るものであることは曩に第4節で述べた通りである(第41節注意事項参照)。

最も單純な音は音叉の出す音でその波形を圖で示すと、第36圖(甲),(乙)の様な所謂正弦波形である。(甲)は音叉の低い大きな音を表し、(乙)は高い弱い音の波形である。音叉の音は斯様な簡単な波形を持つて居るが、一般の樂器の音及び音聲などの波形は口繪寫眞に示した様に遙に複雑である。その一例として第37圖の一番上に示してあるのは口繪のものと同じもので片山雄山氏吹奏尺八の音(傍孔を全部ふさいで出した所謂筒音)の波形である。此複雑な波形を分析した結果は後に述べる。前に戻つて、第36圖の(甲)と(乙)とに示した二

種の音を同時に發せしめた場合の波形は(丙)のやうになる。逆に(丙)を分解すると(甲)と(乙)との集りであること



第 37 圖 尺八の音分析圖



がわかる。同様に第37圖の一番上に示した尺八の音の複雑な波形を分析すると、是れはその下に示した様に十二種以上の純音の集りであることがわかるのである。

化學に於て複雑な混合物を分析して、水が何%、砂糖が何%、蛋白質が何%と云ふ風にその成分の量を明かにすると同様に、複雑な音響を斯様に分析して考へると、その性質を知るに頗る便利であるが、この場合に一番低い音即ち第37圖の(1)は基音で音の調子を定める標準となるものである。違つた樂器の調子を合せるのはこの基音の高さ即ち振動數を同一にするのである。

一般に吾々の日常遭遇する音は複雑なもので比較的規則正しい振動と考へられる樂器の音でも、音又の音の様な單純なものは尠く、通例は頗る複雑なものである。依つて是れを分析してその音色の性質を明かにすることは單に物理學的興味ばかりでなく、電話の技術上、或は心理學・生理學等に於ても大切な問題である。而も是れを行ふ方法は、大凡二種類あつて、上記の様に波形を圖上に表して、是れを分析するのも一つの方法であるが、音それ自身を直接分析する所謂主觀的方法も屢々行はれた。この方法では吾々の聽覺を使用するものであるが、單に聽覺だけでは複雑な音を分析する事は到底不可能であるから、補助として多數の共鳴器を使用する。獨逸の碩學ヘルムホルツは既に數十年前

に斯様な方法で、色々な樂器の音や、吾々の音聲等を分析してその性質を明かにした。

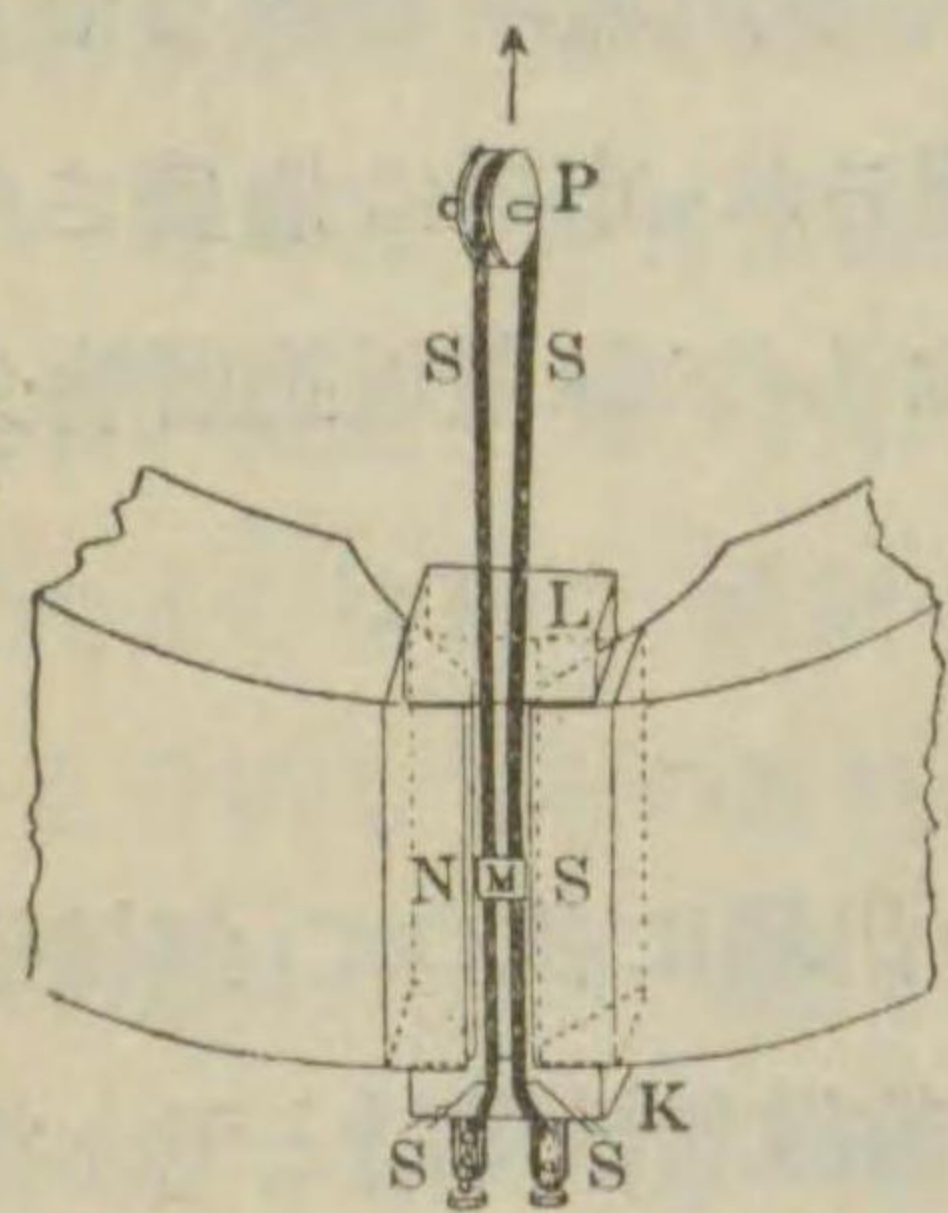
然しながら、斯様な主觀的方法では、最後の判断は吾々の聽覺に俟つものであるが、吾々の聽覺は音の高さの違ひを辨別する力は頗る鋭敏であるが、これに反し強さの違ひに對しては頗る鈍感であるので、かゝる聽覺による音の分析は數量的結果を與へるには不充分である。是れに反し、前記の様に波形を圖にとつて、是れを分析する方法、即ち客觀的方法では、數量的結果を得られる點では申し分ない。然し一得一失で波形の圖を正確に得る事が難中の難事である。音の波形をとる器械も色々考案され、市場に販賣されて居るものもあるが何れも不完全なもので、最近迄音響分析も爲めに行き詰りの感があつた。

#### 40. 電氣的音波形記録方法

然るに最近圖らずも三極真空管の出現に依つて、無線通信の技術に劃期的進歩が遂げられ、放送無線電話と云ふ様な前人の夢想だもしなかつた事柄が實現され、吾人の文化生活に一層の深みが加へられた次第であるが、同時に音波形記録と云ふ古い困難な問題にも亦略々解決が與へられたのである。即ちラヂオに使用する様な精巧なマイクロフォンに依つて、音の勢力を電氣的勢力に變化し、更にこれを三極真空管を使用する増幅器で擴大し、オッシログラフを以

て寫眞的に記録するものである。

オッシログラフとは、電流の變化を寫眞的に記録する器械で、第38圖にその構造の概略を示す。NSは強い電磁石又は永久磁石の兩極で、その狭い空隙の間に細い燐銅又は銀製の帶狀の線SSが吊してある。SSの兩端は固定され中央を小なる象牙製滑車Pに懸けてバネで上方に引張つたものである。MはSSに取り付けられた小さな鏡で、通常その大きさは長さ1mm、幅 $\frac{1}{2}$ mmと云ふ様な微小なものが用ひられてある。今SSに電流を通ずると、磁力線と電



第38圖  
オッシログラフの構造

流との作用で電流の方向と強さの變化に應じて、鏡は左右に廻轉運動をする。依つてこれに適當な光を當てると、寫眞フィルム又は乾板上に反射光點が左右に移動し而も其移動の幅が電流の變化に比例することとなる。依つてフィルム或は乾板を上から下へ動かせば、左右の運動と上下の運動とが組合はされて、フィルム上に電流の變化に應ずる波形が畫き出されるわけである。音波形をマイクロフォンで電流の變化に變じ、これをオッシログラフに通ずれば、茲に音波形の寫眞記録が得られる次第である。口繪

に掲げた母音や樂器の音の波形寫眞は、斯様にして筆者が撮つたものである。寫眞の下側の山から山までが $\frac{1}{50}$ 秒を示す。かくして得られる波形寫眞が、原の音波形を精密に表すためには特殊のマイクロフォンを使用する事を要し、又真空管増幅器も、所謂抵抗容量結合式のもので、増幅の際波形に歪みを生じない優秀なものでなくてはならない。

音波形を記録するに舊式の機械的その他の方法では、色々な原因で波形が崩れて精密に原形通りの物が得られなかつたのであるが、斯様な電氣的波形記録方法に依つて在來の方法では到底得られなかつた正確な結果が得られるに至つたことは、音の干物と云はれた蓄音器が電氣吹込によつて全然舊套を脱し、面目を一新したことで讀者も諒解されることであらう。實に三極真空管の發明と云ふ様な偉大な發明はその影響の及ぶ所頗る廣く、これによつて色々な方面に夫々一新生面が開かれるものである。

#### 41. 音響スペクトル

讀者は口繪に掲げた色々な音波形寫眞を見て、それが如何に多種多様で、夫々特色あるものであるかを認められるであらう。先づ母音の波形に就いて見るに、**アイウ**三つの母音夫々獨特の波形を持つて居る。従つてこれによつて同じ高さの聲を出しても發音方法に依つて**ア**になつたり**イ**になつたりする理由も諒解され、又蓄音器の捻子が緩んで廻轉

が遅くなるとオだかウだか區別が不明になる譯も、大體呑み込めるであらう。但し後に詳しく述べる様に此母音の波形は人により、又男女により多少違ふものである。

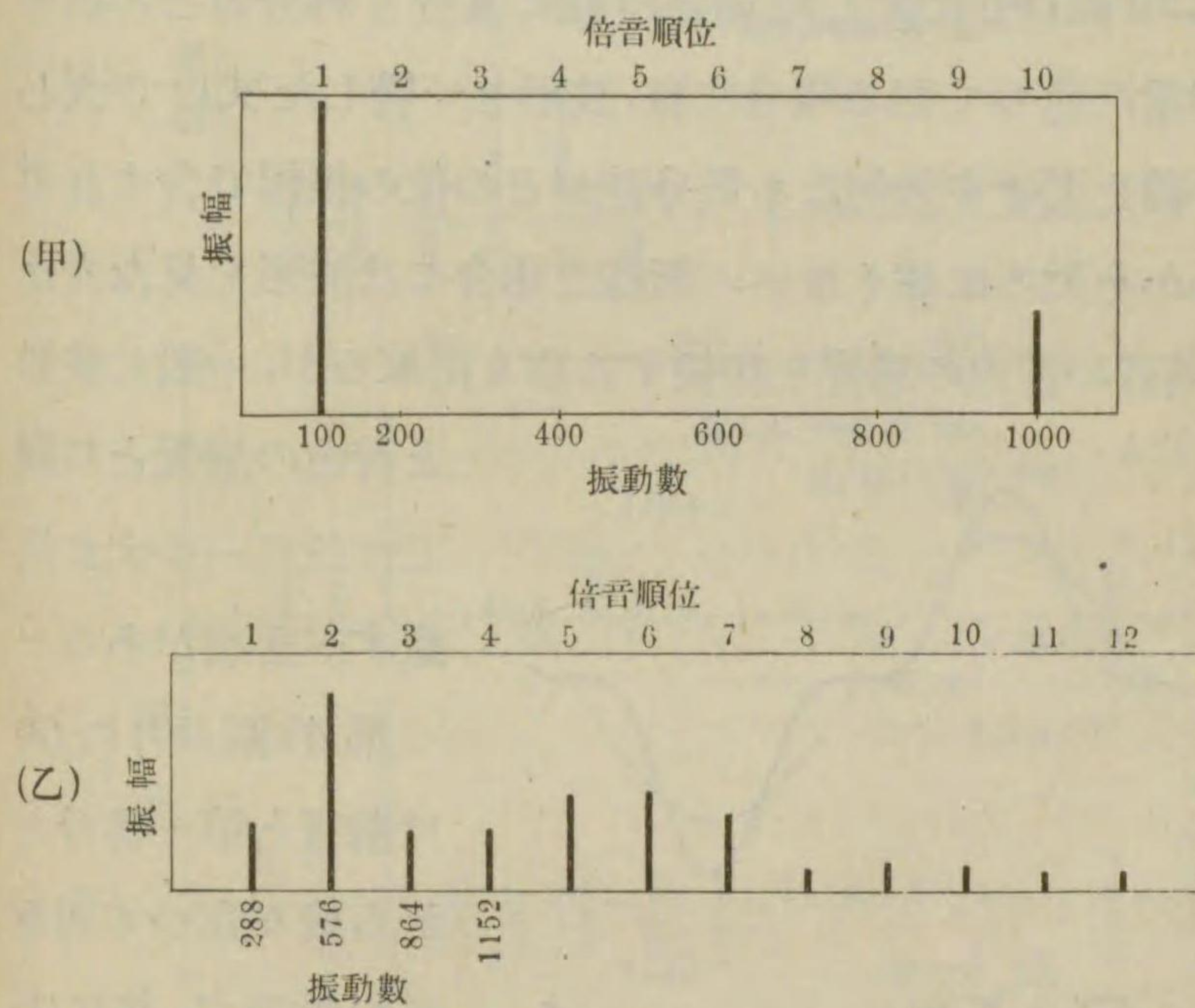
次には尺八の音の波形が出してあるが、一般に笛類の音の波形は、比較的簡單で、高い音では前に掲げた音又の波形の様に正弦波に近づいて来る。ラヂオでも尺八や笛の音は比較的原音に近いのはその波形が簡單で、従つて途中で崩れる事が少いために外ならぬ。茲に掲げたのは都山流尺八の名手片山雄山氏の吹奏されたもので、尺八の音の中で最も吹奏に困難とされて居る□の音で複雑ではあるが極めて規則正しい波形となつて表れて居る。茲には掲げてはないが、素人の吹奏した□の音はもつと遙に簡単な波形で、従つて音に味がない事が明かに示される。

斯様に波形を一瞥しただけで、音色の大體は窺ひ知ることが出来るし、樂器にあつてはその良否、演奏者の巧拙等も或る程度迄はわかる譯である。然しながら、猶詳しくはこの波形を分析して前に述べた様に、その各成分の大きさを知る必要がある。

斯様に波形の正確な寫眞が得られたら、その次に是れを分析して第37圖に示した様に、各成分に分けるのはどうするかと云ふに、詳しいことは略するが、兎も角斯様な波形の一週期(ひと波)を引伸寫眞で擴大し、是れに基いて調和分

析と云ふ非常に面倒な計算を行ふのである。又機械的にこの調和分析を行ふ所謂調和分析器なるものも數種ある。

光を分析するとスペクトルが得られるが、音を斯様に分析して、その各成分の大きさ、高さ等を示す圖を音響スペクトルと言ふ。第36圖(丙)に示した波形(甲と乙とを組合せた)をスペクトルに示せば、第39圖(甲)の様になる。又第37

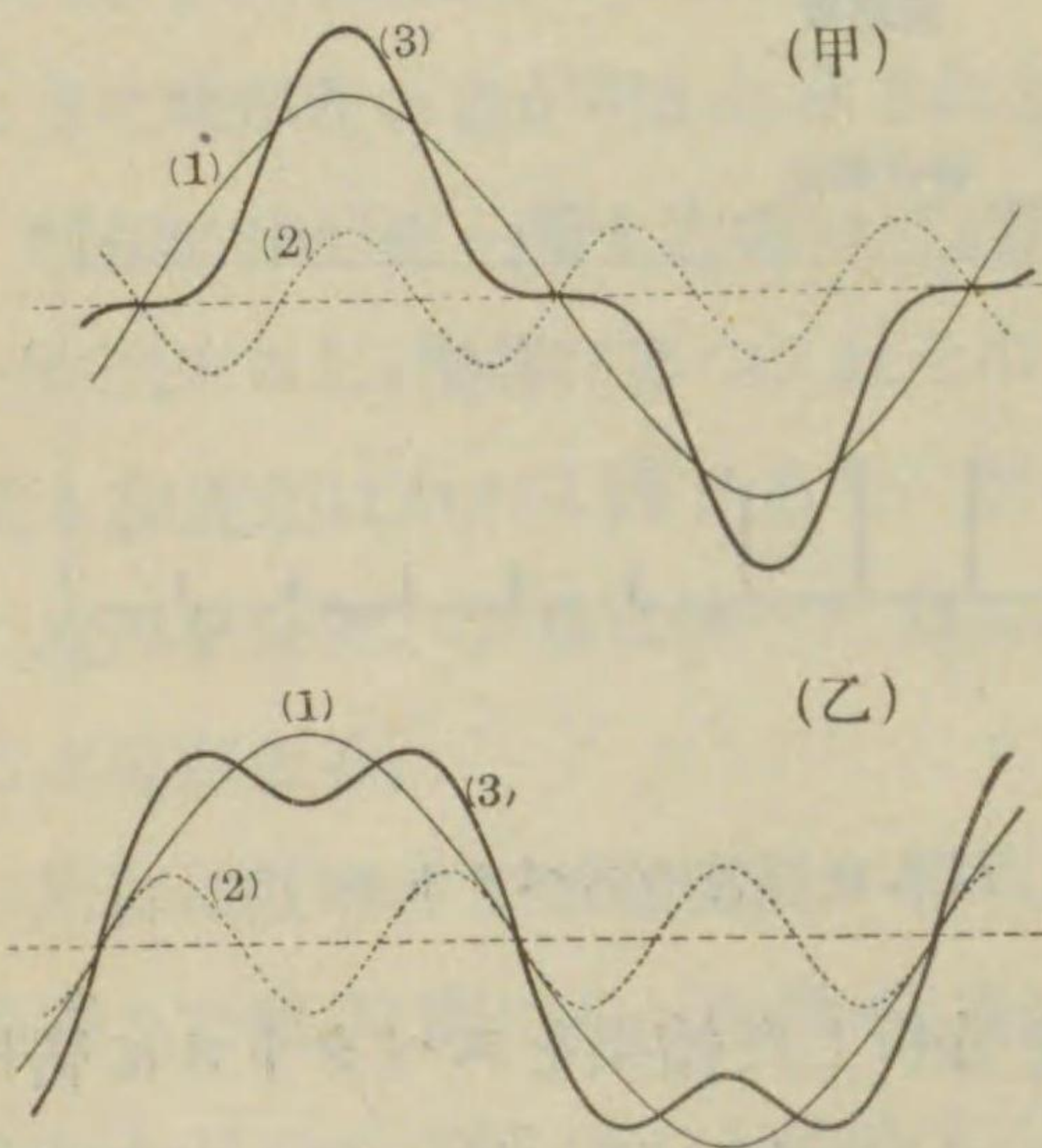


第39圖 尺八□の音のスペクトル

圖に示した尺八□の音を分析した結果をスペクトルに書けば、第39圖(乙)の様になる。何れも縦の棒の長さが成分の強さ(厳密に言へば強さの平方根即ち振幅)を表し、横の方

向には振動數即ち高さが示されてある。第36圖(丙)の波形は高低二つの成分しかないから、スペクトルは唯二本の棒となる。尺八の音では成分の大きさが十二種の棒で示されてある。尺八、箏、三味線、鼓、其他色々な樂器の音や吾々の音聲の波形及び是等を分析した詳しい結果に就いては、拙著“音樂愛好者のための音響學”を参照されたい。

第36圖(丙)に示した場合の様に基音と部分音との高さが非常に違つて居る場合には、波形を一瞥した丈で大した手数を要せず如何なる部分音がどの位の振幅で含まれて居るかを知るに難くない。斯様な場合には波形を見ただけで、其音の音色の感覺を想像する事も出来るが、一般に波形

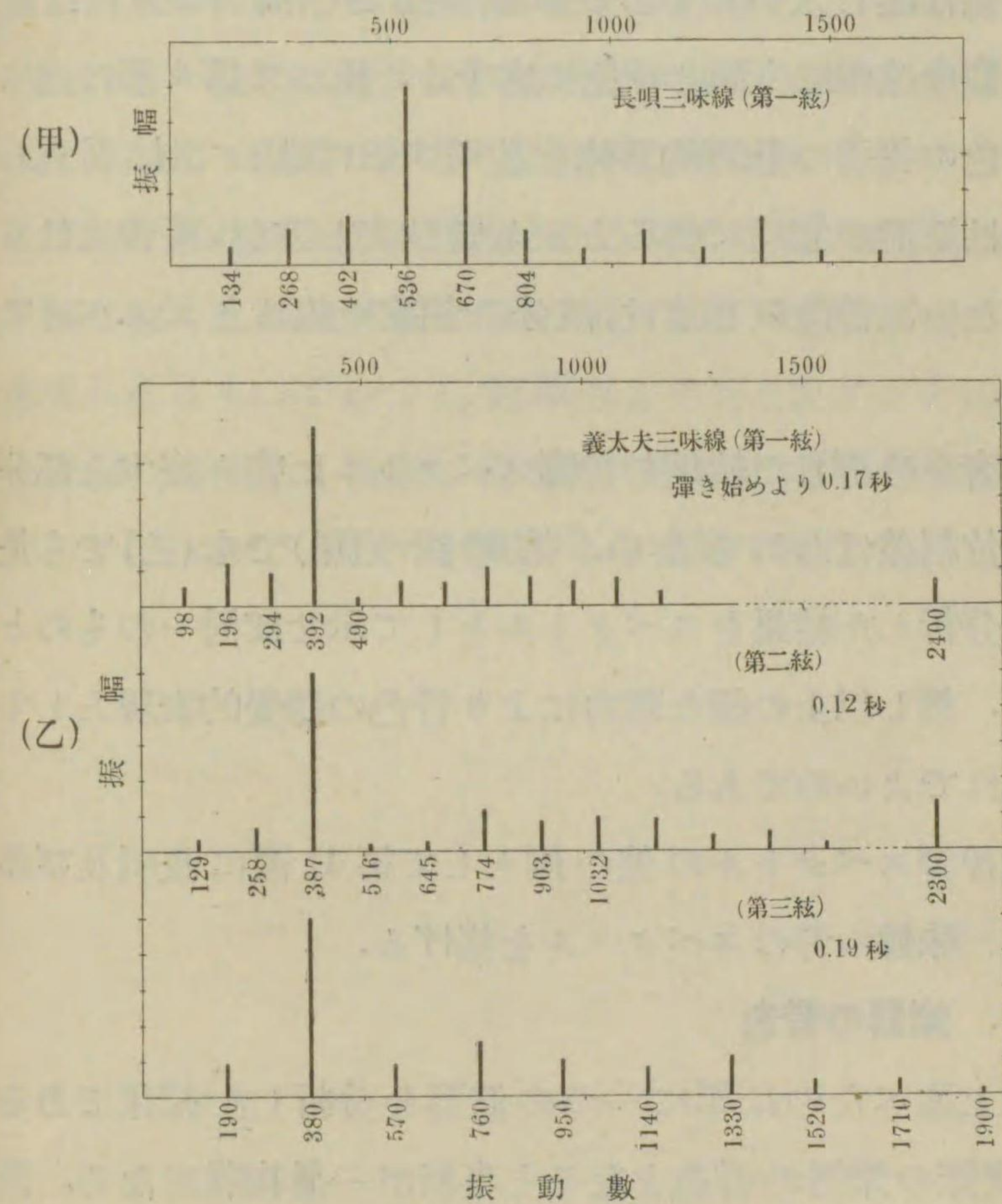


第 40 圖

と音色の感覺とに關して茲に一つ大に注意すべき事がある。

第40圖(甲)の(3)は基音と第三倍音とから成り立つて居る音の波形で、基音(1)と第三倍音(2)とを組合せると斯様に(3)の様な波形となる事を示す。

茲に大に注意を要する事は、斯様に基音と第三倍音と唯二つの波を組合せる場合でも、基音に對して第三倍音を少しずらせて重なり合せると、假令成分は同じでも結果に於て違つた波形となる事である。第40圖(乙)は(甲)と全く同一成分で唯重ね合せ方を變へたものである。斯様な場合



第 41 圖

を基音に對する倍音の位相が違ふと云ふ。即ち以上の事項をもう少し學術的の言葉で言ひ表せば、同じ部分音でも位相が違ふと基音と組合せた結果の波形が違ふと云ふ事が出来る。然し幸な事には吾々の耳は後に説明する様に複雑な音を聞く場合には、是れを成分に分析して感ずるので、位相の差は感じないのであるから、成分さへ同一であれば波形は假令違つても同じ音色に感ずる。依つて第4節に述べた音色の相違の物理的意味を説明するに當つても、音色の相違は波形の相違に依ると云ふ言ひ表し方は、嚴密には正しくない。音色の相違は、成分の相違に依ると云ふべきである。

音響を分析した結果を音響スペクトルに書き表すと部分音の位相差はわからない。第40圖の(甲)でも(乙)でも是れを分析した結果をスペクトルとして示せば同一のものとなる。然し以上の様な理由により音色の聽覺的表現としては是れでよいのである。

猶音響スペクトルの他の例として第41圖に長唄及び義太夫三味線の音のスペクトルを掲げる。

#### 42. 樂器の音色

以上述べたのは單に一つの波形を分析した結果であるが、實際の樂器の音色となると事柄が一層複雑になる。例へば三味線の音に就て言つてみても、その音波形を寫眞に

撮つて詳しく觀察してみると、先づ初めに撥が絃に觸れる音が現れ、これに次いで撥が胴の皮に當る音が出て、以後は絃の振動及び是れに共鳴する胴の振動に基く樂音的部分が規則正しい波形として長く繼續して居るのが認められる。而して此規則正しい部分と雖も、是れを仔細に觀察すると、波形が次第に變化して音色が時と共に變りつゝある事が認められる。是れは基音及び部分音の強さの減衰の程度が違ふために起る現象である。勿論單に耳で聽いたのでは斯様に微細な點迄區別して認識される譯ではないが、以上述べた様な色々な特徴が綜合して、吾々に三味線の音色として感ぜられるものであつて、簡單なるチンとかテンとか云ふ三味線の音も斯く微細に觀察してみれば、頗る複雑なものであり、そこに又無限の興趣がある次第である。

## 第八章 音の強さ及び高さの測定

### 43. 音の強さの測定

茲に述べるのは音の強さ、詳しく言へば音の物理的強さの測定であつて、音の大きさ、即ち感覺上の強さの測定に就ては第十二章に述べる。

音の強さ  $I$  と壓力  $p$  及び媒質の分子の速度  $v$  との間には次の様な關係がある：

$$I = \rho c v^2,$$

$$I = \frac{p^2}{\rho c},$$

$$\text{又 } p = \rho c v.$$

茲に  $p$  及び  $v$  は夫々壓力及び速度の實効値<sup>(1)</sup>、 $\rho$  は媒質の密度、 $c$  は音の速度である。

依つて音の強さを測定するに壓力振幅  $p$  を測る方法と、速度振幅  $v$  を測る方法と二種類ある譯である。而も是等の二量は上記の關係に於て認められる通り丁度電壓と電流とに該當するものである。即ち  $p$  は電壓に、 $v$  は電流に、 $\rho c$  は抵抗に該當し、従つて  $I$  は電力に該當する。然るに吾々

(1)  $p$  及び  $v$  は何れも  $X = X' \sin \omega t$  なる變化をなすものとし、實効値とは最大値  $X'$  の  $1/\sqrt{2}$  である。(交流理論参照)

の耳を初めとして殆んど總ての受音装置は皆壓力振幅を測定するものであるから、音の強さを表すには速度振幅  $v$  を測定した場合でも矢張上記の  $p = \rho c v$  の關係に依つて壓力振幅を以て表すのが通例である。音の強さを測定するに最も普通に用ひられるレイリー盤は速度振幅を表すものであるが、これに依る測定の結果は矢張壓力振幅バー(或はダイソ/平方cm)を以て表すのが普通である。而も、音の強さは上述の通り

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

である。依つて若し  $p$  をバー(ダイソ/平方cm)にて表し、 $c$  を cm/秒、 $\rho$  をグラム/c.c.にて表せば  $I$  はエルグ/秒/平方cmにて表される。然るに10エルグ/秒が1マイクロワットに相當するから

$$I = \frac{1}{10} \frac{p^2}{\rho c} \text{ マイクロワット/平方 cm}$$

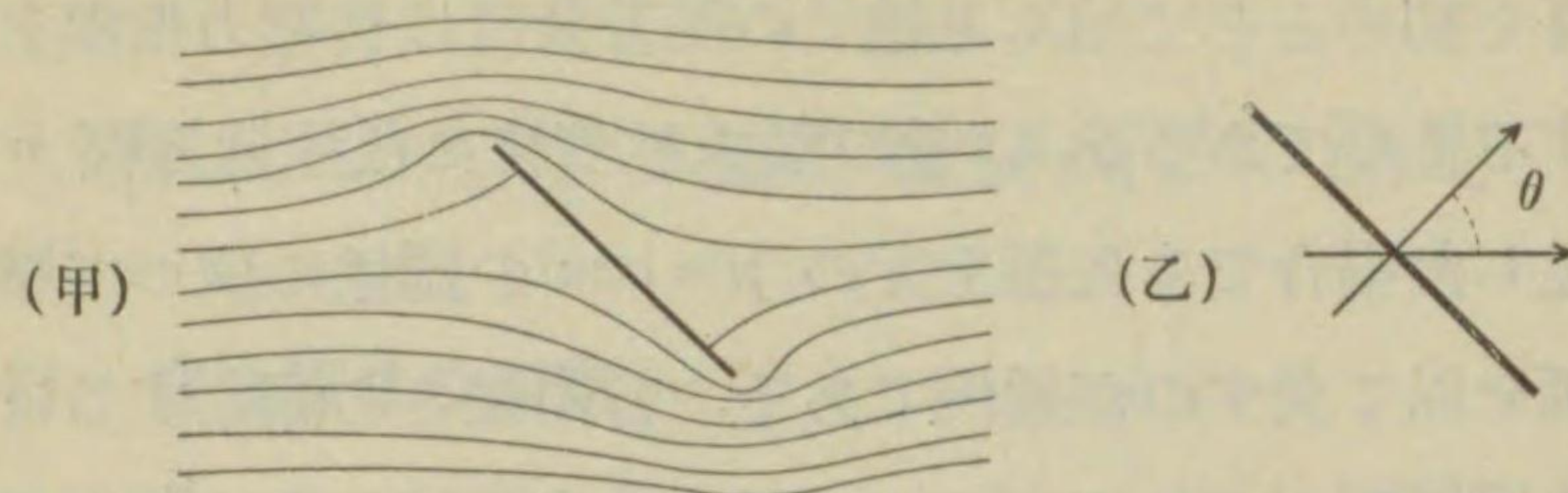
となる。20°C に於て  $\rho = 0.001205$ 、 $c = 33,150 + 61 \times 20 = 34,370$  を入れれば

$$I = \frac{p^2}{414} \text{ マイクロワット/平方 cm}$$

となる。

### 44. レイリー盤 (Rayleigh disc)

第42圖(甲)に示す様に流體の一樣な流れの中に薄い盤を吊すと盤の面を流れの方向に垂直ならしめんとする偶力



第 42 圖

が働く事は流體力學に於て知られて居る所である。ケーニヒ (W. König) は半径  $r$  の圓盤を、密度  $\rho$  の流體の一様な流れの中に、盤の法線と流れの方向とが  $\theta$  なる角をなす様に吊した場合 (第 42 圖 (乙)), 盤に働く偶力の能率  $M$  は次の式で與へられる事を證明した:

$$M = \frac{4}{3} \rho r^3 v^2 \sin 2\theta.$$

此式に依つて明かなる様に廻轉能率  $M$  は  $v^2$  に比例する、即ち分子速度の方向に無關係である。依つて此關係は一つの方向に向いた流れの場合でも、或は流れの方向が交互に變る音の場合でも成り立つ。但し後の場合に  $v$  は速度の實効値 (Effective or root mean square value) である。猶此式の成り立つのは平面波即ち壓力と速度との位相が一致して居る場合に限る。又此式で明らかな様に偶力は  $\theta = 45^\circ$  の時最大である。

