

入眠状態およびレム睡眠時眼球運動の自動計測

広重 佳治*

キーワード: 急速眼球運動, 緩徐眼球運動, 入眠状態, レム睡眠, 自動計測

Automatic measurement of eye movements in hypnagogic state and REM sleep

HIROSHIGE, Yoshiharu *

Key Words : rapid eye movements, slow eye movements, hypnagogic state, REM sleep, automatic measurement.

はじめに

睡眠時には2種類の眼球運動が出現する。その一つは跳躍性の急速眼球運動 (rapid eye movements: REMs) である。REMsの発見 (Aserinsky & Kleitman, 1953) は今から半世紀前に報告され、現代の睡眠科学の基礎を築く一大発見となった。REMsは入眠後約100分前後の間隔において出現する周期性眼球運動であり、その出現期には脳波が段階1に類似した低振幅速波の賦活パターンを示すとともに、抗重力筋の消失、自律神経系の乱れが生じる。さらに、この時期に睡眠者を呼び起こすと視覚心像を伴う奇異な夢を見ていたという内省報告が得られる。こうした特徴からREMsを伴う睡眠状態はそれまでに知られていた睡眠とは異質な状態と考えられ、レム睡眠あるいは逆説睡眠と呼ばれる。第2の眼球運動は左右の眼球が振り子様に緩やかに揺れる緩徐眼球運動 (slow eye movements: SEMs) である。SEMsの出現は古くから知られているが、最近、この眼球運動は入眠状態 (hypnagogic state) のモデル化に有用な生理指標であると考えられている (広重, 2001)。つまり、SEMsは覚醒と睡眠の移行関係と結びついた消長を示し、SEMs出現期には眠気、過小評価の傾向を示す時間知覚、後退した思考内容あるいは夢見様幻覚さらには随意運動の崩壊など覚醒時に存在した自我の連続性の減弱を示唆する一連の心理行動的变化が認められる。

眼球運動は、脳波および筋電位とともに、人の意識水準を他覚的にとらえる睡眠ポリグラフィ (polysomnography: PSG) を構成する必須の記録要素である (Rechtschaffen & Kales, 1968)。睡眠時の眼球運動は角膜側がプラスに、網膜側がマイナスに帯電した角膜網膜電位の変化を取り出す眼電図法 (electrooculography: EOG) による記録が一般的であり、国際基準のPSGにおいては左右眼窩外側縁部と耳朶 (あるいは乳様突起部) 間の電位を導出する基準電極法のEOGが推奨されている。基準電極法によるEOG記録は水平方向の眼球の動きに対して角膜網膜電位の極性が反転することを利用したもので、信号性眼球運動を左右EOG曲線の位相逆転として記録する。これに対して非信号性の電極由来のアーチファクトは同位相の振れとして記録されるので、信号との識別が視察でも比

*鳥取大学教育地域科学部 学校教育課程 人間教育講座

* Department of Human Education, Faculty of Education and Regional Sciences, Tottori University.

較的容易である。また、REMsとSEMsの判別は運動経過時間（前者がミリ秒単位、後者が秒単位）や波形パタンの違いから視察印象でも可能であるが、実際の計測場面においては信号判定の恣意性あるいは計測における人為的な誤差の介入という問題にしばしば直面する。特に、SEMsにおいてはその運動経過が非常に緩慢であるためEOG曲線の変化点（山と谷）の判読は容易でない。加えて、膨大な記録から個々の信号を判読し計測する労力と精神的負荷の大きさ、あるいは計測作業に要する時間の長さなどは無視することのできない問題である。自動計測法の開発はそうした問題への現時的な対処という動機づけから取り組まれる面が強いテクニカルな研究であるが、同時に眼球運動の計測を客観化し標準化するという方法論の発展に寄与する点も決して少なくない。

眼球運動の自動計測法の開発は電子技術の進歩とともに改善されつつあるが、脳波の周波数分析のように標準化された計測法は未だ確立していない。REMsとSEMsの両者を同時に計測対象とする自動計測法としては、シュミット回路を用いた運動周期検出法（菅野・稲永，1972）、スムージング法（島蘭ら，1980）、低域微分デジタルフィルタ法（Varri et al., 1996）あるいは島蘭らの計測法を改善したテンプレートマッチング法（篠・八名，1999）などがこれまでに報告されている。国際基準のPSGへの適用という点から考えると、左右2チャンネルのEOG曲線の位相関係を評価する計測法が望まれるが、従来、そうした計測法に関する報告例はきわめて少ない。著者の知る限り、うとうと状態（drowsiness）のモニターシステム（Varri et al., 1996）が唯一のものであろう。Varriらのシステムは、有限インパルス応答フィルタ（a weighted FIR-median-hybrid filter）による眼球運動の信号波形（SEMs, saccades おび 瞬目）の分離、2チャンネルのEOG曲線の相関と対称性の評価および波形パラメータによる最終判定という3段階の処理工程から構成されている。

先に、移動式直線回帰分析（a moving linear regression analysis）に基づく眼球運動の自動計測法（広重，1999）について報告した。それはSEMsの計測の自動化を主要な目的として考案されたもので、EOG曲線の接線の傾きを任意の時刻において推定することで曲線の変化点を検出し、信号波形の特徴抽出パラメータを計測するアルゴリズムで構成されている。その後の共同研究（鈴木ら，2000）においてアーチファクト処理などに改善を加え、テンプレートマッチング法（篠・八名，1999）との比較検討を行い、覚醒から睡眠への移行過程における眼球運動信号の認識が高速かつ高精度で可能であることを再確認した。しかし、REMsの検出精度の向上あるいは体動等に伴うアーチファクト処理についてはなお改善の余地があると考えられた。本研究は、そうした残された問題の解決策として先の移動式直線回帰分析に基づく計測法を発展させ、国際基準のPSGに準拠した左右2チャンネルEOG曲線から眼球運動信号（REMsとSEMs）を認識する自計測法の開発を試みた。今回は、入眠状態のみならずレム睡眠時にも本計測法を適用し、眼球運動信号の計測精度を吟味した。

