後頭部脳波の発達的变化に関する追跡的研究

—— 6 - 15歳の範囲について ——

日本学術振興会 小池敏英
東京学芸大学 堅田明義

Follow-up study on developmental changes of occipital EEGs

—— 6 to 15 years of age ——

KOIKE, Tosihide & KATADA, Akiyosi

Laboratory of Physiological Psychology for Handicapped Children,
Tokyo Gakugei University, Koganei-si, Tokyo 184, Japan

The developmental changes of occipital EEGs were investigated through follow-up recordings of 13 normal children. Their ages were from 6 to 10 years when the first EEG recording was made. Each follow-up recording lasted about 5 years. On these occipital EEGs an auto-power spectrum analysis was made. Of the 13 subjects there were 7 subjects who showed a single alpha component and 6 subjects who showed multiple peaks in θ and α bands. It was found that with the advancement of age the components which appeared at low frequencies among the multiple peaks diminished in power and disappeared, whereas the component of the highest frequency showed a gradual increase in peak frequency. The single α component also increased in its peak frequency with age. Thus, many components which exhibited distinct chronological changes were found in children's occipital EEGs. It was postulated that different maturational processes of the brain may be responsible for these changes.

Key words : EEG development, theta and alpha waves, spectrum analysis.

健常成人脳波の α 波は、頭皮上各部位で出現するが、特に後頭部近傍で優勢に出現する。この後頭部近傍で優勢な α 波の発達的变化に関しては従来から検討されてきた。その中でも帯域波型分析器を用いた研究によれば、年齢増加とともに δ および θ 帯域のエネルギー率が減少し、 α 帯域の

エネルギー率が増加することが報告された (Corbin & Bickford, 1955; 堅田, 1973; 大田原, 1964; 谷, 1961)。また、脳波記録から平均周波数を計測した結果からも、後頭部 α 波の周波数が、年齢増加とともに連続的に高くなると報告された (Lindsley, 1939)。これらの研究では、周波数帯域のパワや平均周波数を検討の対象としているため、一定の長さの記録範囲において相対的に優勢

1988. 3. 22 受稿

1988. 7. 25 受理

に現れる周波数成分に関する検討に限られた。しかしながら、脳波には複数の周波数成分が認められ、その統計的性質が異なるとする報告(堅田・小池, 1988; 堅田・鈴木・寿原, 1979; Suzuki, 1974)を考慮すると、優勢成分に比べてパワの小さい準優勢な成分を含めて、脳波の発達の変化を検討する必要がある。

この点に関して Katada, Ozaki, Suzuki, & Suhara (1981) は、3-15歳の小児脳波についてパワスペクトル分析を行い、優勢成分と準優勢成分の発達の変化を検討した。その結果、優勢成分と準優勢成分の出現様相と年齢増加との間には、明瞭な直接的関係を認めなかった。しかし優勢成分の周波数に着目すると、優勢成分が8Hzより低い周波数に出現する場合には、準優勢成分はそれより高い周波数に出現した。また優勢成分が8Hzより高い周波数に出現する場合には、準優勢成分はそれより低い周波数に出現した。さらに彼らは脳波の追跡記録から求めた所見とあわせた結果から、優勢成分が準優勢成分となり、さらにそれが消失し、他の一層高い周波数にピーク成分が出現するという、脳波の発達の変化について報告した。彼らはまた、上述の発達の変化は部位により異なるとした。特に後頭部は、前頭および中心の2部位と比べて準優勢成分の数が少なく、その周波数が9Hzより高い例は稀であることを指摘した。彼らはこのような特徴について、後頭部脳波の発達の変化が、他部位に比べ早い時期に終了するためと考えた。しかし後頭部の準優勢成分が消失する過程は、Katada et al. (1981)の追跡的研究では十分確認できなかった。発達の変化が早いと予想される後頭部脳波については、比較的短い間隔で行われた多数回の追跡記録に基づく検討が必要であろう。小児脳波の発達の研究の多くは、横断的研究によって行われてきた。しかし、脳波の発達の変化は個体差を示すことから、個々の対象児における経年的変化を明らかにする必要がある、その点でも上述の縦断的研究は重要である。

