

聴覚情報処理機能の生体工学的研究

—機能的非対称性を中心として—

菊池 吉晃

東京医科歯科大学難治疾患研究所聴覚機能疾患部門

①

聴覚情報処理機能の生体工学的研究

—機能的非対称性を中心として—

菊池 吉晃

東京医科歯科大学難治疾患研究所聴覚機能疾患部門

—目次—

はじめに	1
第1章 脳の構造と機能	4
1-1. 脳の構造	5
1-1-1. 灰白質と白質	5
1-1-2. 大脳皮質の層構造	5
1-1-3. 大脳白質の構成	9
1-1-4. 大脳の外面	9
1-2. 脳の機能	14
1-2-1. 大脳皮質における機能局在	14
1-2-2. 言語機能と脳の可塑性	14
第2章 大脳左右半球における機能的非対称性	21
2-1. 大脳半球における機能的非対称性	22
2-2. key-tapping testと「脳幹スイッチ機構」	29
第3章 聴覚系の構造と機能	34
3-1. 聴器	35
3-2. 中枢聴覚伝導路	39
第4章 脳波の発生機序	43
4-1. 脳波の成因について	44
4-2. 容積導体と電流ダイポール	47
4-3. 聴性誘発反応	52
第5章 聴性誘発反応による機能的左右差検出可能性	55
5-1. 緒言	56
5-2. 3Hz-AEP法	58
5-3. 3Hz-AEPにおける左右差	63
5-3-1. 方法	63
5-3-2. 3Hz-AEPの反応様式	63
5-3-3. 考察	74
5-4. まとめ	76
第6章 3Hz-AEPにおける左右差形成	77
6-1. 3Hz-AEPの左右差評価について	78
6-1-1. 方法	78
6-1-2. 結果	80

6-2. 刺激提示間隔と聴性誘発反応の反応動態	82
6-2-1. 方法	82
6-2-2. 結果	82
6-3. 差異の時間的形成過程	87
6-3-1. 方法	87
6-3-2. 結果	87
6-4. 考察	90
6-5. まとめ	92
第7章 key-tapping testとの対応	93
7-1. 方法	94
7-1-1. 対象および検査音について	94
7-1-2. 聴性誘発反応の測定およびその評価	94
7-1-3. key-tapping testによる判定	95
7-2. 結果	96
7-2-1. 健常日本人に関する結果	96
7-2-2. 非日本人に関する優位性	96
7-3. 考察	109
7-4. まとめ	110
第8章 3Hz-AEPの左右差を決定する音の構造について	111
8-1. 音源とその分析方法	112
8-2. 結果	114
8-3. 考察	123
8-4. まとめ	125
第9章 上位および下位の情報処理系との関連	126
9-1. 聴性脳幹反応との関連	127
9-1-1. 方法	127
9-1-2. 結果	127
9-2. α 波ブロッキングの左右差との関連	141
9-2-1. 方法	141
9-2-2. 結果	142
9-3. 3Hz-AEPに影響を及ぼす因子について	145
9-3-1. 方法	145
9-3-2. 結果	145
9-4. 考察	152
9-5. まとめ	153

第10章 3Hz-AEPの頭皮上電位分布	154
10-1. 方法	155
10-2. 結果	157
10-2-1. 頭皮上電位分布の時間変化	157
10-2-2. P1-N1振幅の頭皮上電位分布	157
10-2-3. N1成分の頭皮上電位分布	168
10-2-4. P1成分の頭皮上電位分布	168
10-3. 考察	183
10-4. まとめ	185
第11章 聴性誘発脳磁場による3Hz-AEPの発生源推定	186
11-1. 理論	188
11-2. 聴性誘発脳磁場の測定	190
11-2-1. 方法	190
11-2-2. 結果	190
11-3. 聴性誘発脳磁場によるP1成分とN1成分の推定	194
11-3-1. 方法	194
11-3-2. 結果	197
11-4. 考察	210
11-5. まとめ	213
第12章 3Hz-AEP法から見たヒトの聴覚情報処理	214
12-1. 音の提示間隔とヒトの聴覚情報処理様式	215
12-2. 3Hzジェネレーターの存在可能性について	222
おわりに	229
本論文関連の発表、論文等の一覧	231
引用および参考文献一覧	237
謝辞	252

はじめに

我々の音声言語によるコミュニケーションでは、話者Aが受聴者Bにメッセージを伝送すると、Bはこの膨大で複雑な時系列情報を実時間で処理するや否や、今度はB自身が送信者として、その構音器の一連の運動遂行によって新たなメッセージをAに伝達する。この様に、ここで要求される音声言語処理機能は極めて高度なものである。さらにこの機能は、人間が人間として存在し得るに不可欠な「思考」や「情動」などの基本的機能を支える基盤としても重要であり、動物間のコミュニケーションやコウモリなどの反響定位 (echolocation) のような機能とは本質的に異なるものである。

この極めて高度な情報処理機構が解明されれば、医学、心理学などの基礎科学はもとより、音声認識などの時系列パターン処理などを目指す工学などの応用科学技術に資するところは計り知れないものがある。しかし残念ながら現時点では、人間の音声言語処理を含む聴覚情報処理機能に関する知見はあまりにも乏しい。この乏しい知見の中で、幸いにも我々の脳の中に「言語処理」と「脳」とを結びつける際立った特徴を見出すことが出来る。すなわち、大脳の片半球（多くは左半球）に、感覚性言語中枢 (Wernicke's area) と運動性言語中枢 (Broca's area) と呼ばれる領域が、それぞれ側頭葉、前頭葉に限局して存在しているという事実である。このような明確な神経構造は、我々の大脳構造の中でも特に際立っており、脳における言語処理機能を解明する上で非常に有益な情報を与え得るものと考えられる。

基礎科学、応用技術いずれにとっても、基本的には正常な人間の情報処理機能が興味の対象となる。しかし、我々の左右大脳半球は脳梁などの交連線維で互いに連絡しており、両半球で自由な情報交換が可能な構造になっている。さらに聴覚神経系の場合には、片耳からの聴覚情報が左右いずれの大脳半球にも伝達、処理され得る構造になっている。したがって正常な人間において、片半球に特有な機能のみを抽出することは極めて困難な作業となり、通常の方法では不可能である。その観測には、左右半球でのいわゆる競合状態の実現が要求される。その典型的な方法として、dichotic listening test や key-tapping test がある。これまで、これらの方法の適用によって、聴覚系の機能的非対称性に関していくつかの重要な知見が得られてきた。しかしながら、これらの方法はいずれも行動的検査法であり、大脳の神経機構の解明にとって有効とは言えない。さらに前者では選択的注意による影響や口答を介した応答に依存せざる

を得ない、後者では妨害音の増大に伴って生じるkey-tappingの乱れの判定が測定者の主観的判断に依る、などの方法論上の問題がある。これらの問題は、人間の行動を介さない、脳の反応を直接的に捕えることが出来れば解決出来る。そしてこれによって、その背後にある神経機構もはじめて明らかにされ得ると考えられる。

このような観点から本研究では、まず誘発反応による大脳半球左右差検出の可能性を検討した。そしてその過程で、従来の関連研究にはなかった、機能的左右差を検出する上で非常に有効な方法を見出すことに成功した。この方法によって認められる人間の聴覚情報処理様式は、特に前述の「行動」検査のひとつであり、しかも脳機能の比較的低次の処理機構との関連の深い key-tapping test と呼ばれる、聴覚を用いた大脳半球優位性検査法によって見出だされた結果との高い相関を認めた。本研究では、さらにこの誘発反応の反応動態について検討するとともに、その発生源の脳内部位について検討を行い、末梢から大脳に至る聴覚情報処理系における音響信号の処理様式について検討したものであり、主に1980~1989年にわたって継続してきたものである。

本論文の構成について、第1章から第4章までは本論文の背景となる基礎を述べ、第5章から第12章までを筆者自身の研究とした。

第1章では脳の機能と構造について概観し、第2章では大脳の左右半球に存在する機能的非対称性の研究に触れ、第3章では特に聴覚系全般にわたって概説する。そして第4章では神経の微視的活動と、巨視的活動である脳波との関連について述べる。第5章では、大脳半球の機能的左右差を聴性誘発反応によって検出する「3Hz-AEP法」という方法を導入する。第6章では同方法の原理およびこれによって得られる聴性誘発反応の特性について述べ、第7章では「行動」検査であるkey-tapping test による結果との相関について検討する。さらに第7章で使用された検査音の物理構造と左右差との対応を第8章において検討する。第9章では上位および下位の情報処理系との関連について述べ、第10章では様々な音と3Hz-AEP法によって検出される聴性誘発反応の頭皮上電位分布との対応について述べる。そして第11章では、脳内の神経活動によって生成される磁気信号の検出によって、3Hz-AEP法によって記録される誘発反応の、電流双極子としての発生源の脳内部位を推定すると共に、第10章で述べた電位の動態との関連について述べる。第12章では本研究によって明らかにされた聴覚情報処理機構の背景にあると想定される神経機構について、他の諸研究との対比から考察を行う。

なお、本研究の一部は、
昭和57年度文部省科研費奨励研究(A)(57770065)、
昭和59年度文部省科研費一般研究(B)(56480207)、
昭和62年度文部省科研費奨励研究(A)(62771305)
および
昭和63年度文部省科研費奨励研究(A)(63771057)
の補助によって行ったことを付記しておく。

第1章 脳の構造と機能

脳の構造およびその機能について概説する。大脳皮質には顕著な機能局在が認められ、ヒトや動物の行動はこれらの部位間における情報交換によって形成される。特に言語中枢の左半球偏在化は、臨界期における言語学習によって決定されるなど、大脳の神経回路網には巧妙な可塑性の機構が内在している。

1-1. 脳の構造

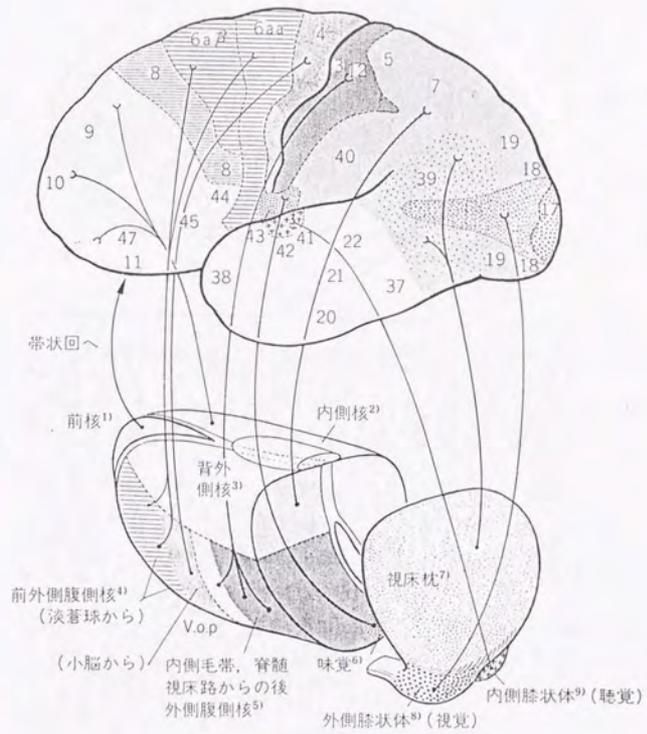
1-1-1. 灰白質と白質

脳では、神経細胞が集合している部分と、細胞体が存在せず神経線維が特に集中している部分とがある。前者は肉眼的に灰白色に見え、後者はそれより白っぽく見えるので、それぞれ灰白質、白質と呼ばれる。灰白質は、脳を果実に例えると皮の部分と中心の種のある部分とに相当する場所に存在する。このうち皮の部分に相当する灰白質が大脳皮質であり、中央にあるのが視床、線状体その他の皮質下の神経核である。なお神経核とは神経細胞の集合体である。視床は中心灰白質の内でも最も大きい重要な神経核であって、感覚、記憶、言語などさまざまな機能との密接な関連をもつ部分である(図1-1)。白質は髄質とも呼ばれ、神経線維の集合体であって、大脳皮質に囲まれてその内部を占めている。白質の中にはこの他、左右の両半球の中央部に複雑な形をした脳室がある。

1-1-2. 大脳皮質の層構造

大脳の皮質では、形態の異なる神経細胞が6層の層状に配列している。図1-2b)の1は無顆粒性皮質のもので、顆粒細胞と呼ばれる小型(4~8 μ m)の細胞が認められない。その代わりピラミッド型をした大形の錐体細胞が多く、特に第V層で著しい。錐体細胞は出力細胞であるため、この部位では出力系が特に発達しており、無顆粒性皮質の代表としては運動野などがある。一方顆粒性皮質(5)では、V層の発達が悪く、代ってII~IV層に多くの顆粒性細胞が存在する。この細胞は入力処理に関連しており、顆粒性皮質は第一次感覚野である体性感覚野、視覚野、聴覚野などで認められる。そしてこれらの中間の皮質については主に連合野に多く認められ、基本的な6層構造から成る(図1-2)。このような層状構造の相違に従って、Brodmannによって大脳皮質は52の区域に分類されている(図1-3)。

大脳に入ってくる入力は大きく分けて3つに分類される。第一は、視床を経由してくる感覚信号で、特殊求心性線維と呼ばれて、おもに第IV層に終わる。特に視覚野ではこの第IV層が発達しており、有線維とも呼ばれている。第二に非特殊求心性線維と呼ばれるものがある。これは視床の中心部の非特殊核と呼ばれる所や脳幹網様体からのもので、皮質の覚醒、睡眠レベルの調節に関連している。この系の入力は第I層とその他の層にも分枝している。第三に、大脳皮質間を連絡するもので、II、III層の錐体細胞がその出力細胞となっている。



- 1) Nucleus anterior 2) Nucleus medialis 3) Nucleus lateralis dorsalis 4) Nucleus ventralis anterolateralis 5) Nucleus ventralis posterolateralis 6) taste, Geschmack
 7) Pulvinar 8) Corpus geniculatum laterale 9) Corpus geniculatum mediale

図1-1 主な視床皮質性結合と個々の皮質領域と視床核との関係。

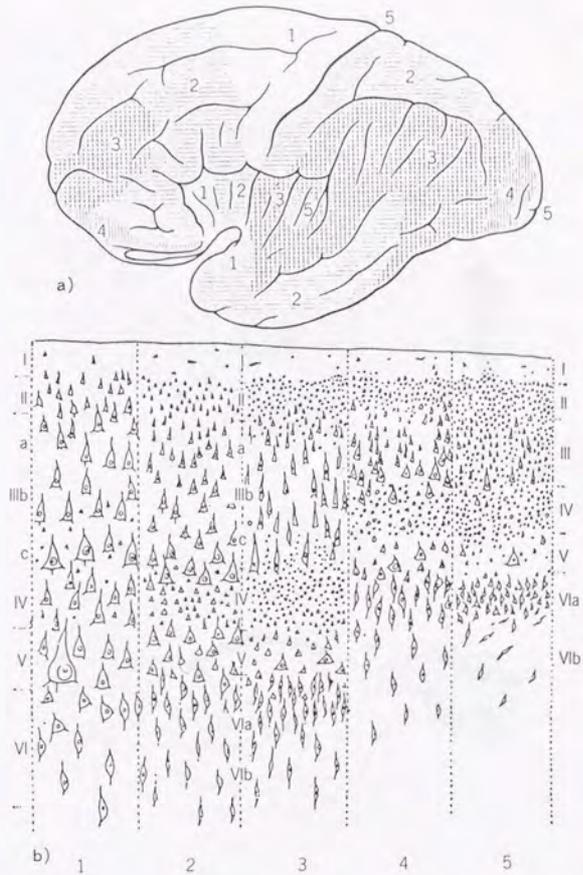


図1-2 大脳皮質の5種類の基本形。1. 無顆粒性皮質(たとえば運動野) 2. 前頭型皮質(前頭葉) 3. 頭頂型皮質(頭頂葉) 4. 極性皮質(前頭葉の極部) 5. 顆粒性皮質(体性感覚野、視覚野など)(von Economo, 1920)。

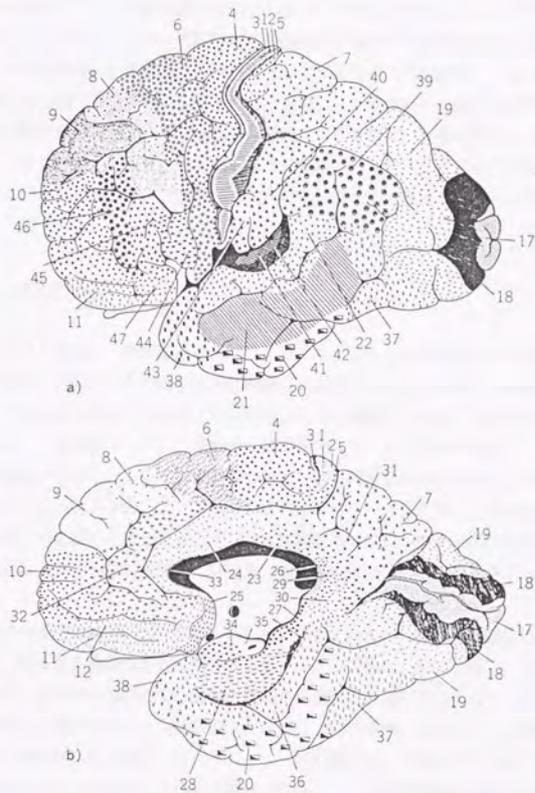


図1-3 大脳の細胞構造的皮質野 (Brodmann, 1906)
 a) 左半球外側面 b) 右半球内側面.

1-1-3. 大脳白質の構成

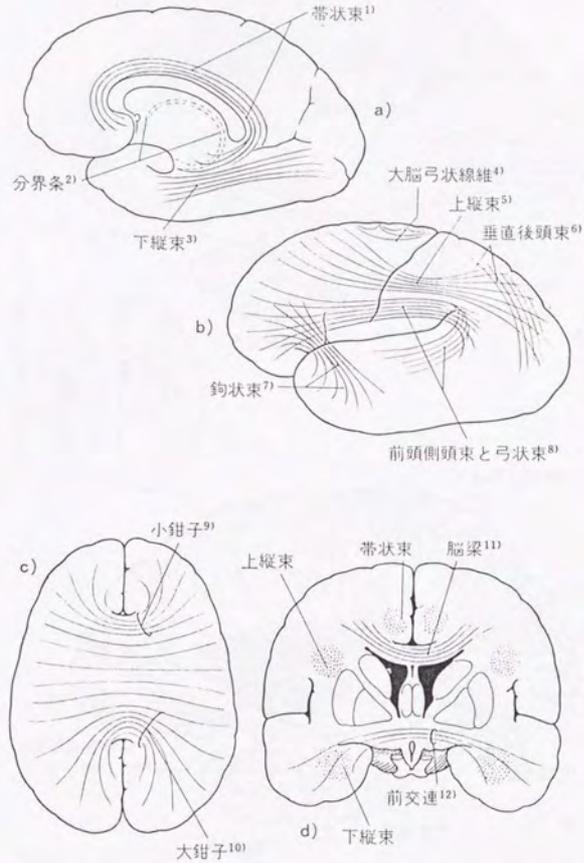
大脳白質は前述のように神経線維の集合であるが、その走向パターンには以下のようなものがある。すなわち 1) 同一大脳半球内で皮質の一部から他の皮質部分へと連絡するもので、これには隣接した脳回同士の皮質間を連絡するもの(弓状線維)、遠く離れた皮質間を連絡するもの(連合線維)などがある。また、2) 皮質間を連絡する線維ではあるが、左右の大脳半球の対応する部分を相互に連絡する線維群で、交連線維という線維群を形成する。そして 3) 皮質と中心部にある神経核、特に視床とを連絡する線維群、4) 視床と末梢とを結ぶ線維、5) 中心灰白質を経由せずに皮質と末梢とを連絡する線維、がある(図1-4, 1-5)。

1-1-4. 大脳の外面

大脳を上方からみると、明確に左右に別れてみえる。すなわち左および右の大脳半球である。この左右の大脳半球を連絡する神経線維束が脳梁である。正中線でこの脳梁を切断すると、その断面は図1-6上のような形をした厚い線維束であることが分る。脳梁は脳梁吻(18)、脳梁膝(19)、脳梁幹、脳梁膨大(20)などから成る。

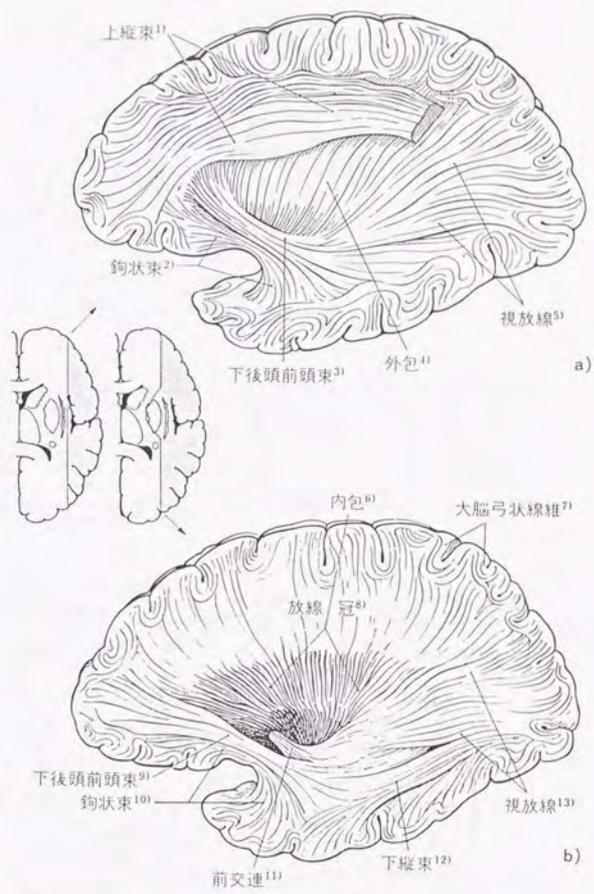
大脳を外側面から見ると、多くの脳溝のうちでも特に顕著なものがある。それは、後上方から前下方に走る大きな溝、すなわち中心溝あるいはローランド溝と、中央よりやや前方の下から後上方に斜めに走る大きな溝、側大脳裂あるいはシルヴィウス溝である。これらの大きな溝によって大脳は前頭葉、側頭葉、頭頂葉、後頭葉の4つの部分に大別できる(図1-6, 下)。

各脳葉はその表面の脳溝によって多くの脳回に分れている。特に言語機能に関連する脳回として、前頭葉を前後の方向に横走する上・中・下(第一、第二、第三)の前頭回、中心溝に沿って走る中心前回と中心後回、側頭葉を前後の方向に横走する上、中、下側頭回、上側頭回の上側でシルヴィウス溝のなかに隠れている横回、シルヴィウス溝の後端にある縁上回、角回がある(図1-6, 下)。特に縁上回、角回については、ヒトでよく発達しておりサルでは発達していない部分である。大脳の内側面の脳回では、脳梁断面のすぐ上に脳梁に沿って走る帯状回、側頭葉の最も内側に位置する海馬回などがある(図1-6, 上)。またシルヴィウス溝の深部にはローランド溝下端(弁蓋部)と側頭葉との間に入り込んでいる島と呼ばれる脳回がある(図1-7)。



- 1) Cingulum 2) Striae terminalis 3) Fasciculus longitudinalis inferior 4) Fibrae arcuatae cerebri 5) Fasciculus longitudinalis superior 6) Fasciculus occipitalis verticalis 7) Fasciculus uncinatus 8) Fasciculus frontotemporalis et Fasciculus arcuatus 9) Forceps minor 10) Forceps major 11) Corpus callosum 12) Commissura anterior

図1-4 主な連合線維と脳梁(交連)線維.