方 法

被験者：大学生3名（男2名，女1名，年齢20～22歳）。

記録：脳波（EEG）、眼球運動（EOG）、筋電図（EMG）を同時記録する終夜睡眠PSGを実施した。EEGは時定数0.3秒で後頭部（O1）と中心部（C3）より、EOGは時定数6秒で左右眼窩外側縁部（E1とE2）よりそれぞれ基準電極法（乳様突起部を基準電極部位とする導出）で記録した。オトガイ筋電位のEMGは時定数0.01秒で双極導出した。入眠状態（20分）、レム睡眠（レム睡眠開始から強制覚醒までの期間）、および強制覚醒後の再入眠状態（20分）の記録を標準化周波数100Hz（ $\Delta t=10\text{ms}$ ）でAD変換した（MP100WS, BIOPAC System社）。

手続き：被験者一人あたり3夜(計9夜)のPSGを実施し、被験者がレム睡眠に達すると強制覚醒法により被験者を目覚めさせて夢見体験を聴取した。夢見の聴取は、レム睡眠(REMs出現あるいは筋電消失)と判定された時点より筋電図上にtwitchの出現を認めた後に、強制的に被験者を眠りから起こして実施した(強制覚醒法)。覚醒直前の夢見体験の有無と夢内容についての報告(所定の質問項目への回答と自由会話)を求めた。夢見聴取終了後、被験者に再入眠を許可し、PSGを再開した。本報告では眼球運動と夢見との関連性の分析は省略する。

資料整理：本報告は9夜の終夜睡眠記録から1夜(被験者MAの第2夜)を選び出し、自然入眠1例、再入眠3例および強制覚醒までのレム睡眠6例の資料を分析した。⁽¹⁾ AD変換によって得られた2チャンネルのEOG時系列を10秒毎の区画(500点, $\Delta t=20\text{ms}$)に分け、各区画に本研究の自動計測法を適用した。検出されたSEMsとREMsの波形の特徴抽出パラメータの計測値、出現時刻、出現区画および検出個数を集計し、入眠状態とレム睡眠との間で眼球運動の出現様式の異同を比較検討した。

処理過程

本計測法は同一のデータ時点においてREMsとSEMsの計測を平行して行うアルゴリズムを用いた。その主要な処理過程は、Fig. 1のブロックダイアグラムに示すように、EOG曲線の頂点(変化点)の検出、位相逆転の判定、偏位度の判定、アーチファクト処理、および波形の特徴抽出パラメータの判定より構成された。以下に、各処理の特徴を概要する。

EOG曲線の頂点の検出：2つのEOG電位時系列を対応する時刻で減算して差分時系列(双極導出のEOG時系列に相当)を求め、その差分時系列に移動式直線回帰分析(広重, 1999)を適用して回帰直線の傾きから頂点(変化点)を推定した。つまり、標準化時間($\Delta t=20\text{ms}$)の単位で時間長 k の窓を移動させながら、窓内に落ちる差分時系列 $\{y_i\}$ ($t=j, j+k-1$)に適合する回帰直線 g_j を接線の近似として最小自乗法により推定した。この回帰直線の傾きの逆正接の絶対値、つまり速度指数 $|\theta_j|$ をEOG曲線の頂点 j を検出する指標として用いた。速度指数は式(1)で与えた。ここで、 σ_{yz} はEOG電位 y と直交多項式の1次係数 z を独立変数とする回帰直線との共分散、 σ_z^2 は1次係数 z の分散である。窓の時間長(k)はSEMsについては400ms($k=20$)、REMsについては100ms($k=5$)を採用した。

$$|\theta_j| = \arctan(\sigma_{yz}/\sigma_z^2)_j \dots\dots\dots (1)$$

SEMsの頂点と立ち上がり点の検出基準はともに $|\theta| = 20\text{deg}/\Delta t$ に改めた。頂点の検出処理は $|\theta|$ が $20\text{deg}/\Delta t$ 以下となるデータ点より開始し、隣り合う $|\theta_j|$ と $|\theta_{j+1}|$ を逐次比較して $|\theta_{j+1}| > |\theta_j|$ となる時点 j を真の頂点と判定した。頂点間間隔の処理は先の計測法と同様に、600msより短い間隔で現れる後続の頂点を棄却した。REMsについては、短時間の速い変化に追従できるように修正を加え、 $|\theta| > 80\text{deg}/\Delta t$ となる時点 j を立ち上がり点、 $|\theta| \leq 80\text{deg}/\Delta t$ となる時点 j' ($> j$)を停留点とした。

