

人工内耳装用者の聴取に関する考察

城間 将江 松永 達男*

要旨 科学技術の進歩により、人工内耳は高度難聴に対する有効な治療法として確立されている。成人の人工内耳装用者においては、静寂時の語音聴取成績は、open-set（選択肢なし）の課題でも平均的にはきわめて高いが個人差が大きく、また雑音負荷時の聴取率は顕著に低下する傾向がみられる。一方小児においては、手術時の年齢が2-3歳の低年齢だと、5-6歳以降に手術した場合に比べて言語発達（とくに発話能力）や社会的発達が促進される傾向にある。しかし低年齢手術児においても聴取能力は個人差が大きいのが現実であり、それは個人の認知能力、教育方法、さらに養育者の関わりなどが要因として挙げられる。認知機能と聴覚機能の発達機序については神経心理学的研究が進みつつあるが、それらの脳における統合処理に関しては未解明のことが多い。教育法については、聴覚活用法が視覚併用法よりも語音の聴取成績は良い。なお音楽の知覚に関しては、全体的に旋律知覚は悪いがリズムの知覚は良い傾向にある。音楽知覚については、今後の音声情報処理技術の革新に期待する。

（キーワード：人工内耳，語音聴取，音楽）

A REVIEW OF SPEECH PERCEPTION ABILITY USING COCHLEAR IMPLANTS

Masae SHIROMA and Tatsuo MATSUNAGA*

Abstract The purpose of this paper is to review the speech perception ability of those using cochlear implants that have long proved to be successful in the treatment of severe to profound hearing-impaired patients. The majority of postlingually deafened adult patients show high perception ability in open-set sentence tests in quiet even though the results are diverse from one individual to another, and the performance tends to decline in noise. children deafened from birth develop language skills using cochlear implants, and if the surgical intervention is done before or up to the age of two to three, the results seem to be better, especially in terms of acquiring spoken language, and social and emotional skills, than for those who receive an implant at the age of five to six or later. In reality, however, the results are diverse as seen in adult patients, and many factors contribute to the performance, especially cognition skills, educational methods, and parental support. In regard to cognition, a lot of studies have been done from the point of neuropsychology, but it is still not known how cognition skills integrate with auditory skills. As for training or educational methods, auditory oral or auditory verbal methods tend to show higher speech perception ability than total or manual communication methods. In comparison to high speech perception ability, musical perception ability is poor except for rhythm. New coding strategies are expected to be developed in the future which will make musical components easier to perceive.

（Key Words : cochlear implant, speech perception, music）

国際医療福祉大学 International University of Health and Welfare 言語聴覚学科

*国立病院機構東京医療センター National Tokyo Medical Center 耳鼻咽喉科

Address for reprints : Masae Shiroma, 2600-1 Kitakanemaru, Ohtawara, Tochigi 324-8501 JAPAN

Received May 17, 2004

Accepted June 16, 2004

科学技術と人工内耳

聴覚知覚関連の学問的探求は19世紀から盛んになされてきたが、オーディオロジーとして学問的に位置づけられたのは第二次世界大戦後と言われている。オーディオロジーの発展は科学技術の進歩と深く関連していて、例えば補聴器開発は真空管の小型化によって飛躍的に発展した。また人工内耳の開発研究はバイオテクノロジーのおかげで1980年代には世界的に臨床において実用化した。従来は最重度の聴覚障害者に対する医学的な治療法はなく、人工内耳によって聴覚の回復が可能になったことは、学問的にも臨床的にも20世紀の画期的な出来事であったと言える。

人工内耳の臨床応用から4半世紀しか経過していないことになるが、その間に、体外に装用するスピーチプロセッサの重量は1.2 kg から約10 g にまで小型化した。さらに、音声情報処理技術（音声コード法）も、正常聴力者の聞こえに近似する努力が日進月歩でなされ、その改良にともなって語音受聴明瞭度は格段に改善した。