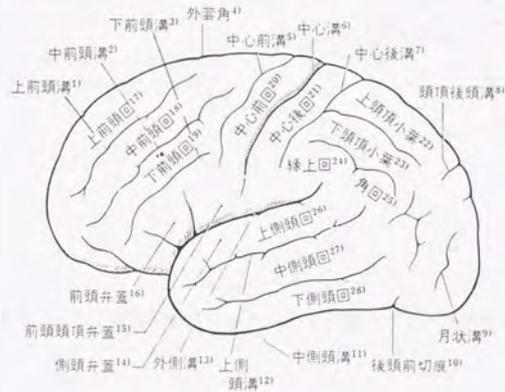


- 1) Fasciculus longitudinalis superior 2) Fasciculus uncinatus 3) Fasciculus occipitofrontalis inferior 4) Capsula externa 5) Radiatio optica 6) Capsula interna
 7) Fibrae arcuatae cerebri 8) Corona radiata 9) Fasciculus occipitofrontalis inferior
 10) Fasciculus uncinatus 11) Commissura anterior 12) Fasciculus longitudinalis inferior
 13) Radiatio optica

図1-5 白質内の連合線維を外側面より見たところ。a) 外包部分 b) 内包部分、線状体は除く。



- 1) Sulcus corporis callosi 2) Sulcus cinguli 3) Sulcus centralis 4) Sulcus parieto-occipitalis 5) Sulcus calcarinus 6) Sulcus hippocampi & Gyrus dentatus 7) Sulcus collateralis 8) Sulcus occipitotemporalis 9) Sulcus rhinalis 10) Gyrus frontalis superior 11) Gyrus praecentralis 12) Lobulus paracentralis 13) Praecuneus 14) Isthmus gyri cinguli 15) Cuneatus 16) Gyrus cinguli 17) Corpus callosum 18) Rostrum 19) Genu 20) Splenium corporis callosi 21) Uncus 22) Gyrus rectus 23) Area subcallosa 24) Gyrus parahippocampalis 25) Gyrus lingualis 26) Gyrus occipitotemporalis medialis 27) Gyrus occipitotemporalis lateralis 28) Septum pellucidum 29) Gyrus paraterminalis



- 1) Sulcus frontalis superior 2) Sulcus frontalis medius 3) Sulcus frontalis inferior 4) Mantelkante 5) Sulcus praecentralis 6) Sulcus centralis 7) Sulcus postcentralis 8) Sulcus parietooccipitalis 9) Sulcus lunatus 10) Incisura praeoccipitalis 11) Sulcus temporalis medius 12) Sulcus temporalis superior 13) Sulcus lateralis 14) Operculum temporale 15) Operculum frontoparietale 16) Operculum frontale 17) Gyrus frontalis superior 18) Gyrus frontalis medius 19) Gyrus frontalis inferior 20) Gyrus praecentralis 21) Gyrus postcentralis 22) Lobulus parietalis superior 23) Lobulus parietalis inferior 24) Gyrus supramarginalis 25) Gyrus angularis 26) Gyrus temporalis superior 27) Gyrus temporalis medius 28) Gyrus temporalis inferior

図1-6 大脳内側面における脳回と脳溝(上)および外側面における脳回と脳溝(下)



- 1) Insel
- 2) Gyrus longus insulae
- 3) Gyrus temporalis superior
- 4) Gyri temporales transversi
(Heschlsche Querwindungen)

- 1) Gyri breves insulae
- 2) Sulcus centralis insulae
- 3) Insel
- 4) Gyrus longus insulae
- 5) Gyrus temporalis superior

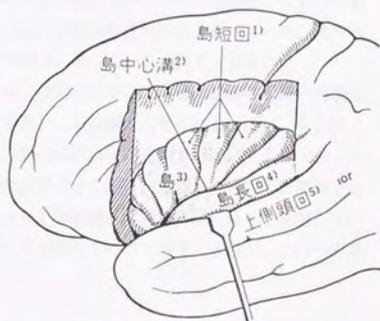


図1-7 上側頭回の上にあるヘシユル横回(上)と島(下)。

1-2. 脳の機能

1-2-1. 大脳皮質における機能局在

図1-8はチンパンジー大脳の機能地図で、最初FritschとHitzig(1870)によるイヌ大脳の電気刺激法によって見出され、後にSherringtonら(1906)によって明確にされたものである。そして1950年には、脳外科医であるPenfieldらの皮質電気刺激法によって、ヒトの脳における機能局在が明らかにされた(図1-9)。その結果によると、中心溝の直前の中心前回には運動野があるが、運動野では図1-9bのように、体中の筋が運動野の一定の部位に対応しており(体部位再現)、足に対応する部分が上方に、頭部に対応する部分が下方にと逆立ちしたように配列している。舌、唇、喉頭、そして手指に対応する部分が比較的広がっている。体性感覚野は中心後回にあり、その配列は運動野の場合に準じている(図1-9a)。

聴覚の中核は横回(図1-7参照)であり、視覚の中核は後頭葉内側面の楔部と内側後頭頭回に挟まれた脳溝(鳥距溝)の皮質であり、有線縹とも呼ばれる。なお第二次聴覚野は側頭葉の大半を占めるが、言語に関わるのは主に左側である。ブローカ(Broca)の領域は発声に関係する運動皮質のすぐ前方に位置し、言語の理解面での中核とされるウェルニッケ(Wernicke)の領域は横回の外側に接して位置している。そしてこのふたつの領域は弓状束によって連絡している(図1-10)。これらの領域については後に(第2章)詳述する。

1-2-2. 言語機能と脳の可塑性

小児の失語症は、成人と同様に左大脳半球前方部の病変によって無言症や構音障害を呈することが多く、後方部の病変では話し言葉の理解の障害が認められることが多い(第2章)。成人との大きな違いは、小児の片側性脳損傷による失語症の回復が良好であることである。実際3歳以前に生じる場合に、特に話し言葉の能力はほとんど完全に回復するといわれる。これに対して、10歳以後に発症した左半球病変による小児失語症は回復が悪く、しばしば永続的な失語症を残すことが多い。すなわち3歳から10歳までの間に、失語症の回復に関する臨界期があると考えられている。

大脳内の神経線維の髄鞘化は感覚野と運動野で最も早く、出生時にはすでに始まっており、その周辺は生後1カ月までに髄鞘化を開始する。さらに残りの大部分は、その後数カ月から1年の間に髄鞘化が始まる(図1-11)。特に言語野やその関連領域の髄鞘化は一般に遅く、例えば4野は3歳頃、45野は10歳頃になってはじめて髄鞘化するといわれる。そのため、機能決定期前に脳損傷が生じると、その領域の営むべき機能が脳の

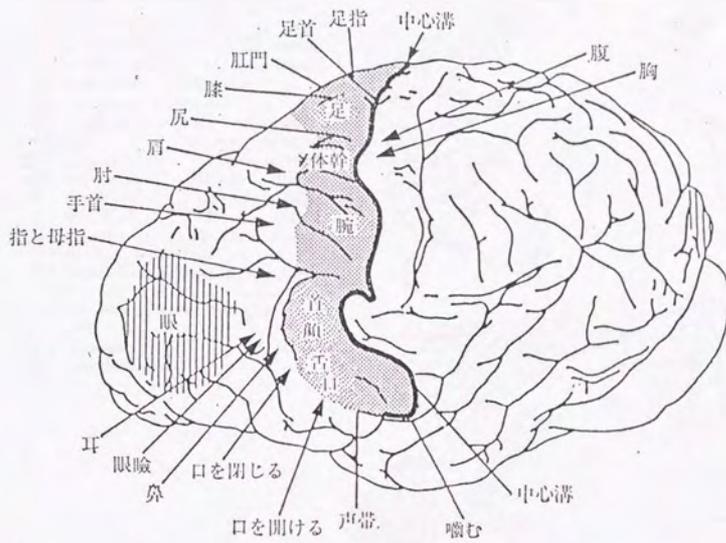


図1-8 チンパンジーの運動野における体部位再現
(Sherrington, 1906).

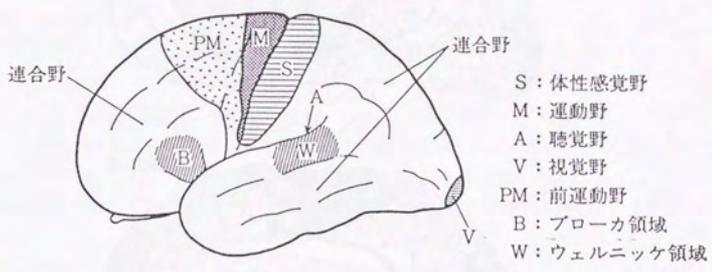
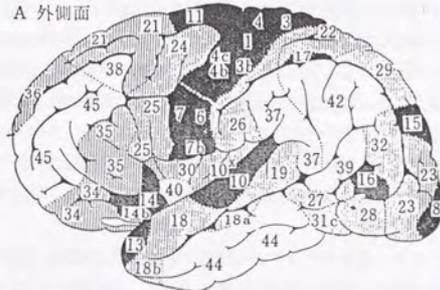


図1-10 ヒト大脳の機能地図。

A 外側面



B 内側面

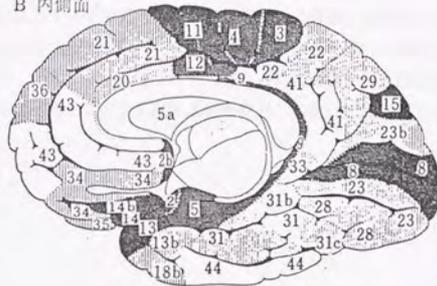


図1-11 大脳皮質の発達における髄鞘形成の順序。番号の小さい領域ほど早く髄鞘形成が起こる。生後1カ月以後に髄鞘形成を始める領域は終末野と呼ばれ、白地になっている。

別の領域によって代償されるものと考えられる。

一方、Geschwindらによって、シルヴィス溝の中に埋もれている側頭平面と呼ばれる部分が左右で大きく異なる事実が確認されている（図1-12）。すなわち測定した100例の脳のうち、65%は右半球よりも左半球の側頭平面が広く、逆のものは11%であり、差のないものは24%であった。その後の細胞構築学的研究によれば、側頭平面後端部で頭頂連合野と接する側頭頭頂部が特に左右差の著しい部位であることが示されている。また側頭平面の明瞭な左右差は、29週目の胎児脳においてすでに存在していることも確認されている。最近では、機能的にも左右差の存在することが確認されている。左半球の側頭平面は言語機能、特に音声言語の理解に関与すると考えられるから、これらの事実は言語を処理する脳の部位や神経回路が遺伝情報に基づいて出生前に決定することを示唆する。

以上から、大脳半球間の形態的機能的差異がすでに存在する一方で、損傷を受けた発達期の脳は残った部分を再組織し、失われた部分の機能を容易に代償できる。つまり発達期の脳の可塑性によって子供の言語障害からの回復力の強弱さが説明され得る。すなわち、年齢が高くなると言語障害が回復しにくくなることは右半球の可塑性が年齢とともに低下することを示す。そして12~13歳を過ぎると言語障害から十分に回復できなくなるという事実は、言語機能の側性化に関する可塑性がこの頃に急激に低下することを示している。

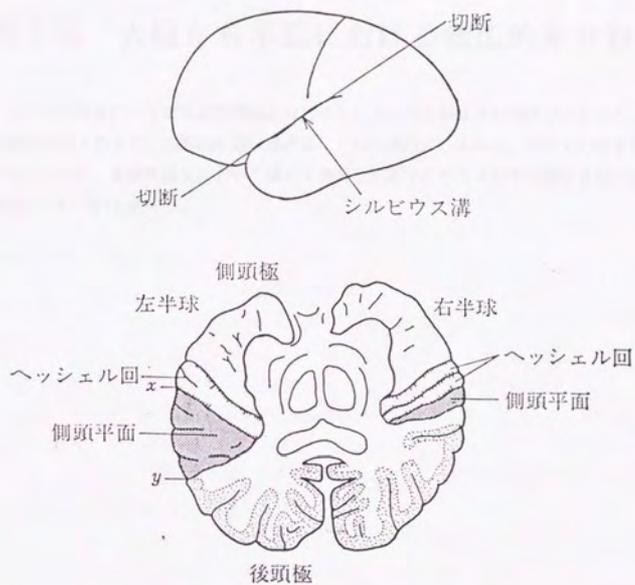


図1-12 シルヴィス溝内に埋もれている側頭平面の左右差。上は側頭平面を露出させるための脳の切断方向を示す。下はその剖面。

第2章 大脳左右半球における機能的非対称性

ヒトの大脳左右半球には言語機能をはじめとして、機能的な非対称性が存在する。ヒトの脳を理解する上でこの問題を通り過ぎることは出来ない。本章はこの研究の歴史を概観するとともに、本研究論文において極めて重要な位置を占める大脳半球優位性検出法の方法論などについて述べる。

2-1. 大脳半球における機能的非対称性

言語機能に代表されるように、両側大脳半球の機能が対称的でなく、その一方に機能が偏在することを機能的非対称性 (functional asymmetry) あるいは側性化 (lateralization) という。

大脳半球の機能的非対称性を最初に指摘したのは、紀元前5世紀末の Hippocrates であり、すでに右片マヒと言語障害との関連について述べていた。19世紀に入ってGalilの骨相学が出現したが、これに対してFlourenが大脳皮質同値説をもって反論した。1861年、パリの人類学会でBrocaによって、運動性失語が左半球第三前頭回の障害によって生じることが発表された。さらに1870年にはHitzigとFritschによって、イヌの大脳を電気刺激することで、身体の反対側に手足の運動を支配する部位のあることが見出された(図1-8参照)。1874年にはWernickeが感覚性言語中枢の存在することを報告するにちなんで、大脳における機能の局在は多くの脳科学者の注目するところとなった。

一方、このようないわゆる古典的機能局在説に対して、Marie(1906)は多くの臨床例から、失語の根底には一般的知能障害のある点を強調して、Brocaの説を否定した。またJackson(1864)やFreud(1891)によっても局在説に異論が唱えられた。さらにはGoldstein(1920)やHead(1923)、そしてLashley(1939)の量作用説によっても批判が加えられていた。これらの背景には、当時のゲシュタルト心理学の影響があったと考えられる。

それに対して、臨床医学的、神経科学的な大脳半球の機能的非対称性の研究は、1950年以降さらに飛躍的な進展を遂げた。

まず、左右大脳半球間を連絡する交連線維を切断した動物の学習実験によって、交連線維を介して高度の情報交換がなされていることが明らかにされた(Sperry, Myers, 1956)。また主にてんかん患者のうち、脳梁切断された例に対する心理学的検査および行動観察によって、人間の左右半球において、言語処理は左半球が優位、視空間処理は右半球優位など、いくつかの情報処理様式に非対称性の存在することが明らかにされた(Sperry, 1961)。また現在神経心理学(Neuro-psychology)として成長している、脳損傷などによる失語症患者を中心とした臨床研究からも多くの興味深い知見が集積している。それによると以下のように、左右の半球はそれぞれ特有の情報処理に深く関与している(表2-1)。

	左半球症状	両側症状	右半球症状
言語	失語 失読 失書		失書(準空間的)
計算	失算		失算(準空間的)
行為	視念運動失行 視念失行 構成失行	構成失行 (視覚失調)	視覚・構成失行 着衣失行
身体認知	手指失認 左右障害	身体部位失認	半側身体失認
聴覚認知	聴覚失認		
視覚認知	対象認知 純粹失読 色彩失認 同時失認 (物体失認)	物体失認 相貌失認	(相貌失認)
	視空間認知 (地誌的失見当)± (地誌的記憶障害)±	バリント症状	空間知覚障害 (「時間知覚」 障害) 半側空間失認 地誌的失見当 地誌的記憶障害
		アントン症状	

表2-1 右利き患者における優位半球症状と劣位半球症状との対比(大橋, 1962)

まず、左半球に側性化する機能として、言語機能以外では計算のような数の操作が左側の頭頂部の障害で起る。知的な障害の場合にも計算は侵されるが、左半球頭頂葉障害による計算の障害(失算)は知能障害がないにもかかわらず、簡単な筆算でも困難となるものである。

また左の頭頂部の損傷によって手指失認と左右障害と呼ぶ症状が出てくることがある。前者は、自分の手についても他人の手についても指の区別がつかなくなってしまうものであり、後者は左右の区別がつかなくなってしまうものである。その他、認知に関するものとして、後頭部の損傷で純粋失読、色彩失認が出現する。

行為に関する障害としては、観念失行、観念運動失行と呼ぶ障害が出ることがある。前者は、ある一連の行為系列の遂行が困難となり、さまざまな行為の誤りをするもので、例えばタバコを反対にくわえたり、タバコをマッチ箱にこすって火をつけようとしたりするものである。後者は、自発的自動的にする行為は可能でも、命じられてする行為や身振りなどが困難となるものである。

なお構成失行は左右いずれの頭頂葉損傷によっても出現する。

右半球については、認知の障害として半側身体失認が右側の頭頂部の損傷で生じることがある。これは自分の体の左半身に無関心になったり、無視したりするなどの症状を示すことがある(図2-1)。通常左半球損傷の際に右半身についてはこのような障害が生じることはなく、右半球損傷の場合のみに認められる。

行為の障害としては、着衣失行といって衣服をきちんと着ることができなくなる症状も右側の頭頂部の損傷で認められる。この場合でも左側のものをきちんと身につけることができない。

他に、半側空間失認あるいは半側空間無視が右後頭の損傷で生じることがある。これは患者の左側の外空間にある対象が認知できなくなるものである。これらの障害は、自己の身体から外空間への相違は認識できるが、すべて左側に症状が出現する。

さらに相貌失認といって、人物の顔の個性が弁別できなくなる障害、そして地誌的失見当、地誌的記憶障害が右後頭部の損傷で起る。

すなわち左半球のウェルニック領野を中心とした角回、縁上回などを含む言語に関する領域に対応する右半球の部分は空間的機能に関わっている。

以上、神経心理学的研究による結果についてまとめると、第一に、左にある言語機能が右にはなく、かわりに視覚的、空間的な機能において優れていること。第二に手指失認、左右障害、純粋失読、色彩失認、観念失行、観念運動失行などのいずれをとってみても、左半球の損傷では症状が身体の片側にだけ出現するようなことはないのに対し、右半球障害では半側空間失認、半側身体失認、着衣失行のように脳の損傷側の反対側にだけ症状が出現するという特徴がある。第三には、左半球には言語機能、計算能力のような分析的、論理的な能力に関連するのに対し、右半球では相貌失認、地誌的失見当などのように総合的、直感的な能力に関連する。

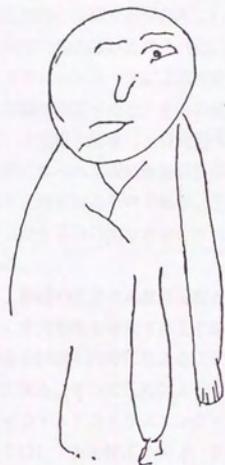


図2-1 左半側空間無視の患者が描いた人物図。左側の描写が不完全である。

以上の研究方法に共通していることは、いずれもなんらかの形で脳のある部位が損傷を受けているものを研究対象としていることである。この場合、例えば損傷を受けた神経線維群には逆行性に変性していく性質があるため、損傷部位以外の他の部位の神経も侵されている可能性がある。そして、損傷箇所と症状または行動との対応のみから、その脳機能を解明するには多くの複雑な問題が附随する。したがってこれらの研究によって得られる結果の解釈については、十分に慎重でなければならない。このような観点から正常人を対象とした研究が目立つようになってきた。正常人の場合、言うまでもなく左右の半球は切断されていないので、両半球間の情報交換が自由に行なえる。そのため、必然的に感覚系あるいは運動系を介した特殊な検査法が要求される。

その代表的な方法のひとつにタキストスコープによる視覚系を介した方法がある。これはスクリーン上の固視点に視線を固定すると、左右の視野に投影された映像が各々、右視野の映像は左半球視覚野に、左視野の映像は右視覚野へと伝達されることを利用したものである。このために特別に作られた視覚刺激装置がタキストスコープ(tachistoscope)と呼ばれるものである。このタキストスコープによって短時間提示(一般に30msecから200msec)された視覚刺激に対する応答によって左右差を評価する方法である。

一方、聴覚神経系の場合には、神経の完全な対側性支配とはなっていないため(第3章参照)、視覚系にみられるように非対称性を研究する上で都合の良い構造とはなっていないが、左右の耳にそれぞれ異なる音刺激を同時に与えることで、左右の聴覚処理系にある種の競合状態を引起こすことが出来る。そしてこれによって、左右差が検出できるようになる。このような検査法をダイコティック・リスニング・テスト(Dichotic Listening Test: DLT)と呼ぶ(図2-2)。

これらの感覚系を利用した検査法の開発によって、正常例についても脳機能の非対称性がより鮮明に浮きぼりにされてきた。特に本論文との関わりが深い聴覚系の左右差に関しては、上記のDLTによって言語音の右耳優位(左半球優位)が明らかにされたことに加えて(Kimura, 1967; Shankweiler & Studdert-Kennedy, 1967; Darwin, 1971; Doehringら, 1971)、メロディー認知(Kimura, 1967)、環境音(Curry, 1967; Knoxら, 1970; Hattaら, 1979)、音の高低弁別(Darwin, 1971)、音の弁別域(Murphyら, 1970)などの非言語音に関する処理においては、左耳優位(右半球優位)となることなどが明らかにされた。

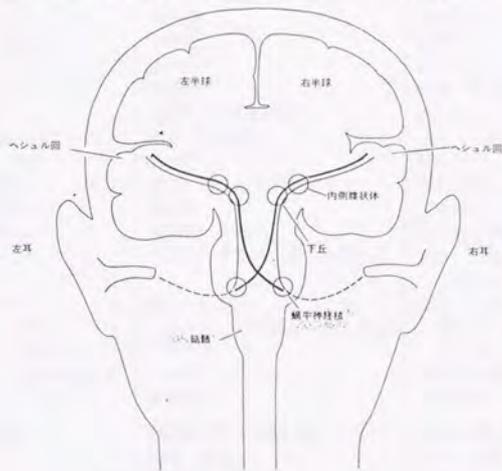
今日では新しい抗てんかん剤の開発などによって脳梁切断患者を用いた実験はほぼ姿を消しつつあるため、上記の神経心理学的研究や正常例を対象とした実験研究が主に行われている。

なお、これまでに報告されている左右半球の機能的差異の特徴についてまとめると、概ね表2-2のようになる。



両耳分離刺激聴法 2チャンネルのテープレコーダに接続したイヤホーンを通じて、一方の耳にあるメロディが、同時にもう一方の耳には違ったメロディが流れてくる。次に今度は両方の耳に同じメロディが、4種類同時に

提示され、被験者はその4つのメロディの中から左右の耳に別々に与えられたメロディを選び出す。他に、数、言葉、無意味音節、自音、テープに録音した言葉も逆によむしたもの、笑い声、叫び声などが使われた。



聴覚伝導路 2つの耳から左右の大脳半球の皮質聴覚野に達する神経路は、途中で一部交叉している。それぞれの半球は両方の耳からの入力を受けけるが、1つの耳と反対側の大脳半球との結合の方が、同じ側の半球との結合より強くなっている。大脳半球内の聴覚機構に、両側の耳からと反対側の耳からの入力と同時に、両側の耳からと、より強い反対側からの入力と同側からの入力を抑制、または遮断することが考えられる。

図2-2 DLT(上)と聴覚伝導路(下)。

主 著 者	優 位 半 球	劣 位 半 球
Anderson	実行的	貯蔵的
Assagioli	理性的	直観的
Bacon	議論的	経験的
Bateson ら	デジタル的	アナログ的
Blackburn	理知的	感覚的
Bogen	命題的, 言語的	並置的, 視空間的
Bruner	合理的	隠喩的
Deikman	能動的	受動的
Eccles	意識への連絡, 言語的 観念構成的, 分析的	意識への連絡欠如, ほとんど非言語的
Freud	因果的, 算術的, 計算機的 二次的過程	統合的, 幾何学的, 空間的 一次的過程
Goldstein	抽象的	具体的
Guilford(村上)	収束的(体系依存的, 常識的, 論理的, 解析的, 既存体系と整合・調和)	拡散的(孤立・独自の, 個性的, 脱論理的, 映像的, 既存体系と不整合・不調和)
Hécaen	ことば	前言語
Humphrey ら	命題的	想像的
Jackson	表出的, 構音的, 命題形成的	知覚的, 視覚的, イメージ
James	差別的, 特異的	実存の, 実在的
Jung	因果的	非因果的
Kogan ら	分析的	関係的
Lee	線型的	非線型的
Levy ら	分析的, 論理的	形態的, 総合知覚的
Luria	系列的	同時的
Maslow	合理的	直観的
McFie ら	関係的	対応的
Milner	言語的	知覚・非言語的
Neisser	系列的(因果連鎖的)	並列的
Oppenheimer	時間・歴史的	永久・無時間的
Polanyi	明示的	暗黙的
坂野	感覚系的, 論理的思索型	運動系的, 芸術思考型
Sechnov	連続的	同時的
Semmes	局所的, 分離的	拡散的, 瀟灑的
Sperry	分析的, 分類の, 系列的記号化	全体・形態的, 表象・同型的, 同時関係の合 成化
角田 (日本人)	言語・計算	音楽
(西欧人)	ロゴス, バトス, 自然(母音) ロゴス	もの バトス, 自然, もの(母音)
Weisenberg ら	ことば	視覚または運動感覚
Zangwill	象徴的	視空間的
清朝	創造的(天), 男性(陽)	受容的(地), 女性(陰)
ヴェーダ哲学	光明, 時間 ブッダ	暗黒, 空間 マナ
	昼	夜

