Y. TANAKA, M.D.: STUDIES ON THE HEARING BY STIMULATION
WITH ALTERNATING CURRENT

交流電氣刺激による聴覚作用の研究

東京大学医学部耳鼻咽喉科学教室 (主任 切替一郎)

医学士 田 中 敬 明
タ ナカ ヨシ アキ

目 次

I 緒 言

II 装置及び実験方法

III 正弦交流波による聴覚作用

- 1) 聴閾値及び痛閾値
- 2) 上下音界
- 3) 音の大きさ
- 4) 音調及び音の大きさに影響する電氣的因子

IV 変調交流波による聴覚作用

V 考 按

- 1) 正弦交流波により2種類の純音を感知することに就て
- 2) 全波整流波により harmonics のみを感知する理由
- 3) 正弦交流, 直流の同時通電により音調が変化する理由
- 4) 変調交流波の電氣聴覚陰性の理由
- 5) 低い周波数, 高い周波数交流による音調の吟味

VI 総 括

VII 結 論

I 緒 言

聴覚が電氣刺激により惹起され得るであろうと云うことは従来多くの人々により考えられ、且つ試みられた。即ち 1800 年 Volta の直流電流による実験に次いで、近年に於ては交流による実験が行われ、Jellinek¹⁾, Perwitzschky²⁾ 等の実験があるが、必ずしも追試者の賛同を得るに至らなかつた。併し Aprapova¹⁾, Volokhov, Gerusuni, Fromm²⁾, Nylén, Zotterman の実験に次いで、本邦では佐藤³⁾の実験発表があり、交流電氣に electrophonic effect (以下電氣聴覚と呼称す)があることが確認されたが、其本態に就ては諸説区々として定説がない、極く最近には Stevens

8,9) 及 Kellaway⁵⁾ の此現象の本態を究明せんとする精細な実験の発表がある。

著者も亦電氣聴覚に就き追試し Stevens 及び其協同研究者の実験結果を確認すると共に、電氣聴覚に於ける鼓膜の意義を探究する爲に、従来実験されて居ない全波整流波、及び変調交流波に就き実験を進め新知見を得、且つ電氣聴覚に於ける音の大きさを正常耳の他に中耳根治手術耳に就ても測定した。以上の事項により電氣刺激による聴覚作用の本態の一斑を窺知することが出来たと信するので、茲に報告する次第である。

II 装置及び実験方法

田中, 小倉, 共著¹²⁾「聴器の交流電氣刺激装置及び実験方法に就て」に記載の如くに行つた。

III 正弦交流波による聴覚作用

1) 聴閾値及び痛閾値

正常耳 11, 根治手術耳 17 に就き 130 μ より 8000 μ に至る範囲で測定した聴閾値及び正常耳 5 に就き測定した痛閾値の平均値のグラフは Fig. 1 の如くである。低い周波数及び高い周波数(可聴周波数内において高, 低の2部分に分け、之を低い周波数, 高い周波数と呼ぶことにする)では聴閾値と痛閾値が接近する傾向がある。又 4,000 μ 以上の高い周波数では正常耳の聴閾値は根治手術耳のそれより大きい。此事は次に述べる如く電氣聴覚による音の大きさが高い周波数では根治手術耳と正常耳とでずれがあり、2,000 μ でくひちがつて居ることと関係がある様に思われる。

正常耳及び根治手術耳の電力聴閾値

m.W. \ $\sim$		130 $\sim$	250 $\sim$	500 $\sim$	1000 $\sim$	2000 $\sim$	4000 $\sim$	8000 $\sim$
正常耳	最大値	0.374	0.274	0.366	0.773	0.844	3.624	3.634
	最小値	0.056	0.021	0.022	0.032	0.056	0.172	0.499
	平均値	0.170	0.108	0.099	0.249	0.313	0.914	1.765
根治手術耳	最大値	0.199	0.780	1.140	1.500	2.170	2.167	3.150
	最小値	0.013	0.004	0.010	0.015	0.024	0.055	0.041
	平均値	0.074	0.120	0.240	0.409	0.515	0.572	0.958

痛 閾 値

m.W. \ $\sim$		130 $\sim$	250 $\sim$	500 $\sim$	1000 $\sim$	2000 $\sim$	4000 $\sim$	8000 $\sim$
最大値		0.69	0.82	1.79	2.44	2.59	5.69	4.97
最小値		0.31	0.48	0.87	1.46	1.46	1.95	3.24
平均値		0.52	0.71	1.38	1.80	2.13	3.08	4.08