レイリー卿は此原理を利用して、高さ一定の音の強さを比較する簡単な器械を作つた。依つて是れをレイリー盤と

云ひ、爾來此装置は色々改良されて音の強さを測定するに用ひられるに至つた。盤の慣性能率を小さくし、感度を良くするため盤の材料としては通常極めて薄い雲母板或は硝子板等を用ひ、また是れを吊すには細い白金線 (Wollaston wire) 或は石英纖維 (Quartz fibre) の類が用ひられる。

前述の様に  $p = \rho cv$  であるから、 $\theta = 45^\circ$  即ち盤を音の來る方向に  $45^\circ$  に吊したとすれば上記のケーニヒの式により壓力振幅 (實効値)  $p$  は

$$p = c \sqrt{\frac{3}{4} \rho \frac{M}{r^3}}, \text{ 又 最大値 } p' = c \sqrt{\frac{3}{2} \rho \frac{M}{r^3}}$$

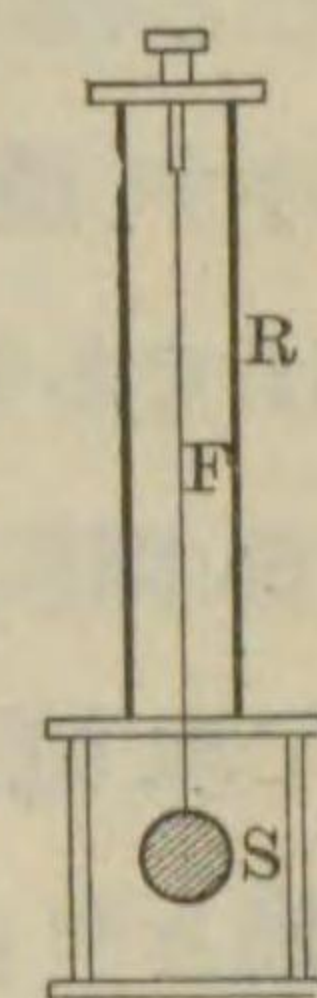
に依つて與へられる。

此式中に含まれる  $M$  は盤の慣性能率、廻轉週期、對數減衰及び偏れの角から求められるから結局

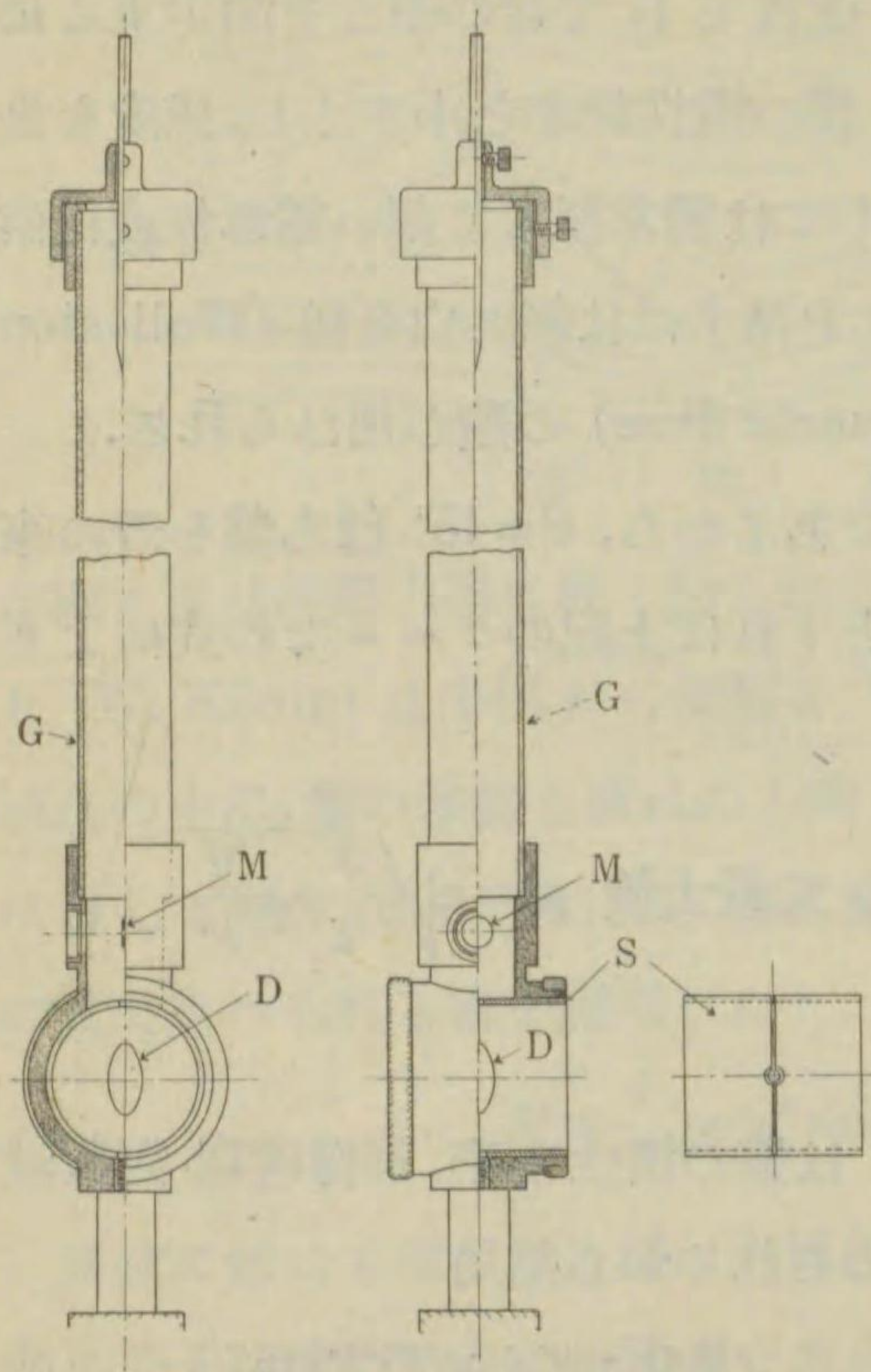
$$p = \text{常數} \times \sqrt{\text{偏れ}} \quad \left( \begin{array}{l} \text{單位: ダイン/平方 cm} \\ \text{即ちバー} \end{array} \right)$$

となり、測定の実際上の操作としては單にランプ・アンド・スケールを用ひて盤の偏れの角度を読みとる事に依り壓力が求められる。

斯様なレイリー盤を作る事は頗る簡單で直径 5~10 mm の極めて薄い雲母板の中心に小さな鏡を貼り付け是れを第 43 圖に示す様に兩端の開いた函又は四本の柱を立てた櫓の中



第 43 圖



第44圖 レイリー盤

に吊しガーゼ、寒冷紗の類にて風の妨害を防ぎ、硝子窓を通してランプ・アンド・スケールで盤の偏れを測定すればよい。

第44圖は著者の使用するレイリー盤の構造を示す。是れはテイラー (H. O. Taylor) が各種の建築材料の吸音性を測定するに用いたものと略、同様なものである。圖に依つて明かなる様に偏れの読み取りの便宜上鏡は盤の面に直接貼り付けず、鏡 M と盤 D とは離して極めて細い硝子棒にとり付けてある。盤は顕微鏡の deck-glass を圓形に截つたもので、圖に示したものでは M の面と D の面とは  $45^\circ$  に傾けて取り付けてある。然し偏れの読み取り用の窓と下の管の軸とを  $45^\circ$  傾けて作つて置けば盤と鏡と同一平面上にある様にする事も出来る。S は上部の垂直な硝子管の共鳴を

防ぐために嵌めるサヤで、レイリー盤を吊り下げてから、是れを左右から嵌めて垂直な硝子管とレイリー盤の在る水平な管の部分との間の連絡を絶つものである。

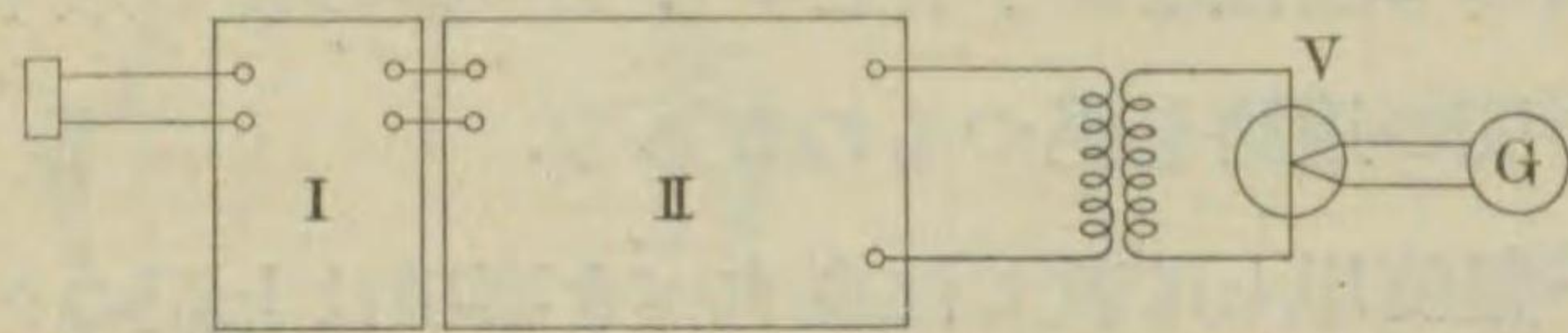
次にレイリー盤使用上に就て注意すべき事項は上記のケーニヒの式は平面波の場合のみに該当するものであることである。依つてレイリー盤は音源から相當離れた所で波面が充分平面と看做され得る所に置かなければならぬ。

斯様なレイリー盤は共鳴性を持つて居ないから、總ての高さの音に對し同一の感度を有し、使用上誠に好都合ではあるが、共鳴性がないため感度は頗る悪いから不便な場合も尠くない。依つて此筒に共鳴器を附し感度を高める事も屢、行はれる。但し此場合は言ふ迄もなく音の高さに依つて感度は著しく變る。

レイリー盤は以上の様な構造上是れを移動する事は困難である。又靜な實驗室内のみで使用されるもので、勿論野外等で使用する事は殆んど不可能である。斯様な目的には豫めレイリー盤に比較して試験したコンデンサー・マイクロフォン (第46節参照) を使用する。コンデンサー・マイクロフォンは豫めレイリー盤に比較して置けば斯く音の強さの絶對測定に用ひられるが、單に同じ高さの音の強さの比較に用ひるには別にレイリー盤によつて豫め試験して置く必要はなくその儘用ひてよい。



斯くコンデンサー・マイクロフォンを音の強さの絶対或



第 45 圖

は比較測定に用ひるには第 45 圖の様に増幅器の出力を真空熱電對 (Vacuum thermoelement) とミリ・アムメーター或はマイクロ・アムメーターの類にて測定すればよい。但し此場合は真空熱電對を使用する結果、電流計の指示は増幅器出力の自乗に比例するから、音の壓力振幅はその平方根に比例する事になる。

#### 45. 音の高さの測定

a) 絶対測定 音の高さの絶対測定とは言ふ迄もなく標準時計に準據して 1 秒間に於ける振動数を求める事である。此目的のために在來屢々行はれた方法はサイレンの音と比較する方法である。サイレンの音の振動数は廻轉板の孔の數と廻轉數との積で與へられるから、サイレンの廻轉數を調節して其音の高さと測定しようとする音の高さとを唸りを利用して合せればよい (唸りを利用して音の高さを合せる方法は第 13 節 (c) 及び本節 (b) 参照)。

音の高さの絶対測定にはサイレンを使用すれば簡単であるが、現今では電氣的方法即ちマイクロフォンとオッシログラフで音の波形を記録する事が容易く出来るから、標準

時間 (電氣時計又は電氣接觸點付きクロノメーター等による) と音の波形とを同一フィルム上に記録する事によつて容易く音の高さの絶対測定が行はれる。但し此場合波形の記録は單に 1 週期の長さを求め得ればよいので波形の精確を必要としないから、マイクロフォンとしてはコンデンサー・マイクロフォンの如き精巧なものを用ひるの必要なく、普通の電話用の送話器又はラヂオ用の擴聲器 (Loud-speaker) を利用して充分である。

斯様な方法で振動数を測定した音又は次に述べる音の高さの比較測定に於ける標準として使用される。

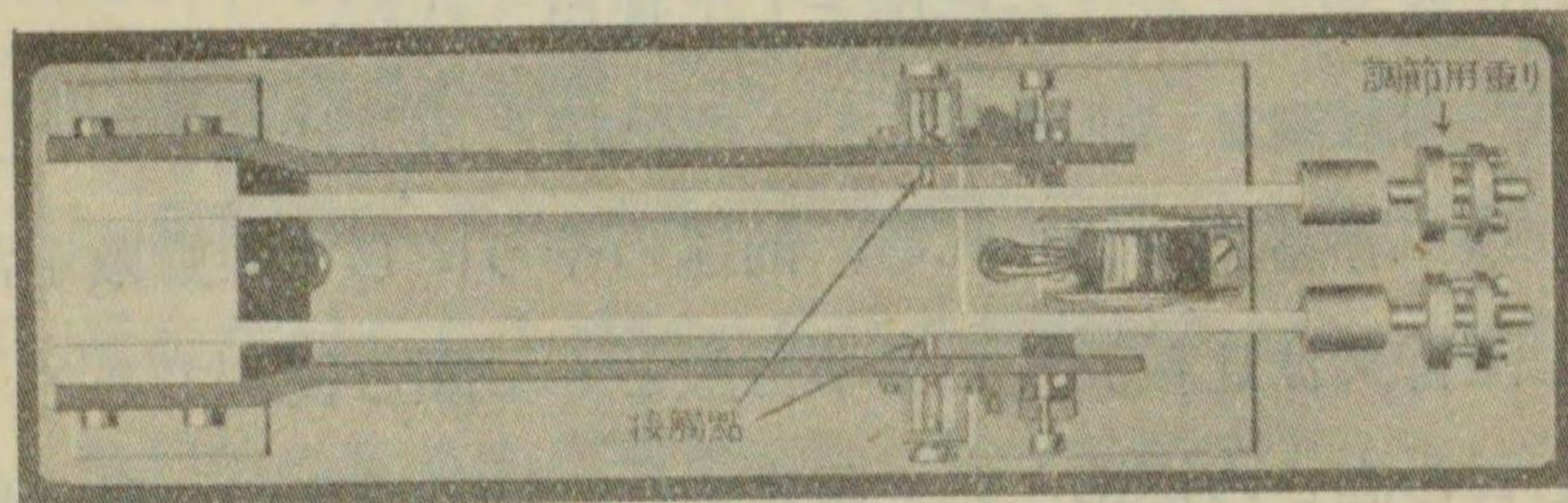
(b) 比較測定 純音の高さは標準音と直接比較することに依つて容易く求められる。前述のやうにして振動数を測定した音又は比較測定の標準音源として頗る便利である。但し音の高さの標準として販賣されて居る音又の振動数は Max Kohl, Edelmann 等の信用ある製造會社以外のものでは時に随分誤差のあるものがあるから注意を要する。

標準音又と較べて音の高さを測定する場合に、若し測定しようとする音の高さが標準音又の音の高さに近い場合に最も簡単な比較方法は、1 秒間に聞える唸りの數を勘定するにある (この唸りの數は兩音の振動數の差に該當する)。但し此未知音と標準音又と何れが高いかを知るには音又の又 (Prong) の一端に蠟等の小片を附し、唸りの數の變化に

注意すればよい。音叉の振動数は叉端に荷重する事によつて下がる。

音響を記録して振動数を求める場合音叉と共に記録するには電気勵動音叉によつて得られる交流を用ひるが最も精確で且つ簡便であるが、餘り精密を必要としない時には電燈線の 50 サイクル交流を用ひる事も出来る。口繪に掲げた寫眞に音波形と並べて記録してある時間波は何れも斯様な電気勵動音叉に依つたものである。

第 46 圖は斯様な目的に使用する電気勵動音叉を示す。



第 46 圖 電気勵動音叉

第 27 節に述べてある様に音叉の振動数の温度に依る變化は極めて微小なものであるから、通常の場合温度の影響は顧慮するの必要はない。

非常に高い音或は可聽界限より更に高い音の振動数は唸り又はヘテロダイン法 (Heterodyne method) に依つて測定される。即ち測定しようとする音をマイクロフォンに受けて電氣的勢力に變へ、是れに周波数を變へられる交流を

重疊する。然る後是れを整流すれば唸りの音が聞えるから、この唸りの音の高さを普通の方法に依つて測定すれば、其値と重疊した交流の周波数とから初めの未知音の高さが求められる。

## 第九章 マイクロフォン

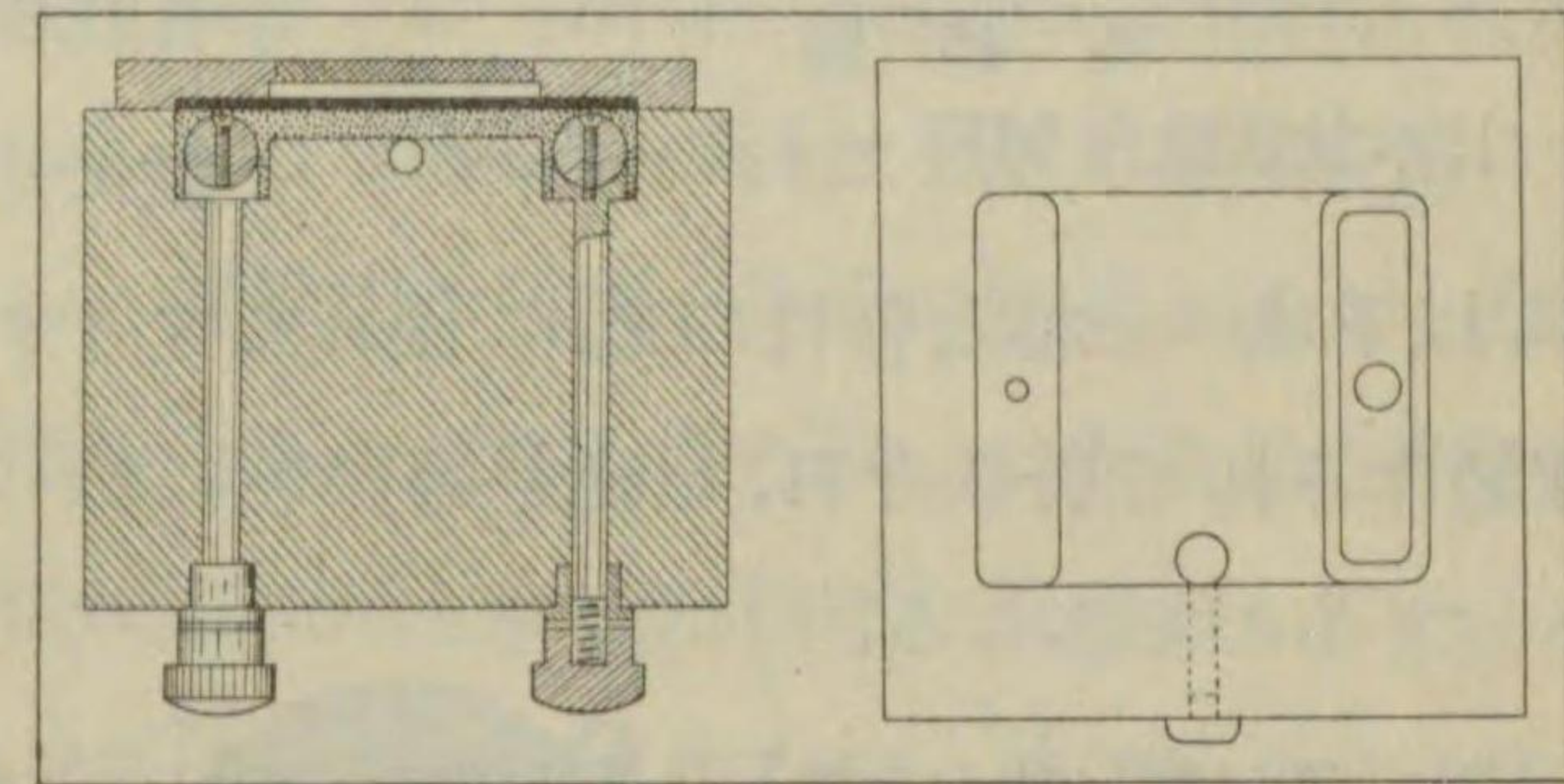
## 46. 各種のマイクロフォン

マイクロフォンと言へば何人も直ちにラヂオを聯想するであらう。ラヂオとマイクロフォンとはしかく密接なる關係のあるもので、マイクロフォンはラヂオの生命と云ふも敢て過言ではない。従つてラヂオの出現の以前にあつてはマイクロフォンと言へば炭素粒子の接觸抵抗の變化を利用する電話用送話器のみであつたが、ラヂオの發達普及に伴つてマイクロフォンの研究改良が著々として行はれた結果その構造、性能に躍進的進歩が遂げられ、各種の優秀なるマイクロフォンが製作せらるゝに至つた。即ち炭素マイクロフォン(Carbon microphone)を初めとして、コンデンサー・マイクロフォン(Condenser " ), ムーヴィング・コイル・マイクロフォン(Moving coil " ), バンド・マイクロフォン(Band " ), リボン・マイクロフォン(Ribbon " ), 或は速度マイクロフォン(Velocity " ), クリスタル・マイクロフォン(Crystal " )等是れである。猶此外にラヂオ用ではないが、微弱なる音の檢出等に用ひられる熱線マイクロフォン(Hot-wire microphone)等もある。茲には是等全部に就て述べる 違がないから、初めの五種のマイクロフォンに

就て夫々代表的のもの一つ宛の構造、性質を簡単に説明するに止める。

(a) **ライス型炭素マイクロフォン** 此マイクロフォンは炭素粒子の接觸抵抗の音響壓力に依る變化を利用する點に於ては普通の電話用送話器と異らないが、何等振動膜を持たず、従つて振動膜の固有振動の影響のないことを特徴とし、現今我國では

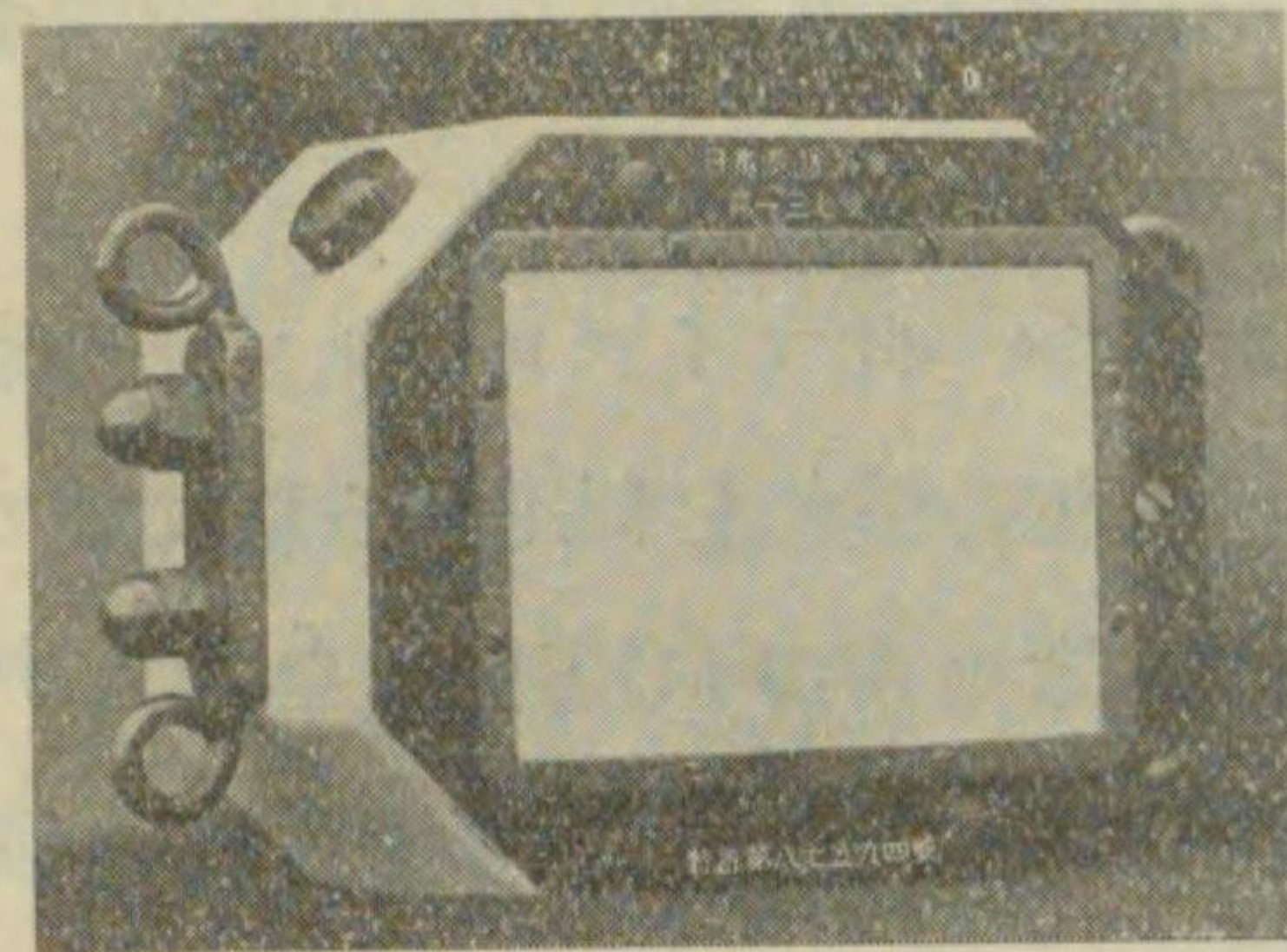
ラヂオ用として廣く用ひられて居る。其構造は第47圖に示すやう



第47圖 ライス・マイクロフォン

に約10cm角の大理石塊の側面に、廣さ10平方cm、深さ3mm許りの凹みを作り、是れに特殊の製法に依る炭素粉を詰め其兩端に炭素棒電極を挿入したものである。炭素粉の脱落を防ぎ且つ濕氣の侵入を防ぐため炭素粉層の外側は極めて薄いゴム膜、絹布、或は雲母板にて蔽はれて居る。英國マルコニー電氣會社及び日本放送協會製のライス型マイクロフォンでは構造は第47圖に示した獨逸製と同一であるが、外觀が第48圖に示すやうに八角形になつて居る。

此種のマイクロフォンの周波數特性(音の高さと感度と



第 48 圖

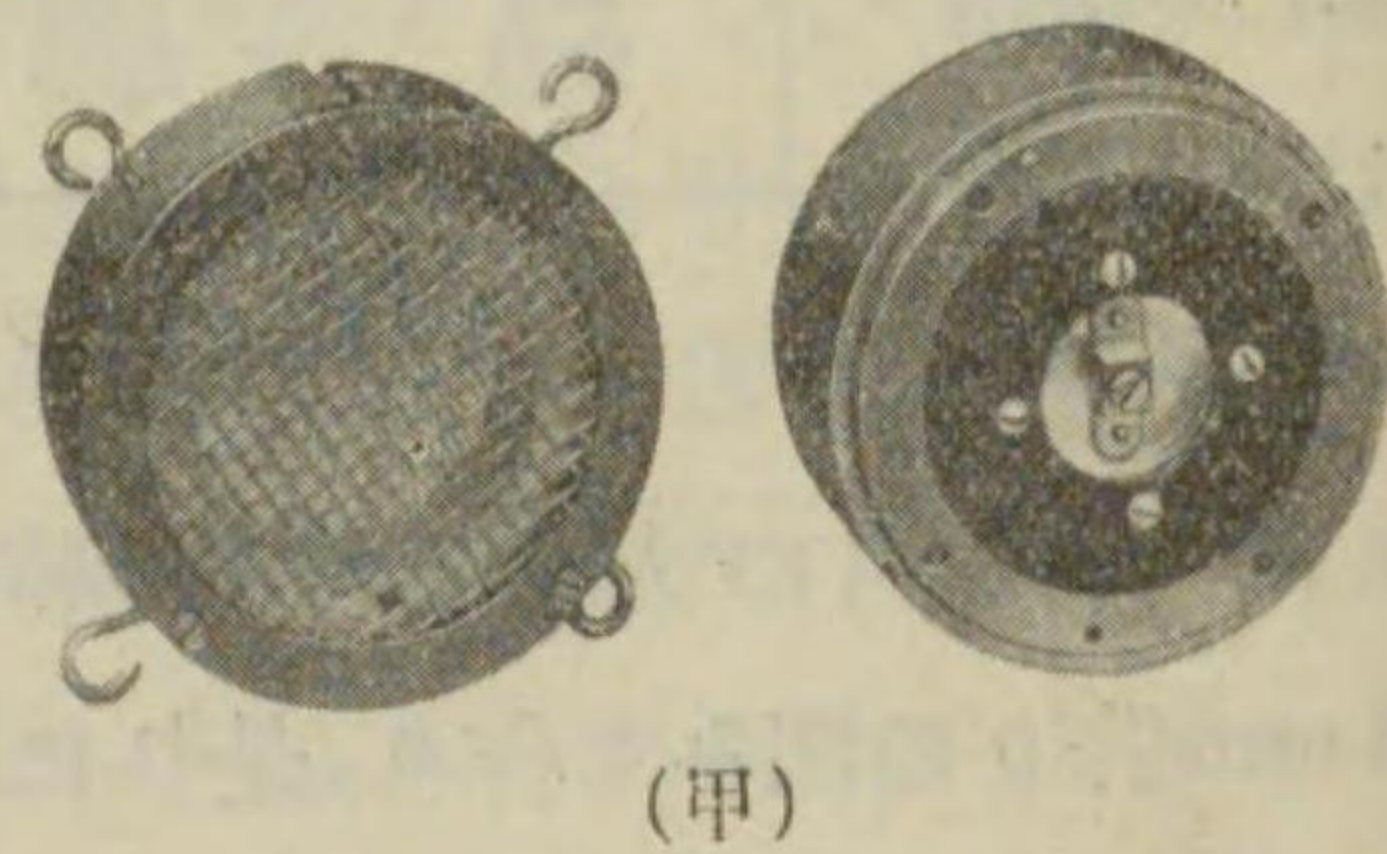
日本放送協會 MH マイクロフォン

の関係)は炭素粉の性質,詰め方等によつて著しく異なるが一般に高音によく感ずる.

