触覚，聴覚，岬角電気刺激の時間分解能に関する実験 ——聴覚代行としての蝸牛電気刺激の有用性——

北海道大学医学部耳鼻咽喉科学教室（主任：犬山征夫教授）

松島純一，熊谷雅彦，原田千洋，高橋国弘，犬山征夫

北海道大学電子科学研究所

伊福部 達

A COMPARISON OF TIME RESOLUTION AMONG AUDITORY, TACTILE AND PROMONTORY ELECTRICAL STIMULATION ——SUPERIORITY OF COCHLEAR IMPLANTS AS HUMAN COMMUNICATION AIDS——

JUN-ICHI MATSUSHIMA, M.D., MASAHICO KUMAGAI, M.D., CHIHIRO HARADA, M.D.
KUNIHIRO TAKAHASHI, M.D. and YUKIO INUYAMA, M.D.

Department of Otolaryngology, Hokkaido University School of Medicine, Sapporo

TOHRU IFUKUBE

Institute of Applied Electricity, Hokkaido University, Sapporo

Our previous reports showed that second formant information, using a speech coding method, could be transmitted through an electrode on the promontory. However, second formant information can also be transmitted by tactile stimulation. Therefore, to find out whether electrical stimulation of the auditory nerve would be superior to tactile stimulation for our speech coding method, the time resolutions of the two modes of stimulation were compared.

The results showed that the time resolution of electrical promontory stimulation was three times better than the time resolution of tactile stimulation of the finger. This indicates that electrical stimulation of the auditory nerve is much better for our speech coding method than tactile stimulation of the finger.

Key words: 聴覚代行，岬角電気刺激，聴覚，触覚，時間分解能

A95—1366—23528

はじめに

聴覚に障害があり補聴器も効果をなさなくなった患者に対して，聴覚に代わる補助装置として，触覚¹⁾，視覚³⁾，人工内耳⁴⁾⁵⁾等により音声情報を伝達することが検討されている。この内，人工内耳が既に実用化され，電極の数が複数の多電極型が1本の単電極型に比して性能が良いという結果となっている。これは，単電極型では音声の強弱と声の高さ情報（以下ピッチと

略す）しか伝達出来ず，音声の母音を特徴づけている特定の周波数帯域（以下ホルマントと略す）を伝達出来ないことによる⁶⁾。多電極型の中でも特にオーストラリアのメルボルン大学とヌクレウス社が開発した人工内耳が，ホルマント抽出型のスピーチプロセッサを用いて音声の強弱，ピッチの変化に加えて，第2ホルマント情報（母音の認識には第1ホルマントより重要である）を蝸牛内に挿入した電極を用い伝達するこ

とから良い成績が得られている⁷⁾

一方 House で代表された単電極型では第2ホルマントの伝達は通常不可能とされていたが、我々は母音の第2ホルマント情報を時系列処理することにより、単電極型においてもホルマント情報の伝達が可能であることを示唆し⁸⁾、さらにそれをリアルタイムで可能ならしめるホルマント抽出型デジタルスピーチプロセッサを開発した⁹⁾

さて、時系列処理方式による音声の伝達は触覚でも可能であることから、我々が試作開発している人工内耳における蝸牛外電気刺激による伝達方式と触覚による方法を比較することは極めて重要なことと思われる。この時系列処理方式による音声の信号処理において最も重要なのは与えられた刺激の時間分解能である。それ故、本研究の目的は岬角電気刺激による音感覚と触覚、聴覚の時間分解能について比較し、時系列処理方式による人工内耳の有用性について検討することである。

方 法

時系列処理方式による音声の第2ホルマントの伝達方式の紹介

我々が提唱してきた音声の符合化方式を図1に示す。音声の高さをあらわすピッチパルスの後に第2ホルマント周波数 (f_2) の逆数に比例する時間的遅れの位置(遅延時間 $t = k / f_2$; $k = 1$ や 1.5 などの定

数)に、さらにもう1個のパルス刺激を行うことにより、母音の第2ホルマントを伝達する方法である。例えば、母音の/a/を時系列処理方式で伝達するには、その第2ホルマント周波数はおよそ 1200Hz であることから、 $k = 1$ とした時、2番目のパルスをピッチパルスから 0.84msec 遅らせた位置で刺激することになる。