人工内耳による語音の知覚

1. 成人人工内耳装用者

失聴時期が言語獲得後の成人を対象にした場合の人工内耳による語音聴取は、図1に示すようにきわめて高く¹⁾、静寂時におけるオープンセット（選択肢がない課題）の文の受聴明瞭度の平均が80%にも達している。一方で、明瞭度が10%程度に止まっている人がいることも事実である。さらに、雑音負荷時においては受聴明瞭度が顕著に劣化する（表1）ことも現システムの限界である。検査文を約70 dB、雑音を60 dB の音圧で呈示した聴取検査（S/N 比+10 dB）の平均正答率は、静寂時に比べて23%も低下している。現段階における雑音への対応としては、音声コード化法やマイクロホンの改良が進められ徐々に改善されつつあるところである。

失聴時期が音声言語の獲得前の成人に対する人工内耳手術に関しては、言語獲得後の対象者に比べると効果が期待できないとして、これまでは否定的であった。しかし、新しい音声コード化法が紹介される度に平均的な聴取結果が良好なため、青年期や成人初期の人工内耳装用者も増加傾向にある。これらの人々も、装用経験年数や聴取訓練などで電話による会話が可能になることは臨床的に確認されている。

言語習得前の失聴者と言語習得後の失聴者における人工内耳装用時における脳の活動性について、内藤ら²⁾が報告しているが、前者は後者に比べて活動性が高いとい

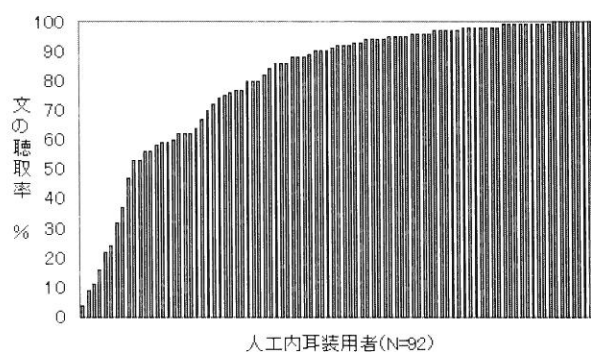


図1 静寂時におけるオープンセットの文の聴取率（メルボルンクリニック）：人工内耳手術後3～6ヵ月時の評価（文献1より）
平均値（91%）、中央値（80%）

表1 雑音負荷時におけるオープンセットの文の聴取率（メルボルンクリニック）：人工内耳手術後3～6ヵ月時の評価（文献1より）

	CNC 単語検査	文の検査（+10 dB SNR）
平均値	41%	57%
中央値	40%	55%

うことである。これは聴覚伝導路における神経経路に対する継続的刺激の重要性を示唆するものであるが未解明なことも多く、今後の新たな研究が待たれる。

2. 小児人工内耳

人工内耳手術の適応基準は年々緩和され、障害の原因、失聴時の年齢、手術時の年齢などによる制約がなくなりつつある。2004年現在、世界の人工内耳装用者数は7万人以上にのぼり、その6割以上は小児である。小児の場合は、早期発見・診断、早期治療（早期補聴）、早期教育することが言語発達にとって肝要であることは記するまでもない。そこで、手術時の年齢も年々低下する傾向にある。

1980年代は、側頭骨の発達や全身麻酔による身体的影響を考慮し、手術の適応年齢を約4歳としていた。しかし、体内に埋め込む電極部の小型化が進み、手術手技も改良されたことで適応年齢が次第に低年齢化し、現在では、2歳以下で手術することも珍しいことではない。米国のFDA（食品医薬品局）の「小児人工内耳適応ガイドライン」では、適応年齢を生後12ヵ月としている。また髄膜炎による場合は生後半年を経過した段階で人工内耳手術することもある。