表 2-2 半球の機能的特徴。

2-2. key-tapping test

と「脳幹スイッチ機構」

DLTは、1960年代から今日にいたるまで広く応用されてきた。しかし本法については、使用できる音源の種類が限定される、ヒトには優れた選択的注意機構が備わっているため容易に片耳にのみに注意を集中することができるので競合状態を実現することが困難である、あるいは被検者に口頭あるいは筆記などによって応答させる必要がある、など方法論上の問題がある。

これに対して Delayed Auditory Feedback effect (DAF効果) を利用した、角田法 (key-tapping testによる大脳半球優位性検査) と呼ばれる方法が開発された (1965)。同法は、図2-3、2-4のように、被検者のkey-tappingに同期した同期音を片耳へ与え、これに対して同期音をおよそ200msec遅らせた遅延音を反対側耳へ与える。被検者には、聴こえてくる同期音に注意を集中して、規則正しい一定のリズム・パターン (3-3のパターン; …… または4-2のパターン; …… など) を打叩するように要求する。同期音に対して遅延音の音圧がある程度以上大きくなると、被検者の同期音への注意集中が低下して、規則正しいtappingの続行が不可能となる (DAF効果)。この時の同期音と遅延音との音圧の差を、左右の耳についてそれぞれ比較することによって、検査音に対する左右耳の優位差を評価する方法である。この時、左耳優位、右耳優位は一般にDLTにおける評価と同様に、それぞれ反対側の、右半球優位、左半球優位と解釈される。

図2-4を用いて具体例で説明する。先ず最初の音刺激として母音/a/を用い、指先で刻む3-3; …… のリズムに同期する音を30dBの強さで左耳に与える。リズムを数回刻んだ後、右耳に30dBの遅延音を聞かせてもリズムは乱れないが、例えば35dBに上げると正しいリズムが刻めなくなる (a)。次に左右を逆にして右耳に同期音を与えてやると、左耳に75dBではじめてリズムが乱れる (b)。したがってこの場合、右耳で同期音を聞いた時の方が遅延音による妨害を受けにくかったので、右耳が左耳より40dB (=75dB-35dB) 優位であると判定される。このような評価法でホワイトノイズを用いた場合 (c, d) では、逆に左耳の方が右耳よりも40dB優位と判定される。

角田は同方法によって、正常なヒトの聴覚系には音の物理構造によって大脳の左右半球へ振分ける「音の自動選別機構」の存在することを推定している。そしてこの機構は言語機能と密接な関係があって、6歳から9歳の間の言語環境によって固定化される、すなわち臨界期があるとしている。そして、この間に日本語の言語環境下にあった人の場合、子音-母音から成る音節、母音、動物や虫の鳴き声、小川のせせざりや風の音、邦楽器音な

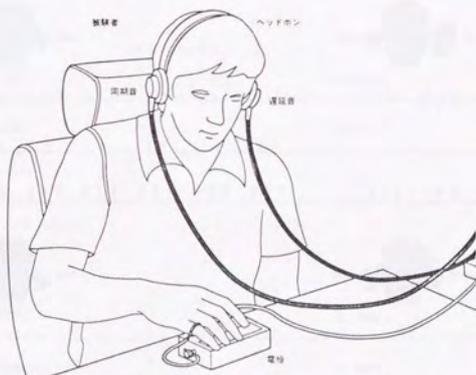
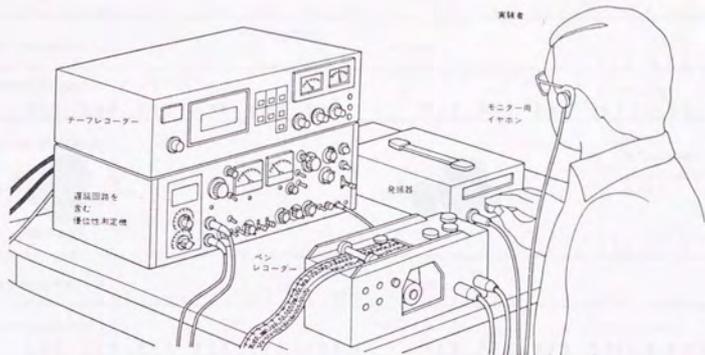


図2-3 key-tappingによる大脳半球優位性検査（角田法）

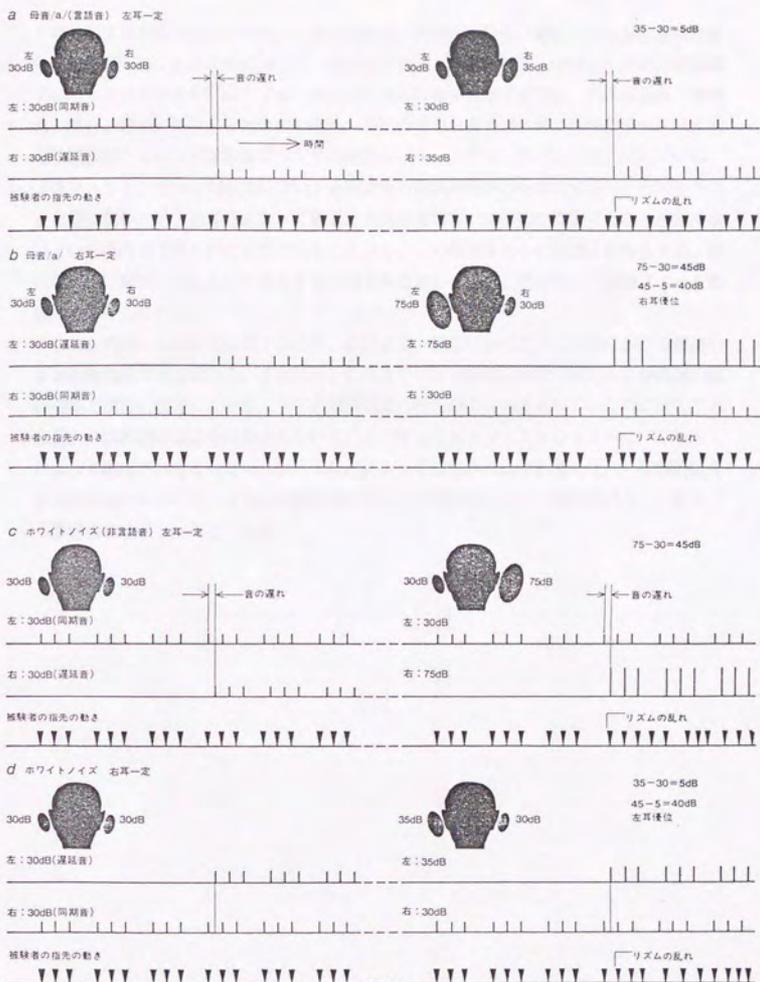


図2-4 key-tapping testによる判定. 母音/a/を検査音とした場合(a, b)とホワイトノイズを検査音とした場合(c, d). (詳細は本文参照)

どは言語半球優位（主に左半球）、西洋楽器音、機械音、雑音、純音などは非言語半球優位（主に右半球）となるのに対して、臨界期に英語、仏語、独語、中国語などの言語環境下にあった人々の場合には、子音-母音から成る音節が言語半球優位、西洋楽器音、機械音、雑音、純音、母音、動物や虫の鳴声、小川のせせらぎや風の音、邦楽器音などは非言語半球優位となり、言語環境によってその優位性パターンが異なることを見出だしている

（図2-5）。そして同現象については検査音の持続時間が50msec~70msecと非常に短いため、被験者にとって聴こえる音が何の音であるのか同定することが出来ないという条件下で得られたものであることから、この機構をヒトの意識下に存在する、解剖学的には脳幹を中心として存在するものであるとして、これを特に「脳幹スイッチ機構」とも呼んでいる。

なお、角田による結果は以下の点で、これまで一般に行われてきた大脳における機能的非対称性の研究とは異なる。すなわち、これまでの非対称性の研究のほとんどが高次の認識機能と密接に関連しており、主に大脳皮質連合野の機能を対象としていたのに対してより低次の脳幹機能周辺を対象としていること、そしてkey-tapping testによって検出される左右差は、DLTなどによって検出される左右差に比べて圧倒的に大きな左右差であること、さらには臨界期における言語環境によって優位性パターンが大きく影響されること、などである。

a 日本人と欧米人で優位性が共通している音



b 日本人と欧米人で優位性に相違のある音



日本人と欧米人の違い 一連の研究から、左右の大脳半球に機能分担のあることが明らかになった。子音を含む音節のような言語音が左脳優位、西洋楽器音や雑音、ホワイトノイズが右脳優位となるのは、日本人と欧米人とに共通していた(上)。しかし、泣き声や笑い声のような感情音、動物や虫の鳴き声、小川のせせらぎのような自然音、邦楽器音などは、日本人では言語音と同じ左脳が、欧米人では右脳が優位になっていた(下)。この違いは6-9歳の間の言語環境によって後天的に決まることがわかった。

図2-5 key-tapping testによる日本人の優位性パターンと欧米人の優位性パターンとの相違。(本文参照)

第3章 聴覚系の構造と機能

外耳に入った音響エネルギーは、鼓膜、耳小骨の振動という機械的エネルギーに変換され、さらに蝸牛で電気エネルギーに変換されて神経情報として上位の神経核に伝達される。この神経情報は、上オリーブ核、下丘、内側膝状体などの中継核でさらに複雑な処理を受けて、最終的に大脳皮質の聴覚野に到達する。

3-1. 聴器

耳は聴器として聴覚とともに平衡感覚も司る感覚器で、外耳、中耳、内耳に大別される。外耳を除き、その大部分は側頭骨の岩様部内に存在する(図3-1)。

中耳腔には耳管を通じて外気が送り込まれており、鼓膜内外の空気圧が常に等しく保たれているため、鼓膜は音に対する振動が良好な状況に保たれている。中耳では、低インピーダンスの空気振動が高インピーダンスの内耳液に効率良く伝達される。耳小骨はツチ骨、キヌタ骨、アブミ骨から成り、互いに関節で連絡し耳小骨連鎖を形成している(図3-2)。鼓膜から前庭窓に音波が伝わる際に、鼓膜とアブミ骨底の面積比、耳小骨のテコ作用により音圧は約30dB増強される。

内耳は中耳腔の内側に存在しており、その構造が極めて複雑なので迷路とも呼ばれる。聴覚と平衡覚を感受する器官が存在して、前方から後方に蝸牛、前庭、三半規管が並び、互いに内耳液(リンパ液)で交通している。アブミ骨の振動はリンパ液を介して蝸牛基底板に伝わる。この振動波は蝸牛底から蝸牛頂に向けて進行しながら振幅を増大させ、周波数によって決まる場所(高周波音では基底回転側に、低周波音では上方回転側となる)で最大に達したのち急激に減少する(図3-3)。ラセン神経節は有毛細胞に接する神経終末のうち、無顆粒性の求心性神経終末と脳幹部の蝸牛神経核とを連絡させている双極性の神経細胞から成る。この細胞は蝸牛神経の第一次ニューロンを成す(図3-4)。

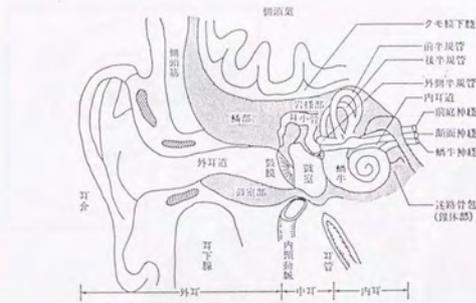


図3-1 聴器と周辺組織

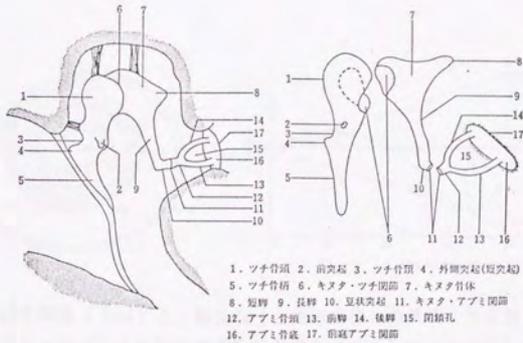


図3-2 耳小骨

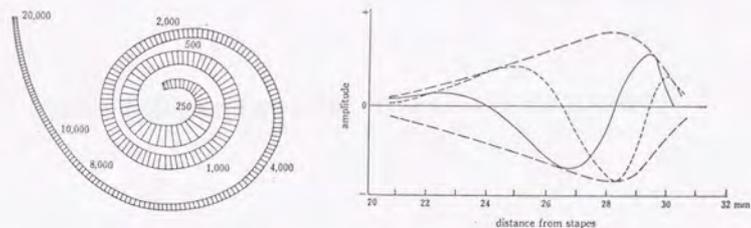
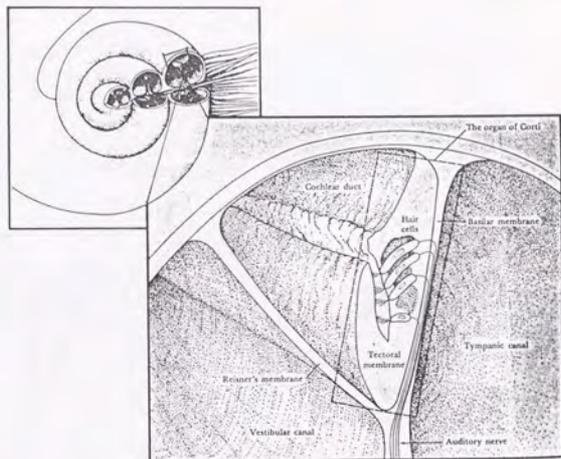


図3-3 蝸牛断面(上図)と、基底板(上図四角部)の構造(下左図)および200Hz純音により蝸牛基底板に形成される進行波(下右図)。基底板の長さは約3.2cm、約24000本の線維からなっており、基底板の幅は基底回転で狭く、頂回転に向かうにしたがって広がる。下左図において、数字は最大振幅を起こす周波数(Hz)の部位を示す。また、下右図において、実線と点線は位相の異なる2つの波を示す。

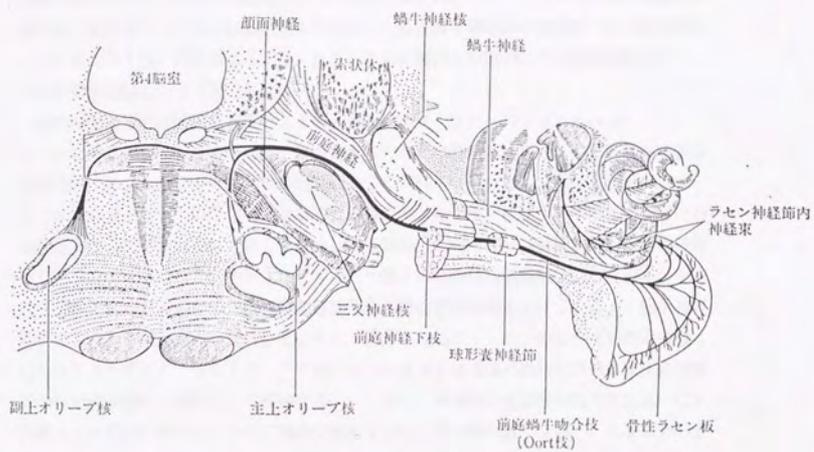


図3-4 聴覚末梢神経の走行路。(Rasmussen, 1960)

3-2. 中枢聴覚伝導路

ラセン神経節細胞（1次ニューロン）は、脳幹部の橋に存在する蝸牛神経核でシナプスを形成する。ここから2次、3次ニューロンとなって同側あるいは対側の上オリブ核、台形体核と連絡する。ここからさらに同側あるいは対側の被蓋に達し、いわゆる外側毛帯をつくって中脳や間脳の下丘や内側膝状体に向かう。これらの核で中継した第4次、第5次ニューロンは聴放線を形成して大脳皮質の側頭葉の聴覚領である横側頭回（Heschl回）に終わる（図3-5）。通常対側の伝導路のほうが神経線維が多く、これを対側優位という（第2章参照）。

蝸牛神経線維では刺激音がないときも自発放電（spontaneous discharge）がみられる。刺激音を与えると自発放電は消え、音に対する応答放電が出現する。また、どの線維からの応答もそのPST（Post Stimulus Histogram）の型は同一であるという点で、蝸牛神経核以上の中継核で記録されるPSTヒストグラムとは大きく異なる。蝸牛軸を出た蝸牛神経は延髄に入り、蝸牛神経核で第2次ニューロンとシナプス結合する。蝸牛神経核は内側膝状体、下丘および上オリブ核とともにのおのおの大脳皮質聴覚領からの遠心性の投射を受けている。蝸牛神経核の後上方から微小電極を刺入していくと、測定されるニューロンのCF（特徴周波数：Characteristic Frequency）は電極の進行につれて順次高周波数から低周波数へと規則正しく移動する。そして背側核と腹側核の境で急に高いCFの聴ニューロンに変わり、さらに電極を進めていくと再び順次低くなる。すなわち各subdivisionにおいてそれぞれ独自の周波数配列がある。この様な配列をtonotopic organizationという（図3-6）。

蝸牛神経核からの2次ニューロンには同側のオリブ複合体に入るものと、対側の上オリブ核に達するものがある。オリブ複合体はこの様に左右の耳からの入力がかつて融合する核で、両耳機能、特に音の方向感覚において重要な機能を有する。この核群にもtonotopic organizationが認められる。また、上オリブ核は下丘とともに大脳皮質聴覚領からの遠心性の下行路の中継核にもなっている。この核周辺には眼球運動に関与する外転神経核、意識に関与する顔面神経核が存在、連絡している。さらに上オリブ核の求心線維は外側毛帯を形成し下丘に投射する。

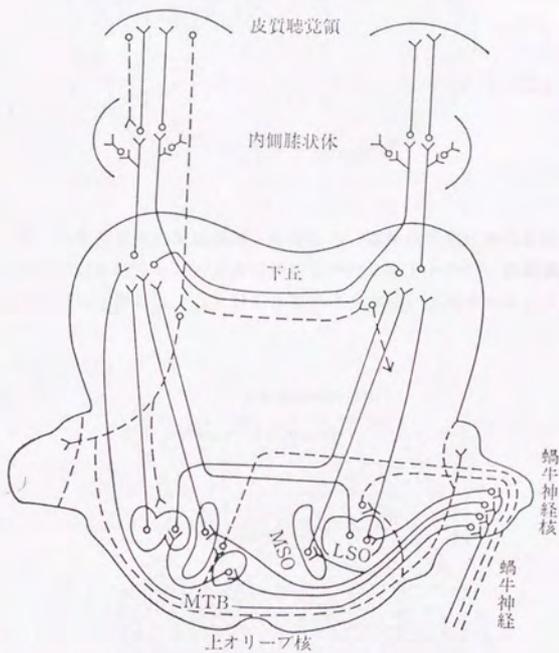


図3-5 聴覚経路。実線は右蝸牛からの求心路、破線は左皮質聴覚野からの遠心路。
 MSO：内側上オリブ核、LSO：外側上オリブ核、MTB：台形体内側核。
 (勝木, 1982)

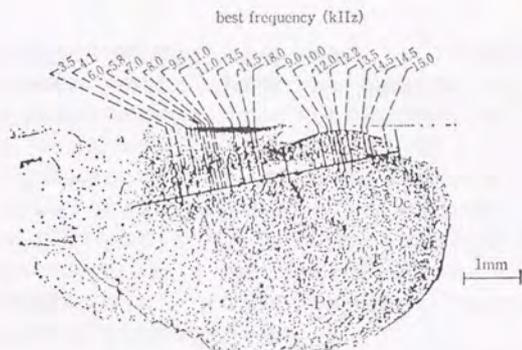


図3-6 蝸牛神経核の矢状断面図。左が前方、電極は背側核から前腹側核に刺入され、ニューロンのCFは15 kHzから順に9 kHzまで下がり、前腹側核に入ると18 kHzに上昇し、再び3.5 kHzまで小さくなる。(Rose, 1960)

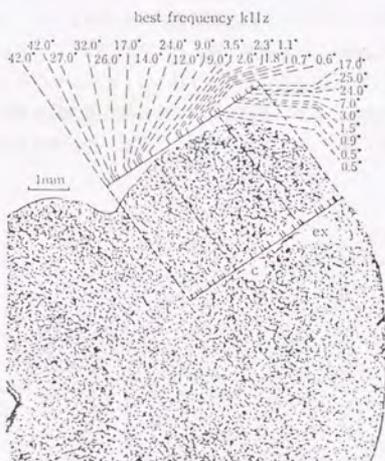


図3-7 下丘のtonotopic organization (Rose, 1963)

下丘では中央核が主な細胞群をなしており、背内側部は主として大型の多極細胞から成り、大脳皮質聴覚領、外側毛帯および反対側の下丘からの線維を受けている。また下丘の中心核は反対側の蝸牛神経核の大部分の核から求心性の線維を受けており、tonotopic organizationが認められる(図3-7)。

下丘ニューロンの刺激音に対する応答は、蝸牛神経核のそれとは大きく異なっている。トーンバーストに対する応答では、持続放電型が少なくなり、刺激音のon-setに興奮するon型、抑制されるoff型、途中で休止期を有するpauser型の他、特に持続放電型で過時の非常に長いlong-latency型なども存在する。この他、FM音やAM音に特異的に応答するニューロンもあり、多様な応答パターンを示す。下丘ニューロンは音源定位においても重要な機能を有する。

内側膝状体は間脳視床後部にあり、腹側部、背側部、内側部に分れる。特に腹側部は下丘腕からの入力を受ける主な上行路であり、この部位に、やはりtonotopic organizationが認められる。内側膝状体のニューロンの応答は下位のそれに比してさらに複雑になり、例えば語音のように複雑な音に対して特異的に応答するものが多く認められるようになる。また、背側部および内側部では視覚や体性感覚にも関与している。内側膝状体を出た線維は聴放線を形成して側頭葉の聴覚領に達しており、逆に大脳皮質からの遠心性の投射も受けている(図3-5)。

大脳皮質聴覚領は、ヒトで側頭葉の深部横側頭回(Heschlの前回と後回)、Brodmannの41、42野に存在する(第1章参照)。大脳皮質では下位の中枢と異なって整然としたtonotopic organizationは顕著ではないが、大まかにみて、第一次聴覚領の前部は蝸牛の基底回転に対応し高音を、中間部は第2回転で中間音を、後部では頂回転に対応し、低音を感受する。第二次聴覚領ではこれと逆になる。

第4章 脳波の発生機序

脳波を構成する素波の問題については、Adrianによるスパイク集合電位説や、Bremerの脳電位の自発変動によるという説などがあったが、実証的証拠はなかった。近年、微小電極法が適用されるようになって、単一ニューロンの各部分が示す膜電位変動や活動電位が詳細に調べられるようになってきた。また皮質波との相関に基づいて研究されるようになった。

4-1. 脳波の成因について

ニューロンの電気活動には大別して、1) 非伝導性の比較的遅い電位(シナプス電位など)、2) 伝導性のスパイクの2種類があり、これらはすべてなんらかの形で、集合活動(mass activity)に反映し得るものと考えられる。

しかし、脳波を1)のEPSPやIPSPのシナプス後電位や皮質細胞の脱分極または過分極による膜電位変化によるものとして理解する点で、関連研究者の意見はほぼ一致している(Peronnet, 1972; Calvet, 1964; Creutzfeldt, 1974; Thatcherら, 1977等)。一方、2)のニューロン・スパイクの同期的表現が脳波であるという考えはほぼ否定されている。これは深麻酔下でスパイク電位が消失している状態でも脳波が残るという実験事実、あるいは酸素不足下での脳波とスパイク活動との解離現象が存在するという実験などによる(中西ら, 1979)。

