

2つの耳(両耳聴)と 2つの眼(立体視)と頭部の運動

加我君孝 竹腰英樹 小村 豊*

IRYO Vol. 63 No. 9 (545-557) 2009

要旨

2つの耳は両耳聴, すなわち音源定位やカクテルパーティー効果を担当し, 2つの目は両眼視, すなわち立体視や奥行知覚を担当する。

哺乳類の耳介はマウスからネコやウマ, チンパンジーやヒトまで頭部の左右の横に付着している。左右の耳介はそれぞれ左右の聴空間(耳介がカバーする音の空間)を単独に担当する。頭部の前方や後方の音は両耳による音源定位の能力を使う。耳と耳の間の距離は, ヒトでは約15cmであるが, 眼と眼の距離は約6cmである。ヒトでも頭部の小さい赤ちゃんはその半分ほどにすぎない。この左右の耳の距離が大きいほど, 音源定位に効果的である。

ヒトの耳介は動かすことはできないが, 大型動物のウマやシマウマ, シカなどは耳介を動かし, 耳介を自在に動かすことでも聴空間を作ることができる。ヒトの場合は首を動かすことで聴空間を自由に実現する。

哺乳類の眼はマウスやモルモット, ウシやウマは, 耳介同様頭部の横についているので, それぞれの眼が視空間を担当している。両眼視をするため頭部を動かす。後方を見る場合も頭を動かして見るしかない。ネコや霊長類やヒトの眼は鼻先が短く平たい顔の前方についている。初めから両眼視が自由にできるようになっている。眼が顔の横にある動物は片目でじっと見つめ, 頭を動かしてスキヤニングすると補うことができる。

頭部運動は2つの耳と2つの眼の働きをコーディネートしている。すなわち音源の方向へ頭部に回すと生じる前庭眼反射により, 見るべき物体をぶれることなく固視できる。すなわち, 左右の三半規管による, 前庭眼反射が両眼視を助けている。

2つの耳と2つの眼を生かすことは, 音と映像の基礎研究も商業ベースの応用でも大きく発展している。すでに3Dの映画はIMAXの大画面で経験できる。身近なテレビでも技術開発がされている。普通の映画やテレビは3次元であるわれわれの世界を技術的制約のため聴覚は擬似的な3次元, 視覚は2次元で再現しているにすぎない。おそらく技術開発はこれにとどまることなく, まず触覚, さらに化学感覚の味覚や嗅覚も再現する技術開発がなされるであろう。現実のわれわれの世界では知らず知らずのうちに五感を同時に利用しているが新たな感覚と脳の統合時代も来るであろう。

キーワード 両耳聴, 立体視, 知覚, 認知

国立病院機構東京医療センター・臨床研究(感覚器)センター *産業技術総合研究所
別刷請求先: 加我君孝 国立病院機構東京医療センター・臨床研究(感覚器)センター
〒152-8902 目黒区東が丘2-5-1

(平成21年4月30日受付, 平成21年7月10日受理)

Binaural Hearing, Binocular Vision and Eye Head Coordination

Kimitaka Kaga, Hideki Takegoshi and Yutaka Komura*, NHO Tokyo Medical Center, *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Key Words: binaural hearing, binocular vision, perception, cognition

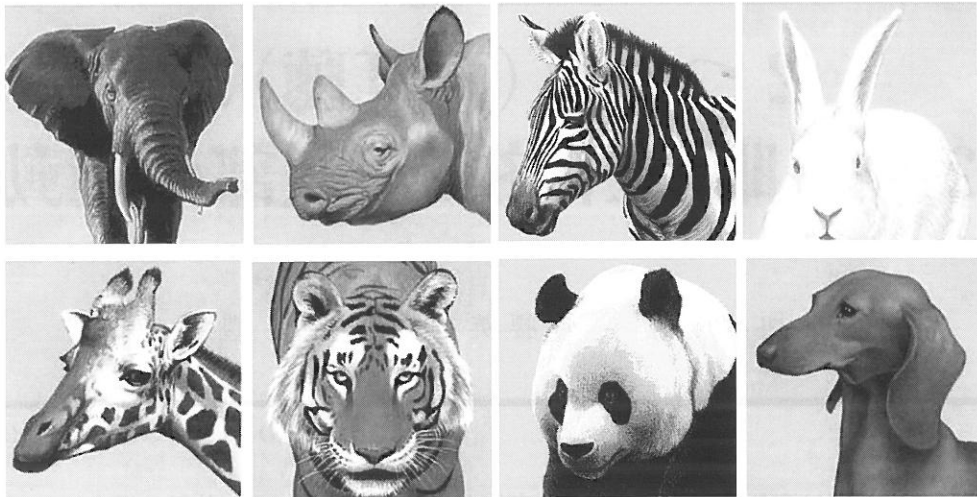


図1 動物の耳と眼の位置

上段：耳は左右に付着しているが、眼は顔の横にある動物

下段：耳は左右に付着しているが、眼は顔の前にある動物（須山補聴器(株)提供）

はじめに

哺乳類の耳介はマウスからネコやウマ、チンパンジーやヒトまで頭部の左右の横に付着している（図1）。なぜ横についているのか？左右の耳介は左右の聴空間（耳介がカバーする音の空間）を単独に担当する（図2）。頭部の前方や後方の音は両耳を使う音源定位の能力を使う。耳と耳の間の距離は、ヒトでは約15cmである。一方、眼と眼の距離は約6cmである。ヒトでも頭部の小さい赤ちゃんはその半分ほどである。この左右の耳の距離が大きいほど、音源定位に効果的である。図3にHeffnerら¹⁾による各種哺乳類の音源定位の角度を示した。音源定位に鋭い動物はイルカ・ゾウ・ヒト、鈍感な動物はマウス・ラット・ウマ・ヤギである。

ヒトは耳介を動かすことはできないが、大型動物のウマやシマウマ、シカなどは耳介を動かす、聴空間を耳介を自在に動かすことで作る事ができる。ヒトの場合は首を動かすことで聴空間を自在に実現させる。

哺乳類の眼はマウスやモルモット、ウサギやウマでも、耳介同様頭部の横についているので、それぞれの眼が視空間を担当している（図4）。両眼視をするため頭部を動かす。後方を見るには頭を動かして見るしかない。ネコや霊長類やヒトの眼は鼻先が短く平たい顔の前方についている（図5）。初めから両眼視が自由にできるようになっている。なぜ眼が顔の横についている動物と顔の前についている動

物があるのか？

眼と眼で見つめ合って話をする事は、ヒトでは重要視される。相手の眼を見ないで話すことは心理的反映の一つである。サルもチンパンジーもゴリラなど知能の高い霊長類はコミュニケーションを補うために両眼で見つめ合うことが重要なのであろう。鳥ではフクロウやミミズクも同様顔の前に目がある。眼を合わせるとフクロウも深いことを考えているように錯覚する。眼が顔の横にある動物は片目で見つめ合い、頭を動かしてスキヤニングして補うことができる。