刺 激 方 法

触覚刺激の方法

図1で示した刺激電流の波形をそのまま振動刺激に変換し、ヒトの第2指に径 2.8mm の振動子で刺激した。この時、振動子から出るノイズを遮蔽するための

表1 各母音の第2ホルマント周波数と時系列処理方式における2発目のパルスの位置 t (図1における遅延時間)
 t は($t = k / \text{第2ホルマント周波数}$)から計算される。 k は1や1.5などの定数

母 音	/i/	/e/	/a/	/o/	/u/
第2ホルマント周波数 (Hz)	2132	1863	1195	702	1322
遅延時間 (t) msec ($k = 1$)	0.469	0.537	0.837	1.424	0.756

$t = k / \text{第2ホルマント周波数}$
(k は1や2などの定数)

刺激方法

触 覚 刺 激： 振動子（径 2.8mm ）を用いて第2指を振動刺激

聴 覚 刺 激： ヘッドホンを通して 80dB SPL で音響刺激

岬角電気刺激： ホール電極（径 $750\mu\text{m}$ ）を使用

図1 刺激波形と刺激方法

ピッチ周波数に対する Δt 弁別閾

図2 聴覚と触覚のピッチ周波数 (fp) に対する Δt 弁別域の実験

図2上に基準刺激 (ref.) とテスト刺激 (test) がのっている。これらのピッチ周波数 (fp) を100から300Hzまで変えた時(横軸)のテスト刺激の Δt の弁別域を縦軸に msec で表す。

被験者にヘッドホンを介して 80dB SPL のバンドノイズを与えた。

音響刺激の方法

健聴者にヘッドホンを介して刺激電流波形をそのまま音響刺激し、強さは 80dB SPL とした。

岬角電気刺激の方法

鼓膜麻酔後、切開孔から径 250 μ m, 先端 750 μ m の白金イリジウムのボール電極を用い、岬角を電気刺激した。対極は心電計に用いられる電極を同側耳垂に貼り付けた。電気刺激は片側 0.1msec のダブルパルスを用い、パソコン (pc-98) で時系列パターンを作った。これらの刺激パターンを用いて、以下の実験を行った。

実験1：聴覚と触覚の時間分解能の比較

聴覚と触覚の時間分解能の比較のために以下の二つの実験を行った。

i 聴覚と触覚のピッチ周波数 (fp) に対する Δt 弁別域の実験 (図2)

この実験はピッチ周波数を100から300Hzの間で変化した時の、聴覚と触覚の時間分解能に関する実験である。

方法は、最初に図2に示した基準刺激 (ref.) を与え、次いでテスト刺激 (test) を与えることにより、両者の

第2パルスの位置に対する Δt 弁別閾

図3 第2パルスの位置に対する Δt 弁別域の実験

ピッチ周波数を100Hzに固定し、基準刺激 (ref.) の第2のパルスの位置 t を1から4msecまで変化した時(横軸)、この基準刺激と比較して、50%の割合で弁別可能なテスト刺激 (test) の第2のパルスの位置 Δt の値を図の横軸に表した。なお、触覚刺激は破線で、音響刺激は実線で表す。

間で得られた感覚の違いを50%の割合で弁別出来た時の Δt を音響刺激と触覚刺激の間で比較検討した。

ii. 第2パルスの位置に対する Δt 弁別域の実験 (図3)

この実験ではピッチ周波数を100Hzに固定する。この時、刺激波形の2個のパルス間隔 (t) を1から4msecまで変化した基準刺激に対して、さらに Δt ずらしたテスト刺激を与え、両者の間で50%の割合で弁別可能な Δt を音響刺激と触覚刺激の間で比較検討した。なお、被験者は2人で、触覚、聴覚に全く問題がない。

実験2：実際の母音から作った刺激パルス列による音響刺激の識別学習曲線と岬角電気刺激実験との対比 (図4)

