人工内耳の子音処理

庄司 和彦・榊原 淳二・藤田 修治*
 大森 孝一・伊藤 壽一・児嶋 久剛
 本庄 巖

Simulation of Consonants with a Multi-electrode Cochlear Implant

Kazuhiko Shoji, Junji Sakakihara, Koichi Omori,
 Juichi Ito, Hisayoshi Kojima and Iwao Honjo
 (Kyoto University)

Syuji Fujita
 (Osaka Red Cross Hospital)

While patients with multi-electrode cochlear implants can distinguish vowels well, it is hard for them to recognize consonants, especially voiceless plosives. To find out why they are not able to distinguish the three voiceless plosives /p/, /t/, /k/, we examined the simultaneous electrical pulses of each electrode of a cochlear implant with the input of the consonant-vowel syllables /pa/, /ta/, /ka/ in detail, using a computer and an analog-digital converter. The rate of electrical pulses caused by the voiceless plosives was lower than that caused by vowels. The intensity of electrical pulses was similar. And then we synthesized sounds which simulated the consonant-vowel syllables with multi-electrode cochlear implants. Each synthesized sound was so different from normal syllables that we could not recognize them as consonant-vowel syllables. The results show that more information of consonants must be translated through a cochlear implant for better recognition of consonants.

Key words: cochlear implants, deaf patient, simulation of consonants

はじめに

我々は、1987年より現在までに聾および高度感音難聴者7例に、Nucleus社製の多チャンネル型人工内耳を使用し、良好な成績を得た。なかでも母音弁別の成績は良好で、22個の電極全てを蝸牛内に挿入した6症例のうち、術後のリハビリテーションが完了した4症例では母音

弁別率はほぼ90%に達した。これはこの人工内耳のフォルマント抽出方式が、母音の弁別に有効であることを示すものといえる。

しかし、子音の弁別は母音に比して劣っており、confusion matrix testでは最良の症例でも弁別率は約50%で、特に無声破裂音/p/, /t/, /k/の弁別はほとんど不能であった。

この理由を検討する一つの方法として、まず人工内耳に無声破裂音が入力された時の電極の発火状況を記録し、これに基づきコンピュータで波形を合成し、これを聴力正常者が聴取し、人工内耳患者が「聴取」としていると考えられる無声破裂音の聴覚判定を行った。こうして無声破裂音の弁別が人工内耳装用者でどの程度可能であるかを調べた。

方 法

1) 発火電極の記録

まず Nucleus 社製22チャンネル人工内耳のスピーチプロセッサを、ある人工内耳埋め込み患者と同一設定下においた。この患者では、電極はひとつおきの双極で使用し、300~4000 Hzの周波数帯域を20に分割し、これを1~20の電極に割り当てて、電極ひとつおきの双極間に通電するように設定されていた。この患者では全ての電極が蝸牛の基底回転に挿入されており、各電極に相当するおよその特徴周波数を、レントゲン所見に基づき 100 Hz 単位で決定した。

次に図1に示すブロックダイアグラムで、DAT（デジタルオーディオテープレコーダ）に録音しておいた成人男性の子音音節 /pa/, /ta/, /ka/ を再生して人工内耳にライン入力し、各電極の発火を音声と同時に AD 変換してコ

ンピュータに入力し、どの電極がどのようなタイミングで発火したかを正確に調べた。

サンプリング周波数は10 kHz で、分解能は12ビットである。図2に使用した音節のサウンドスペクトログラムを示す。/pa/, /ta/, /ka/, の持続時間はそれぞれ 267 msec, 273 msec, 251 msec であり、その無声破裂音部は /p/, /k/ が 30 msec, /t/ は 22 msec であった。

2) 合成音の作成

次に、選択された電極の挿入位置に対応する特徴周波数からなる持続時間 5 msec のトーンバースト波形をコンピュータで作成し、それを発火のタイミングと一致させて配置し、シミュレーション波形を合成した。単一電極の発火に対しては単一周波数のサイン波からなるトーンバーストを対応させたが、ほとんどの場合は 1 msec のタイムラグで 2 つの電極の発火がみられ、これには各電極位置に相当する特徴周波数のサイン波を同位相で加算した波形のトーンバーストを使用した。同一の電極では刺激電圧がほぼ同一であったのでトーンバーストの振幅は一定とした。図3に /pa/ の /a/ の持続部