寺田寅彦は「耳」と「眼」について以下のように指摘している²⁾。

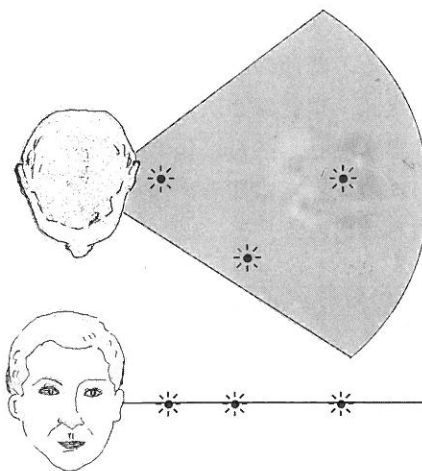


図2 聴空間の解説

片耳による受容可能な左右の拡がりと前後の距離の感を示す

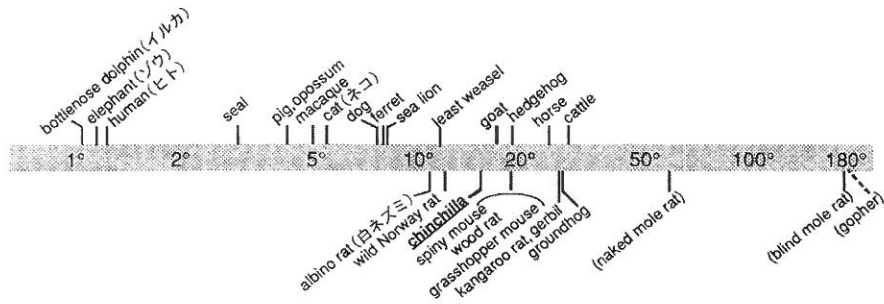


図3 哺乳類の音源定位の閾値
100msec あるいは400msec のノイズバーストによる反応
(Heffner RS et al : 1994¹⁾より)

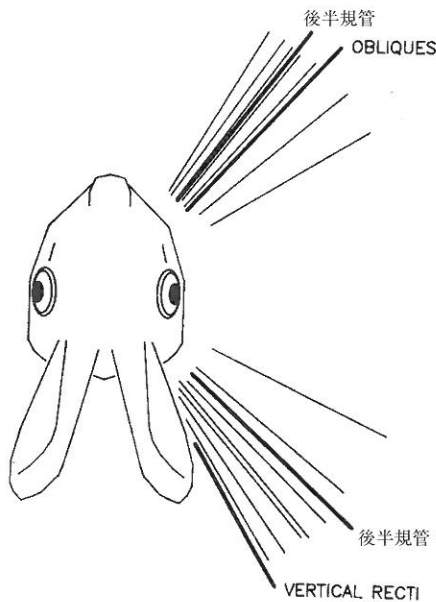


図4 ウサギの視空間と三半規管の位置

「耳も目も、いづれも二つずつ、吾々の頭の頂上からほぼ同じ距離だけ下がった^{われわれ}ところ^{ところ}に開いて居る。目の方は前面に二つ並んでほぼ同じ方向を向いて居るのに耳の方は両側^{だいたい}に於て反対^{はんたい}の方向に向いて居る。尤も^{もっと}耳^{みみ}だがある為^{ため}に各方^{あらゆる}の耳が精確にどちらに向いて居るかといふ事はさう簡単には云はれないが、併し、此の平凡な事實は考へて見ると色々な面白い意義をもつて居る。

二つずつあるのは空間^{ちかく}知覚^{ちかく}の為^{ため}であって、二つの間の距離が空間を測量するための基線(ベースライン)になるのである。耳と目が同じ高さにあるの視覚空間と聴覚空間との連絡、同格化(コーオルディネーション)の為に便利であらうと思はれる。ところが光線^{でんぱ}傳播は直線的であるので二つの眼が同時に対象^{たいしやう}に向つて居なければならぬ。従つて、二つが前面に並んで居ないと不都合である。之れに

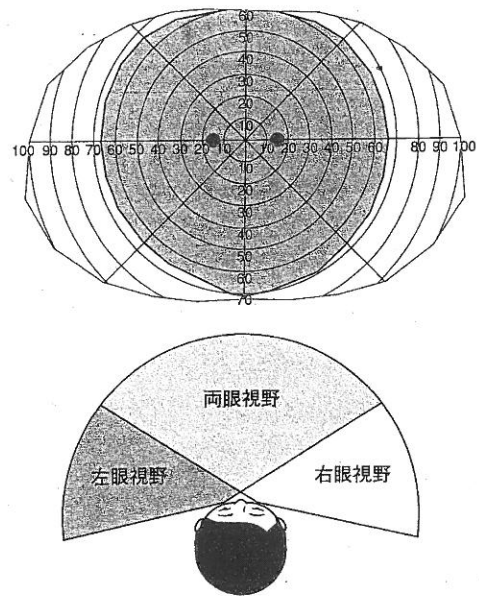


図5 ヒトの両眼視野

各眼の視野の重なりが両眼視野で、融像(周辺および中心)が行われる(久保田伸枝: 2005¹⁰⁾より転載)

反して音の場合には音波が頭で回折されるから、一つの耳の反対の側から来る音でも其の耳に到達する。併し正面から来る音よりは弱く聞こえるのである(図6)。それで音源の方向を知るには寧ろ^{むしろ}両耳が頭の反対の側にある方が好都合な譯になるのである。(原文ママ)」

空間認知には2つの耳と眼の どちらが先に働くか

アフリカのサバンナは弱肉強食の動物の世界である。群れで動く、弱い動物は強い敵を警戒して注意を怠らない。孤立して生きる強い動物は、生きるために弱い動物を狙うが、簡単には捕まえることはで

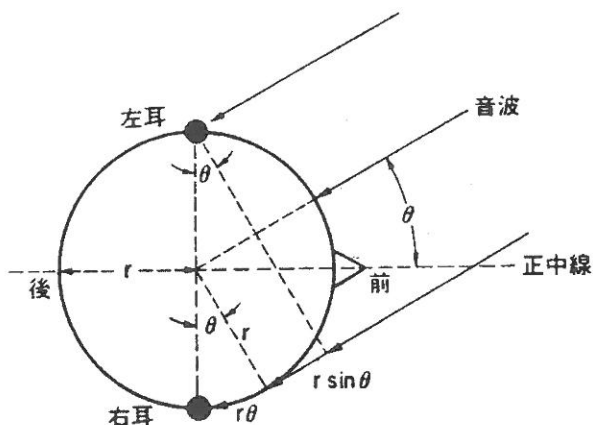


図6 方向感成立のための左右の耳のパラメータ
左右の耳に届く音は音源が正中よりずれていると、物理的に差の生じることを示す(菅乃武男:1986⁵⁾より)

きない。サバンナの動物は両耳介をレーダーのように動かし、方向感により敵の動向を探る。群れのリーダーは敵をキャッチすると首を動かし、両眼視でその存在を確かめ、敵の位置と距離を測定し、群れにとどまるか逃げるか、声を出して指示をする。その逆もある。視界の中に突然敵が見つかる場合がある。敵の動きにともなう走る音や声を耳介でキャッチし、眼と耳で判断して逃げるか戦うか行動を決める。このように首を左右上下に動かしながら、両耳と両眼で認知し、仲間とのコミュニケーションをとる。これはヒトも同様であるが、耳と眼はその場に応じてどちらも先になり得る。それは状況による。