尖頭樹状突起電位(dendritic potential:皮質直接刺激により皮質表層をゆっくり伝わる緩電位)がChang(1951)以来、長く脳波起源の最有力候補とされてきたが、皮質深部の電気活動も脳波の成因であることが明らかにされたため、尖頭樹状突起が皮質内ダイポール層のひとつとして重要な役割を有することが事実ではあっても、説としては古典になりつつある。

粗大電極による皮質脳波と微小電極による皮質錐体細胞の細胞内電位との同時記録は、ある場合時間的にそして位相的に明らかな対応を示す(図4-1)。また、視床の特殊投射核または汎性投射核の低頻度反復刺激による増強反応(augmenting response)または漸増反応(recruiting response)が認められている(図4-2)。これらは、バルビタール麻酔時あるいは睡眠時に見られる紡錘波などの、脳波の同期現象の成因を究明する上で重要である。

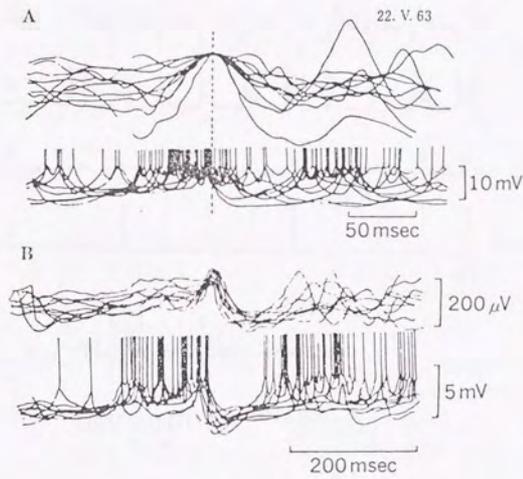


図4-1 2つの型の脳波とそれに対応する錐体細胞からの細胞内記録。(Creutzfeldtら) Aは表面陰性で対称的波形をもつ波で、細胞発射を伴う純粋なEPSPに対応する。Bは陰性、陽性波で、表面陰性波はEPSPに、表面陽性波はこれに続くIPSPに対応する。

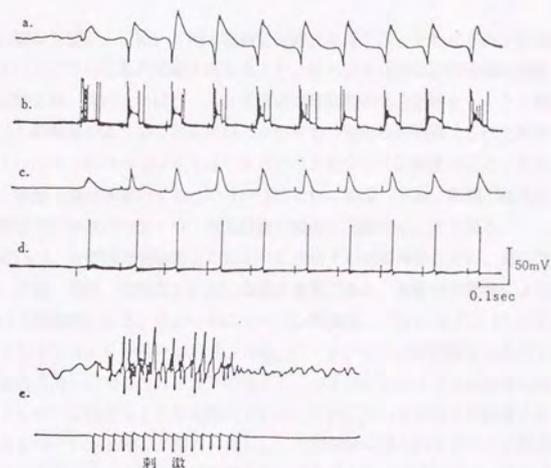


図4-2 aは視床のVL核に低頻度刺激(7Hz)を加えた場合の増強反応を、bはその場合の細胞内電極で記録した錐体路細胞の発射。この場合顕著な発射群がEPSPの高まりの部分で生じており、aの陽、陰の両方の波形にわたっている。cは視床のCM核の低頻度刺激の場合の漸増反応を示し、dはその時の錐体路細胞内導出による発射の様子。水平軸は0.1秒、縦軸は50mV。eはネコの頭皮上からCM核刺激(8Hz)時の漸増反応を、記録速度を遅くして示したもので、全体としてCM核の刺激に同期して脳波が形成されることがわかる。なおaとcは細胞外での記録である。

4-2. 容積導体と電流ダイポール

ヒトの脳波を頭皮上に置いた粗大電極で記録する場合に、それがどのような電気現象を記録しているのかの理論的基礎を考える上で、最も重要なのは容積導体の問題である。脳波の記録とは、要約すれば、1) 多数の神経細胞の集合活動を、2) 細胞外で、しかも3) 組織液のような3次元のひろがりをもつ電導性の媒質(これを容積導体(volume conductor)という)を介して記録することである。換言すれば、頭皮上脳波を導出するということは、頭皮、頭蓋、髄膜、髄液などをへだてて、電極近傍の多数のニューロン電気活動の総和を記録することである。

誘発反応は、末梢感覚受容器またはそれに連絡する感覚神経などに、適当な刺激を与えた場合、大脳、脳幹、脊髄などに起こる電位変動である。神経核の興奮による誘発反応の発生は以下の機構による。核の中のニューロンの興奮、すなわちインパルスの発生の前段階としてシナプスにEPSPが形成される。EPSPは脱分極であるので電位を上昇させ、電流が流れこむ(Naイオンの流入)。つまりこのシナプスは電流の流れこむ負の電位点となり、これをsinkと呼んでいる。これに対して電流の供給源となるシナプス周囲をsourceと呼ぶ(図4-3)。神経核は多くのシナプスの集合体であり、これらのシナプスがある程度の同期性をもってEPSPを形成すれば、核自体がいわばsinkとなり、核周辺ではsourceの役割を果たすと考えられる。この時、電極を核の外に設置すると、sinkとなっている状態では負の電位、sourceとなっている状態では正の電位が記録される(図4-4)。

神経路の興奮伝搬のように、興奮部位が移動する場合は、まず電極部より末梢部での脱分極に対してsourceとなるから正の電位、つづいて電極部での脱分極に対してsinkとなるから負の電位、そしてより中枢部の脱分極による正の電位という3相性の電位変動が記録される。このような波は、電極が興奮部位の近傍にあるときにみられるもので、near-field potentialと呼ぶ。

単一刺激による感覚性誘発反応は、多くの場合表面陽性波につづく、持続20~30 msec、振幅数100 μ V~数mVの表面陰性波から成る2相性の波形となり、これを1次反応(primary response)と呼んでいる。大脳皮質は6層から成るが、錐体細胞はその深層に多く認められる。錐体細胞からは大脳皮質の上層に垂直に向かう1本の尖頭樹状突起が出ており、これに多くのシナプスが付着している。層別に誘発反応を記録すると、表面陽性波に対して深層からは陰性波が認められる。これは深層の錐体細胞体に近い尖頭樹状突起の基部に発生したEPSPによる脱分極と、それによる錐体細胞体の発射によってその部がsinkとなり、表層部がこれに対するsourceとなる

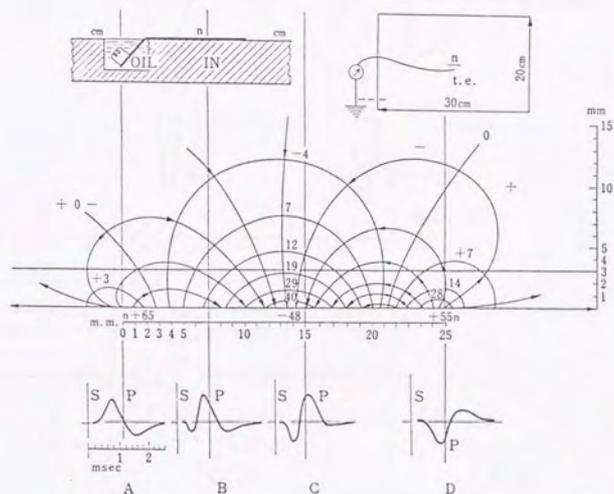


図4-3 神経インパルスのまわりの電場。Pの瞬間に記録電極を数百カ所に設置して測定したものである。Sはそれぞれの場合の刺激の時点をあわす。上図右は櫛紙の中央にニューロン(n)を置き、これに測定電極(t. e.)と櫛紙の片隅に基準電極を配置した。上図左は神経を錳物性油槽内で電気刺激し、その軸索はリングル液で浸した櫛紙の上にのせたところ。(Lorente de Nó, 1947)

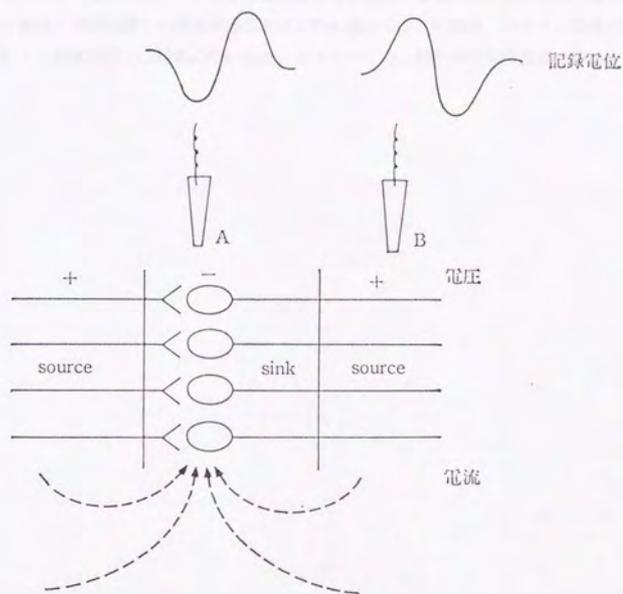


図4-4 誘発電位の発生機序。興奮部位はEPSP優位となり、脱分極のため電流の流れ込み(sink)が起こる。つまり電圧としては負となる。このためAの部位では負の電位がまず記録される。興奮が終わると隣接部位の興奮(source)に対して電流の湧き出しとなり、記録上正の電位となる。Bでは、これと逆の位相の誘発電位が記録されることになる。

ことによって生成される。表面陰性波については、深層のIPSPあるいは樹状突起のEPSP性脱分極によるとされている(図4-5)。

near-field potentialに対して、興奮部位から離れた所で記録された場合、far-field potentialと呼ぶ。far-field potentialでは、ある程度記録部位を移動しても波形に大きな変化が認められない。頭皮上や脳硬膜での誘発反応などはこれに属する。この場合、シナプス電位がよく同期して、興奮部位では経過の短い波形となっても、緩やかな電位変動となる。

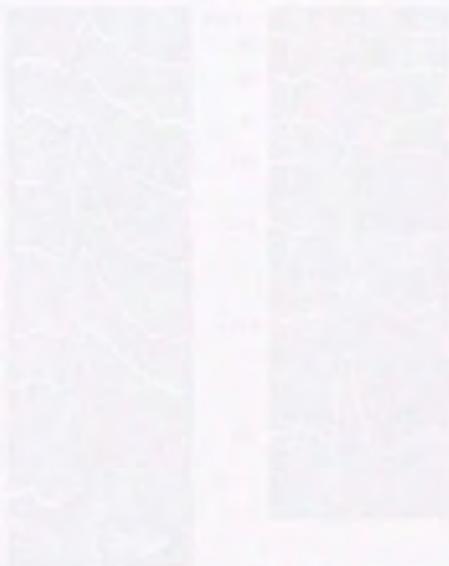
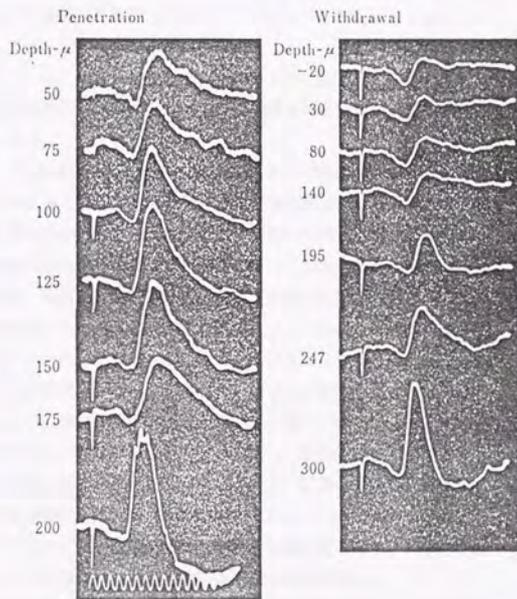
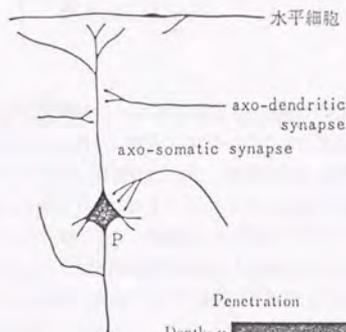


図4-5 近接電位と遠隔電位の波形。左は興奮部位に近い近接電位を示し、右は興奮部位から離れた遠隔電位を示す。両方とも誘発電位である。縦軸は電位、横軸は時間を示す。



—
|
+

図4-5 ネコの体性感覚性誘発電位の1次反応(下)と大脳皮質における錘体細胞のシナプス接続関係(上)。 下肢の皮膚に電気刺激を与え、微小電極を皮質に刺入時(左)および抜去(右)の皮質の各深さにおける1次反応。時間軸用の正弦波の周波数は500Hz。表面では陽性の波が、深さ200 μ ~300 μ 付近では陰性(上向き)になっている。(Mountcastleら, 1957)

4-3. 聴性誘発反応

聴性誘発反応は、音刺激に対応して蝸牛から大脳皮質の聴中枢に至るまでの聴覚伝導路、あるいはこれらに関連する部位から生じる電位変動である。その大きさは0.1~10 μ Vであり、潜時や記録法、反応の特徴などから、脳幹反応、中間潜時反応、頭頂部緩反応に大別される(表4-1)。ただし同表で示された刺激音の種類は一般的な記録に用いられるものであり、各数値は平均的なものである。なお、大部分の聴性誘発反応は頭頂部と耳垂または乳突部間の電位差を記録したものである。また波の命名については、一般に反応極性(反応ピークの極性)と潜時(P60-N100など)によって表示したり、発生順序で表示(P1-N1など)したりする。

蝸電図(CM, SP, AP)は、蝸牛から蝸牛神経にかけての反応であり、鼓室内に針電極を挿入したり、外耳道に電極を装着したりすることで記録される。これらは聴器や末梢機能についての情報を有する。

聴性脳幹反応(ABR)は聴性誘発反応のうちでも安定性あるいは再現性のよさ、記録の容易性、反応閾値の低さなど多くの利点があるため、現在臨床医学的には最も広く利用されている。ABRは蝸牛神経核から下丘に及ぶ脳幹の広範囲の聴覚伝導路の活動によって形成される。特にその速波成分(第9章)はそれぞれのピークが由来する中継核がほぼ明らかとなっていることから、脳幹障害や意識障害の診断、予後判定に活用されている。

聴性中間反応は、構成周波数が30~50Hzで潜時12~70msecの緩やかな電位変動で、特に潜時30msecのPa成分を中心にNa-Pa-Nbから成る。

頭頂部緩反応(SVR)は聴性誘発反応のうちでも、最も古い歴史を持つものであるが、音の認識や注意集中などのより高次の情報処理との関連が深いため、いまだにその値は失われてない。SVRはP1-N1-P2-N2から成り、聴性誘発反応のなかでも特に周波数特異性を有する反応である。起源については、いまだに多くの議論が残されているが、一般には側頭部の聴覚野の活動と深い関連があるとされている(図4-6)。

P300は、潜時300msec~400msecの大きな陽性波である。刺激音を数えたり、作業の遂行などによって現われる反応で認知機能との関連が深い。

CNVは、次の命令刺激があることを予告する刺激と、作業や判断の開始を示す命令刺激とが一致になって与えられた時に生じる。これはDC成分の変動であり、P300と共に認知機能が関与する。

	反応の名称	潜時	刺激音	解析時間	刺激間隔	フィルタ帯域	加算回数	反応の起源
蝸 電 図	1. 蝸牛マイクロホン電位 CM	0msec	トーンビップ	10msec	50-100 msec	1-5000Hz	1000 ? 2000	有毛細胞
	2. summing potential SP	0	短音					コルチ器
	3. 蝸牛複合活動電位 AP	1-4	クリック トーンビップ					蝸牛神経
頭 頂 部 反 応	4. 聴性脳幹反応 ABR	2-12	クリック トーンビップ	10-20	50-100	30-1500	1000 ? 2000	脳幹聴覚路
	5. frequency-following response FFR	6	トーンビップ 短音					
	6. 聴性中間反応 MLR	12-70	トーンビップ	50-100	100-150	10-300	1000 ? 2000	聴皮質と 脳幹聴覚路
	7. 40Hz 事象関連電位 ERP		短音	50				
	8. 後耳介反応 PAR	10-25	クリック トーンビップ	50	50-100	8-120	500	後耳介筋
	9. 緩反応 SVR a. 覚醒時反応 b. 睡眠時反応	50-300 200-800	短音	1-2sec	1-2sec	0.3-30	30-60	聴皮質
	10. P ₃₀₀	300-450	短音			0.1-120	40	大脳皮質 連合野
	11. CNV	第1刺激の 反応後	短音+ 他種刺激	不定	不定	DC~30	10-20	

表 4-1 聴性誘発反応の分類.

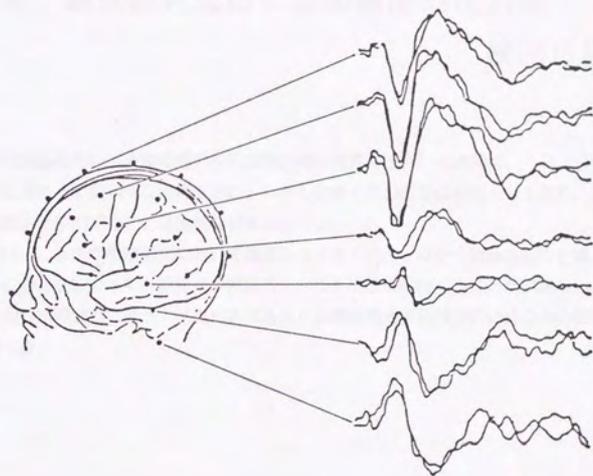


図4-6 SVRの頭蓋分布. 電位の位相逆転が上側頭溝近傍で生じる.
 (Vaughanら, 1970)

第5章 聴性誘発反応による機能的左右差

検出可能性

聴性誘発反応を用いて大脳半球の左右差検出の可能性を追究した研究は、1970年代以来今日に至るまで数多くなされてきた。しかしながらその結果は混沌としており、未だにこれを安定に検出することは困難な状況にある。

本章では、これまでの諸研究において採用されてきた方法とは全く異なる方法を導入する。この方法によって、聴覚系の機能的左右差を明確に検出することが出来る。本章では、この方法の適用によって見出だされるヒトの聴覚情報処理様式のいくつかの側面について述べる。

5-1. 緒言

事象関連電位は感覺性誘発電位をはじめ、運動、知覚あるいは認知作業遂行中に頭皮上から導出される電位と定義される。この事象関連電位がヒトの大脳における高次情報処理活動、特に大脳半球間の機能差を反映するの否かについて、多くの研究者の関心を引いている。とりわけ、聴性誘発電位を用いた研究は多い。Morrelら(1971)は側頭-頭頂部において、言語音刺激時に左側のN1成分が右側に比較して大きくなるという結果を報告している。またWoodら(1971)は、N1-P2成分に左右差の生じること述べているが、その差異の成因は音刺激に対する被験者の意味付けによるとしている。これらの諸研究は聴性誘発反応を用いた大脳半球機能差検出の可能性について肯定的結果は出しているが、被験者個人から得られる差異については非対称性係数(5-3-2参照)ではほぼ10%程度と、非常にわずかな差にとどまっている。また一方では、聴性誘発反応を用いて大脳半球の機能差を検出することは不可能とする否定的報告も少なくない(Galambosら, 1975等)。研究方法、データの解析方法、条件統制などがそれぞれ個々の研究で異なるため、これらの結果を直接比較することは困難であるが、少なくとも現時点では、聴性誘発反応を用いた大脳半球機能差の検出可能性については混沌とした状況にあると言わざるを得ない。

Kimura(1961)のdichotic listening testや角田(1965)のkey-tapping test(第2章)を用いることによって、正常なヒトの聴覚情報処理機能に明確な左右差が検出されているにもかかわらず、聴性誘発反応という電気生理学的現象に明確な左右差が認められない原因は何か? ヒトの左半球に言語中枢の存在することは明白な事実である(2-1)にもかかわらず、なぜ言語音に対する聴性誘発反応の左右差が明確に認められないのか? これが本研究を始めるにあたっての基本的な問題であった。

以上の混沌とした研究状況の中で、聴性誘発反応による機能的左右差検出法を見出だすために以下の条件を設定した。

1) 広く用いられている大脳半球優位性検査法の多くに共通して見出される検査原理は、前述のように(2-1)左右半球のいわゆる競合状態において、機能差がはじめて観察され得るということであった。一方、これまで報告されてきた聴性誘発反応による左右差検出可能性に関する研究のほとんどすべてにおいては、この競合原理の必要性は全く意識されていなかった。したがって基本的には試行錯誤に基づくが、この競合原理を最も重要な検査原理として意識する。ただしこれは、少なくとも現時点では理論的に完全に記載できるというほどの明確な条件ではないので、これに近い状況を設定する努力を行い、現象的により明確な神経活動の左右差を確実に検出し得ることを第一目的とした。

2) 前述のように、検出可能性について肯定的結果を報告している研究においてさえ、実際個人から得られている差については非常に微小なものである。したがってこれらの結果から、生理学的分析に充分耐え得るような情報を抽出する可能性は望めない。したがって本研究においては、まず個人から検出される左右差が十分に大きなものであることを要求した。こうすることによって、個人の経時的变化および安定性についてもはじめて議論することが可能になると考えた。そしてこれによって、同時に検査法自体の安定性についても検討することが出来る。従来の関連研究が個人個人の経時变化あるいは経時的安定性を追うことをしなかった、あるいは研究をさらに推進することが出来なかったのは、まず明確な差異を検出することが出来なかったというところに大きな原因があると考えられる。

3) 1) の適合原理を基本的に意識するが、実験条件が必要以上に複雑なものとなることを極力避けること。これは実験条件が複雑なものとなればなるほど、そこから得られる結果についての解釈、分析が困難となる危険性を避けるためである。従来の関連研究の中には、条件の複雑なものが見受けられるが、そのような研究では前述のように検出される左右差が微小であることも絡んで、結果の解釈が全く不明確であるものも少なくない。

次節では、以上の条件に合致する聴性誘発反応を用いた大脳半球機能差検出法について述べる。

5-2. 3Hz-AEP法

5-1. まえがきの項で掲げた条件を満たす方法を見出すために、筆者は数年間試行錯誤を繰り返してきた。その過程において見出された、少なくとも現在までにおいては筆者の掲げた条件に最も合致する方法を以下に示す。

まず同方法の基本的な外部条件として音刺激の提示条件をまとめる。

音の提示間隔： 300msec±30msec
音の持続時間： 50msec~70msec
音の立ち上がり、立下がり時間：10~30msec
音圧： 40dBSL~70dBSL
(SL: Sensation Level)

脳波の導出については、

導出部位：主にT3およびT4における電位の比較
(国際10-20系による(図5-1))
基準部位： 両耳垂連結(A1+A2)
脳波の加算回数： 32~128回
低域フィルター： 0.8~3.0Hz
高域フィルター： 20.0~200.0Hz

同測定法の主なブロックダイアグラムを図5-2に示す。このように実験の外部条件を設定した上で、さらに被験者の音の聴取状態、すなわち内部条件を統制する。

音刺激系列の時間間隔が充分長い場合には特に問題はないが、この方法で採用されている300msecという非常に短い提示間隔では音の聴取感覚が多様になる。物理的な音提示の条件は全く変わらないにもかかわらず、被験者の聴取感覚はその意識によって異なる様相を帯びる。以下は、筆者がこれまで行ってきた実験から、被験者の聴取感覚と音に対する注意集中の程度との対応関係について9段階に分類したものである。第1段階から第9段階へと進むに従って、被験者の音に対する注意集中が高まってゆく。

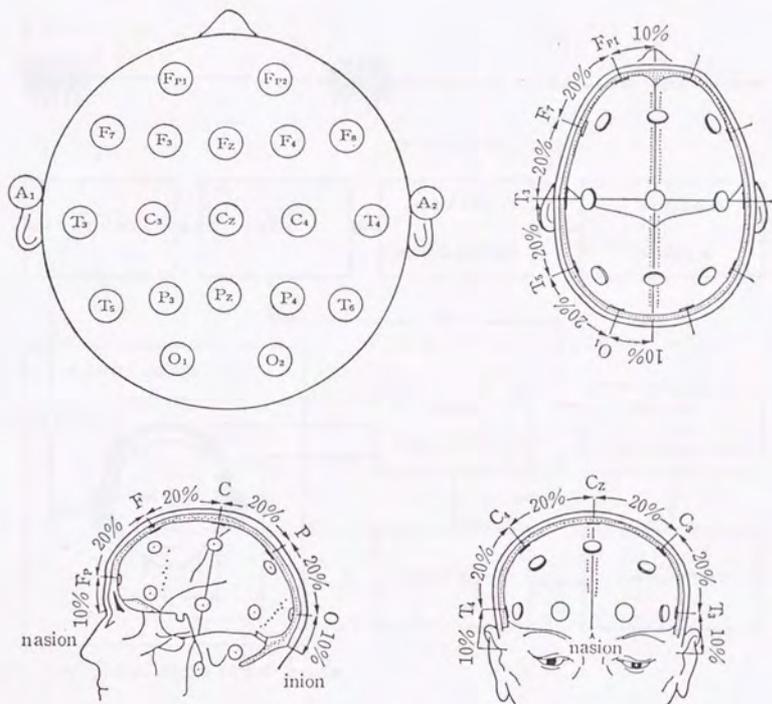


図5-1 国際10-20電極配置法。前後の始点は鼻根部 (nasion) と後頭結節 (inion) であり、左右のそれは耳介前点である。半円を10%と20%に分割して部位が決定される。

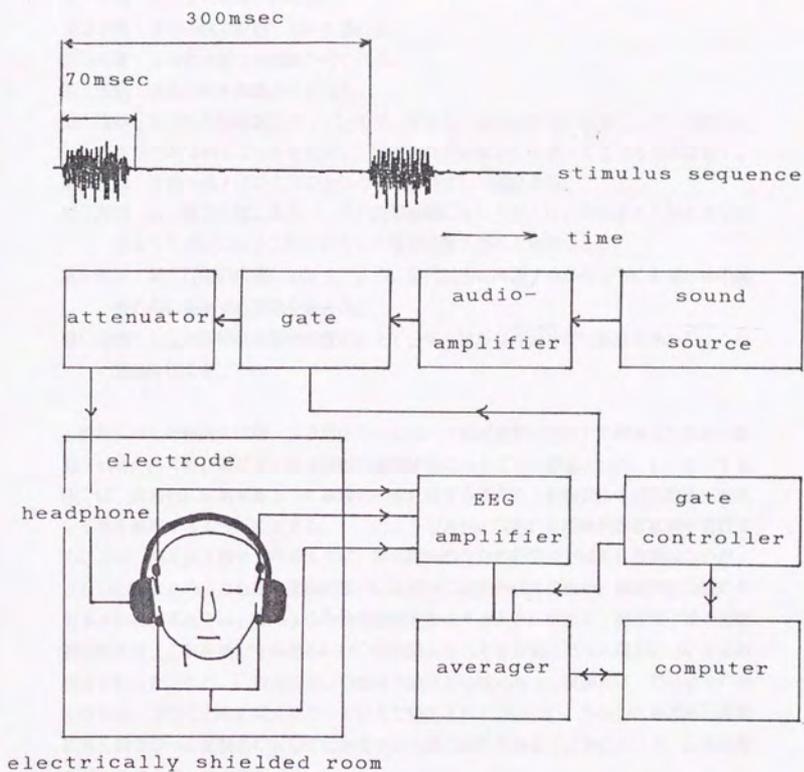


図5-2 聴性誘発反応の測定系のブロック図.

