

- [18] Gottschlich S, Billings PB, Keithley EM, Weisman MH, Harris JP. Assessment of serum antibodies in patients with rapidly progressive sensorineural hearing loss and Menière's disease. *Laryngoscope* 1995;105:1347–52.
- [19] Yagi M, Harada T, Yamasoba T, Kikuchi S. Clinical features of idiopathic bilateral sensorineural hearing loss. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 1994;56:5–10.
- [20] Moreira NC, Nylander R, Briaukait I, Velyvyte S, Gleiznien R, Monastyreckien E. Superficial siderosis: a case report. *Medicina (Kaunas)* 2011;47:320–2.

Notice of correction

The Early Online version of this article published online ahead of print on 21 Nov 2013 was missing information about the authors.

The corrected version is shown here.

HRCT-BASED PREDICTION FOR COCHLEAR IMPLANT OUTCOMES OF CASES WITH INNER EAR AND INTERNAL AUDITORY CANAL MALFORMATIONS

Hiroshi Yamazaki,^{1,3} Sho Koyasu,² Saburo Moroto,¹ Rinko Yamamoto,¹ Tomoko Yamazaki,¹ Keizo Fujiwara,¹ Kyo Itoh,² Yasushi Naito^{1,3}

¹Department of Otolaryngology, Kobe City Medical Center General Hospital; ²Department of Radiology, Kobe City Medical Center General Hospital; ³Institute of Biomedical Research and Innovation, Kobe, Japan

Introduction

Inner ear and internal auditory canal (IAC) malformations account for approximately 20-35% of congenital sensorineural hearing loss^{1,2} and an increasing number of children with inner ear and/or IAC malformations underwent cochlear implantation. According to Sennaroglu's classification of inner ear malformations, which is the most widely accepted, the inner ear malformations are divided into labyrinth aplasia, cochlear aplasia, common cavity (CC), incomplete partition type I (IP-I), type II (IP-II), and type III (IP-III), cochlear hypoplasia type I (CH-I), type II (CH-II), and type III (CH-III), and large vestibular aqueduct syndrome (LVAS).^{1,3} This classification is essential to investigate the etiology of the inner ear malformations, but with respect to predicting cochlear implant (CI) outcomes, it might not be enough, because it does not include IAC malformations such as narrow IAC (NIAC) and hypoplasia of the bony cochlear nerve canal (HBCNC). These IAC malformations are highly associated with cochlear nerve deficiency (CND), which has a negative impact to CI outcomes.^{4,5}

The purpose of this study was to establish a new CT-based categorization which is simple and includes both inner ear and IAC malformations for predicting CI outcomes.

Materials and methods

Between 2004 and 2010, 98 subjects who were under 20 years old underwent cochlear implantation at Kobe City Medical Center General Hospital. Among them, CT revealed that 24 subjects had inner ear and/or IAC malformations at the implanted side.

We evaluated inner ear and IAC malformations at the implanted side based on CT findings. Sennaroglu's classification was used to classify inner ear malformations and the IAC malformations were classified into NIAC and HBCNC. NIAC was diagnosed when the maximum diameter of the IAC was less than 2 mm.² The width of the bony cochlear nerve canal (BCNC) was evaluated at the mid-portion between the base of the modiolus of a cochlea and the fundus of the IAC on axial images. When the diameter of the BCNC is less than 1.5 mm, it is diagnosed as HBCNC.⁵ CND was diagnosed when a cochlear nerve (CN) appeared smaller than the facial nerve on the parasagittal MR imaging.

We categorized inner ear and IAC malformations into four groups by two criteria: (1) the presence or absence of a bony modiolus in the cochlea; and (2) the diameters of IAC and BCNC. In this categorization, both Group 1 and Group 3 have a bony modiolus in the cochlea, while Group 2 and Group 4 lack this component. Both IAC and BCNC are normal in Group 1 and Group 2, but NIAC or HBCNC was observed in Group 3 and Group 4. Sennaroglu's classification of inner ear malformations clearly discriminates between

Address for correspondence: Yasushi Naito MD, PhD, Department of Otolaryngology Kobe City Medical Center General Hospital, 650-0047 2-1-1 Minatogima Minamimachi Chuo-ku, Kobe City, Japan. naito@kcho.jp

Cholesteatoma and Ear Surgery – An Update, pp. 371-373

Edited by Haruo Takahashi

2013 © Kugler Publications, Amsterdam, The Netherlands

the presence and absence of a bony modiolus in the cochlea. According to his classification, a bony modiolus is present in IP-II, CH-III, LVAS, and a normal inner ear, while CC, IP-I, IP-III, CH-I, and CH-II have a cystic cavity without a bony modiolus.³

We evaluated CI outcomes by category of auditory performance (CAP) scores,⁶ hearing thresholds of pure-tone sounds, infant word speech discrimination scores, and monosyllabic word speech discrimination scores at one to three years after implantation. A subject with 0-4 CAP scores could not even understand common phrases without visual language and, therefore, we defined 5-7 CAP scores as a good CI outcome and 0-4 CAP scores as a poor one.

Results

We categorized our patients based on the two criteria as described above. In this study, there was no case categorized in Group 4. Group 1, Group 2, and Group 3 consisted of 11, 7, and 6 cases, respectively. MR imaging revealed CND in all cases of Group 3.

The post-operative CAP score was equal or over five in all cases of Group 1, but did not exceed four in all of Group 3. In Group 2, the post-operative CAP score was still four in two cases even after three years of CI usage, but reached to five or six in the remaining five cases. As shown in Figure 1, using our new categorization instead of the existing classifications, we can better discriminate between a good and poor outcome.

We examined speech discrimination scores of 22 cases except for two cases of Group 3 whose response to voice was poor. The correct percentage of the closed-set infant word discrimination test was ≥ 80 in all cases of Group 1, while the score ranged from 40 to 60 in tested cases of Group 3. The correct percentage of Group 2 widely varied between cases, ranging from 55 to 100. The open-set monosyllabic word discrimination test is much more difficult than the closed-set infant word discrimination test and, therefore, only 17 of 24 patients, who were over five years old and used their CI for more than two years, underwent this examination. All tested cases of Group 1 and 3 cases of Group 2 could answer correctly in equal or over 80% of accuracy. The correct percentage of the remaining cases, including all tested cases of Group 3, was ≤ 30 .

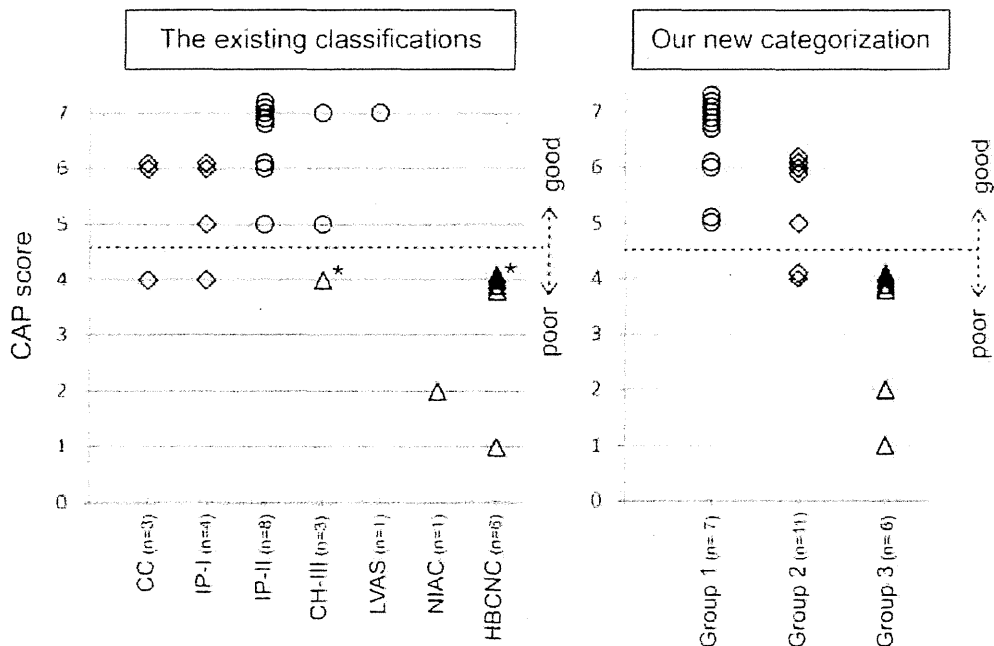


Fig. 1. A. The post-operative CAP score of each type of malformations based on the existing classifications. One case with both CH-III and HBCNC is plotted twice (*). B. The post-operative CAP score of each group of our new categorization. In both graphs, the members of Group 1, Group 2, and Group 3 are represented by a circle, diamond, and triangle, respectively.

Discussion

In this study, we established a new CT-based categorization including both the inner ear and IAC malformations. This categorization is defined by two criteria; (1) the presence or absence of a bony modiolus in the cochlea; and (2) the diameters of IAC and BCNC. We focused on these structures because the bony modiolus contains spiral ganglion cells, the major target of CI-mediated electrical stimulation, and their axons go through BCNC and IAC.