1. 聴覚

左右の耳や眼から入った情報は、中枢の聴覚伝導路を上行し、正中で交叉して反対側をさらに上行して大脳皮質の知覚中枢で認知される(図7)。一方同側に上行する伝導路がある。どこで交叉し、どのくらいの割合で交叉しているのだろうか。

脳の中の聴覚伝導路の解剖で生理が明らかになったのは20世紀になってからである。各中継核のなかでニューロンの分布がみかけ上も不思議な形態をとっているのが上オリブ核である。これは外側核と内側核からなり、外側核はS字状の形をしている。脳の中にはこのような形態をとる核は他にはない。1953年 Stotler³⁾は、上オリブ核内側核は、両耳に届いた聴覚信号が初めて出会う部位であることを見出した。

図8に Horseradish Peroxidase (HRP) に染まったニューロンの強拡大を示したが、きわめて樹状突起の多いことがわかる。両耳聴のためであろう。

1959年、Galambosら⁴⁾は内側核のみが両耳より入力を持ち、30%は両耳からの反応のみに刺激に応じ、残りの70%は反対側耳からの刺激のみに応じることを見出した。Van Bergeijk⁵⁾は、次のようなモデルを提唱した。「片側の蝸牛神経核より上行する神経線維は2つに分かれ、1つは反対側の内側上オリブ核へ、他は同側の内側上オリブ核へ到達す

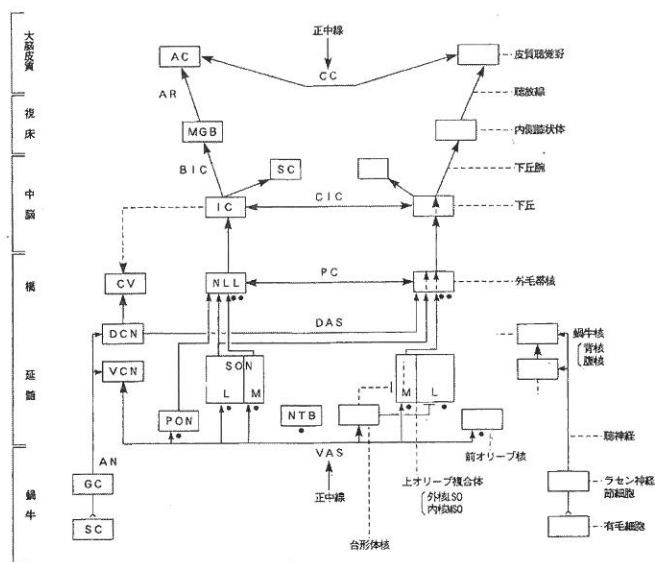


図7 上行性中枢聴覚伝導経路

左半部にある略号の意味は右半部の対称の位置に記してある。CC:脳梁 CIC:下丘交連 DAS:背側聴条 PC:プロブストの交連 VAS:腹側聴条(菅乃武男:1986⁵⁾より)

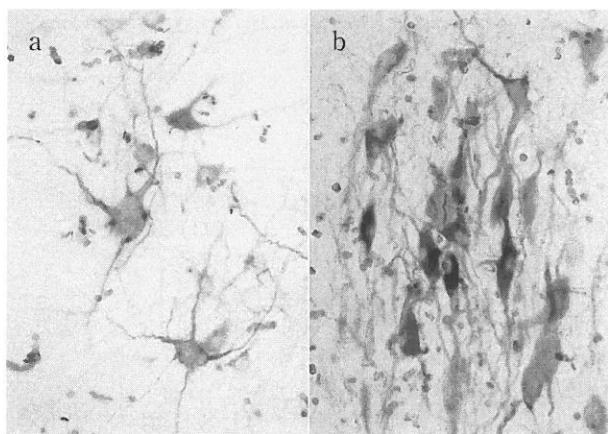


図8 ネコの上オリブ核

ネコの上オリブ核のa:外側核(LSO)とb:内側核(MSO)のニューロンの強拡大。ニューロンの樹状突起の形が異なり内側核の方が樹状突起が多い(HRP染色×200)。

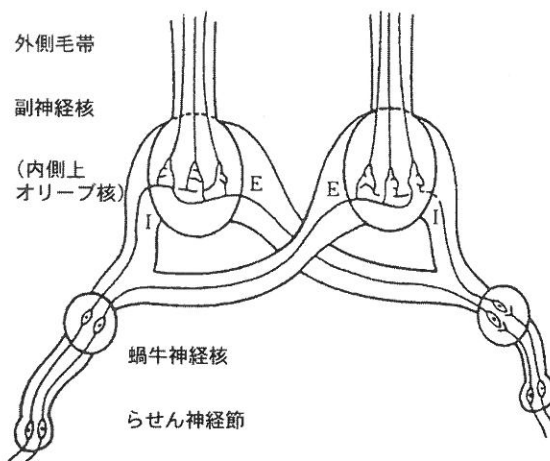


図9 台形体上オリブ核における両側神経支配の模型図

Stotler氏細胞の樹状突起が、両側から同時に興奮(E)と抑制(I)を受けることを示す(Van Bergeijk: 1962⁵⁾より改変)

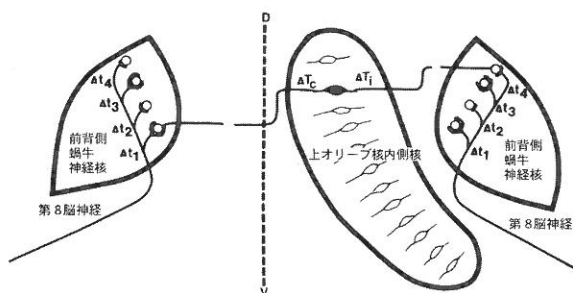


図10 方向感と蝸牛神経核と上オリブ核の内側核
両耳から届いた信号は時間差があると同一音源でもAVCNの別のニューロンが発火し、同一のニューロンに収束するという模式図

(Casseday JH et al: 1987⁸⁾より改変)

る(図9)。前者は興奮性、後者は抑制性である。交差性と非交差性の神経線維は内側上オリブ核へ反対側から到達する。すなわち核の腹内側と背外側へ達する。このようにしてすべてのニューロンは興奮性と抑制性の信号を受ける。究極的には両側の上オリブ核内側核から聴皮質に至る情報量の差によって方向感が生じる」

1930年、Bekesy⁶⁾は実験的研究から両耳干渉作用と、時間—強度取引(time-intensity trade)の現象を報告し、この現象は上オリブ核ですでに生じることが明らかにされた。臨床的にも時間差によって生じた方向感の偏りを強度差の調整によって正中に戻したり、逆に強度差によって生じた方向感の偏りを時間差の調整によって正中に戻すことができる。また基礎的な研究では、両耳干渉作用が失われるのは下丘や聴皮質よりも上オリブ核である。ただし