- 第1段階：音が全く意識に昇らない。
- 第2段階：音が不快で拒絶したいと感じる。
- 第3段階：音列の大部分が意識からされる。
- 第4段階：音列が時々意識からされる。
- 第5段階：音列は充分意識に昇っているが、単純な一定周期音列とは聞こえず、相続く2音がひとつのユニットを形成して周期的な交替音として聞こえる（音列の群化）。
- 第6段階：音列を成す音ひとつひとつが分離、独立して聞こえる。
- 第7段階：音が独立に聞こえる上、左右両眼輪筋に少し力が入り、両眼があたかも音を見るような感覚になる。同時に左右の眼が鼻側上部へと移動する。
- 第8段階：第7段階の状態に加えて、さらに音列周期に同期するかのように眼球が体の前後方向に振動する感覚を覚える。
- 第9段階：上記の眼球振動様の感覚に加えて、体全体が音系列と共に振動するような感覚を覚える。

数年にわたる検討の結果、300msecという音刺激提示条件下で顕著な左右差が観測されるためには、最低でも第6段階の聴取状態にあることが要求される。したがって本法では、音系列に同期するように被験者の音に対する構えを、被験者自らが能動的に形成して音を聴取するように要求する。このような音列に同期した能動的聴取状態を維持することは、例えば1秒や2秒のように、提示間隔の充分長い場合には特に支障はないが、300msecのような短い間隔の場合には相当に能動的な注意集中、聴取状態の維持が要求される。本法では、このような聴取状態を形成するように指示し、測定終了後の被験者の報告が、これを満たすかあるいはこの段階よりも上位段階にあった場合についてのみ検討を行った。なお、この方法がこの意味で適用不可能であった被験者は、これまでの測定からは、少なくとも正常人においてはまだ見出されていない。すなわち最初第6段階に達し得なかった被験者に対しては何度か同方法の適用を繰返すことによって、この段階を越えさせることが出来た。

前述の外部条件設定に加え、以上の内部条件の統制をおこなうことによって、従来の関連研究には認められなかった非常に顕著な、音の種類に対応した聴性誘発反応の左右差が検出される（5-3参照）。

同方法は前節の条件をよく満たすものとして、筆者が発見的に見出した方法である。この方法およびこれによって認められる聴覚系の情報処理様式に関しては、第12章においてさらに詳しく考察するため、本節ではこの方法に関してこれ以上詳しくは論述しない。

以上のように本方法では、300msecの周期で与えられる音系列に対して、これに同期するように被験者の意識の流れを形成することが最も重要な条件である。この方法は、従来の関連研究および一般の誘発電位記録法とは異なる特異な方法であるため、以後

便宜的にこの方法を「3Hz-AEP法」と定義する。そしてこの方法によって検出される誘発反応を、「3Hz-AEP (Auditory Evoked Potential)」と定義して、以下ではこれらの名称を用いることにする。

特に本論文において研究対象とした反応は、第11章の一部を除きすべてこの3Hz-AEP法によるものであるため、3Hz-AEPを単に「反応」、「誘発反応」あるいは「聴性誘発反応」と記載する場合もある。また以後の章において、付け加える点がある場合にはそこで改めて詳述することにする。

5-3. 3Hz-AEPにおける左右差

5-3-1. 方法

被験者は健常で、言語学習のいわゆる臨界期(1-3, 2-2)には通常の日本語の言語環境下にあった日本人男性5名、女性1名(年齢22歳~55歳)とした。測定に際しては、さらにkey-tapping test(第2章)の結果によって指摘されている大脳半球の優位性に影響を及ぼすとされる諸因子(喫煙、アルコール、薬物、嗅覚刺激など)も極力禁止した。誘発反応の記録は前述の3Hz-AEP法によって行った。

刺激音には、日本人男性の発声による母音/a/の準定常部をエンドレス・テープに編集したものと、聴力測定用のオーディオ・メーター内蔵のホワイトノイズとを用いた。これらの音は刺激提示間隔300msec、持続時間70msec、立上がり、立下がり共に10msecの断続音として、ヘッドホン(TDH-39)を介して被験者の両耳へ同時に提示した(図5-2)。

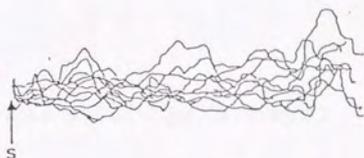
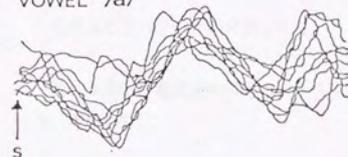
誘発反応は、T3及びT4から記録される脳波(0.8Hz~120Hz; -6dB/oct)を128回加算平均することによって求めた。なお脳波は、オシロスコープによってモニターし、眼球運動、筋電などのアーチファクトの脳波への混入をチェックした。また脳波の記録開始前数分間は、実験時と同様の条件下で音を聴取させた。

5-3-2. 3Hz-AEPの反応様式

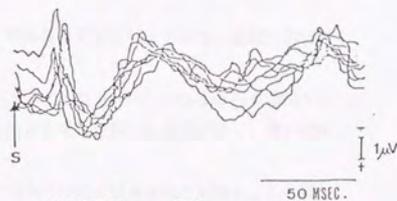
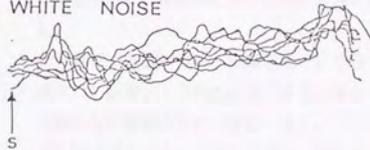
図5-3は、6名の被験者の中でも特に安定で(5-2における第7段階以上の聴取感覚が安定に実現する)顕著な結果を示したY例から記録された、母音/a/とホワイトノイズに対するT3およびT4の反応波形の重ね書きである。図5-3aの左図は、T3から記録された母音/a/に対する誘発反応であり、潜時約50~70msecの陽性波(P1-成分)および90~110msecの陰性波(N1-成分)の、主に2つの成分から構成される。一方、T4より記録された母音/a/に対する反応は、同右図のように、T3で認められるような明確な反応パターンをほとんど見出すことができなかった。日を変えて測定すると、T3で記録されるような反応パターンを形成することがあっても、上記2成分の頂点間振幅値は、明確な反応パターンを示すT3のそれに比較して小さかった。

逆にホワイトノイズに対する反応は、前述の典型的なパターンはT4においてのみ確認され、T3では認められなかった(図5-3b)。

a. VOWEL /a/



b. WHITE NOISE



LEFT T3

RIGHT T4

図5-3 被験者Y例から記録された、母音/a/ (a)とホワイトノイズ(b)に対する左右の側頭部T3、T4における聴性誘発反応の重ね書き。Sは刺激音のon-set

本法によって検出される検査音に対する非優位側から得られる反応については、

- 1) P1-N1の振幅が優位側のそれに比較して小さい。
- 2) P1-成分あるいはN1-成分が認められない。
- 3) 優位側の反応波形と逆位相になる。

のおよそ3パターンに分類できた。

特に本反応が眼球運動によるアーチファクトによるものでないことは、以下の事実による。すなわち、

- 1) 被験者に、視線固定用の指標を凝視させ、同条件下で測定しても同様の結果が得られた。
- 2) 誘発反応測定中に、眼球運動(EOG: Electro-OculoGram)を測定した結果、T3あるいはT4で記録された誘発反応に比較して充分小さく、微小電位変動のみが観測された(図5-4)。
- 3) 後述するように(第10章)、頭皮上12点から同時に誘発反応を記録し、その電位分布を検討した結果、特に眼球近傍において顕著な電位変動を認めることはなかった。

また基準電極部位の問題に関しては、鼻尖を基準にした場合の左右の両耳垂から記録される電位変動が、側頭部において記録される誘発反応の振幅に比較して充分小さいものであること、さらにこの電位変動に両耳間の左右差が認められないことから、少なくとも聴性誘発反応を用いて左右差を検出するにおいては本質的な問題とはならない(図5-5)。

図5-6に、6名の被験者個々の、母音/a/とホワイトノイズに対する反応のP1成分とN1成分間の頂点間振幅値を示すと共に、6名の被験者の振幅値の平均値および標準偏差、そして以下の式で定義される左右差係数 α を示した。

$$\alpha = (L-R) / (L+R)$$

L: T3より得られる反応のP1-N1振幅値

R: T4より得られる反応のP1-N1振幅値

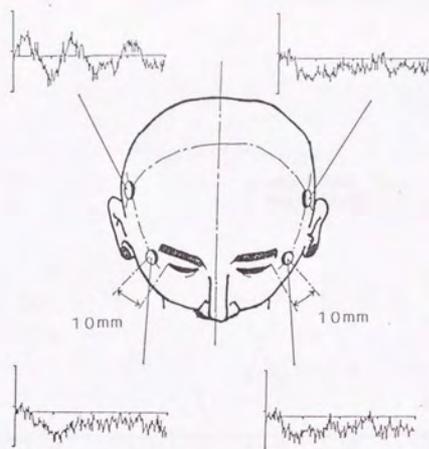


図5-4 純音1kHzに対する左右の側頭部(T3、T4)および左右の眼球近傍の電気変化の同時記録の例。

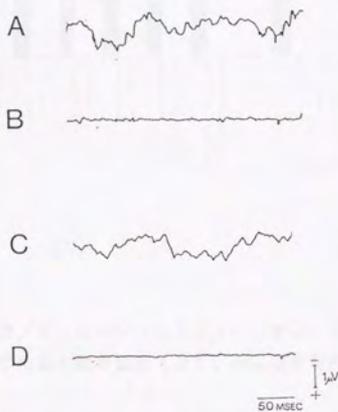


図5-5 左右の耳垂(A1、A2)における電気変化。Aはホワイトノイズに対する右耳垂-鼻尖および左耳垂-鼻尖間の電位変化。Bはこの2部位で記録された電位変化の差。Cは母音/a/に対するAと同部位での電位変化。Dは同じくそれらの差。

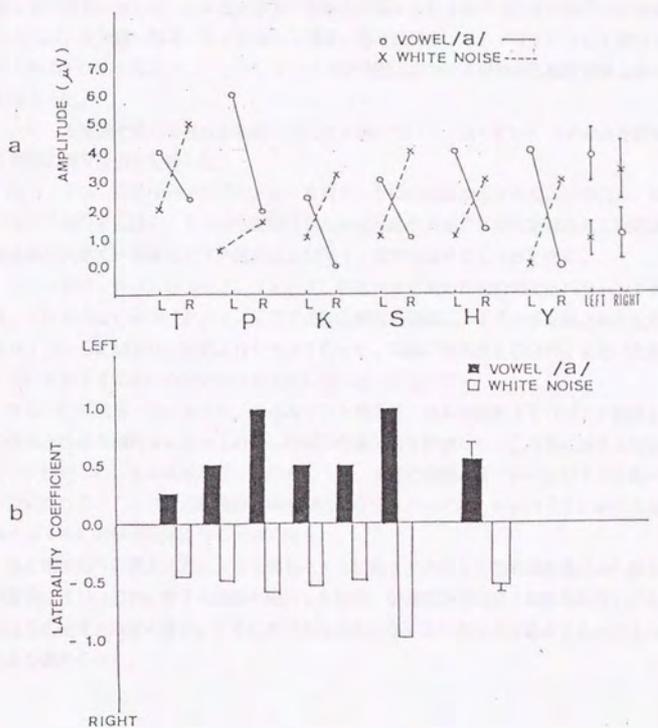


図5-6 被験者6例の母音/a/とホワイトノイズに対する、T3およびT4における反応のP1-N1振幅値、平均値と標準偏差(a)、および非対称性係数の棒グラフ(b)。

同図より、母音/a/に対しては、T3における反応がT4における反応に比べて大きく、ホワイトノイズに対してはT4における反応の方が大きくなり、母音/a/の場合と全く逆の様相を呈した。この反応波形の振幅の差異が左右大脳半球の非対称性を反映するとすれば、左半球は母音/a/に対して優位、右半球はホワイトノイズに対して優位と考えられる。なお、母音/a/とホワイトノイズの提示については顕著な順序効果は認められなかった。

次に、本実験で最も顕著な左右差を呈したY例について、さらにいくつかの音を提示して同様に誘発反応を記録した。

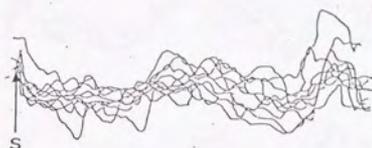
図5-7は、自然母音/o/と/e/を提示した時の反応波形である。この場合、母音/a/の場合と同様に、T3から記録された誘発反応の方がT4から記録された反応よりも非常に大きく、明確なP1-成分およびN1-成分を認めることができた。

図5-8は、純音500Hz、1kHz、8kHzを用いた場合の反応パターンであるが、この場合にはホワイトノイズに対する反応様式と同様に、T4から記録された反応の方がT3から記録された反応よりも大きくなった。同様に矩形波500Hzを用いた場合についてもT4における反応の方が大きくなった(図5-9)。

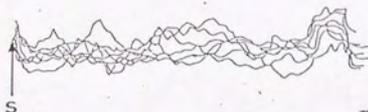
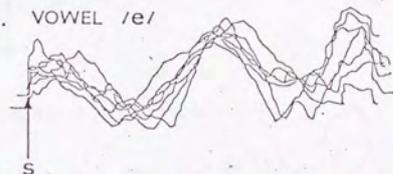
次に、自然母音/e/と/o/のホルマント構造を、基本周波数110Hzの純音とその倍音から成る調和音によって近似した調和合成母音を合成して、これらに対する反応について検討した。その結果図5-10のように、前述の自然母音/a/に対する反応パターンに比べると、これほど明確な反応波形とはならなかったが、やはりT3における反応の方がT4における反応よりも大きくなった。

また増幅器への過大入力によって図5-11に示すような多くの高調波成分から成る歪み母音を作り、これに対する応答を検討した結果、前述の自然母音(無歪み母音)/a/に対する結果とは全く逆に、T4における反応の方がT3における反応よりも大きくなることが認められた。

a. VOWEL /o/



b. VOWEL /e/



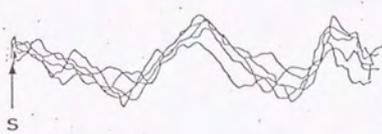
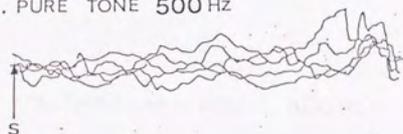
LEFT T3

RIGHT T4

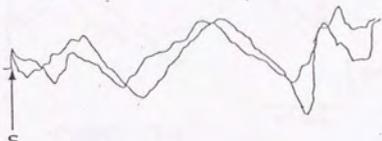
50 MSEC. \updownarrow 1 μ V

図5-7 Y例の自然母音/o/ (a) および/e/ (b) に対する反応.

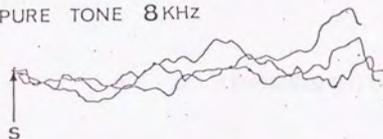
a. PURE TONE 500 Hz



b. PURE TONE 1 KHz



c. PURE TONE 8 KHz



LEFT T3

RIGHT T4

図5-8 Y例の純音500Hz、1kHzおよび8kHzに対する反応。

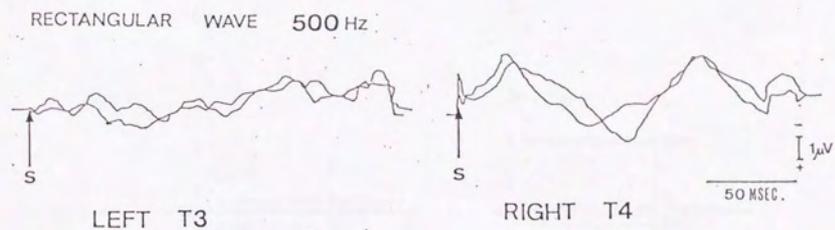
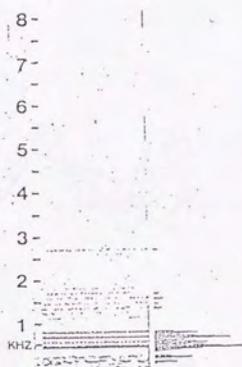
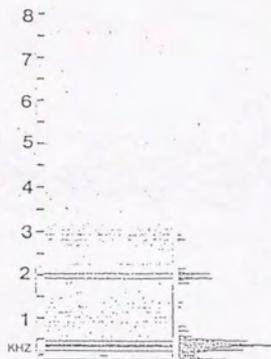


図5-9 Y例の矩形波500Hzに対する反応波形.



SYNTHETIC VOWEL /o/



SYNTHETIC VOWEL /e/

a. SYNTHETIC VOWEL /o/



b. SYNTHETIC VOWEL /e/

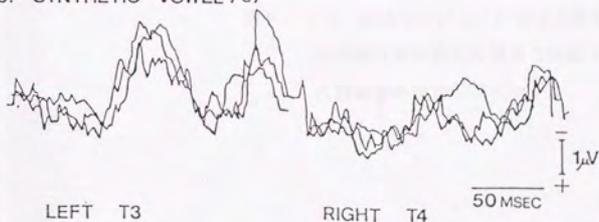
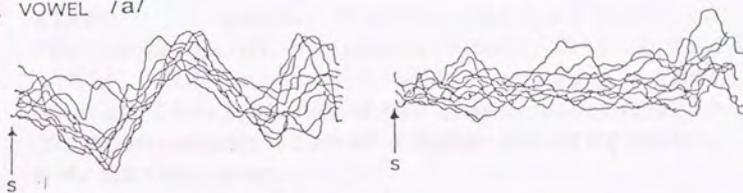
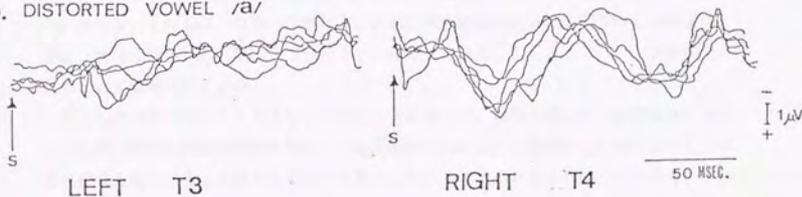


図5-10 調和合成母音/e/と/o/のスペクトルとそれに対する反応例.

a. VOWEL /a/



b. DISTORTED VOWEL /a/



LEFT T3

RIGHT T4



図5-11 自然母音/a/に対する反応(a)
と高調波歪み母音に対する反応(b).
左図は歪み母音のスペクトル.