Fig. 1

2) 上下音界

20~23 才の 6 人の健康人に就き検査した結果では

i) 上音界は 15,000 $\sim$ 1 例, 14,000 $\sim$ 2 例, 13,000 $\sim$ 3 例である。此附近では閾値は著しく上昇し, 1,000 $\sim$ における平均閾値の数十倍の電力を必要とする。

ii) 下音界は 100 $\sim$ ~ 130 $\sim$ であり, それ以下では頭蓋内振動感が起るが, 音感としては感知せられない。即ち反対側の耳に同じ振動数と思われる音を聞かせても此振動感とは全然性質が異つて居る。又下音界附近では三叉神経, 顔面神経の刺激による感覚及び筋肉の攣縮が音感と同時に起つて来る。

3) 音の大きさ

正常耳及び根治手術耳に就き痛閾値附近の電力により聞える音の大きさを電極を挿入しない側の耳に氣導音を入れて balance させる方法で測つた。正常耳 7, 根治手術耳 8 の平均値は下記の表及び Fig. 2 の如くである。

根治手術耳では音の大きさの動搖範囲が廣いことは手術後の鼓室の肉芽及び上皮形成の如

周波数	130 $\sim$	250 $\sim$	500 $\sim$	1,000 $\sim$	2,000 $\sim$	4,000 $\sim$	8,000 $\sim$
正常耳	19db	23	24	28	18	21	18
根治手術耳		15	22	23	32	31	18以上

何により内耳への電流流入に難易がある為と思われる。又正常耳と根治手術耳により多少音の大きさと周波数との間にずれがあり、根治手術耳では高い周波数に行くに従い2,000 $\sim$ 以上で音の大きさが正常耳より大きくなり、正常耳では低い周波数に於ては根治手術耳より音の大きさを大きく感ずることは注目すべきである。

Fig. 2 電気聴覚による音の大きさ

4) 音調及び音の大きさに影響する電気的因子

音調の決定は主に 500, 1,000, 2,000 $\sim$ に就

て次の如く行つた。即ち電極を入れない側に Otoaudion により発生せしめた気導音をきかせて、被検者に自ら気導音の振動数を調節せしめる方法で行つた。

正弦交流により生起される音には閾値電力より少々大きい電力では2種類の純音即ち小さい交流周波数の音 (fundamental tone) とそれより大きい倍数振動数の音 (harmonics) が含まれて居ることを決定出来る。刺激電力の増大につれて fundamental tone は大きくなるが、harmonics より大きくなる前に痛閾値に達する。

6,000 $\sim$ 以上の高い周波数の交流による音調は気導音と比較する方法によつては決定が困難である。此音調に就ては後述する。

正弦交流を全波整流せる場合の音調は fundamental tone は消失し harmonics のみとなる。此際には刺激電力を増大しても fundamental tone は生じない。即ち全波整流波による音調は正弦交流波による音調に比較して高くなるが、敏感な耳でないと感知せられない程度の音調のすれである。

正弦交流と直流を同時通電せる場合の音調は正弦交流を一定に保つ時は直流電圧の増大につれて fundamental tone が増大するが、harmonics は影響を受けない。即ち直流及び交流の同時通電による音調は交流のみの場合に比較して低くなる。例えば1,000 $\sim$ の正弦交流を通電せる状態で交流電圧より大きい直流電圧を加印すると聞えて居た2,000 $\sim$ の音より大きい1,000 $\sim$ の音加わつて来る。併し8,000 $\sim$ 以上の高い周波数では此音調のすれは感知し難い。以上の実験成績は交流に直

流を加えて同時に通電すると音調が変化するという Stevens の主張を肯定するものであるが、Kellaway は反対して居る。本実験では音楽家を被験者として音調がずれることを確認した。

IV 振幅変調交流波による聴覚作用

濾波器を使用せざる場合の変調交流波は其波形が非対称性であり、其電気聴覚の音調は正弦交流波によるものと同じである。搬送波の電圧と之を変調せしめる交流の電圧に應じて変調器を適宜に調節し、且つ濾波器を使用して波形を対称的にすると電気聴覚は起らなくなる。此際に波形の対称性の吟味は陰極線オシログラフで見ると他に電話受話器で発生する音の大きさによつて知ることが出来る。波形が対称的となるにつれて電話受話器の音が小さくなり、且つ電気聴覚の聴覚値が増大して行き、遂に痛閾値に達しても聴覚が起らない。

