論 説

電氣的構音器官模型 electrical vocal tract analog について

広戸幾一郎・平野 実・宮城 平
吉田義一*・中島 亨**

On the Electrical Vocal Tract Analog

Ikuichiro Hiroto, Minoru Hirano, Taira Miyagi
Yoshikazu Yoshida* Toru Nakazima**

*Department of Otolaryngology, Kurume University and **Kyushu Industrial College

On the purpose of studying the relationship between the articulatory configuration and speech sound radiated, an electrical analog of human vocal tract and its control system were designed and constructed. The analog circuit of vocal tract is similar to that designed previously by K. N. Stevens, which is a lumped-constant network consisted of thirty-five pi-four terminal sections. Each section represents 0.5cm length of the vocal tract and is adjustable to simulate the range of cross sectional areas from 0.174 to 17.6cm².

The idealized vocal tract configurations for vowel production might be represented as a function of three parameters, i. e. the effective radius or the cross sectional dimensions of the tube at the point of greatest constriction in the vocal tract, the distance of that point from the glottis, and the ratio of the area of the mouth opening to the length of the mouth opening. In the present studies the effects upon the acoustical characteristic of the sounds were discussed in some of simplest ways. Synthesis of consonants were also done though satisfactory sounds were not yet obtained.

1. 緒 言

音声の研究は、音声そのものを対象とする音声学的研究と、音声がいかにして発せられるか、その機構を対象とする音声生理学的研究とに大きく分けることができよう。sonagraph による音声の分析は勿論前者に属するものであり、構音器官のレ線学的観察、共鳴腔各部の気圧測定、発音ならびに構音器官諸筋の筋電図学的研究などは後者に属する研究である。ここに紹介しようとする構音器官模型 vocal tract analog による研究も、厳密には後者の音声生理学的研究に含まれるべきものであろう。構音器官模型には、機械的構音器官模型 mechanical vocal tract analog と呼ぶべきものと、電氣的構音器官模型 electrical vocal tract analog との二つがある。母音構成に関する機械的模型に関する研究は、古くは18世紀末、von Kempelen, C.G. Katzenstein 等によつてなされ、最近では苦瓜の研究がある。電氣的構音器官模型に関しては、T. Chiba, M. Kajiyama (1941) の発声時の声道形態のレ線学的計測と母音形成に関する理論 (The vowel, its nature and structure) や H.K. Dunn

* 久留米大学耳鼻咽喉科教室 (主任: 広戸幾一郎教授)

** 九州工業大学物理学教室

(1950)の研究(The calculation of vowel resonance and an electrical vocal tract), C.G.M. Fant (1950-)の音声生成に関する音響学的考察(Acoustic theory of speech production)などを基礎として、電気的等価回路の方法を適用することによつて、複雑な音声の生成が理論的にも実験的にも可能となり、この面における飛躍的進歩をもたらして来ている。

私共は、K.N. Stevens, S. Kasowski, C.G.M. Fant によつて設計された電気的構音器官模型を参考として、之に無声有声両子音音節構成のために独自の電気的制御回路を附加し、又 vocal tract の任意の場所より其処までで修飾せられた音声の自由に取り出せるような terminal を附した電気的構音器官模型を作成した。この研究はまだその緒についたばかりであるが、今迄に獲られた成績を若干加えて、electrical vocal tract analog (E.V.T.A. と略称)なるものについての概説を試みることとする。

2. 音声発生機構の電気系への等価

人間の音声の電気的に合成再現する方法は、大別すると三通りある。その一は、音声の音響学的構造が大凡解つている場合に、必要な強調周波数帯域(formant)に共振する電気回路、即ち filter をいくつか直列あるいは並列に接続し、これに適当な原音を通じ、各 filter を通つて出て来る音を混じて目的とする音声を得る方法で、terminal analog type と呼ばれる。

其の二は、発声時の附属共鳴腔、即ち vocal tract の形態が解つている場合、vocal tract なる音響管を電気回路に置き換える。即ち、H.K. Dunn, K.N. Stevens, L.O. Schott, C.G.M. Fant, G. Rosen 等のごとく、声道をコイル L 、コンデンサー C の梯子回路で等価して vocal tract analog を作ることができる。この電気回路を予めある特定の音声が出るように設定しておくものを static analog type という。この電気回路は制御電圧によつて自動的に変化させることもできるので、かかるものを dynamic analog type と呼ぶ。私共の試作したものは static type の electrical vocal tract analog である。