図1 発火電極記録のためのブロックダイアグラム

図2 使用した音節のサウンドスペクトログラム

図3 発火電極と合成波形の対応

分の音声波形と13番と16番の2つの電極でみられた発火、および各電極に相当する特徴周波数2000 Hz, 1400 Hzのサイン波を加算したトーンバーストを同一時間軸上に示す。波形の合成に使用したプログラムはC言語 (Turbo C™) で記述した。

波形の再生には16ビット DA コンバータを用い、サンプリング周波数20 kHzでアナログ信号に変換し、カットオフ周波数10 kHzのスムージングフィルターを通した後、125 kHzまでの周波数特性を持ち、過渡特性が最も良好な高域用スピーカー (テクニクス EAS-10 TH 800™) で再生した。

記録および波形の合成に使用したコンピュータはPC-9801UX41 (NEC 社製) で、AD コンバータはADX-98™, DA コンバータはDAX 98™, 波形処理ソフトはWAVE MASTER™で、いずれもカノーパス社製である。サウンドスペクトログラムにはApple社のMacintosh II™と音響分析ソフトMac Adios™とを利用した。

結 果

図4は各子音音節が入力された際の発火電極を時間軸上にプロットしたものである。/ka/では/k/に相当する時間内に発火した電極はなく、電極11が最初に発火したのは起声から44.1 msec後であった。/t/では2つ、/p/では3つの電極の発火が、各子音に相当する時間帯で認められたに過ぎなかった。また、起声から最初の電極発火までの時間は、/t/では15.6 msec、/p/では15.0 msecを要した。この遅れは人工内耳での処理時間と考えられ、無声破裂音の持続時間プラス約15 msecの間に発火した電極が、この人工内耳で無声破裂音の情報を伝えるものと仮定すると、/p/では7つ、/t/では6つ、/k/では2つの電極の発火がみられた。しかし、この数は後続母音の発火頻度に比して明らかに少なく、また、その電気刺激の強さを母音部でも発火のみられた/pa/の17番電極の発火電圧と比較した所、その比は1.01であり、子音部で特

に低い電圧ではないことがわかった。

/p/, /t/, /k/での発火電極の違いは、図2でみられる無声破裂部のエネルギー分布の違いをある程度反映しており、特に/t/における7番電極の発火は/p/, /k/ではみられない2700 Hz付近のエネルギーによると推定される。

図2で明らかなように、各子音音節で後続母音の第1, 第2フォルマント周波数はほぼ同じであり、かつ、経時的な変化がほとんどないにもかかわらず、人工内耳で発火する電極は各子

図4 a) は/pa/, b) は/ta/, c) は/ka/が入力された時の発火電極

図5 合成音のサウンドスペクトログラム

音音節で異なっており, また, 同一の子音音節であっても, 後続母音の部分で経時的に異なる電極の発火が認められた. なお, 発火の頻度は基本周波数に一致していた. /pa/, /ta/, /ka/ をシミュレートした再生音のサウンドスペクトログラムを図 5 に示す. スピーカーの周波数特性のため, 1.5 kHz 以下の音圧はやや低くなっているが, フォルマント周波数は図 4 で示した発火電極の特徴周波数とのほぼ完全な一致が確認される.

これらの合成音の聴覚印象では, もとの音声 /pa/, /ta/, /ka/ とは大きく異なっており, 破裂音であることの認識も不可能であった. 各合成音相互間の区別は困難ながらも可能であり, これは母音相当部の違いによるものと思われた.