2. 1 早期手術の効果

手術時期については、脳の可塑性が最も高い乳幼児期

に行うのが言語発達にとって効果的である。正常聴力児は生後半年で母語を多言語と聴覚的に識別し、2-4歳では音声言語による応答関係が確立する。そして5-6歳までには自分の考えをことばで表現することができ、文字言語を含めて成人言語を学習する準備が整う。

聴覚障害を持つ子どもについても、認知機能の発達に問題がなく、療育・教育が適切であれば、早期補聴によって正常聴力児と同様の言語獲得が可能となる。補聴器も人工内耳も、装用時期は早期であるほど良好な結果が期待できる。具体的な効果としては、次の通りである。①構音が正常聴力児とほぼ同等に明瞭になる、②プロソディー（韻律あるいはイントネーション）が自然である、③聴覚的フィードバックを活用した音声言語の言語獲得が早い、④書字言語の獲得が早い、⑤社会性や情動発達が、聴覚活用によって促進される。

しかしながら、成人同様に早期手術児においても、人工内耳の装用効果は個人差が著しいのが現実である。

2. 2 語音聴取に影響する要因

語音の聴取能力に影響を及ぼす要因について過去の研究報告をまとめると³⁾、表2に示すように、①科学技術の発展（人工内耳関連テクノロジーや医療技術）、②個体要因（生理学・病理学的要因：蝸牛神経核の残存量、残存聴力および補聴器装用、認知能力、失聴時の年齢や手術時の年齢、等など）、③環境要因（教育方法、養育者の関与、継続的装用等など）、④両耳装用（人工内耳と補聴器、あるいは両耳人工内耳）があげられている。

個体要因については、単一の要因では人工内耳手術後の効果を推測することは難しく、表1に示すさまざまな要因が複雑に影響して個人差として現れる。難聴の原因疾患が人工内耳による語音聴取能に及ぼす影響に関する研究は1980年代から1990年初期に数多くなされたが、単独要因となる疾患は報告されていない。

成人では失聴時期が大きく関与し、音声言語による聴覚像が脳にインプットされていることが重要であるため、幼少時に失聴して成人した場合は聴覚活用が困難になる。幼少時から難聴があっても補聴器装用で聴覚活用していた成人は、一般には人工内耳効果が期待できる。

小児においては、養育者との相互関係やコミュニケーションモードならびに教育方法などの言語環境要因が人工内耳装用効果に影響しているという臨床研究報告が多い。しかし、これらの要因は客観的な測定が困難であり、子どもの認知能力や運動能力、コミュニケーション意欲などの全体的な発達との関連で推考するしかない。

2. 3 人工内耳と補聴器の比較

筆者は、人工内耳は補聴器の延長線上にある補聴補助

表 2 人工内耳装用者（児）の語音聴取能に寄与する要因

1. 科学技術の進展
 - 1) 人工内耳関連テクノロジーの進展
 - (1) 機器の安定性
 - (2) 音声コード化法の変遷
 - (3) スピーチプロセッサのプログラム（マッピング・フィッティング）
 - 2) 医療技術の進展
 - (1) 手術手技手法
 - (2) 電極の挿入状況（使用可能電極数）
 - (3) 手術にともなう副作用の軽減
2. 個体要因
 - 1) 生理・病理・解剖学的要因
 - (1) 聴覚障害の原因
 - (2) 障害の重症度、残存聴力
 - (3) 残存する蝸牛神経細胞の質量
 - (4) 聴覚伝導路の発達と聴覚機能の可塑性（電気生理学的反応を含む）
 - (5) 蝸牛の形態
 - 2) 発症時の年齢
 - 3) 手術時の年齢
 - 4) 失聴期間
 - 5) 装用経験年数
 - 6) 総合的能力
 - (1) 聴覚以外の障害の有無と重症度
 - (2) 手術前の聴覚活用度（語音聴取能力）
 - (3) コミュニケーション能力（読話や手話を含む）
 - (4) その他：コミュニケーション意欲、社会性など
 - 7) 心理的要因
3. 言語環境
 - 1) 家庭・教育環境：家族や周囲の人々の理解・協力
 - 2) リハビリテーションの手法
 - (1) コミュニケーションモードの選択と活用度
 - (2) リハビリテーションの一貫性と継続性
 - 3) 音響環境：補聴補助機器（例：FM システム）の活用
4. 両耳装用
 - 1) 人工内耳と補聴器の併用
 - 2) 人工内耳の両耳装用
5. 手術の適応基準・対象者〔児〕の選択