5-3-3. 考察

人間の聴覚情報処理機能における左右差については、一般に言語音は左半球優位、楽音などの非言語音は右半球優位という結論が提示されている(第2章)。しかし母音の優位性については、未だ議論が残されている。これまでアメリカ、カナダを中心として、Shankweiler (1975)、Kennedy (1970)、Darwin (1969)、Lieberman (1967)、Spreen (1970)、Spellacy (1970)、Blumstein (1975)、Cutting (1974)らによるdichotic listening testを用いた研究が行われてきた。これらによれば、子音を含む音節は左半球優位となるが、合成母音および自然母音については左右差無し、左半球優位、右半球優位、あるいは不確定であるなど、統一的な結論は得られていない。

一方、本章で示した3Hz-AEP法による結果および角田のkey-tapping testによる日本人を対象とした研究結果は、母音が左半球優位となることを示している。key-tapping testによる日本人の母音の優位側についての結果は、他に、林(1979)、宮川(1981)、佐藤(1980)によっても、左半球優位となることが確認されている。

dichotic listening testは、前章(第2章)で指摘したように、両目に同時に異なる刺激を与え、口答あるいは筆記などで認知できたものを答えさせるという方法である。したがってこの方法は、key-tapping testあるいは3Hz-AEP法と比較すると、少なくとも応答の段階では、高次機能との関わりがより深いと考えられる。この際、人間には高度の選択的注意能力が備わっているため、dichotic listening testの条件下では、意識的に片耳にのみ注意を集中することが容易に出来る。このような事実も、上述のdichotic listening testによる母音の優位性に関する結果の不確定性を導く原因のひとつであったかも知れない。

これに対して、key-tapping testおよび3Hz-AEP法では、前者は最初から片耳にのみ注意を集中させるという条件下であり、後者は全く同じ音刺激が同時に両耳に与えられるという条件であるため、選択的注意機構による測定結果への影響は、dichotic listening testの場合とは異なり、これを抑制することが出来る。また応答についてもkey-tapping testでは人示指によるタッピング、3Hz-AEP法では頭皮上より記録される誘発反応であるため、いずれもdichotic listening testの場合よりも単純であり、より非操作的である。このような理由から、key-tapping testおよび3Hz-AEP法を適用して得られる結果は、より安定で再現性の高いものであることが理解で

さる。しかも両者とも、持続時間の短い音に対して得られた結果であるため、音の意味によるというよりはむしろ音の物理構造に依存して生じる左右差と考えられる。なお3Hz-AEP法による結果とkey-tapping testによる結果との類似性については、後章（第7章、第8章）においてさらに詳細に検討する。

さらに、3Hz-AEP法のkey-tapping testに対する優位点は、主に以下の2点と言える。

第1に、key-tapping testでは、被験者のkey-tappingの「乱れ」によって優位性を評価するが、乱れの評価が実験者自身の主観的判断に基づくものであって、完全に定量化されてはいない。これに対して、3Hz-AEP法では客観的な反応波形に認められる明確な差異が検出出来る。

第2に、いずれの方法でも音の構造に対応して作動する、いわゆる「音の選別機構」の活動に対応した現象を観測することが出来る。しかし、key-tapping testは基本的に行動検査法であり、神経機構解明のための分析には自ずと限界がある。一方3Hz-AEP法では、同機構に関連する神経集団の活動性を測定することが可能であるため、この機構の解明において重要な情報を抽出することが可能である（第6章、第9～11章参照）。

なお本章の結果からは、3Hz-AEP法による左右差が音に対する非優位側の反応が顕著に変形あるいは抑圧されることによるものであることが示された。現象的には、検査音に対する非優位側半球が、優位側半球に比較して断続して与えられる音に対して疲労しやすい、あるいは優位側半球などの一連の神経活動によって抑制されるという神経過程が想定される。この神経機構に関する分析については、さらに後章（第6章、第9章、第10章、第11章）において検討を行う。

5-4. まとめ

- 1) 聴性誘発反応を用いて聴覚系の左右差を検出する方法-3HZ-AEP法-を定義した。
- 2) 同方法で検出される差異は、従来に関連研究には見られなかった顕著なものであり、しかも音の意味に依るといよりは、むしろ音の物理的な構造に対応して生じるものであった。
- 3) 同方法の適用によって、正常日本人では自然母音や合成母音が左半球優位、純音やホワイトノイズなどは右半球優位であることが確認された。

第6章 3Hz-AEPにおける左右差形成

前章で導入した3Hz-AEP法によって検出される3Hz-AEPの左右差は、これまでの関連研究において見だされてきた差異と比較して顕著なものであった。

本章では前章において定性的に検討してきた3Hz-AEPの、個人内での左右差について定量的検討を試みると共に、刺激提示間隔と聴性誘発反応との関連を明らかにすることによって、刺激提示間隔300msc近傍における誘発反応の左右差の発現様式について検討する。

6-1. 3Hz-AEPの左右差評価について

前述のように、3Hz-AEP法によってT3およびT4より記録される聴性誘発反応に、音の構造に対応した顕著な左右差を認めた。しかしながら、誘発反応の記録条件から、この顕著な左右差は基本的に検査音の立上りに同期した脳波成分の平均値であるため、一度統計的に検討する必要がある。本節では、3Hz-AEPの定量的左右差評価について検討した。

6-1-1. 方法

音の刺激提示条件および被験者への統制については、前章と全く同様とした(5-2)。また被験者は10例の健常者とした。

検査音には、母音/a/、純音1kHzを用いた。そして、ひとつの検査音について被験者から記録された脳波をデータ・レコーダーで記録し、オフ・ラインで以下の処理を行った。

図6-1のように、P1成分のピーク潜時とN1成分のピーク潜時とに対応する、T3およびT4から導出される原脳波波形の値をそれぞれ128個ずつ抽出して、以下の式に基づいてその分散および平均値の検定をおこなった。

P1成分、N1成分のピーク潜時に一致する原脳波の値 a_j と b_j をサンプルし、 $(b_j - a_j)$ を求めて評価する。

$$b - a = \sum_{j=1}^n (b_j - a_j) \times (1/n)$$
$$S^2 = \sum_{j=1}^n \{ (b_j - a_j) - (b - a) \}^2 \times (1/n)$$
$$t = \frac{|A_l - A_r|}{\sqrt{(S_l + S_r) / (n-1)}}$$

ただし

A_l : 左側のP1-N1振幅値

A_r : 右側のP1-N1振幅値

S_l : 左側の標準偏差

S_r : 右側の標準偏差

$n = 128$

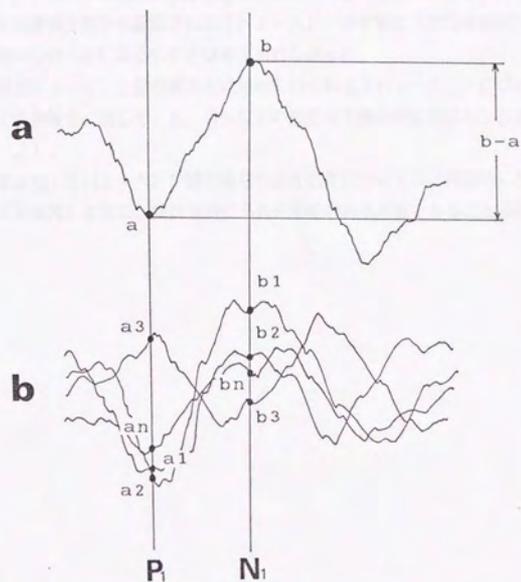


図6-1 3Hz-AEPの分散評価の説明図。

6-1-2. 結果

F-検定によって、母音、ホワイトノイズ、純音に対するT3およびT4から記録される3Hz-AEP間に分散の統計的に有意な差は見出されなかった。したがって、特に検査音に対する非優位側から記録される3Hz-AEPの平坦化(第5章参照)は単なるピーク間の潜時のゆらぎによるものとは考えられなかった。

次にt-検定によって、上記の検査音に対して得られる3Hz-AEPについては、10例すべての被験者に関して、5.0%以下の危険率で統計的に有意な左右差と判定された(図6-2)。

以上の結果より、3Hz-AEP法で得られる左右差については、視覚的にも顕著な差である(第5章参照)と共に、統計学的にも充分意味のある差異であることが明らかとなった。

実験例 番号	母音/a/ (L>R)	純音 1 kHz (R>L)
1	2.04 [*]	2.25 [*]
2	2.46 ^{**}	2.17 [▽]
3	2.34 [*]	2.12 [▽]
4	2.72 ^{***}	2.55 ^{**}
5	2.15 [*]	2.26 [*]
6	2.66 ^{***}	2.43 ^{**}
7	2.38 ^{**}	2.35 [*]
8	2.23 [*]	2.07 [▽]
9	2.55 ^{**}	2.21 [*]
10	2.26 [*]	2.47 ^{**}

^{*} $p < 0.05$
^{**} $p < 0.01$
^{***} $p < 0.005$

図6-2 10例の、母音と純音について得られたt-値。

6-2. 刺激提示間隔と聴性誘発反応の反応動態

3Hz-AEP法における刺激提示間隔は、従来聴性誘発反応を記録する際に一般に採用されてきた値に比較して非常に短い。通常は1秒から5秒程度の刺激提示間隔によって聴性誘発反応、特にSVR (Slow Vertex Response) が記録される(第4章参照)。これは被験者の音刺激に対する、いわゆる慣れ(habituation)のための時間を充分にとる必要があるとする考えからきているものである(第5章参照)。

この刺激提示間隔に関する研究は、SVR記録の条件を明確にするという観点から初期には盛んに行われたが、近年ではほとんど見受けられなくなってきた。この初期の研究報告によれば、一般にSVRのN1-P2の最大振幅を得るには6秒以上の刺激提示間隔が必要であり、これを1秒に短縮すると最大値の1/4程度に、500msecでは1/6程度に減衰するとされている(Davis, 1966等)。

本節では、音の提示間隔と左右の側頭部T3およびT4から記録される聴性誘発反応の反応動態との関連について検討した。

6-2-1. 方法

音の提示間隔を2secから100msecまで変化させ、T3およびT4より導出される反応のP1-N1振幅値がどのように変化するかを観た(recovery curve)。

検査音には、母音/a/、ホワイトノイズ、純音(いずれも音圧は50dB SL)を用いた。また音ひとつひとつが独立によく聴こえるように、被験者の注意集中を統制した。

6-2-2. 結果

図6-3に、純音1kHzを刺激音とした場合の日本人5例の平均を示す。同図より、刺激提示間隔が500msec以上では刺激提示間隔とP1-N1振幅値とは単調増加の関係を示し、この時に左右差は認められなかった。一方、400msec近傍から左右差が確認され、およそ300msec近傍において、特に純音1kHzに対して優位な(第5章参照)T4における反応がT3に比較して特異的に大きくなった。しかも、300msec近傍で最も大きな左右差を呈した。

母音/a/についても、同様に提示間隔300msec近傍において特に顕著な左右差を認めた(図6-4)。

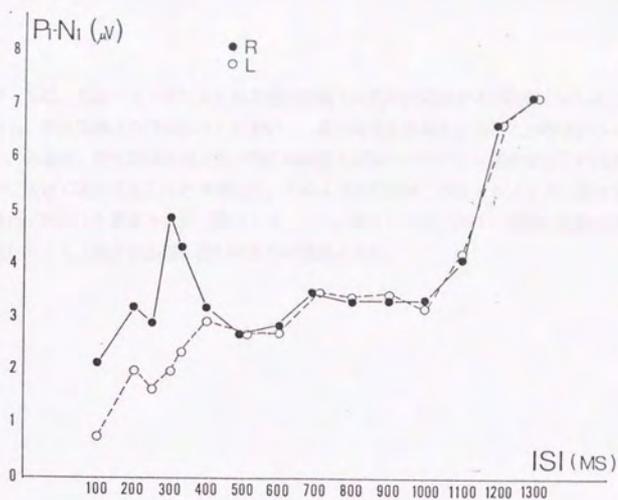


図6-3 純音1kHzを用いた場合のrecovery curve.

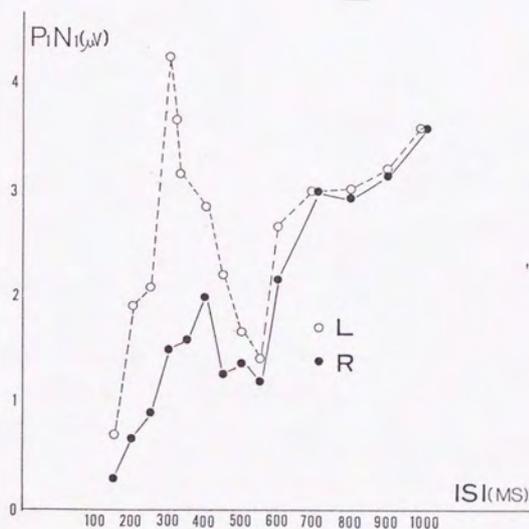


図6-4 母音/a/を用いた場合のrecovery curve.

図6-5に、母音/a/を与えた時の提示間隔と左右の反応波形との関係を示した。同図からも、提示間隔300msecにおいて、顕著な左右差の生じることが確認された。さらにこの場合、提示間隔が充分長い時には顕著ではなかったP1-成分が、この近傍で特異的に大きく成長することが判明した。このような特性は、ホワイトノイズ、純音を用いた場合においても確認された(図6-6, 7)。特にこの時、N1-成分の振幅の差異に比較してP1-成分の振幅に著しい差異が視測された。

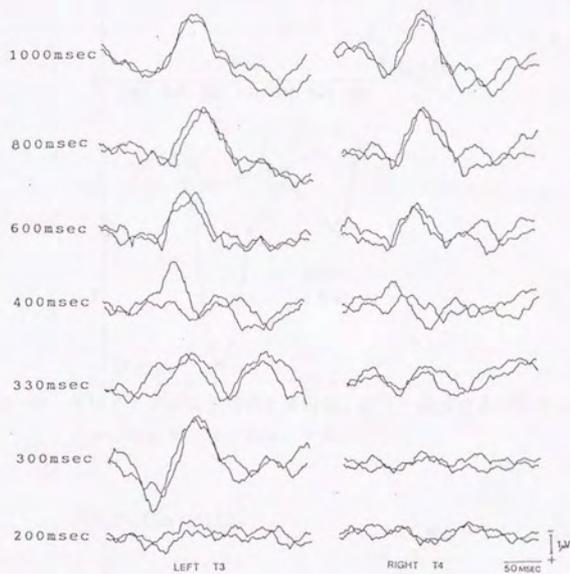


図6-5 左右の側頭部から得られる、母音/a/に対する聴性誘発反応波形と刺激提示
 間隔との関連。同一被験者から記録されたAEPを重ねたもの。

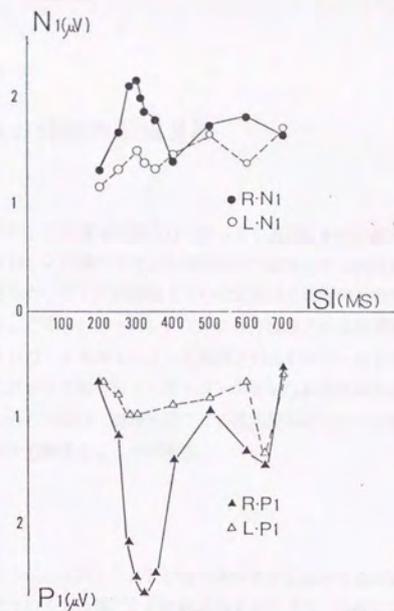


図6-6 ホワイトノイズを用いた場合の、P1-成分およびN1-成分の recovery curve.

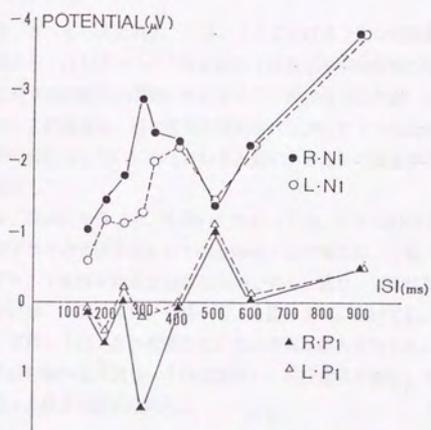


図6-7 純音を用いた場合の、P1-成分およびN1-成分の recovery curve.

6-3. 差異の時間的形成過程

前節で示したように、音の提示間隔300msec近傍における聴覚誘発反応の動態は特異である。本節では、この条件下で左右側頭部から記録される誘発反応波形が時間と共にどのように変化するか、そして時間軸上での安定性はどれ程のものか検討する。

第5章で視たように、この3Hz-AEP法によって観測される聴覚情報の処理様式は、key-tapping testによって観測されるものと一致する。key-tapping testではmsecオーダーの詳細な時間経過を追うことは不可能である。一方3Hz-AEP法は、脳から発生する電気現象について評価出来るため、差異の時間的な形成過程を追跡することが出来る。

6-3-1. 方法

図6-8に示すように、3Hz-AEP法の条件下で記録される原脳波波形について、データを1個ずつずらして20個ごとの加算平均をとり(0.3秒×20=6.0秒)、左右の波形の時間変化を追跡した。

6-3-2. 結果

図6-9は、母音/a/を与えた時の、T3、T4における20の回加算平均波形の時間変化である。同図より、3Hz-AEP法においては反応波形の時間的定常性は認められず、被験者の音に対する注意集中開始からおよそ10数秒経過した後、差異が顕著なものとして観測された。この過程は、最初差異の認められなかった2つの反応波形のうち、音に対する非優位側の波形がしだいに抑圧されると共に、優位側の反応が増大するという過程であることが判明した。

また図6-10は、同様に母音/a/を用いた時の、T3、T4における反応のP1-N1振幅値と時間のずれとの関係を示したものである。この場合は、3個(0.3秒×3=0.9秒)ずつずらして加算平均を計算したものである。図6-9の結果と同様に、最初差異が認められないが、ほぼ7×0.9秒=6.3秒のずれにおいてはじめて差異が生じ、ほぼ12×0.9秒=10.8秒程度のところで差異が最大となった。この状態がしばらく続き、音の提示を断つと(図6-10の矢印)、再び差異が減少して、まもなくノイズレベルにまで達する様子が認められた。

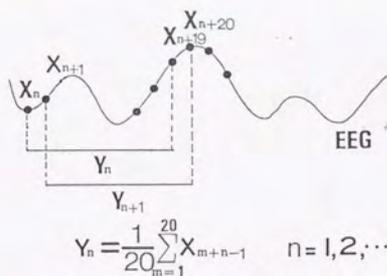


図6-8 3Hz-AEP法下で記録される脳波波形をデータ1個ずつシフトして20個の加算平均をとり、左右差の時間的形過程を追う。

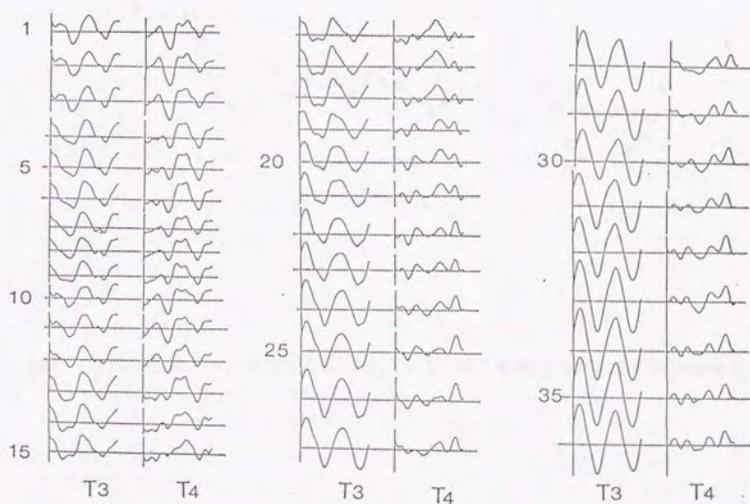


図6-9 母音/a/を与えた場合の、左右差の形成過程。

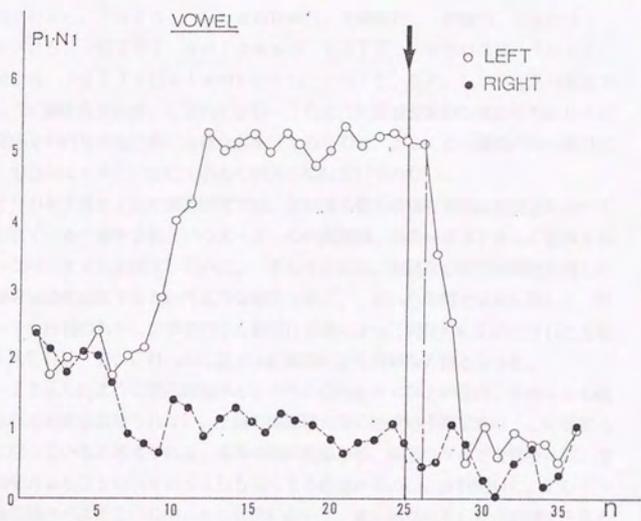


図6-10 母音/a/を与えた場合の、P1-N1振幅値の左右差の時間的变化。

6-4. 考察

聴性誘発反応を用いた、正常人の左右大脳半球の機能差検出の可能性に関する研究は、1970年以来今日に至るまで数多く発表されている(Friedmanら, 1971; Galambosら, 1975; Grabowら, 1980; 伊藤ら, 1980; Shucardら, 1977; Wolpawら, 1977; Woodら, 1971; Morrelら, 1971; Galambosら, 1975, 等)。しかしながら本法で得られたように顕著な左右差、定量的には6-1のように原脳波波形の集合平均としての聴性誘発反応それ自体が統計的に有意な差を呈するものは、少なくとも筆者の知る限りにおいてはこの3Hz-AEP法によるもの以外には見受けられない。

これまで行われてきた上記の関連研究では、音刺激の提示間隔を誘発反応測定において通常用いられている1秒や2秒というオーダーの時間間隔、あるいはランダムに提示するというようなパラダイムを設定していた。そして中には、複雑な心理学的課題を課した条件下で誘発反応を記録するというような報告もある。これらの関連研究に対して、前述の(5-1)目的のもとに、筆者の全くの試行錯誤によって発見的に見出された方法“3Hz-AEP法”は、これらの方法とは結果的に全く異質な方法となった。

6-2-2で示したように提示間隔がおよそ500msec以上の場合、少なくとも統計的に有意な左右差は認められない。上述の関連研究間の結果の不確定性は、この事実もその一因になっていると考えられる。本章の検討結果から、顕著な左右差を得るには、音の提示間隔をおよそ350msecよりも短くする必要があることが判明した。そして中でも、提示間隔がおよそ300msec近傍において、最も顕著な左右差が視測できるといことから、3Hz-AEP法では、特にこの値を採用している。またこの提示条件下で、優位側における反応は共振様特性を示した。さらに、この近傍においてのみ眼球や体全体の共振様の感覚、すなわち5-2の第8、9段階の感覚が生じ得る。これらの事実から、我々の神経系にこのような共振機構が存在すると想定される。これに関しては第12章でさらに詳述する。またこの時、音に対する優位側の誘発反応のP1成分が著しく成長することが確認された。このことから、P1成分の成長とこの差異の生成機構との間には高い相関関係のあることが示された。

3Hz-AEP法においては、非優位側から得られる聴性誘発反応は一般に抑圧されるが、優位側から得られる3Hz-AEPについては、充分長い刺激提示間隔で得られる反応とはほぼ同程度の振幅値(5 μ V~8 μ V)となる。すなわち3Hz-AEP法においては、検査音の入力によって優位側の反応が過大になるというよりは、むしろ非優位側の反応が抑圧されることによって顕著な左右差が形成される。この事実は、人間の脳半球の左右性の神経機構を考える上で、極めて重要な情報である。刺激提示間隔300msecという条件下においては、左右半球へと連絡する聴覚経路を含む左右の聴覚情報処理系の

うちのいずれか一方の処理系のみが、入力音の物理構造によってその音処理を担当する系として安定化する一方、非優位側の関わる処理系は抑制されるという過程が実現しているものと推測される。そして差異の形成過程の分析結果から、全体の処理系が安定化するまでにおよそ10数秒という時間遅れが必要であることが判明した。

3Hz-AEP法の基本原理およびその意味などについては、後章(第12章)において、聴覚心理学、心理物理学および認知心理学などでこれまでに明らかにされてきた事実との対比によって、さらに詳細に検討する。またそこに内在する神経過程についても、臨床医学的研究結果などとの対応から、さらに詳細に考察を行う。

6-5. まとめ

1) 個人から記録される3Hz-AEPの左右差は、統計的にも有意な差異であることが確認された。

2) 音の提示間隔およそ400msecより短い間隔で左右差が確認され、特に300msec近傍で最大となった。この時、音に対して優位な側の反応は一種共振様の挙動を示した。

3) 3Hz-AEPの左右差が生じ、安定化するまでおよそ10数秒の時間を要した。これは、同法で観測される左右差の生成機構が安定化するのに必要な時間遅れに対応するものと考えられる。

第7章 key-tapping test

との対応

第5章において、3Hz-AEP法によって検出される聴覚系の左右差については、多くの点で、key-tapping test によって見出される左右差に類似していることを指摘した。本章ではさらに、聴覚系の左右差の検査法として両者がどれほどの相関を有するのかを明確にするため、特に被験者として非日本人をも含め、様々な音に対する優位性パターンについて検討した。

7-1. 方法

7-1-1. 対象および検査音について

日本人被験者として、健常な男性16例、女性9例(年齢20~59歳)で、いずれも音構造に依存する聴覚系の左右差に決定的な影響を及ぼす時期(臨界期)とされる、およそ6歳から9歳の間にはそれぞれ日本語の通常の言語環境下にあった人々とした(角田ら、1980)。

検査音には、日本人男性の発声による自然母音/a/、同じく子音-母音(C-V)より成る音節/ga/、えんまこおろぎの鳴き声、小川のせせらぎの音、牛の鳴き声、尺八の音、薩摩琵琶の音、フルートA音(non-vibrato)、バイオリンA音(non-vibrato)、純音1010Hz、ホワイトノイズを採用した。

非日本人被験者は、測定時現在の国籍が、アメリカ合衆国の3例、カナダの2例、中華人民共和国の3例、フランスの1例で合計9例(男性6例、女性3例)の健常者とした。そして日本人被験者の場合と同様に、いずれも臨界期にはそれぞれの母国語の言語環境下にあった人々である。

検査音には、日本人被験者に適用したものと同じ、母音/a/、音節/ga/、および純音1010Hzを用いた。

なお、各被験者の日本語に関する理解度、会話能力などについては結果と共に後述する(7-2-2)。

7-1-2. 聴性誘発反応の測定およびその評価

測定日には、喫煙、薬物などの大脳半球の左右差に影響を及ぼすとされる諸因子(2-2)を統制し、被験者が言語半球側偏移状態(第9章参照)にないことを確認した。

被験者を、電気的にシールドされた防音暗室内の椅子に座らせ、両足を床に置き、口を軽く閉じさせた。

刺激音の提示方法については、刺激提示間隔300msec、持続時間70msec(立上がり、立ち下がり共に24msec)、音の音圧を、60dB SLの断続音としてヘッドホン(TDH-39)を介して両耳へ与えた。ただし、音節の提示についてはデジタル処理を行うことで、提示ごとに同位相になるようにした(持続時間100msec)。

