

覚醒－睡眠移行期の脳波のトポグラフィ特徴と時間変動特性の検討

森川 俊雄

広島県警察本部刑事部科学捜査研究所

The topographical EEG features and their temporal variations in waking-sleeping transition period

Toshio MORIKAWA

*Forensic Science Laboratory, Hiroshima Prefectural Police Headquarters,
Kohnan, Naka-Ku, Hiroshima, 730-0825, Japan*

第1章 入眠期研究の現状と本研究の目的

覚醒期と睡眠期の中に存在する入眠期では、入眠時幻覚という睡眠中の夢とは異なった心理的体験や、パフォーマンスの急激な低下現象が発生することが知られている。これらのことから、入眠期は心理学や人間工学において注目すべきテーマとなり、これまでに様々な検討が行われてきた。また、入眠期は生理的機能が覚醒系から睡眠系へと切り替わる時間帯であることから、生理学や臨床脳波学の分野からも注目されている。ところが、覚醒－睡眠移行期の脳波は、優勢周波数成分やトポグラフィ特徴が瞬時に変化することから不規則で不安定とされ、入眠期に特徴的な脳波変化のほとんどが国際判定基準の睡眠段階1に統合された (Rechtschaffen & Kales, 1968)。その結果、睡眠段階1が入眠期、睡眠段階2以降が睡眠期として扱われることとなった。

一方で、覚醒－睡眠移行期に焦点を当てた研究において、睡眠段階1開始前に覚醒期とは異なる状態が開始しているという指摘がある (Hori, 1982)。また、睡眠期とは考えられていない睡眠段階1の状態、すでに睡眠機構が活動を開始しているという知見が示されている (Ogilvie & Wilkinson, 1984; Harsh et al., 1994)。さらには、睡眠期とされてきた睡眠段階2においても初発の睡眠紡錘波 (spindle) が出現した時点では睡眠感が乏しいという報告もある (Kamiya, 1961)。これらのことは、国際判定基準が長時間の脳波記録を効率的に判定するために最適化されており、覚醒－睡眠移行期の検討には適していないことを示すものである。この時間帯を検討するためには、定量的な解析手法により、脳波のトポグラフィ特徴の変化や時間変動特性を統計的に整理し時間軸にそって詳細に記述することで、その時間構造を明らかにすることが必要とされている。

そこで本研究では、外部から刺激を与えることなく覚醒期から徐波睡眠期（睡眠段階3及び睡眠段階4）に至るまでの脳波を、頭皮上12部位 (Fp1、Fp2、F7、F8、Fz、C3、C4、Pz、T5、T6、O1、O2) から記録し、連続的にスペクトル解析することとした。パワについては記録を行った全部位、コヒーレンスについては左半球5部位 (Fp1、F7、C3、T5、O1) 及び正中線上の2部位 (Fz、Pz) の計7部位の脳波を用いた。得られたスペクトルを、覚醒－睡眠移行期の主要変動成分である6帯域

(δ 帯域：2.5~3.0Hz、 θ 帯域：3.5~7.5Hz、 α 1 帯域：8.0~9.0Hz、 α 2 帯域：9.5~11.0Hz、 α 3 帯域：11.5~12.5Hz、 σ 帯域：13.0~15.0Hz) に分割し、それぞれの帯域のトポグラフィ特徴の変化やパワ及びコヒーレンスの時間変動特性についての検討を行った。

第 2 章 入眠期脳波のパワスペクトル分析

第 2 章では、覚醒—睡眠移行期における主要変動成分毎によく似た時間変動特性を示す部位をまとめ込み、それぞれの領域の時間変動特性について検討した。

睡眠段階 1 開始前に変化を示したのは覚醒中の α 波のピーク周波数を含む α 2 帯域のみで、この帯域は前頭極—中心と頭頂—後頭に分離され、いずれの領域も睡眠段階 1 開始 1 分前から有意な低下を開始しそのまま NREM 睡眠の水準に達した。全ての部位が一つの主成分にまとめ込まれた δ 、 θ 帯域は、睡眠段階 1 開始後から一斉にパワが上昇し NREM 睡眠の水準に達する時間変動特性を示した。また、fast spindle の周波数に対応する σ 帯域は前頭—頭頂とその外周部の領域に分離され、いずれの領域も睡眠段階 2 開始後から有意な増加を開始し、そのまま NREM 睡眠の水準に達した。 α 3 帯域は 2 つの領域に分離され、slow spindle の活動を反映していると考えられる前頭極—頭頂が、 α 1 帯域の 2 つの領域とともに、睡眠段階 2 開始後から有意な増加を開始し、そのままに NREM 睡眠の水準に達した。

これらの結果は、入眠期に関連すると思われる脳波の変化が、 α 波が出現している睡眠段階 1 開始 1 分前に始まり、睡眠段階 2 開始数分後まで持続することを示唆するものであった。

第 3 章 入眠期脳波のトポグラフィ分析

第 3 章では、トポグラムを連続的に描画し、トポグラムの類似性に注目することで特徴的なトポグラフィパターンを抽出し、それらの時間軸上での移行関係を統計的に検討した。