機器として位置づけるが、その移行期の判断資料として、補聴器装用者の語音受聴明瞭度と人工内耳装用の明瞭度の比較研究は有用である。

図2は、Meyer (1998)⁴⁾による補聴器装用者の語音受聴明瞭度と人工内耳装用の明瞭度の比較研究で、人工内耳装用児が棒グラフ、補聴器装用児は折れ線で示されている。なお、補聴器装用児の聴力レベルに関しては、●が90-100 dBHL 群、○は101-110 dBHL 群である。

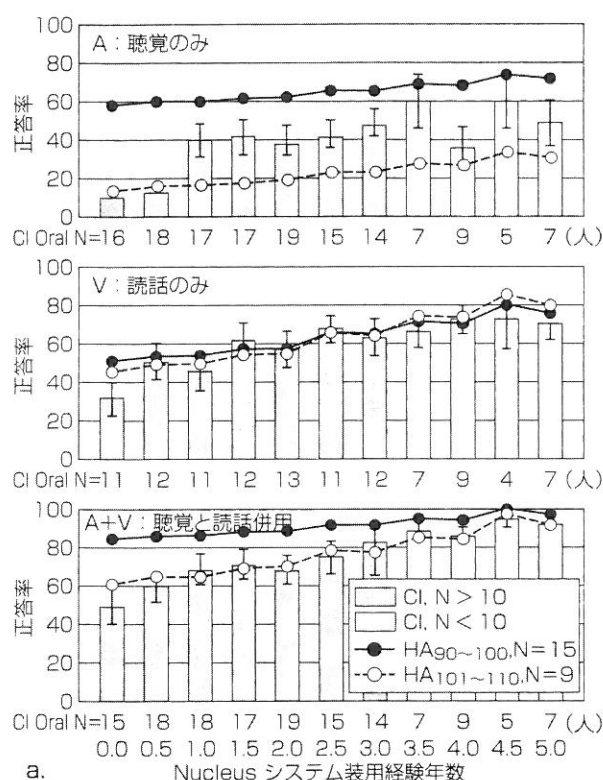


図2 Nucleus システム使用の人工内耳装用児 (CI) と補聴器装用児 (HA) による語音明瞭度 (文献4より抜粋)

縦軸：聴取率，横軸：装用経験年数 (N=対象者数)，上段 A：聴覚のみ，中段 V：読話のみ，下段 A+V：聴覚と読話併用

棒グラフ：人工内耳装用児 (対象者10名以上の平均値は黒棒，10名以下は白棒)

折れ線：補聴器装用児 (裸耳聴力が90-100 dB は●，101-110 dB は○)

a. 聴覚口話法による CI 児と HA 児の日常会話文の正答率

聴覚のみ (A: auditory perception)，読話のみ (visual perception)，聴覚と読話併用 (A+V: auditory perception with visual cues) の3条件で比較したものである。この研究結果から，下記の点が示唆される。①聴覚口話法で教育を受けている人工内耳装用児の受聴明瞭度は，90-100 dBHL の補聴器装用児よりも低い。②人工内耳装用児は装用経験年数4年程で90-100 dBHL の補聴器装用児群に追いつく。③読話のみの正答率は，補聴器装用群と人工内耳装用群間で差は認められない。④聴覚と読話併用においても両群間で顕著な差は認められず，視覚的情報は日常生活における情報補償に欠かせない。⑤人工内耳装用者は経験年数に伴って受聴明瞭度が改善する傾向に

