人工内耳での刺激頻度とピッチ感覚

榊原 淳二・竹内真理子・児嶋 久剛

伊藤 壽一・本庄 巖・藤田 修治*

Pitch Perception in Patients with Cochlear Implant

Junji Sakakihara, Mariko Takeuchi, Hisayoshi Kojima,
Juichi Ito and Iwao Honjo

(Kyoto University)

Shuji Fujita

(Osaka Red Cross Hospital)

Pitch perception was investigated in four cochlear implant (CI) patients.

At first, the difference limen (D.L.) of pitch sensation conveyed by a stimulation rate was measured at each electrode in three CI subjects by the "Rate-pitch discrimination test" software program. At a fixed stimulation rate, D.L. was larger at the electrode near the round window. At most electrodes, D.L. decreased when the stimulation rate was increased. In general, D.L. was much larger than the acoustic performance in normal subjects.

Secondly, a pitch recognition test was performed in two CI patients with two fixed electrodes. Two of the 9 complex synthetic tones, with fundamental frequencies which differed successively, were inputted randomly into the speech processor with the modified "map". The pitch perception performance of the CI patients was not satisfactory, and it was thought that in speech CI patients are unable to discriminate voice pitches.

This may be explained as follows: either the CI cannot utilize the activity of neurons tuned only to pitch frequency, or the spectral pattern of complex tone is not transmitted by the CI because of the limited number of electrodes. Thus, the only coded information of pitch is a stimulation rate synchronized to voice pitch.

Key words: cochlear implant, stimulation rate, pitch perception

はじめに

コクレア社製人工内耳は、母音の第1ホルマントF1および第2ホルマントF2の周波数から蝸牛内に挿入された多数の電極のうち、2箇所を選択して刺激する方式である。本方式は他

の方式に比して母音の認識に有利であり¹⁾、我が国の経験でも一連の電極が蝸牛基底回転に十分挿入された症例では母音弁別は80%程度と良好であり²⁾、聾者が社会復帰する上で大きな福音となっている。

京都大学医学部耳鼻咽喉科学教室

* 大阪赤十字病院耳鼻咽喉科

一方, 本人工内耳では音声のピッチ周期で電極を発火させることで, 基本周波数 F_0 を聴神経に伝えるとされているが, 患者が刺激頻度の違いに対して鋭敏であれば, 音階の弁別は容易のはずと考えられる. しかし, 試みに簡単な童謡のメロディを数名の母音弁別良好な人工内耳症例に聴かせたところ音階を聞き取ることが全くできなかったことから, 人工内耳患者のピッチ弁別能はそれほど鋭敏でないと考えられた³⁾. そこで, 人工内耳患者が刺激頻度の違いをどの程度ピッチの違いとして知覚し得るかを調べ, 基本周波数すなわち音声ピッチを聴神経に伝えようとする試みが語音の認知にどの程度有益かを検討した.

方 法

母音弁別がほぼ80%以上と良好な人工内耳患者 4 名 (表 1) で, 以下に述べる 2 通りの方法でのピッチ弁別能を評価した.

1) 電極 1 箇所を発火させたときのピッチ弁別

症例 1 ~ 3 の人工内耳患者で電極 1 箇所ずつを 50, 100, 200 Hz の 3 通りの刺激頻度で発火させ, 刺激頻度を 1 Hz ずつ増加させたときピッチの変化が知覚されはじめた値を調べ, 各周波数での心理物理学的な弁別閾値 (difference limen, 以下 D.L. と略す) を求めた. 刺激電流量は, 個々の電極の最大快適レベルの 80% とし, 回数は各周波数で 1 回ずつとし上昇法で行った.

さらに症例 4 の人工内耳患者で, 刺激電極を 20 番 (蝸牛頂寄り) で最も低い周波数を担当する電極) に固定し, 刺激頻度を 90 Hz から 220 Hz

まで 10 Hz おきに変化させた時の弁別閾値 D.L. を同様の方法で調べ, 刺激頻度と D.L. の関係を検討した.

2) 電極 2 箇所を発火させたときのピッチ弁別

本人工内耳では, 通常 2 箇所の電極がほぼ同時に発火する設定となっている. そこで, これに近い条件でのピッチ弁別能を調べた.

症例 1 および 4 で使用電極を 10 番と 18 番の 2 箇所に設定した. これは母音 /e/ 入力時の発火電極にほぼ相当する. 周波数の割当ては 0 ~ 595 Hz を 18 番とし, 596 ~ 4000 Hz までを 10 番とした. 次に基本周波数が異なる 9 個の合成音 (110, 125, 141, 156, 180, 195, 211, 227, 242 Hz) の中からランダムに異なる 2 音をスピーチ・プロセッサを介して入力し, これら 2 箇所の電極を異なる基本周波数の頻度で発火させて,

表 2 合成音の周波数構成

	基本周波数	倍音周波数
1	110 Hz	1578 Hz
2	125	1539
3	141	1593
4	156	1601
5	180	1593
6	195	1539
7	211	1671
8	227	1578
9	242	1687

電極 10 番の発火に必要な周波数成分は, 基本周波数の整数倍で互いに近い値とした. その周波数は刺激の頻度とは直接関係しない. 各周波数成分の振幅は同一とした.