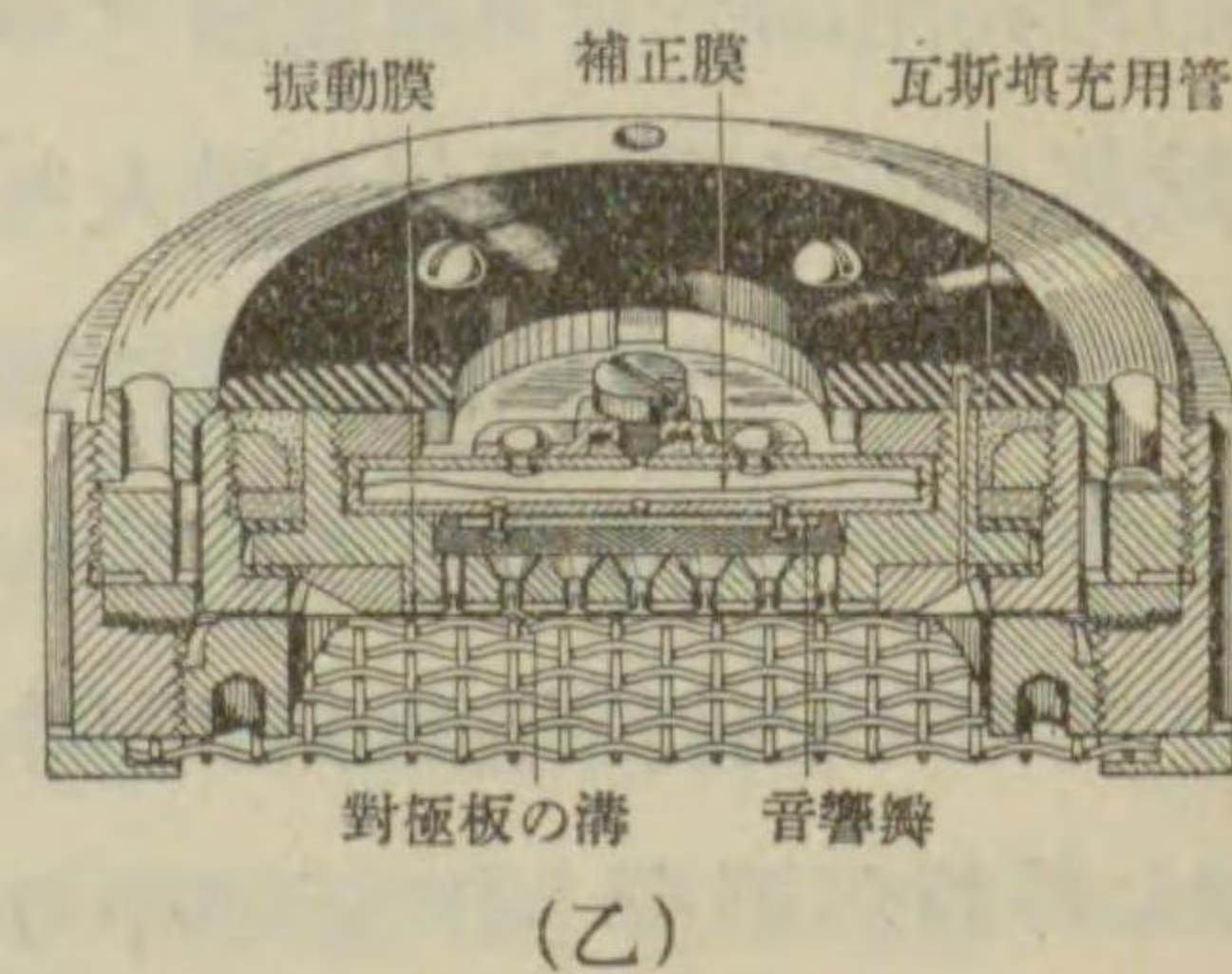
此マイクロフォンは取扱は簡便であるので今日我國のラヂオでも一般に用ひられて居る

が,以下述べる様な特性の遙に優れたマイクロフォンが種々製作されて居る今日,早晚是等の物に依つて置き換へらるべきものであらう.

(b) **コンデンサー・マイクロフォン** 此マイクロフォンには米國のウェンテ式と獨逸のリッガー式との二種があるが,何れも金屬製の振動膜を使用し,是れと電氣的に絶縁し,且つ極めて接近して金屬製對極を置き,是等兩者で一つの平行板蓄電器



(甲)



(乙)

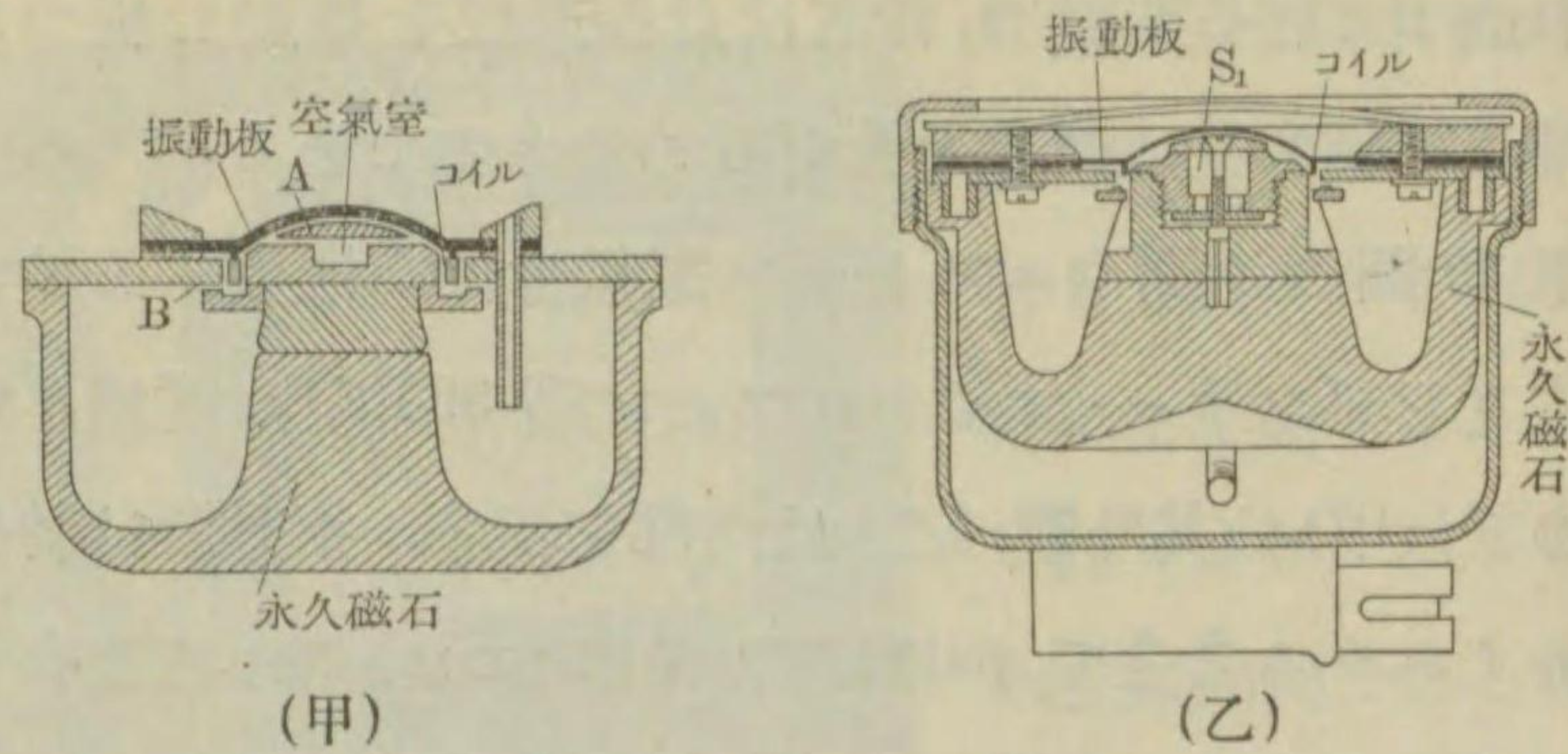
第 49 圖

を形造つて居るもので,音波は此振動膜を振動し従つて蓄電器の電氣容量に變化を生ぜしめるものである.

第 49 圖は米國ウェスターン電氣會社で販賣するウェンテ式コンデンサー・マイクロフォン第 394 型の構造を示すもので,(甲)は其外觀,(乙)は内部を示す.振動膜は特殊のアルミニウム合金で 0.0011 吋 (0.028 mm) の厚さを有し固有振動約 5,000 に調整されて居る.振動膜と對極との間隙は 0.001 吋 (0.025 mm) で金屬面の腐蝕を防ぐため窒素ガスが充されて居る.振動膜の内部と外界の空氣とは全く直接の連絡を絶ち而も内外の氣壓を常に同一に保ち且つ高い感度を得られる様に圖に示した様な複雑な構造としてある.

(c) **ムーヴィング・コイル・マイクロフォン** 此マイクロフォン及び (d) のバンド・マイクロフォン或はリボン・マイクロフォンは何れも同一原理に依るもので音響に依つて強磁場内の電氣導體を振動させ,其導體内に誘起される電流を利用するものである.依つて是等のマイクロフォンを總稱して動電型マイクロフォン(Electro-dynamic type microphone)と呼ぶ事もある.

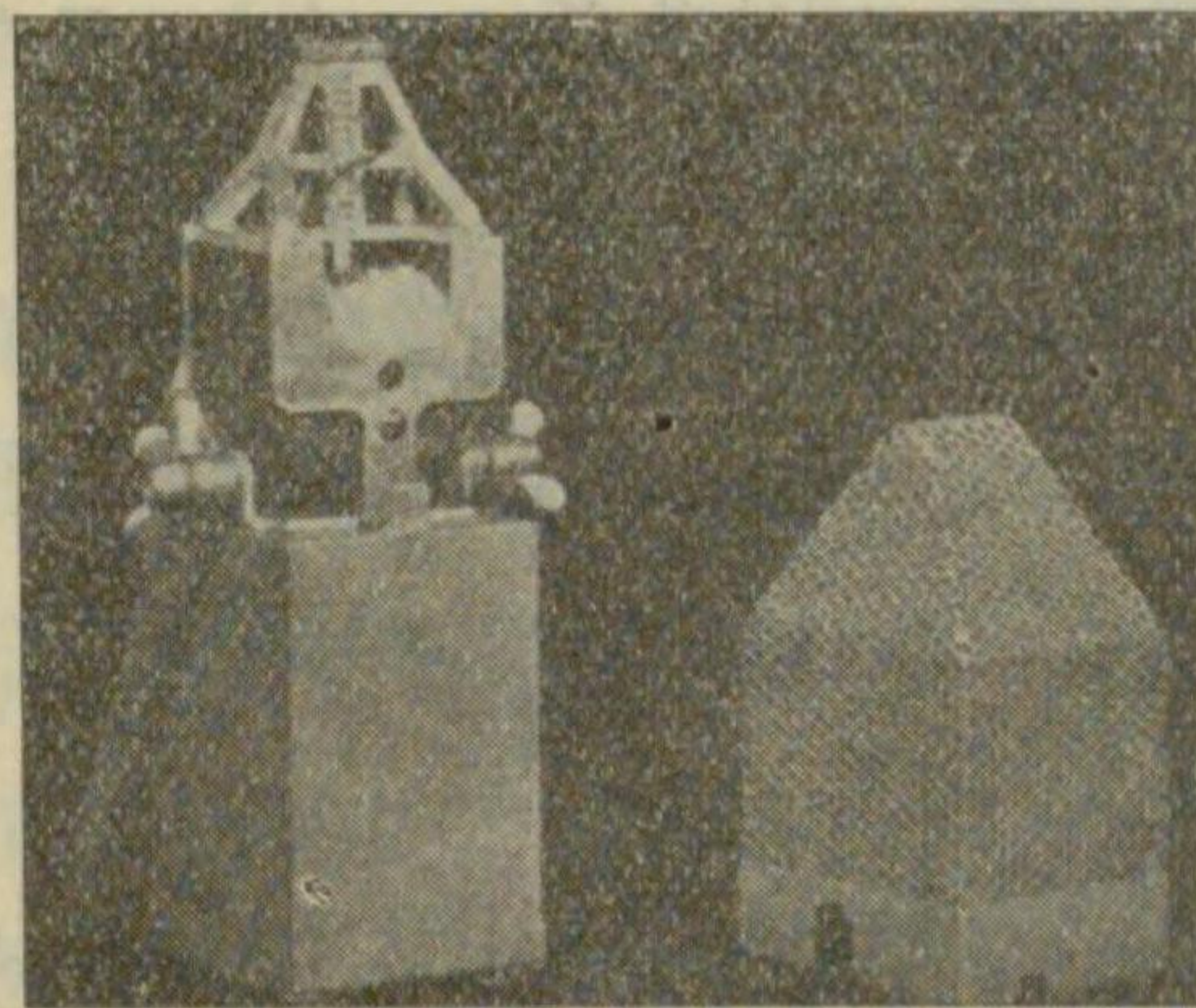
第 50 圖は此ウェスターンの Moving coil マイクロフォンの構造を示す.振動板は剛性を増すために中央部を球狀にし,是れにアルミニウムの薄片を捲いた單層のコイルが取り付けである.其周波數特性は振動數の廣い範圍に互つ



第 50 圖

て一様であり、ウェンテ型コンデンサー・マイクロフォンに比して感度は稍、良い。

(d) リボン・マイクロフォン或は速度マイクロフォン、及びバンド・マイクロフォン 振動膜を有するマイクロフォン或は炭素粒マイクロフォンは所謂 Pressure-operated microphone



第 51 圖

リボン・マイクロフォン

を吊したもので、音響によつて此アルミニウム・リボン

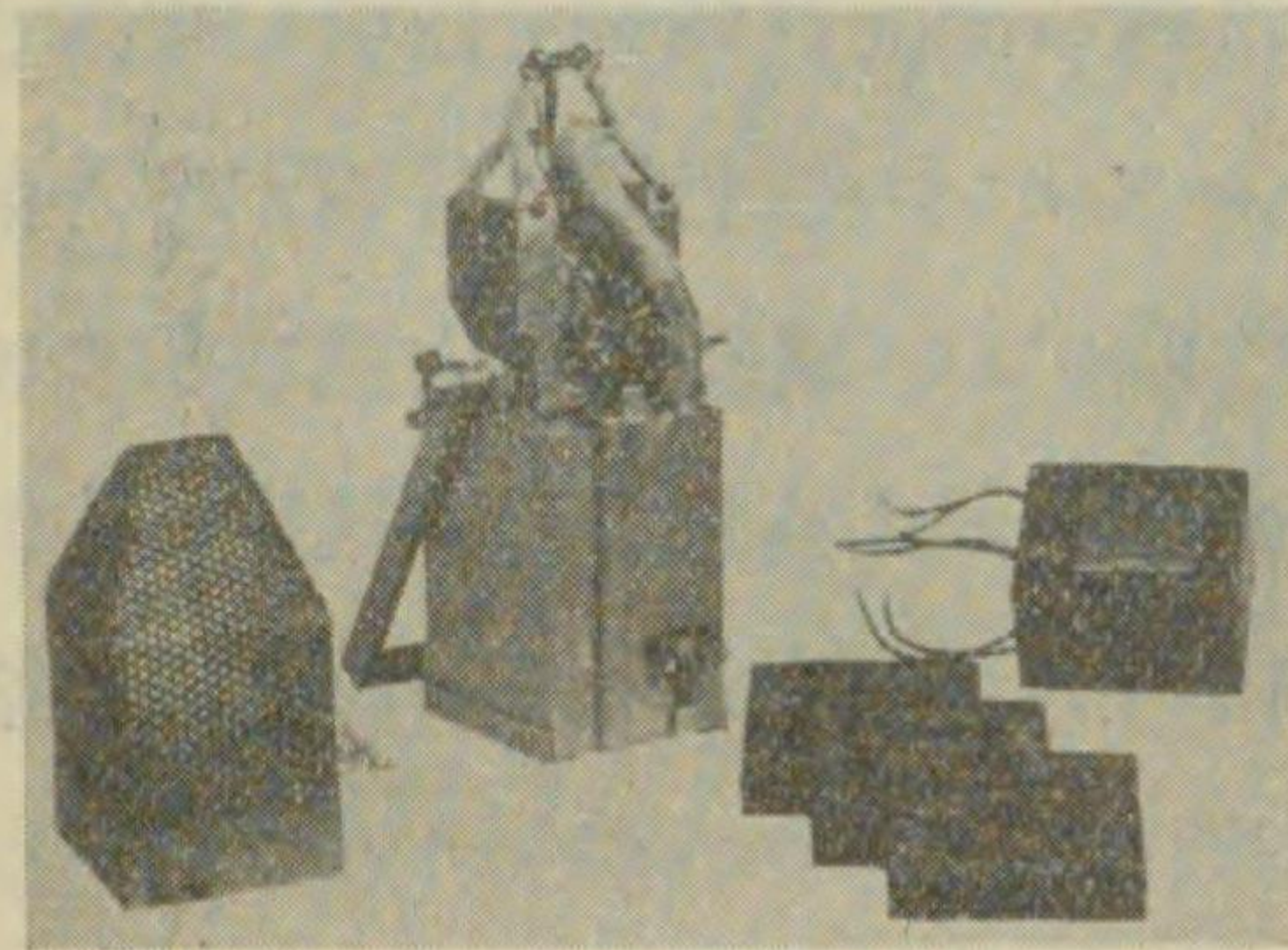
であつて、音響によつて生ぜられる過剰圧力(常圧に對して正負の圧力變化)によつて動作するものである。リボン・マイクロフォン或は速度マイクロフォンとは強磁界に薄いアルミニウムの波形の

が振動すれば、磁力線を截るから、リボンの中に起電力が誘起される。依つて此起電力を真空管によつて適當に擴大するものである。此リボンは前後両面共外氣に自由に曝露されて居る(上述のマイクロフォンの振動膜は片面だけ外氣に曝されて居る)。従つてリボンの両面の壓力差に依つて振動するものであるが、此壓力差は空氣分子の速度にも該當するものであるから、リボン・マイクロフォンの事を一名速度マイクロフォンと云ふ。

過剰壓力に依つて動作する普通のマイクロフォンは當然方向性に乏しい。即ち色々な方向から來る音に殆んど同じ様に感ずる。而して是れが時として普通のマイクロフォンの大きな缺點となる。舊式の劇場等からの中繼放送を聴くと、少しく誇張して云へば恰もトンネルの中で芝居をして居る様に、殘響(餘韻)が著しくて聲がワンワン鳴り響く事が屢、ある。あれは主としてマイクロフォンでは耳と違つて四方からの反射音が總て受け入れられるに依る。斯様な中繼放送に於てマイクロフォンに小形のラッパを嵌めるのも全く指向性を與へんために外ならない。

リボン・マイクロフォンでは金屬片の前後の振動だけが起電力を誘起するものであるから構造上當然方向性に富んで居る。然し單に強磁界にリボンを吊したのでは、其方向性は前後兩方向に於て等しく所謂 8 字型となり(左右から

来る音には感じないが前後から来る音には同等に感ずる), 未だ理想的とは云ひ得ない. 依つて此マイクロフォンと壓力



第 52 圖

単一指向性リボン・マイクロフォン

力マイクロフォンとの兩特徴を適當に組合せ 単一指向性とする事が 最近の型に於て行はれ 居る. 其方法は頗る 簡單でリボンの背面の 一部を塞げばよい. 第

52 圖に斯様な構造に

して單一指向性としたリボン・マイクロフォンを示す.

獨逸製のバンド・マイクロフォンは構造はリボン・マイク

ロフォンに似て居るが, 狭い空氣室の口にリボンが吊され

てあるので

リボンの兩

面が完全に

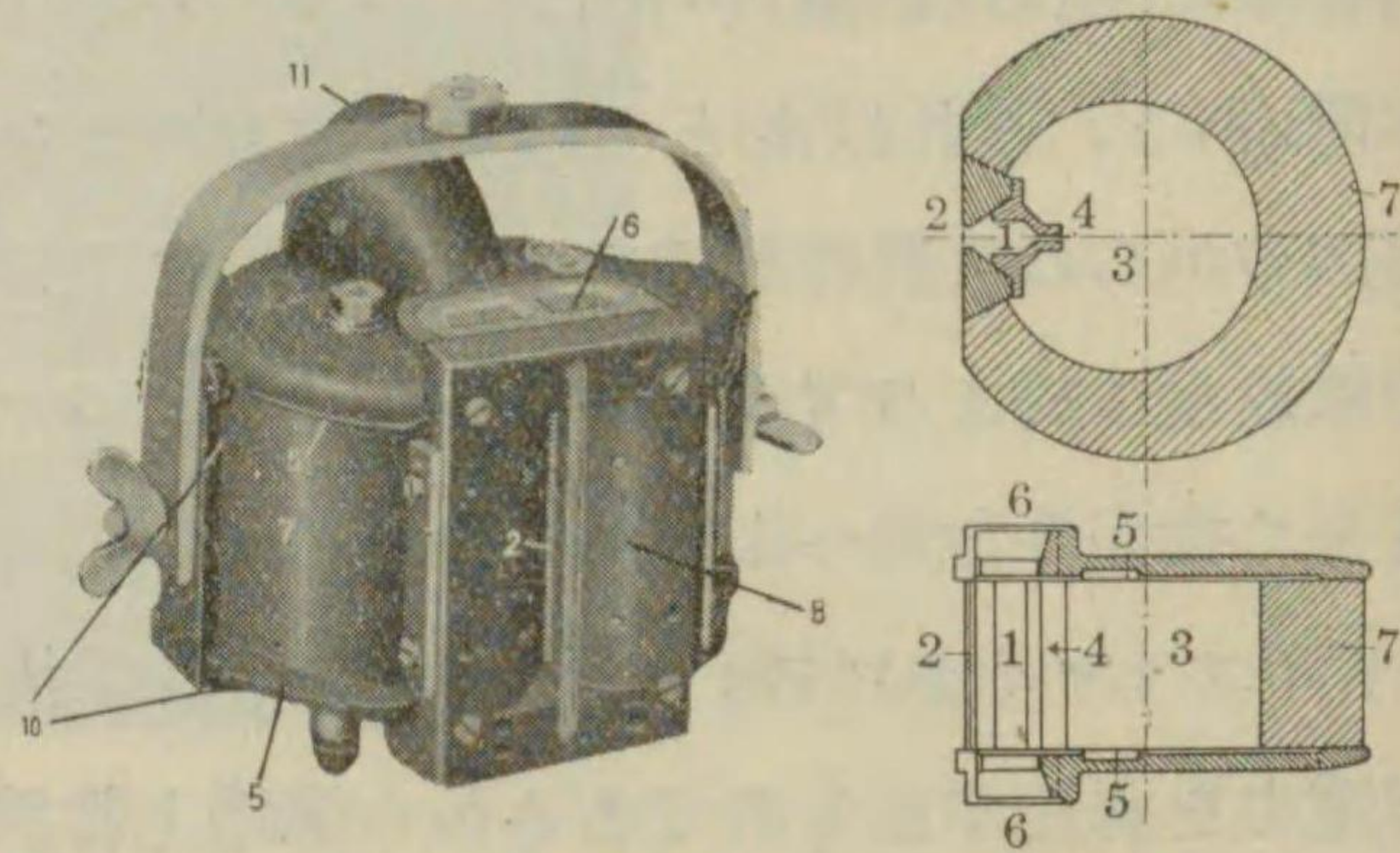
自由に外氣

に曝されて

居ない. 従

つて 200 ヘルツ以下の

低音に對し



(甲)

(乙)

第 53 圖 バンド・マイクロフォン

てはリボン・マイクロフォンと同様に速度マイクロフォン であるが, 是れ以上の高い音に對しては壓力マイクロフォ ンの様な性能を示すものである.

47. 小型マイクロフォン, 襟付けマイクロフォン

音響測定に電氣を利用する以前に於ては音の強さを精密 に比較する事はかなり困難であつた. 然るに一旦マイク ロフォンに依つて音の勢力を電氣的勢力に變へれば, その後 は適當な増幅器によつて是れを擴大する事は容易であるか ら, 既成の發達した精巧な電氣計器に依つて音の強さの比 較が極めて精密に行はれる. 斯くして色々な音源の周圍や 障礙物の附近に於ける音の強さの分布の測定等凡そ音の強 さの比較に關する測定は純粹な音の場合には電氣的方法の 採用によつて極めて容易く行はれるに至つた.

然しながら茲に最も不都合な事は普通のマイクロフォン は何れも相當な大きさを持つて居るためにその存在に依つ て音の場が亂される事である. 例へばマイクロフォンを用 ひて或る障礙物の周圍に於ける音の強さの分布状態を調べ るとしても, マイクロフォンを置いた場合と, 置かない場合 と壓力の分布状態が少しく違ふ筈である. 而も此違ひは音 が高くなり音の波長がマイクロフォンの大きさと同程度にな つて來ると殊に著しくなる. 依つて此種の測定に使用する マイクロフォンはその形を出来るだけ小さくする事が望ま

しい。従つて斯様な目的に使用する小型マイクロフォンの設計も既に種々発表されて居り、外径僅に 14 mm, 長さ 15 mm に過ぎない微小なコンデンサー・マイクロフォンも製作されて居る。

小型マイクロフォンの他の用途は、所謂襟付けマイクロフォン (Lapel microphone) で、是れを講演者の襟に取り付けるものである。普通の固定マイクロフォンは聴衆の視野の妨害になり、且つ講演者は常にマイクロフォンの近くで是れに向つて發音することが必要で實用上不便が尠くないが、是等の不便はマイクロフォンを講演者の襟に付ける事に依つて悉く除かれる。此目的のために炭素粒子を使用するマイクロフォンが以前から作られて居るが、前記の速度マイクロフォンの考案者オルスン (H. F. Olson) はまた同種の構造で形を極度に小さくした一種の“襟付けマイクロフォン”を製作した。

#### 48. マイクロフォンと耳との相違

以上述べた様に現今では特性の頗る優秀なマイクロフォンが種々考案製作されて居るが、吾々の五感の作用と云ふものは實に巧妙に出来て居るもので、今日のマイクロフォンを以てしても猶且つ或る點では到底耳の作用に遠く及ばないものである。

先づ吾々が演奏を見ながら音を聴く場合には音を選んで

聴く事が出来る。オーケストラ等に於ても誰が何を奏して居るかを分けて聴く事が出来るが、ラヂオではさうはいかない。又演劇などでも實際の舞臺なら二人以上の者が同時に發言しても差支ないが、ラヂオでは一人一人別々に發音させないと聲が混亂して不明瞭になる。ラヂオによつて耳で聴く場合はまだそれでも大分よいが、是れをオッシログラフに依つて音の波形を見る場合には音は全然一時に一種宛でないとは波形が混亂して到底分離不可能である。

猶多くのマイクロフォンが耳と違ふ點は曩にリボン・マイクロフォンの項で述べた様に方向性に乏しい事である。耳は頭の兩側に一つ宛付いて居るために、吾々は是れに依つて音の來る方向を判定する事が出来る便宜を持つて居るのである。

#### 49. マイクロフォンの較正 (Calibration)

マイクロフォンの較正即ち周波數特性(種々なる高さの音に對する感度)を測定するには色々な方法があるが、レイリー盤(第44節参照)を使用する方法が最も普通に行はれるものである。依つてその概略を説明しよう。

壁、床、天井に吸音材料を張つて反射を少くした實驗室で優良なる真空管發振器を以て擴聲器を鳴らし色々の高さの音を出し、其強さをレイリー盤を以て測定し、マイクロフォンはレイリー盤の近くに吊し、増幅器の出力を交流用マイ

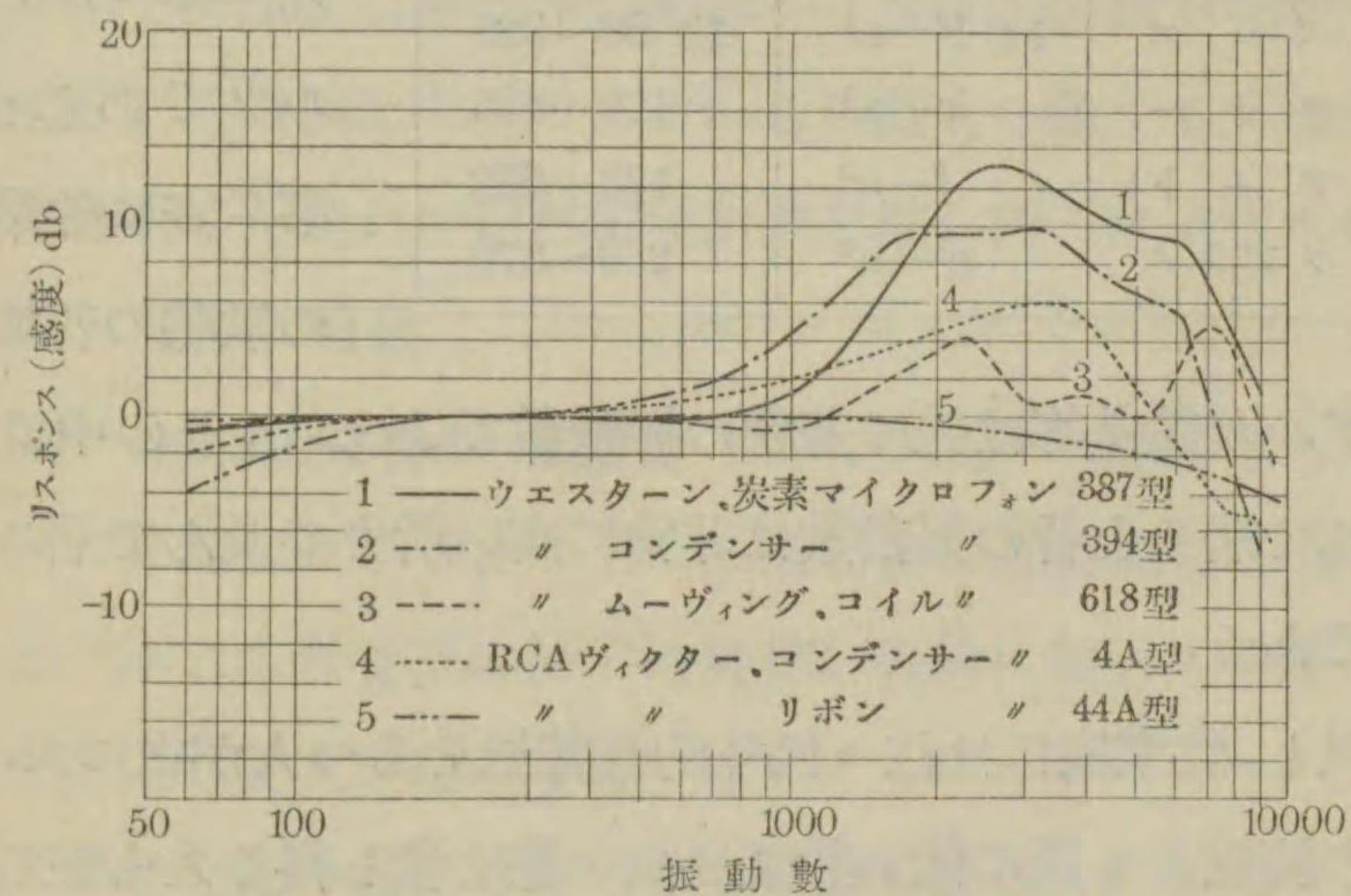
クロ・アムメーター若しくは真空熱電對(微小交流測定用 Vacuum thermocouple)とガルヴァノ・メーターとを以て測定する。使用する音は倍音を含まぬ純正弦波形のものである事が必要であるから、オッシログラフを以てその波形を時々検査する事を要する。