ある。その他，Meyer らは教育方法の違いによる語音聴取率についても分析し，手話法に比して聴覚口話法は聴取能力の発達に貢献することを報告している。

2. 4 両耳装用効果

人工内耳適応ガイドラインの緩和によって，残存聴力があっても補聴効果が期待できないと判断された場合は手術の適応となる。そのため，片耳に補聴器装用，他耳に人工内耳装用 (bi-model) という組み合わせで同時併用することは珍しいことではない。さらに欧州では，両耳に人工内耳装用 (binaural cochlear implant) する人も増えてきた。両耳装用によって雑音負荷時の語音明瞭度が改善されるという報告もあり，今後の動向に注意しながら適応を判断する必要がある。

2. 5 人工内耳と新生児聴覚スクリーニング

前述のような難聴児の早期教育効果は，障害の早期発見が前提になることから，現在はグローバルな新生児聴覚スクリーニングが推奨されている。欧米諸国では法制化されている国も多く，日本においても厚生労働省のプロジェクトにより，多数の自治体が遂行中である。

新生児聴覚スクリーニングによる難聴の早期発見によって人工内耳の手術時年齢が早くなることも少なくない。これについては倫理的な側面から賛否両論あり，聴覚的情報補償手段の1つとして人工内耳を選択する養育者がいる傍ら，ろう者の人権保護の立場から乳幼児に対する人工内耳手術に反対を唱える人もいる。

3 人工内耳による音楽の知覚

冒頭で述べたように，人工内耳分野における科学技術の発展は日進月歩で音声情報の処理については高い評価を受けている。しかしながら，音楽の知覚に関しては，とくに目覚ましい改善は報告されていない。

楽音の知覚は，周波数や音圧やスペクトルの物理的特性が，多少あいまいな高さや大きさ，そして音色の主観的神経信号の感覚に変換された結果であると言われている。その機序は語音の知覚においても同様であり，語音知覚能力が高い人は楽音の知覚も容易にできる可能性があると考えられる。しかし，実際は語音知覚能力が高い人でも楽音の知覚は困難である。

図3は，人工内耳装用による楽音の要素であるリズム，音程，音色（この場合は，同じ旋律を異なる楽器で演奏した音色を識別する課題とした），馴染みのある旋律，加えてアカペラ歌謡，などの知覚実験結果を示したものである。また，図4は「春が来た」の旋律を，違う楽器で演奏した場合の知覚正答率を求めたものである。