図4右下に記載してある基準刺激波形において2発目のパルスをランダムに与えた時 (Δt は 0.1msec 毎にずらした刺激波形7通りを1セットとしてある) の感覚の違いの有無を答えさせるという恒常法を用いて、音響刺激について検討した。なお、実験1よりピッチ周波数は100Hzとした。この聴覚心理実験の被験

実際の母音から作った刺激パルス列による音響刺激の識別学習曲線

図4 実際の母音から作った刺激パルス列による音響刺激の識別学習曲線と岬角電気刺激実験との対比

者は2人で、実験1を行った被験者と同一であり、触覚、聴覚に全く問題がない。

岬角電気刺激実験の被験者は両耳とも聾の36歳の男性患者1人であった。本患者は、昭和41年 pinealoma のため放射線治療を受けた。その後、徐々に難聴が進行し、最近では両側とも聾となった。本患者に対して、人工内耳使用の適否を決めるために、当科で行っている方法で岬角電気刺激を行った。岬角電気刺激実験では、実際の母音から作った刺激パルス列（5つの母音に符合する）を基準パルス列と比較し、その感覚の違いの有無を識別率として平均したもので評価した。この患者においては、コンフュウジョンマトリックスを作ることを目的としたため、また岬角電気刺激の性質上から学習効果に対しては検討しなかった。

実験3：基準刺激 (ref.) に対するテスト刺激 (test) の類似性に関する実験

図5上に基準刺激とテスト刺激を表示している。触覚、音響刺激、岬角電気刺激において、基準刺激とランダムに与えられたテスト刺激によって得られる感覚に差があるか答えさせた。なお、テスト刺激の2発目のパルスは基準刺激のそれよりは Δt 遅れた位置にあり、 Δt は触覚では 0.2msec、音響刺激では 0.1msec、また岬角電気刺激では 0.02msec として変化させ、ピッチ周波数は 100Hz とした。

基準刺激に対するテスト刺激の類似率

図5 基準刺激 (ref.) に対するテスト刺激 (test) の類似性に関する実験

図5上に基準刺激とテスト刺激を表示している。

横軸の時間差 Δt はテスト刺激と基準刺激の2発目のパルスの時間差を表し、触覚では 0.2msec、音響刺激では 0.1msec、また岬角電気刺激では 0.02msec 毎に変化させた。縦軸には基準刺激とテスト刺激によって得られる感覚に差があるかを類似率 (%) で表した。

結果

実験1：聴覚と触覚の時間分解能の比較

i 聴覚と触覚のピッチ周波数 (fp) に対する Δt 弁別域の実験 (図2)

触覚刺激では、図2に示した基準刺激 (ref.) とテスト刺激 (test) の間の感覚の違いを50%の割合で弁別出来た時の Δt はピッチ周波数が100から250Hzの間では約0.5msecであったが、ピッチ周波数が300Hzでは約0.3msecと良くなった。一方、音響刺激ではピッチ周波数の変化にかかわらず、弁別率はほぼ0.15msecであった。このことから、聴覚は触覚に比して約3倍時間分解能が高いことが分かった。

ii 第2パルスの位置に対する Δt 弁別域

図3に示した基準刺激 (ref.) とテスト刺激 (test) の間の感覚の違いを50%の割合で弁別出来た時の Δt は、刺激波形の2個のパルス間隔 (t) を1から4msecまで変化させても触覚刺激では約0.55msecと変化はなかった。一方、音響刺激では第2パルスの位置が離れるのに従って50%弁別率における Δt の弁別

域が悪くなり、第2パルスの遅れが1msecでは Δt は0.15msecであり、4msecでは0.22msecであった。これらのことから、2個のパルス間隔が1から4msecまで変化した条件下においても、聴覚は触覚に比べて約3倍時間分解能が良いことが分かった。

実験2：実際の母音から作った刺激パルス列による音響刺激の識別学習曲線と岬角電気刺激実験との対比(図4)

音響刺激でピッチパルスの後に第2ホルマント周波数の逆数の遅れで、もう1個のパルスを与えて5個の合成母音を弁別させる実験を行ったところ、図4に示すように、練習のない1回の実験では、約60%の正当率であった。答を教え、練習した後では正当率は75%に上昇した。