脚注 (1) 2000年度教育学部卒業研究「レム睡眠と夢見に関する心理学的研究」(寺坂麻紀)において得られた資料の一部を分析した。

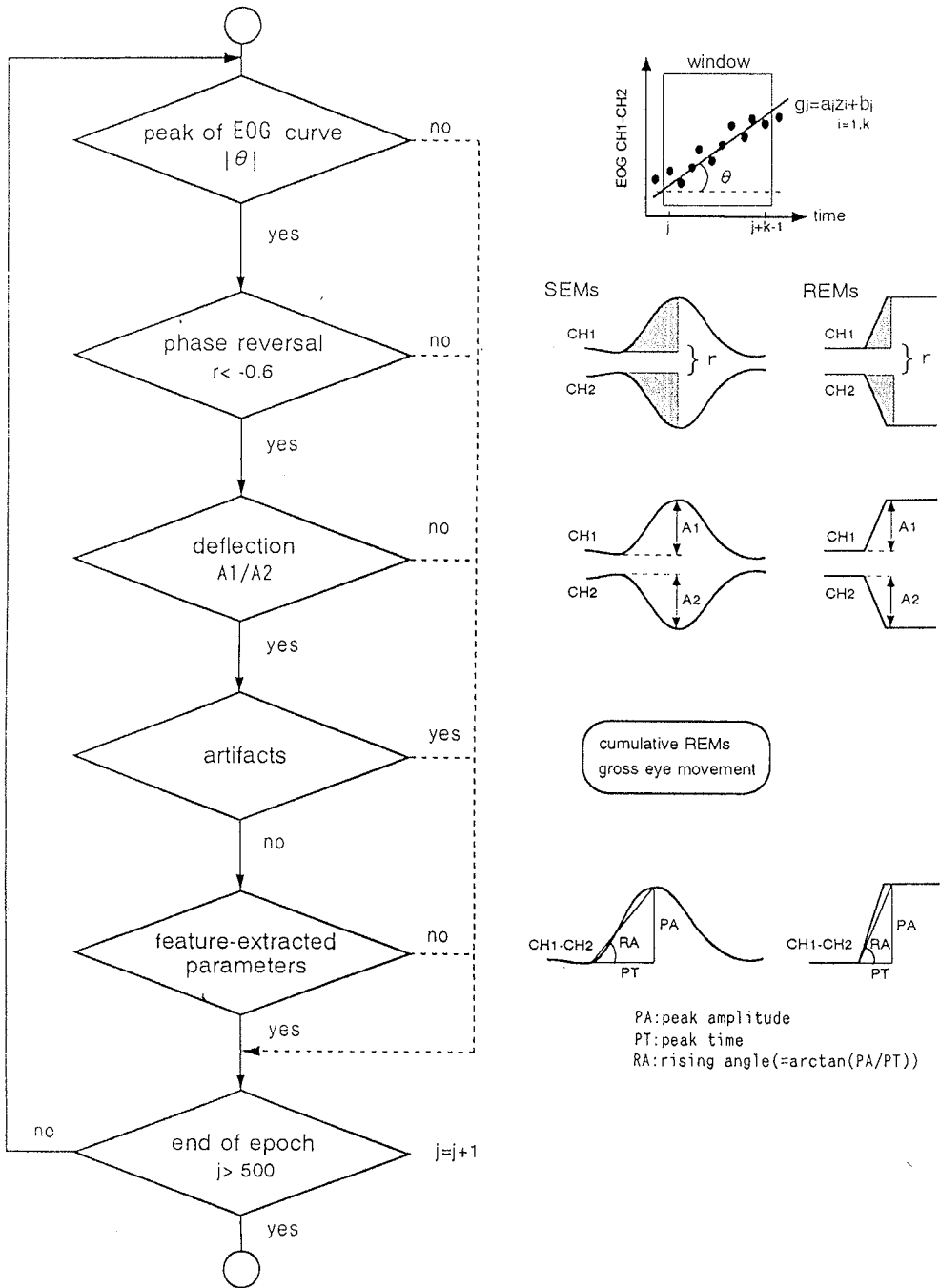


Fig.1 Flowchart of main processings of automatic detection of EOG signals.

位相逆転の判定: 眼球運動の信号波形は左右2チャンネルのEOG曲線の位相逆転として現れる。両眼球がほぼ同期して水平方向に回転する共役性眼球運動 (conjugate eye movement) を示すと、これにほぼ比例して左右眼窩外側部電極の角膜網膜電位が反転するため、基準電極法により導出した左右のEOG曲線は逆位相の振れを示す。これに対して、基準電極の不良、活性電極の不良あるいは装置に原因があるアーチファクトによる非信号性の波形はEOG曲線の同位相の振れか片一方のチャンネルのみの片振れとして現れる。EOG曲線の片振れを片眼性眼球運動の信号とする考えもあるが、その出現率はレム睡眠で4%程度と低く(福田,1981他)、活性電極部位に由来するアーチファクトの可能性も否定できない。本研究はこうした眼球運動の信号波形と非信号波形を識別するために、左右2チャンネルのEOG曲線の位相情報をピアソンの積率相関係数(r)を用いて定量的に評価した。相関係数計算のためのデータ長は固定長ではなく、眼球運動の立ち上がり点から頂点(SEMs)あるいは停留点(REMs)までの期間とした。位相逆転は相関係数 r が負の値をとるが、 $r < -0.60$ を信号波形の判定基準とした。この判定基準は、SEMsとREMsの検出率が r が-0.6以下に落ちると顕著に減少するという検出度数分布(r を-0.1のキザミで変化させて入眠状態とレム睡眠の資料より作成した分布)の特徴に基づいて経験的に定めた。

偏位度の判定: 相関係数 r はEOG曲線の位相関係(逆位相と同位相)の情報を提供するが、全分散による標準化処理が施されているため曲線の振れの大きさを評価することができない。そこで、左右のEOG曲線の偏位度を頂点振幅(図のA1とA2)を用いて2段階に分けて判定した。第1段階の判定は各チャンネルのEOG曲線が示す偏位がPAの基準値(SEMs:立ち上がり点と頂点間の電位, REMs:立ち上がり点と停留点間の電位)の45%以下となる場合、非信号性の偏位として破棄した。この第1段階を通過すると、次に2チャンネル間の頂点振幅比によって偏位度の等質性を判定した。その頂点振幅比が一定値 c を下回る($c \leq 0.2$)あるいは越える($c \geq 5$)とき等質性の低い偏位として破棄した。

アーチファクト処理: SEMsの誤検出を導く可能性が高いものとして、次の2種類のアーチファクトを経験的に定めた。①REMsの累積によるEOG曲線の偏位:跳躍的なREMsが積み重なるときEOG曲線は階段状に変化してSEM様の波形を示すことがある。この場合、SEMの頂点検出処理中に出現したREMsの頂点振幅(PA)の累積値がSEM様波形のPAの55%以上を占めるときSEMの信号処理を破棄した。②粗大眼球運動によるEOG曲線の偏位:粗大眼球運動は開閉眼に伴って生じやすい。その記録波形はREMsあるいはSEMsに類似しているが、高電位で比較的運動経過が長い。判定基準を $PA \geq 500 \mu V$, $500ms \leq$ 頂点時間 $PT \leq 800ms$ としてREMsおよびSEMsから区別した。粗大眼球運動を含む形でSEMの頂点が検出される場合は、SEMのPAの55%以上を粗大眼球運動が占めるときSEMの信号処理を破棄した。

特徴抽出パラメータの判定: 眼球運動の信号処理の最終段階である。個々のSEMsおよびREMsの頂点振幅(PA)、頂点時間(PT)および立ち上がり角度(RA)を判定した。RAは式 $\arctan(PA/PT)$ より求めた(広重,1999)。パラメータの判定基準は、SEMsについては $PA \geq 45 \mu V$, $PT \geq 500ms$, $RA \leq 20deg$ とした。REMsについては $PA \geq 40 \mu V$, $60ms \leq PT < 500ms$, $RA \geq 25deg$ とした。以上の基準を満たすSEMsとREMsの出現時刻を記録開始時点から検出時点までの経過時間として求めた。

先の自動計測法(広重,1999)は1区画毎に処理が完結する区画分離型処理を採用したため、信号性眼球運動が2つの区画にまたがって経過する場合にはその信号が見落とされるという弱点があった。そうした見落としを回避するために、本計測法はデータを半区画ずつ移動する半区画重複移動方式を導入した。つまり、先行区画の後半5秒と後続区画の前半5秒のデータを連結して信号処理