表 1 人工内耳症例

症 例	埋め込み時年齢	性別	難聴の原因疾患	失聴期間
1.	55	男	頭部外傷	1 年 7 カ月
2.	66	男	頭部外傷	1 年 8 カ月
3.	63	男	内耳炎	5 年
4.	55	女	突発性難聴	9 年

2音の内どちらが高く聞こえるかを指摘させた。合成音の組み合わせ毎にそれぞれ10回ずつ呈示し、正答数を調べた。表2に合成音の一覧を示す。電極10番を発火させるための周波数成分は、基本周波数の整数倍とし、かつ各合成音で近い値になるように設定した。

結 果

1) 電極1箇所を発火させた場合のピッチ弁別

図1a, b, cにそれぞれ症例1, 2, 3の各電極でのD.L.の値を示す。電極1箇所を発火させる方法では、全症例で100 Hz 刺激に対してその1.5倍以上刺激頻度を高めてようやくピッチの違いを指摘できた。一般に電極が蝸牛底に近い程、ピッチ弁別能が低下する傾向が認められた。また各電極についてみると、刺激頻度が低い程D.L.の値は大きく、ピッチ弁別能が不良となるものが多かった。

図2は、症例4で電極を20番に固定した場合のD.L.の値を並べたものである。同一電極では、刺激頻度が低い程ピッチ弁別能が不良となる傾向がより明らかとなった。刺激頻度の変化に対するD.L.は、最良でも10~20%と正常者が音刺激で行った場合のピッチ弁別能に比して、1桁以上大きな値であった。

2) 電極2箇所を発火させた場合のピッチ弁別

図3a, および図3bに症例1と4での結果をそれぞれ示す。陰影部は10回のうち2回以上誤りがあった組み合わせである。各症例とも電極2箇所を発火させた場合でも、隣合った周波数の2音の弁別の多くは不確実であった。また症例1では、1オクターブ近く離れた音でもピッチ弁別が不確実となる場合がみられ、刺激頻度の違いがピッチの違いとして必ずしも十分には知覚され得ないことが明らかとなった。

考 按

聴神経ニューロンの音刺激に対する応答とサイン波電流刺激に対する応答が大きく異なる点は、純音刺激では明確な特徴周波数がみられる

のに対し、電気刺激では応答野は浅い皿状を呈し周波数選択性はないに等しいことが挙げられる⁴⁾。また、各ニューロン間での周波数選択性の違いも殆ど認められない。ダイナミック・レンジは音刺激が30~50 dBあるのに対し、電気刺激では電流量から換算して5 dBから最大20 dBと狭い⁵⁾。さらに重要な点は、音刺激では多数のニューロンから同時に入力された情報を聴覚系が総合的に処理できるのに対し、電気刺激では多チャンネル方式であっても電極間の干渉のために同時刺激できる電極が数個に制限されるため、上位聴覚中枢でのいわゆるfeature extraction機能、例えば高次の倍音成分(harmonics)からピッチを抽出する機能などが十分発揮できない可能性が挙げられる。

以上の相違を踏まえ、人工内耳、特に蝸牛内多チャンネル方式で伝えられるピッチについて検討してみた。

まず音刺激では、音声ピッチをコード化する方法として、①特徴周波数が基本周波数に一致するニューロンが活動してピッチを伝えるという説、②ニューロンの周期的発火(phase-lock)がピッチを伝えるとするtemporal theory、③多数のニューロンの発火パターンからピッチが抽出されるとするpattern recognition theoryの3通りがある。一方、人工内耳では刺激部位が基本周波数より高い周波数を担当する基底回転に限られること、また同時刺激できる電極が限られることから、ピッチ情報を電気刺激を介して伝える方法としては、②に基づいた方法が採られることが多い。コクレア社製人工内耳でも、音声の基本周波数を抽出して刺激頻度としている。

この方式によるピッチ情報伝達にはいくつかの問題点がある。第一は、例えば特徴周波数が1 kHz以上のニューロンを0.3 kHz以下の低い刺激頻度で刺激した場合、ピッチ情報として中枢で有効に処理され得るかという点である。Shamma⁶⁾⁷⁾は、蝸牛神経核でのlateral inhibitionモデルで、聴神経ニューロンの活動が自己

図 1 a

図 1 b

図 1 c

図 1 電極 1 箇所を発火させた場合のピッチ弁別成績
基準の刺激頻度を 50, 100, 200 Hz とし, 症例 1, 2, 3 の各電極での弁別閾値の結果を a, b, c にそれぞれ示す。