音響に関する測定を行ふに當つて音源としては従来はオルガン管が用ひられたが、倍音を含まぬ任意の振動数の純音を得るのに便利でないので、近頃では真空管發振器を以て擴聲器を鳴らす方法が多く用ひられる。此際發振器は純正弦波形の交流を發生する優良な物を要する事勿論であるが、此交流波形を歪みなく音に變ずる事が必要であるから使用する擴聲器も亦極めて優秀な物でなくてはならない。

猶以上の測定を行ふ際に大に注意を要する事は、斯くマイクロフォンと音源なる擴聲器とを相對時せしめる時は、殊に大形のマイクロフォンにあつては、特殊の波長の音に於てマイクロフォンの表面と擴聲器の表面との間に定常波を生じ誤差を生ずる事が屢々あることである。依つてレイリー盤の感度の許す範囲内に於て成るべく音源から隔つた所にレイリー盤及びマイクロフォンを装置し且つ音源とマイクロフォンとの間隔を種々變へてみる等の注意が肝要である。但し室の四壁からの反射等をも考慮に入れ適當なる距離を選ぶ必要のある事は勿論である。

マイクロフォンの絶對感度(即ち音の壓力幾パーに對してマイクロフォンの出力幾ミリヴォルトと云ふ様な)を知る必要のある場合には、勿論豫めレイリー盤の絶對感度を求め置き、音の強さの絶對値を求める事が必要であるが、單に色々な振動数の音に對するマイクロフォンの感度の變化だけを要する場合には、レイリー盤は製作した儘で、其感度を絶對的に求めおく必要はない。而して音響の分析等に於ては通常はマイクロフォンの斯様な周波數特性の比較値だけで充分であつて、絶對感度は必要ではない。

第54圖にバラントイン(St. Ballantine)の測定した、アメリカ製各種マイクロフォンの周波數特性曲線を示す。



第 54 圖



## 第十章 音 聲

### 50. 音聲の高さの範囲

吾々に音として聞える振動数(高さ)の範囲は曩にも述べた通り最良の条件の下に於て16乃至20,000ヘルツの間であるが、音楽に用ひる色々な楽器の音の基音の振動数の範囲は僅に30乃至4,000ヘルツ位であり、吾々の發し得る音聲の基音の高さの範囲は是れより遙かに狭いものである。

第7表 歌聲の音域

	音 名	振 動 数
ベース	約 F-e <sup>1</sup>	約 86~326
テナー	c-a <sup>1</sup>	129~435
アルト	f-e <sup>2</sup>	173~652
ソプラノ	c <sup>1</sup> -a <sup>2</sup>	259~870

成人の音聲の高さの範囲は、大凡100~700ヘルツであるが、第7表に聲樂家の歌聲の音域を

示す。勿論是等は總て基音の振動数であつて、その中に含まれて居る上音の振動数は非常に高い所まで及んで居るのである。

但し、聲樂家には往々例外的な聲域をもつ人が在つて、上記の範囲より遙に低い聲又は高い聲を發し得る人も在る。依つて大體の見當としては音聲の基音の高さの範囲は100乃至1,000ヘルツと見てよい。

### 51. 音聲の勢力

吾々の言語が他人に及ぼす精神的の勢力は時に驚くべきものがあつて、偉人、政治家等の一言は時として世界の耳目を聳動する様な場合も尠くないが、其物理的勢力、即ち言語のエネルギーは實に極めて微弱なものである。かの32燭光の白熱電燈1箇を點すには約40ワットの電力を必要とするが、大聲叱咤三軍を指揮する様な大音聲も、其音の勢力は到底百分の一ワットに達しないものであり、普通の會話を小聲で行へば其勢力は千萬分の一ワットでも足り、更に“さゝやき”の聲を以てすれば、十億分の一ワットと云ふ様な驚くべき微細なエネルギーを以てしても十分吾々の意志を相手に通ぜしめる事が出来る。吾々の言語の物理的勢力は斯くも微弱なものであるから百萬人の發する大聲の勢力を集めても猶且つ白熱電球數箇を點し得るに過ぎない。

### 52. 音聲の音色

(a) 母音及び子音の一般性質 吾々の言語の音響即ち語音を分つて母音及び子音の二つに區別する事は周知の通りである。而して音聲學に於ては發聲の機構に基いて母音と子音との區別を次の様に定義する：

“母音とは呼氣が口腔の中で通路を遮られる事なしに出る時に發せられる音で、子音とは呼氣が口腔の中で通路を遮られ又は狭められる時に發せられる音である。”

子音の性質に就てはしばらく措き、今母音のみに就て考へるに、たとへば日本語の五つの母音アイウエオの區別は如何にして生ずるか、同じ高さで發聲してもアになつたりイになつたり又ウになつたり、色々違つた音色となるのは如何なる原因にもとづくものであるかを、次に簡単に説明しよう。

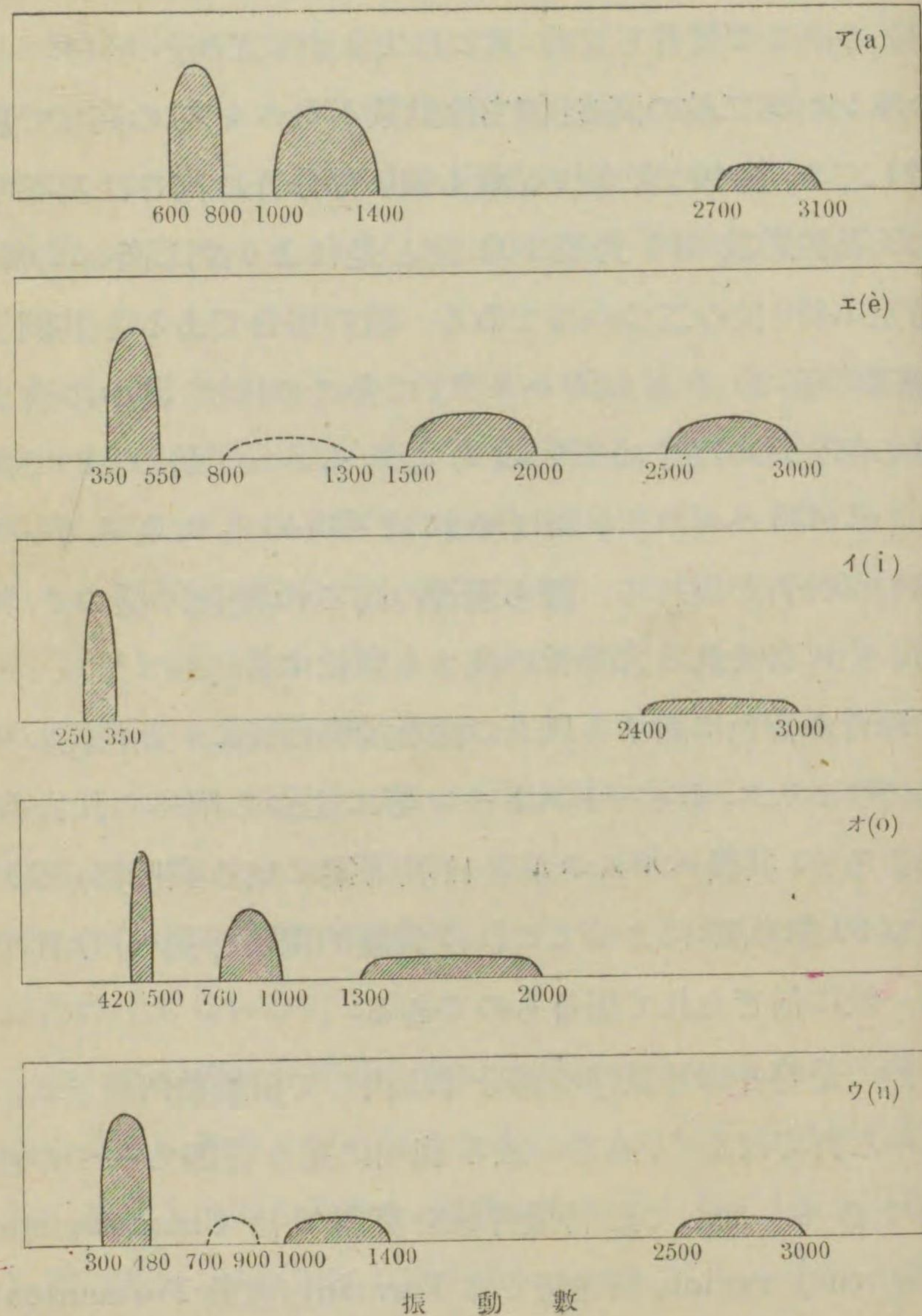
母音の音の源は“さゝやき”の聲を除き、勿論肺臟から呼出される空氣による聲帯の振動であるが、此聲帯の振動に依つて生ぜられる空氣の振動、即ち音は頗る複雑な性質のもので多數の部分音を含むで居る。そこでこの呼氣が咽喉、口腔を経て唇から出るか或は鼻腔から外界に吐き出される場合にこれ等口腔、鼻腔の共鳴する模様は各部の形狀、或は舌の形狀、位置及び唇の形狀、開き方等によつて色々に変化されるから、これ等口腔、鼻腔の共鳴によつて夫々各母音に該當する特定の部分音だけが強められ、各母音獨特の音色が生ぜられるのである。

而して茲に最も注意を要する重要な事項はこの口腔、鼻腔の共鳴によつて強められる音の高さは是等の部分の形狀等に基くものであるから、發音した母音の高さ(即ち聲帯の振動の基音)に關係なく絶對的に定まつて居るものである事である。此點が母音の音色が他の發音體例へば絃の音色等と全然趣を異にする點である。例へば日本語アの母音で

あれば、是れを  $e^1$  (ピアノの中央の  $e$  即ち振動數 259 ヘルツ) の高さで發音しても、又これよりずつと高い  $a^1$  (ヴァイオリンの第二絃の高さ、即ち振動數 435 ヘルツ) の高さで發音しても、其中に含まれる最も強い部分音の高さは男聲なら大凡振動數 600 乃至 800 位と是れより少し高い 1,000 乃至 1,400 位の二つの音である。絃の場合であると其調子(基音の高さ)を  $e^1$  (259 ヘルツ) に合はせれば、其中に含まれる部分音の高さは 259 の 1, 2, 3, 4, 5... 倍のものであり、 $a^1$  (435 ヘルツ) に合はせれば 435 の 1, 2, 3, 4, 5... 倍の部分音が現れる。即ち基音の高さの變化に従つて、其音の中に含まれる部分音の高さも變化する。

母音の音色に對する以上の様な説明は既に十九世紀の初めにウィリス、ホキートストーン等によつて唱へられた所であるが、其後ヘルムホルツは其考案に成る共鳴器(第 34 及び 39 節参照)によつてこれに實驗的證明を與へ、今日では一般に信ぜられて居るものである。

茲に是等各母音獨特の部分音は決して振動數何程と云ふ單一な音ではなく、高さの或る範圍に互る音即ち一つの音域である。而して此特徴音域を英語では Characteristic frequency region, 獨逸語では Formant (複數 Formanten) と呼ぶ。依つて本書では爾後是れをフォルマントと呼ぶ事にする。國語により又同一國人間でも個人々々により母音



第 55 圖 日本語母音のフォルマント (男聲)

の音色に相違のあるのは何れもこのフォルマントの位置(振動数)及び強さの差異によるものである。

斯様な母音のフォルマントを求めるには音響分析によるものであるが、第 8 表は著者が最近多數の人の發音した母音を分析した結果から推定した日本語母音のフォルマントを示すもので、第 55 圖は是等フォルマントの位置許りでな

第 8 表 日本語母音のフォルマント (男聲)

母 音	$F_1$	$F_2$	$F_3$
ア	600~800	1000~1400	2700~3100
エ	350~550	1500~2000	2500~3000
イ	250~350		2400~3000
オ	420~500	760~1000	1300~3000
ウ	300~480	1000~1400	2500~3000

く強さをも明かにするために圖示したものである(各の山の高さはその強さを示す)。

茲に注意すべきことは女聲の場合には男聲に比して一般にフォルマントが少しく高い方に移動する事である。

(b) **子音の性質** 子音は母音に比較して一般にその性質が頗る複雑で而も繼續時間の極めて短い音である。子音は發音の際聲帯の振動を伴ふか否かに従つて有聲子音、無聲子音の二つに區別される。

無聲子音即ち聲帯の振動を伴はない子音とはカ、サ、タ、

ハ、パ行の子音で、是等の子音は閉じた呼氣の通路を急に開いたり、或は口蓋と舌との間の狭い間隙に於ける空氣の摩擦によつて發せられる、性質上極めて高い、而も不定な振動數を持つた噪音である。無聲子音の中で高さの最も低いのはカ行子音で振動數約 1,400 であり、是れに反し最も高く複雑なのはサ行子音で振動數 3,000 乃至 4,000 である。勿論斯様な振動數の規則正しい波が或時間繼續すれば、その高さの樂音が聞える譯であつて、實際の子音は此程度の振動數を持つた不規則な波動である。ガ、ザ、ダ、バ行の濁音子音は勿論有聲子音であるから聲帶の振動を伴ふ結果として、以上の高音成分の外に振動數の低い音をも含んで居る事が認められる。又ナ行、マ行、ヤ行、ワ行、ラ行の初めの子音は清音ではあるが無聲子音ではなく、有聲子音に屬すべきものである。

斯く子音は一般に頗る複雑な性質を持つて居り殊に多くは極めて高い而も不規則な振動から成り立つて居るので、電話や蓄音器等でも子音は中々うまく現れない。電話や蓄音器で言葉や歌がよくわかるのは前後の關係で想像する場合が尠くないので、電話で話を交換する時、突然の言葉の意味が通じにくいのは主として子音の不明瞭なるによる。

### 53. 發聲器官、聲帶の振動

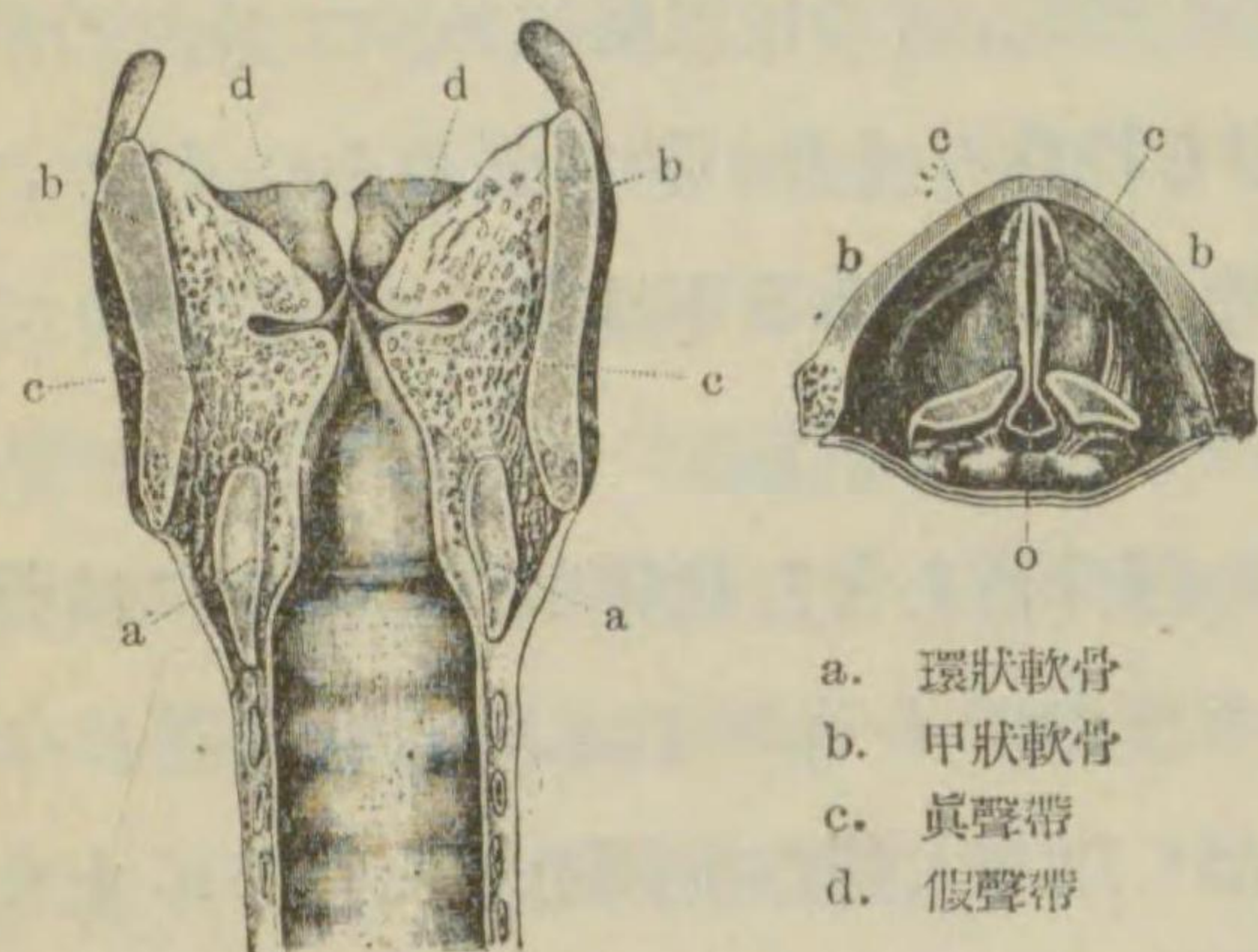
吾々の音聲の源は勿論肺臟から吐き出される空氣である

が、是れに依つて聲帶が振動し、多數の部分音を有する音波が生ぜられ、而して此空氣が口腔及び鼻腔を通つて外界に吐き出される時、口腔の形狀、舌の位置等に依つて音波の形が色々に變化され、即ち特殊の成分が特に強められ、種々の音色を持つた音聲となるものである事は曩に述べた通りである。

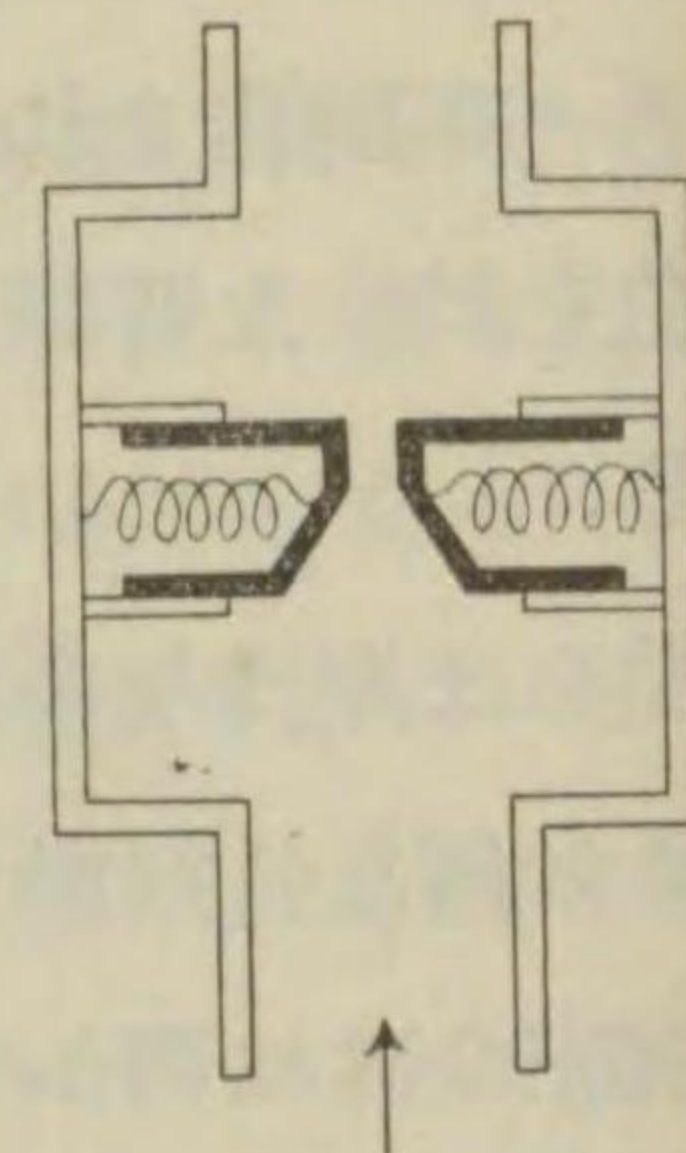
然らば斯様な多數の部分音を含む複雑な音を出すには聲帶は如何なる振動をなすのであるかと云ふに、此問題は今日猶完全には明かでなくたゞ大體の推測を下し得るに止まる。其理由は聲帶は何分咽喉の奥深く存在して居るので、大きく口を開けば外部から其外觀を窺ふ事は出来るが、一般の音聲を發する場合の其振動を外部から正確に知る事は不可能であるによる。

元來聲帶と云ふ名稱は、英語の Vocal chord 或は獨逸語の Stimmband 及び是等の譯語である聲帶、何れも不適當であるため、聲帶は恰も薄い膜か何かの様に誤解され、従つて聲帶はハーモニカやオルガン(パイプ・オルガンに非ず、日本で通常オルガンと云ふアメリカ・オルガン)の簧したの様な振動をなすものと誤解され、在來の音響學書にも斯様に記載されて居るものもある。然し聲帶は決して左様な薄い膜状のものではなく、第 56 圖に縦斷面を示す様に、喉頭壁の左右から盛り上つた筋肉と粘膜の高まりである。従つて肺

臓からの呼気が此聲帯に當る時、聲帯の尖端に近い一部は勿論簧の様な(氣流の方向及びこれに逆らつた)振動もする



第 56 圖



第 57 圖

が、全體としては第 57 圖に示す様に空氣の流れに直角に振動し、流れの路を狭くしたり廣くしたりする作用をなすものである。

普通の會話に用ひる様な地聲 (Bruststimme) と聲樂家が高音を出す時に用ひる裏聲 (Falsett) との音響學的性質について著者等の研究した所に依れば、裏聲の母音に於ては地聲の母音に比して其母音性が著しく失はれ、即ちフォルマントが弱まり、基音が顯著に現れる。是れに依つて考察するに裏聲の場合には聲帯の振動に簧の振動の様な部分が相當多くなるものと思はれる。

## 第十一章 聽 覺

### 54. 聽覺の一般性質

聽覺の性質として先づ第一に擧げらるべき事項は吾々は樂音に對して高さ、強さ及び音色の三種の感覺を持つて居る事である。換言すれば吾々の聽器官は樂音の高低、強弱及び音色を辨別する能力を持つて居る。

次に吾々は高さの違つた二つの音を同時に聽くと通常別別の音として聽き分ける力を持つて居る。此點は聽覺と視覺と大に趣を異にする所で眼では色の違つた(即ち振動數の違つた)二つの光線、例へば赤色光線と綠色光線とを同時に受けると恰も振動數に於て其中間である黄色光線がある様に感ずる。

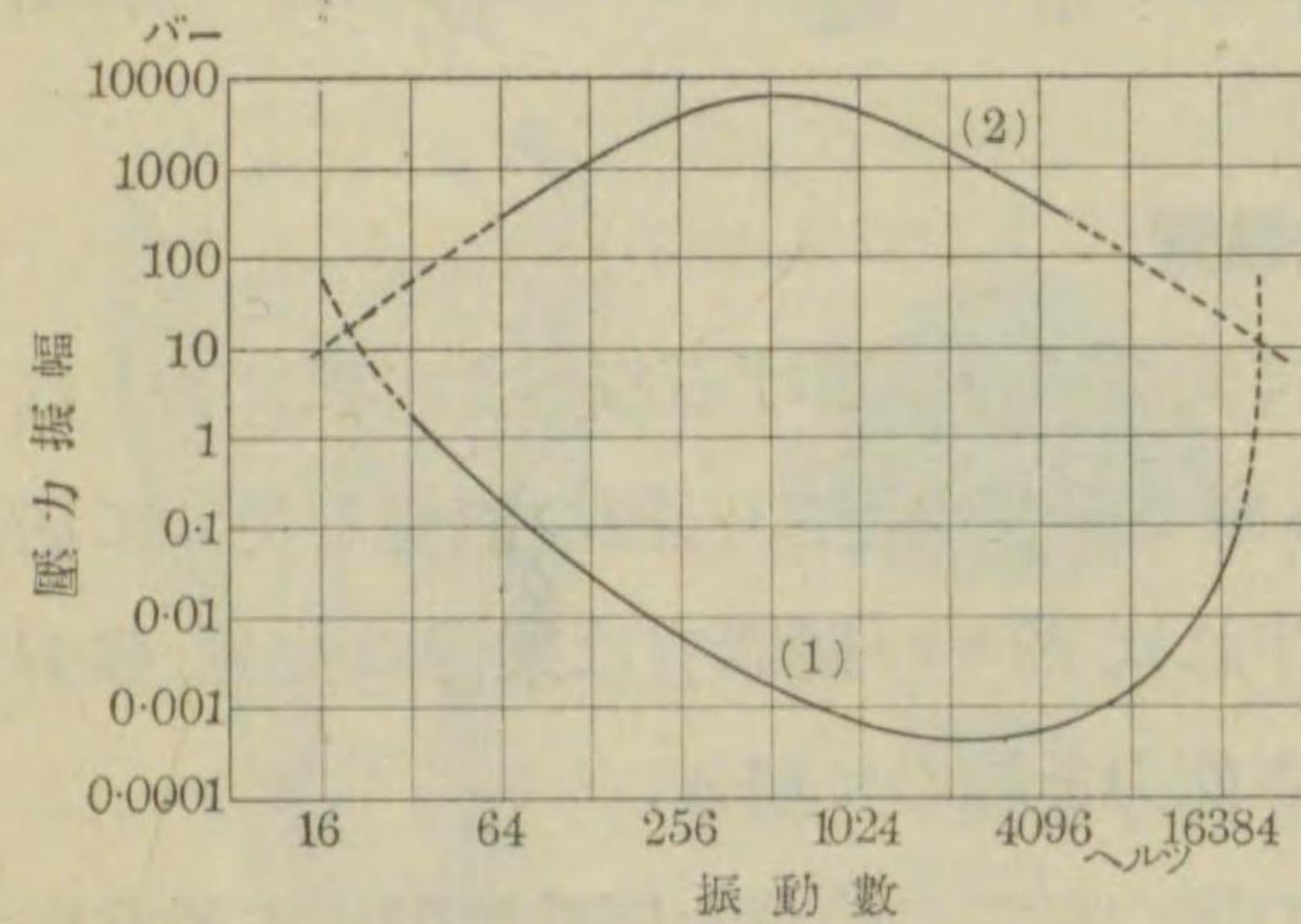
### 55. 音として聞える振動數の範圍

振動を音として感ずるには高さにも、また強さにも範圍がある。換言すれば高さや強さの或る範圍内の振動だけが吾々に音と云ふ感じを與へるものである。即ち聽覺には可聽界限がある。依つて今斯様な可聽界限若しくは可聽範圍に就て少しく詳しく説明しよう。

或る音をその高さを變へないで段々弱めて行くと、遂に吾々の耳に何の感覺をも與へなくなる。斯様に是れより弱

くすれば聞えなくなると云ふ強さの界限を音の最小可聽界

限と稱する。



第 58 圖

じ猶夫より強さを増せば耳に疼痛感を生ずるに至る。此音としての感じの無くなる界限を音の最大可聽界限と呼ぶ。

是等二つの界限は音の高さに依り大に異なるもので、第58圖は健康な耳を持つた人の是等の界限を圖示したものである。曲線(1)は色々な高さの音の最小可聽界限を示すが、是れに依つて觀るに振動數60ヘルツと云ふ様な低い音では此最小界限は0.1ダイン/平方cm(或はバー)であるが、1,000乃至4,000ヘルツと云ふ様な比較的高い音では此界限は60ヘルツの時より遙に小さく0.001ダイン/平方cm以下であつて、吾々の耳が此附近の高さの音に對して頗る感度が良い事を示して居る。更に是れより高い音になると最小界限は再び増し吾々の耳の感度は段々と鈍くなる。

猶1ダイン/平方cm即ち1バーは大凡1氣壓の百萬分の一に相當するから0.001ダイン/平方cmと言へば實に1氣壓の拾億分の一と云ふ微細な壓力に該當する。以て吾々の聽覺が如何に鋭敏なものであるかを知る事が出來よう。