そこで本研究では、約5年にわたって行われた3-4回の追跡的脳波記録のスペクトル分析結果に基づいて、後頭部の脳波周波数成分の発達の変化に関して検討することを目的とした。

方 法

1 被験対象

対象児は、6歳から10歳の健常児13名を被験対象とした。健常児については、重篤な疾患歴や障害のない標準的な心身の発達を示すものとした。対象児は、4年から5年4ヵ月(平均4年9ヵ月)にわたって追跡記録された。記録間隔については、各対象児とも、はじめの2年間は5ヵ月から2年(平均1年1ヵ月)であり、その後、2年6ヵ月から3年10ヵ月(平均2年11ヵ月)経過して最後の記録を行った(Fig. 1)。

Fig. 1 Age distribution for EEG records in subjects. EEG records of one subject were connected by lines.

2 脳波の記録

防音され、恒温湿に維持された実験室内では、安楽椅子に単独または付き添いと共に対象児を腰掛けさせ、脳波を記録した。脳波は、閉眼覚醒安静状態で、正中線上6部位より両耳垂を基準として導出した。電極は、直径10mmの銀塩化銀皿状電極を用い、電極糊(日本光電製)で接着させ、テープにより固定した。電極の位置は、鼻根正中点と後頭部隆起との距離を100%とし、鼻根正中点より20%後方を前頭部(F)、以下順次15%後

方を、前頭中心部 (FC), 中心部 (C), 中心頭頂部 (CP), 頭頂後頭部 (PO), 後頭部 (O) とした。脳波は、脳波計 (三栄測器製 1A12 型) により増幅・紙記録すると共に、FM 変調方式による磁気記録 (TEAC 製 R-250) を行った。脳波の記録は、時定数 0.3 秒, 増幅感度 $5 \text{ mm} / 50 \mu \text{ V}$ または $7 \text{ mm} / 50 \mu \text{ V}$ で行った。

3 脳波の分析

対象児が覚醒し、各導出部位でアーチファクトの認められない脳波記録について、スペクトル分析を行った。スペクトル分析は、はじめに脳波の A/D 変換 (サンプリング間隔 11.7 ms) を行い、1 区間 2.9952 秒の脳波の高速フーリエ変換により、分解能 0.333 Hz (以下 $\frac{1}{3} \text{ Hz}$ と記す) の小区間パワースペクトルを求めた。その後、小区間パワースペクトルの平均により約 3 分間の脳波の平均パワースペクトルを求めた。Window 処理は、小区間パワースペクトルの算出時に周波数軸上で行った。

結 果

1 後頭部脳波スペクトルにおける優勢成分と準優勢成分の関係

Fig. 2 は、脳波の追跡記録によって求めた後頭部脳波の平均スペクトルを示した。E. S. の 1 回目 (6 歳 3 ヶ月) の記録では、6 Hz と 9 Hz にピーク成分が出現し、9 Hz の成分のパワは他の成分と比べて大きかった。このように各部位においてパワの最も大きいピーク成分を“優勢成分”とし、それ以外のピーク成分を“準優勢成分”とよぶことにした。2 回目 (6 歳 8 ヶ月) の記録では、4 Hz, $6 \frac{1}{3} \text{ Hz}$, 9 Hz に各ピーク成分が出現した。3 回目 (10 歳 9 ヶ月) の記録では $9 \frac{2}{3} \text{ Hz}$ の成分のみが出現した。M. A. の 1 回目 (7 歳 3 ヶ月) の記録では、 $8 \frac{2}{3} \text{ Hz}$ の優勢成分と 4 Hz の準優勢成分を認めた。3 回目 (11 歳 3 ヶ月) では、 $9 \frac{2}{3} \text{ Hz}$ にピーク成分が出現した。Y. K. についても、1 回目 (7 歳 3 ヶ月) の記録では 7 Hz と 9 Hz にピーク成分を認めたが、3 回目 (11 歳 6 ヶ月) では、 $9 \frac{2}{3} \text{ Hz}$ の

Fig. 2 Auto-power spectra of occipital EEGs from the same subject. Numbers in parentheses indicate the ages of EEG recordings. Thus, (6:3) indicates 6 years and 3 months of age.