人の音声は、肺の空気が気管を通つて、4～5 cm 水柱の圧で声門を通過する時、声帯の振動を惹起して原音を生じる。換言すると、気管からの空気流量(体積速度——単位時間当りの空気通過量)は声門において周期的な変化をうけることになる。他方、声道(附属共鳴腔)は発声すべき母音の種類に応じて、舌の形、開口の度合などによつて全体の形、即ち、各部分の断面積が変化せられている。声門において作られた原音は声道を通過する際に種々修飾(共鳴)せられて音声(ここでは母音を対象としている)となる訳である。

一般に、音響系、機械系、熱系、化学系、電気系などの問題を取り扱う場合、各系における量的関係が、

例えば、弾性体の伸びと張力の関係(Hookeの法則)、電圧と電流の関係(Ohmの法則)のごとく linear の場合には、各系で適当な量を選べば、二系間における量的関係は相互に対応させることが可能である。電気系における解析結果は極めて豊富であるので他系における関係を電気系に等価すれば、種々の条件の変化した場合の結果も極めて簡単に獲られて便利な訳である。電気的構音器官模型もこの理に拠つたもので、声道という音響管を電気回路に等価し、機械的微細変化を電気的に再現して研究しようとするものに他ならない。

今、断面積 S 、長さ l なる円筒を一つの音響系と考え、これを電気回路で等価する場合、音響系における音圧を電気系における電圧に、体積速度を電流に、音響インピーダンスを電気抵抗に対応せしめると、第一図に示すごとく、円筒は inductance L と capacitance C によつて構成される四端子回路で等価的にあらわされることになる。この場合、音響管内を伝播する音波の速度に比して管の大きさが充分小さいという条件が必要であるが、4000 cps の音を例にとると、声道の断面はこれを円と考えると最大直径4 cm程度のものであ

第 1 図
円筒(音響管)とその電気的等価回路

C : Capacitance

L : Inductance

第 2 図

声道の形態の簡易化とその電氣的等価

る。今、音速を $3.53 \times 10^4 \text{ cm/sec}$ とすると、4000cps の時の波長は約 8.8cm であり、上述条件は十分に満足さ

れることになる。又、このような場合には、音波は平面波として取り扱えるし、道が曲つていること、声道各部の断面積が円から外れて色々な形をとっていることなどは無視しても、音声の本質的性質を論ずる上に大きな誤は生じない。

人の声道は屈曲し、又複雑な形をしているが、これを直線的にし、又各部の断面を同一面積の円形に直し、又断面積は連続的に変化しているけれども、これを階段的に変化するものとする、声道は種々の断面積をもつた円筒の連続と見做すことができる（第2図）。実際には声門より口唇の端までの距離を 17.5cm とし、これを 35 割に区分する。即ち、長さ 0.5cm の円筒の連続とする訳である。0.5cm なる長さは、4300cps の音波の波長の約 $1/16$ に相当しており、声道を連続的に変化する管でなく、0.5cm 毎に階段的に変化する管と見做しても誤差は無視し得る位小さいものである。即ち、35 割の四端子回路の連続によつて、人の声道に近似の音響管が電気系として得られる訳である。これが electrical vocal tract analog である。

3. 我々の試作した電氣的構音器官模型

K.N. Stevens 等が作っている E.V.T.A. は上述のごとく、声道を 35 等分し、各部は 11 通りに断面積が変化し得るようにし（第 1 表）、これを 35 割の π 型四端子

第 1 表

電氣的構音器官模型の断面積、インダクタンスおよびキャパシタンス

SWITCH POSITION	S IN CM ²	L MH	$\frac{1}{2} C^1$ MICROFARAD
1	0.17	37.0	0.00273
2	0.30	21.5	0.00463
3	0.60	10.9	0.00885
4	0.79	8.5	0.0118
5	0.96	6.6	0.0150
6	1.44	4.4	0.0223
7	3.02	2.1	0.0446
8	6.65	0.96	0.104
9	7.74	0.82	0.121
10	9.90	0.64	0.154
11	17.60	0.36	0.276

の継続接続とし、各四端子には適当な loss を与えるようにしたものである。我々も、声道等価回路としてはこれを殆どそのまま利用した。母音発声時には、声

道のどこかに狭窄部が出来ているのであるが、E.V.T.A. においては、声門より口唇までを 0.5cm 間隔で区切り、各部分の断面積を 17.6 cm^2 より 0.17 cm^2 まで 11 通りに変化させて生じる音声をしらべることができる。この組み合わせで出し得る音の数は 11^{35} と云うことになり、生理的に認め得る正常ならびに病的構音機構は勿論、実際にはあり得ない構音状態をも現出することができる訳である。特に我々が創意した点は、