考 按

現在, 多チャンネル方式の人工内耳は 2 方式に分類できるが¹⁾, 我々が使用している Nucleus 社製の人工内耳ではフォルマント抽出方式²⁾を採用しており, 各母音の第 1, 第 2 フォルマント周波数を検出し, これに応じて刺激電極を選択し, 基本周波数の頻度で電極を発火させて母音のフォルマント情報を伝える方式である. 挿入電極の位置が蝸牛の基底回転に局限されるため, 発火電極の位置の特徴周波数が実際の母音のフォルマント周波数より高い方にずれるにもかかわらず, 母音の弁別が良好である事は, 先に逆フーリエ変換によって線形な合成音を作成して行なった母音のシミュレーション³⁾で, 5 母音間の弁別が容易であったことから理解できる.

しかし人工内耳埋め込み患者の子音の弁別, 特に無声破裂音の弁別は極めて不良であった. 人工内耳での電極の発火を調べ, これに基づく人工内耳患者「聴取」音のシミュレーションを行うことは, この様な子音の弁別が悪い原因を探る上で, またこの不良な弁別を改善する上で有用な手段であると考えられる.

子音をシミュレートする際, 発火電極が様々で, しかも発火の間隔が一様でないために, 線

形な合成波形によるシミュレーションは困難で, そのため電極の発火にトーンバーストを対応させる方法をとった. しかし, 蝸牛内での電気刺激の範囲が正確には判定できないこと⁴⁾, 有毛細胞から聴神経につたえられる刺激と電流による神経末端の刺激の違いが音声認識にどう影響するか不明であること, などから, 今回の子音の再現が完璧とはいえないのは母音の場合と同様である. しかし, この方式の人工内耳が蝸牛の place theory に基づいている以上, 今回のような処置法は合理的であり, シミュレートした音と患者の聴取音との間には一定の近似があるものと考えられる.

さて今回の検討で, 無声破裂音の情報が人工内耳装用者の内耳に十分に伝えられていない事が確認されたが, この理由としてまず, この Nucleus 社製人工内耳が発火頻度を音声の基本周波数の抽出で決定しているため, 基本周波数の検出ができない無声音では電極の発火回数が少なくなる事があげられる. 次に, この人工内耳では音の強さの情報は電気刺激の強さで伝えているとされている⁴⁾にもかかわらず, 先の測定結果でみられた様に電気刺激の強さが無声部と有声部とで差異がなく, 子音と母音の音圧の差の情報が伝えられていないものと考えられた.

また, 各子音音節の母音部分のフォルマント周波数に相当する発火電極に変動がみられたのは, 本人工内耳のフォルマント周波数の検出処理の方法になお問題があることを示すものと考えられた.

子音の情報をいかに多く正確に伝えるかが, 将来の人工内耳の最大の課題と考えられるが, その際, 今回のような合成音によるフィードバックが極めて有用であると考えられる.

ま と め

Nucleus 社の人工内耳では, 無声破裂音に一致する電極の発火頻度が少ないこと, また, 発火電圧も母音部と差がないことが確認された. また, 無声破裂音音節をシミュレートした音の

聴取で, /pa/, /ta/, /ka/ 相互の弁別は困難であった。以上の所見より, この方式の人工内耳では無声破裂音の情報は十分に伝えられていない事が明らかとなった。

参考文献

- 1) 伊藤壽一: 人工内耳について. 耳鼻臨床 81: 779~786, 1988.
- 2) Clark GM and Dewhurst DJ: A multiple-electrode hearing prosthesis for cochlear implantation in deaf patients. Med Progr Technology 5: 127~140, 1977.
- 3) 庄司和彦, 藤田修治, 大森孝一, 他: 人工内耳聴取音のシミュレーション. 耳鼻臨床 81: 1709~1713, 1988.
- 4) Clark GM, Blamey PJ, Brown AM, et al: The University of Melbourne-Nucleus Multi-electrode Cochlear implant. Advances in Oto-Rhino-Laryngology 38 (ed by Pfaltz CR). pp 63~84, Karger, Basel, 1987.

(原稿採択: 平成元年 5 月 25 日
別刷請求先: 児嶋久剛
〒606 京都市左京区聖護院川原町54
京都大学医学部耳鼻咽喉科学教室)