Group 1, which is defined by the presence of a bony modiolus of the cochlea with a normal IAC and BCNC, showed the best CI-aided hearing performance among three groups. The high proportion of post- or peri-lingually deaf cases might also contribute to the high CI outcomes of this group.⁷ Group 2 is defined by the absence of a bony modiolus with a normal diameter of IAC. The CAP score and speech discrimination score varied widely between cases in this group, but five out of seven cases could understand common phrases without visual languages. Group 3 is defined by the presence of a bony modiolus in the cochlea with NIAC or HBCNC and their post-operative improvement of hearing performance was limited. Visual languages were necessary for them to understand common phrases even after long usage of their CI. MR imaging revealed CND in all cases of Group 3, which might be responsible for their poor outcomes.

Conclusion

Our new CT-based categorization, which was based on the presence or absence of a bony modiolus in the cochlea and the diameters of IAC and BCNC, was effective in predicting CI outcomes of children with inner ear and/or IAC malformations. The CI outcomes were the best in Group 1, followed by Group 2 and Group 3. All cases of Group 1 showed good CI outcomes and could communicate orally. On the other hand, all cases of Group 3 showed poor CI outcomes and used lip-reading or sign language to understand common phrases. The CI outcomes of Group 2 varied between cases, but many of them showed good CI-aided hearing performance.

References

1. Sennaroglu L, Saatci I. A new classification for cochleovestibular malformations. *Laryngoscope* 112:2230-2241, 2002
2. Papsin BC. Cochlear implantation in children with anomalous cochleovestibular anatomy. *Laryngoscope* 115:1-26, 2005
3. Sennaroglu L. Cochlear implantation in inner ear malformations – a review article. *Cochlear Implants Int* 11:4-41, 2010
4. Song MH, Bae MR, Kim HN, Lee WS, Yang WS, Choi JY. Value of intracochlear electrically evoked auditory brainstem response after cochlear implantation in patients with narrow internal auditory canal. *Laryngoscope* 120:1625-1631, 2010
5. Miyasaka M, Nosaka S, Morimoto N, Taiji H, Masaki H. CT and MR imaging for pediatric cochlear implantation: emphasis on the relationship between the cochlear nerve canal and the cochlear nerve. *Pediatr Radiol* 40:1509-1516, 2010
6. Archbold S, Lutman ME, Marshall DH. Categories of Auditory Performance. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 166:312-314, 1995
7. Niparko JK. *Cochlear implants: Principles & practices*. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins, 2009

小さな common cavity 例の人工内耳手術

内藤 泰

小さな common cavity 例の手術は難しい

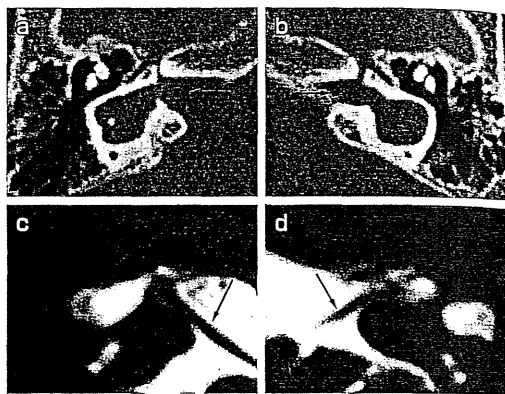
人工内耳手術は内耳奇形例でも可能であるが、蝸牛と前庭が分離せずに1つの腔になっている common cavity 奇形では内耳形態にさまざまなバリエーションがあり、個々の症例に応じた工夫が必要である¹⁾。本項では、内耳奇形の人工内耳のなかでもとくに難度が高い、小さな common cavity 例の手術について述べる。

症例は女兒で、言語発達の遅れにより耳鼻科を受診し両側高度難聴の診断が確定した。その後の補聴器装用で効果が得られず、当科紹介となった。2歳5か月時の所見で、聴性定常反応 (ASSR) で両側無反応。乳幼児有意味聴覚統合スケール (IT-MAIS) は2点 (40点満点)、新版K式発達検査では、認知適応領域の発達指数 (DQ) 104 に対して、言語社会領域の DQ が48 と低い成績であった。

画像検査所見

側頭骨 CT では両側とも common cavity 奇形があり、内耳道から内耳まで軟部組織陰影が連続している (❶ a, b)。MRI では、両側で第8脳神経

が明瞭に観察される (❶ c, d) が、蝸牛神経と前庭神経の分離は確認できない。内耳道と内耳腔のあいだの隔壁は MRI でも不明瞭で、内耳開窓で gusher (脳脊髄液の噴出) をきたす可能性がある。cavity は右のほうが若干大きいので、右側の手術を行う方針とした。



❶ 側頭骨の画像検査所見 (a, c: 右, b, d: 左)

cavity の大きさを計測して電極を選択する

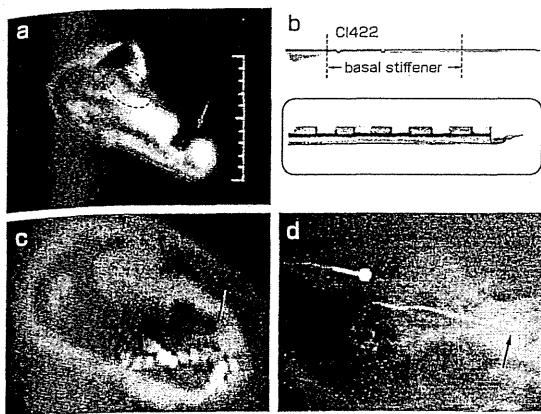
右内耳の三次元再構築 MR 像 (❷ a) をみると、cavity 前方の蝸牛相当部分の直径は3 mm 程度であり、その後方に顔面神経迷路部に該当する内腔の切れ込み (❷ a) がある。このように小さな空間に電極を敷設するには、できるだけ細い電極が有利と考え、コクレア社の CI422 電極 (❷ b, 拡大図は電極アレイ先端部分の形状) を選択した。この電極は先端付近の直径が0.3 mm、根元が0.6 mm と細く、アレイの片側だけに電極がある half band 構造になっている。内耳奇形例で通常用いられる同社のストレート電極の先端付近の直径は0.4 mm と若干太く、また電極が全周にある full band 構造になっているので、狭い空間内では電極同士の接触によるショートの可能性もある。このため、本例では CI422 電極を選択し、通常とは逆に電極面を外にして弯曲させ、cavity

内腔壁に密着するように敷設する計画とした。

手術時の留意点

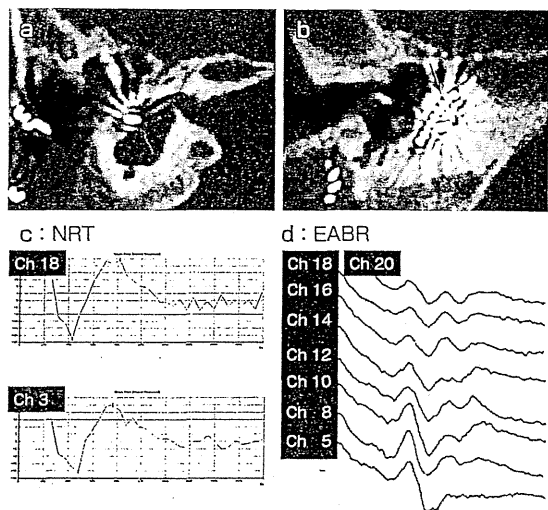
小さな common cavity では、できるだけ広い手術視野を確保し、cavity 内を明視して電極を入れないと思いが通りの位置に電極が入らない。本例では外側半規管隆起の前端付近に径3~4 mm の大きな開窓を行って内腔を観察した。gusher をきたしている所が内耳道底と考えられ、その前方がおおむね cavity の蝸牛該当部分であると推測した。

実際には cavity のどの部分に蝸牛神経が分布しているかわからないので、内腔の前端を中心にできるだけ広い範囲をカバーできるように、電極を中央で曲げて挿入し、先端の小さな空間だけでなく、その後方の cavity にも電極が触れるように工夫した。この電極の根元寄りには電極を若干固くする basal stiffener という構造がある (❷ b)



② 術後検査所見

a: 三次元再構築 MR 像, b: 使用した電極, c: 術後の傍冠状断平均 CT 画像, d: 術後の単純 X 線像



③ 術中・後の検査所見

a: cavity への入口部 (矢印) の CT 像, b: cavity 内の電極, c: NRT 波形, d: EABR 波形

が、この適度の硬さが狭い空間内で電極を操作するのに役立った。なお、gusher は筋肉や筋膜片を cavity 内に充填することで制御できた。

手術結果

術後の CT (②c, 傍冠状断平均 CT 画像) では、計画どおり、cavity 前端付近を中心に内腔壁に密着して電極アレイを敷設できていることが確認された (②c→)。アレイの先端と根元は前端の小さな空間から後ろにはみ出て伸びている。単純 X 線像では、アレイの固い部分の前端が狭い内腔の前端に位置しているように見える (②d→)。軸位断 CT 像では、電極アレイが cavity の外側中央付近から挿入され (③a→)、前半部分の内腔に密着して敷設できているのが観察できる (③b→)。

術中の電気生理学的検査 (反応波形を③c, d に示す) では、NRT で 2 番から 22 番、EABR で 5 番から 21 番電極において反応が確認された。術前に蝸牛相当部分と予想していた空間内にはおおむね 7 番から 17 番電極が収まっているが、実際にはその後方にも蝸牛神経が分布していたことがわかる。とくに cavity 内腔の下面ではほぼ電極先端まで反応があり、蝸牛神経支配がかなり尾側後方まで及ぶと推測され、今後、同様症例の手術を行ううえで参考になる。

引用文献

- 1) 内藤 泰. 内耳奇形例における人工内耳手術手技の留意点. 神崎 仁編. 1. 耳疾患. 耳鼻咽喉科・頭頸部外科診療のコツと落とし穴. 東京: 中山書店; 2006. p. 167-9.