聴性誘発反応は、前額接地、両耳垂連結を基準に左右の側頭部T3、T4より導出した脳波を、帯域フィルタ(0.8Hz~120Hz;-6dB/oct)に通し、128回の加算平均によって求めた。

聴性誘発反応は前述（第5章）の様に、主に刺激音の立上がり開始時点からのピーク潜時が、およそ40～70msecに生じる陽性波（P1-成分）と80～120msecに生じる陰性波（N1-成分）の2成分より構成されるため、このP1-N1成分の頂点間振幅値を用いて次式で定義される係数 α で左右差評価を行った。

$$\beta = (L - R) / (L + R) \times 100$$

ただし

L: T3より得られる誘発反応のP1-N1振幅値

R: T4より得られる誘発反応のP1-N1振幅値

$$\alpha = \begin{cases} \text{sgn}(\beta) \times \log(|\beta|) \times 50 & (\beta \neq 0) \\ 0 & (\beta = 0) \end{cases}$$

ただし

$$\text{sgn}(\beta) = \begin{cases} 1 & (\beta > 0) \\ -1 & (\beta < 0) \end{cases}$$

7-1-3. key-tapping testによる判定

key-tapping testについては、標準的な一耳同期音、他側遅延音の両耳の競合状態における成績によった（第2章参照）。検査に際しては、同期音に強い注意集中をさせたもので、同一人には数回以上の検査によって検査に十分に慣れさせ、安定した再現性のある結果を示した例であり、うち10例は1年以上にわたって実験を続けた熟練被験者であった。優位性については正確を期するために、言語刺激、嗅覚刺激、自律神経刺激などによる優位性の変動を観察して、これらの成績の間に矛盾の無いことを確認した（角田、1978）。

このkey-tapping testは角田によって、3Hz-AEP法とは独立に行われ、両者の結果が判明した時点で初めて比較検討された。

7-2. 結果

7-2-1. 健常日本人に関する結果

角田法によって判定された25例の被験者を、母音-右耳優位、ホワイトノイズ-左耳優位となる正常型(No. 1~No. 20)と、その逆の母音-左耳優位、ホワイトノイズ-右耳優位となる逆転正常型(No. 21~No. 25)とに分類整理した結果を図7-1上表に示す。

一方、図7-1下表はそれぞれの被験者について得られた α の値を各被験者ごとにまとめたもので、それぞれの番号は図7-1上表の被験者番号に一致している。同図より、聴性誘発反応による左右差評価によっても、No. 1~No. 20例については母音-左側優位、ホワイトノイズ-右側優位となる正常型、No. 21~No. 25例についてはその逆の、母音-右側優位、ホワイトノイズ-左側優位となる逆転正常型と判定され、角田法による判定結果(図7-1上表)と被験者個々の例において完全な一致を認めた。また図7-2は、被験者No. 1~No. 20までの正常型の例から得られた聴性誘発反応の重ね書きで、図7-3はそのP1-N1振幅値の平均値と偏差を示したものである。これより、正常型日本人において、こおろぎの鳴き声、牛の鳴き声、小川のせせらぎの音、尺八の音、琵琶の音、篠笛の音は、いずれも母音/a/、音節/ga/と同側の左側優位、一方、フルートA音、バイオリンA音は純音1010Hz、ホワイトノイズと同側の右側優位となることが聴性誘発反応の左右差として明確に示された(図7-4, 5)。

聴性誘発反応の各種検査音に対する反応様式の再現性、安定性については、同一被験者についての検討を重ねることによって確認した。図7-6は、図7-1におけるNo. 2例で、それぞれ測定日を変えておよそ2カ月にわたって測定し続け、これを重ね書きしたものであるが、この様に十分な安定性を有する反応であることが確認された。

図7-7は、逆転正常型について得られた聴性誘発反応の重ね書きで、図7-2のパターンとは明らかに逆のパターンを示した。

7-2-2. 非日本人に関する優位性

図7-8は9例の非日本人に関する母音/a/、音節/ga/、純音1010Hzの優位差を α で表したものである。これによって、S、T、W、O、M、A、Fの7例は非日本人の正常型、YとC例については非日本人型逆転正常型(角田, 1977)と判定された。

S、T、Y例の国籍は中華人民共和国で、S、T例は共に2年間日本の某国立大学に留学したため、日本語についてはかなりの理解力があり、日本語の日常会話についても問題

1	normal	2	normal	3	normal	4	normal	5	normal
6	normal	7	normal	8	normal	9	normal	10	normal
11	normal	12	normal	13	normal	14	normal	15	normal
16	normal	17	normal	18	normal	19	normal	20	normal
21	contra-normal			contra-normal					
23	contra-normal			contra-normal					
25	contra-normal								

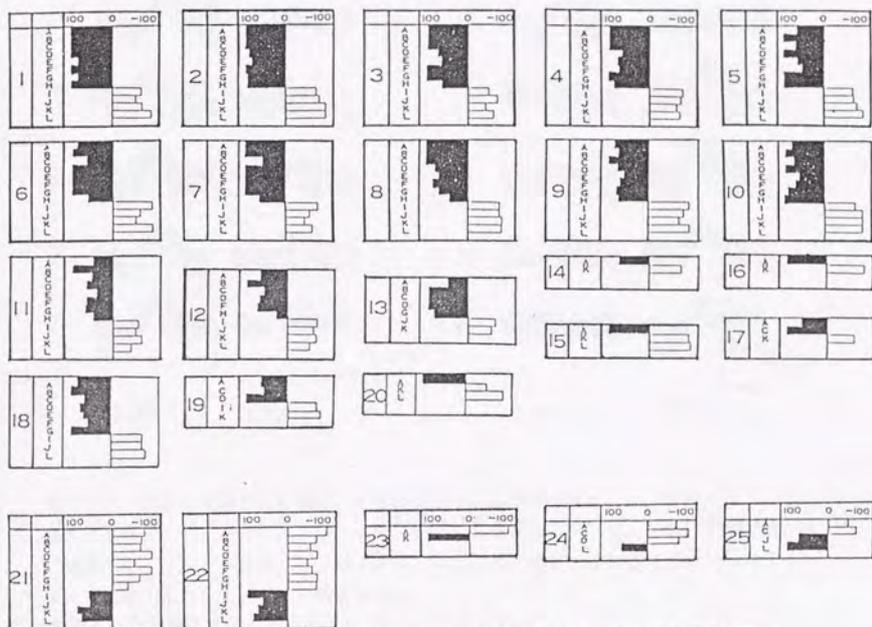


図7-1 key-tapping test による健常日本人25例の判定結果

(上表)と3Hz位相同期法によって左右の側頭部から得られた反応のP1-N1振幅値の左右差を α で示した図(下). key-tapping testの結果については、言語中枢が左半球にある型—正常型(normal type)と言語中枢が右半球にある型—逆転正常型(contra-normal type)とに分類した。3Hz-AEPの左右差については、黒棒が左側(T3)優位、白棒が右側(T4)優位を表す。被験者番号は両者で一致する。(A. 母音/a/, B. 音節/ga/, C. こおろぎの鳴き声、D. 小川のせせらぎ、E. 牛の鳴き声、F. 尺八、G. 薩摩琵琶、H. 篠笛、I. フルートA音、J. バイオリンA音、K. 純音1010Hz、L. ホワイトノイズ)

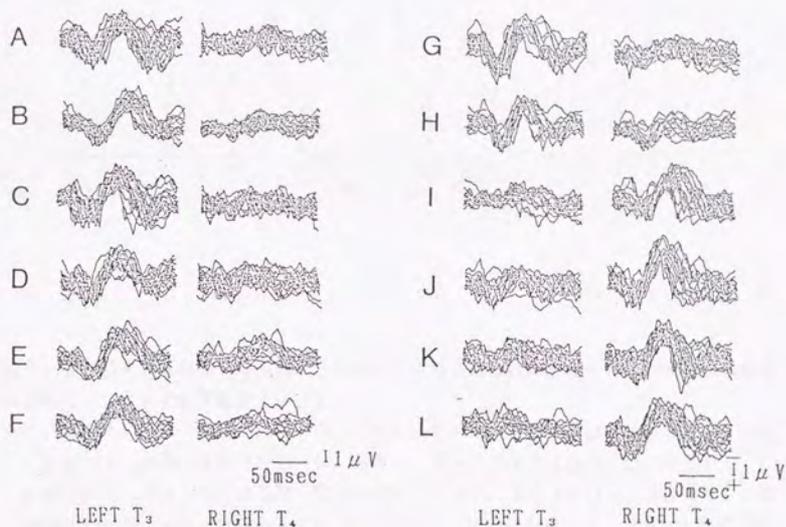


図7-2 日本人正常型20例の、T3およびT4より得られた、A. 母音/a/, B. 音節/ga/, C. こおろぎ、D. 小川、E. 牛の鳴き声、F. 尺八、G. 薩摩琵琶、H. 篠笛、I. フルートA音、J. バイオリンA音、K. 純音1010Hz、L. ホワイトノイズに対する3Hz-AEPの重ね書き。
各個人から記録されたAEPをひとつひとつ重ねたもの。

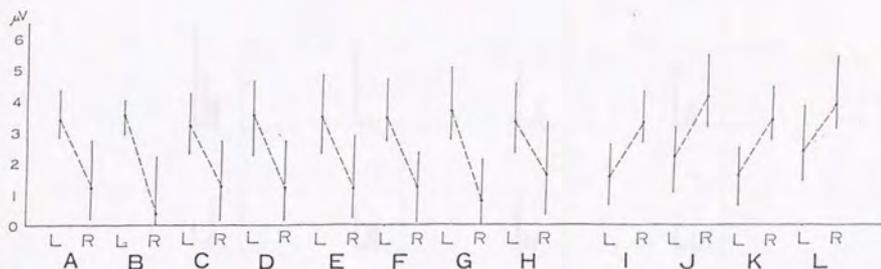


図7-3 日本人正常型20例のT3およびT4から得られた反応のP1-N1振幅値の平均値(L、R)と標準偏差(SD)。

A. /a/ (L=3.38 (SD=0.74), R=1.20 (SD=1.24)), B. /ga/ (L=3.49 (SD=0.54), R=0.41 (SD=0.91)), C. こおろぎ (L=3.17 (SD=0.97), R=1.24 (SD=1.30)), D. 小川 (L=3.45 (SD=1.21), R=1.17 (SD=1.29)), E. 牛 (L=3.49 (SD=0.78), R=1.83 (SD=1.24)), F. 尺八 (L=3.36 (SD=0.95), R=1.23 (SD=1.13)), G. 琵琶 (L=3.36 (SD=1.13), R=0.79 (SD=0.98)), H. 篠笛 (L=3.33 (SD=1.06), R=1.64 (SD=1.44)), I. フルート (L=1.55 (SD=0.94), R=3.32 (SD=0.83)), J. バイオリン (L=2.20 (SD=1.05), R=4.10 (SD=1.14)), K. 純音 (L=1.58 (SD=0.95), R=3.32 (SD=0.81)), L. ホワイトノイズ (L=1.39 (SD=1.69), R=3.86 (SD=1.14))

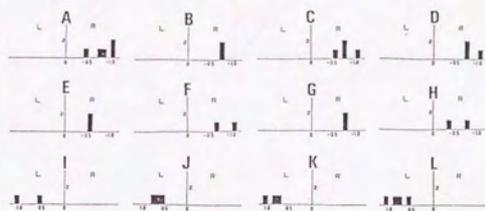
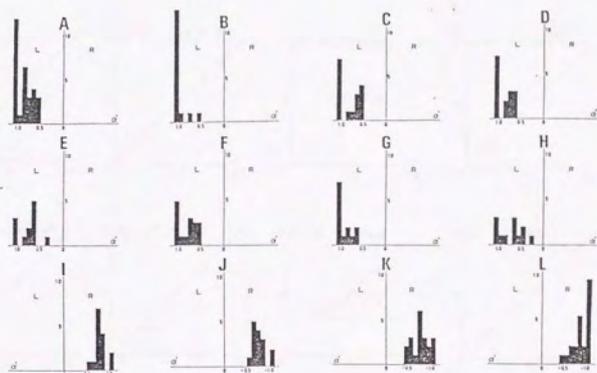


図7-4 日本人正常型(上)と日本人逆転型(下)の各種検査音に対する左右差係数とその分布。

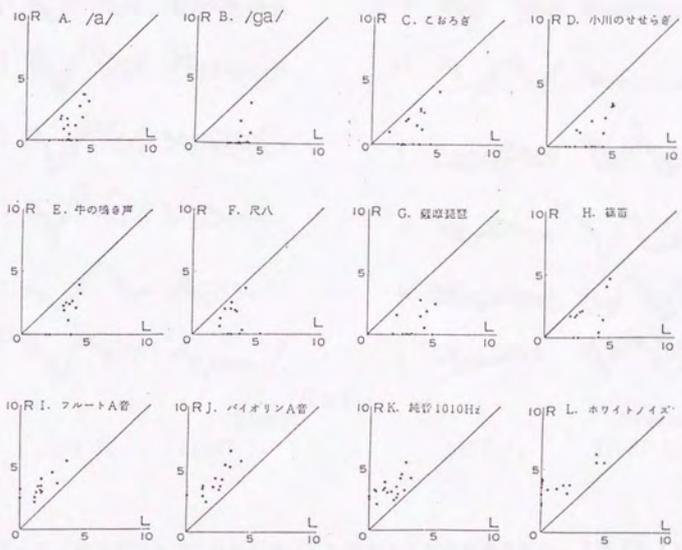


図7-5 日本人正常型の各種検査音に対する誘発反応のP1-N1振幅値の左右分布。

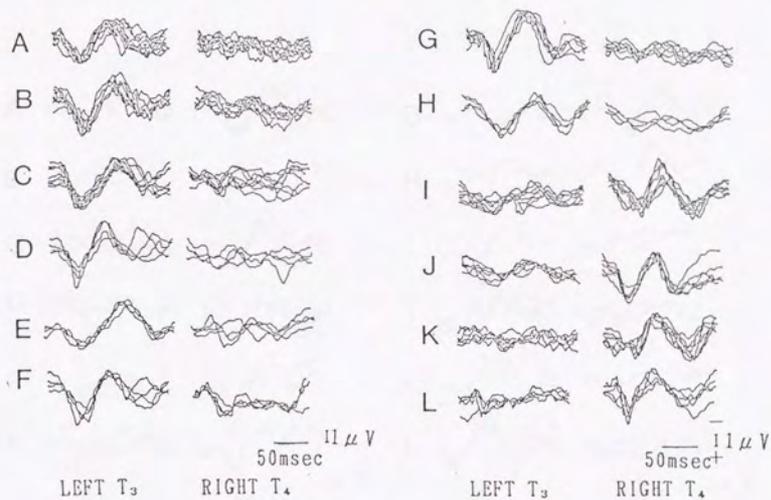


図7-6 およそ2カ月にわたり測定した日本人正常型被験者No. 2例(表7-1, 図7-1参照)のA~Lまでの検査音に対する誘発反応の重ね書き。

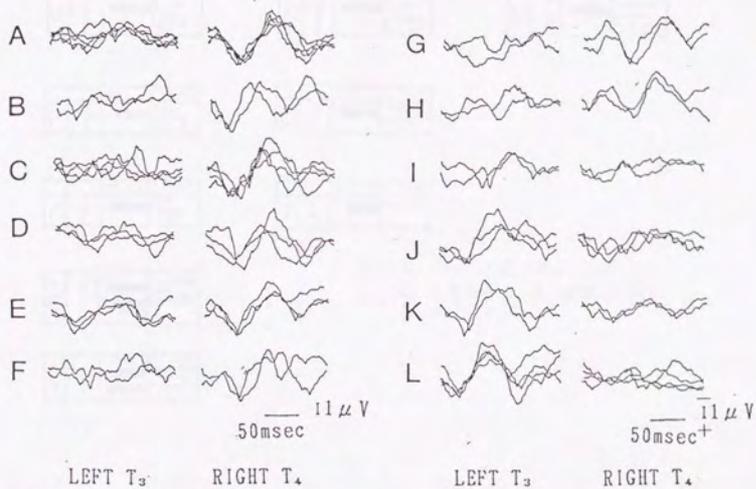


図7-7 日本人逆転正常型(図7-1のNo. 21~No. 25)について得られた各種検査音に対する誘発反応の重ね書き.

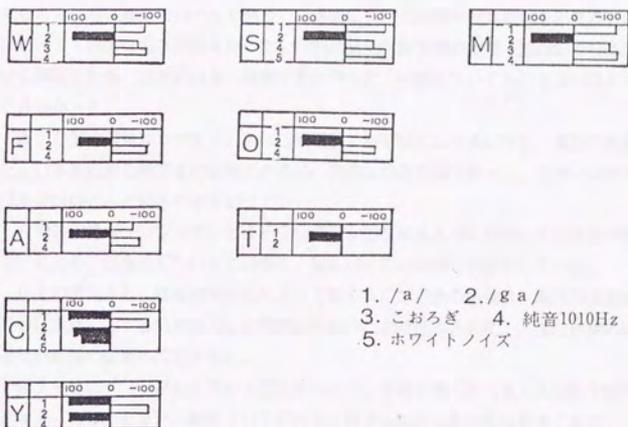


図7-8 非日本人9例(S, T, Y(中国), W, O, M(アメリカ), A, C(カナダ), F(フランス))についての各種検査音に対する聴性誘発反応のP1-N1振幅値の左右差を α で示したもの(図7-1の説明参照)。

はほとんど認められなかった。Y例については中華人民共和国の某工科大学の助教授であり、日本語をはじめとして数カ国語に精通しており、学術的な議論にも不自由しない能力を有していた。

また、W、O、Mの国籍はアメリカ合衆国で、特にW例はkey-tapping testの熟練被験者の一人であり、日本語についてはある程度理解を示すが、日常会話において不自由な場合が時々あった。O例は某大学医学部の教授で数日間の日本滞在の折りに測定したが、日本語は全く理解できなかった。M例についても日本語はほとんど理解できなかった。

A、C例の国籍はカナダで、Aは日系三世で測定時には日本に在住、英語の教師であった。日本語はある程度まで理解できるが、会話は自由ではなかった。C例はM例と同様、日本語はほとんど理解できなかった。

F例の国籍はフランスで、およそ2年間日本の某私立大学に留学して日本語の勉強をしていたため、日本語については堪能で、現在バリで日本語の教師をしている。

以上の事実より、聴性誘発反応によって得られた左右差の結果は、臨界期を過ぎた段階での日本語に関する処理能力には影響されることが確認された。またA例の結果より遺伝的要因の影響も否定された。

図7-9は、逆転正常型と判定されたC、Y例を除く非日本人正常型7例の、母音/a/、音節/ga/、純音1010Hzに対する反応波形の重ね書きである。図7-10には、そのP1-N1振幅値とその偏差を示す。同図より、非日本人正常型においては、音節/ga/が左側優位、母音/a/、純音1010Hzは共に右側優位となることが分る。これから、日本人正常型の母音/a/に対する優位側とは反対になることが確認された。

また図7-11は測定時15歳であった日本人少年T。O例から得られた聴性誘発反応の重ね書きである。この場合、母音/a/がホワイトノイズと同側の右側優位、音節/ga/が左側優位となった。同被験者は6歳から11歳までの間にアメリカ合衆国に滞在していたことから、臨界期における言語環境下の影響によるものと思われる(第2章参照)。

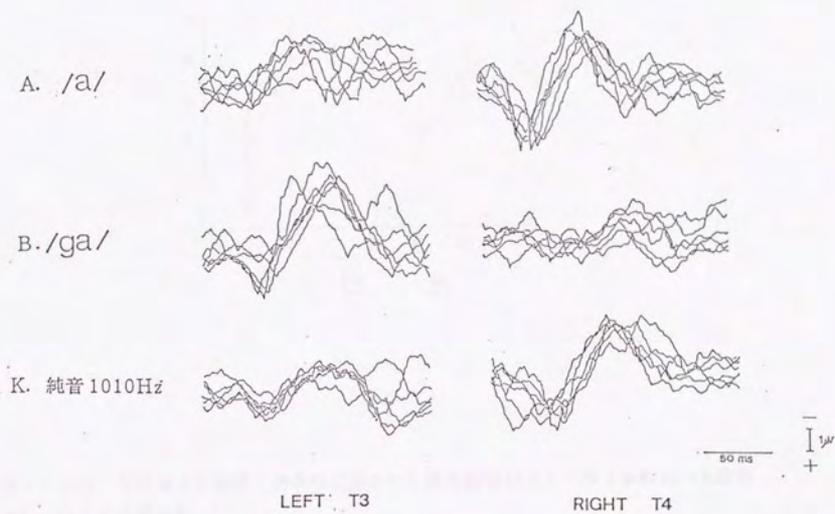


図7-9 聴性誘発反応の左右差評価によって非日本人の正常型と判定されたS, T (中国), W, O, M (アメリカ), A (カナダ), F (フランス) 例の母音/a/, 音節/ga/, 純音1010Hzに対する誘発反応の重ね書き。

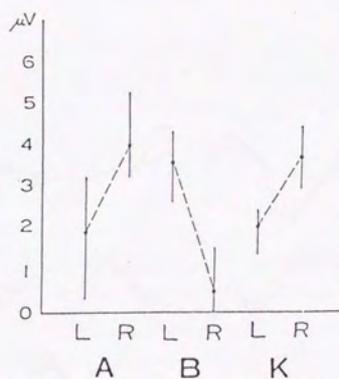


図7-10 非日本人正常型7例から記録された誘発反応のP1-N1振幅値の平均値(L, R)と標準偏差。

A. /a/ (L=1.90 (SD=1.45), R=4.00 (SD=0.95)), B. /ga/ (L=3.57 (SD=0.80), R=0.47 (SD=0.70)), K. 純音 (L=2.10 (SD=0.48), R=3.68 (SD=0.92))

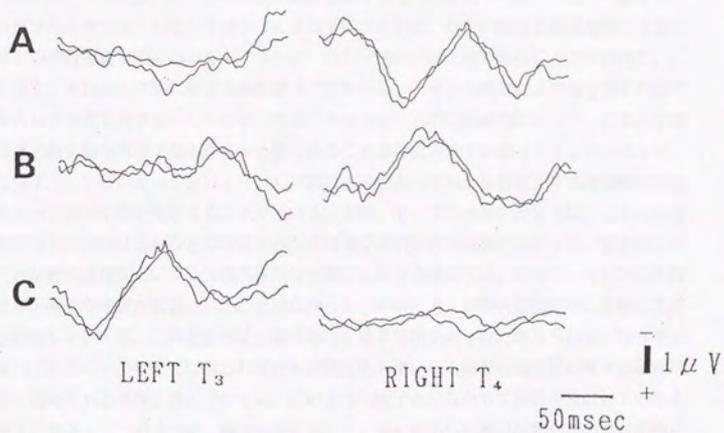


図7-11 6歳から11歳までの間、合衆国に滞在していた日本人被験者T. O例(測定時15歳)の母音/a/(A)、ホワイトノイズ(B)および音節/ga/(C)に対する反応。

7-3. 考察

本章では、第5章において述べた3Hz-AEP法とkey-tapping testとの相関について検討した。そして、いくつかの自然音に対する、日本人および外国人個々の優位性パターンの判定結果が合致することを確認した。これによって、key-tapping testによって見出された。ヒトの聴覚情報処理様式(第2章)の神経機構解明においても、3Hz-AEP法は充分有効であることが示された。

また、大脳左右半球に対する麻酔薬(アミタールソーダ)の効果により優位性を判定するWada法とkey-tapping testとの比較研究によって、日本人では母音の優位側が言語中枢の存在する側であることが確認されている(Tsunodaら, 1971)。したがって3Hz-AEP法の適用によっても、母音に対する優位側の判定によって言語半球を推定することが出来る。実際、7-2でも示したように、日本人被験者のうち何例かは母音などの言語音が右半球優位と判定される場合があった。従来行われてきた聴性誘発反応による大脳半球優位性測定に関する研究では、3Hz-AEPの差異ほどの顕著な差異が観測されることはなかった。そのため、被験者集団の中に逆転正常型が混在していても、これを正確に分類することは不可能であったと考えられる。第5章で述べたように、これまでになされてきた誘発反応を用いた大脳半球優位性に関する研究結果に認められる不確定性については、このような因子も少なからず影響を及ぼしていると考えられる。このように、個々の例において、音に対応した神経活動の左右差が明瞭に検出出来るため、臨床例を対象とした神経心理学的研究(第2章)においても、3Hz-AEP法は充分有効な方法と考えられる。