を行った。この方式によると先行区画で検出された信号が半区画重複移動後に再検出されることがあるので、検出処理完了後、出現時刻の一致を手が掛かりに重複信号を除去した。

結 果

EOG 信号処理例

本研究で考案した自動計測法による眼球運動信号の処理例を Fig.2 から Fig.6 に示す。各図は上段から左右 2 チャンルの EOG 曲線、SEMs と REMs の信号検出マーク (信号の持続時間を矩形波で表示) および速度指数 $|\theta|$ の時間変動曲線の順に描いた。速度指数の縦軸のスケールの表示は SEMs と REMs で逆転させた。SEMs の立ち上がり点と頂点の基準値 ($20\text{deg}/\Delta t$)、並びに REMs の検出開始点の基準値 ($50\text{deg}/\Delta t$) および立ち上がり点と停留点の基準値 ($80\text{deg}/\Delta t$) をそれぞれ実線の水平線で描いた。また、右欄の上段に SEMs、下段に REMs の特徴抽出パラメータの計測値を頂点振幅 (μV)、頂点時間 (ms)、立ち上がり角度 (deg) の順に示した。

Fig.2a に、入眠状態において出現する典型的な SEMs の原記録と自動計測を例示した。左右の EOG 曲線は位相が緩やかに逆転して正弦波様の律動的な変動を示した。これに自動計測法を適用した結果、5 つの逆位相パターンが SEMs として検出された。それぞれのパラメータ計測値 (右端上段の数値) は原記録の視察から得られる SEMs の印象を忠実に再現した。Fig.2b はレム睡眠の開始時に現れた SEM の原記録と自動計測の結果である。後述するように、レム睡眠期にも入眠状態と同様の SEMs の出現例を相当数認めた。本例の SEM は頂点時間 (5.5 秒) が非常に長く、頂点振幅 ($549\mu\text{V}$) もかなり大きな波形として計測された。

Fig.3 に、レム睡眠期における典型的な REMs 群発の原記録と自動計測を例示した。左右の EOG 曲線は位相が短時間で急速に逆転する矩形状あるいは階段状の波形が連続した。自動計測の結果、21 個の鋭角な位相逆転が REMs として順次検出された。原記録の視察印象をほぼ忠実に再現するパラメータ計測値 (表示の都合上、最初の 4 個を除く 17 個の REMs の計測値のみを表示) が得られた。SEMs の速度指数変動曲線上に付記した黒丸は SEMs の頂点検出処理をその時点で破棄したことを示しており、SEMs の誤検出が回避された。

REMs と SEMs はそれぞれが単独で出現するほかに、時間的に相前後して、あるいは重畳して出現するという複合的な出現様式をみせた。Fig.4a に、入眠状態における REMs と SEMs の複合的出現を例示した。本例の場合、SEMs の律動的な出現中に REM の混入を検出しており、その REM の検出によって SEM の頂点検出処理が破棄された (SEMs 速度指数変動曲線上の黒丸にて表示)。レム睡眠期にも REMs と SEMs の複合的出現が認められ、それは REMs に後続して出現する SEMs (Fig.4b) あるいは SEM に重畳する REMs (Fig.4c) として検出された。複合的出現様式を示す場合の REMs は群発時にもものに比べて立ち上がり角度が低くなる傾向がみられた。

非信号性眼球運動の処理は本計測法にとって重要な処理である。Fig.5 は、体動に伴って EOG 曲線に同位相の偏位が生じた記録例である。こうした緩やかな同位相の偏位は 1 チャンルの EOG 記録においては SEM として誤検出される可能性が高いが、本計測法ではピアソンの積率相関係数により非信号として処理された。Fig.6 に、もう 1 つの非信号性眼球運動である粗大眼球運動の検出結果を例示した (EOG 曲線上の▽印で指示)。本例はレム睡眠時に検出された粗大眼球運動で、その頂点時間は REMs より長く ($P T = 540\text{ms}$)、立ち上がり角度は REMs に類似して急峻であった ($R A = 45.8\text{deg}$)。一見すると 4 番目に検出された REM (▼印, $P A = 706\mu\text{V}$, $P T = 420\text{ms}$, $R A = 59.3\text{deg}$) によ

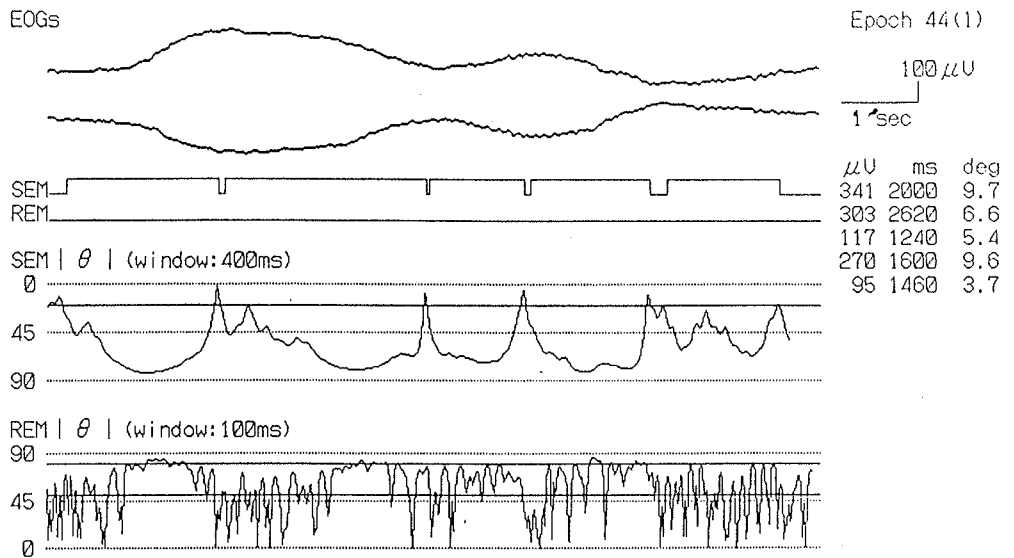


Fig.2a Detection of SEMs in hypnagogic state. From the top, EOGs: left and right eye movements, SEM: detection mark of SEMs, REM:detection mark of REMs, SEM| θ |: temporal change in velocity index of SEMs, and REM| θ |: temporal change in velocity index of REMs. The velocity index | θ |, given as the arctangent to the slope of a regression line computed for each moving window, works to detect the turning point of EOG curve. The detection mark drawn as a rectangle indicates the duration of EOG signals. Measurements of feature-extracted parameters (peak amplitude, peak time and rising angle) were listed on the right column in the order of detection of SEMs (upper) and REMs (lower) .