ディスカッション

- 小さな common cavity 例では術前の CT, MRI 検査で内腔の大きさを計測し、現在臨床使用できる電極のうちどれが最もフィットするか十分検討することが大切である。
- 手術では cavity をできるだけ大きく開窓し、内腔を直視しながら、あらかじめ曲げた電極を内腔に密着するように敷設する。
- 術中に単純 X 線撮影と NRT や EABR 検査を行うと、電極アレイが適切に敷設できているか否か、cavity のどこに蝸牛神経が分布しているか確認できる。

ランチョンセミナー

治療の観点から見た耳疾患の画像診断

内藤 泰

神戸市立医療センター中央市民病院

Imaging of ear disorders seen from a viewpoint of treatment.

Department of Otolaryngology, Kobe City Medical Center General Hospital

Yasushi NAITO, M.D.

Textbooks on medical imaging usually show key images for diagnosing a certain disease, but seldom describe its treatment and prognosis leaving them to clinical or surgical textbooks. We encounter many patients and diseases during our clinical practice. Each disease has its unique etiology, diagnostic process, treatment and its result, which cannot be understood well without seeing the stages after the diagnosis. A viewpoint of treatment is, thus, essential for clinically appropriate imaging diagnosis. This article reports cases of infectious and inflammatory ear diseases, temporal bone traumas and inner ear anomalies, in which not only their diagnostic key images but also their treatment findings and prognoses are described and discussed.

はじめに

一般の画像診断解説では画像による疾患診断までは示されるが、それに対する実際の治療法や治療結果には言及されることは稀であり、他の教科書や手術書などに委ねられるのが通常である。我々は臨床を続けるうちに多彩な疾患・患者に遭遇するが、個々の疾患には、それぞれの病因、診断、治療、予後という一連の流れがあり、各々についてその診断までを見ただけでは、全体像を把握することはできない。臨床的に適切な画像診断を行うためには、治療の観点が不可欠である。本稿では、耳疾患のうち、感染・炎症性疾患、側頭骨外傷、内耳奇形を取り上げ、各々の画像診断上の要

点を治療も含めて概説する。なお、本稿では、筆者の著書「画像でみる耳の診断と治療－小児編」¹⁾で取り上げた症例をいくつか呈示している。読者には、あらかじめご承知いただくとともに、さらに詳細な所見等については同書をご参照いただきたい。

1. 感染・炎症性疾患

中耳炎は日常臨床で最も頻繁に遭遇する耳疾患である。通常の急性中耳炎は臨床症状と鼓膜所見で十分な診断ができ、また短期に治癒するので、側頭骨 CT などの高度の画像検査は不要であるが、合併症を伴う急性中耳炎や慢性中耳炎では、

治癒を阻害している要因の探求や耳小骨連鎖の病態観察、手術の要否などの治療方針決定のために画像診断が必要になる。また、手術治療を行った症例では、術後の経過観察にも画像診断が大きな役割を果たす。

症例1：5歳 男児

主 訴：左耳痛、左側頭部の頭痛

現病歴：左耳痛で近医耳鼻科受診。急性中耳炎の診断で左鼓膜切開と抗菌薬投与を受けたが、翌日になっても耳痛が改善しなかった。発症2日後に、最寄りの市中病院を経て当科紹介となった。依然として左耳痛と頭痛を強く訴えている。

局所所見：左外耳道に淡血性耳漏あり。耳後部に発赤、腫脹なし。

検査所見：白血球 10100/μl, CRP21.1mg/dl, 意識清明。

CT 所見：側頭骨ターゲットCT (Fig. 1: a) では、発育良好な乳突蜂巣全体に軟部組織陰影が充満しているが、骨破壊像は見られず、S状静脈洞周辺は均一な軟部組織陰影にしか見えない (Fig. 1:a→)。軟組織ウィンドウの頭部CT像 (Fig. 1: b) では左S状静脈洞が腫脹していることが観察でき、血栓による静脈洞の閉塞腫脹と推測される。MRI 所見：腫脹した左S状静脈洞はT2強調像では低信号 (Fig. 2: c→) であるが、T1強調像では中等度の信号強度 (Fig. 2: d→) で血流に

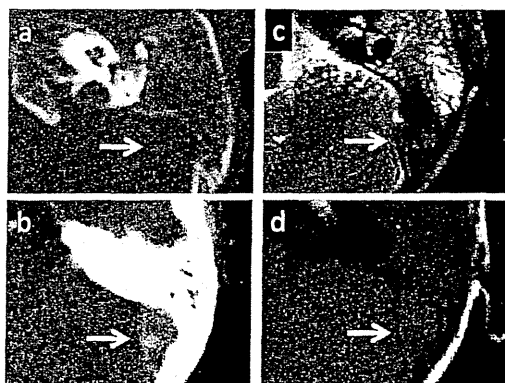


Fig. 1 CT and MRI of sigmoid sinus thrombosis

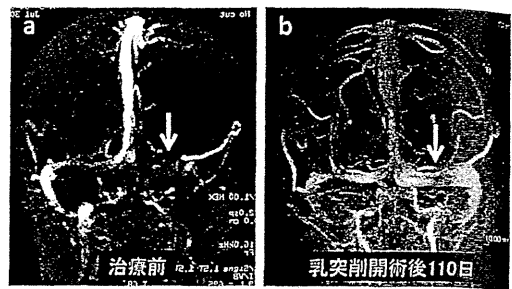


Fig. 2 MR venography before and after treatment of sigmoid sinus thrombosis

よる無信号域 (flow void) はなく、凝血塊として矛盾のない所見である。MR 静脈撮影像 (MR venography) (Fig. 2) では上矢状静脈洞から右の横静脈洞、S状静脈洞への流れはきれいに描出されているが、左側の横静脈洞からS状静脈洞は全く描出されていない (Fig. 2: a↓)。

治療とその経過：患児到着4時間後に全身麻酔下に左乳突削開術を行った。乳突蜂巣は炎症性肉芽で充満しており、削開中には肉芽から通常より遥かに強い出血があったが削開が完了すると出血もほぼ停止した。S状静脈洞内にはゼリー状の凝血塊が充満していた。静脈開窓部を閉鎖し、上鼓室から鼓室への交通路も清掃、確保して手術を終了した。手術により左中耳炎は完治し、術後110日では左S状静脈洞の再疎通が確認された (Fig. 2: b↓)。

解 説：S状静脈洞血栓症は急性および慢性中耳炎や頭部外傷の重篤な合併症の一つであり²⁾、対応が遅れると死亡に至る場合もある。本症の診断は臨床症状とCT、MRI検査による。CTではS状静脈洞の造影効果のない拡大が診断の鍵になり、S状静脈洞そのものは内部の血栓によってやや高濃度となる。同じCT検査でも、側頭骨ターゲット撮影ではウィンドウ幅が広く設定され、血栓と周囲の脳脊髄液や小脳などとの濃度コントラストがつかないので注意を要する。血栓症の画像ではMRIの有用性が高いが、発生から時間が経つと共にT1およびT2強調像での信号強度パターンが変化してゆくの時間に応じて読影しな

なければならない。また、S状静脈洞血栓症では特にMR venographyによる静脈の状態観察が有用である^{3,4)}。治療では、早期の乳突削開による中耳炎の外科的制御が有効であり、本章の治療の基本は乳突削開と考える。本例でも、乳突削開と上鼓室の肉芽清掃のみで治癒し、S状静脈洞の再疎通が得られた。

症例2：23歳男性

主訴：左顔面神経麻痺と難聴、耳鳴

現病歴：左錐体尖真珠腫による顔面神経麻痺、難聴、耳鳴で、7年前に側頭開頭と経乳突法によって真珠腫を摘出し、画像により経過を観察していた。

側頭骨ターゲットCT所見：左錐体の中央部分に手術による骨欠損が見られるが (Fig. 3: a ↓)、軟部組織の内部構造は見分けられない。

造影MRI所見：錐体の骨欠損内側部分に、やや低信号で周囲が膜状に造影される領域があり、真珠腫 (遺残性再発) とその母膜と診断した (Fig. 3: b ↓)。

non-EP 拡散強調MRI：左錐体尖部に塊状の亢進号部分があり、真珠腫と診断できる。また、その外側に小さな高信号腫瘍が2個同定される。

手術所見：左側頭開頭で錐体尖部に到達した。大きな再発真珠腫塊の外側に、硬膜に接して小さな真珠腫塊も確認され、内側の大きな真珠腫とともに剥離、全摘出した。

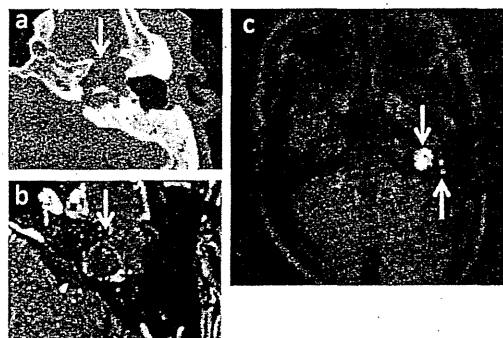


Fig. 3 Follow-up CT and MRI of petrous apex cholesteatoma

解説：真珠腫のMRI診断には、従来、単純のT1強調像とガドリニウム造影T1強調像の比較、あるいはecho-planar法による拡散強調画像が用いられていたが、近年、同法を用いない拡散強調画像：non-EP-diffusion-weighted MRIの高い診断能力が報告されるようになった⁵⁾。症例2のFig. 3: cでも分かるように、non-EP法はecho-planar法の画像に比べて歪がほとんどなく、小さな真珠腫も検出することができる。今後は、この方法と側頭骨CTの組み合わせが真珠腫の画像診断の中心となってゆくと考えられる。