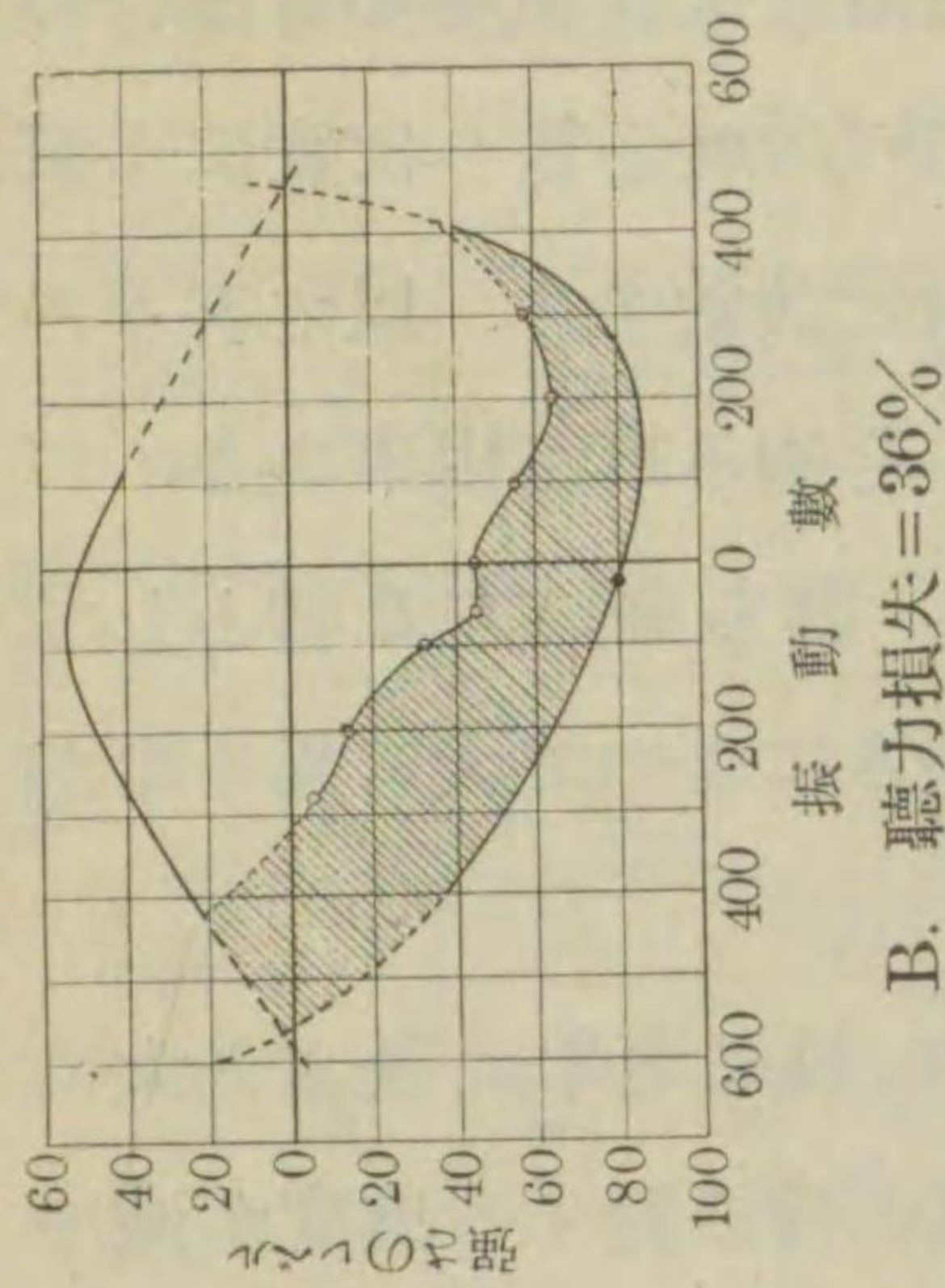
曲線(2)は最大可聽界限を示す。即ち強い方で音としての感覺がなくなる界限も亦音の高さによつて大に異なる事が示されてある。

是等の界限は人に依り多少異り、殊に老年に及ぶと大に變化する。年をとると主として高い音に對する感度が減ずるものであるが、第58圖に掲げたのは多數の常聽力者に就て得た平均の結果である。第59圖に聽力に異状のある人の聽力曲線の二、三の例を掲げる。是れに依つて一口に言へば“つんぼ”にも色々な型がある事が了解されよう。

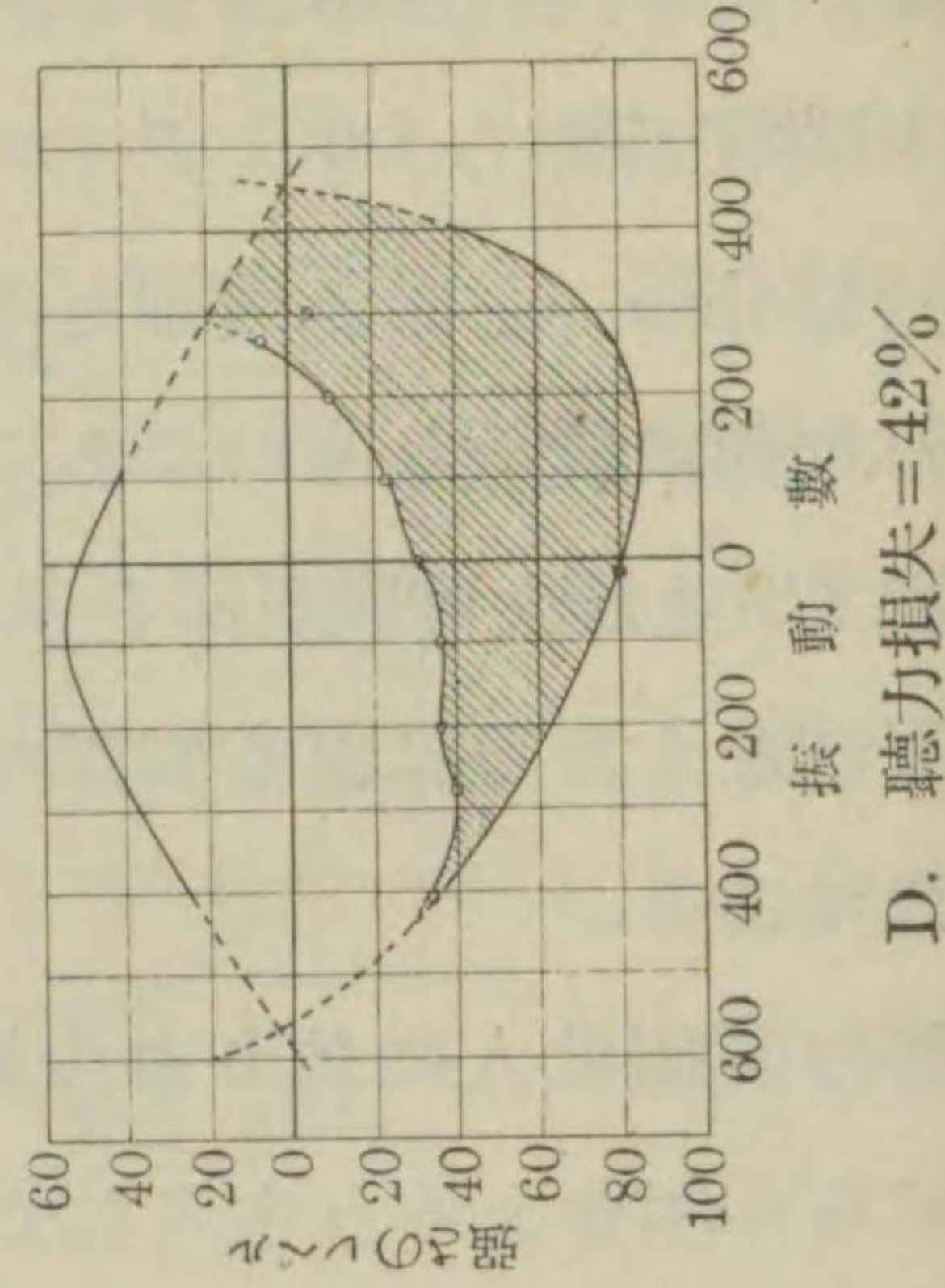
此圖で縦は強さのレヴェル(1マイクロワットを基準とした)でデシベルで表され、横は音の高さである。(1) (1,000ヘルツを基準としてセンチ・オクターヴにて表したもの。)

次に音として聞える高さ(即ち振動數)の範圍に就てもう少し詳しく述べれば、音として聞えるのは振動數16から20,000に至る範圍であるとは普通よく云はれる所で、中等

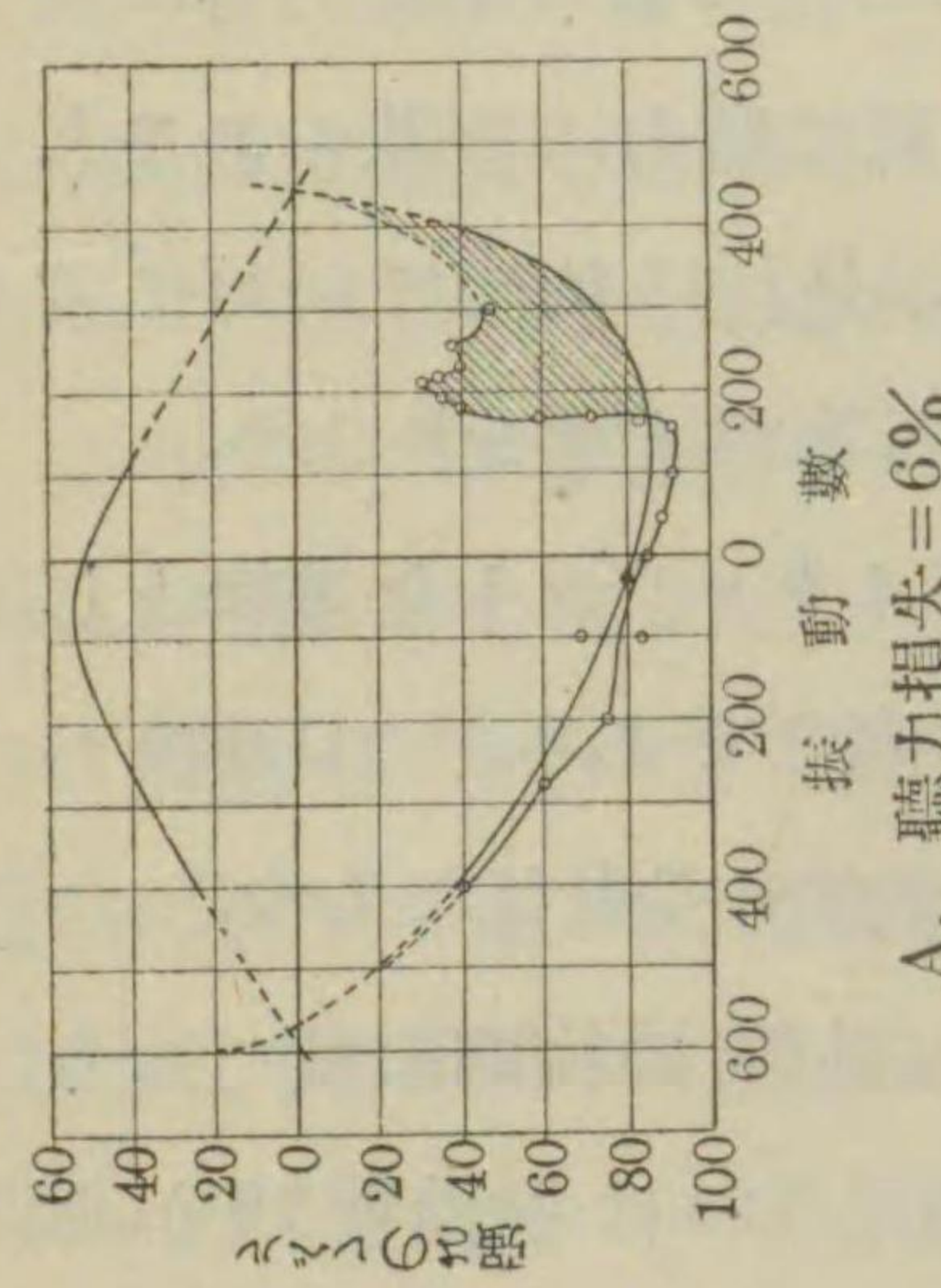
(1) 0より右100, 200, 300, 400は夫々振動數2,000, 4,000, 8,000及び16,000ヘルツを表し、0より左100, 200, 300, 400は夫々振動數500, 250, 125及び63ヘルツを表す。



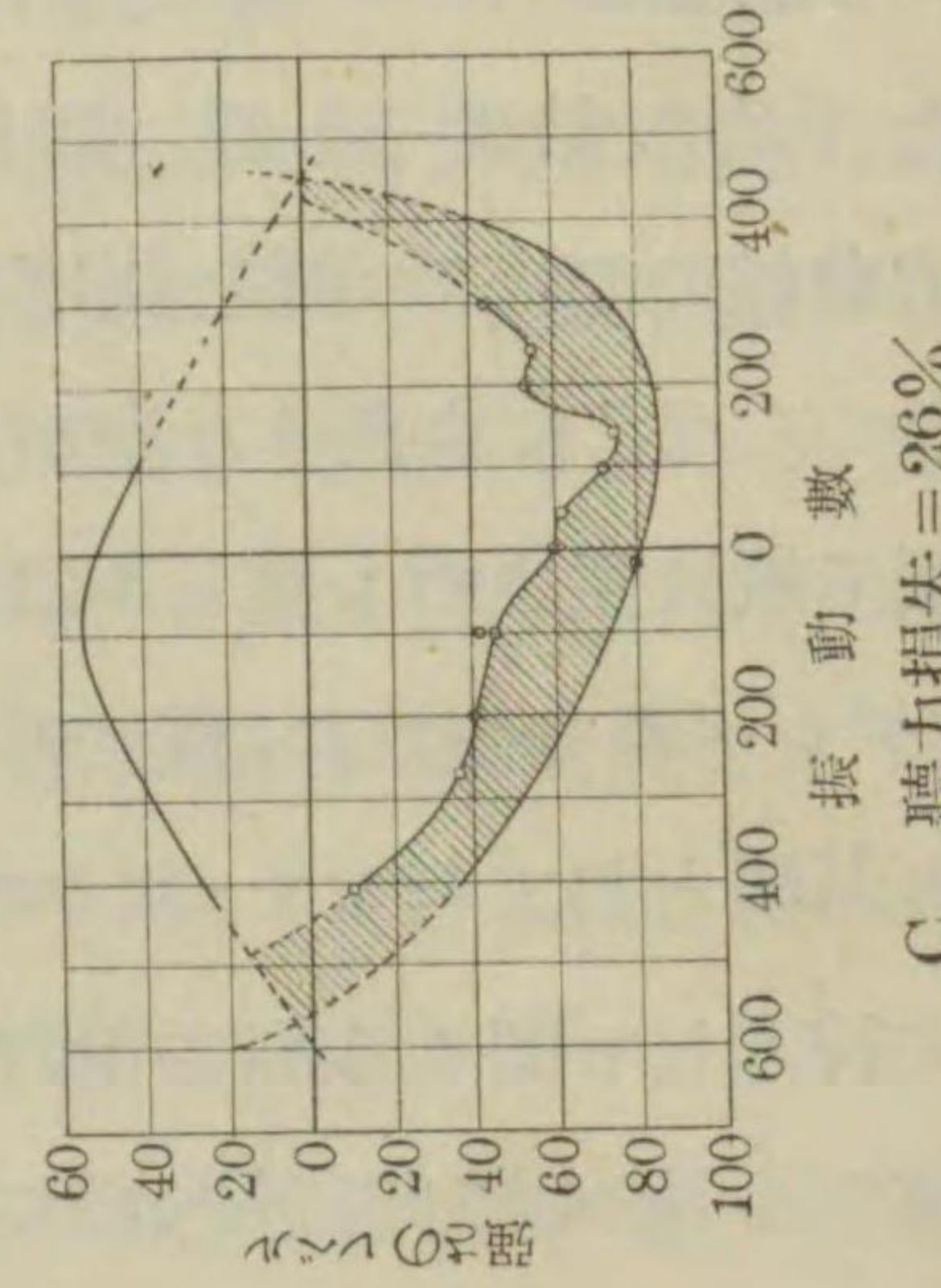
B. 聴力損失=36%



D. 聴力損失=42%



A. 聴力損失=6%



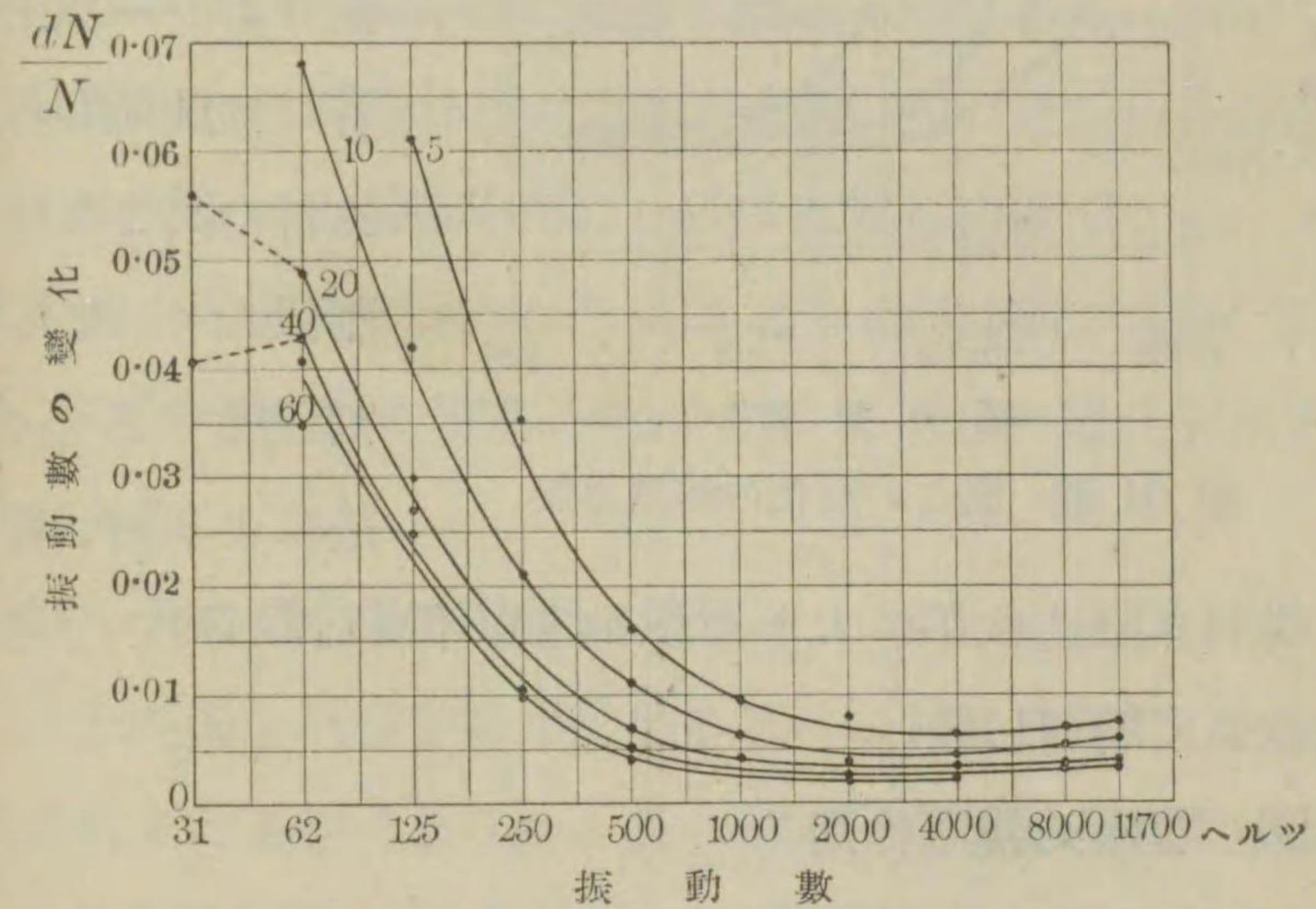
C. 聴力損失=26%

第 59 圖 聴力不全の色々な型

教科書等にもさう書いてあるが、此音として聞える振動数の範囲も實は音の強さに依つて大に異なるものである事は第 58 圖を注意して見れば直ちに了解される所であらう。

振動数 16 から 20,000 に至る範囲と云ふのは音の強さ即ち壓力變化が 10 ダイン/平方cm 程度(約 90 デシベル)の場合である事が認められる。音の強さが 0.01 ダイン/平方cm の場合では此範囲は大凡 200 乃至 12,600 ヘルツであつて 0.001 ダイン/平方cm になると音として聞える範囲は非常に狭く僅に 500 乃至 5,000 ヘルツである。

周知の通り吾々の耳は音の高さの差に對しては頗る敏感で殊に音樂的修練を経た耳では高さの極めて僅かの違ひをも判別し得るが、一般に強さの差を辨別する力は頗る弱い。



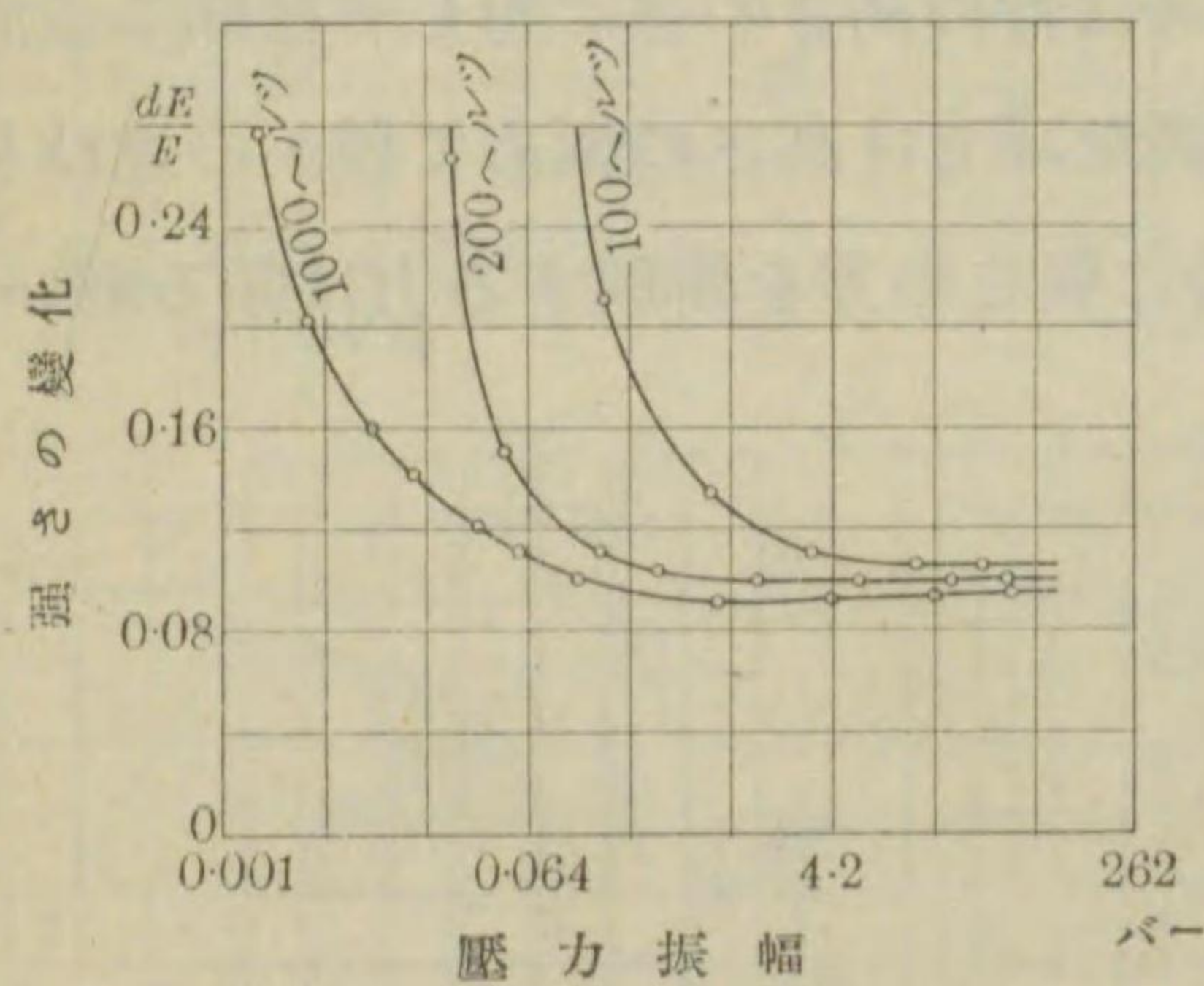
(曲線上の數字はデシベルで表した音の強さ)

第 60 圖 高さの差の辨別界限

先づ第 60 圖に示す通り音の高さの違ひの辨別界限は音の高さにより變化し又強さによつてもかなり變化する。例

へば振動數 500 乃至 4,000 ヘルツの間で相當強い音では辨別し得る高さの違ひの割合は略、一定で 0.2% 乃至 0.3% である。即ち 1,000 ヘルツの音では振動數の違ひが 3 あれば辨別し得る。250 ヘルツ以下の低い音では此辨別界限は強さによつてかなり違ふものである。

次に音の強さの違ひの辨別界限は第 61 圖に示す通り矢



第 61 圖 強さの變化の辨別界限

張音の強さの絶對値及び振動數に依つて異なる。壓力振幅 4.2 バー以上の音では此辨別界限は音の高さに餘り關係なく、大凡一割程度であるが、是れより弱い音で

は辨別界限は次第に大きくなり、弱い低い音の強さの違ひは極めて辨別し難い。

### 56. 聽覺の隱蔽作用

吾々の聽覺には隱蔽作用 (Masking effect, 遮蔽作用と譯する人もある) と稱する作用が在る。即ち A なる音がある場合に、他の B なる音の強さを漸次増加する時は遂に A 音が聞えなくなる點に達する。此場合 A 音は B 音に依つて

隱蔽されたと云ふ。

此隱蔽作用は複雑な音響に對する吾人の感覺、延いては騒音測定の問題等に關聯し頗る重要な事項であるので、最近米國ベル電話研究所で是れに關し詳細な研究がなされた。その結果を茲に詳しく述べる事は略するが、一般に言へば低い音は高い音を容易に隱蔽するが、是れに反し高い音は低い音を隱蔽し難い。然し猶詳しく言へば低い音でも振動數のかけ離れた高い音を隱蔽するには非常な強さとなる事を要し、又一方に於て高い音でも是れと高さの餘り違ひのない低い音は容易に隱蔽し得るものである。

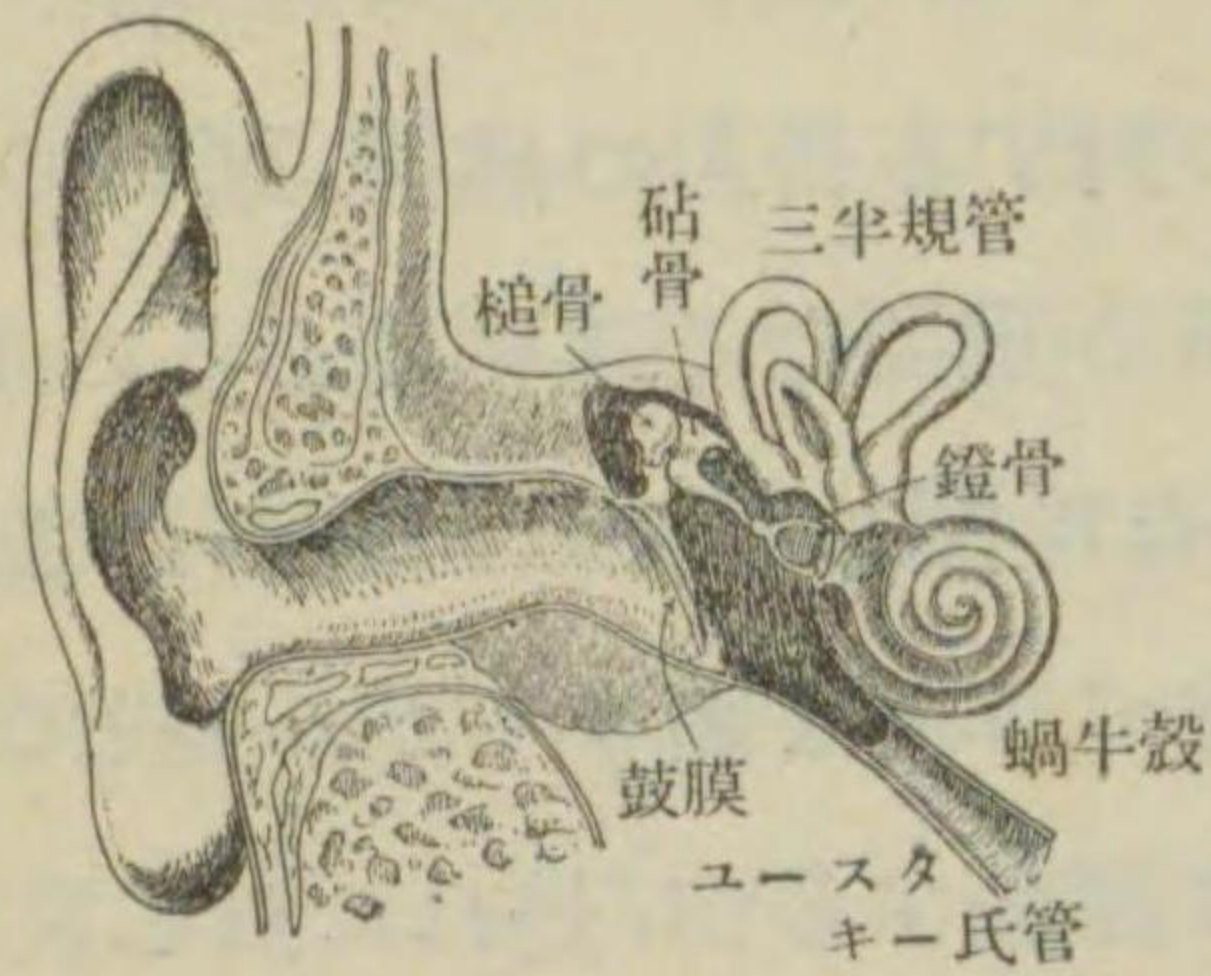
純音同志の隱蔽作用は比較的簡單であるが、複合音に依つて生ぜられる隱蔽作用は一般には頗る複雑である。ラヂオを聽く場合に擴聲器から出る音を原音以上に強くすると、各成分音の間の隱蔽作用によつて音色に變化を來す場合がある。

### 57. 耳の構造及び聽覺の原理

以上の様な性質を持つて居る吾々の耳は抑、如何なる構造を有するものであるか。耳の構造及び聽覺の原理は音響學と密接な關係を持つものであるが、生理學教科書等に述べられてあるから、茲には極めて簡単に其要點だけを述べるに止める。