なおkey-tapping testおよび3Hz-AEP法によって観測される、いわゆる臨界期における言語環境に対応した優位性パターンの相違が発生する原因については、さまざまな意見が提出されている。特に角田(1976)は、日本語の母音には、それ自体で意味を備えたものが、欧米の母音に比較して圧倒的に多く認められるとし、そのために日本人の脳における母音の処理様式が子音などと同様に言語半球で処理されると説明している。しかしながら、この仮説を証明することは、現段階では極めて困難である。したがって本研究論文では、この件に関してはこれ以上深くは論ぜず、むしろ3Hz-AEP法によって観測される、おそらくは大脳皮質を含む一連の聴覚情報処理機能および機構の解明を目的とする。本章では、現象的に3Hz-AEP法で検出される誘発反応の左右差とkey-tapping testによって行動的に観測される左右差とが、個々のレベルで完全に一致したことを述べるに止める。なおここで観測された音の処理機構(音の選別機構)が、音のどのような特性に基づくものかについては次章で議論する。

7-4. まとめ

1) 健常日本人25例個々の例について、key-tapping testと聴性誘発反応による左右差評価とを独立に施行し、両者の判定結果に完全な一致を認めた。

2) 聴性誘発反応の左右差評価によって、日本人正常型では母音/a/、音節/ga/、こおろぎの鳴き声、牛の鳴き声、小川のせせらぎの音、尺八、薩摩琵琶、篠笛の音は左半球優位となり、バイオリンA音、フルートA音(いずれもnon-vibrato)、純音1010Hz、ホワイトノイズは右半球優位となることが示された。

3) 聴性誘発反応の左右差によって、非日本人正常型では音節/ga/は左半球優位となるが、母音/a/、純音1010Hzは右半球優位となった。母音/a/に関する日本人正常型との違いについては、臨界期を過ぎた時点での二次的日本語学習による影響は受けられないことが示され、角田による非日本人正常型に関する結果(1980)と一致した。

4) 音節以外の検査音については、同定不可能な状況において検出された左右差であるため、本稿で検出された左右差は、高次の認識によらない検査音の物理構造に依存する左右差と考えられた。

第8章 3Hz-AEPの左右差を決定する 音の構造について

前章において、3Hz-AEP法の適用の結果、正常型日本人では、母音、音節、こおろぎの鳴き声、牛の鳴き声、尺八の音、琵琶の音、篠笛の音が左半球優位、フルートA音、バイオリンA音、純音、ホワイトノイズの音が右半球優位となること、そして3Hz-AEPの左右差が特に音の物理構造に対応して生じるものであることを示した。

本章では、第5章、第7章において得られた左右差と検査音との対応に基づいて、3Hz-AEPの左右差において基本的に重要な音の物理特性はどのようなものであるのかについて検討する。

8-1. 音源とその分析方法

分析の対象は、前章で述べたように正常型日本人で左半球優位となる母音/a/、子音-母音から成る音節/ga/、こおろぎの鳴き声、牛の鳴き声、尺八の音、薩摩琵琶の音、篠笛の音、および右半球優位となるフルートA音、バイオリンA音、純音1010 Hz、ホワイトノイズとした。

第7章の聴性誘発反応を用いた左右差評価は、音節/ga/、純音1010Hz以外はエンドレス・テープに録音、編集したものを断続して与え、脳波を128回加算平均することによって行った。したがって、この結果については、音源の物理構造の統計的性質に起因するものと考えられるため、分析は音源の平均的特徴を抽出する方針で行った。

周波数分析については、ソナグラフ(サウンド・スペクトログラフ RION SG-07)によるセクション、パターン(分析時間2.4secおよび0.8sec、平坦特性による)、また必要に応じてカットオフ周波数10kHzの低域フィルター(-48 dB/oct)に通した後、FFT(サンプリング時間40 μ sec、データ数512、12ビットのA/D変換による)によってスペクトルおよびその加算平均などを求めた。

特に基音の充分強い調和構造から成る準定常音については、低域フィルターを用いて第二倍音が元のレベルから約33dB減衰するように処理することで基本音を相対的に強調し、その零交差を1024周期分計数することでピッチのゆらぎを推定した(精度およそ0.02%)(図8-1)。

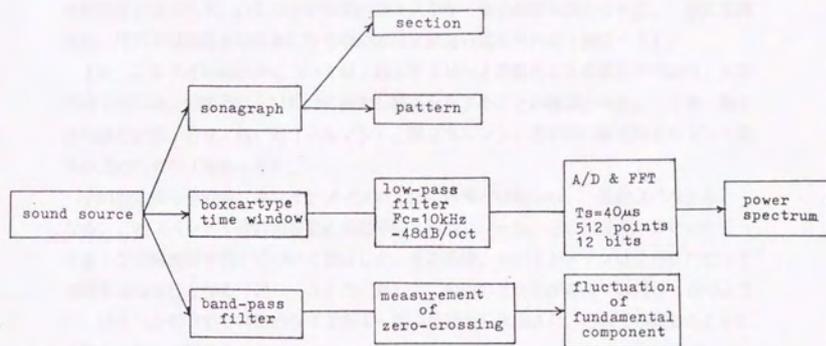


図8-1 音の分析のブロックダイアグラム.

8-2. 結果

バイオリン、フルート、篠笛はいずれも倍音構造から成る。これらのスペクトル包絡は、バイオリンの場合、基音の強い、約4.5kHzまで平坦な山形であり、フルートは奇数次と偶数次のレベル差が15dB、傾斜-12dB/倍音の単純な高域減衰型、篠笛については傾斜-34dB/倍音の単純な高域減衰型となった(図8-2)。

一方、尺八、母音/a/、牛の鳴き声、薩摩琵琶は、前述の3種類の音のような単純な包絡特性とはならず、いくつかの特徴的なエネルギー集中帯域が認められた。特に薩摩琵琶、尺八では整数倍の関係にならない部分音構造も認められた(図8-3)。

また、こおろぎの鳴き声については、およそ4kHzの基音とその倍音から成り、下降性の10%以上の顕著なFM成分の繰返し構造を有することが確認された。子音-母音から成る音節/ga/は、第1ホルマント、第2ホルマントその他の顕著なホルマント遷移が認められた(図8-4)。

小川のせせらぎの音、ホワイトノイズは上記の音源とは異なり、連続スペクトルとなる。このスペクトルの時間変動と時間平均(時間フレーム 20.48msecのデータを128回加算平均)について検討した。その結果、ホワイトノイズは全域にわたってほぼ平坦な特性となる(図8-5)のに対して、小川のせせらぎの音では図8-6のように、いくつかの安定で特徴的なエネルギー集中帯域から構成され、これらが時間とともに推移する構造が認められた。

図8-7は、母音/a/、牛の鳴き声、薩摩琵琶、小川のせせらぎの音、尺八の音、フルートの音について、パワースペクトルのピークレベルの最大値から30dB以内に存在する、バンド幅1kHz以下のエネルギー集中帯域の中心周波数を、最低周波数を1次としてそれぞれ比較したものである。これより、日本人正常型で右半球優位となったフルートの音では整数倍の関係(1次、3次、5次、...)となるのに対して、牛の鳴き声、薩摩琵琶、小川のせせらぎの音、尺八の音については明確な整数倍の関係にはならないことが分った。

図8-8に、尺八、能管、母音/a/、篠笛、バイオリン、フルートのピッチのゆらぎを示す。これより、正常型日本人で右半球優位となるバイオリン、フルートのピッチのゆらぎは、左半球優位となる母音などの音に比べて小さくなることが認められた(尺八: 2.26%、母音/a/: 1.15%、篠笛: 0.82%、バイオリン: 0.78%、フルート: 0.56%)。

篠笛、バイオリン共に単純な高域減衰型で、しかも図8-8のようにピッチのゆらぎの大小に、特に有意な差が認められないにもかかわらず、日本人正常型ではそれぞれ左、右大脳半球優位となる。これについては、図8-2に示すように、バイオリンの方が篠笛に比べて圧倒的に倍音構造が豊かであるという性質の違いによるものと説明され得る。

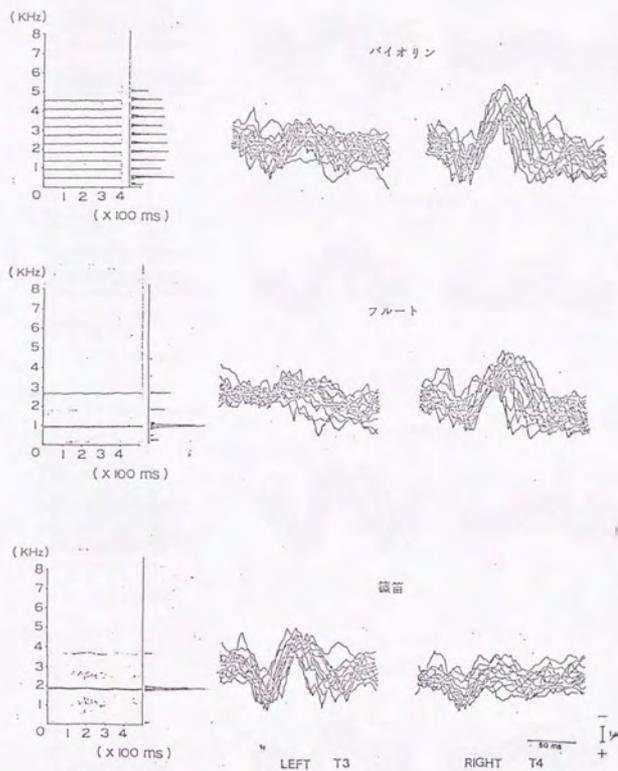


図8-2 バイオリン、フルート、篠笛の音のスペクトルと日本人正常型の誘発反応 (第7章参照)。

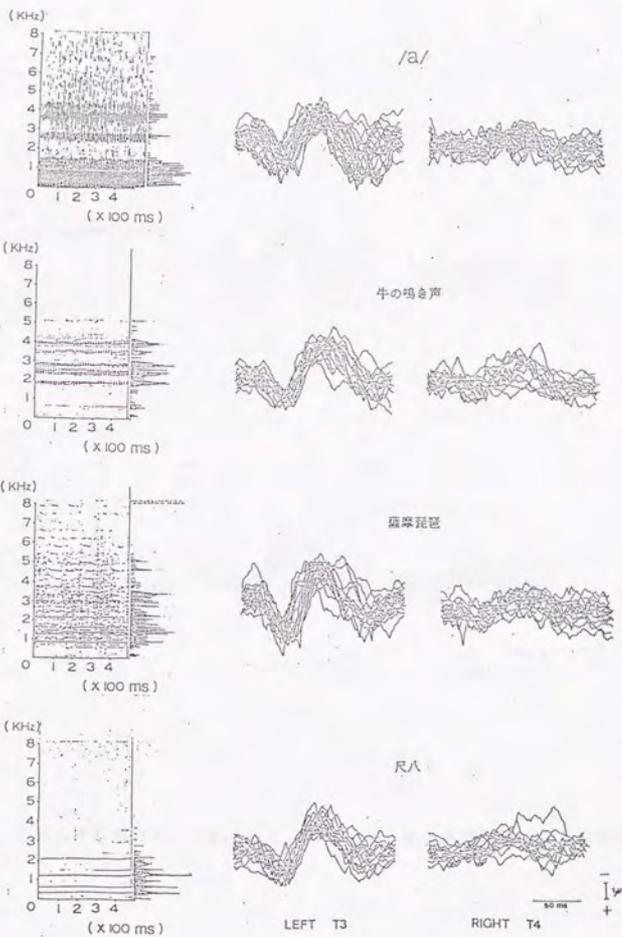


図8-3 母音/a/, 牛の鳴き声, 薩摩琵琶, 尺八の音のスペクトルと誘発反応 (第7章参照)。

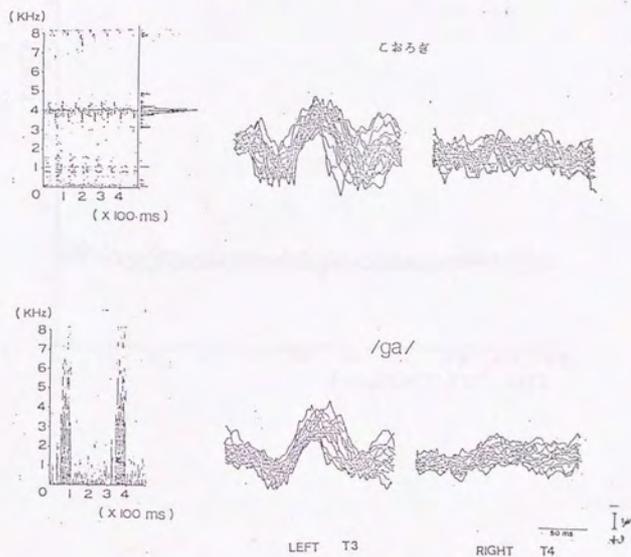


図8-4 こおろぎの鳴き声，音節/ga/のスペクトルと誘発反応（第7章参照）。

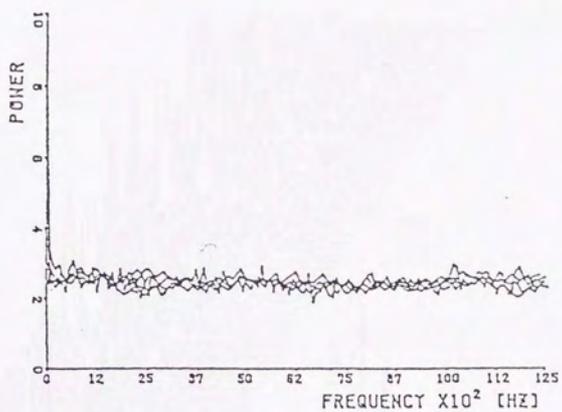


図8-5 ホワイトノイズの平均パワースペクトル。時間幅20.48msecの時系列のパワースペクトルを128回連続加算平均した平均パワースペクトルを5回重ねたもの。縦軸はリニアスケール。

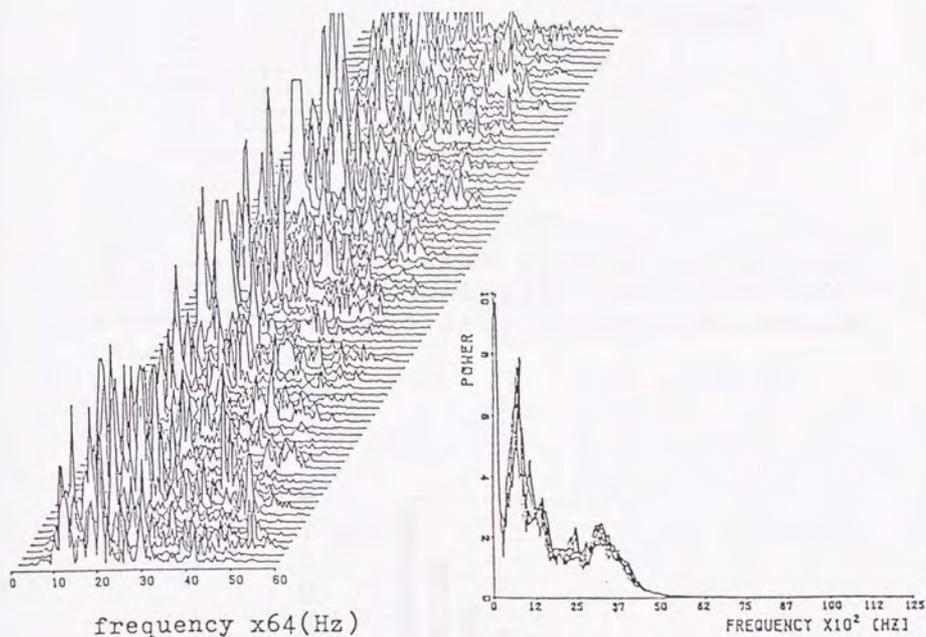


図8-6 小川の平均パワースペクトル(図8-7参照)とスペクトル・アレー(1フレームは31.2 msecの時系列より求めたスペクトルで、連続80フレームを描いたもの)。

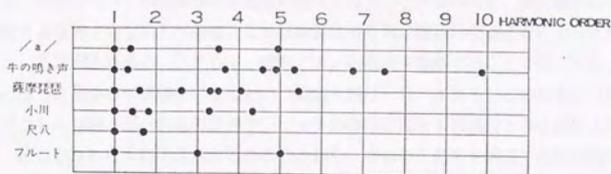


図8-7 母音/a/, 牛の鳴き声, 薩摩琵琶, 小川のせせらぎ, 尺八, フルートの音について, パワーの最大値より30dB以内に存在するバンド幅1kHz以下のエネルギー集中帯域の中心周波数を最低周波数を1次として, これと他の中心周波数との関係を比較したもの。

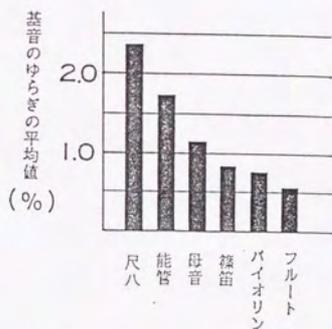


図8-8 尺八, 能管, 母音/a/, 篠笛, バイオリン, フルートの基音のゆらぎの平均値。

さらにこの因子が、いわゆる音の物理構造に依存する左右差において重要であることを支持する結果としては以下に示す事実が認められる。まず、母音/a/に振幅歪みを与えることで、そのスペクトル包絡が非整数倍の関係となるにもかかわらず、優位側が右半球へと変化する事実(第5章)がある。これは高調波倍音列が豊かになることによって生じる現象として説明され得る。そして、母音/a/の高域を遮断することで第1ホルマントのみとなった音が右半球優位になるという現象(図8-9)がある。この現象についても、スペクトル包絡が単一共振特性で、ピッチのゆらぎは左半球優位となる篠笛よりも大きい、にもかかわらず右半球優位となることから、やはりこの音を構成する倍音列の豊かさによって説明され得る。以上の分析結果から、音形レベルの左右差を決定する音の物理的因子として、角田の合成音を用いた実験結果より導かれた「スペクトル間の関係が整数倍か非整数倍か」および「FM成分の大小」という因子(角田, 1980)の他に、本分析によって「倍音構造が豊かか否か」という因子も無視し得ない重要な因子となることが見出された。

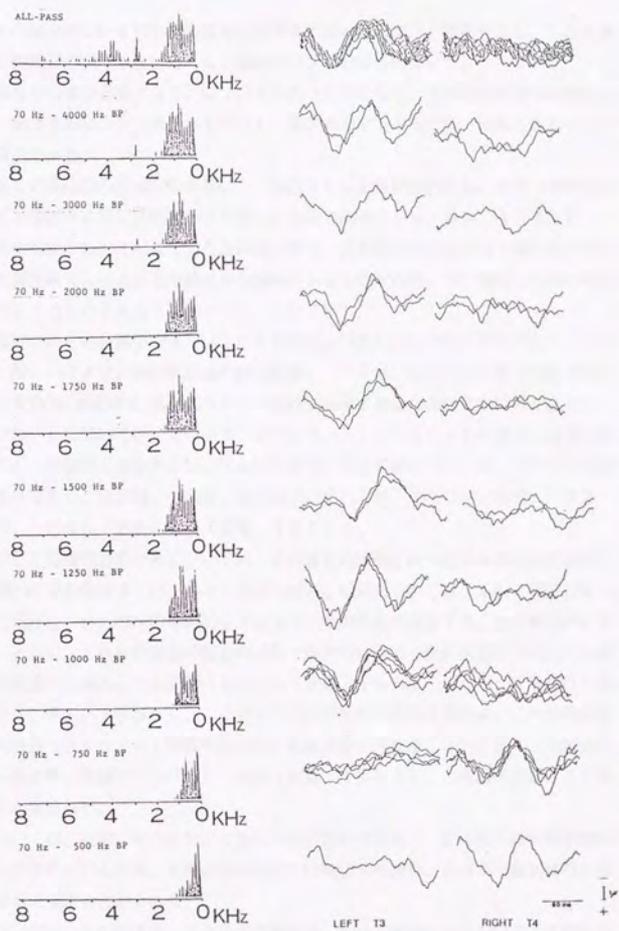


図8-9 母音/a/の高域遮断による聴性誘発反応の左右差の変化。正常型日本人 No. 2例(第7章参照)。

8-3. 考察

母音、牛の鳴き声はいずれも構音器から発声するためホルマント構造を有し、しかも各周波数間に整数倍の関係は生じにくく、適度のピッチのゆらぎを伴う。

子音-母音から成る音節/ga/についても言うまでもなく、有声破裂音から後続母音へと続く、第1ホルマント、第2ホルマント、第3ホルマントなどの、顕著なホルマント遷移が特徴的である。

また、多くの直翅目の昆虫の発音源は、線状または歯状凹凸の並んだ面（摩擦発音部）をバチで摩擦する系に共鳴器がつながったものである（Leroy, 1979）。本稿で分析の対象としたえんまこおろぎの鳴き声も、この機構から発する下降性のFM成分を伴った周波数4kHzとその倍音から構成されるものであり、ヨビ鳴きとも言われ我々がよく耳にするものである（Leroy, 1979）。

西洋楽器についての音響学的研究は1960年代より盛んに行われており（山口, 1981）、一般にバイオリン属の楽器音の倍音構造については、倍音がきわめて豊富で十分に強い基音を持ち、巨視的に見たスペクトル包絡が山形となるなどがその特徴とされる。

また、フルートについては、オーボエ、クラリネット、トランペットに比べて倍音の数が最も少なく、偶数次と奇数次にはレベル差があり、倍音傾斜については、それぞれ音域により定まっており、低音域、中音域、高音域で、それぞれ-16dB/倍音、-13dB/倍音、-8dB/倍音となる（安藤, 1978）。

これに対して邦楽器音の分析については、その解析の困難さから西洋楽器の研究報告に比べて圧倒的にその数は少ない。しかしながら尺八、琵琶については、本稿で測定対象とした音源と同様な、いくつかの特徴的なエネルギー集中帯域が存在することが明らかにされている。さらに、これらの楽器の構造の不均一性から生じる、西洋楽器では見出し難い、部分音構造から成ることも認められている（安藤, 1982；井上ら, 1980；西川, 1982；外山, 1985）。このような非整数倍の部分音構造は、これらの楽器の他に、大鼓音（Bessel関数の根の比で近似可能）（安藤, 1985）、小鼓音の奏法のうち頭と甲（安藤, 1985）、梵鐘（栗原, 1981）、三味線（安藤, 1983）などにも見られる。

篠笛については、長町、村の社などで祭りの時に使われる笛で、その多くは竹の生地がそのまま生かされているため、本稿の分析精度では確認不可能な、倍音から数%外れた部分音を有する可能性も否定できない。

以上より、音声、牛の鳴き声、こおろぎの鳴き声、西洋楽器音などについて、本稿で分析の対象とした音源が、それぞれの音の平均的特徴を備えた代表的な音と考えてもよい。邦楽器音については、上記のように、現在の所それに関する知見が充分でないため、その一般的特性と、本稿が分析の対象とした音源との関連を明確にすることはできない。しか

しながら邦楽器の構造、奏法に由来する特徴的な音響特性のいくつかについては、これをよく備えたものと言えよう。

五線譜による記譜法は、邦楽器の演奏法を正確に記述する上で重要な役割を果たしている。また、演奏者の視覚的な理解を助けることで、演奏の精度を向上させる効果がある。

また、邦楽器の演奏法は、その独特の音響特性を生み出す重要な要素である。

このように、邦楽器の演奏法は、その独特の音響特性を生み出す重要な要素である。

また、邦楽器の演奏法は、その独特の音響特性を生み出す重要な要素である。

また、邦楽器の演奏法は、その独特の音響特性を生み出す重要な要素である。

また、邦楽器の演奏法は、その独特の音響特性を生み出す重要な要素である。

8-4. まとめ

3Hz-AEP法によって、左右側頭部より得られる聴性誘発反応の左右差と各種自然音の物理特性との対応から、日本人における聴覚系の左右差を決定する音の物理構造について検討した結果、以下の物理特性の強い音は日本人正常型で右半球優位となることが明らかにされた。

- 1) 音のスペクトル包絡が、単一共振様特性あるいは単純な高域減衰型。
 - 2) 音のスペクトル包絡に2つ以上のエネルギー集中帯域があり、その中心周波数間に整数倍の関係がある。
- そして特に倍音構造から成る音については、
- 3) 音のピッチのゆらぎが小さい。
 - 4) 音の倍音構造が豊かである。