上位レベルの障害に関する臨床例の報告はもともと少ない。

上オリブ核の役割についてはOsen⁷⁾が1969年、重要な考えを提案した。すなわち、「外側核と内側核には前背側蝸牛神経核: anterior ventral cochlear nucleus (AVCN) から投射されるが、外側核には小型の球状ニューロン、内側核には大きな球状ニューロンが関与する。この大小2種類のニューロンは分布が異なる」。その後の研究でもこの違いが証明され、これらは別々の情報を伝達すると考えられるようになった。このようにして、その脳幹の聴覚伝導路の下位の段階で両耳聴のシステムが出来ている。内側核、外側核のニューロンは上行し、下丘、内側膝状体、聴皮質でそれぞれの交連線維がある。図10にCassedayら⁸⁾による模式図を示した。たとえば上オリブ核内側核が両耳からの信号を処理する場合は、図で示すように両耳の時間差があると左右それぞれでAVCNの別々のニューロンが発火して収束するというものである。すなわち両耳聴は延髄の蝸牛神経系で始まることを示している。

2. 視覚

(1) 両眼視の神経機構

両眼視は「右眼の視覚と左眼の視覚が脳の視覚中枢で同時に認識される感覚」と定義される⁹⁾。この感覚を得るためには種々の両眼視機能がある。

両眼視機能が正常の場合は、「左右のそれぞれの

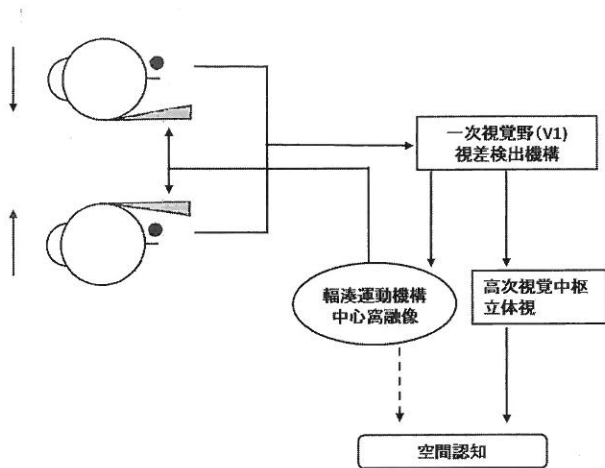


図11 両眼視神経機構

視覚（単眼視）は個々に認識（同時視）されるが、両眼視野¹⁰⁾は右目の視野と左目の視野が重なった部分で、周辺視野の融像（両眼単一視）と中心視野の融像（両眼単一視）が行われる（図11）。融像された結果として立体視が生まれる。

深径覚は三次元空間の奥行きを認識する感覚で奥行き知覚には両眼視も関与しており、両眼視差を手がかりとして感覚される空間知覚を立体視という。立体視は観察対象の位置を判断する静的立体視と動きを判断する動的立体視があり、両者はそれぞれ形態覚と動態覚の2系統で処理される¹¹⁾。すなわち視差から奥行きを知覚するという機能、1つは両眼加算効果、つまり両眼視力は片眼視力に比較して良好であるというもの。もう1つは広い視野を得るためのものであると考えられる。

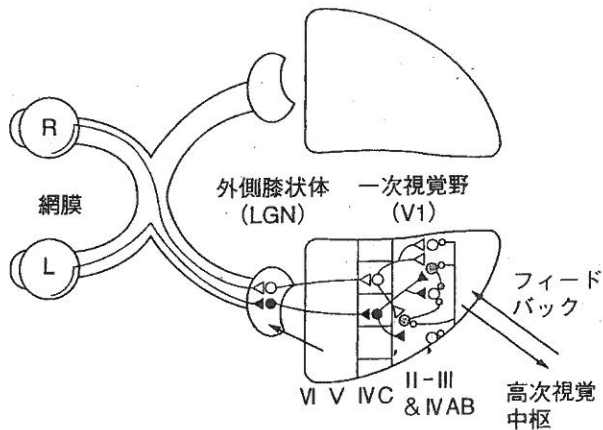


図12 一次視覚野での視差感受

外側膝状体からの神経軸索は左右交互に配置される一次視覚中枢、IVC層の眼優位コラムに入る。左右眼各々の情報はIVC層からII、III、IVAB層の両眼性入力をもつニューロンに伝えられるとともに、水平連絡（long-range horizontal connection）により周辺の受容野からの入力を受け視差を感受する

1対の網膜で得られた二次元像から三次元像として認識するには両眼視差を感受する神経系が大脳皮質視覚野に必要である。一次視覚野：primary visual cortex (V1)は網膜上の投影像を二次元的に再現するとともに、両眼受容野からの入力が初めて統合され、視差を感受する¹²⁾。V1からの視差情報は二次視覚中枢以降の高次視覚中枢で立体視を形成し、また、中心融像のための輻湊機構に働く（図11, 12）。