2. 側頭骨外傷

側頭骨外傷は交通外傷や転落事故、転倒、暴力、銃創などで生じる。初期診療では、まず気道の確保、呼吸、循環、中枢神経機能の評価、体温管理を行い (primary survey)、次いで身体全域の受傷状態を検索する (secondary survey)。側頭骨骨折の診断は、このsecondary surveyに位置づけられ、それに基づいて根本治療 (definitive therapy) に進む⁶⁾。

本症の画像検査では側頭骨高分解能CTが第1選択で、骨折線が錐体の長軸に対して平行であれば縦骨折、直交していれば横骨折と分類されるが、縦骨折の頻度が高く全体の70から90%を占める。機能的観点から側頭骨骨折を迷路骨折の有無で大別する方法も唱えられている⁷⁾。迷路骨折があると基本的に同側の聴覚、末梢前庭機能が完全に失われる。一方、脳組織の損傷についてはsoft-tissue window撮影の頭部CTで急性期の判断を行い、必要に応じて軟部組織コントラストに優れたMRI検査を行う。

症例3：60才 女性

乗用車と接触し、5m引きずられてそのまま車の下敷きになった。当院からドクターカーが出動し、45分後に負傷者とともに帰還。初期診療で状態をひとまず安定させた上で、画像検査が行われた。

頭部CT所見：右中頭蓋窩に厚さ約1cmの急性硬膜

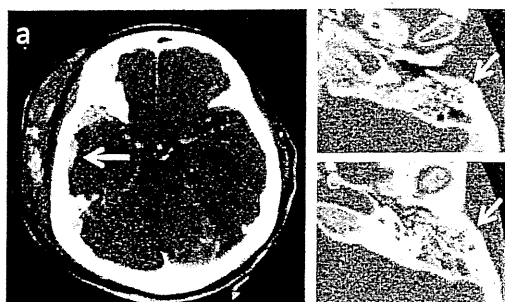


Fig. 4 Brain and temporal bone CT of severe head trauma

外血腫 (Fig. 4: a ←), 左側頭骨から眼窩上縁の骨折を認めた。硬膜外血腫は脳の圧迫が乏しかったので脳神経外科で保存的に経過観察となった。胸部CT, 腹部CTでは異常所見なし。両側下腿X線像で, 骨折なし。

全身状態が回復, 安定し, 顔面の腫脹が軽快した受傷後11日の時点で, 左顔面神経麻痺, 左難聴が明らかとなり, 耳鼻咽喉科受診となった。

側頭骨ターゲットCT所見: 骨折線が左乳突部から骨部外耳道, 顎関節窩を経て内側前方に走行しており (Fig. 4: b, c ←), 乳突部から鼓室まで, 中耳腔には軟部組織陰影が充満している。外耳道後壁の骨片が割れて前方の外耳道内に突出しており, 耳小骨連鎖ではキヌタ・アブミ関節が離断してキヌタ骨長脚が前方に変位していた。骨折線は骨迷路から離れており, 顔面神経管の破壊や断裂は見られない。

治療経過: 臨床症状から, 内耳障害はなく, 難聴は伝音系の問題であり対処は急がないが, 顔面神経麻痺が高度であったので, まず顔面神経減荷術を行い, 同時に外耳道, 鼓膜, 耳小骨連鎖の状況を観察する手術計画とした。

受傷18日後に左顔面神経減荷術・鼓室試験解放術を行った。外耳道後壁骨が破壊され, 鼓膜も一部穿孔があり, 耳小骨連鎖はキヌタ・アブミ関節で離断し, 周囲に肉芽形成が見られた。乳突部にも血腫と肉芽が充満しており, これらを除去, 清掃した。顔面神経管を膝神経節から鼓室部, 乳突部全域にわたって露出, 減荷した。顔面神経管の

破損, 骨片等による神経の圧迫などは確認されなかったが, 術中の顔面神経電気刺激で顔面筋の反応は見られなかった。この手術で外耳道と鼓膜, 中耳の創傷が治癒, 回復を待ち, 6か月後に第2段階手術で伝音再建を行った

解説: 側頭骨外傷では, 創部の感染には局所処置と抗菌薬の投与, 出血には局所止血処置や止血薬の投与, 髄液漏には頭部高位での安静などで, まず保存的に対処し, 各々効果がなければ手術で対処する。機能検査では全ての脳神経をチェックし, 症状に応じて個々の精査を行う。聴覚については, 純音聴力検査で感音難聴か伝音難聴かを鑑別する。伝音難聴には後でも対処できるが, 急性の感音難聴は時間とともに治療効果が低下するので, できるだけ早く音響外傷に準じた治療を行う。眼振の観察も重要で, 耳鳴とともに内耳障害の指標となる。瘻孔症状や変動する難聴など, 外リンパ瘻を示す所見があつて保存的に治らなければ内耳窓閉鎖術の適応となる。顔面神経麻痺に対しては問診が大切で, 即発性のものは重症例が多く, 遅発性のものは保存的治療で治る例が多いとされるが, 重度の外傷では受傷当初の状況が明確でなく判断に困る場合も少なくない。

3. 内耳奇形

先天性難聴に占める内耳奇形の割合は20%程度⁸⁾, 主要な原因の一つである。内耳奇形による難聴でも, 他の病因によるもの同様に早期診断, 早期介入が重要である。特に, 人工内耳が必要になる高度から重度の難聴例では, 単なる診断や分類だけでなく, 手術計画の観点からも奇形の正確な評価が必要である。我々の最近6年間の集計でも, 当科の難聴外来を受診した重度以上の先天性難聴小児91例, 182耳中, 画像診断で内耳奇形が確認されたのは20例, 39耳, 21.4%であり, Jacklerらの報告とほぼ同様の結果である。また, この20例中, 人工内耳手術に至ったものは内耳や蝸牛の無形成, 内耳道狭窄で手術非希望例の3例を除いた17例, 85.0%と高率であるが, これ

は重度難聴例で聴覚活用を進めて音声言語を習得するには、たとえ内耳奇形があっても人工内耳を使用する以外に有効な方法がないことによる。

内耳奇形のうち最も重篤なのは内耳が形成されない Michel 型奇形であり、次に位置づけられるのが蝸牛の無形成である。蝸牛と前庭両者の原器は形成されたが、その後の分化がないために内耳が単一の嚢状構造となっているものを common cavity 奇形と呼ぶ。前庭・半規管と蝸牛がはっきりと分れ、ともにある程度形成されるが、蝸牛において基底回転と上方回転の輪郭はあるものの、各々の隔壁や蝸牛軸が CT 上観察できないものを incomplete partition type I (IP-I) とする。さらに分化が進んだものが incomplete partition type II (IP-II) で、蝸牛が 1.5 回転以上形成され、基底回転と上方回転間の隔壁も明瞭であるが、基底回転より上の部分は嚢状である。蝸牛軸は基底回転で確認できる。IP-II の前庭系では半規管の奇形は軽微で、前庭の僅かな拡大がある程度であるが、前庭水管の拡大をとまなう。この所見は、Carlo Mondini が 1791 年に報告した内耳奇形症例の所見に合致する。Mondini 奇形は内耳奇形の中で最も有名なものであるが、この用語が現在まで必ずしも厳格な定義に沿って用いられてこなかったため、本来は異なる様々な奇形を一括して指すと理解されがちである。Sennaroglu の研究⁹⁾では IP-II という、最も軽い範疇に属する奇形を明確に定義することで、これが Mondini の報告例に正確に当てはまることを示しており、その点において Sennaroglu 分類の意義は大きい。

症例 4 : 3 歳 男児

新生児聴覚スクリーニングで要精査となり、近くの総合病院耳鼻咽喉科で精密検査を受けた。当科紹介初診時の聴力は右側が 120dB、左側が 110 から 120dB。新版 K 式発達検査での発達指数は、姿勢・運動 : 100、認知・適応 : 94、言語・社会 : 64 と、言語社会領域の選択的な遅滞があり、一般的な発達遅滞を伴わない難聴児として典型的な

プロフィールである。

症例 5 : 7 歳 女児

新生児聴覚スクリーニング検査で両側とも要精査、総合病院の耳鼻咽喉科で両側内耳奇形に伴う中等度難聴と診断された。3 歳 10 カ月時に精査および将来の人工内耳適応検討のために当科を紹介初診。平均聴力レベルは右 77.5dB、左 92.5dB で、両耳に補聴器を装着して順調に音声言語を習得しており、音声言語に歪を認めなかった。しかし、その後両側とも聴力悪化と改善を繰り返しながら徐々に聴力レベルが低下し、7 歳時に特に誘因なく両側聴力が悪化して両側聾となった。ステロイド治療と経過観察の後、左人工内耳埋め込み術を行った。術後の人工内耳による語音聴取は良好である。