一方、岬角電気刺激による正当率は60%と音響刺激と同じ値であった。しかし、岬角電気刺激の性質上から1回だけのデータしか得られなかったため学習効果に対しては検討しなかった。

実験3：基準刺激(ref.)に対するテスト刺激(test)の類似性に関する実験

図5に示された基準刺激(ref.)とテスト刺激(test)とによって得られる感覚の類似率をみると、音響刺激と岬角電気刺激とによって得られる感覚の類似率はほぼ同じ傾向を示す。例えば、50%の割合で異なると(言い換えれば50%の類似率)答えた時の Δt は音響刺激と岬角電気刺激とは同じで、約0.15msecであった。さらに Δt を大きくし、 Δt が0.2msecの時、岬角電気刺激では基準刺激とテスト刺激の感覚の違いを100%の割合で答えられ、音響刺激においても80%とほぼ同じ値が得られた。

なお、音響刺激では0.5msecで基準刺激とテスト刺激の感覚の違いを100%の割合で答えられた。

一方、触覚刺激では、図5からも明らかなように、音響、岬角電気刺激に比して弁別率が悪く、50%類似率でみると、触覚における Δt は0.5msecで、この値は音響、岬角電気刺激に比して、およそ3倍時間分解能が悪いことを示す。また、触覚で100%の割合で違うと答えた(図5の縦軸の類似率0%で示される)時の Δt は、1.0msecであることから、岬角電気刺激に対し5倍、音響刺激に対しても約2倍時間分解能が低いことが分かった。

考 察

高度難聴者や聾者に触覚¹⁾²⁾、視覚³⁾を利用した聴覚

補助装置を用いたり、人工内耳⁴⁾⁵⁾等により音声情報を伝達することがなされている。これが聴覚代行という概念である。この聴覚代行として最初に考えられるのは触覚を利用することである。方法は、一つには音声周波数分解して、そのスペクトルを皮膚面上に空間パターンで呈示する。それ故、周波数が触覚面上の場所に、音圧が振動強度に対応することになる。刺激点の数や感覚は、音声ホルマントの位置や、ホルマント移動が感覚で弁別できるように決定される。この方法は、視覚、人工内耳の使用に比べて簡便であることから、既に北大応用電気研究所で触覚ボコーダなどとして試作されている。また、指の感覚を利用する方法としては、他に、多電極型蝸牛内刺激型人工内耳を開発し、人工内耳としては最も良い成績をあげているメルボルン大学の tickle talker という方式がある²⁾。これは、第2指から第5指の内、外側を用い8チャンネルとして、それらを多電極型人工内耳と同じ方式のスピーチプロセッサを用いて電気刺激する方法を使っている。しかし、これらの触覚による聴覚代行は、本来の指の運動機能を多少なりとも制限すると共に、今回の実験から触覚の時間分解能が音響、岬角電気刺激に比して約3倍悪いという結果が得られ、特に子音のように短時間で激しく変化するような場合には問題となってくるのが分かった。しかし、こうした触覚ボコーダ、tickle talkerなどは、特に手術の必要のないことから、小児の難聴者における聴覚代行としては優れたものと思われ、今後の研究が待たれる。

現在、聴覚代行として実用化されているのは、現存する聴神経を電気刺激する人工内耳である。人工内耳には、電極の数により単電極型と多電極型に分けられる。多電極型の人工内耳では容易にホルマント情報を患者に伝達出来るが、単電極型方式では不可能であった。我々が試作開発している方式では音声の時系列処理することにより、単電極型であるが患者に第2ホルマント情報を伝達する予定である。今回の時間分解能に関する実験において、基準刺激と50%異なると答えたのは、音響、岬角電気刺激共0.15msecで差がなかった。しかし、100%違いを認識出来たのは、音響刺激0.5msecに対して、岬角電気刺激の方が0.2msecと時間分解能が良かった。岬角電気刺激の50%弁別率は Δt が0.15msecの時得られることから(図5)、各母音間の Δt の違いが0.15msecであれば、合成母音の弁別率が50%以上となるのが推定された。