1) 喉頭原音に相当する鋸歯状波発振器の基本周波数を可変とし、かつ 10000cps における減衰率を -20 db より -42 db まで変化できるようにした。従つて、男声を模した低い声も、女声を模した高い声も出し得る訳であるし、又、母音 formant よりも高い基本周波数の音も出すことができる訳であつて、母音形成の研究に便利である。

2) vocal tract 等価回路の任意の部位から音声を誘導できるようにした。即ち、原音が声門で生じてから口より発せられるまでにいかに修飾されて行くかを検討することが出来る訳である。

音響管として、一端が閉じて他端が開放されている一様な断面積をもつ円筒を取り上げてみると、この管の振動形態は第 3 図に示すごとく、管の長さ l を $1/4$

第 3 図
閉管における振動形態

波長とする基本振動 $f_1 = c/4l$ (c は音速) とその奇数倍の倍振動 $f_n = (2n-1) \cdot f_1$ が存在する。声道はこのような単純な管ではないけれども、各母音の formant の位置が構音器官の形といかように結合するかを考える場合には或程度参考にはなる。母音の第 1 formant を声道全体の共振、即ち第 1 振動形式によると考えると、第 2 formant は第 3 図の円筒においては 3 倍の周波数となる訳である。母音イの場合のように声道の狭窄部位が前方にあれば、第 2 振動形式の節の近くが狭くなる為に第 2 formant は高く現れ、母音ア、ウの場合のように舌が後退して狭窄部が後方に位置する時には、第 2 振動形式の腹の部分が狭められるため第 2 formant は低く現れる。このように考えることもできる。E.V.T.A. の任意の部より 音声を誘導して検討すれば、構音器官の形態と共振周波数帯域との関係——formant 形成の問題を検討することも可能であろう。

3) 子音音節も合成できるようにした。無声子音音節の場合には、white noise を子音の構音部位に相当する濾波回路より導入し、続いて後続母音用鋸歯状波を等価回路に導入して合成する。有声子音音節の場合には、low pitch の先行波用鋸歯状波を等価回路に導入した後、white noise を鋸歯状波の pitch にのせて子音の構音部位に相当する濾波回路より入れ、続いて母音用鋸歯状波を等価回路に導入して合成するのである。これらの子音音節合成のためのすべての発振は、最初のボタンで自動的に行なわれるようにしている。

日本語子音音節の構造に関しては、釜本の sonagram による分析成績があるので、これを参考とし、先行波あるいは雑音波継続時間を夫々 300~1 msec の間で選択できるようにした。先行波、母音波の継続時間制御

第 4 図
gate signal 模型図
(点線は補正された gate signal)

は univibrator によつて作られる単発矩形波の持続時間によることとし、これを各波の gate (二極管を用いた振巾選択形式) の開閉信号として利用した。第 4 図は、無声子音音節、有声子音音節の時間制御の gate 開閉、pulse の生成過程を示している。又、第 5 図は、全制御系および先行波、母音波の電流電圧源をまとめた block diagram である。

上述のごとき我々の試作した E.V.T.A. によつて合成されるべき子音音節をシェーマで示すと、第 6 図のごときが予想される。この場合、無声子音音節の合成については比較的問題は少ないが、有声子音音節については問題が少くない。まず先行波の pitch であるが、これは sonagram の分析によると後続母音より低いことがわかつている。例えば、或る人の発声 za, zu, ze を例にとると、先行波の pitch は夫々 120 cps, 133 cps, 120 cps であるが、母音波の pitch は夫々 186 cps, 186 cps, 173 cps を示している。従つて、E.V.T.A. における先行波電流は、その周波数を母音波の周波数の 50~80% にとりうるように設計した。又、その周波数分布は確実な資料が少いため、一応 low pass filter の特

第 5 図
制御系の block diagram

性を変化させて適当な濁音性をもてるようにした。有声子音を形成するためには、雑音に周期性をもたせなければいけないので、雑音継続用 univibrator の出力矩形波を適当な pitch で変調して periodic noise とした。

有声子音音節の構成が、先行波 + 有声子音波 + 移行部 + 母音波よりなっていることは Sonagram の成績よりわかっているが、技術的には移行部を作ることは極めて難しい。しかし、この点に関しては、頸部食道癌で laryngopharyngoesophagectomy を行なつて、まだ二次的食道造成の施行されていない患者について、第7図

のごとき状態で人工喉頭を使用させた実験がある。この状態では構音器官は何等障害を受けない訳であるから、単に喉頭(声帯)が人工喉頭(笛)に代つたと云うだけで、患者の語音発声は略正常に近いと考えてよい。事実、明瞭度は極めて良く、又語音そのものも自然性が保持せられていたが、日を変えて録音した音声の sonagram に、第8図に示すごときものを見出しているのである。即ち、先行波がない時には移行部が著明であり、移行部がない時には先行波が強力であるということである。換言すれば、先行波が充分強力であれば移行部はなくとも有声子音音節の明瞭度、自然度