α 2、 α 3 帯域からは前頭優位パターンと後頭優位パターン σ 帯域からは平坦パターンと前頭—頭頂優位パターンが抽出された。一方、 δ 帯域、 θ 帯域、 α 1 帯域は前頭優位パターンに集約された。 α 2 帯域では、睡眠段階 1 開始後に後頭優位パターンから前頭優位パターンへと交代した。 α 3 帯域と σ 帯域も、睡眠段階 1 開始後に 2 つのパターンが交代した (α 3 帯域：後頭優位パターンから前頭優位パターン、 σ 帯域：平坦パターンから前頭—頭頂優位パターン)。いずれの帯域においても睡眠段階 1 開始前にパターンの交代は発生しなかった。一方、 δ 帯域、 θ 帯域、 α 1 帯域はいずれも 1 つのパターンに集約されたことから、同じパワの大小関係を保ったまま、それぞれの部位のパワが増加していることが明らかとなった。

これらの結果から、睡眠機構に関連する背景脳波の変化が睡眠段階 2 開始前にすでに発生していることが示唆された。

第 4 章 コヒーレンスによる入眠期脳波の共変動成分の検討

第 4 章では、頭皮上における任意の 2 部位間の脳波の同期性の指標とされるコヒーレンスの時間変動曲線を用いて覚醒—睡眠移行期における脳波の共変動成分について検討した。

各帯域毎によく似た時間変動特性を持つ組み合わせを主成分分析により統計的に分離した。その結果、全帯域において頭皮上のほとんどすべてをカバーする分布特徴を示す汎性成分と、一部の部位に局在する局在性成分の存在が明らかとなった。それぞれの帯域における汎性成分の時間変動特徴の順

序性について整理すると、 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 帯域の低下、 δ 帯域の一過的な上昇、 σ 帯域の上昇、 $\alpha 3$ 帯域の上昇、 θ 帯域の低下、 δ 帯域の低下の順となった。

第2章、第3章におけるパワの分析結果と本章の結果を総合的に考察すると、 $\alpha 2$ 帯域の活動には覚醒機構と睡眠機構のそれぞれに対応したジェネレータの存在が考えられ、睡眠段階1開始後には前者から後者へと交代している可能性が指摘された。また、NREM睡眠中の δ 、 θ 、 $\alpha 1$ 帯域の活動は複数のジェネレータから構成されている可能性が示唆された。一方、fast spindle及びslow spindleについては、それぞれに対応する皮質下の個別のジェネレータの存在が推定され、その活動開始の順序から、前者が睡眠の開始、後者が睡眠の維持に関与している可能性が指摘された。

第5章 総 括

第5章では、第2章から第4章までの検討から得られた分析解析結果に基づき、覚醒—睡眠移行期の時間構造について整理した。

最も最初に発生する変化は、国際判定基準では「覚醒」として判定される睡眠段階1開始前に覚醒中のピーク周波数に対応する $\alpha 2$ 帯域において認められた。この時点での変化は、トポグラフィパターンが後頭優位のまま、各部位におけるパワーが一齐に低下する点が特徴的であった。このことは、 $\alpha 2$ 帯域のパワーの変化に注目することで、最も早く入眠期の開始が判定できることを示すものであると考えられた。

睡眠段階1開始から睡眠段階2開始までの間にも特徴的な変化が認められた。睡眠段階1の開始直後に、 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 帯域のコヒーレンスが有意な低下を開始しNREM睡眠の水準に達した。それと同時に、 δ 帯域と θ 帯域のパワーと δ 帯域のコヒーレンスが有意な上昇を開始し、NREM睡眠の水準に達した。 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 帯域と δ 、 θ 帯域にこのような順序性があることは、 $\alpha 1$ 、 $\alpha 2$ 帯域のコヒーレンスの変化を見ることで、 δ 、 θ 帯域の活動の開始が予測できることを示すものであると考えられた。また、この時点で $\alpha 2$ 帯域のトポグラフィパターンがNREM睡眠のパターンに変化した。睡眠に密接に関連する δ 帯域の変化と覚醒中の α 波のピーク周波数に対応する $\alpha 2$ 帯域のこのような関係は、覚醒期がこの時点で終了していることを示すものであると考えられた。