IP-I と IP-II の違い

内耳奇形の診断において、IP-I と IP-II の鑑別は非常に重要である。これは、両者とも頻度の高い奇形であり形態的な差異が大きいにも関わらず、人工内耳による治療効果が大きく異なることによる。Fig. 5 に IP-I と IP-II の典型例を示す。IP-I (Fig. 5 : a, b) では、生下時から重度の難聴があり、基底回転と上方回転が分離せず、骨性の蝸牛軸が観察できない。上方回転が嚢状に融合している (Fig. 5 : b ↓)。人工内耳の効果は概し

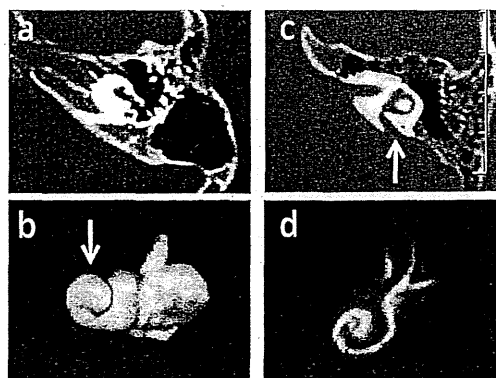


Fig. 5 CT and MRI of IP-I and IP-II inner-ear malformation

て不良であり、蝸牛開窓で gusher をきたす例が多い。一方 IP-II (Fig. 5 : c, d) では、生下時には一定の残存聴力を有して言語習得できる例が多く、生後に聴力悪化をきたす。蝸牛の上方回転が嚢状に融合しているが基底回転と上方回転が分離している (Fig. 5 : d)。骨性の蝸牛軸は CT で一部観察できる。また、原則として前庭水管が拡大している (Fig. 5 : c ↑)。人工内耳の効果は良好で、原則として手術時の gusher はない。

症例 6 : 1 歳 男児

生後 8 カ月時にインフルエンザ菌による細菌性髄膜炎に罹患し、小児科入院となった。抗菌薬とステロイド治療で髄膜炎は完治したが、退院前に内耳障害の有無確認のため聴性脳幹反応検査 (ABR) を行ったところ、右側の反応がないことが分かり、精査のため当科紹介となった。当科で ASSR 検査を行うと、左はほぼ正常であるが、右側の閾値は 70 dB (500 Hz) から 110 dB (4000 Hz) と上昇していた。しかし、DPOAE 検査では両側ともほぼ正常の反応が確認された。

側頭骨ターゲット CT 所見 : 右側では内耳道底から蝸牛軸への移行部、いわゆる蝸牛神経管の径が 1.7 mm であり (Fig. 6 : a 拡大写真 矢印)、左側の 2.4 mm (Fig. 6 : c 拡大写真 矢印) より明らかに狭い。その他の内耳、中耳には異常所見を認めない。

MRI 所見 : 右内耳道底部の神経を観察すると、

蝸牛神経の描出が不明瞭 (Fig. 6 : b 矢印) で、左側できれいに観察できる蝸牛神経 (Fig. 6 : d 矢印) との間に歴然とした差がある。また、内耳道径も右側 2.4 mm、左側 3.7 mm で、右側が若干狭い。解説 : 内耳道の前下部は内耳道底からやや奥まった構造になっているが、解剖学的構造としての神経管は存在しない。しかし一部の感音難聴例では、この部分が狭く、管状の構造を形成する。このような管状構造は bony canal for the cochlear nerve¹⁰⁾ として報告され、その後は単に cochlear nerve canal¹¹⁾ と呼ばれることが多くなった。CT 画像でその狭窄を伴う高度難聴例では MRI で蝸牛神経の低形成を認めることが多い。治療の観点からは、蝸牛神経管の狭窄、蝸牛神経の低形成があると人工内耳の効果不良が予測されるため¹²⁾、先天性感音難聴症例における臨床画像診断上の重要な着眼点である。

ま と め

耳の画像診断では、耳だけでなく頭蓋内や頭蓋底の合併症にも留意が必要である。診断のモダリティとしては側頭骨 CT が基本であるが、症状や、想定される疾患に応じて脳 CT、MRI、MR-venographyなどを併用する。観察目的を十分に考えて撮像法を選択することが大切であり、治療後の経過観察では低侵襲で簡便な方法を考慮する。

文 献

- 1) 内藤 泰 : 画像でみる耳の診断と治療 - 小児編, 国際医学出版, 東京, 2011
- 2) Zinis LOR, Gasparotti R, Campovecchi C, et al. Internal jugular vein thrombosis associated with acute mastoiditis in a pediatric age. *Otol Neurotol* 2006 ; 27 : 937-944.
- 3) van den Bosch MA, Vos JA, de Letter MA, et al. MRI findings in a child with sigmoid sinus thrombosis following mastoiditis. *Pediatr Radiol*. 2003 ; 33 : 877-879.

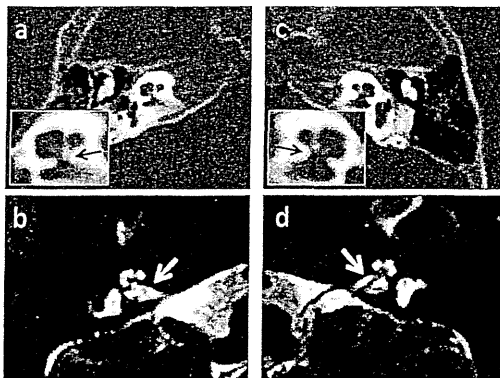


Fig. 6 Temporal bone CT and MRI of right cochlear nerve deficiency

- 4) Vazquez E, Castellote A, Piqueras J, et al. Imaging of complications of acute mastoiditis in children. *Radiographics*. 2003 ; 23 : 359-372
- 5) De Foer B, Vercruyse JP, Bernaerts, et al. : Middle ear cholesteatoma : non-echo-planar diffusion-weighted MR imaging versus delayed gadolinium-enhanced T1-weighted MR imaging-value in detection. *Radiology* 2010 ; 255 : 866-872.
- 6) 内藤 泰 : 側頭骨骨折 - 確実な診断法は? . 耳鼻咽喉科臨床フロンティア 急性難聴の鑑別とその対処. 高橋晴雄編, pp87-92, 中山書店, 東京, 2012
- 7) Greinwald Jr JH, et al : Temporal bone and skull base trauma. *Neurotology* Second edition. In Jackler RK and Brackmann DE (eds), Elsevier Mosby, Philadelphia, pp1070-1088, 2005.
- 8) Jackler RK and Luxford WM : Congenital malformation of the inner ear. *Laryngoscope* 97 : 2-14, 1987.
- 9) Sennaroglu L, Saatci I : A new classification for cochleovestibular malformations. *Laryngoscope* 2002 ; 112 : 2230-2241.
- 10) Fatterpekar GM, Mukherji SK, Alley J, Lin Y, Castillo M. Hypoplasia of the bony canal for the cochlear nerve in patients with congenital sensorineural hearing loss : initial observations. *Radiology*. 2000 ; 215 : 243-246.
- 11) Stjernholm C, Muren C. Dimensions of the cochlear nerve canal : a radioanatomic investigation. *Acta Otolaryngol*. 2002 ; 122 : 43-48.
- 12) Papsin BC. Cochlear implantation in children with anomalous cochleovestibular anatomy. *Laryngoscope* 2005 ; 115 (Suppl. 106) : 1-26.

連絡先 : 内藤 泰

〒 650-0047

神戸市中央区港島南町2丁目1-1

神戸市立医療センター中央市民病院

TEL 078-302-4321 FAX 078-302-7537

聴覚領域の検査

方向感・両耳聴検査

内藤 泰* 諸頭 三郎*

Yasushi NAITO Saburo MOROTO

● Key Words ● 方向感, 両耳聴, カクテルパーティー効果 ●

はじめに

聴覚に異常をきたす中枢疾患の診断において、CTやMRIなどの画像診断は極めて有用であるが、形態的異常を伴わない病態や、形態変化が明確にならない段階での疾患等を機能的側面から診断するには、個々の機能障害に応じた聴覚機能検査が大きな役割をはたす。また近年、人工内耳の両耳装用効果が注目されてきているが、この適否を検討するには各耳単独での検査を行うだけでは不十分で、両耳聴が関与する高次の聴覚機能も評価する必要がある。

本稿では、両耳で聴くことについての聴覚機能検査のうち、方向感と両耳聴検査についてまとめるとともに、両耳人工内耳の効果判定に用いられる検査についても自験例を含めて概説する。

I. 両耳聴の定義と生理学的意義

両耳聴 (binaural hearing) とは、音刺激が両方の耳に与えられる聴取状態を指す¹⁾。両方の耳で音を聴くと、片耳の機能が反対側にも加わるだけでなく、両耳からの聴覚情報が上オリーブ核より上位の中枢聴覚路で統合あるいは分離されることで、片耳では得られないより高次の聴覚情報が得られる。

両耳聴の効果としては、

- 1) 両耳で同じ音を聴いたときに片耳の場合より閾値が低下し、ラウドネス、明瞭度が向上する両耳加重現象 (binaural summation)
- 2) 両耳に与えられた同種刺激音に位相や時間