耳は大別すれば外耳、中耳及び内耳の三つの部分から成



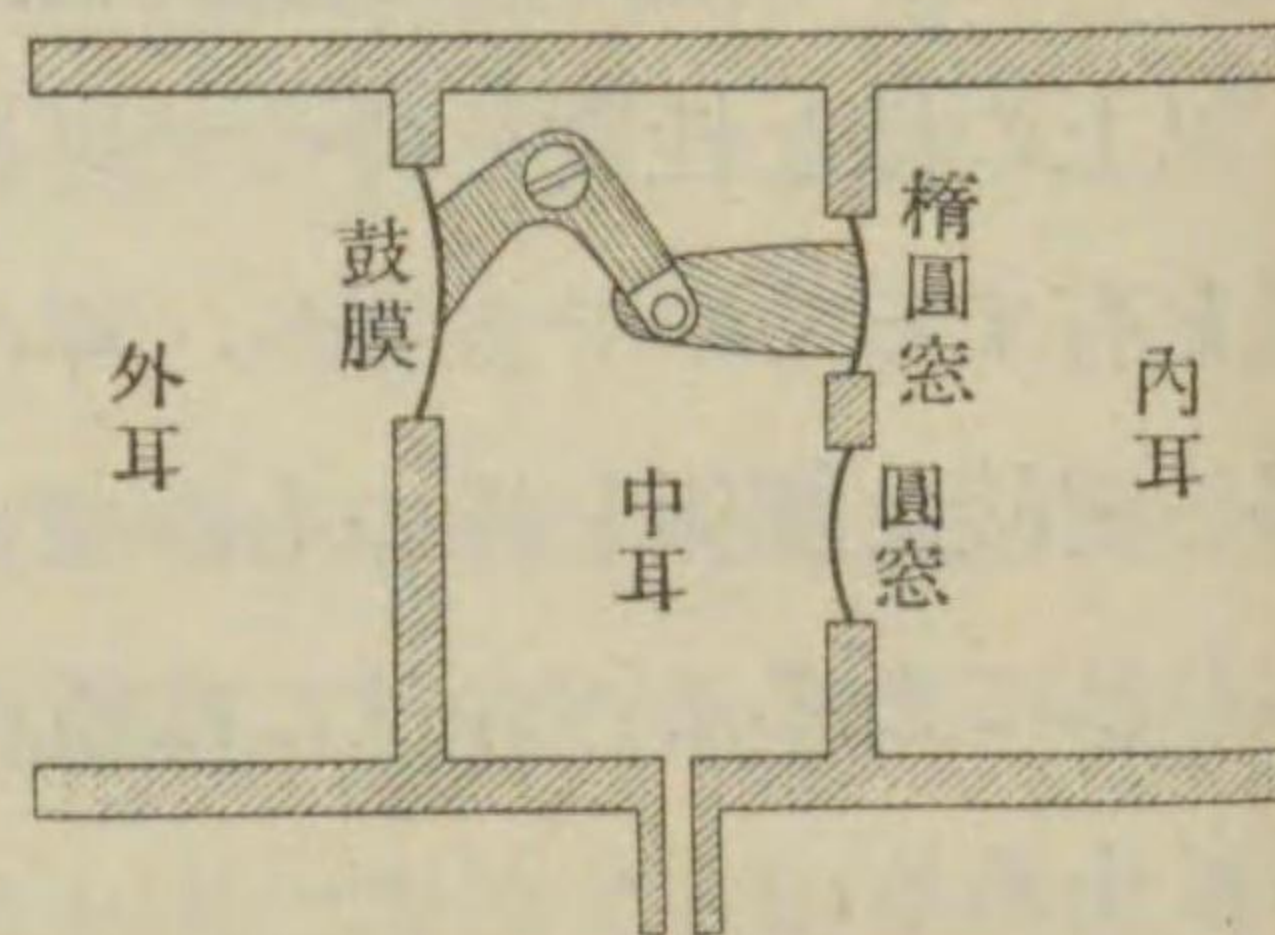


第 62 圖

り立つて居る。外耳は耳殻(耳たぼ)と外聽道から成り、鼓膜に依つて中耳と隔てられて居る。鼓膜は橢圓形で中央が稍へこんで居るが、その大きさは縦直徑 0.85 cm, 横直徑 1.00 cm で、面積約 0.65 平方 cm である。鼓膜の内部は中耳であつて、中耳はユースタキー氏管によつて咽喉に通じて居る。ユースタキー氏管は平素は閉ざされて居るが、唾液、食物等を嚥下する際には開いて、鼓膜の内外の氣壓の平衡を保つ役目をする。中耳には槌骨(重量 23 mg)、砧骨(重量 25 mg) 及び鐙骨(重量 3 mg) と云ふ極めて小さな三箇の骨が相連つて居り、槌骨の柄は鼓膜の内面に接し、鐙骨の足は内耳の橢圓窓に接して居り、鼓膜の振動は是等三箇の小骨を経て内耳に傳へられる

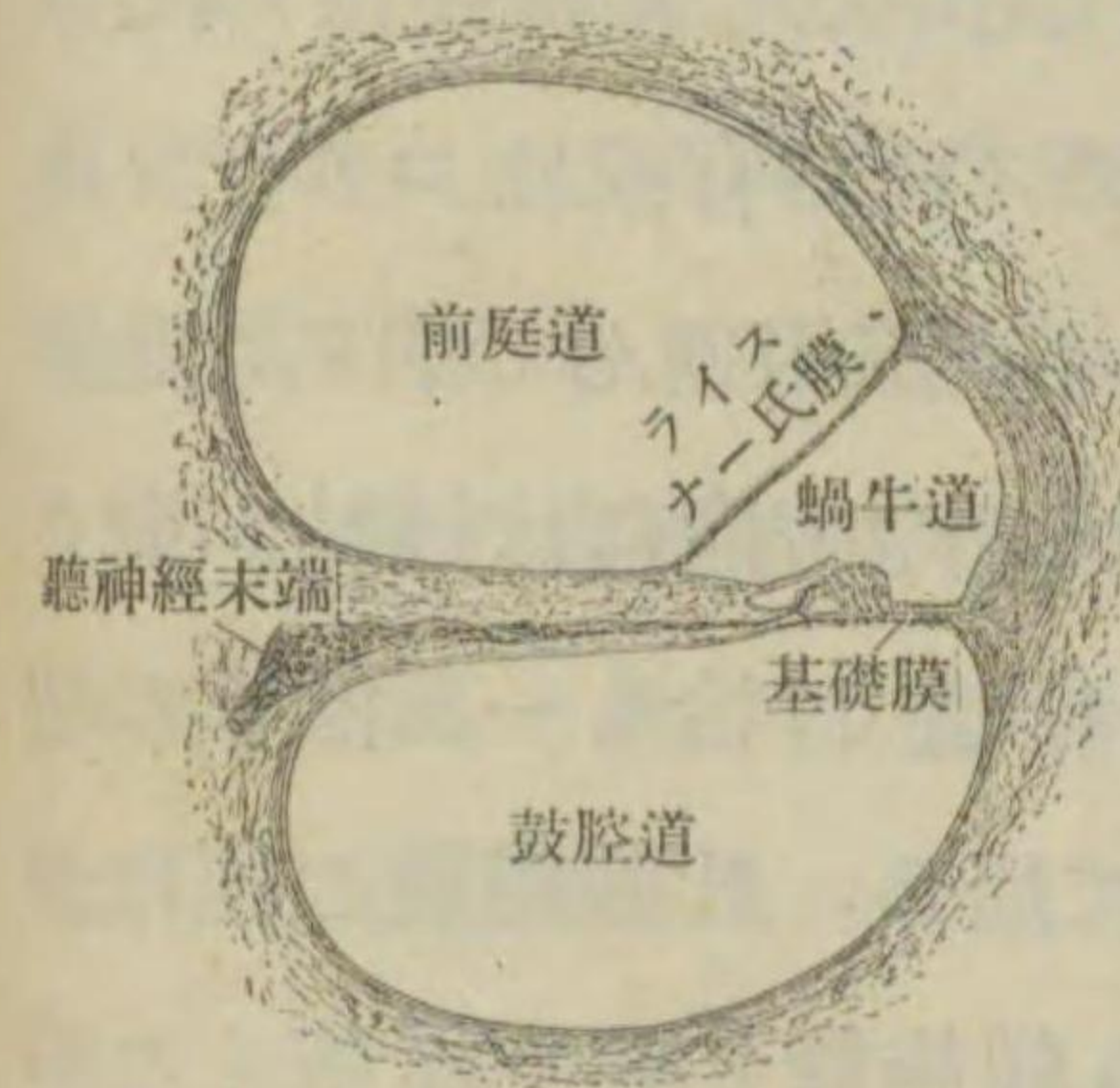
様になつて居る。今斯様な構造を簡単に圖示すれば第 63 圖の様になる。

内耳は三半規管と蝸牛殼とから成つて居る。前者は淋巴液を以て充たされ

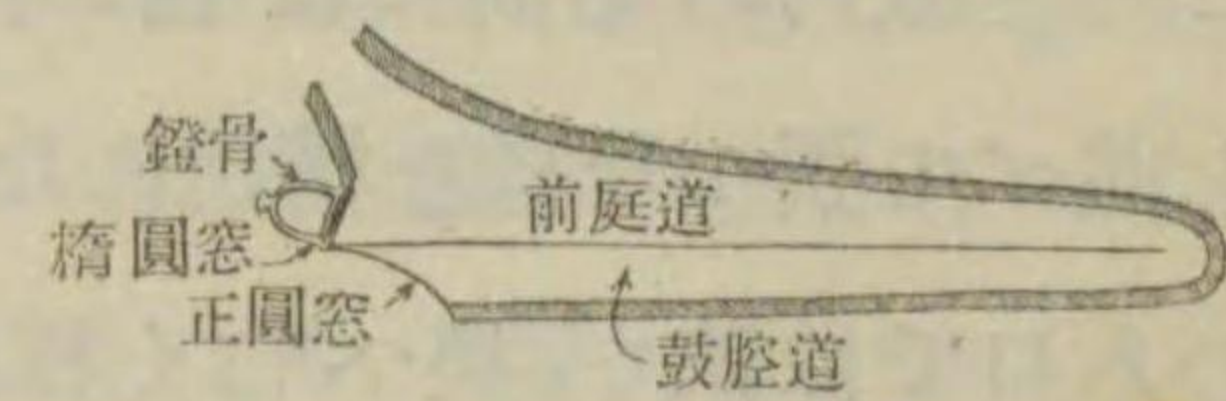


第 63 圖

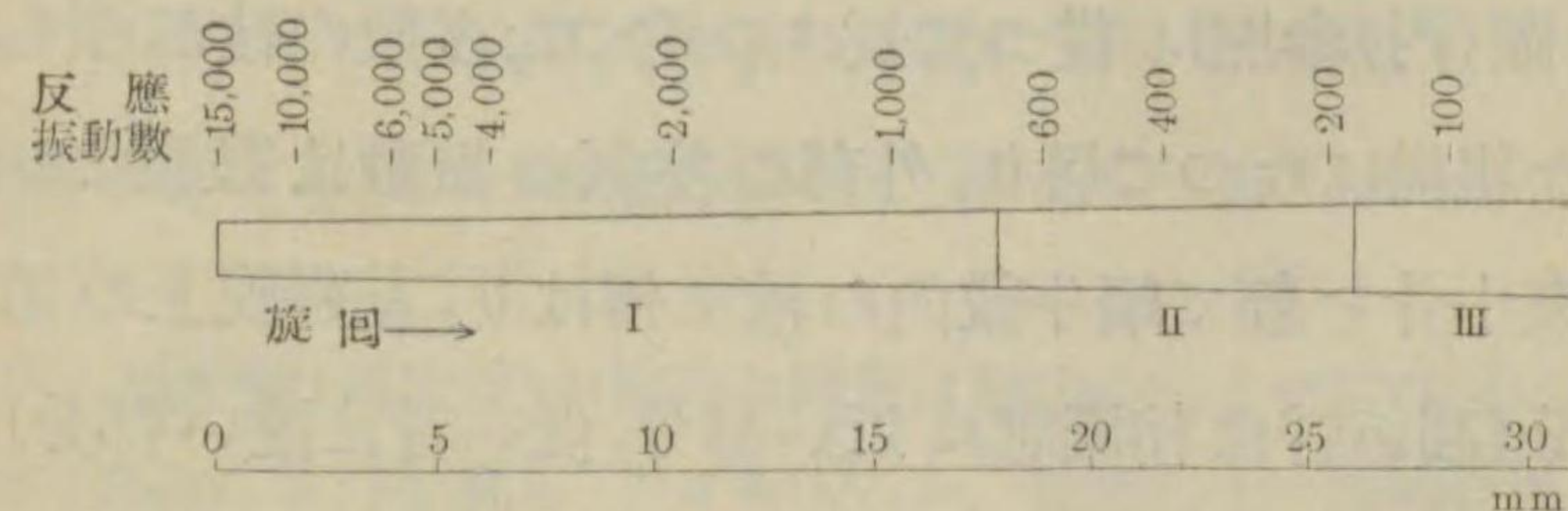
た特殊の形の器官であるが、是れは身體の位置の均衡を保つ働きをなすもので音を感じる役目には關係ないものである。音を感じ分析する器官は蝸牛殼である。蝸牛殼は其名稱の示す様に蝸牛の貝殼に似た形に細長い管が螺旋狀に卷いて居り、その内部は淋巴液を以て充たされて居る。第 64 圖(甲)はその横斷面を示すものであるが、管の入口から奥迄全長に互つて膜があり、是れに依つて管は前庭道と鼓腔道(或は後庭道)の二つに分たれて居る。此構造を判り易くするため此管を眞直に引伸して縦斷面を作れば(乙)の様になる。此膜の一番奥(即ち螺旋管の頂上)の所に



(甲)



(乙)



(丙)

第 64 圖

は孔が在つて是れに依つて前庭道と後庭道とが聯絡して居る。依つて管の入口なる橢圓窓(鐙骨の底部で塞がれて居る)からはひつた振動は膜全體に働いて、餘り大きければ奥の孔を通して後庭道に傳はり其前端である正圓窓(薄膜を以て被はれて居る)から中耳の中に戻るものである。

此上下二つの道の隔壁である膜は實は圖に示した様になつて居りライスナー膜(或は前庭膜)と基礎膜とに依つて夫々前庭道及び鼓腔道(後庭道)に接して居るものである。此ライスナー膜は弱い簡単な膜であるが、基礎膜は頗る複雑な構造で其表面に多數のコルティ氏器官或はコルティ氏アーチ(Corti's organ, Corti's arch)が相列んで居る。此膜の性状を一言にして云へば管の長さの方向には連結が弱くこれと直角の方向には強い様な構造で、恰も一萬餘本の絃を並べて張つた様な構造になつて居る。此基礎膜の幅は管の入口では狭く、奥へ行く程即ち螺旋管を上る程廣くなつて居る(管の入口での幅は 0.041 mm で、頂上では 0.49 mm. 第64圖(丙)参照)。従つて長さの違つた多數の絃が張られた様な組織になつて居り、外部の空氣の振動は鼓膜より中耳の微小骨を経て蝸牛殻内の液に傳はり、基礎膜上の適宜な部分(高い音は橢圓窓に近い部分、低い音は遠い部分)が是れに共鳴して振動するものと考へられる。第64圖(丙)は色々な振動数の音に對して共鳴する基礎膜の部分を示す

(I, II, III は螺旋管の<sup>(1)</sup>旋回を表す)。依つて外部の音が單純な音でなくして幾多の部分音を含む場合には、基礎膜上の色々な部分が夫々これ等の部分音に共鳴して振動する。即ち複雑なる音響は耳の内部で夫々成分に分析して感じられる。以上が聽覺に關するヘルムホルツ(Helmholtz)の共鳴理論と稱せられるものである。此理論は上記の様な聽覺の各性質を説明するに大體は都合のよいものであるが、猶不十分な點もあつて反對論者も多少はある。

吾々は音の來る方向を感知する能力を持つて居るが、是れは主として兩耳の作用に依るもので、兩耳に於ける刺戟の性質の差異、主として強さの違ひに依るものである。

#### 58. 音の物理的強さと感覺上の強さ(音の大きさ)との關係

次に詳しく述べる様に音の物理的強さと感覺上の強さととは常に比例するものではない。物理的強さが倍になつても吾々は二倍に強く感じるものではない。單に音の強さと云ふ時はそれが物理的強さであるか、或は感覺上の強さを意味するか、時に紛らはしいから、既に第4節に述べた様に音の強さと云ふ時は物理的強さを意味するものとし、音の感

(1) 蝸牛殻(螺旋管)の旋回の回数は動物の大きさや智能には關係ないが、動物に依つて異なる。“カモノハシ”は僅に1/4旋回に過ぎないが、鯨のは1回半、馬のは2回、人間のは $2\frac{3}{4}$ 回、猫のは3回、豚のは約4回旋回して居る。

覺上の強さは是れを音の大きさ (Loudness) と呼ぶ事とする。

そこで表題に掲げた音の物理的強さと感覺上の強さとの關係、即ち音の強さと大きさとの關係であるが、音響に限らず一般に刺戟と吾々の感覺との間には所謂ウェーバー・フェヒナーの法則 (Weber-Fechner's law) なる對數關係がある。

今刺戟の強さを  $E$ 、感覺の強さを  $L$ 、又  $C$  を常數とすれば、

$$L = C \log E$$

なる關係が  $E$  と  $L$  との間に成り立つ。是れがウェーバー・フェヒナーの法則として著名なものである。

然し乍ら此法則の成り立つのは刺戟の小範圍に限られるので、殊に音響の場合には假令純粹な音であつても此關係は一般には成立しない。後に述べる様に音の強さと大きさとの關係は頗る複雑である。然し吾々が音として感じ得る刺戟の強さ即ち音の強さの範圍は實に  $1:10^{13}$  と云ふ廣い範圍に互るから強弱色々な音の數値を圖で示す場合等に普通の直線的尺度を以てしては甚だ都合が悪い。且つ既に存在する音の大きさの増加は大略強さの増加の割合に比例する<sup>(1)</sup>

(1) 例へば 10,000 マイクロワット/平方cm の強さの音の 50%、即ち 5,000 マイクロワット/平方cm の變化も、100 マイクロワット/平方cm の音の 50% 即ち 50 マイクロワット/平方cm の變化も均しく大きさが半分變つた様に感ずる。即ち 5,000 とか 50 とか云ふ變化の絶對値に拘泥せず、既存の音の強さに對する變化の割合だけが大きさの變化として感じられる。

から、音の強さを表すに直線的尺度よりも對數尺度を用ひる方が便利である。

**デシベル** 斯様な對數尺度を用ひて二つの音の強さの比較をする場合に單位としてベル及びデシベルが廣く用ひられる。今強さ  $I_1$  及び  $I_0$  なる二つの音の強さの差は

$$\alpha = \log_{10} \frac{I_1}{I_0} \text{ ベル (bel)}$$

であると云ふ。

ところで此ベルなる單位は少し大き過ぎるので、通常その  $\frac{1}{10}$  なるデシベル (db) が用ひられる。即ち

$$\alpha = 10 \log_{10} \frac{I_1}{I_0} \text{ デシベル (db)}$$

である。

若し音の強さ  $I$  の代りに壓力  $p$  或は分子速度  $v$  を用ひるならば、 $I$  は  $p^2$  或は  $v^2$  に比例するから

$$\alpha = 20 \log_{10} \frac{p_1}{p_0} = 20 \log_{10} \frac{v_1}{v_0} \text{ デシベル}$$

茲に  $p_1$  は測らうとする音の過剩壓力(壓力變化)、

$p_0$  は基準音の過剩壓力、

$v_1, v_0$  は夫々測らうとする音及び基準音の分子速度

となる。

茲で誠に好都合な事は 1 デシベルの變化は大體常聽力者の辨別し得る音の強さの變化の最小値である事である。即

第 9 表

ベ ル	デシベル	音の強さの比	音の圧力或は分子速度の比
0	0	1	1
1	10	10 倍	$10^{0.5}$ 倍
2	20	$10^2$	10
3	30	$10^3$	$10^{1.5}$
4	40	$10^4$	$10^2$
5	50	$10^5$	$10^{2.5}$
6	60	$10^6$	$10^3$
7	70	$10^7$	$10^{3.5}$
8	80	$10^8$	$10^4$
9	90	$10^9$	$10^{4.5}$
10	100	$10^{10}$	$10^5$

ち1デシベル以下の強さの變化は通常辨別し得ない。

斯様な對數單位(デシベル)で表した音の強さを音の強さのレベル(Intensity level)と云ふ。

**音の強さと大きさとの關係** 色々な振動數の音に對する吾々の耳の感度が一樣ではなく、又此振動數と耳の感度との關係が音の強さに依つて變るため、音の強さと大きさとの關係は頗る複雑なものとなる。即ち振動數の違ふ、同じ強さの二音は一般には違つた大きさの感覺を與へる。又振動數の違ふ二音の強さを同じ割合だけ増加すると一般には大きさの増加の割合は同一ではない。

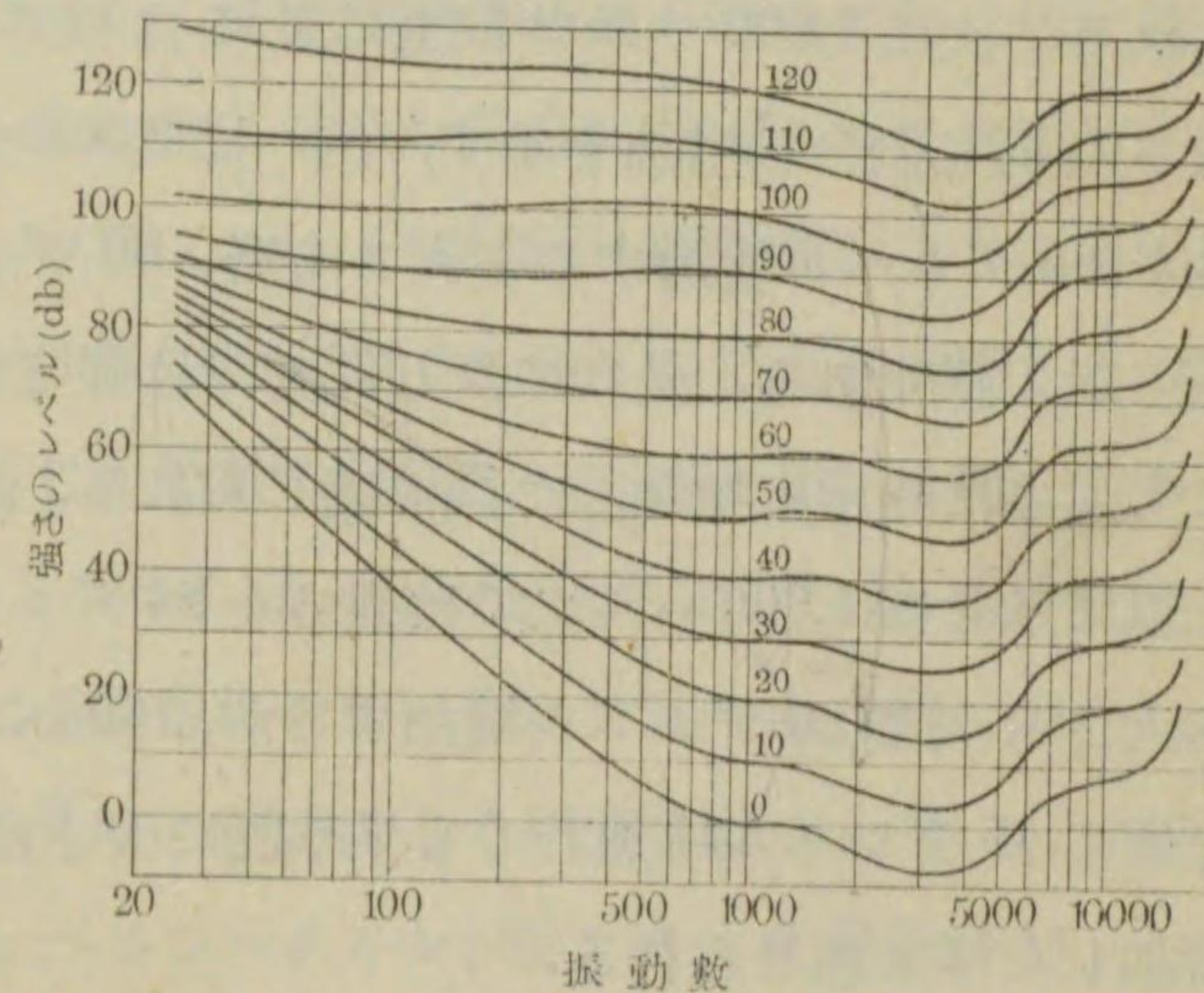
斯様な色々な振動數の音の強さと大きさとの關係に就ては曩にアメリカのベル電話研究所に於てキングスバリー(B. A. Kingsbury)が詳しく研究したが、最近同所に於てフレッチャー及びマンソン(H. Fletcher & W. A. Munson)は一層精密な

測定を行つた。第65圖はその結果を示したもので、音の強さと大きさとの關係を示す重要な

結果であ

るから、よく含味してその意味を理解して置く必要がある。

横には振動數、縦には音の強さ、何れも對數尺度で目盛つてあり、曲線は色々な振動數に於て等しい大きさの感覺を與へる強さを示す。換言すれば大きさの等しい contour line で地圖に書いてある同一高度の線と同様の意味のものである。曲線上の數字は大きさの階段をデシベルで書いたもので、振動數1,000の基準音と比較して求めたものである。茲に0デシベルの強さ即ち上述の  $p_0$  に該當する強さは米國



第 65 圖

に於ける新提案に基き  $10^{-16}$  ワット/平方 cm, 従つて  $p_0 = 0.000204$  バーと云ふ値が採つてある(第63節参照).

今此圖の性質を少しく詳しく説明すれば, 先づ第一に吾々の耳の感度は 3,000 ヘルツ附近に於て最も良い事が認められる. 次に 1,000 ヘルツ以上に於ては強さの増加は略、大きさの同じ割合の増加を示す. 例へば 2,000 ヘルツでは強さを 80 デシベル増加すると大きさも略、80 デシベル増加すると云ふ譯である. 是れに反し低音では強さを僅に増加しても大きさは非常に増加した様に感じられる. 此事實を數字を以て示せば 1,000 ヘルツでは強さを 80 デシベル増加すると大きさも矢張 80 デシベル増加するが, 100 ヘルツでは強さを僅に 45 デシベル増加しても早や既に大きさは 80 デシベル増加した様に感じられる.

斯く低い音では強さの僅少な増加も大きさに著しい増加を示すと云ふ事實は實用上頗る影響の多い事柄で, 例へばラヂオの受信機で音を擴大する場合に原音より餘り大きくすると原音に含まれる各成分を同じ割合に擴大しても, 低い音は大きさが餘計増される結果として, 音色が原音と違つて來ると云ふ結果になる. 又騒音の大きさの測定が一般に頗る困難であるのも騒音が高低色々な成分から出來て居るため上述の事實に依つてその全體としての大さの決定が容易でないためである.

### 59. 音の強さと高さとの關係

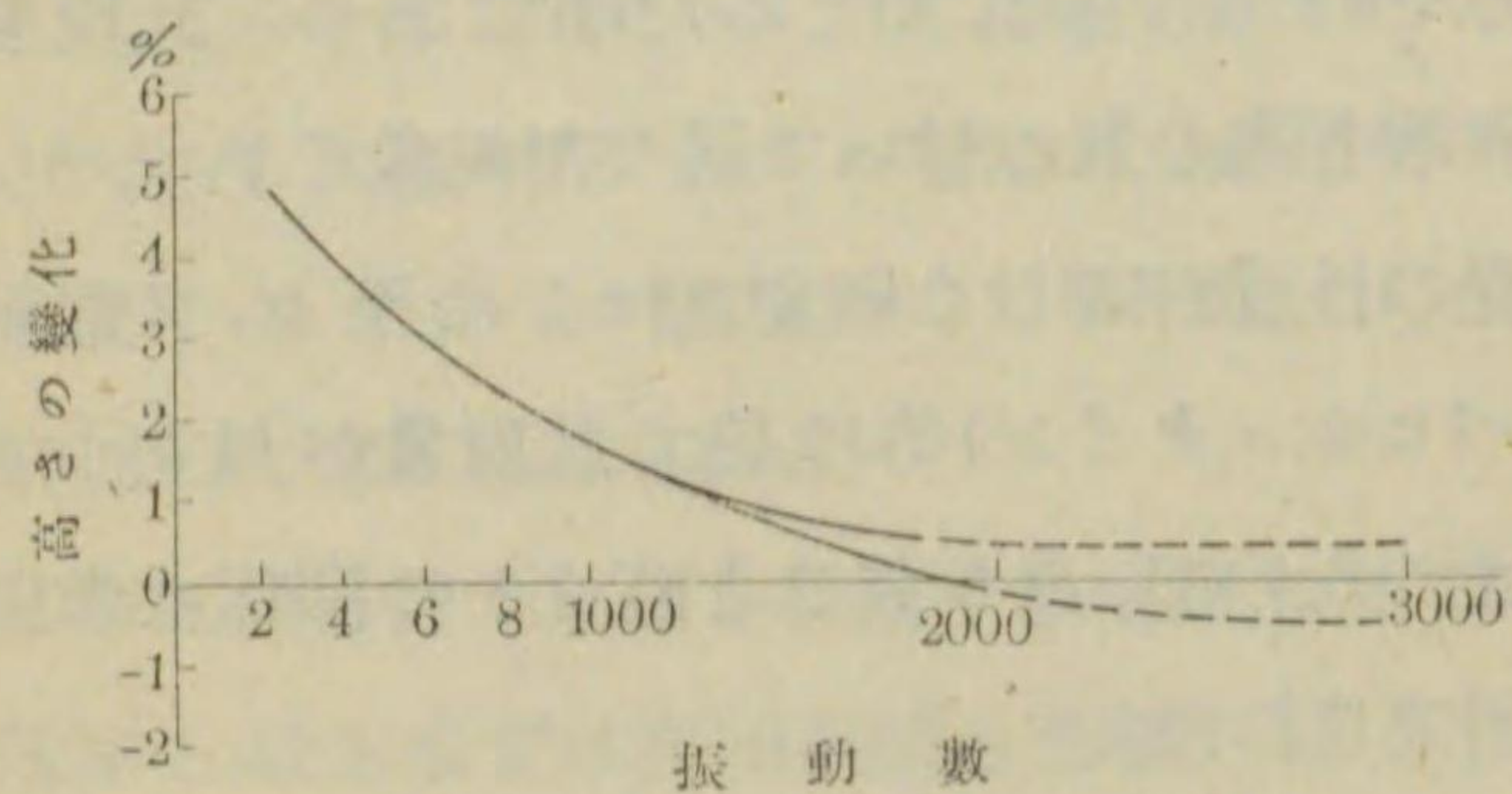
弱い音は同じ振動數の強い音より少しく高く聞える. 即ち或音の高さと云ふ感じは音の強さに依つて少しく違ふものである. 例へば音叉を鳴らして注意して聽いてみると音段々減衰して行くに従つて調子が高くなつて行く様に感じられる.<sup>(1)</sup> 是れは唯さう云ふ具合に聞えるのであつて實際に高さが違ふのではない. 勿論同じ振動數の二つの音を同時に出せば假令強さは違つても全く同じ高さに聞えるのであつて, 唯, 同じ振動數の強弱二つの音を交互に出してみると, 弱い音の方が少し高い様に聞えるだけである. 此現象は古くから生理學者等の氣の付いて居つた現象であるが, 最近吾々の聽覺の性質が詳しく研究されるに至り, 又電氣ピアノ(ネオ・ベヒシュタイン)等に於て此現象が目立つて感じられるに至つたので, 音の強さと高さとの關係は米獨兩國で詳しく研究された.