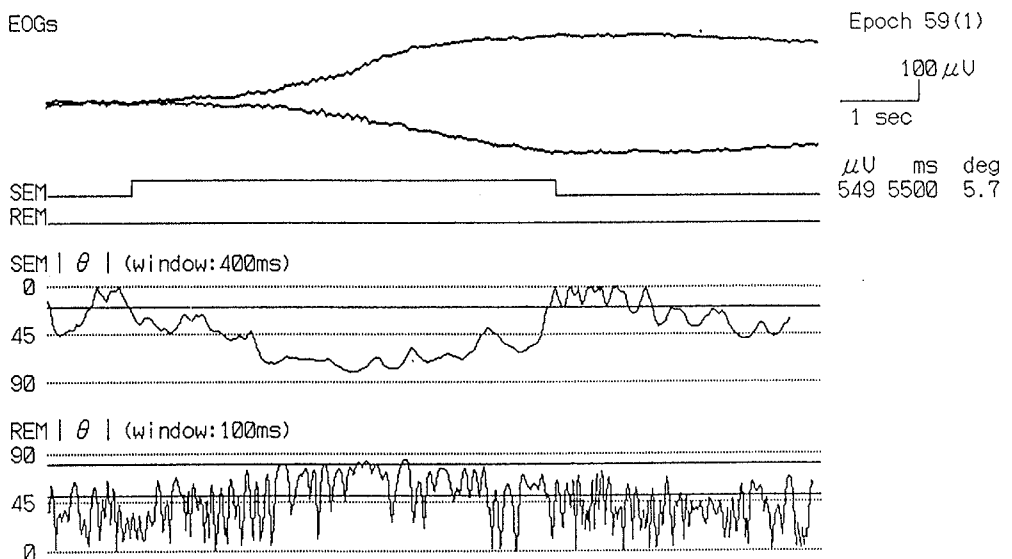


Fig.2b Detection of SEM in REM sleep.

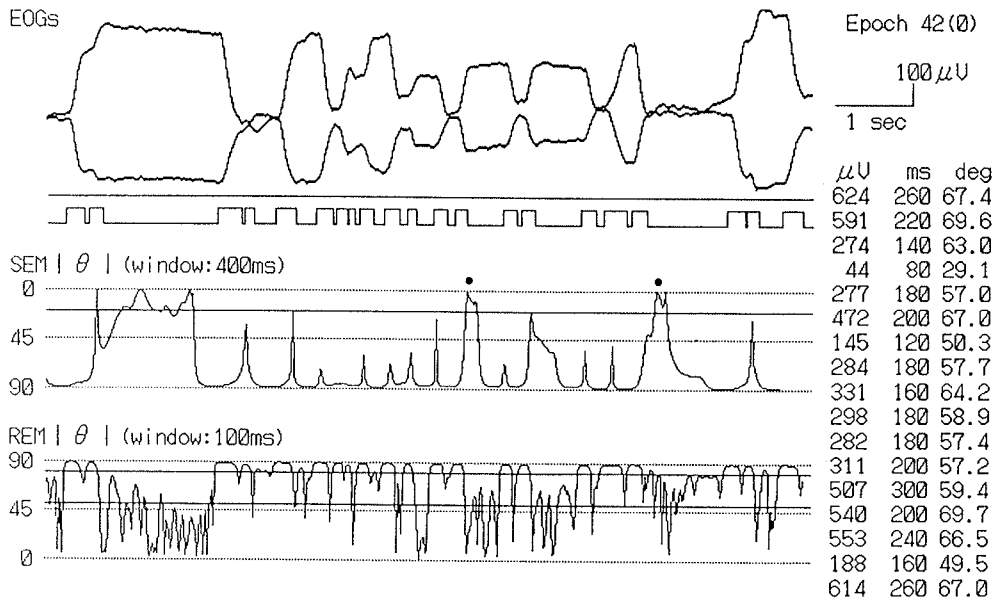


Fig.3 Detection of REMs in REM sleep.

く似ているが、立ち上がり角度がやや緩やかであった。こうした粗大眼球運動は視察では REMs として判定されるかもしれないが、波形の定量的計測によると REMs と SEMs の中間的な特性をもつことがわかる。

SEMs と REMs の特徴抽出パラメータ

Table 1 に、本計測法によって検出された SEMs, REMs および粗大眼球運動 (gross eye movements) の波形の特徴抽出パラメータの平均 (PA: 頂点振幅, PT: 頂点時間, RA: 立ち上がり角度), EOG 曲線の位相逆転の程度を示す相関係数 (r) の平均および検出総数 (n) を入眠状態とレム睡眠に分けて示した。SEMs は入眠状態 ($n=712$) において多数検出されたが、レム睡眠での検出数 ($n=599$) も決して少なくなかった。SEMs 波形の特徴抽出パラメータは入眠状態とレム睡眠の間で比較すると比較的良好な値を示しているが、レム睡眠では PT の延長傾向がみられた。REMs の検出数はレム睡眠 ($n=1184$) で圧倒的に多く、入眠状態 ($n=42$) の約 28 倍であった。REMs 波形の特徴抽出パラメータのうち PT は入眠状態とレム睡眠で共に 180ms 台でほぼ一致する値を示すが、PA の値がレム睡眠期で大きく、したがってレム睡眠期の REMs はより急峻な傾斜 (RA) を示す傾向があった。粗大眼球運動の検出数 ($n=13$) は少ないが、REMs が多発する睡眠後半のレム睡眠期に認められた。その波形は PA が $500 \mu\text{V}$ を越えて PT が 500ms より長い大型の運動であるが、REMs とほぼ同様に急峻な傾斜をみせた。相関係数 r はいずれの眼球運動においても高い負の値をとり、かつ分散も小さいことから、EOG 曲線の明瞭な位相逆転に基づいて信号性および非信号性眼球運動の計測が行われたことを示している。