差がある場合に単一の音像ができる両耳融合現象 (binaural fusion)

3) 両耳に同時に与えられた異なる音刺激を分離して弁別できる両耳分離現象 (binaural separation/discrimination)

4) 音源の方向がわかる音源定位 (sound localization)

などが挙げられる²⁾。

これらの両耳聴機能は日常生活のなかでさまざまな効果として現れており³⁾、両耳で聴く方が片耳より若干音が大きく明瞭に聞こえ、背景雑音のある状態での音声聴取が改善し、多数の話者が同時に話している状況で1人の話者の音声を聴取することが容易になる(カクテルパーティー効果)⁴⁾。

II. 方向感の生理学的機序

音の定位 (localization ; auditory localization) は、音場において聴覚によって聴取者が感じる距離感と方向感を伴った音源の位置感覚と定義される¹⁾。音源定位は、頭部に対して垂直方向と水平方向に大別され、各々機序が異なる。垂直方向の定位は、主に頭部や耳介による音の反射や直達音との干渉など頭部の形態による音の修飾・変化(頭部伝達関数, head related transfer function : HRTF)を手掛かりとしており、水平方向の定位はHRTFに加えて両耳に到達する音の違いを利用する。音源定位の手掛かりとしては、これら以外にも対象音の音量や音色、音源と聴取者の間あるいは周囲にある物体による音の反射、吸収、遮蔽なども挙げることができる⁵⁾。

頭部に対する音源の位置に応じて、左右の耳で聴取される音の音圧(両耳間音圧差, interaural

* 神戸市立医療センター中央市民病院耳鼻咽喉科
(〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島中町2-1-1)

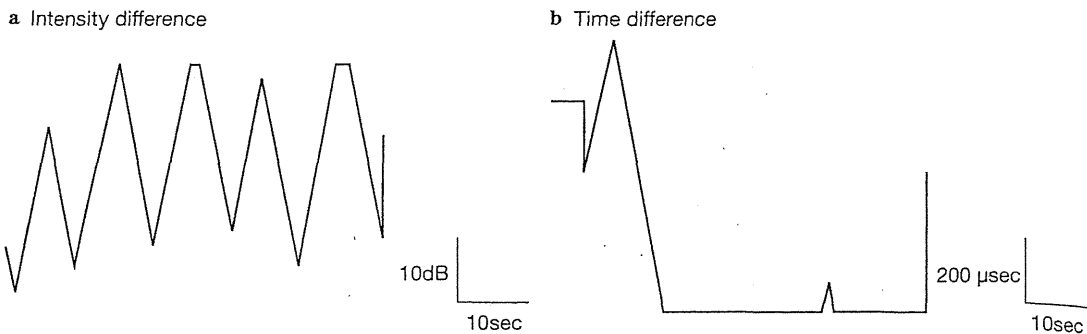


図1 小児 auditory neuropathy 例の両耳聴検査結果 (文献7より引用)
IID (a) では音像が一定の幅の中で定位できるが、ITD (b) では時間差が大きくなっても音像が定位できていない。

level difference : ILD あるいは interaural intensity difference : IID), 到達時間 (両耳間時間差, interaural time difference : ITD), 位相などに相違が生じる。ILD/IID は頭部に対して正中から横にずれた方向から音がやってきた場合、音源と反対側の耳が頭の影になり、音が回折して到達するので、直接到達する耳に比べてわずかに減衰した音を聴取するために生じ、この効果は音の周波数が高いほど大きい。一方、ITD は主に低周波数領域で音源方向の効率的な手掛かりになる³⁵⁾。両耳間の聴取音の相違は、これら種々の手掛かりを通じて、聴者周囲の空間そのものの認知に貢献する⁶⁾。

III. 方向感と両耳聴の検査

方向感の検査には、無響室内で被験者の周囲に多数のスピーカーを配置して行う方法と、ヘッドフォンを用いて両耳に入力する音の音圧やタイミングを変えて行う方法がある。

前者は HRTF も含んで、より自然な状況での検査であるが、無響室というスペースが必要で、さらに検査室空間内での音場の均一性やスピーカーの配置などに細心の注意を要する。また、このような音場検査では実際の音源を使用するので ILD/IID と ITD を独立して変化させることも困難である。

一方、ヘッドフォンを使用する検査は、頭蓋内に形成される音像の位置を被験者に応答させるも

ので、実際の音源の方向が変わるのでない分、非生理的であるが、普通の聴力検査室で実施可能であり、ILD/IID と ITD を別個に検査できる利点もある。例えばリオン社の聴力検査装置 AA-75 では ITD の検査が可能で、臨床的検査として実用的である。ITD 検査の臨床応用については多くの報告があるが、例えば Kaga らは、auditory neuropathy 症例で語音弁別能が純音聴力に比して不釣り合いに低下すると同時に、ILD/IID は感知できるが ITD による音像定位ができない事例を報告している (図1)⁷⁾。この例は、聴神経の病態が中枢聴覚路での時間分析を劣化させ、これが語音弁別能低下につながることを示唆し、興味深い。

IV. 人工内耳装用者での知見

両耳聴検査の意義が問われる病態の1つに、人工内耳の両側装用の問題がある。通常、人工内耳の効果を評価するためには静寂下の単音節/単語聴取検査などが行われるが、これらのように片耳でも良好な結果が得られやすい検査では両耳装用の本質的な効果を示しにくく、両耳聴の観点から種々の工夫が必要である。

両耳聴では加重効果があり、健常聴力者で 3~5 dB 程度閾値が下がるが、両側人工内耳では 1~2 dB とされる。方向感覚では ILD/IID と ITD が主に寄与するが、このうち ITD では左右のわずかな (健常聴力者で 70 μs 程度以下) 時間差が利用される。しかし、人工内耳電極アレーの刺激頻度は数

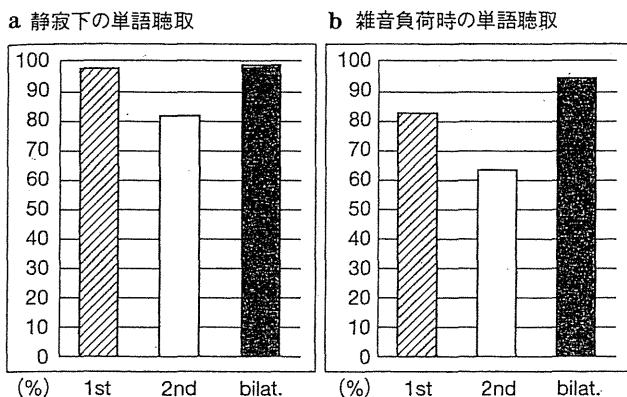


図 2 両耳人工内耳使用小児における静寂下 (a) および雑音負荷時 (b) の単語聴取成績

1st: 最初に手術した側の人工内耳単独での成績。

2nd: 2 回目の手術で埋め込んだ人工内耳単独での成績。

bilat.: 両側の人工内耳を使用して聴取した場合の成績。

百から 1000 Hz までであり、しかも通常は左右のプロセッサが独立して機能している。このため、両耳人工内耳の状態でもコードできる ITD は 1 ms のオーダーになり、方向感には活用できない。したがって、両耳人工内耳の方向感には主に ILD/IID によって得られていると考えられる。今後、両耳人工内耳で ITD を活用するためには、左右プロセッサを一体的に同期させた駆動が 1 つの課題になるであろう。

両耳聴の利点の 1 つに“カクテルパーティー効果”があり、人工内耳使用者の評価でもさまざまな方向から雑音と語音を同時に提示し、語音が弁別できる S/N 比や、一定の雑音レベルでの語音弁別能などが計測される。例えばわれわれの施設での両側人工内耳小児例 11 名 (検査時平均年齢 5 歳 11 カ月) の単語聴取検査 (図 2) において、初回手術の人工内耳単独、2 回目手術の人工内耳単独、両耳人工内耳の成績を比べると、静寂下の検査では初回手術耳単独と両耳装用で差が出ない。一方、正面の語音に対して左右 45 度の 2 方向から S/N 比 0 dB で加重不規則雑音を負荷した場合、単耳人工内耳での弁別能は初回手術の人工内耳単独が平均 82%，2 回目手術の人工内耳単独が平均 63% であるのに対し、両耳人工内耳では 94% まで改善し、このような検査ではじめて両耳人工内耳の効果が評価できる。

Dunn ら⁸⁾ は成人で単耳人工内耳使用者と両耳人工内耳使用者を比較し、語音 (単語) の音源に対して約 60 度離れた方向からスピーチノイズを

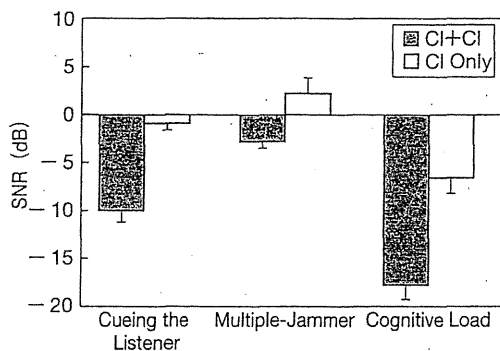


図 3 語音の音源に対して約 60 度離れた方向からスピーチノイズを負荷したときの単耳人工内耳使用者と両耳人工内耳使用者の比較 (文献 8 より引用)