普通のピアノでは音の強さを非常に廣い範圍に變化させる事は出來ないが, 電氣ピアノ(ネオ・ベヒシュタイン)等に於ては, ピアノの鋼絃の振動を直接電氣的の振動に變化させ, 且是れを増幅して擴聲器を鳴らして音を出すのである.

(1) 音叉は極めて強く叩くと弱く叩いた場合と音の振動數が違ふものであるが, それは本質的に高さに變化があるので, 茲に云ふのは別な問題である.

からして、増幅器の調節で音の強さは非常に広い範囲に互つて自在に加減出来る。今斯様な電気ピアノと普通のピアノとを調子を良く合せて置き、然る後電気ピアノの音の強さを變へてみると、調子がまるで狂つた様に聞える。

此の音の強さと高さとの關係に就てはアメリカではベル電話研究所のフレッチャー及びハーヴァード大學のステイヴンス (S. S. Stevens), ドイツではハインリッヒ・ヘルツ振動研究所のフィールリング (Osker Vierling) 等がくはしく研究した。第 66 圖はフィールリングの得た結果で、強



第 66 圖

弱 50 フォン (db と同じ, 第 63 節参照) の差のある二つの音の高さの違ひを曲線を以て示したものである。此圖に示されてある通り此現象は 200 ヘルツ附近 (即ちピアノの中央の e より少し低い邊) で最も顯著で、強さに於て 50 フォン (或は db) の差があると高さが振動數にして 5% (音程で約半音) も違ふ様に感じられる。音の高さが段々上るに従つて此現象は顯著でなくなり、1,000 ヘルツ附近になると強さに 50 フォンの差が

あつても高さは違はない。猶もつと高い音、例へば 3,000 ヘルツ附近になると逆に強い音の方が少し高い (極く僅かではあるが) 様に聞えて來る事が前記のフレッチャーの詳しい研究の結果で知られて居る。而して此特異な現象の起る原因に就ては一、二の説明が試みられて居るが、未だ確實なものではない。

### 60. 結合音

振動數の似寄つた二つの樂音が同時に存在すると所謂唸りの現象が現れる (第 13 節参照)。即ち振動數  $N_1, N_2$  の二つの音が同時に在ると、音の強さが毎秒兩者の振動數の差 ( $N_1 - N_2$ ) の週期を以て消長する。

是れは振動數の似寄つた二音が同時に存在する場合であるが、振動數の相當隔つた二つの樂音を聴くと唸りとは違ふ第三音、詳しく云へば二つの音の振動數の和 ( $N_1 + N_2$ ) 及び差 ( $N_1 - N_2$ ) に相當する振動數を持つた音が聞える事は古くから知られて居り、是れを結合音、Combination tone, 組合音と譯する人もある) と呼び、二音の振動數の和の振動數を持つた音を和音 (Summation tone), 差の振動數を持つた音を差音 (Difference tone) と云ふ。

是等の結合音の現れるためには、兩音が強い事が第一に必要なであるが、又和音或は差音が丁度中庸の高さで吾々に聞き易いものである事が必要である。即ち差音を出すには

高い強い二つの音を要し、和音を出すには低い強い二つの音を必要とする。而して差音の方は容易く聽かれるが和音の方は聽きにくい。

複合音の隠蔽作用は一般に頗る複雑であることは既に第56節に述べたが、二つの成分より成る複合音の隠蔽作用は夫々の成分による隠蔽作用に加ふるに、夫等の和音及び差音の隠蔽作用も現れる譯である。従つて實際の騒音に屢例を認められる様な比較的高音部内に強大なる幾多の成分を有し、一見低音に對し隠蔽作用が著しくない様に思はれる音も、夫等成分の間の差音の影響により低音に對して顯著な隠蔽作用を生ずる場合もある。

猶差音は人聲や、樂器の音の様な複雑な樂音の高さの認識に關し重要な役目を持つものであるが茲に詳細な説明は略する(“實驗音響學”第85節参照)。

差音、和音は唸りと違つて空氣中に實在して居るものではなく、刺戟が強い場合吾々の耳の特異性に依つて、耳の中で形成されるものである。

## 第十二章 騒音及び其測定

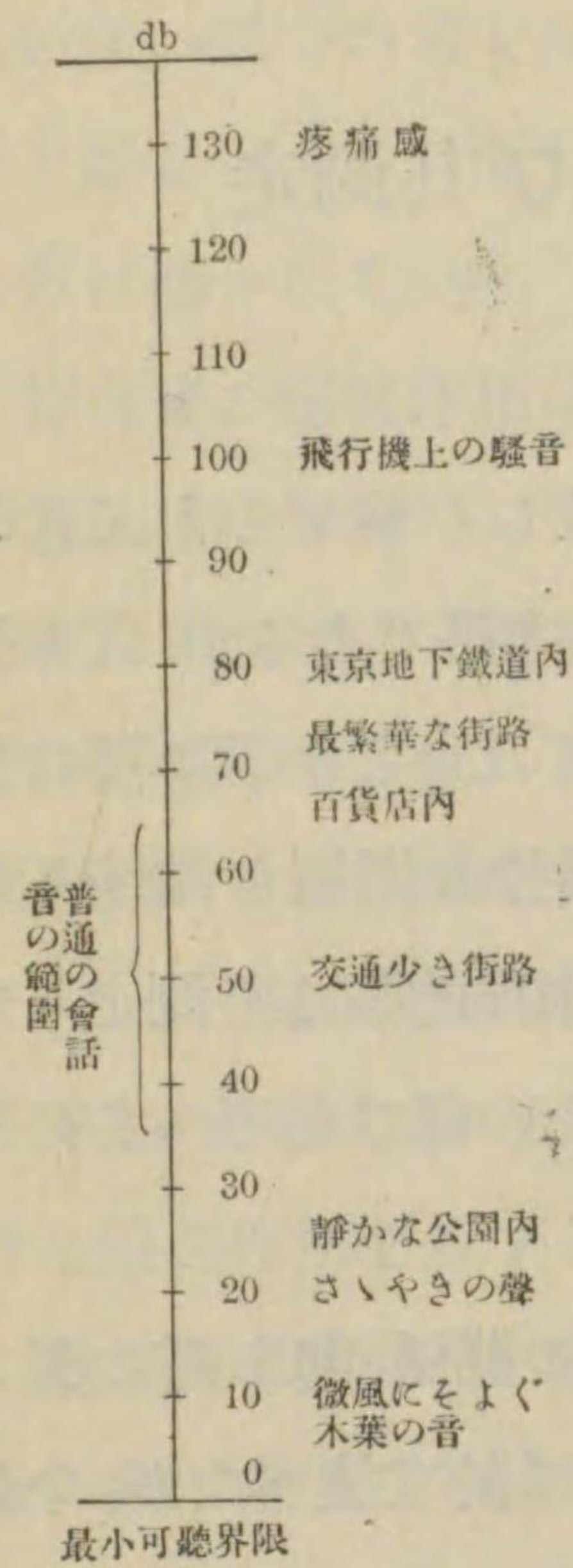
### 61. 總 說

騒音の問題は近頃都市の騒音が喧しく論ぜられるに至り、大いに世人の注意を惹くに至つた次第であるが、元來騒音の場合には是れが喧しいとか喧しくないとか云ふのは全く吾々の感覺上の問題であるから、騒音の問題を論ずるに當つて他の物理的諸量の様に單に其物理的強さを測定しただけでは意味をなさない。是非感覺上の強さを考へる必要のあるものである。

音の物理的強さと感覺上の強さとの關係、即ち音の強さと大きさとの關係に就ては曩に第58節に於て述べたが、今日問題となる騒音の様な複雑な刺戟に於ては此關係も亦頗る複雑であつて、最近迄其大きさの測定若しくは比較に要する單位及び測定器すらも無かつたのであるが、都市騒音等に關聯して近時頗る其必要が感ぜられた結果、最近音の大きさの單位も決定され又後に述べる様な種々なる測定方法が考察、實施されて居る次第である。

### 62. 騒音の大きさ

騒音の大きさ即ち喧<sup>やかま</sup>しさを表すには曩に第58節に述べたデシベル又は次節に述べるフォンを用ひる。何れも大略同



第 67 圖  
騒音の大きさ

じ大きさの単位であるが前者は主として英米國で用ひられ後者は獨逸で用ひられる。今代表的の騒音を其大きさの順に列記すれば第 67 圖の様になる。是等デシベルやフォンの性質は次節に詳しく述べる。

吾々に是れ以上弱くしては聞えないといふ界限の音の大きさを 0 デシベルとすると<sup>(1)</sup>、百貨店内の騒音は六、七十デシベルで、飛行機のすぐ近くの耳をつん裂く様な強烈な音は大凡 110 デシベルである譯である。序に第 10 表に東京市の色々な場所に於ける騒音の大きさの程度を示す。

都市の騒音は同一場所に於ても時と場合とに依つて大いに異なるものであるが、通常暗騒音即ち所謂“どよめき”の音

(1) 最小可聴界限と云つても人により、年齢により異なるから、嚴密な言ひ表し方ではない。依つて最近アメリカでは 0 デシベルとして毎平方 cm  $10^{-16}$  ワットの強さの音と云ふ事にした。而して騒音測定の基準としては 1,000 ヘルツの平面波若しくは球面波の強さを用ひる (第 63 節参照)。

第 10 表 東京市騒音測定實例 (單位: デシベル)

1. 交通機關	車内	鐵道省電車, 市内電車	70~80
		郊外電車	65~75
		乗合自動車	60~70
		汽 車	65
		地下鐵道	75~80
	車外	市内電車 (歩道にて)	70~80
		鐵道省電車 (ガードの下)	85~95
		トラック	65~75
		消音せざるオートバイ	80以上
		乗用自動車 市内電車交叉點	50~65 75~85
2. 屋内街路騒音	街路に面する商店内 (暗騒音)	55~60	
	“ (電車通過の際)	70~80	
	デパート屋上 (銀座)	60~65	
3. 公園及び住宅地の騒音	公園及住宅地 (電車より離れたもの)	45~55	
	“ (電車路に近接せるもの)	50~65	
	舊東京市内で最も静な地點 (植物園, 帝大・池の端, 護國寺墓地) 午後	30~35	
4. 特殊な雑沓に依る騒音	静な郊外 (午後)	20~30	
	デパート店内	60~65	
	新宿驛構内 (平日午後) 夜店等にて雑沓する街路	65~75 60~65	
5. 特殊音源に依る騒音	交叉點自働交通整理機ベル	80	
	鐵骨鋸打作業 (20 メートル)	80~90	



と之に加ふるに交通機關その他に依つて間歇的に發せられる騒音とから成り立つて居るものである。

茲にデシベルで表された騒音の大きさの意味をもう少し詳しく説明しよう。音の強さとデシベル數との關係は曩に第58節第9表に示した通りである。依つて、たとへば繁華な街路の騒音が60デシベルであると云ふ意味は、斯様な喧噪の巷では吾々は或る程度聾になつて居ると同様に、極めて静な場所で吾々が辛うじて聴き得ると云ふ音の強さを1(0デシベル)とすると、此繁華な街では其強さを $10^6$ 倍即ち100萬倍しなければ吾々に聞えて來ないと云ふ意味である。もつと判り易く説明すれば紐育市の騒音防止委員會で先年測定した所によれば、ライオンの吼える聲は87デシベルに達するが、シベリヤやベンゴール産の虎の聲は76乃至79デシベルであると言ふ。然るに紐育市中の最も繁華な街路の騒音は80デシベルに達すると言ふから、今假りにライオンが斯様な街に出て來て吼えたと言へば、その聲は二、三十尺の所で聞えるが、虎の怒號は往き來の人々には單に虎が欠伸をして居る様にしか見えまいと云ふ。

### 63. 騒音測定の基準, デシベル及びフォンの定義

**デシベル** 二つの音の強さを比較するにデシベル(db)なる単位を用ひる事は既に第58節に於て述べた。即ち壓力變化 $p_1, p_0$ なる二つの音の強さの差は

$$\alpha = 20 \log_{10} \frac{p_1}{p_0} \text{ デシベル}$$

である。 $p_0$ を基準音の壓力變化、 $p_1$ を測らうとする音の壓力變化とすれば、是れに依つて $p_1$ の強さが與へられる。

此基準音 $p_0$ として通常吾々の耳の最小可聴界限の壓力變化を用ひるが、此最小可聴界限なるものは一定のものではなく人に依り又同じ人でも場合に依り異なるので、是れを基準に採る事は結果が曖昧となる。依つて米國では最近此基準點即ち0デシベルの音の強さを

$$10^{-16} \text{ ワット/平方 cm}$$

と採る事を提案した。依つて溫度 $0^\circ\text{C}$ , 氣壓760 mmでは

$$p_0 = 0.000204 \text{ バー(或はダイン/平方 cm)}$$

となる。<sup>(1)</sup> 而して騒音測定の基準音としては1,000ヘルツの平面波或は球面波の純音を用ひる(第65圖参照)。

**フォン** 獨逸では騒音測定等に於ける音の大きさの單位として最小可聴界限の壓力變化を基準とし、壓力の比の2を底とする對數 $\log_2 \frac{p_1}{p_0}$ を以てし、是れをフォン(Phon)と名づけた。此單位に依る最小可聴界限の音の大きさは0フォンであり、吾々の耳に疼痛感を與へる音は約14フォンの大きさとなる。此フォンなる單位はバルクハウゼン(Barkhausen)

(1) 是れに依つてバーとデシベルとの關係を求めれば0.001, 0.01, 0.1, 1, 10 バーは夫々14, 34, 54, 74, 94デシベルに當る。

の提案に係り、一時ジーマンス製のバルクハウゼン騒音計(次節参照)に用ひられたのでバルクハウゼンのフォンとも呼ばれ、相當廣く使用されたが、其値大きに過ぎ、且つ基準點  $p_0$  も單に最小可聽界限と云ふのみで確固たる數値でないから實用上不便が尠くない。依つて最近獨逸でも別に音の大きさ(Lautstärke)の單位“Phon”を新に制定した。其定義はデシベルと同様に壓力振幅の比の10を底とする對數の20倍即ち  $20 \log_{10} \frac{p_1}{p_0}$  であるが、1,000ヘルツにて

$$70 \text{ "Phon" } = 1 \text{ ダイン/平方 cm}$$

と規定し、ちゃんと基準點を明かにした。ジーマンス製のバルクハウゼン騒音計も近頃は總て此フォンで目盛がしてある。此新提案に依るフォンを以前のバルクハウゼン・フォンと區別するため“新フォン”と呼ぶこともある。70フォン=1ダイン/平方cmと云ふ定義に従へば1,000ヘルツに於ける最小可聽界限の壓力は  $p_0 = 0.000316$  ダイン/平方cmとなり、米國の新提案の  $p_0$  より少しく大きく、是れに依つて計算してみると

$$1 \text{ ダイン/平方 cm} = 70 \text{ Phon} = 73.8 \text{ db.}$$

従つて今後音の大きさをフォンで表した場合とデシベルで表した場合とでは70dbで大凡4dbの開きがある事になる。

#### 64. 騒音の測定方法, 騒音計

現今行はれて居る騒音測定の方法は是れを大別して次の

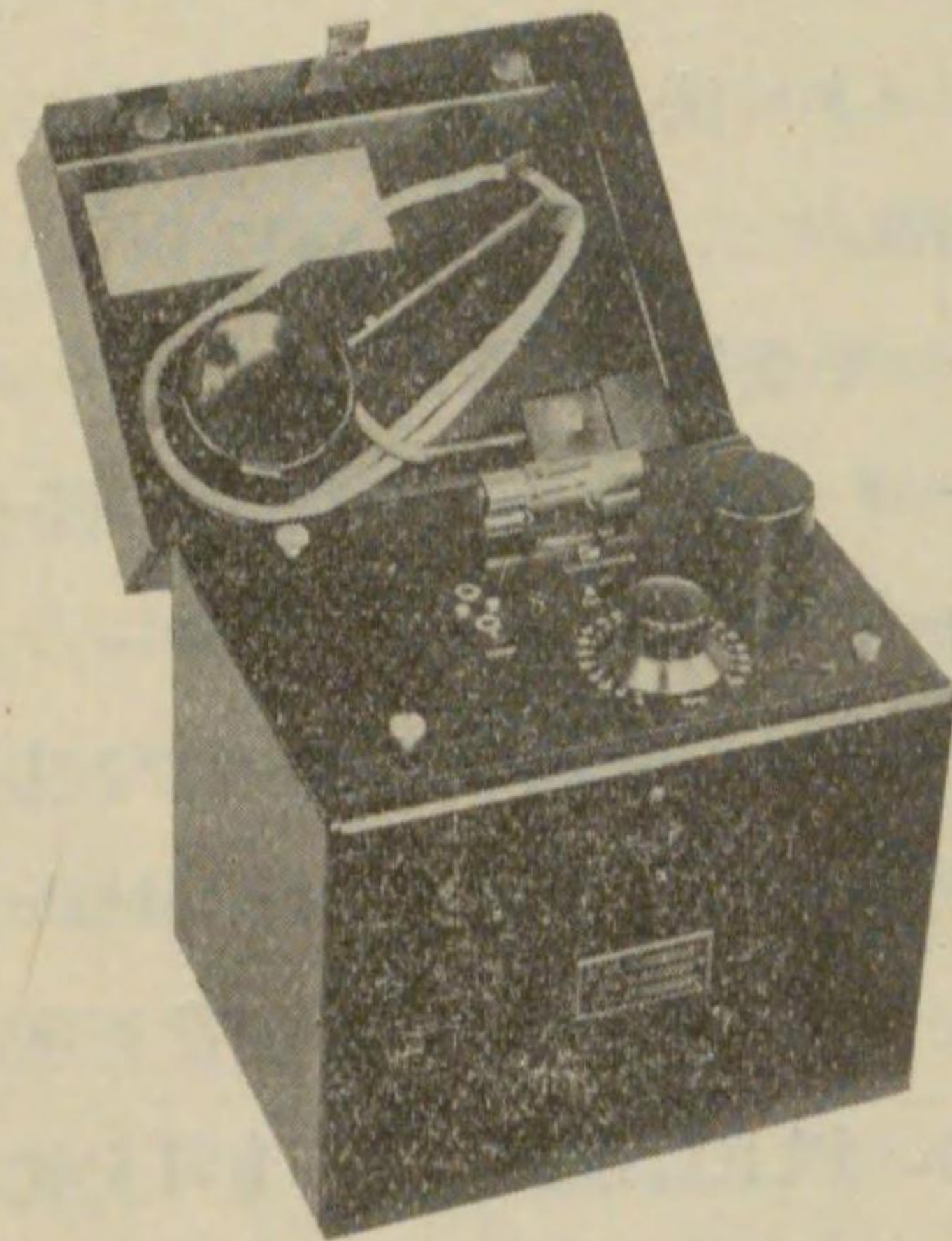
三種となす事が出来る:

- (i) オーディオメーター法,
- (ii) 音叉に依る方法,
- (iii) マイクロフォンを使用する方法.

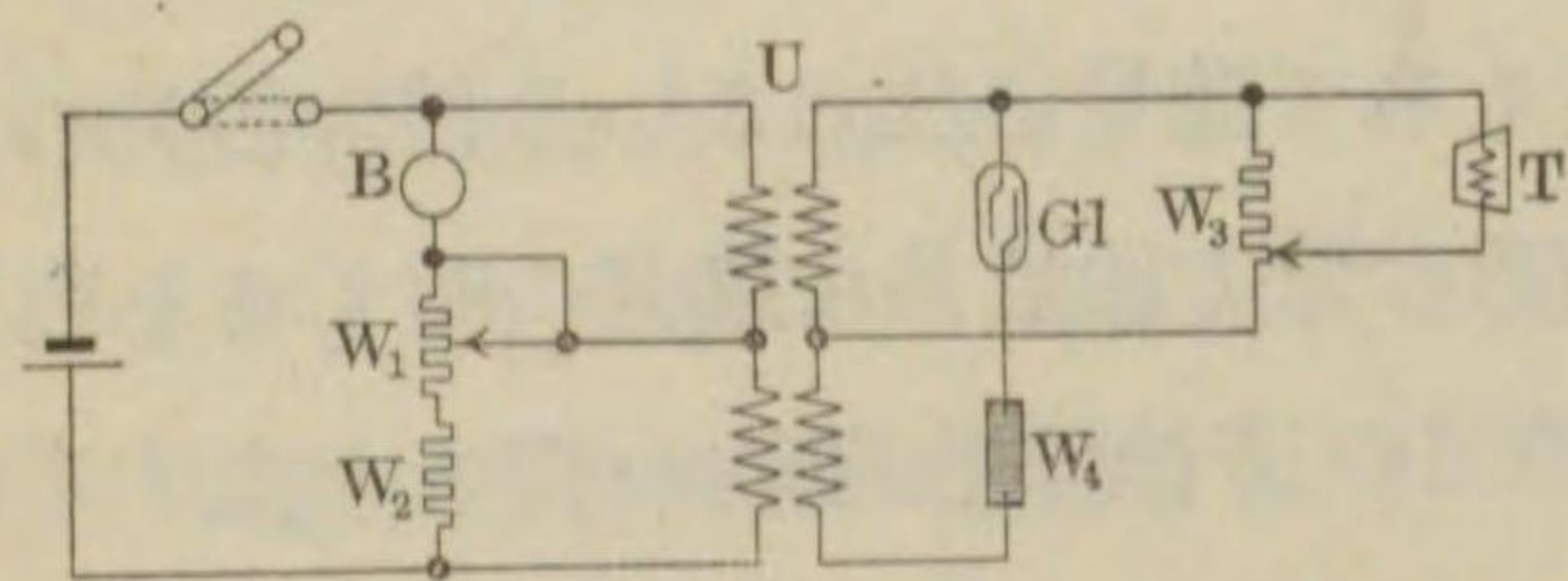
以上の中、(i)はジーマンス製バルクハウゼン騒音計(Barkhausen Geräuschmesser)若しくはウェスターン電氣會社製オーディオメーター(Audiometer)を使用する方法で現今最も廣く行はれて居り、(ii)は音叉とstop-watchだけを必要とする最も簡単な方法であるが、而も相當正確な結果を得られるものである。以上二方法は何れも耳を使用するものであるが、(iii)は是等三種の方法の中最も複雑なものでマイクロフォン及び増幅器を使用し、指示計器によつて騒音の強さを表すもので聽覺に依らない全然客觀的方法である。従つて初めの二方法は共に騒音の喧しさを直接示すものであるが、第三の方法は物理的の強さを表すものである。

(a) **バルクハウゼン騒音計** 第68圖(甲)にバルクハウゼン騒音計の外観を示し、(乙)に其内部接續を示す。此装置の動作の原理はブザー<sup>(1)</sup>Bに依つて得られた斷續電流を

(1) ブザーとは電磁石の極片が振動するとき、電磁石の回路を機械的に開閉して極片の振動を持続し、その斷續電流によつて電磁石の他の捲線に誘導する交流を利用する最も簡単な交流發生器。



(甲)



(乙)

第 68 圖

ジーメンス製バルクハウゼン騒音計

此騒音計で騒音の測定をするには騒音計の一次電圧を以上の様に調節した後、受話器 T を一方の耳に當て他の耳で其場所の騒音を聴きながらダイヤルを廻して  $W_3$  を變化し騒音と受話器音と強さの感覺が一致する様に受話器電流を

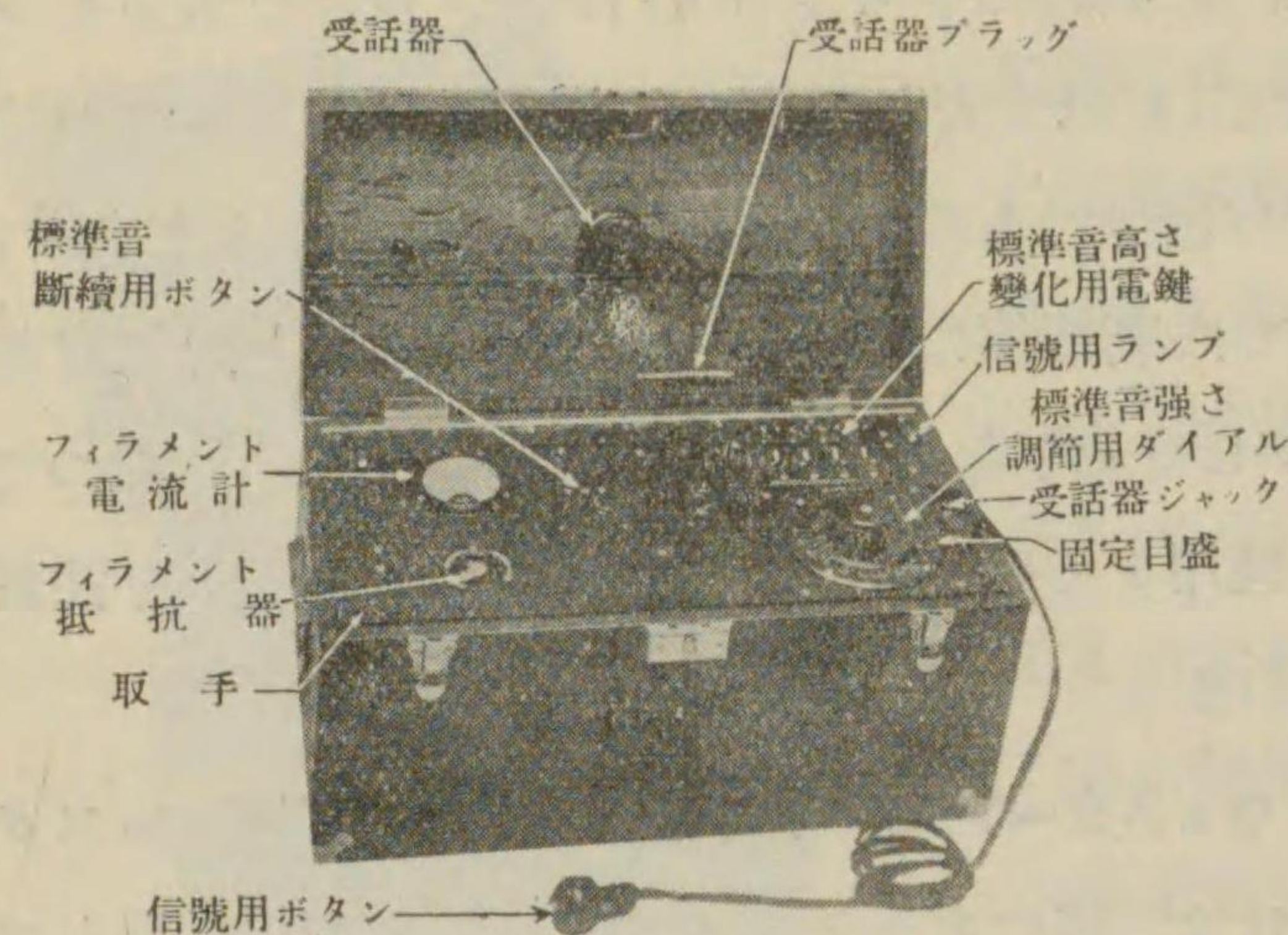
變壓器 U 及び電圧調節器  $W_3$  を通じて受話器 T に導き、種々なる強さの受話器音が得られる様になつて居るものである。但しこの變壓器の二次電圧従つて  $W_3$  の兩端の電圧を一定に保つためにグリムランプ G1 が入れてある。このグリムランプが丁度點火される程度に變壓器の一次電圧を調整して使用する。

調節すれば其時のダイヤルの目盛が騒音の大きさをフォン(前節参照)を以て表したものとなる。但しバルクハウゼン騒音計の舊型のものでは舊フォンで目盛がしてあり、新型のものでは新提案に依るフォン(デシベルと同じ意義であるが、少しく基準を異にする)で目盛つてある。従つて此騒音計を使用する時は、それが何れの型であるかを注意するの必要がある。

(b) **ウェスターン・オーディオメーター** 米國ウェスターン電氣會社は三種のオーディオメーターを市場に出して居るが、其中で騒音測定に使用されるものは 3A 及び 2A の二種であつて殊に後者が最も屢々用ひられる。

ウェスターンのオーディオメーターは總てデシベルで目盛つてあるが、3A オーディオメーターは音源としてブザーを使用し、前に記したジーメンスの騒音計と略々同一のものである。

2A オーディオメーターはもと米國ベル電話研究所で聾者の聽力測定用として作られたものであるが、近頃騒音測定に廣く利用されて居るものである。其構造の原理はバルクハウゼン騒音計と同様なものであるが、音源として真空管發振器を用ひ且つ一種の標準音に止まらず 64 乃至 8,192 ヘルツ即ち  $C$  乃至  $e^6$  に互る毎オクターヴの 8 種の標準音を出せる様になつて居るから、バルクハウゼン騒音計に



第 69 圖

ウェスターン 2A オーディオメーター

比し構造複雑で、形も大きく携帯に便ではないが、色々な高さの標準音と比較する事に依つて騒音の性質を稍、詳しく知るには適當である。第69圖は此オーディオメーターの外観を示すものである。

是等の騒音計を以て騒音を測定するには測定者は、騒音と標準音とを同時に聴き是等の大きさを比較するのであるが其方法に二種類ある。其一つは一方の耳で騒音を聴き他の耳で標準音を聴いてその強さの感覚を等しからしめるもので、是れを平衡法 (Balance method) と云ふ。此方法は兩耳を同時に使用するのであるから、兩耳の感度が等しい事が豫定されて居る。ジューメンズの器械では全く此方法に依る