実際に5つの母音の第2ホルマントの周波数とそれ

に対応する2発目のパルスの位置を表す t についてみると(図1と表1を参照), $/i/$ と $/e/$ の間の違いは0.07msecしかない。しかし, ここでもう一度母音の第2ホルマントにおける我々の時系列処理方式についてみると, 第2ホルマントの位置を表す t は必ずしも固定されていないことが分かる。このことは, $k=1$ の時, $/i/$ と $/e/$ の間の違い($t: t=k/\text{第2ホルマント周波数}$)は0.07msecであることから, 50%弁別率にも満たないが, $k=1.5$ とした時, 第2ホルマントの位置を表す t の差は0.105msecとなることから, 図5の結果からも弁別率は50%には達しないが弁別は可能と思われた。さらに弁別率をあげる方法としては, 例えば $/i/$ の第2ホルマントの周波数とそれに対応する2発目のパルスの位置を表す t を0.47msec, $/e/$ を0.62msecとし, $/u/$, $/a/$, $/o/$ はそれぞれ $k=1.5$ の値とすれば各母音の t の違いはいずれも0.15msec以上となり, 今回の実験の結果から訓練により各母音間の違いを50%以上の割合で弁別できることが予想されたことから, 我々が試作開発している単電極型人工内耳において, 時系列処理方式による母音の第2ホルマントの伝達が可能であることが示唆された。

岬角電気刺激による音感覚の弁別実験は健聴者における母音の弁別実験とは異なっているため, 直接の比較は困難と思われる。しかし, 我々の時系列処理方式による人工内耳における母音の伝達は, 今回得られた結果を基にして音声の母音に符号化した電気刺激を与えることから, 練習により電気刺激と音声の母音の対比を会得した場合においては可能と推定された。このことは, 図4で示した実際の母音から作った刺激パルス列による音響刺激の識別学習曲線と岬角電気刺激実験において, 両者とも1回目は約60%程度と同じ識別率が得られたことから考えられた。

ま と め

電気聴覚の時間弁別能が触覚よりも約3倍良いこと

から, 時系列処理方式により音声の母音に符合化した方法を用いた時, 母音の第2ホルマントの伝達は触覚よりも人工内耳方が良いことが示唆された。

文 献

- 1) 和田親宗, 伊福部達, 泉 隆, 松島純一: タクティルボコードの評価と改良のための基礎実験. 信学技報 MBE 91-30: 85-90, 1991.
- 2) Epstein J: The story of the bionic ear. Hayland House Publishing Pty, Melbourne, 1989.
- 3) 似鳥寧信, 伊福部達, 吉本千禎: 単音節音声の実時間認識装置. 日本音響学会誌 30: 75-79, 1983.
- 4) Clark GM, Blamey PJ, Busby PA: A multiple-electrode intracochlear implant for children. Arch Otolaryngol Head and Neck Surgery 113: 825-829, 1987.
- 5) House WF, Urban J: Long term results of electrode implantation and electrode stimulation of the cochlea in man. Ann Otol Rhinol Laryngol 82: 504-517, 1973.
- 6) House WF: Cochlear implants. Ann Otol Rhinol Laryngol 185 suppl 127: 1-52, 1976.
- 7) Clark GM: Engineering of future cochlear implants. Chapter 11. in Roger FG (ed) Cochlear Implants. Croom Helm, 1976, pp211-228.
- 8) 高橋国広, 松島純一, 熊谷雅彦, 寺山吉彦, 伊福部達: 単電極人工内耳のためのホルマント情報伝達に関する実験的研究 耳鼻臨床 81: 453-459, 1988.
- 9) Ifukube T, Hirata Y, Matsushima J: A new model of auditory prosthesis using a digital signal processor. The Journal of Microcomputer Applications 13: 219-227, 1990.