立体視のお蔭を被るのは医師としての仕事では手術用顕微鏡下の操作である。たとえば耳の手術は側頭骨の中の複雑な構造をトラブルなく聴力の改善を

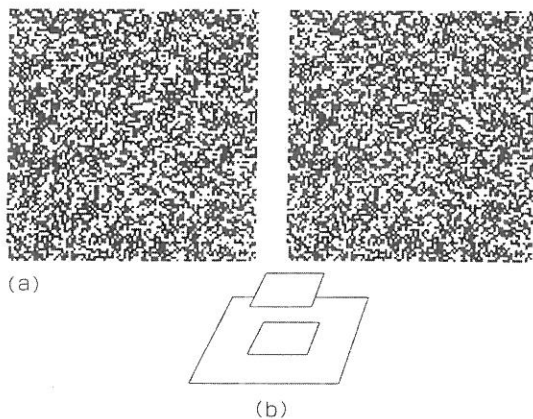


図13-A ユルシュのランダムドット・ステレオグラム
2枚の図形を実体鏡で見ると中央に正方形が浮きあがって見える。

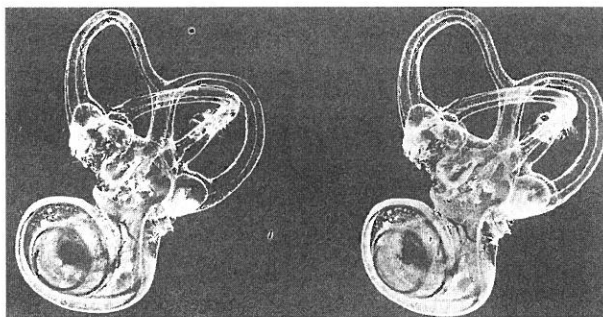


図13-B 内耳のステレオ写真
複雑な構造の迷路がビューワで見ると立体的に浮き上がって見える。

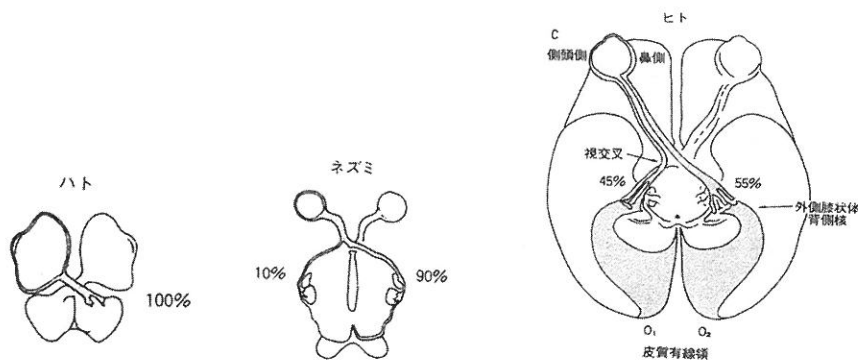


図14 ハト・ネズミ・ヒトの視神経交叉の割合を示す

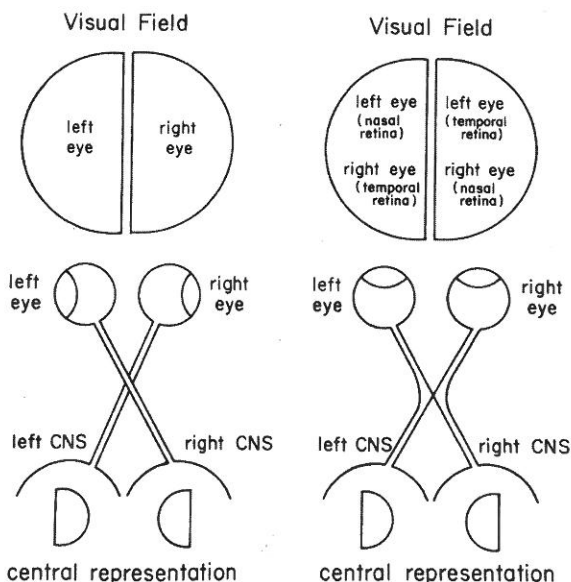


図15 視神経交叉

左は視神経の全交叉と視皮質、右は視神経の半交叉と視皮質の関係

行う必要がある。その為、鼓膜や顔面神経や鼓索神経、耳小骨など中耳の空間にあるものを10-20倍の倍率で手術する。さらに人工内耳手術は中耳を通り蝸牛に小孔をあけ、その鼓室階に人工内耳電極を挿入する。立体視を可能にする手術用顕微鏡は、術者の新たな2つの眼である。日常生活では片眼だけでも生きることはできるが視野が狭く奥行き知覚も不十分である。少しだけでも片眼で過ごしてから眼をあけると2つの眼の動きの素晴らしさを実感できる。視空間は両眼で見える3Dの世界をいう。ランダムドットやステレオ写真をビューワーで見ると立体的に感じる(図13A, B)。左右の6cm離れた眼の位置でそれぞれ写真を撮り、それを前に並べビューワーで見ると立体的に見える(図18参照)。ビューワ

一の仕組みは右の眼では右の眼の位置で撮った写真を、左の眼では左の眼の位置で撮った写真をそれぞれの眼で眺めるだけの単純な撮影である。結果的に2つの眼から入った視覚情報が脳の中で統合処理され、立体的に感じる。立体視の場合は脳で処理される。一方聴覚は脳幹を上行しながら統合処理され最終的には聴皮質で知覚される。1.5cm離して録音したものを聴くより、左右の耳の位置で録音したものをヘッドフォンで左右の耳で別々に聴くと、ステレオ体験は著明となる(図17参照)。これをバイノーラルステレオという。

(2) 立体視のしくみ

両眼視は動物の眼の位置で神経機構が異なる。視交叉はハトは100%、ネズミでは90%、ヒトでは55%である(図14)。視野との関係が図15に示すように、いずれにしても脳の中枢で対応して処理している。

聴覚と視覚の統合

脳には外界すべての情報は感覚器を通して届き、その感覚情報を脳で処理する。話相手のいる会話でも、話相手のいないテレビや映画でも、聴覚と視覚の情報が次々と入ってくる。ところで無声映画は視覚だけの、ラジオは聴覚だけの情報の世界である。しかし、日常では、視覚と聴覚の情報が渾然一体こんぜんとなって入ってくる。それでは、脳のどこで初めて、視聴覚情報は統合処理されているのであろうか。視覚皮質は中脳上丘より上位にある。聴覚皮質は脳幹の蝸牛神経核より上位にある。それぞれの左右の感覚器情報は脳を上行しながら交叉するので、もし両者が統合処理されるのであろうか、中脳上丘より上

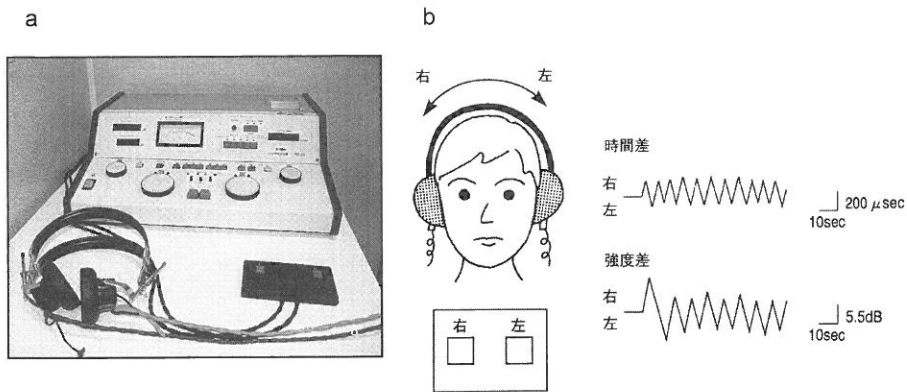


図16 方向感検査

a : 佐藤恒正博士とリオン社によって開発された方向感自動記録装置 (TD-01)

b : 方向感検査の方法と記録の例

位である。Komura ら¹³⁾¹⁴⁾は、大脳に感覚情報を中継する視床領域に、視聴覚相互作用を行う部位の一部を見出している。視床のなかでも、聴覚処理する内側膝状体と、視覚処理する外側膝状体は発生学的にもコア領域として有名であるが、むしろ、その周辺に位置する複数の亜核（ベルト領域）が、視聴覚統合に関わっているらしい。すでに大脳レベルでの視聴覚統合はよく知られているが、新しく発見された視床レベルの視聴覚の統合はどのような意義があるのか解明が待たれる。

方向感検査

音源の方向や音源までの距離を識別することを音源定位 (sound localization) といい、臨床的に方向感覚という。これは音が両耳に到着した時を考えると、左右の耳に音がたどり着いた時に、左右の耳にはその音のパラメータが異なっている (図6)¹⁵⁾。すなわち、音源から発した音の届く時間と強さである。前者を時間差 (time difference)、後者を強度差 (intensity difference) という。音源定位は時間差と強度差によって生じる知覚で、上オリーブ核で前処理をして分析し、大脳で認知する。

方向感覚は聴空間における音源の方向を認知する音源方向定位 (sound localization) と、実験的に両耳のヘッドフォンにより同一音源を聴取することによって頭蓋内に生じる音像を認知する音像定位 (sound lateralization) に分けることができる。

音源定位検査にはスピーカを多数配列させるために無響室を必要とするが、音像定位検査は任意に両耳間の時間差と強度差をコンピュータで変化させる

ことができ、臨床検査として有用である。音像定位検査として方向感自動記録装置が東京警察病院の佐藤恒正博士により開発され (図16-a)、身近なものとなった¹⁶⁾。これは自記オージオメトリーの原理を利用してコンピュータ化したものである¹⁷⁾ (図16-b)。この機種は現在販売されていないが、リオン社の聴力検査装置 AA75に同じ機能が含まれている。