事になつて居る。

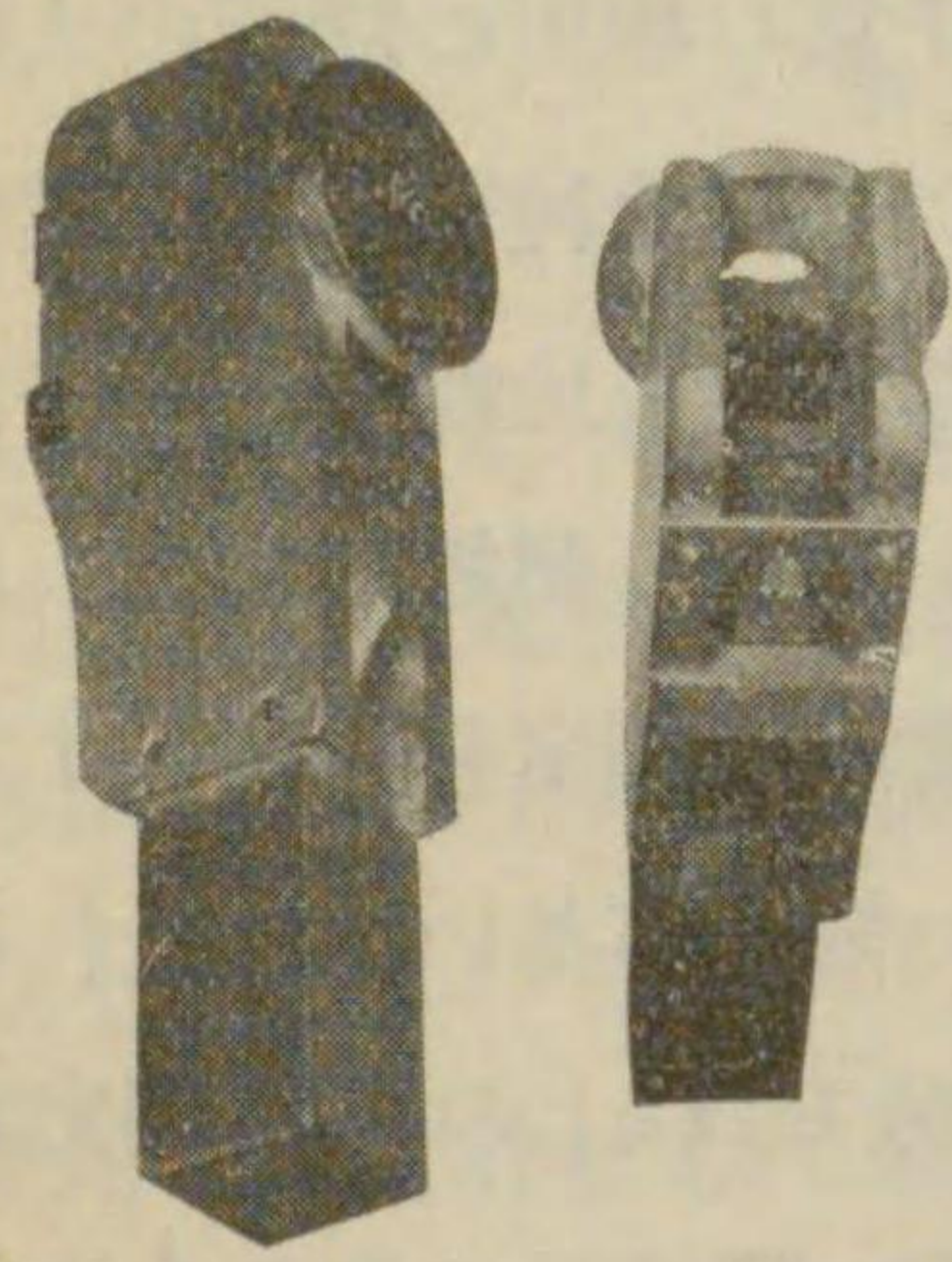
ウェスターンの器械では此平衡法を行ふ事も勿論出来るが一つの耳で同時に標準音と騒音とを聴いて騒音に依る隠蔽作用によつてその大きさを測定する所謂隠蔽法 (Masking method) も行ふ事が出来る様になつて居る。即ち此場合には受話器の振動板の外側 1 cm 許りの距離に中央に孔のある板を固定し、騒音は此板と受話器との間隔から這入つて来る様にして、騒音に依つて標準音が隠蔽され丁度聞えなくなる迄標準音の強さを加減するのである。

是等の騒音計は何れも携帯用で任意の場所の騒音の大體の大きさを知るには頗る便利であるが、何分純音に近い標準音(受話器音)と多くは調子の低い騒音とを比較するのであるから非常に精密な事は望まれないが少し熟練すればかなり一致した結果が得られる。而も實際上測定を必要とする騒音の大きさは厳密に一定不變でない場合が多いから是れを非常に精密に測定しても寧ろ無意味で、以上の様な測定器で得た結果で充分差支ない。猶是等の騒音計に依る方法の最も有意義なる點は測定の結果が直ちに感覚上の強さとして與へられる點である。

(c) 音叉に依る測定法 此方法は音叉を一定の力で叩いて鳴らし、音叉の枝(叉)の幅の廣い方の面を出来るだけ耳に接近させ、音叉の音の強さが漸次減衰して丁度外界の騒音

の強さと等しく感じられるに至るまでの時間(秒數)を測定するもので、近頃英國國立物理實驗所のデエヴィス (A. H. Davis) の提案によるものである。音叉の振動の減衰の法則は對數的であるから、豫め前記の騒音計等に比較して音叉の音の大きさと時間との關係を求めて置けばよい。

音叉の叩き初めの音は通常 80~90 デシベルであるから、以上の様な方法では是れ以上の強さの騒音を測定する事は出来ない譯であるが、斯様な場合には音叉の音と騒音とが等しくなる迄の時間でなくして、音叉の音が騒音に隠蔽さ



第 70 圖  
音叉騒音計

れて聞えなくなる迄の時間を測定すればよい。

音叉の叩き方は大なる注意を要せず凡そ一定の力を以て叩けばよい。餘り精密を要しない時は靴のゴム踵かかとに音叉を當てる等も簡便な方法であるが、簡単なバネ仕掛で音叉を槌で打つ様にした装置を第 70 圖に示す。

(d) **マイクロフォンを使用する測定法, 指示騒音計** 上述の騒音計は何れも耳を使用するものであるが、此外に全然耳を使用せず、マイクロフォンに依つて音の勢力を電氣的勢力に變へ、適當な増幅器で是れを擴大し、その出力をミリアン

メーター若しくはマイクロアンメーターで讀む指示騒音計も種々考案されて居る。

此種の騒音計は全然客觀的のものであるから頗る好都合の場合もあるが、複雑な音に於ては斯かる計器で指示される音の強さと吾々の感覺上の強さとの關係は頗る複雑であるから、注意を要する。猶此種の騒音計には眞空管や電池を使用するためその感度は變り易いから、標準音源を使用して屢々感度を測定する事が必要である。

## 第十三章 建築と音響

### 65. 總説

建築に關する音響の研究は、所謂建築音響學 (Architectural acoustics) として最近頃に發展し、音響學の重要な一部門となつたもので、頗る廣汎なものであるが、二つの部分に大別される。その一つは室内音響で、他の一つは音響遮斷の問題である。室内音響學とは講堂、音樂堂、劇場、ラジオ放送室等の音響的性質を夫々の目的に對して最良ならしめる方法を攻究するものであり、音響遮斷とは外部或は隣室からの音響を遮斷して其妨礙を防ぐ事で、病院、ホテル、アパートメント、事務室等に於て常に必要を感じる問題であり、また工場等で特殊の激しい音を外部に漏れない様にするのも此種の問題である。而して室内音響學は最近音樂、ラジオ、トーキー等の發達に伴ひ特に一般の注意を惹くに至つた問題であり、音響遮斷は是れ亦最近スピード時代、或は騒音恐怖時代の出現と共に益々その必要を感じらるゝに至つたものである。以上二つの問題の中第二の音響遮斷の問題は後節に譲り、先づ室内音響に就て述べよう。

此問題は建築物としては頗る重要な問題であるが、是れが科學的研究のなされたのは近年の事で米國ハーヴァード

大學教授セイビン (W. C. Sabine) の研究がその先驅である。セイビンは1895年ハーヴァード大學フォッグ美術館の大講堂の音響的性質を調べた際、室内音響に關しては發せられた音が室内に増大散亂して行く狀況並びに音が止められた後減衰する模様の研究が最も重要な事項であることに著眼し、爾後1916年他界する迄専心此問題の研究に没頭し、室内音響に關する根本的の問題は殆んど剩す所なく彼に依つて研究し盡されたものである。

### 66. 反響及び殘響

講堂、音樂堂等の音響的性質には二つの注意すべき點がある。その一つは反響 (Echo) で、他の一つは通常殘響<sup>(1)</sup> (Reverberation) と呼ばれる現象である。反響とは滑かな丸天井或は曲面の壁、舞臺のアーチ等からの反射によつて生ぜられるもので音が明瞭に反復される事である。元來吾等は原音と反射音とが1/15秒以上離れて居ると明かに二つの音として感ずるので、大劇場等にて舞臺の反對側の丸天井等からの反響の著しい場合には舞臺上の俳優は自己の獨白を再び耳にし甚だ不都合を生ずる様な事もある。一般に音樂堂、劇場等に於ては舞臺からの音が内部に一様に配布され、觀覽席若しくは聽衆席等のどこでも同様に聞える

(1) Reverberation の譯語は未だ一定して居ない。餘響と譯す人もある。

事が最も緊要であるが、反響に依つて音の焦點即ち音が特に強く聞える點、或は反對に死點即ち音の聞えない點等を生ずることもある。反響の著しい言はば畸形的の建物は世界各所に在るが、ロンドンのセント・ポール寺院の丸天井下の廻廊は所謂 Whispering gallery としてその最も有名なもので、廻廊の或る一點に聽者が立つと他の一定所から來る音が著しく良く聞える所がある。ワシントンの國會議事堂内の歴代の大統領の石像の建つて居る所謂石像の間も亦同様な場所として知られて居る。又我國では日光輪王寺藥師堂の鳴龍なきりゆうも床と天井との間の一種の反響であつて<sup>(1)</sup>、是等は何れも名所として觀光客の杖を曳く所である。

一般に既成の建物に現存する著しい反響を完全に除去する事は頗る困難であるから、建築の際豫め其形狀等に充分注意を拂ふ事が萬全の策であるが、既成の建物に就ては反響を生ずる曲面に凹凸を附し、或は後に述べる様な厚い毛布類の如き吸音材料を張り音の反射能を減じ、反響の害から救ふ事も出来る。

**殘響** 室内で發せられた音は擴散するに當つて壁、天井、

(1) 最近東京市王子音無橋のコンクリートのアーチの下にも鳴龍と同じ現象を呈する場所のある事が發見された。此所で拍手をするると圓弧狀のコンクリート天井と地面との間に反射が數回反復される結果一種異様の音として聞える。

床等で數百回反復反射され室の内部各所に散亂されるものである。依つて繼續して居た音を急に止めても猶暫くは音が聞え、所謂餘韻が残るものである。かく原音を止めても猶暫く残る音を殘響と呼ぶ。殘響の繼續する時間は室の大きさ、性質、初めの音の強さ等に依つて著しく變り、コンクリート建築内で何等の什器を容れない大きな室で相當大きな音を出すと殘響は十數秒間も聞える事がある。

上述した反響は建築物の眞の缺點であるが殘響の方は演説等を室の隅々迄行渡らせ或は音楽が所謂餘韻よゐん々々として味のあるものとなる爲めには或る程度必要なものである。然し殘響が餘り大きい室で話をすれば一語が充分消えない内に次の語が發せられるから兩者相混じて明晰を缺くもので前述の様なコンクリート建築内で殘響が7~8秒以上も續く室では3m以上離れては會話は不可能となる。又音楽堂にあつては殘響が長過ぎると音楽が不明瞭になり、殊に最強音の次に休止符が來る様な場合に、其急激な休止の効果が一向現れないで力のない音楽となる様な場合もある。

然しながら餘り殘響が少いと、會話に不愉快であり、演説は室の隅々迄達せず、又音楽は恰も野外で奏して居る様な感を與へ頗る無味乾燥なものとなる。依つて音楽堂、講堂、ラヂオ放送室等では第70節に述べる様に目的に應じ夫々最良の殘響量があり、近頃蓄音器吹込に於ても殘響の量に

特に注意が拂はれる様になつた事は最近のレコードを少しく注意して聴けば直ちに氣付かれる所である。

### 67. 残響時間, 損率

W. C. セイビン<sup>1)</sup>は多數の講堂, 音楽堂等の残響の性質を詳細に研究した結果, 同じ強さの音に對しては残響の聞える時間  $t$  は室の容積  $V$  に正比例し, 壁, 天井, 床等の表面の全吸音力  $A$  (後に説明す) に逆比例する事を確めた。即ち

$$t = k \cdot \frac{V}{A},$$

茲に  $k$  は常數である。

依つてセイビンは室の残響の多少を云ひ表すに, 最小可聴界限の音の百萬倍の強さの音を使用した場合に残響の聞える時間を以てし是れを **残響時間** (Reverberation time) と呼ぶ事を提案し, 爾後一般に使用されて居る。即ち残響時間とは室内に於て最小可聴界限の百萬倍の強さの音を發し定常状態に達せしめたる後, 急にその音を止めた場合にその強さが漸次減衰して遂に聞えなくなる迄の時間である。

**損率** 室内の音源から出た音波は天井, 壁, 床等の隔壁に當ると音の勢力の一部は隔壁の表面で反射され, 他の一部は隔壁の物質中に吸収され熱に變じ, 残りの部分は隔壁を透過して外界に逸出し去る。即ち隔壁に當つた初めの音の勢力を 1 とし, 反射される部分を  $r$ , 吸収される部分を  $\alpha$ ,

透過する部分を  $t$  とすれば, 明かに

$$1 = r + \alpha + t$$

である。音の勢力は隔壁に當つて斯く三つの部分に分たれるが, 隔壁に吸収される部分  $\alpha$  と, 隔壁を透過して外界に逸出し去る部分  $t$  とは共に再び室内に戻つて來ないものであるから室内の音響と云ふ立場から考へれば敢て是れを二つに區別する必要はない。即ち室内音響に就て云ふ場合には隔壁に依つて反射される部分と, 吸収, 透過して失はれる部分との二つに分けて考へればよい。依つて吸収と云ふ言葉を一層廣い意味に用ひて, 音の勢力は隔壁に於て一部反射され他は吸収されとする。

一般に色々な物質の音に對する吸収作用は物質に依つて大に異なるものである。依つて上記の意味に於ける物質の吸収作用を表すに  $a$  を以てし是れを損率<sup>(1)</sup>と名付ける。即ち

$$a = \alpha + t, \quad \text{又} \quad a = 1 - r$$

である。最も完全に音を吸収する隔壁は開放した窓である。開放窓に當つた音は全部外界に逸れ去り室内に復歸する事はない。即ち開放窓の  $a$  は 1 である。厚い毛布類は是れに當つた音の約半分を吸収するからその  $a$  は約 0.50 である。

(1) 損率と云ふ言葉は未だ餘り廣く用ひられて居ない。吸収率, 吸音率等の言葉が用ひられる。



前記のセイビンの残響の式の中の  $A$  は詳しく云へば天井, 壁, 床等の種々な部分の面積  $S_n$  とその部分の損率  $a_n$  との相乗積を寄せ集めたものである。即ち

$$A = a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + \dots$$

である。依つてセイビンは此  $A$  に等價開放窓 (Open window equivalent) なる名稱を與へた。

セイビンの定義に依る残響時間を  $T$  とすれば

$$T = \frac{k \cdot V}{A} \text{ 秒}$$

となり,  $k$  なる常数は  $V$  及び  $S$  を呎單位を以て表せば 0.05 であり, メートル單位を以て表せば 0.162 となる。即ち

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{0.05 V}{A} \text{ 秒 (呎單位)} \\ T &= \frac{0.162 V}{A} \text{ 秒 (メートル單位)} \end{aligned} \right\}$$

となり, 是れセイビンの **残響時間の公式** として頗る著名なもので後に述べる様に残響時間の計算及び色々な物質の損率の測定等に廣く用ひられるものである。茲に上述の通り  $A = \sum aS$  である。

セイビンの此公式は全く實驗の結果から得られたものであるが, 數年後イエーガー (G. Jaeger) は室内に於ける音の擴散の性質に關し, 二の妥當なる假定に基いて理論的計算をなし残響時間の式として是れと全く同じ形の式を誘

出した。イエーガーの得た  $k$  の數値は呎單位にて 0.049, メートル單位にて 0.161 であり, セイビンの實驗的に得たものと極めて良く一致したから, セイビンの式は理論的にも亦確證を與へられた譯である。従つて爾來此式は残響時間の式として廣く使用されたが, 最近ラヂオ放送室の様な多量の吸音材料を用ひて残響時間を短くした場合には此式は嚴密に當嵌らない事が發見され, 斯かる場合にも使用し得る一層精確なる次の様な式がアイリング (C. F. Eyring) に依つて導き出された。

$$T = \frac{0.05V}{-S \log_e (1-\bar{a})} \text{ 秒.}$$

茲に  $V$  は室の容積 (立方呎),  $S$  は表面積 (平方呎),  $\bar{a}$  は各部の損率の平均値である。

#### 68. 残響時間の測定

残響時間測定之音源としては W. C. セイビンを初めとし在來は一般に壓搾空氣でオルガン管を鳴らしたが, 今日では眞空管發振器で擴聲器を鳴らす方が遙に便利であるのでオルガン管は極めて特殊の場合以外には用ひられなくなつた。オルガン管は是れを少し強く吹くと忽ち倍音を含んだ音となるが眞空管發振器に適當な濾波器を併用すれば殆んど上音を含まない純粹の音を得られ, 又音の高さ及び強さを變化する事もオルガン管に比して遙に自由に出来る。良

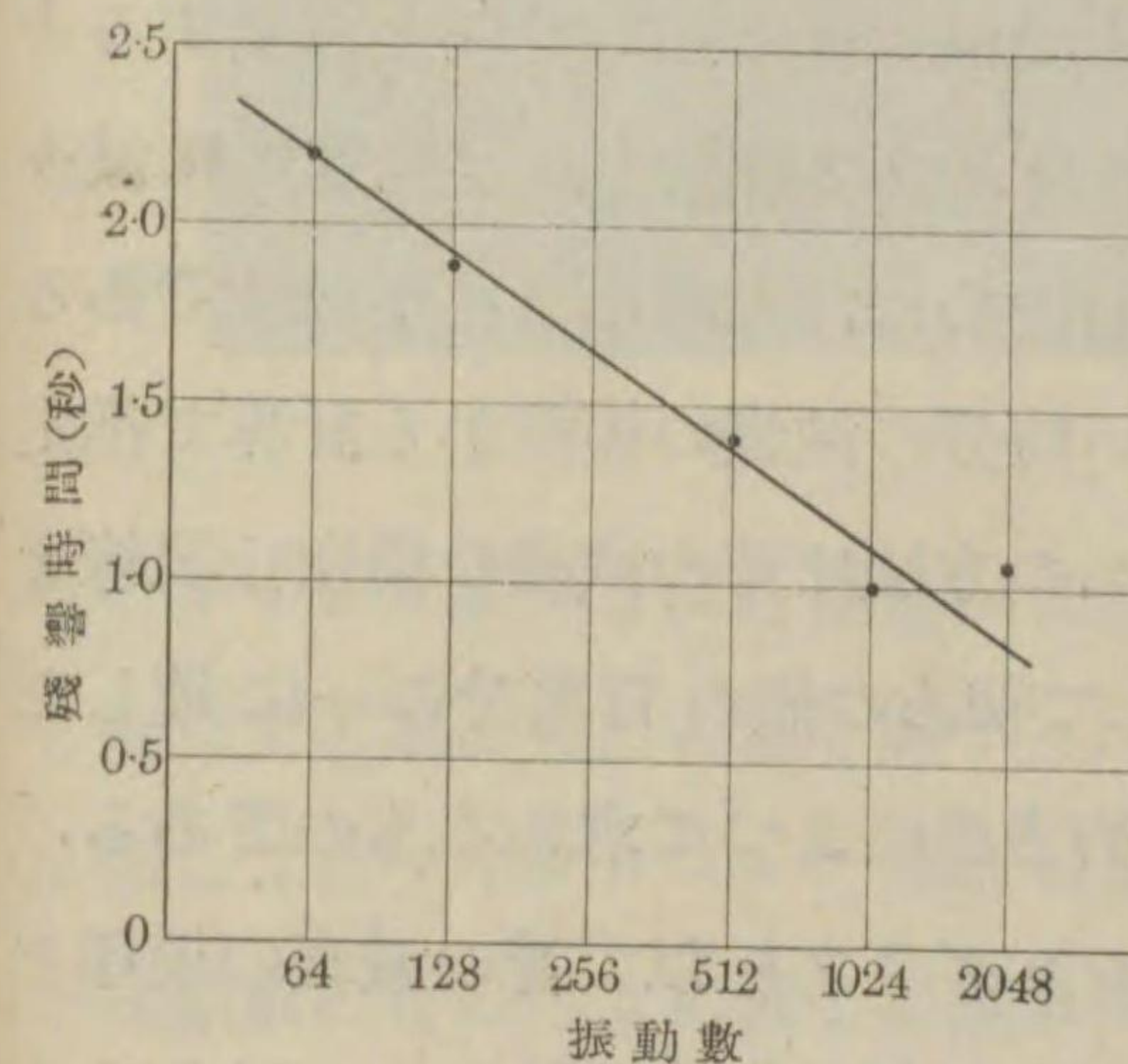
く設計された發振器ならば通常濾波器の必要もない位である。又残響時間の測定には最小可聽界限の強さの百萬倍の音を得る事が必要であるが、擴聲器の出す音の強さは電流の自乗に比例するから百萬倍の音を出すには單に電流を千倍にすればよいので頗る簡單に行はれる。

さて残響時間を測定するには擴聲器を鳴らして可聽界限の百萬倍の音を得、室内各部の音の強さが一定になつた後、急に電流を切つて音を止め、クロノグラフ又はストップ・ウォッチを使用して音が聞えなくなる迄の時間を測定すればよい。但し音の強さが可聽界限に達した瞬間を決定する事はかなり困難であるから残響時間の測定は一回では到底正確なる結果を得る事は六ヶ敷い。是非數回繰り返して行ふ必要がある。又音源や測定者の位置を色々變へて測定を行ふ事も必要である。残響時間の測定は外界の騒音によつて著しく不正確となるから、屢、深夜最も靜寂なる時を利用して行はれる。

残響時間測定の音源として擴聲器を用ひる事の利點は上にも述べたが、猶擴聲器を使用すると音の強さを最小可聽界限の百萬倍にする事を残響時間測定の直前に於て行ふ事を得るから、測定者の心身状態の變化等の影響から免れる事が出来、又可聽界限の測定と残響時間の測定とを同一條件の下に於て行ふ事が出来るから、外界の騒音の影響はオ

ルガン管の場合に比して遙に少い。

以上述べた方法は室の残響時間そのものを目的とする場合は勿論、又後に述べる様に是れに依つて各種の材料の損率を測定する場合にも應用される。



第 71 圖  
東京帝大安田講堂残響時間

第71圖は斯様な方法によつて測定した東京帝國大學大講堂(通稱安田講堂、容積276,000立方呎)の残響時間で、音の高さに依つて残響時間の變化して居る點に注意されたい。

耳とクロノグラフ

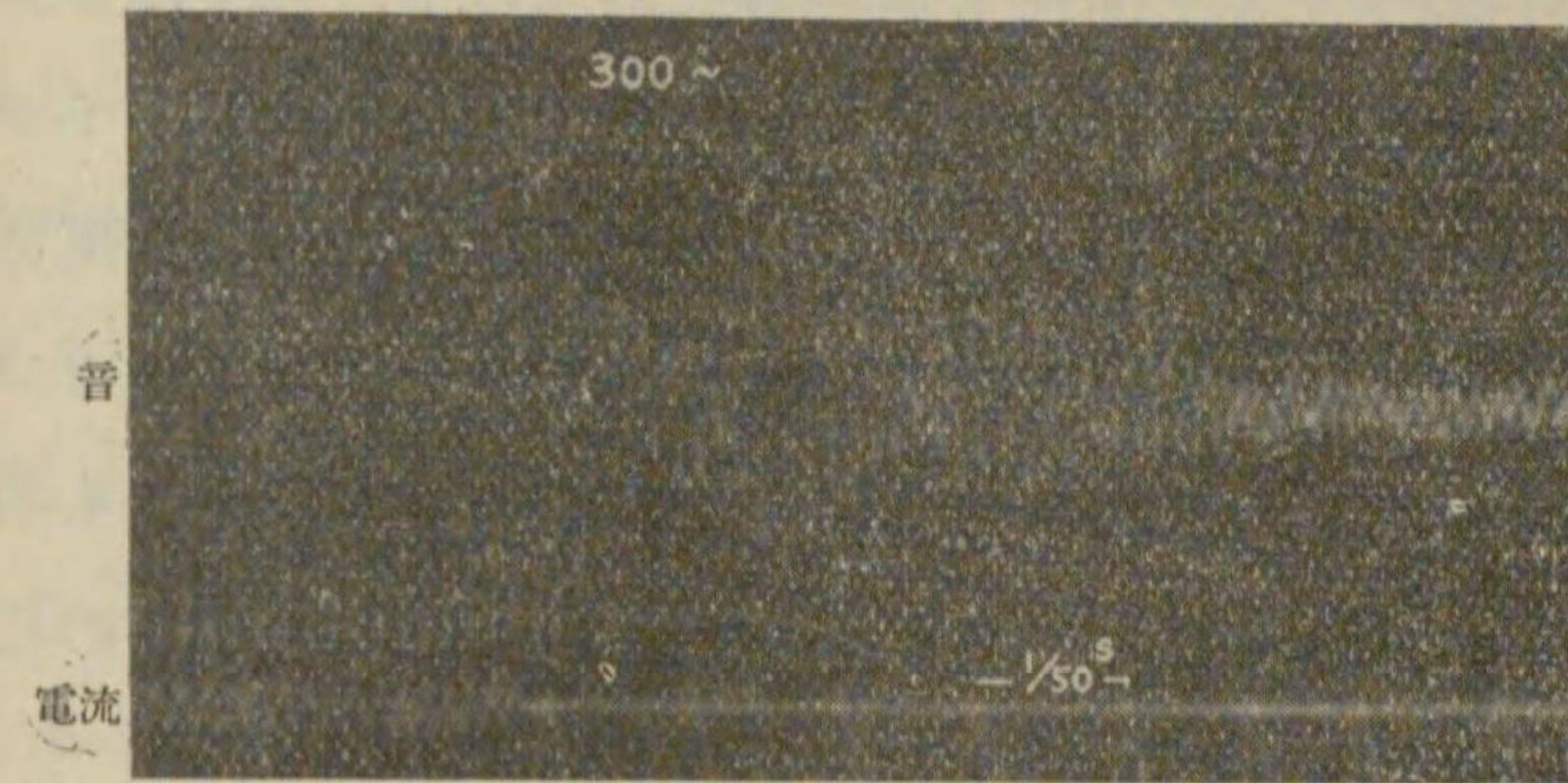
或はストップ・ウォッチを以て残響時間を測定する上記の方法は室が相當に大きく且つ靜かで音の減衰が緩かであり、従つて残響時間の長い場合には相當熟練の後にはかなり一致した結果が得られる。然し曩にも述べた様に音の強さが減衰して可聽界限に達した瞬間を決定する事はかなり困難であり、殊に室に騒音の在る場合、或は残響時間の短い場合には此の方法では到底満足な結果は得られない。依つて是等の困難に打勝つため全然耳を使用せず客觀的に残響時間

の測定を行ふ方法が種々考案されて居る。

其方法の一つは<sup>(1)</sup>マイクروفオンとオッシログラフを用ひて音の減衰の模様を記録し、是れによつて音の強さが最初の百萬分の一に減少する迄の時間、即ちオッシログラフの振幅が最初の  $1/1,000$  に減少する迄の時間を算出する方法である。此場合オッシログラフの振幅が  $1/1,000$  に減少する迄の時間を記録から直ちに測定する事は不可能であるから初めの減衰の著しい時分の減衰の模様から計算で推定するのである。他の一つの方法は音の減衰の模様は記録せず、單に其強さが減衰して初めの値の百萬分の一に達した瞬間を機械的乃至電氣的方法によつて求めるものである。

第一の方法即ちオッシログラフを以て音の減衰の模様を記録する方法は残響時間の客觀的測定方法としては何人も直ちに思ひ付く所であらうが、是れを実施してみると意外の困難に遭遇し此方法の実施も容易でない事に氣付く。四壁に特に吸音材料を使用していない普通の室では原音と四壁から反射される音波との干涉に依つて、音の減衰の模様は第 72 圖に一例を示す様に滑かな對數曲線とならない。從

(1) 耳に依つて残響時間を測定する場合には可聽界限の百萬倍の音から、可聽界限迄減衰する時間を測るのであるが、是れを機械的に行ふ場合には別に可聽界限を固執する必要はない。大體可聽界限の百萬倍の音を使つて、音の強さが最初の値の百萬分の一になる迄の時間を測ればよい、約言すれば 60 db 減衰する時間を求めればよい。



第 72 圖

つてオッシログラムから振幅が初めの  $1/1,000$  になる瞬間を推算する事に大に困難を感じる。依つて通常斯様な測定に際してはマイクروفオン或は音源を廻轉するか、或は單一振動數の音の代りに或る振動數帯内を急に上下する所謂震音 (Warbling tone, Heulton) を使用して、干涉型の現れる事を防ぐ等の方法を講ずるものである。勿論マイクروفオン或は音源を廻轉する場合には是れがために不要の音を發しない様特に注意する必要がある。

上述のオッシログラフを使用する方法は音の減衰の模様を一々記録するのであるから、一測定に多くの時間を要し、従つて多數の材料の損率の測定等度々残響時間の測定をなす場合等には不便である。依つて音の減衰の模様を記録せず、單に其強さが最初の値の百萬分の一に達した瞬間を自動的に記録する方法が種々考案、實施されて居る次第であ

る。それ等の方法は何れも其原理に於ては同一で、音を止めると同時にクロノグラフ或は電氣時計を起動し、マイクロフォンに依つて受けられる音の強さが最初の値の百萬分の一に達すると直接普通の繼電器により或はグリムラムプ又は真空管を含む繼電器を働かして其時刻を記録するものである。所謂残響時間ブリッジとして知られて居るものは此種の器械である。

### 69. 建築材料その他の損率の値

各種の建築材料の損率を測定する方法に就ては第72節

第 11 表 種々なる物質の損率 (振動數 512)

物 質	損 率 $a$
開放窓	1.00
毛製フェルト (厚さ 1 吋, 毎平方呎重量 0.75 封度)	0.58
窓懸け (襜をよせたもの)	0.40
アコースティ・セロテックス (Acousti-celotex) BB: 厚さ $1\frac{15}{16}$ 吋, 毎平方呎 441 孔	0.63
セロテックス (無孔)	0.22
インシュライト (Insulite): 厚さ 1/2 吋	0.31
煉瓦壁	0.032
リノリウム	0.03
硝子	0.027
コンクリート	0.015
大理石	0.01

に詳しく述べる。今日の諸建築に於ては其音響的性質は重要な一因子となり大に注意を惹くに至つたから、室の音響的性質を良好ならしめるに必要な吸音材料は多數製造販賣されて居る。第 11 表にワットソン及び P.E. セイビンの測定による種々なる物質の損率の値 (振動數 512 の音に對する) を掲げる。茲に掲げたアコースティ・セロテックス, セロテックス, インシュライト等は何れも吸音材料として市場に販賣されて居るものである。猶此表に掲げた損率の値は何れも残響時間測定の方法 (第 72 節参照) に依つて得たもので 70 乃至 100 平方呎の大きな試料を音響實驗室の床上に置き測定したものである。

是等損率の値は音の振動數によつて大に異り、一般に低い音に對しては吸音性は著しく減ずるものである。一方に於ては窓懸, 布等にては襜を寄せる事が高音吸収に大いに有効である事が知られて居る。

### 70. 残響時間の最適値

**室の容積と最適残響時間との關係** 講堂, 音樂堂等の残響時間には夫々目的に應じて最も適良なる値がある。残響時間を幾何にしたら最も良い音響効果が得られるかと云ふ問題は講堂或は音樂堂の設計, 改造に最も重要な事項であるから既に多くの學者に依つて研究されて居る。

現在の講堂, 音樂堂等に就て測定した結果によれば, 残響