(1992年2月5日受稿 1992年4月8日受理)

別刷請求先 〒060 札幌市北区北15条西7丁目

北海道大学医学部耳鼻咽喉科学教室 松島純一

<div data-bbox="134 1584 168 1787">A 95—1366—23528</div> <div data-bbox="134 1043 168 1120">日耳鼻</div> <div data-bbox="201 1130 329 1700"><p>聴覚、聴覚、岬角電気刺激の時間分解能に関する実験 ——聴覚代行としての蝸牛電気刺激の有用性—— 松島純一・熊谷雅彦・原田千洋・高橋国弘 犬山征夫（北大） 伊福部 達（同 応用電気研究所）</p></div> <div data-bbox="362 1043 651 1787"><p>我々は母音の第2ホルマント情報を時系列処理方式することにより単電極型においてもホルマント情報の伝達が可能であることを示唆した。聴覚においてもこれが可能であることから、時系列処理方式で最も重要な要素である刺激の時間分解能について岬角電気刺激、聴覚との間で比較検討した。 結果は、岬角電気刺激の時間分解能が聴覚よりも約3倍良いことから、時系列処理方式により音声の母音に coding した方式を用いた時、母音の第2ホルマントの伝達は聴覚よりも人工内耳の方が良いことが示唆された。</p></div>	<div data-bbox="134 801 168 1004">A 95—1352—23581</div> <div data-bbox="134 260 168 338">日耳鼻</div> <div data-bbox="188 328 322 937"><p>低音型突発難聴のメニエール病移行例に関する検討 ——いわゆるメニエール病前駆期の蝸牛傷害について—— 阿部 隆・立木 孝・村井和夫・近 芳久 草野英昭・石川 健・浅野義一（岩手医大）</p></div> <div data-bbox="329 260 651 1004"><p>低音型突発難聴（LTSD）の診断で経過観察中メニエール病に移行した6例を検討した結果を得た。(1)メニエール病移行の割合は7.5%であった。(2)移行までの期間は最短4カ月・最長6年8カ月・平均2年9カ月であった。(3)移行様式にはLTSD様発作を反復して短期間に移行する例と1年以上の無症状態の後に移行する例の2型が認められた。(4)発作3カ月後に単発不変型LTSDであった例がメニエール病に移行し易い。(5)メニエール病前駆期の自覚症状と聴力像の間に密接な関連はなかった。(6)メニエール病移行時の聴力像は種々であった。(7)聴力の長期予後は6例中3例が良好で、そのうち2例はメニエール病軽症例と思われた。</p></div>
<div data-bbox="698 1584 732 1787">A 95—1372—13522</div> <div data-bbox="698 1043 732 1120">日耳鼻</div> <div data-bbox="772 1188 887 1632"><p>蝸牛電気刺激による EABR の変化 ——蝸牛神経核細胞の大きさとの比較—— 松島純一・犬山征夫（北大）</p></div> <div data-bbox="893 1043 1202 1787"><p>生後6週目に難聴になった子猫の蝸牛神経を電気刺激をしたところ、EABR（electrically evoked auditory response）の最大振幅と刺激側蝸牛神経前腹側核細胞の大きさとの間で高い正の相関が得られたが、非刺激側では相関は認められなかった。ラセン神経節細胞の生存率とEABRの最大振幅との間においても明らかな正の相関は認められなかった。これらのことから、聴覚系の成熟の途中で難聴になった場合はEABRの最大振幅はラセン神経節細胞の生存率のみならず、中枢聴覚系の発達状況によっても影響されることが分かった。</p></div>	<div data-bbox="698 801 732 1004">A 95—1360—25598</div> <div data-bbox="698 260 732 338">日耳鼻</div> <div data-bbox="772 260 846 937"><p>早期から手指法を導入した重度聴覚障害幼児2例の言語発達 能登谷晶子・鈴木重忠・手取屋浩美・古川 剛（金沢大）</p></div> <div data-bbox="853 260 1202 1004"><p>105dB以上の重度聴覚障害幼児2例に、0歳代と1歳代から文字音声法に手指法を併用し、手指言語の発達と音声言語の発達との関係を助詞や疑問詞の初期の獲得を中心に検討した。2例の言語発達は、手指による表出が音声による表出に先行した。初期において先行した手指による助詞や疑問詞の発達は、ほぼ健聴児の発達に匹敵していた。また、先行した手指による表出は、まもなく多用期をむかえ、また音声との併用期を経て、音声のみへと移行する傾向を示した。以上より、重度聴覚障害幼児にとっても、手指の利用は音声言語の発達に有用であることが示唆された。</p></div>