音源定位の認知は、大脳皮質の第一次聴覚野の、左右耳からの刺激に応答する両耳性ニューロンによると考えられる。この両耳性ニューロンは、聴覚野の前端から後端へかけて、高音から低音の順に規則正しく並んでいる。音源定位のための両耳性干渉は、脳幹の聴覚伝導路が部分的に交叉した後の上オリーブ複合体と、それより上位の中継核で生じることが知られている。上オリーブ核の内側上オリーブ核は低周波数音の情報処理を行い、両耳間の時間差に反応し、一方外側上オリーブ核は高周波数音の情報処理を行い、両耳間の音圧差に反応する¹⁵⁾。

方向感覚に関する因子には1,200Hz以下の低周波数帯域では時間差が、高周波数帯域では強度差がその定位に関係する。音像定位検査では、両耳間に時間差と強度差のないときは音像は正中に存在し、この音像は音が早く到達する耳側または強い耳側に偏倚する。この音像偏倚を認知できる最少弁別閾値を音像移動弁別閾値という¹⁸⁾。中枢聴覚伝導路の病巣診断には、鋭敏な20-40μsec (実在角度で1-2°)、強度差では2-3 dBが弁別閾値となる¹⁶⁾。

音像定位検査による、筆者らの聴覚伝導路損傷例の研究では¹⁷⁾、時間差の弁別地域は、上オリーブ核レベルの損傷で中等度上昇し、片側の聴皮質の損傷では正常か、ボーダーラインで両側の聴皮質の損傷

では著しく上昇した¹⁷⁾。しかし、音圧差はそれに反して、いずれの損傷でも正常か軽度の閾値上昇を呈するのみであった。すなわち、時間差と音圧差の音源定位は脳内の情報処理過程が異なる部分が多いと思われる。前者は一次聴覚伝導路、後者は二次聴覚伝導路に対する依存度が高い可能性がある。

両耳聴の臨床

1. 片側難聴に対する人工内耳手術の効果

一側の感音難聴になると日常生活でいかに両耳聴が大切であるかに気がつく。難聴側での会話困難、音源定位の低下、騒音環境での語音聴取能の低下などが報告されている。しかし、一側性難聴は昔からあまり重要視されていない。2008年のThorpeの報告¹⁹⁾では一側難聴児の35%以上に進級できず留年が認められ、一側性難聴の重要性を報告している。しかしわが国では片側の難聴のために進級できなかったという話はきいたことがない。両耳聴は、音の加算ばかりでなく頭部陰影効果や位相差効果も加わって、雑音下での会話聴取能力や音源定位を改善させる効果がある。

頭部陰影効果は1,000Hz以上の周波数で10-16dBといわれている。雑音(noise)と会話音の音源が異なるため、内耳到達時の時間差、強度差、周波数スペクトルを用いて、中枢で聞き分けることができる。これらを両耳スケルチ効果という。通常スケルチ効果では語音聴取閾値(SRT)で2-4.9dBの閾値低下を認める。健聴者では頭部陰影効果とスケルチ効果にて単音節の認知が約40%まで改善すると報告されている。両耳聴による音加算効果は、SRTで1-2dBといわれている。

両側人工内耳手術例の報告では語音聴取が一側のみ埋め込み手術例に比べ大幅に改善すると報告されているが、疑問の声も上がっている。健聴者の両耳効果と同様の効果を得るとする報告があるがMüllerら²⁰⁾は、頭部陰影効果が20.4%、スケルチ効果が10.7%、加算効果が18.7%にあると報告している。Van Hoeselら²¹⁾は、頭部陰影効果は有意に5dB改善し、スケルチ効果は2dBだけだったと報告している。Schleichら²²⁾は、頭部陰影効果は6.8dB、スケルチ効果は0.9dB、加算効果は2.1dBですべて有意に改善したと報告している。人工内耳の音声処理装置(スピーチプロセッサ)の進歩により、人工内耳手術の適応も多様化し、対側耳が中等度難聴

でも語音明瞭度が悪ければ行うようになっており、補聴器を対側耳に装用している症例も増えてきた。人工内耳と補聴器の両耳装用により両耳聴効果があることも報告されてきている。Tylerら²³⁾は騒音下で2/3の患者に両耳加算効果があったことを報告している。スケルチ効果は、雑音を補聴器装用耳近くに負荷した場合は認められず、CI側では1人認めたと報告している。Chingら²⁴⁾²⁵⁾も両耳装用で加算効果があったことを報告し、Dunnら²⁶⁾も両耳聴効果を12症例で報告している。

最近、対側耳が正常もしくは中等度難聴症例の一例聾症例に人工内耳埋め込みで耳鳴効果があることをVan de Heyningら²⁷⁾によって報告されている。興味深いことは、耳鳴改善ばかりか、騒音下での聴取能力改善も認められることである。

Varmeireら²⁸⁾は、騒音下での語音聴取が人工内耳を使った両耳聴で変化するのか調べた。一側聾で耳鳴改善目的にて人工内耳を埋め込んだ20症例を対象としている。平均年齢は51.6歳。平均失聴期間は8.9年。難聴と同時に耳鳴が生じた症例である。9症例が対側耳に補聴器を装用(平均60.1dB)、11症例が対側耳は正常(7.7dB)である。

提示は自由音場、被検者はスピーカーから1m。雑音と語音を正面から提示(S0N0)、語音を正面で雑音を人工内耳側(S0NCI)、雑音を正面で語音を人工内耳側(SCIN0)の3条件で行った。人工内耳装用による改善の評価は語音の聴取尺度(SSQ:Speech Spatial and Qualities of Hearing Scale)を用いた。

音入れ後、1年経過したところで騒音下での語音聴取はLeuven Intelligibility Sentence Test(LIST)を用いた。LISTは10文35リストを女性スピーカーにて提示される。騒音レベルは65dBである。語音聴取が50%の閾値を調べる。語音提示は55dB SPLより2dBずつ大きくしていく。

加算効果は補聴器群で3.3dB、正常群で0.6dBであり、両群に差を認めなかった。語音を正面でかつ雑音を人工内耳側に提示した場合、補聴器群は両耳聴効果が有意に3.8dB改善した。これは人工内耳によるスケルチ効果と考えられる。正常群ではむしろ悪化を認めている。雑音を正面で語音を人工内耳側に提示した場合、補聴器群は両耳聴で有意に6.5dB改善を認めている。正常群でも1.7dB有意に改善を認めた。