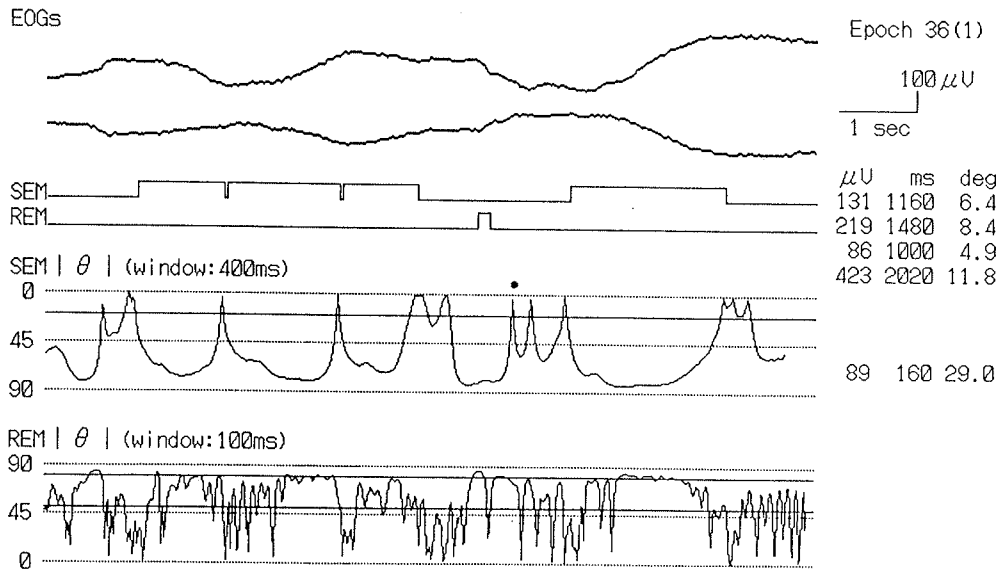


Fig.4a Detection of combined appearance of SEMs and REMs in hypnagogic state.

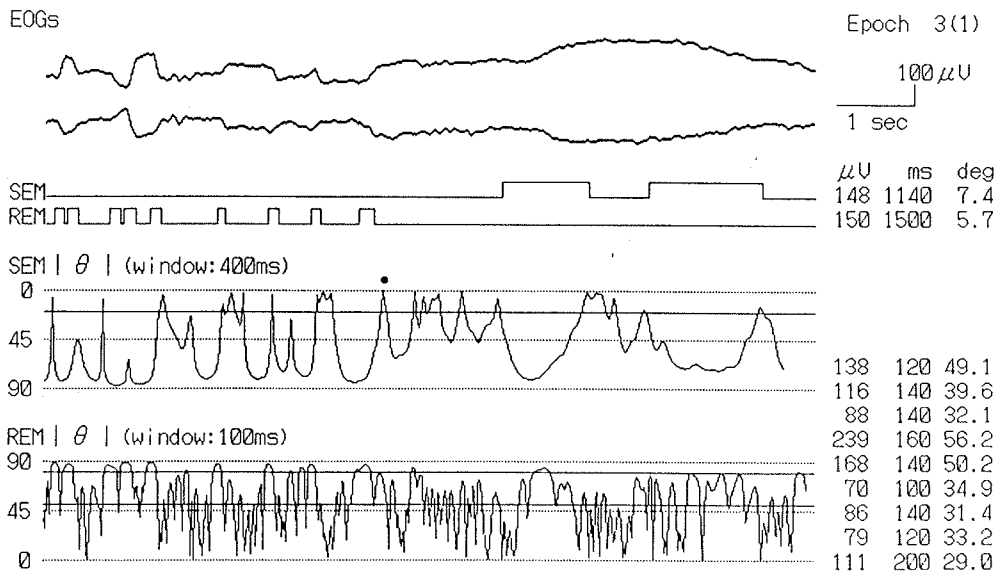


Fig.4b Detection of combined appearance of SEMs and REMs in REM sleep.

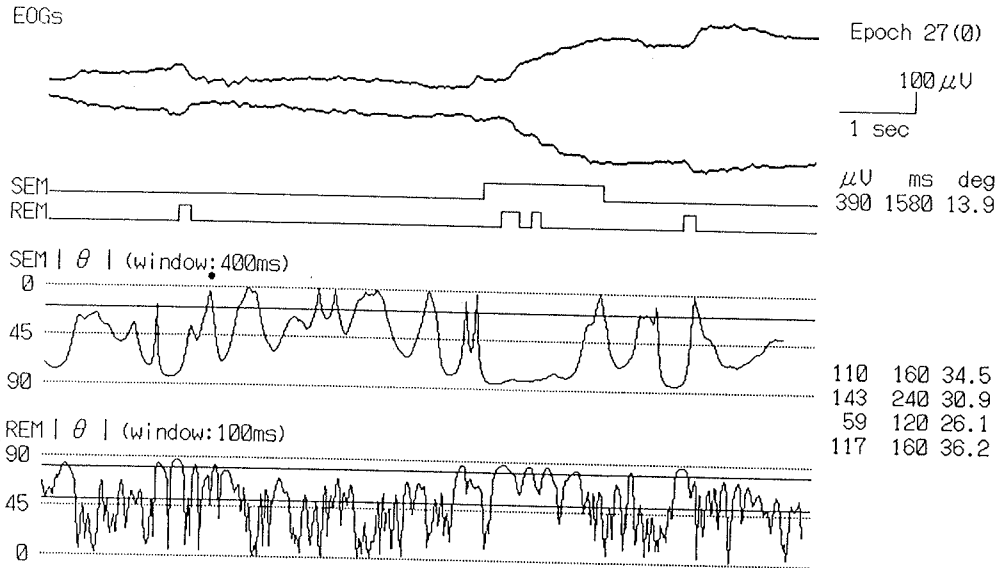


Fig.4c Detection of REMs superimposed on SEM in REM sleep.