語音聴取に側方の離れた角度の単一音源からスピーチノイズを負荷する条件 (左グラフ) では、両耳人工内耳使用者 (灰色) の方が単耳人工内耳者 (白) より低い S/N 比で語音弁別できるが、雑音源が 2 つになると成績が下がって両者の差が小さくなる (中央グラフ)。語音聴取に側方のノイズと、視覚的認知課題を同時に負荷する条件では両耳人工内耳の方が、より低い S/N 比で聴取可能である (右グラフ)。

負荷し、単語弁別成績が 50% になる S/N 比を求めている (図 3)。この実験では両耳人工内耳使用者では単耳人工内耳使用者に比べて 9 dB 低い S/N 比に耐えることが示された。雑音源が複数 (左右 2 個) になると全体の弁別成績が下がるが、この状態でも両耳使用者の方が単耳使用者より 5 dB 良好な成績になっている。興味深いのは、この単語弁別課題を視覚的認知課題と同時に負荷した場合で、単耳と両耳の差は 11 dB にもなっている。

日常生活では往々にして聴覚と同時に視覚その他多様な認知処理を並行して行う場面があり、両耳聴の機能を評価するにはこのような複数の認知課題の負荷も考慮すべきである。

両耳人工内耳のカクテルパーティー効果については、否定的意見もある。Loizouら⁹⁾は雑音負荷下の語音弁別検査をいくつかの条件で行い、妨害雑音が単独で目的音源と離れた角度にあるときは両耳人工内耳の効果が得られるが、雑音原が複数になると単耳と両耳の効果の有意差がなくなり、“カクテルパーティー効果”という観点からは日常生活上でのメリットが少ないと結論している。その機序として、上述したように現在の人工内耳ではITDが活用できない点が大いだが、両耳人工内耳でIID/ILDは活用可能であり、聴覚機能から見た両耳人工内耳の利点と限界を評価するには、さらに精緻な検査が必要であろう。

まとめ

- 1) 両耳聴には両耳からの聴覚情報の加重、融合、分離、さらに音源定位など単耳聴では得られないさまざまな機能がある。
- 2) 方向感覚（音源定位）には多様な音響的手がかりが活用されるが、特に水平方向の定位には両耳で聴取される音のILD/IIDとITD

が重要な役割を果す。

- 3) 両耳人工内耳の効果においても限定的ではあるが両耳聴機能が寄与し、その有効性の評価には両耳聴も勘案した検査が必要である。

文献

- 1) 日本聴覚医学会用語集 (2011.9.16). *Audiology Japan* 55 : 698-738, 2012.
- 2) 野村恭也, 加我君孝 : 第3章8) 聴覚伝導路と聴皮質中枢. *新耳鼻咽喉科学*, 野村恭也 (監), 加我君孝 (編), 42-44頁, 南山堂, 東京, 2013.
- 3) Moller AR : Chapter 6, 7 Directional hearing. *Hearing-Anatomy, Physiology, and Disorders of the Auditory System*. 2nd ed, pp142-150, Academic Press, 2006.
- 4) Haykin S, Chen Z : The cocktail party problem. *Natural Comput* 17 : 1875-1902, 2005.
- 5) 森 浩一 : 音源定位. *CLIENT* 21, 第10巻 感覚器, 本庄 巖 (編), 54-64頁, 中山書店, 東京, 2000.
- 6) Blauert J, Lindemann W : Auditory spaciousness : some further psychoacoustic analysis. *J Acoust Soc Am* 80 : 533-542, 1986.
- 7) Kaga M, Kona K, Uno A, et al : Auditory perception in auditory neuropathy : Clinical similarity with auditory verbal agnosia. *Brain Dev* 24 : 197-202, 2002.
- 8) Dunn C, Noble W, Tyler R, et al : Bilateral and unilateral cochlear implant users compared on speech perception in noise. *Ear Hear* 31 : 296-298, 2010.
- 9) Loizou PC, Hu Y, Litovski R, et al : Speech recognition by bilateral cochlear implant users in a cocktail-party setting. *J Acoust Soc Am* 125 : 372-383, 2009.

* * *

聴覚

鳴頭輝 狩野章太郎 山唄達也

はじめに

聴覚は、空気を媒質とした疎密波である音を電気信号である神経の活動信号に変換し、音の強弱、音源の左右の定位、音色、音声言語等の様々な情報を認識する働きである。この機序には大きく分けて伝音系と感音系がある。伝音系の働きは、外耳における共鳴効果による増幅効果と、中耳におけるインピーダンス整合による空気の疎密波から液体である内耳液の疎密波への変換の働きに分けられる。感音系の働きは、内耳での液体の疎密波から神経の活動電位への変換と、延髄から視床を経て大脳皮質に至るまでに行われる情報伝達の処理に分けられる。

聴覚器の解剖

聴覚器は大きく外耳、中耳、内耳に分けられる。外耳は耳介軟骨に支えられた皮膚のヒダで、鼓膜に至るまでの外耳道を形成している。中耳は主に鼓室、耳小骨からなる。鼓膜は、外耳道からつながる重層扁平上皮、線維束、中耳粘膜から連なる単層扁平上皮の3層からなる。鼓室は耳小骨を入れた空洞となっており、内部は粘膜に覆われている。耳小骨はツチ骨・キヌタ骨・アブミ骨の3つの骨がそれぞれ関節で連合し、耳小骨連鎖を形成している。また、ツチ骨前突起には前ツチ骨靭帯が、キヌタ骨短突起には後キヌタ骨靭帯が鼓室に固定されており、耳小骨連鎖の振動の回転軸としての意味を持っている。内耳は蝸牛・前庭・三半規管が互いに交通し、内外リンパを満たした膜迷路を形成している。

伝音系の働き

外耳の共鳴効果は、一端が鼓膜で閉鎖された共鳴管としての働きによるもので、2.5~4 kHzの間に約10 dB程度

の増強効果がある。この効果は、ヒトでみられる気導聴力の周波数毎の感度差の一因とされている。耳介自体には集音の働きはないが、両耳に到達する音の周波数・位相が変化することで音源の立体的な定位に役立っている。

中耳でのインピーダンス整合は、空気から液体である内耳の外リンパに疎密波を変換する働きを持つ。空気の疎密波が液体に達した場合、そのエネルギーの大部分は空気・液体の境界で反射されてしまい、液体に伝わるエネルギーはわずかとなってしまふ。この問題を解決するため、中耳ではツチ骨、キヌタ骨、アブミ骨の耳小骨連鎖・耳小骨靭帯の形成するテコ比・面積比によって、空気の振動を効率的に液体の振動に変換している。ツチ骨、キヌタ骨の間にはテコのような作用があり、長さにして1.3:1程度、約2.5 dBの増強効果がある。また、空気振動を受ける鼓膜の面積と液体振動を伝えるアブミ骨底の面積は17:1程度、約25 dBの増強効果がある。以上、合計27.5 dBの増強効果によって、中耳では、空気の疎密波が液体である内耳の外リンパの疎密波に効率的に変換されている。

感音系の働き

内耳液での疎密波が神経の活動電位に変換されるのは、蝸牛基底板・有毛細胞の働きによる。

中耳より変換された内耳外リンパの疎密波は基底板を振動させる。この振動は、基底板の特徴的な形状により、周波数によって異なった基底板の部位に最大振幅を生じさせる。これは進行波と呼ばれ、高音では基底回転に近い部位で、低音では蝸牛頂に近い部位で最大振幅が生じる。ここまでは内耳伝音系と呼ばれており、外有毛細胞や神経細胞による能動的な作用がなくても、おおまかな周波数特性を持つ。

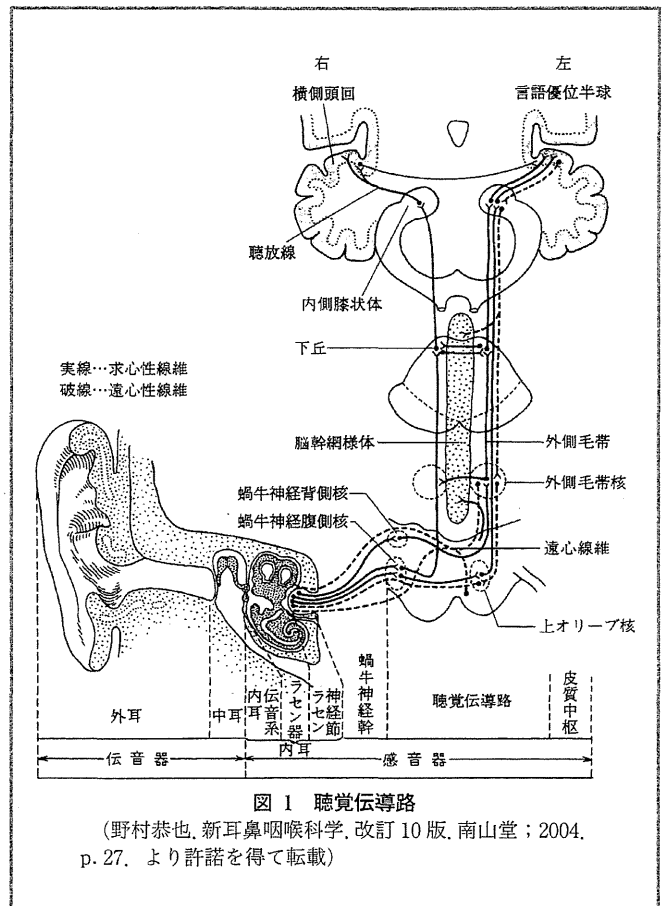
基底板上に生じた振幅は、基底板に接触している有毛細胞との間にずれ運動を引きおこし、有毛細胞の聴毛を屈曲する。外有毛細胞の聴毛は蓋膜にささるように保持されて