結果は，音程，音色，旋律，などのように物理的に周波数特性の弁別が要求される課題は難しいが，音の強弱

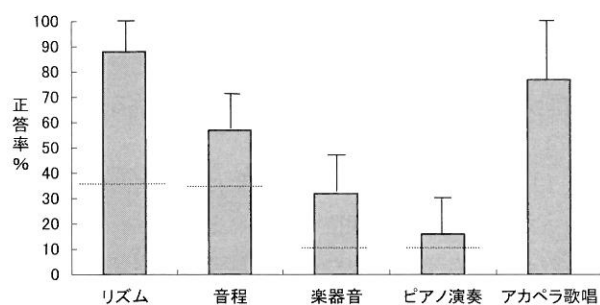


図3 楽音の知覚 (N=16) 文献5より
: 点線はチャンスレベルを示す

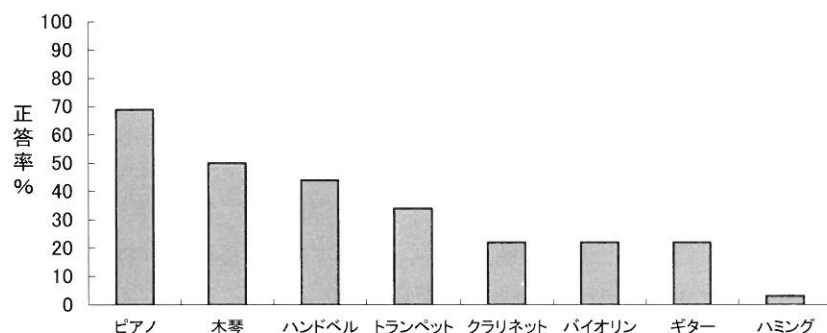


図4 各楽器音の識別 (1/12選択)
旋律: 「春が来た」の最初の4小節

や持続時間の弁別課題は正答率が高い。

これらの結果は、音の強弱や定期的な周期で音圧が変化する課題は知覚しやすいことを示している。アカペラ歌唱の知覚率が高いのは、楽器音をともなわず歌詞の朗読を聞くようなようなもので語音の知覚と変わらないからである。同旋律の歌を歌詞付きのアカペラ歌唱で聞く場合と歌詞なしでハミングした場合の知覚正答率との差が顕著であることから、アカペラ歌唱は音楽的な要素で聞き分けているわけではないことが示唆される。同旋律で歌詞付きの場合は正答率が70%と高いが、歌詞がないハミングの場合の正答率は5%以下に下がるのである。

旋律の知覚の困難さは、図4の楽器音の識別結果からも示唆される。同旋律でも、ピアノ音や木琴のような打(打弦)楽器の知覚はバイオリンやギターのような倍音構造の豊かな弦楽器に比べて振幅情報が多く、リズムの知覚がしやすい。

楽音要素の旋律知覚は、現人工内耳システムではきわめて難しいがリズム知覚は良好である。リズム学習は、

子供の発話改善(呼気のコントロールや話しことばの韻律的側面)に貢献するため、言語訓練の中に取り入れた方が良いと考えられる。

ま と め

20世紀後半で飛躍的に改善された人工内耳システムであるが万能ではなく、言語獲得後の成人でさえも聴取能の個人差は大きい。これにはさまざまな要因が関与していると考えられるが、脳における言語音の認知機序が深く関係していることが小児症例から推測できる。

言語の聴覚的理解は、音韻処理能力の他に語彙処理能力、意味処理能力、統語処理能力などの他に知能・認知・記憶・注意力といった高次脳機能が複雑に統合されて可能になる。しかしながら、脳機能の画像診断が盛んに行われている現在でも、神経ネットワークモデルについては未だ一致した見解は得られていない。

小児期に神経ネットワークが形成されやすく、子どもの言語発達は脳の可塑性との関係で説明されることが多いが、学習経験の積み重ねがないと発達は望めない。今後、脳における聴覚認知機序が解明されることで、人工内耳による聴覚学習方法なども科学的根拠に

基づいて行われるであろう。

文 献

- 1) Dowell RD, Hollow R, Wirton E et al: Outcomes for adults using cochlear implants re-thinking selection criteria. Paper presented at the 7th International Cochlear Implant Conference, Manchester, UK, 4-6 Sept. 2002
- 2) Naito Y, Hirano S, Honjo I et al: Sound-induced activation of auditory cortices in cochlear implant users with post-and prelingual deafness demonstrated by Positron Emission Tomography. Acta Otolaryngol (Stockh) 117: 490-496, 1997
- 3) 城間将江, 山嵜達也, 加我君孝: 小児人工内耳の長期的言語聴取能力に寄与する要因: 文献的考察. MB ENT 27: 46-63, 2003
- 4) Meyer TA, Svirsky MA, Kirk KI et al:

Improvements in Speech perceptin by children with profound prelingual hearing loss : Effects of device, communication mode and chronological age. J Speech Lang Hear Res **41** : 846-858, 1998

5) 城間将江, 菊地義信, 加我君孝ほか: 人工内耳によ

る音楽の知覚, Audiology Japan **41** : 755-764, 1998

(平成16年 3 月23日受付)

(平成16年 5 月21日受理)