第 6 図
子音々節構成模型図

第 7 図
喉頭・下咽頭・頸部食道全摘出患者における人工喉頭使用実験

第 8 図

人工喉頭を使用し
て発せられた有声
子音々節。
上段は先行波がな
く移行部著明。
下段は先行波が顕
著で移行部殆ど欠
如しているもの。

第 9 図

子音々節の Sonagram (左は人声, 右は
電氣的構音器官模型より発せられた音)

には変化がないということである。我々の E.V.T.A. での有声子音音節の構成はこの事実に立脚しているのである。

ところで、問題がこれで片附いた訳ではない。試作 E.V.T.A. は static analog type であつて、声道各部における断面積は予め set しなければならない。もし、母音発生時の構音状態に模して set すれば、子音発声の構音状態は極めて不自然にならざるを得ない。現段階では、母音の foemant は略確定されており、子音の夫については不明確であるが、当然子音にも formant 類似的の強調周波数帯域——特有構音状態がある筈であるから、厳密には声道等価回路としては 2 channels が必要である。現在の 1 channel のみでは、母音と子音の構音構造が似ている si, su, zi, zu, 程度の子音音節しか合成は難しいと考えられる。第9図は、試作 E. V.T.A. によつて合成せられた“si”と“zi”の sonagram である。自然性においては勿論不充分であるが、明瞭度が比較的良好にことに期待が持てる。sonagram 上における子音波の formant 構成分が母音波のそれに類似していること、又、雑音（無声子音波）の持続時間は摩擦音に属する場合でも、立ち上りを急激にすると破裂音ように聞えることなど、今後このような合成面からの語音の研究に示唆を与えるものが多いが、之についてはここでは触れないこととする。

4. E.V.T.A. による母音 formant に関する実験

前述したごとく、E.V.T.A. は11段階に断面積を変え得る35コの円筒の連続である。その組み合わせは11の35乗で、組み合わせのすべての音について検討するとすれば、一つの音に10分間要するとして30兆年以上を要することになる。しかし、幸いに、K.N. Stevens が american vowels について Kajiyama らのレ線学的成績を参考にして各部の断面積を報告している。我々は、この Stevens の成績を参考にして音を発生させ、これを tape recorder に録音した後、人の声と比較して、最も明瞭度が良く、かつ自然度のあるものを選び、これによつて各断面積を決定した。第10図は、かくして得た五母音の声道断面積の分布を示している。

母音 formant を決定するものは声道の形であることはいうまでもない。特に、舌の隆起によつて生じる狭

第 10 図

5 母音発生時の電氣的構音器官模型の声道断面積模型図

窄部の位置、その大きさ、および口唇部の広さが五母音部それぞれに最も特長的である。この3因子を E. V.T.A. にあてはめると、1) 声門より狭窄部までの距離 d_0 、2) 狭窄部の円筒の半径 r_0 、3) 開口部の断面積に対する長さの比 S/l (これは音響管より空中へ音が放出される時の抵抗 radiation impedance に比例する) 以上の3になる。

これらの各因子が母音 formant の形成にいかに関与しているかを検討することとし、先づ声門より狭窄部までの距離 d_0 の影響についてみてみる。長さ 17.5cm, 断面積 17cm² の円筒に、長さ 1.5cm, 断面積 1.6cm² の狭窄部を作り、これを声門より口唇部に向つて 0.5cm 宛漸次ずらせて行き、それぞれの場合の音声を録音して、sonagraph で分析して formant の変動をしらべてみた。第11図は、このようにして得られた音の sonagram を連続して並べたもので、横軸の数値は声門から狭窄部の中央までの距離を示している。これによると、第一 formant は狭窄部の位置が声門より遠去かるに従つて低くなる。第二 formant は、或る範囲内では、狭窄部と声門との距離が大きい程高くなるが、或る点（この場合は 12.5cm）を越してそれ以上遠去かると低くなる。

次に、狭窄部の半径について検討するが、便宜上、比較的声門に近い場所 (A点)、声道の略中央 (B点)、比較的口唇部に近い場所 (C点) の三カ所における変動をみてみる。長さ 17.5cm, 半径 2.3cm (断面積 17cm²) の円筒の上述 A, B, C 各点に順次、長さ 1.5cm の狭