SEMsとREMsの波形の類似性が入眠状態とレム睡眠においてどの程度維持されているのかを調べるために、特徴抽出パラメータ間でピアソンの積率相関係数を算出した。その結果をTable 2にまとめた。SEMsの波形は入眠状態とレム睡眠にほぼ共通する特徴があった。SEMsはPAがPTおよびRAと正に相関し、振幅が大きいものは経過時間が長く、傾斜が鋭くなる関係があった。RAとPTは負に相関したが、RAの計算式から予想されるさほど強いものではなかった。一方、REMsは入眠状態とレム睡眠で検出数が極端に異なっているものの、いずれの状態においてもPAがPTおよびRAと正に相関し、振幅が増大すると経過時間が長く、傾斜が一層鋭くなる関係があった。以上のように、SEMsとREMsの波形パラメータ間の関係（直線性）は睡眠状態の違いに関わらずほぼ維持されていることが判明した。

SEMsとREMsの出現様式

Table 3に、SEMsとREMsの検出区画率（括弧内に実数）を入眠状態とレム睡眠に分けて表示した。入眠状態はSEMs優位であった。SEMsの検出区画が全区画の半数以上（56.9%）を占め、残りの区画の大半は眼球運動を欠いた。REMsの検出区画は少ないが、その多くはSEMsの検出区画と一致した。レム睡眠は眼球運動の検出区画率（76.1%）が入眠状態に比較して2割近く増え、眼球運動優位の睡眠状態であった。SEMsあるいはREMsのみが単独で検出される区画（表中のSEMs onlyとREMs only）、両者が同時に検出される区画（SEMs and REMs）の割合は入眠状態と異なり、ほぼ均衡する傾向がみられた。しかし、REMsの検出区画率は予想に反して低い値であった。つまり、全検出区画の割合はSEMs（60.4%）がREMs（40.4%）を上回っており、単独検出区画率もSEMs

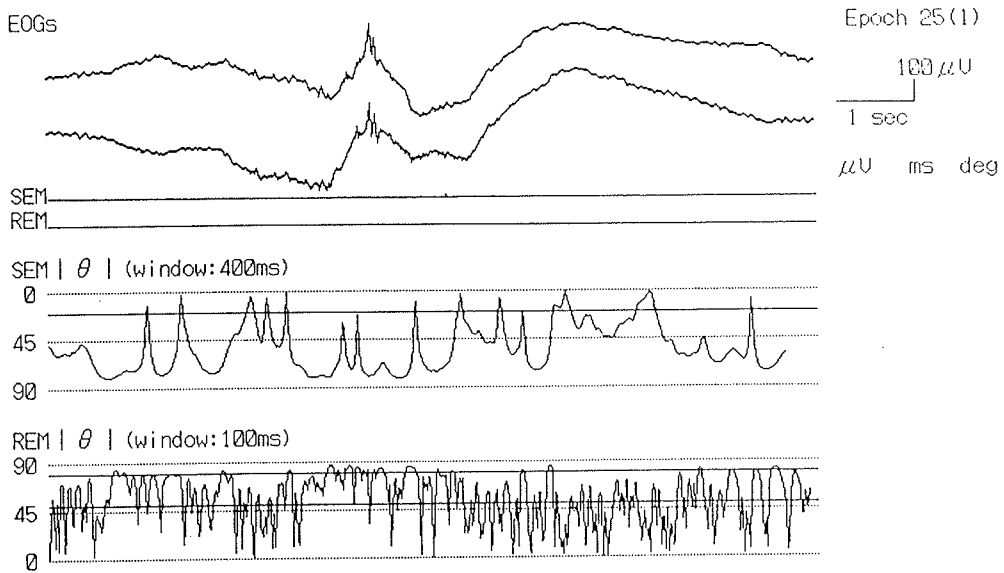
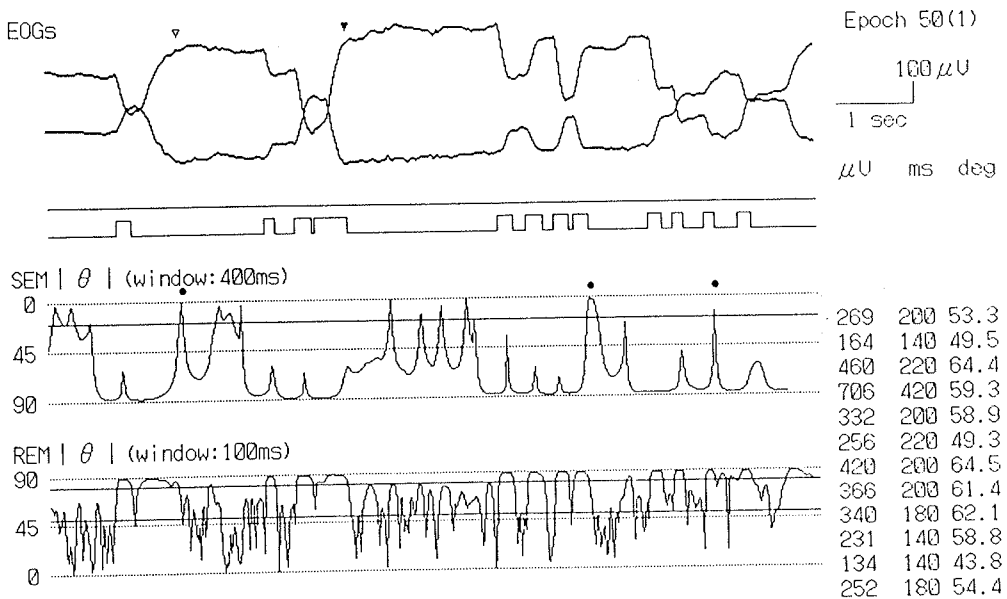


Fig.5 Artifact of a body motility. An in-phase deflection of two-channel EOGs was produced by a body movement, and it was rejected as a nonsignal.



* e1107rb

Fig.6 A gross eye movement and REMs. A gross eye movement with a peak amplitude of more than $500 \mu V$ and a peak time of more than 500ms (∇) looks similar to a large REM (\blacktriangledown).

Table 1 Means of feature-extracted parameters of slow eye movements, rapid eye movements, and gross eye movements during the hypnagogic state and REM sleep

	Hypnagogic state	REM sleep
Slow eye movements		
PA (μ V)	159.3 (88.08)	156.6 (96.83)
PT (ms)	1570.7 (636.30)	1619.7 (740.60)
RA(deg)	5.9 (2.40)	5.6 (2.37)
r	-0.86(0.10)	-0.87(0.10)
n	712	599
Rapid eye movements		
PA (μ V)	121.6 (69.16)	193.6 (141.16)
PT (ms)	183.8 (79.29)	185.0 (80.45)
RA(deg)	32.7 (6.90)	42.2 (11.24)
r	-0.89(0.10)	-0.96(0.05)
n	42	1184
Gross eye movements		
PA (μ V)	—	613.4 (71.21)
PT (ms)	—	593.8 (81.40)
RA(deg)	—	46.0 (5.07)
r	—	-0.97(0.08)
n	—	13

PA:peak amplitude, PT:peak time, RA:rising angle(edge slope), r: Pearson's product-moment correlation coefficient, n:the number of detected EOG signals. SDs are given in parentheses. The sign of a dash indicates no detection.