SSQでは術前と術後両耳聴では、補聴器群も正

常群も有意に改善を認めた。語音領域の改善，聴覚の質改善を認めた。

これらの本研究は一側性感音難聴で耳鳴に悩んでいる症例に，人工内耳は耳鳴治療効果ばかりか騒音下での語音聴取も改善することを明らかにしている。

2. 両耳補聴器と両耳人工内耳の比較

(1) 両耳補聴器のメリット

“補聴器は両耳装用が効果的です”と補聴器会社の宣伝パンフレットに書いてある。その理由を①音の方向感や遠近感がわかるので安全，②騒音下の会話が向上するのでイライラやストレスが少ない，③音量が小さくなるので快適で疲労が少ない，④自然な聞こえに近づく，⑤理解力が向上する，⑥分析力が向上する，⑦臨場感があるなどと消費者にそのメリットを書いている。どんな難聴者もそうであるかのように書いているが，中等度の感音難聴で聴力に左右差のない場合で，かつ高齢ではない人にはあてはまるであろう。しかし実際にはそのような患者は多くはない。①高齢者の難聴は補充現象（リクルートメント現象）をともなうことが多く，快適に聴こえるように調整するのが難しいことが多い，②左右の聴力が違うと，そのバランスをとるのが簡単ではない，③高齢になるほど補聴器は小さいため電池の交換も扱いにくい。両耳装用は耳につけるのに人の助けが必要で面倒である，④補聴器はデジタル時代になり15万-25万円と高価で購入をためらう，⑤両耳の補聴器装用には長期の指導が必要であるが，そのような販売店はまれである。眼鏡であれば眼科で視力や視機能検査をした後は，その処方せんで適切な眼鏡を購入しても問題は少ないのであろうが，眼鏡はレンズであるが補聴器は電子装置で，かつコン



図17 バイノーラル録音のためのダミーヘッド
左右のレシーバーの中にマイクも備え付けてある。録音も再生もこのレシーバーで行う（ビクター社製）

ピュータ化している全く異なるものである。わが国の補聴器販売は国家資格はないため，販売店の組織の自律性に基づいているため多くの問題があり，日本耳鼻咽喉科学会でその解決に取り組んでいる。

われわれの研究では両耳補聴で方向感が時間差も音圧差も成立する。

(2) 両耳人工内耳装用と方向感

補聴器はコルチ器の残存感覚細胞を刺激しているが，人工内耳は蝸牛神経そのものを電気刺激している。わが国では人工内耳は健康保険制度により片耳に対しての手術を行っている。人工内耳手術は材料費が約270万円もする高額なものである。欧米では両側人工内耳手術が行われている。そのメリットは，騒音下の聴き取り能力が片耳人工内耳に比べ5-10%の向上することと方向感の成立である。方向感

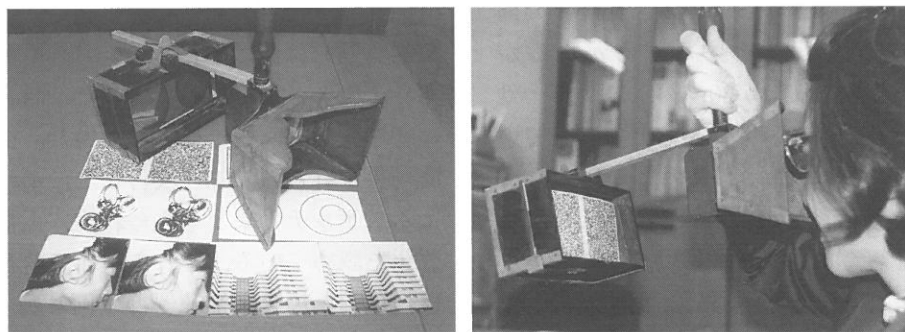


図18 立体視のためのビューワー。20世紀初めのオーストリア製
a. 立体視ビューワーと見るための素材の例
b. 実際にビューワーでランダムドットを立体視しているところ

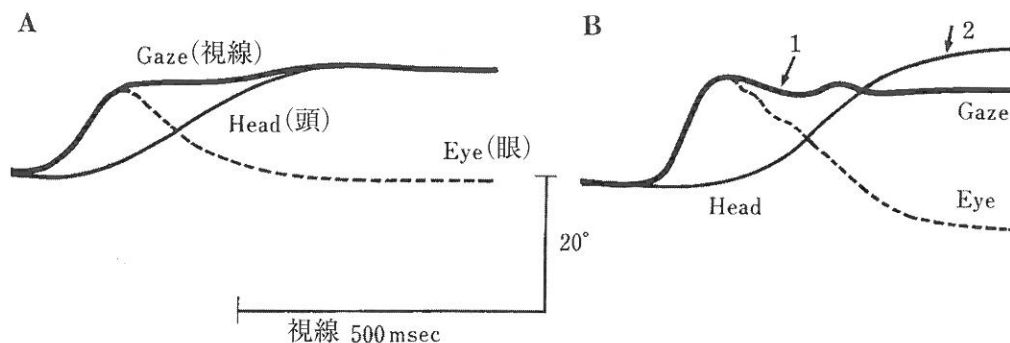
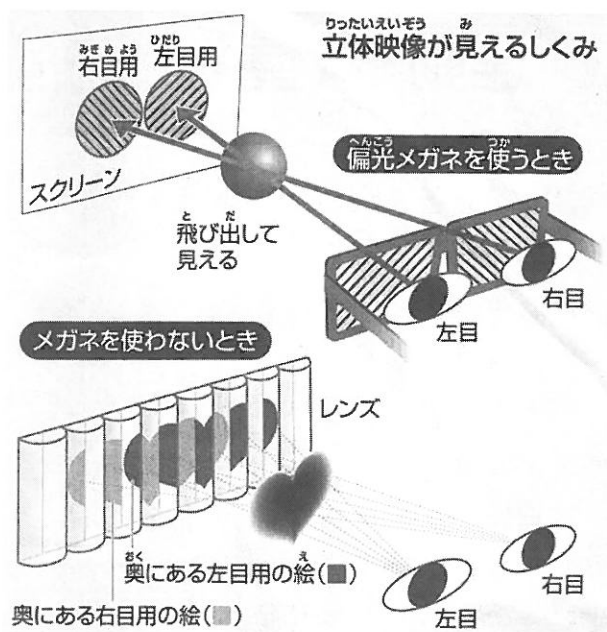


図19 眼・頭部協調運動記録

A：正常成人で，Gaze（視線）は安定している．Gaze=Eye+Head
 B：両側迷路障害（髄膜炎後遺症で温度眼振反応検査，回転検査とも反応なし）のため，Jumbling（動揺視）の著しい例，矢印の2箇所に問題があることがわかる



(朝日新聞 DO 科学 2008年5月8日より)

図20 立体映像のしくみ

は，人工内耳の場合は，中高音域の聴き取りが中心になるので音圧差による方向感が向上するのであろう．補聴器が低音域の方向感が向上するので時間差の方向感が向上するのと対象的である．

両耳聴と両眼視を再現し体験させる方法

一般には両耳聴は1.5m 離れた2つのマイクロフォンでステレオ録音を行い，スピーカーで聴くと体験できる．しかしこれは疑似的にすぎない．リアルにするにはバイノーラル録音を行う．すなわち，ダミーヘッドの耳の位置で録音し，ヘッドフォンで聴く．臨場感あふれる両耳聴体験ができる（図17）．

両眼視は自分の左右の眼の位置で写真を撮り，ステレオビューワーで見する方法である．さまざまなビューワーがあるが，筆者は100年前のウィーン製のものを好んでいる．見る素材としてはランダムドット，観光写真などさまざまである．カメラは中古カメラ屋で売っているが，自分でカメラを移動して撮ればよい．ビューワーは市販のものを手に入れざるを得ない．安いものから高級品までさまざまである（図18-a, b）．最新のものにはフジフィルムのデジカメ仕様がある．静止画も動画も可能で専用のビューアもある．