図2 症例4の電極20番でのピッチ弁別成績

電極を20番に固定し、基準周波数を10 Hz 毎に増加した場合のピッチ弁別をグラフに示す。

Hz	110	125	141	156	180	195	211	227	242
110		4	10	8	9	10	8	10	10
125			6	10	10	10	10	10	10
141				10	10	10	9	10	9
156					10	10	10	8	7
180						9	8	9	7
195							5	7	6
211								7	7
227									5

図3a

Hz	110	125	141	156	180	195	211	227	242
110		9	10	10	10	10	10	10	10
125			7	10	10	10	10	10	10
141				8	9	10	10	10	10
156					7	10	10	10	10
180						8	9	10	10
195							6	9	10
211								7	10
227									5

図3b

図3 電極2箇所を発火させた場合のピッチ弁別成績

電極を10番と18番に設定後、合成音の各組み合わせ毎にそれぞれ10回呈示し、正答数をまとめた。陰影部は2回以上誤りがあった組み合わせを示す。

の特徴周波数に phase-lock しているものだけが中枢で accept される可能性を示しており、これが事実だとするとコクレア社製人工内耳ではピッチ情報が中枢に伝達されないことになる。

第二には、単一ニューロンが音の強さの違いを発火頻度でコード化していることから考えて、刺激頻度の違いをピッチの違いとしてだけでなく音の強さの違いとして認知する可能性である。これは、人工内耳患者にピッチ弁別能の聴覚心理学的検査を行う際、注意を要する点である。

第三は、刺激頻度が同じでも蝸牛の刺激部位によって知覚されるピッチが異なる点である⁸⁾。基底回転寄りでは高く、頂回転寄りでは低く知覚されるため、ホルマントの高低によって電極を選択するコクレア社の方式では、同じ基本周波数でも各母音でピッチが異なって知覚される可能性がある。

今回我々は4名の人工内耳患者で、電極を固定して刺激頻度を変化させたときのピッチ弁別能を評価した結果、周波数の弁別閾は正常者の音刺激での弁別閾よりも大きく劣っていた。これは、上記の問題点を反映した結果と推察される。この成績から考えて、本人工内耳によるピッチ弁別は少なくとも会話音域では不完全であり、刺激頻度の違いでピッチを伝えようとする意義は小さいことが示唆された。

聴覚生理上、可能な限り蝸牛頂近くまで電極を挿入すれば、ピッチ弁別が向上するものと推測される。刺激頻度の違いに対して、正円窓寄りの電極よりも蝸牛頂寄りの電極の方が鋭敏であった事実もこれに符合する。しかしながら蝸牛頂への電極挿入が不可能な現在、ピッチを伝える試みが語音の認知向上にどの程度寄与しているのかには疑問が残る。本人工内耳でも大まかなピッチ弁別は可能であった(図2)。しかし一般に話声のピッチの変動幅は10~20%より小さく、今回得られたD.L. 値から考えて、人工内耳患者はこの変動を十分に捉えていない可能性が高いと考えられた。

ま と め

人工内耳患者のピッチ弁別能を評価した結果、

1. 刺激頻度の違いをピッチの違いとして十分認知できないことがわかった。
2. 基本周波数を刺激頻度に用いる意義は少ないものと推測された。

なお、本論文の要旨は第91回日本耳鼻咽喉科学会総会で口演した。

文 献

- 1) 船坂宗太郎, 湯川久美子, 高橋 整, 他: 22-Channel Cochlear Implant の聴取能に関する一考察—刺激方式の異なる2症例の音響生理学的背景—. 日耳鼻 91: 177~184, 1988.
- 2) 伊藤壽一, 土師知行, 川野通夫, 他: 人工内耳手術とリハビリテーション. 耳鼻臨床 81: 1563~1568, 1988.
- 3) Townshend B, Cotter N, Compennolle D, et al: Pitch perception by cochlear implant subjects. J Acoust Soc Am 82: 106~115, 1987.
- 4) Kiang NYS and Moxon EC: Physiological considerations in artificial stimulation of the inner ear. Ann Otol Rhinol Laryngol 81: 714~730, 1972.
- 5) Hochmair ES and Hochmair-Desoyer IJ: Aspects of sound signal processing using the Vienna intra- and extracochlear implants. Cochlear Implants (ed by Schindler RA and Merzenich MM). pp 101~110, Raven Press, New York, 1985.
- 6) Shamma SA: Speech processing in the auditory system I; the representation of speech sounds in the responses of the auditory nerve. J Acoust Soc Am 78: 1612~1621, 1985.
- 7) Shamma SA: Speech processing in the auditory system II; lateral inhibition and the central processing of speech evoked activity in the auditory nerve. J Acoust Soc Am 78: 1622~1632, 1985.

- 8) Eddington DK : Speech discrimination in deaf subjects with cochlear implants. J Acoust Soc Am 68 : 885~891, 1980.

(原稿受付：平成2年7月23日
原稿採択：平成2年8月13日
別刷請求先：榊原淳二
〒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)