かがしら てる 東京大学/耳鼻咽喉科学
 かりの しょうたろう 同 特任講師
 やまそば たつや 同 教授

おり、基底板振動により直接ずれが生じる¹⁾。内有毛細胞の聴毛は蓋膜とは接していないが、この間の内リンパの流れにより聴毛が屈曲する。聴毛の屈曲により、聴毛の tip-link の付け根に存在するイオンチャンネルが開き、カリウムイオンが流入して脱分極が生じる^{2,3)}。聴毛を最長側に屈曲させた時に細胞は最も刺激され、聴毛の周期的な屈曲により脱分極・過分極が繰り返される⁴⁾。この働きにより機械的エネルギーが電気的エネルギーに変換される。外有毛細胞は膜電位の変化により機械的に伸縮する働きがあり、基底板での振動をさらに増強し、周波数弁別能を高めている。この外有毛細胞の働きは基底板・前庭窓・耳小骨・鼓膜と通常とは逆向きに伝わり、耳からマイクロホンとらえることができる(耳音響放射)。

蝸牛は内リンパ、外リンパの2種類の細胞外液で満たされている。外リンパは通常の細胞外液とほぼ同じようなイオン組成であるが、内リンパはカリウムイオンが約140 mM と高濃度、ナトリウムイオンは約10 mM と低濃度であり、カルシウムイオン濃度は非常に低くなっており、外リンパと比べて約80 mV と高電位になっている⁵⁾。基底板に存在する有毛細胞は、感覚毛を有する頂上の膜のみを内リンパに接しており、音刺激の発生時に感覚毛に有するチャンネルがわずかに開くだけで大量のカリウムイオンが有毛細胞内に流入し、刺激に対し敏感に反応することができるようになってきている。また、このチャンネルは無音時でも10%程度開口しており、音に対する感度が上がるようになってきている。この内リンパ・外リンパ間のイオン濃度差・電位差は、血管条によるカリウム・ナトリウムの能動的な輸送とタイトジャンクションによる働きによるものである⁶⁻⁸⁾。

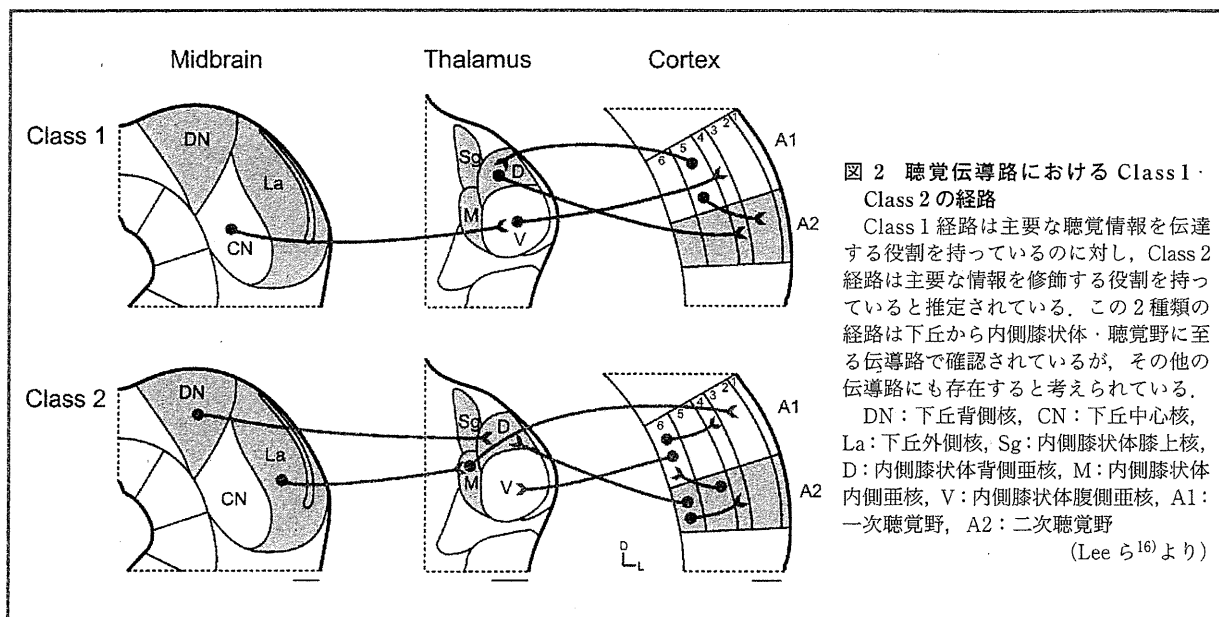
有毛細胞の直下では蝸牛神経の樹状突起が神経終末となってシナプスを形成しており、有毛細胞からの神経伝達物質をスパイク放電に変換している。音の入力により有毛細胞からの神経伝達物質が増加すると、スパイク放電の頻度が上昇し、高位ニューロンへと情報を伝達する。各神経線維には最も鋭敏に応じる周波数があり、特徴周波数と呼ばれている。この周波数の幅は音圧によって異なる。低音圧では蝸牛の周波数特性と変わらないが、音圧が上がると蝸牛神経から上位のニューロンになるに従って、それぞれの神経線維の応じる周波数範囲は鋭くなり、内側膝状体で



完成される。

音刺激の神経活動信号の処理

蝸牛軸内に存在するラセン神経節から蝸牛神経背側核・腹側核、上オリーブ核、外側毛帯、下丘を経て内側膝状体に至るが、この経路中で左右での時間差、音圧差、周波数成分の差等の検出が行われている。哺乳類では内側上オリーブ核で左右の時間差情報が検出されており、シナプスにより形成された遅延回路により両耳間の時間差が神経の発火頻度にコードされていると推定されている⁹⁾。また、左右の音圧差は外側上オリーブ核で行われていると考えられ、同側の音で興奮し、対側の音で抑制される細胞により音圧がコード化されると考えられる¹⁰⁾。周波数成分の差は蝸牛神経背側核、下丘により行われている。音源が移動すると耳介によって周波数成分にノッチが生じ、下丘には特定の周波数帯が弱くなると特異的に興奮する細胞が存在す



るため、音源の定位として知覚できる¹¹⁾。以上の、左右の時間差、音圧差、周波数成分の差等が下丘で統合され、上丘では聴覚と視覚との情報が統合され空間地図が認知されていると考えられている。

下丘は、視床の神経核である内側膝状体に情報を入力するとともに、上位神経核から抑制性の入力を受けている。内側膝状体でも、下位である下丘から周波数・音圧・両耳間の差についての情報を受け取るとともに、視床網様核・大脳皮質と入出力の経路を持ち、ネットワークを形成している。

内側膝状体・視床網様核・大脳皮質が形成する回路は内側膝状体での下丘からの情報を修飾し、時間軸に沿って情報を処理し、大脳皮質に伝達する役割があると考えられる。内側膝状体は音反応に特化した神経核であると考えられてきたが、近年、ラット等における実験から、その一部は体性感覚や視覚といった異種の感覚により影響を受けていることが分かってきた。

内側膝状体は腹側亜核(MGBv)、内側亜核(MGBm)、背側亜核(MGBd)、膝上核(SG)に大きく分けられ、それぞれにおいてニューロンの細胞膜特性や細胞形態に違いがある。MGBvには白色雑音刺激に対し、短い潜時で反応するSL細胞と長い潜時で反応するLL細胞が認められており、SL細胞は下丘から音刺激に対する興奮性の刺激を受け

取っているのに対し、LL細胞は音刺激により誘発される内側膝状体・視床網様核・大脳皮質のループの活動に応じて興奮が左右されると考えられている^{12,13)}。この働きにより、大脳皮質の高次の情報が内側膝状体で聴覚情報に重み付けされていると考えられる。また、聴覚刺激への報酬による重み付けはMGBdにおいても認められており、MGBvでは体性感覚によって音刺激に対する反応が抑制される現象が確認されている¹⁴⁾。内側膝状体のいずれの亜核においても、下丘よりの音刺激の感覚入力と、先行して処理された感覚入力とがループ回路によって処理されており、それらに加えて大脳で処理された高次の情報の入力や視覚・体性感覚といった異種の感覚入力が影響し、周波数・音圧といった情報を処理し、一次聴覚野・二次聴覚野に伝達する働きを持っていると考えられる。

内側膝状体からは聴放線が形成され、同側の聴覚野に至っている。一次聴覚野は側頭葉の背側面にある横側頭回に存在し、Brodmannの41野にあたる。後方から前方に向けて低音から高音に反応する領域が配列し、ここにおいても周波数局在性が認められている。この一次聴覚野でも、視覚・触覚といった異種の感覚に応答する細胞による多感覚応答が見出されており¹⁵⁾、他の感覚との結合についても徐々に明らかになっている。

聴覚中枢の神経経路には、神経細胞の生理学的な特徴に