V 考 按

- 1) 正弦交流により2種の純音を感知することに就て
- i) 鼓膜及び鼓室の形成する condenser microphone に就て

Fig. 3

鼓膜及び鼓室壁を Fig. 3 の如く模型化して考え、且つ PT 間に加印される電圧が $V_0 \sin \omega t$ とすれば、T なる振動板の受ける力 F は

$$F = \frac{SK}{8\pi} \left(\frac{V_0 \sin \omega t}{d} \right)^2 = \frac{SKV_0^2}{16\pi d} (1 - \cos 2\omega t)$$

従つて

$$F \propto V_0^2 \cos 2\omega t$$

$$\omega = 2\pi f$$

K: 電媒定数

斯くて交流の周波数を f とすれば、鼓膜は $2f$ なる振動数の外力を受けることにより、交流周波数の 2 倍振動数の音を聞くことになる。

即ち電気エネルギーは condenser microphone の理論により square law に従つて機械的エネルギーに変換されて居る。

Stevens 及び其協同研究者は電気聴覚に因る音と、反対側の耳に入れた氣導音との間に唸りを生ぜしめ前者の音の振動数を測定し、frequency doubling effect を認めて居るが、此際の交流周波数範囲に就ては記載が無い。本実験の結果は低い周波数交流では Stevens の報告と一致するが、高い周波数となるに従い此の effect は不明瞭となり、他の拠点(後述)に依れば 8000 ㄱ 以上では square law に従う電気エネルギー部分は著しく小さくなることを推察せしめる。

ii) electromechanical transducer としての内耳機能に就て

fundamental tone は交流が直接に内耳を刺激して生ずる音感の様に推定される。何故なら中耳根治手術耳では1種類の fundamental tone のみを感知する。又正常耳では交流に加えて直流を同時に通電すると音調が低下するが、根治手術耳では音調は直流の影響を受けない。即ち内耳に於ては linear law に従う機構により聴覚が惹起されて居る。此際の内耳の電流の出入路としては前庭窓或は蝸牛窓は蝸牛骨包に比し電気抵抗が少ないと思われる。即ち cochlear microphonic effect に於て内耳より起る電位変動は蝸牛窓から導かれた時に著明に記録出来る。内耳直接の刺激にもとづく電気聴覚は丁度 cochlear microphonic effect の逆効果であり、之等の electromechanical な現象が可逆性であることを推定せしめる。

此様な内耳機能が如何なる機構によるもの

であるかに就ては次の3説がある。

① the "fluid microphone" suggestion (溶液が圧力を受ける時に其長軸に沿つて電位差が生ずる)。

② the "sensory cell" hypothesis (コルチ器官の "sensory cell" に歪みを生じてピエゾ電気が起る)。

③ the "membrane" hypothesis (ライスネル膜に極性があり、此膜が振動すると電位の変動を生ずる)。

以上の3説であるが、其何れの説にも未だ基礎づけとなる確証がない。

iii) 電気聴覚の閾値を表す電気単位に就て
電気的エネルギーが機械的エネルギーに変換された其量を $m.W.$ で表すのが理想的であるが、之を測定することは不可能である。人体の電気抵抗及び力率は交流周波数により変化するものであり、且つ電圧単位では linear law に従う部分を表すに不適であり、電流単位では square law に従う部分を表せない。結局頭蓋を電流が通過する時に消費される電気エネルギーを電力単位で表すのがよいと考えられる。

2) 全波整流する時には harmonics のみが聴える理由

正弦交流 ($V_0 \sin \omega t$) の全波整流波を調和分解すれば

$$V = \frac{2V_0}{\pi} - \frac{4V_0}{\pi} \left(\frac{1}{3} \cos 2\omega t + \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \dots + \frac{1}{4n^2 - 1} \cos 2n\omega t \right)$$

となるから内耳が linear law に従つて刺激されるとすれば、harmonics が惹起される。此事は次の事実からも確認される。根治手術耳を初めに正弦交流により刺激し、次に全波整流に切り替えると被験者は音調が明瞭に高くなつたと云う。正常耳で同様な実験を行うと敏感な被験者でないと音調の変化は殆ど感知