ピーク成分のみが出現した。K. K. については、1 回目 (8 歳 7 ヶ月) の記録では、5 Hz, 8 Hz, $9 \frac{1}{3} \text{ Hz}$ に各ピーク成分が出現し、5 Hz の成分が優勢成分であった。2 回目 (9 歳 9 ヶ月) の記録でも、1 回目と同様の 3 成分を認めた。3 回目 (13 歳 10 ヶ月) では、 $4 \frac{2}{3} \text{ Hz}$ と $9 \frac{2}{3} \text{ Hz}$ にピーク成分が出現し、 $9 \frac{2}{3} \text{ Hz}$ の成分が優勢成分であった。このように各対象児のスペクトル構造は、記録相互の間で類似し、ピーク成分の出現は安定していた。またそのスペクトル構造は、優勢成分と準優勢成分によって特徴づけることができた。

Fig. 3 は、対象児 13 名の追跡記録において認められた、優勢成分と準優勢成分の関係の変化を示した。黒丸は優勢成分をあらわし、それと実線で結ばれた白丸は、同じスペクトルでみられる準優勢成分をあらわした。各パターンにおいて、優勢成分と準優勢成分の関係を、追跡記録の順に上か

Fig. 3 Dominant and subordinate EEG component alternation with age. Solid and open circles indicate the dominant and subordinate components, respectively. A solid line linking circles indicate that these components were observed in the same spectrum. The relations of dominant and subordinate components were shown in the order of follow-up EEG recording.

ら下に配列した。横軸は周波数を示した。なお、相続く 2 回の追跡記録のスペクトルにおけるピーク周波数が 1Hz の範囲内で変化した場合、同じ周波数の成分とした。図中 (a) は Fig. 2 の対象児 K. K. を、(c) は E. S.、(e) は Y. K.、(f) は M. A. について示した。これより、1・2 回目の記録で優勢成分が準優勢成分より低い周波数にあり、3・4 回目の記録で優勢成分が準優勢成分より高い周波数に出現した例 (a) は、1 名であった。1 回目の記録で単一の優勢成分がみられ、2・3 回目で優勢成分と共に低い周波数に準優勢成分が出現した例 (b) は、1 名であった。また 1 回目の記録で準優勢成分が優勢成分より低い周波数にあり、3 回目ないしは 4 回目の記録で、優勢成分のみが出現した例 (c, d, e, f) は、5 名であった。追跡記録をとおして準優勢成分が出現せず、単一の優勢成分のみが出現した例 (g, h) は、6 名であった。これより、複数の成分の中で低い周波数の優勢成分や準優勢成分は、記録回数の増加に

ともない消失することがわかった。また単一の優勢成分や、複数の成分の中で周波数が最も高い成分は、優勢成分として存在し続けることがわかった。そこで次に、発達経過において優勢成分として存続した周波数成分の経年的変化を検討した。