頭部の運動と両眼視

われわれが物を見つめるとき，対象が狭い視野の中にあるときは，頭部は動かさずに眼球を動かすだけでよい．本を読むときがそれにあてはまり，滑動性眼球運動系とサッケード性眼球運動を用いている．

臨床的には，狭い視野での視標追跡検査や2点交互視検査がこれに相当し，頭部が固定したままであるために前庭眼反射の関与はない．しかし，視標が広い視野の中であり，頭部を自由にして見つめるときは，眼球がサッケード運動を行い，側方視をすると同時に頭部が動いて，結果的に，視標を正面で見つめることになる．この間の眼球と頭部の一瞬の協調した動きを，眼球・頭部（E-H）協調運動（eye-head coordination）という．

眼球と頭部の動きを，直流で記録し，両者の動きを電気的に加算すると一定になる．この加算したものを gaze（視線）と呼んでいる（図19）．

E-H 協調運動では，頭部の動きが始まると前庭眼反射が働き，視標が，ぶれずに見えるように助け

ている。サッケード、頭部回転、前庭眼反射の3つの有機的なシステムとしての働きは、中枢プログラミングによってなされていると考えられている。

片側の迷路障害の急性期や両側の迷路障害では、gazeがオーバーシュートする。両側迷路障害の場合には歩行時にjumbling（動揺視）現象が生じるが、これはE-H協調運動記録をみると、gazeがオーバーシュートしたり不安定であることがわかる。

このように音源の方向へ頭部を回すと前庭眼反射により、見るべき物体をおぼれることなく固視できる。すなわち、両耳聴は左右の三半規管による、前庭眼反射が両眼視を助けていることがわかる。

おわりに

3D映画、TVの時代が来ている。すでに3Dの映画はIMAXの大画面で経験できる（図20）。身近なテレビでも見る事が出来るように技術開発がされている。普通の映画やテレビは3次元である現実の世界を技術的制約で2次元で再現しているにすぎない。3D映画は両眼視両耳聴により現実の世界を3次元に再現する新しい映画である。おそらく技術開発はこれにとどまることなく、まず触覚、さらに化学感覚の味覚や嗅覚も再現する技術開発がなされるであろう。現実のわれわれの世界では五感を同時に利用することは少ないが五感映画が出現するのも遠くはないであろう。感覚のよろこび実現時代も来ることであろう。

[文献]

- 1) Heffner RS, Heffner HE, Kearns D et al. Sound localization in chinchillas. I: left/right discriminations. *Hear Res* 1994; 80: 247-57.
- 2) 寺田寅彦. 耳と目. 寺田寅彦全集, 第4巻. 東京: 岩波書店; 1950: p191-8.
- 3) Stotler WA. An experimental study of the cells and connections of the superior olivary complex of the cat. *J Comp Neuro* 1953; 98: 401-20.
- 4) Galambos R, Schwartkopff J, Rupert A. Microelectrode study of superior olivary nuclei. *Am J Physiol* 1959; 197: 527-36.
- 5) Van Bergeijk WA. Variation on a theme of Bekesy; a model of binaural interaction. *J Acoust Soc Am* 1962; 34: 1431-7.
- 6) Bekesy GV. *Experiments in hearing*. New York: Mc Graw-Hill; 1960
- 7) Osen KK. The intrinsic organization of the cochlear nuclei. *Act Otolaryngol* 1969; 67: 352-9.
- 8) Casseday JH, Covey E. Central auditory pathways in directional hearing. In: Yost WA and Gourevitch G ed. *Directional Hearing*. New York; Tokyo: Springer-Verlag; 1987: p109-43.
- 9) 栗屋 忍. 両眼視の発達とその障害. In: 丸尾敏夫, 栗屋忍編. *視能矯正学*. 改訂2版. 東京. 金原出版; 1998: p190-201
- 10) 久保田伸枝. 両眼視. In: 丸尾敏夫, 久保田伸枝, 深井小久子編. *視能学*. 東京. 文光堂; 2005: p176-83.
- 11) 不二門尚. 両眼視機能の発達と検査. In: 山本節編. *小児眼科・診療の最前線*. 東京. 金原出版; 2003: p37-41.
- 12) Marr D, Poggio T. A computational theory of human stereo vision. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* 1979; 204: 301-28.
- 13) Komura Y, Tamura R, Uwano T et al. Retrospective and prospective coding for predicted reward in the sensory thalamus. *Nature* 2001; 412: 546-9.
- 14) Komura Y, Tamura R, Uwano T et al. Auditory thalamus integrates visual inputs into behavioral gains. *Nat Neurosci* 2005: 1203-9.
- 15) 菅乃武男. 音源定位. In: 真島英信. *生理学*. 東京. 文光堂; 1986: p299.
- 16) 佐藤恒正, 鈴木秀明, 八幡則子. 新しい方向感検査装置及びその応用. *Audiol Jpn* 1983; 26: 659-66.
- 17) 山田勝士, 加我君孝. 聴神経障害-脳幹障害にみられた ABR 波形異常と時間差音像定位. *Audiol Jpn* 1989; 32: 403-4.
- 18) 佐藤恒正. 方向感現象. In: 時田喬 [ほか] 編. *神経耳科学 I*. 東京, 金原出版, 1985: pp422.
- 19) Tharpe AM. Unilateral and mild bilateral hearing loss in children: past and current perspectives. *Trends Amplif* 2008; 12: 7-15.
- 20) Müller J, Schön F, Helms J. Speech understanding in quiet and noise in bilateral users of the MED-EL COMBI 40/40 + cochlear implant system. *Ear Hear* 2002; 23: 198-206.
- 21) Van Hoesel RJ, Tyler RS. Speech perception, lo-

- calization, and lateralization with bilateral cochlear implants. *J Acoust Soc Am* 2003 ; 113 : 1617-30.
- 22) Schleich P, Nopp P, D'Haese P. Head shadow, squelch, and summation effects in bilateral users of the MED-El COMBI 40/40+ cochlear implant. *Ear Hear* 2004 ; 24 : 197-204.
- 23) Tyler RS, Parkinson AJ, Wilson BS et al. Patients utilizing a hearing aid and a cochlear implant: speech perception and localization. *Ear Hear* 2002 ; 23 : 98-105.
- 24) Ching TY, Van Wanrooy E, Hill M et al. Binaural redundancy and inter-aural time difference cues for patients wearing cochlear implant and a hearing aid in opposite ears. *Int J Audio* 2005 ; 44 : 513-21.
- 25) Ching TY, Incerti P, Hill M et al. An overview of binaural advantages for children and adults who use binaural/bimodal hearing devices. *Audiol Neurootol* 2006 ; 11 (supple) : 6-11.
- 26) Dunn CC, Tyler RS, Witt SA. Benefit of wearing a hearing aid on the unimplanted ear in adult users of a cochlear implant. *J Speech Lang. Hear Res* 2005 ; 48 : 668-80.
- 27) Van de Heyning P, Vermeire K, Diebl M et al. Incapacitating unilateral tinnitus in single-sided deafness treated by cochlear implantation. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2008 ; 117 : 645-52.
- 28) Vermeire K, Vande Heyning P. Binaural hearing after cochlear implantation in subjects with unilateral sensorineural deafness and tinnitus. *Audiol Neurootol* 2009 ; 14 : 163-71.