第 11 図

狭窄部の位置が formants に及ぼす影響

第 12 図

狭窄部の半径が formants に及ぼす影響

- A : 狭窄部が比較的声門に近い場合
 B : 狭窄部が声道の略中央にある場合
 C : 狭窄部が比較的口唇部に近い場合

第 13 図

開口部（口唇部）の形態が
formants に及ぼす影響

窄部を作り、狭窄の半径を1.9cmより0.71cmの間の5段階に変化させ、それぞれの場合の音を録音し、sonagraphで分析する。第12図は、A, B, Cの各点における狭窄部半径の変化時のsonagramを連続して並べたもので、横軸の数値は狭窄の半径を示している。これによると、第一formantは狭窄部の位置に関係なく、狭窄の程度が強い程低くなる。第二formantは、狭窄

部が声門に近い場合には狭窄の程度が強い程低くなるが、狭窄部が声道の中央にある時には狭窄の程度によつては殆ど影響を受けない。狭窄部が口唇部に近く位置すると、第二formantは狭窄の程度が強くなるに従つて高くなり、後には不明瞭となる。

最後に、開口部の断面積に対する長さの比について検討してみる。開口部の長さを0.5cmに一定しておいて、断面積を17cm²から0.17cm²まで11段階に亘つて変化させ、おのおの場合の音を録音し、分析した。第13図は、そのSonagramを連続して並べたもので、横軸の数値は開口部の断面積と長さの比を示している。これによると、開口部の断面積と長さの比が大きい程、換言すれば radiation impedance が小さい程、第一、第二formant共に高くなる傾向がうかがわれる。

以上は最も単純なる形で、各因子単独の母音formantにおよぼす影響をみてみたのであるが、実際にはこれら三つの因子がいろいろに組み合わせ、影響し合つてformantを決定しているもので、これに関しては今後尚検討をつづける予定である。

5. 結 語

以上、E.V.T.A.に関する概説と、我々の試作品とそれによつて獲られた初歩的段階における母

音 formant の解析成績とを述べた。

我々が E.V.T.A を試作した意図は、母音および子音音節を含めた日本語語音の性質の究明もその一つであるが、実はこれによつて言語障害の器質的あるいは機能的異常の原因を追及する足場をつくり、その治療指針を確立したいと考えたからに他ならない。この問題は極めて複雑多岐であり、果してこのような面から可能であるか否かは不明であるが、ともかく漸時こういつた病的音声の域にまで歩を進めたいと考えている。

文 献

- 1) Dunn, H.K. : The calculation of vowel resonance, and an electrical vocal tract. JASA **22**: 740~753, 1950.
- 2) Stevens, K.N. and Fant, C.G.M. : An electrical analog of the vocal tract. JASA **25**: 734~742, 1953.
- 3) Schott, L.O. : An electrical vocal system Bell Lab. Record 549~555 Dec. 1950.
- 4) Fant, C.G.M. : Modern instruments and methods for acoustic studies of speech. Acta Poly Technica Scandinavia Physics including Nucleonics Series. No. **1**, : 1~81, 1958.
- 5) Rosen, G. : Technical Report No. 353 R.L.E. M.I.T. 1960.
- 6) Flanagan, J.L. : Some properties of the glottal sound source. JAHR. **1**: 99~116, 1959.
- 6) Morse, P.M. : Vibration and sound (Mc Graw-Hill, 1948)
- 7) Hattori, S.K. Yamamoto, Y. and Fujimura, O. : Vowels of Japanese. Bull. Kobayashi Institute of Physical Research **7** : 69~79. 1957.
- 8) Stevens, K.N. and House, A.S. : An acoustical theory of vowel production and some of its implication. JSHR. **4**: 303~320, 1961.
- 9) Dellatre, P. : The Physiological interpretation of sound spectrogram. PMLA. **66** : 864, 1951.
- 10) Potter, R.K. and Peterson, G.E. : The representation of vowels and their movements. JASA. **20** : 528~535, 1948.
- 11) Heing, J.M. and Stevens, K.N. On the Properties of voiceless fricative consonants. JASA' **33** : 586~596, 1961.
- 12) Stevens, K.N. and House, A.S. : Development of a quantitative description of vowel articulation. JASA. **27** : 484~493, 1956.
- 13) House, A.S. and Stevens, K.N. : Analog studies of the nasalization of vowels. JSHD. **21** : 218~232, 1956.
- 14) 釜本安敏 : 日本語音声の構音機構に関する電気音響機器による分析的研究. 耳鼻咽喉科臨床 **51** : 536~552, 1957.
- 15) 苦瓜安彦 : 構音器官模型による日本語母音構成に関する実験的研究. 耳鼻咽喉科臨床, **53** : 98~112, 1960.