2 後頭部脳波のスペクトル成分と年齢との関係

Fig. 4 は、単一の優勢成分や、複数の成分の中で周波数の最も高い成分について、追跡記録脳波のスペクトルを示した。K. A. の 1 回目 (6 歳 6 ヶ月) と 2 回目 (6 歳 11 ヶ月) の記録ではピーク成分は $8\frac{1}{3}$ Hz に出現し、3 回目 (7 歳 6 ヶ月) と 4 回目 (11 歳 4 ヶ月) の記録では、9Hz に出現した。K. Mo. の 1 回目 (7 歳 3 ヶ月)、2 回目 (7 歳 10 ヶ月)、3 回目 (8 歳 7 ヶ月) の記録では、ピーク周波数は 9Hz であったが、4 回目 (11 歳 6 ヶ月) の記録では、 $9\frac{1}{3}$ Hz であった。M. S. については、1 回目 (8 歳 11 ヶ月) の記録では、ピーク成分は $8\frac{1}{3}$ Hz であったが、2 回目 (10 歳 0 ヶ月) と 3 回目 (11 歳 3 ヶ月) では 9Hz に、4 回目 (13 歳 9 ヶ月) の記録では、ピーク成分は $9\frac{1}{3}$ Hz に出現した。K. Mi. についても、1 回目 (9 歳 3 ヶ月) の記録では、ピーク成分は 9Hz に出現したが、4 回目 (13 歳 11 ヶ月) では $9\frac{2}{3}$ Hz にみられた。これらの結果は、個体差があるものの、単独の優勢成分や最も高い周波数に出現する成分は、年齢増加にともないその周波数が増加する傾向にあることを示した。

Fig. 5 は、単一の優勢成分や、複数の成分の中で周波数の最も高い成分の周波数の経年的変化を、各対象児について示した。横軸は年齢を示し、四角は記録時の年齢を表した。縦軸は、1 回目の記録において認められたピーク周波数を基準として、2 回目以降の記録時のピーク周波数との差分を表示した。周波数分解能は $\frac{1}{3}$ Hz であり、各対象児の図右に示した。図左の数字は、1 回目の記録時のピーク周波数を示した。対象児は、1 回目の記録時のピーク周波数が順に高くなるよ

Fig. 4 Dominant components of EEG spectra from the same subjects. Numbers in parentheses indicate the ages of EEG recordings.

Fig. 5 Changes of peak frequencies of dominant components with age in each subject. Differences of peak frequencies were calculated between the first EEG recording and the other recordings. Numbers at the left indicate the peak frequencies of the dominant components in the first EEG recordings. An ordinate right scale indicates frequency. Resolution of frequency was $\frac{1}{3}$ Hz.

う、下から上に配列した。この図によれば、1回目の記録で9Hz以下の周波数を示した成分は、6歳から9歳半の対象児に多くみられた。それに対して、1回目の記録において9 $\frac{1}{3}$ Hz以上の周波数

を示した成分は、7歳半から10歳半の対象児でみられた。記録回数の増加にともなうピーク周波数の変化の差分についてみると、1回目の記録で9Hz以下であった成分は、相続く記録の間では1Hz以内と小さかったが、年齢増加とともに増加分が累積し、ピーク周波数は高くなる傾向が各対象児において認められた。1回目の記録で、9 $\frac{1}{3}$ Hz以上であったピーク成分に関しては、その増加分は $-\frac{1}{3}$ Hz から $\frac{1}{3}$ Hz の値を示し、ピーク周波数の増加傾向は明瞭でなかった。これより単一の優勢成分や、複数の成分の中で周波数の最も高い成分については、年齢と共にピーク周波数が徐々に増加し、その程度は、対象児の年齢やピーク周波数の高さによって異なることが判明した。

考 察

1 後頭部脳波の年齢的变化

後頭部脳波の年齢的变化に関しては、これまでの多くの研究では、アナログ型帯域分析器を用いて検討されてきた。それによると年齢増加とともに θ 帯域のエネルギー率が減少し、 α 帯域のエネルギー率が増加すると多くの研究で報告された (Corbin & Bickford, 1955; 堅田, 1973; 大田原, 1964; 谷, 1961)。 α 帯域内の周波数成分の発達的变化に関しては、アナログ型分析器の特性上、