せられない。此事実により鼓膜の存在は電気刺激による聴覚作用の上にも意義を持つて居ると考えることが出来る。鼓膜の振動が square law に従つて起つて居るとすれば、電波整流を行つても其振動数に変化が起らないのは当然である。

3) 正弦交流と直流を同時に通電することにより音調及び音の大きさが変化する理由

此場合にも鼓膜に働く力 F は square law に従い電圧の2乗に比例するから

$$F \propto (V_{11} + V_0 \sin \omega t)^2 \quad V_{11}: \text{直流電圧}$$

$$F \propto V_{11}^2 + \frac{1}{2} V_0^2 + 2V_{11}V_0 \sin \omega t - \frac{1}{2} V_0^2 \cos 2\omega t$$

$$V_{11} \gg V_0 \text{ とすれば } -V_{11}V_0 \sin \omega t \text{ に比して}$$

$$\frac{1}{2} V_0^2 \cos 2\omega t \text{ は省略し得るから}$$

$$F \propto V_{11}V_0 \sin \omega t$$

従つて鼓膜は交流周波数と等しい振動数で直流電圧に比例する外力を受けることになる。故に直流電圧に比例して増大する音が聞えるわけである。此直流の作用が以上の様なものでなく聴神経の興奮性を高めるのでないかと云う考えでは直流を通じた際に起る音調のずれを説明することが出来ない。

4) 変調交流によつて電気聴覚の起らざる理由

変調交流の波形が対称的で歪みなく、之を受話器に導いても音の発生しない場合には

$$V = V_0(1 + k \sin \beta t) \sin \omega t$$

$$\beta = 2\pi f_1 \quad f_1: \text{変調波周波数}$$

$$\omega = 2\pi f_2 \quad f_2: \text{搬送波周波数}$$

又力が電圧の2乗に比例し f_2 が上音界を超越した高い周波数である爲に $\sin \omega t$ は刺激にならぬから省略すれば

$$F \propto kV_0 \sin \beta t$$

従つて鼓膜を動かすに必要な電圧が鼓膜と鼓室壁の間に加印されるならば、変調波周波数

に等しい音が聞える様に考えられるが、事実は何の音感も起らない。其理由は小倉¹⁾の実験によれば、インピーダンスが周波数の増大につれて減少し、且つ中耳根治手術耳、正常耳のインピーダンスの差が小さくなり、40,000 $\sim$ 以上では殆ど等しくなることに求められる。即ち40,000 $\sim$ の交流を搬送波とする変調波では鼓膜及び鼓室小骨の有無によつてはインピーダンスに大小を生じない。即ち鼓室壁と鼓膜の間には電圧は殆ど加印されて居ないと考えることが出来る。従つて鼓膜は振動しない。

内耳刺激としては搬送波のみが問題となるが、上音界を超越した40,000 $\sim$ である爲に電氣聴覚を起さないのが当然と考えられる。

非対称的な歪んだ波形では $V_0(1+k\sin\beta t)\sin\omega t$ の他に $V_0\sin\beta t$ なる正弦交流が混入して居る爲に之による電氣聴覚が起つて居るものと考えることが出来る。

5) 低い周波数及び高い周波数交流による音調の吟味

square law 及び正常耳と中耳根治手術耳のインピーダンスと周波数との関係を拠点として考えれば、低い周波数程鼓膜を振動せしめ易く、高い周波数(8,000 $\sim$ 以上)は鼓膜を振動せしめ難くなる筈である。此事は正常耳で感ずる音の大きさは低い周波数の交流では、中耳根治手術耳のそれより大きい事実と関係がある様に思われる。

高い周波数の交流では鼓膜振動は微弱となるが、内耳直接刺激のlinear law に従う電氣エネルギー部分が大きくなり、音感が生ずる。此事は次の事実から推定出来る。即ち