δ 、 θ 帯域の変化に続いて、睡眠段階2が開始する直前に、 $\alpha 3$ 帯域と σ 帯域のトポグラフィパターンが前頭及び前頭—頭頂優位のNREM睡眠のパターンへと変化し、それと同時に σ 帯域のコヒーレンスも有意な上昇を示しNREM睡眠の水準に達した。睡眠に密接に関連する δ 帯域と σ 、 $\alpha 3$ 帯域のこのような順序性から、 δ 、 θ 帯域のパワーとコヒーレンスの変化を見ることで、背景的な睡眠紡錘波の出現を予測できるものと考えられた。また、 σ 帯域のパワーが上昇してこの帯域が睡眠期の活動水準に到達するまで δ 帯域のコヒーレンスの有意な上昇が持続していた。このことから、fast spindleが安定して出現するようになるためには δ 帯域の活動が必要である可能性が指摘された。さらには、睡眠段階2の開始直前に $\alpha 3$ 帯域と σ 帯域のトポグラフィパターンが変化した。このことは、これら両帯域のトポグラフィパターンを見ることで、睡眠段階2の開始を的確に予測できることを示すものであると考えられた。睡眠段階1で睡眠と密接に関連していると考えられる δ 、 $\alpha 3$ 、 σ 帯域の活動が睡眠中の構造へと変化を開始しているという結果は、睡眠段階1で睡眠機構が活動を開始していることを示唆するものであった。

一方、slow spindleの周波数に対応した $\alpha 3$ 帯域のパワーとコヒーレンスがNREM睡眠の水準に達するのは、 $\alpha 1$ 、 θ 帯域と同時であり、 σ 帯域とそれに続く $\alpha 2$ 帯域がNREM睡眠の水準に達した後であった。このことから、主観的な睡眠感の成立過程にはslow spindle ($\alpha 3$ 帯域)だけでなく、 $\alpha 1$

帯域や θ 帯域がNREM睡眠の水準に達する必要があることを推察した。覚醒-睡眠移行期における脳波の変化は、 δ 帯域のコヒーレンスがNREM睡眠の水準まで有意に低下し、この帯域が安定期になることで終了した。

以上の結果は、これまで不規則で不安定とされてきた覚醒-睡眠移行期の脳波が主要変動成分毎に異なったトポグラフィ特徴の変化と時間変動特性を示しつつ、一定の順序をたどりながら覚醒期の脳波構造から睡眠期の脳波構造へと系統的に再構成されていることを示唆するものであった。これらの主要変動成分の変化から、入眠期は均質なものではなく、第Ⅰ段階： $\alpha 2$ 帯域のパワの減少から $\alpha 2$ 帯域のトポグラフィが変化し、 δ 、 θ 帯域の変化が開始するまで、第Ⅱ段階： $\alpha 2$ 帯域のトポグラフィが変化し、 δ 、 θ 帯域が変化を開始してから σ 帯域の変化の終了まで、第Ⅲ段階： σ 帯域の変化が終了してから $\alpha 2$ 帯域の変化が終了するまで、第Ⅳ段階： $\alpha 2$ 帯域の変化が終了してから $\alpha 1$ 、 θ 、 $\alpha 3$ 帯域の変化が終了するまで、第Ⅴ段階： $\alpha 1$ 、 θ 、 $\alpha 3$ 帯域の変化が終了してから δ 帯域の変化が終了するまでの5つの段階区分を提案した。このように入眠期が区分できたことは、眠気、居眠り運転防止、産業事故防止といった分野における「どこからが睡眠なのか」という問題点を検討するための一助になるものと考えられる。本研究の参加者は、睡眠障害や睡眠に対する愁訴のない心身ともに健康な男子大学生および大学院生であった。したがって、今回明らかとなった覚醒-睡眠移行期における脳波のトポグラフィ特徴の変化と時間変動特性を成人における基本的なパターンと位置づけることができよう。このことから、今回の結果と睡眠に対して様々な愁訴を持つ不眠症患者や高齢者の覚醒-睡眠移行期における脳波の変化パターンとを比較検討することにより、これらの人々の入眠過程の「歪み」が明らかになるものと期待される。

本研究の結果から、覚醒-睡眠移行期の脳波は頭皮正中線上を前後方向に変化することが明らかとなった。したがって、少なくとも正中線上4部位（Fz、Cz、Pz、O1）の脳波をモニタし、トポグラフィ特徴をつかみながら入眠期を観察することが、今後あるべき姿であると考えられた。また、小型軽量のデジタルポリグラフが普及し、コンピュータの性能も飛躍的に向上したことから、旧来の特定部位の視察判定ではなく、ポリグラフィ情報の高速処理と自動判定の実現により、精度の高い覚醒-睡眠移行期の研究と応用が可能となるであろう。

引用文献

- Harsh, J., Voss, U., Hull, J., Schrepfer, S., & Badia, P. (1994) ERP and behavioral changes during the wake/sleep transition. *Psychophysiology*, 31:244-252.
- Hori, T. (1982) Electrodermal and electro-oculographic activity in a hypnagogic state. *Psychophysiology*, 19:668-672.
- Kamiya, J. (1961) Behavioral, subjective and physiological aspects of drowsiness and sleep. In: D.W. Fiske & S.R. Maddi (eds.), *Functions of varied experience*. Dorsey: Illinois, Pp.145-174.
- Ogilvie, R.D., & Wilkinson, R.T. (1984) The detection of sleep onset: behavioral and physiological convergence. *Psychophysiology*, 21:510-520.
- Rechtschaffen, A., & Kales, A. (1968) *A Manual of Standardized Terminology, Techniques, and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects*. Public Health Service, U.S. Government printing office: Washington, D.C.