詳細な検討が不可能であった。このことについては近年、デジタル処理によるスペクトル分析法を用いて検討されてきた。吉田(1984)は、分解能 0.5Hz の脳波パワースペクトルを算出した後、帯域別の平均パワの平方根より等価的電位を求めた。その結果、 α_1 帯域 (8-9.5Hz) の等価的電位は、3歳以降 6-9歳にかけて増加し、その後、減少傾向を示すのに対して、 α_2 帯域 (10-12.5Hz) の電位は、3歳以降増加し、9-12歳で最高値を示し、その後、20歳まではほぼ一定になると報告した。同様な結果は、3.5-12.5Hzの総パワを基準として、各帯域の相対パワを算出した Benninger, Matthis, & Scheffner (1984)によっても報告された。これらの研究では、帯域内の成分のパワは平均化されており、帯域の境界周波数における成分の出現様相は考慮されなかった。本研究では、6-15歳の小児後頭部脳波のパワースペクトルには、単一の成分を示すものと、優勢成分と準優勢成分の両方を示すものを認めた。優勢成分の周波数は 8-11Hz であったが、 α_1 帯域と α_2 帯域の境界周波数である 9-10Hz の値を示すものが多く認められた。このことは、従来、 $\alpha_1 \cdot \alpha_2$ 両帯域で観察された年齢変化に、優勢成分の周波数が関連することを示している。また優勢成分の周波数に比べて、準優勢成分の周波数が低いことから、両成分は相互に関連して発達の変化を示すことが指摘できる。これより、特定帯域のパワの経年的変化に関する検討のみでは、脳波の発達の変化を十分捉えきれないことが想定される。そこで次に、各対象者において観察された優勢成分と準優勢成分の経年的変化から、脳波の発達経過を考察する。

2 後頭部脳波の発達的変化

後頭部脳波には、優勢成分と準優勢成分が認められたが、そのピーク周波数は個体差を示し、両成分の発達的変化は、横断的研究では明らかにしにくい。本研究では、優勢成分と準優勢成分の関係が、追跡記録においてどのように変化するか検討した。その結果が示すように、後頭部で認めら

れる複数の周波数成分の中で、より低い周波数の成分はパワが減少し、消失した。これに対して、後頭部で認められる複数の周波数成分の中で周波数の最も高い成分や、単独で出現した優勢成分は、年齢が増加しても優勢成分として存在し続けた。これらの成分のピーク周波数の経年的変化を追跡的に検討したところ、ピーク周波数は年齢増加とともに徐々に高くなる傾向を示した。

後頭部で認められる複数の周波数成分の中で、より低い周波数に認められる成分については、年齢増加とともにパワが減少し消失した。Katada et al. (1981) は、脳波の発達の変化として複数の周波数成分の消長過程を指摘した。本研究で観察した周波数成分の消失は、Katada et al. (1981) の指摘した消長過程が後頭部において生じていることを確認するものであった。後頭部において認められた準優勢成分のパワは、優勢成分のそれと比べてかなり小さいものが多かったが、その出現様相は、同一個体の追跡記録相互の間で極めて類似し、著しい変動を示さなかった。このような準優勢成分の特徴は、Benninger et al. (1984) によっても指摘されており、パワが小さくとも各対象児の脳波の発達の特徴を表すことを示唆する。Katada et al. (1981) は、準優勢成分は特に前頭部や中心部で明瞭に出現することを指摘した。本研究で認めた後頭部における準優勢成分の消長的変化と、他部位でみられる準優勢成分との関係については、さらに部位を増やしての検討が必要である。

一方、後頭部で認められる複数の周波数成分の中で最も周波数の高い成分や、単独に出現した優勢成分について観察された、ピーク周波数の漸進的な増加傾向に関しては、Lindsley (1939) や Petersén & Eeg-Olofsson (1971) による結果と一部関連していると考えられる。彼らは、後頭部脳波記録の計測より平均周波数を算出し、各年齢群の平均値によって発達の変化を報告した。しかし本研究の結果、 θ 帯域と α 帯域に複数の周波数成