① 高い周波数となるに従い根治手術耳で感じ得る音の大きさは正常耳より大となる。

② 8,000 $\sim$ 以上の高い周波数では直流を断続しても音調及び音の大きさの変化が著明に起らない。

③ 直流と交流を同時に通電しても上音界が

上昇しない。

④ 8,000 $\sim$ で電氣聴覚の起る人でも之を全波整流して刺激すれば電氣聴覚が起らない。若し8,000 $\sim$ の交流でもsquare lawが支配するとすれば、全波整流によつても同じ音を聞く筈である。即ち8,000 $\sim$ の音を聞いて居たのが、電波整流によつて16,000 $\sim$ 以上に變化した爲に音感を生じなくなつたと考えることが出来る。高い周波数になると其harmonicsは聴器の周波数特性から考えて、より微弱にしか感ぜられないから、harmonicsが聞えないでも鼓膜が振動しないと云う証拠にはならないと云う考えに対しては③及び④が反対の拠点となる。

⑤ 小倉¹⁾は高い周波数になると内耳電流が流入し易くなると云うことを推定せしめる事実を述べて居る。即ち前庭窓の部分に蠟を氣密に充填し得た根治手術耳では充填前に聞えて居た130 $\sim$ 500 $\sim$ が聞えなくなるが、高い周波数交流では影響がない。

VI 總 括

1) 正弦交流により正常耳では100~13,000 $\sim$ の範囲内で電氣聴覚が起る。

2) 鼓膜及び鼓室小骨の欠損せる根治手術耳でも内耳が障害されて居ない時には電氣聴覚が起る。

3) 此際の電氣聴覚としての音の最大の大きさは正常耳では10~40 db(感覚單位)であり、根治手術耳では5~60 dbであり、2,000 $\sim$ 以上では根治手術耳の感じ得る音の大きさは正常耳のそれより大となる傾向がある。

4) 正弦交流による電氣聴覚では正常耳にはfrequency doubling effectが認められるが、根治手術耳では認められない。

5) frequency doubling effectは高い周波数となるにつれて弱くなる。

6) 全波整流波による電氣聴覚では正常耳、

根治手術耳ともに harmonics のみとなる。

7) 正弦交流と直流を同時に通電することにより frequency doubling effect が弱くなる。

8) $4,000 \text{ } \omega$ を搬送波とする 振幅変調交流では波形が対称的の時には電氣聴覚が起らない。

9) 4) 5) 6) 7) 8) により 正弦交流により低い周波数では鼓膜が振動すると思われる。

VI 結 論

電氣聴覚 (electrophonic effect) は電氣エネルギーが一部は square law に従つて鼓膜を振動せしめ、一部は内耳に於て linear law に従う機構により機械的エネルギーに変換せられて惹起される electromechanical な現象である。

本実験の着手を快諾せられ、且つ推進せられたる東大生理学教室勝木保次、時実利彦両先生及び電氣的理論及び技術の御指導を賜りたる物理学教室本多侃士教授、玉川元助手に深謝す。

主要文献

1) *Arapova, Gerusuni, and Volokhov*: A. Further Analysis of the Action of Alternating Currents on the Auditory Apparatus.

J. of Physiol. 89, 122, 1937.

2) *Fromm, Nylen, and Zotterman*: Electric Stimulation of the Cochlea. J. of Physiol. 80, 3, 1934.

3) *Hallpike and Rawdon-Smith*: The Wever and Bray Phenomenon. A Summary of the Data concerning the Origin of the Cochlear Effect. Laryngoscope, 976, 1937.

4) *Jellinek, and Scheiver*: Eine neue Methode des Hörens. Wiener Kl. Wschr. 43, 417, 1930.

5) *Kellaway*: The Mechanism of the Electrophonic Effect. J. of Neurophysiology. 9, 23, 1946.

6) *Perwitschky*: Eine neue Theorie und Methode des Hörens. Zschr. f. H. u. Oheilk. 26, 477, 1930.

7) 佐藤: 電氣刺激に因る聴覚に関する研究 (第1報) (第2報) 日耳鼻, 46, 831, 及 1614, 1940.

8) *Stevens*: On Hearing by Electrical Stimulation. J.A.S.A. 8, 191, 1937.

9) *Jones, Stevens, and Lurie*: Three Mechanisms of Hearing by Electrical Stimulation. J.A.S.A. 12, 281, 1940.

10) 切替, 田中, 小倉: 交流電氣刺激による聴覚作用の研究 (第1報) (第2報) 日耳鼻, 51, 291, 1948, 及 52, 28, 1949.

11) 小倉: 日耳鼻, 53, 1950.

12) 田中, 小倉: 聴器の交流電氣刺激装置及び實驗方法に就て. 日耳鼻, 53, 216, 1950.

(原稿到着=昭和24.12.20)