分が存在する後頭部脳波スペクトルを示す被験児が認められた。このような場合、脳波の平均周波数は、複数の成分のパワの大小関係によって影響を受ける。そのため脳波の平均周波数のみによって各個体の脳波の発達の特徴を記述する方法は、パワの小さな準優勢成分を適切に検討できず、脳波の発達の変化を検討する上で必ずしも妥当でないと考えられる(堅田, 1984)。本研究で明らかになった優勢成分のピーク周波数の変化が、脳内のどのような成熟の変化に基づくものであるかに関しては、頭皮上脳波のみを検討した本研究では詳細な議論は困難である。しかし後頭部脳波には、相違した発達の経過をたどる複数の周波数成分が混在することが明らかになった。このような複数の成分の発達の変化が、互いに異なる経過で同時に進行することは、後頭部 α 波の発生に関与する脳内各部位の成熟が、均等に進むのではないことを示すものと考えられる。成人の後頭部 α 波は、刺激に対する応答経過や部位間関係について、その特性が明らかにされている。発達過程上の複数の後頭部成分と、成人の α 波との関連性を明らかにするためには、これらの特性に関する検討が必要とされよう。また後頭部優勢な α リズム形成の機序として、視床非特殊核を含む視床-皮質間のニューロン回路網が指摘されており、特にそのリズム性に関しては、シナプス電位の時定数などのニューロン間の伝達特性によって影響されるとする研究もある(Lopes da Silva, Hoeks, Smits, & Zetterberg, 1973)。本研究で認めた後頭部脳波の優勢成分におけるピーク周波数の発達の変化は、周波数特性に関与する回路網の構成要素の成熟過程を反映していることが考えられる。この成熟過程はさらに、周波数成分の部位的特徴や時間的変動性に関連することが示唆されるが、この点については、さらに検討が必要である。

引用文献

- Benninger, C., Matthis, P., & Scheffner, D. 1984 EEG development of healthy boys and girls : Results of a longitudinal study. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 57, 1-12.
- Corbin, H. B. F., & Bickford, R. G. 1955 Studies of the electroencephalogram of normal children : Comparison of visual and automatic frequency analysis. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 10, 31-50.
- 堅田明義 1973 精神薄弱児の発達に関する生理心理学的研究-脳波の帯域分析による検討- 心理学研究, 44, 59-67.
- 堅田明義 1984 成熟・発達の計測 バイオニクス研究協議会(編)新時代をめざすバイオニクス技術-我が国の知識集約型産業の今後の動向調査研究- p. 159-165.
- 堅田明義・小池敏英 1988 発達途上に出現する θ 波と α 波の変動性-健常児および精神遅滞児脳波による検討- 脳波と筋電図, 16, 73-80.
- Katada, A., Ozaki, H., Suzuki, H., & Suhara, K. 1981 Developmental characteristics of normal and mentally retarded children's EEGs. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 52, 192-201.
- 堅田明義・鈴木宏哉・寿原健吉 1979 小児脳波の発達に関するスペクトル分析的研究-健常児及び精神薄弱児脳波の変動性- 心理学研究, 49, 318-325.
- Lindsley, D. B. 1939 A longitudinal study of the occipital alpha rhythm in normal children : Frequency and amplitude standards. *J. Genet. Psychol.*, 55, 197-213.
- Lopes da Sylva, F. H., Hoeks, H., Smits, H., & Zetterberg, L. H. 1974 Model of brain rhythmic activity: The alpha-rhythm of the thalamus. *Kybernetik*, 15, 27-37.
- 大田原俊輔 1964 脳波の発達-自動周波数分析に

- よる正常小児脳波の発達に関する研究— 臨床
脳波, 6, 143—157.
- Petersén, J., & Eeg-Olofsson, O. 1971 The
development of the electroencephalogram in
normal children from the age of 1 through 15
years : Non-paroxysmal activity. *Neuropädia-*
trie, 2, 247—304.
- Suzuki, H. 1974 Phase relationships of alpha
rhythm in man. *Jpn. J. Physiol.*, 24, 569—
586.
- 谷 秀雄 1961 Analyserによる正常小児脳波の周
波数分析結果について 福岡医誌, 52, 312—
332.
- 吉田治美 1984 脳波等電位図法による小児脳波の
発達に関する研究 脳波と筋電図, 12, 248—
260.

EEG, EMG, 外バイオフィードバック

各種電極, 特殊電極製作

ご相談下さい。ME全般

〒160 東京都新宿区西新宿7-5-5
プラザ西新宿303

株式会社 江 松

電話 (03) 365-5600