Table 2 Pearson's product-moment correlation coefficients between feature-extracted parameters of slow eye movements and rapid eye movements during the hypnagogic state and REM sleep

	Hypnagogic state	REM sleep
Slow eye movements		
PAXPT	.643	.664
PAXRA	.632	.612
PTXRA	-.448	-.437
n	712	599
Rapid eye movements		
PAXPT	.785	.758
PAXRA	.611	.795
PTXRA	.039	.320
n	42	1184

Table 3 Percentage of epochs with EOG signals (SEMs and/or REMs) and no eye movements during the hypnagogic state and REM sleep

	Hypnagogic state	REM sleep
Epochs with		
Slow eye movements only	52.7 (253)	35.7 (175)*
Rapid eye movements only	1.3 (6)	15.7 (77)
SEMs and REMs	4.2 (20)	24.7 (121)
No eye movements	41.9 (201)	23.9 (117)
Total epochs	100.0 (480)	100.0 (490)

* The real number of epochs is given in parentheses.

がREMsの2倍以上と多く現れた。REMsの単独検出区画率は、睡眠前半のレム睡眠で低く(8.5%)、睡眠後半のレム睡眠で高くなる(26.7%)傾向があった。以上、入眠状態の眼球運動はSEMsが優位であり、SEMsの消失は眼球運動の停止とほぼ同義であった。これに対し、レム睡眠の眼球運動はSEMsとREMsが共存する出現様式をみせ、REMsの出現は睡眠時間の関数として変化した。

最後に、本報告で分析した10例のデータファイルの処理時間を調べた。記録時間20分のデータファイルの分析に要した時間は最長347秒であった。各データファイルにおいて、開始区画から最終区画までに要した時間を全処理画面数(半区画移動も含むので区画数の2倍となる)で除した平均処理時間を求めた。平均処理時間は 1.44 ± 0.01 秒/画面であり、検出信号総数(最小44~最多504)の寡多に関わらず安定していた。

考 察

睡眠段階判定の国際基準は左右眼球から導出した2チャンネルEOG記録を標準とするPSGに基づいており、特にレム睡眠の判定には眼球運動(REMs)が不可欠の指標となる(Rechtschaffen & Kales, 1968)。近年、日本睡眠学会コンピュータ委員会(1999)は睡眠段階判定の国際基準について不確かさの問題があるとの認識から再検討を重ね、修正と補足を加えた判定マニュアル「学習用PSGチャート：睡眠ポリグラフ記録の判読法と解説」を発刊している。そのマニュアルの特徴の一つはSEMsの持続的な出現を段階1の判定基準に追加し、段階1判定の改善措置をとっている点である。SEMsを段階1判定の補完指標として明確に位置づけたことは従来の国際基準の曖昧さを是正する措置として特筆される。ただし、SEMsの記録波形の歪みの原因となる時定数の選択(広重, 1997)についてはなお不十分さを残している。SEMsについては、段階1の随伴現象としての扱いにとどまらず、覚醒から睡眠への移行を橋渡しする入眠状態を規定する生理指標として積極的に位置づける考え方(広重, 2001)からすれば、歪みの少ない記録波形が得られる時定数(6.0秒)が望ましい。いずれにせよ、レム睡眠および段階1の状態像さらには覚醒と睡眠との連続性など、睡眠状態の諸相を明確にする上で眼球運動が重要な生理指標であるという認識はより明確なものとなりつつある。

眼球運動の自動計測法の開発において左右2チャンネルのEOG曲線の位相関係を考慮することは、国際基準のPSGの判定の客観化、とりわけ判定が難しいとされる覚醒から段階1への移行過程(あるいは入眠状態)の判定改善に寄与するところが大きい。その意味で、Varriら(1996)が考案した

自動計測法は先駆的な性格をもつものとして位置づけられる。彼らの計測法は、まず FIR フィルタを用いて左右 2 チャンネルの EOG 曲線から 3 種類の眼球運動 (blinks, saccades, SEMs) を分離した後に、積率相関係数を乗数としてアーチファクトを除去し、振幅と経過時間の閾値に基づいて検出信号の最終的判定を行うという解析手順をとっており、2 チャンネル EOG 曲線の位相関係が相関係数によって数量的に評価できるとする点で特徴がある。しかし、Varri らの計測法にはいくつかの問題点もある。まず、相関係数は原理的には時系列の共分散と全分散積の比であるから、全分散がチャンネル間で大きく異なっている場合でもデータの変動傾向が類似ないし相似する関係にあれば強い相関を得るという不都合が生じる。事実、Varri らの報告は検出信号の視察判定との一致率が低く (SEMs : 48%, saccades : 62%), 視察で判定された SEMs の 38% は範疇化が困難な混合パターン (other eye movements) であると述べている。第 2 の問題は、移動式小型脳波記録器 (ambulatory cassette EEG recorder) への適用という実用性を意図しているためと推測されるが、眼球運動の記録に脳波と同じ 0.3 秒の時定数を使用している点である。0.3 秒という短時定数は SEMs の記録波形に著しく大きな歪みを与えることから、入眠状態の EOG には少なくとも 3 秒の時定数が必要であることが判明している (広重, 1997)。最後に、検出波形のパラメータ計測値が報告されていないため、信号波形の特性を他の研究成績と相互比較することが困難である。

本研究で開発した眼球運動の自動計測法は REMs と SEMs を同時に認識対象とするものであり、その主要な処理過程は移動式直線回帰分析 (広重, 1999) による EOG 曲線の変化点の検出、2 チャンネル EOG 曲線の位相関係と偏位度の判定、アーチファクト処理、波形の特徴抽出パラメータの判定および半区画重複移動処理から構成された。その結果、電極や体動に由来するアーチファクトあるいは脳波成分の混入 (同位相の振れと片振れ) を信号とする過誤や信号の見落としがなくなり、先の計測法 (広重, 1999) に比べて高い検出精度を得ることができた。加えて、その適用範囲が入眠状態に限定されず、レム睡眠にまで拡大できるという汎用性も確認された。さらに、6 秒という長時定数で増幅記録した 2 チャンネルの EOG 曲線から SEMs と REMs の両信号を同時に処理することができる点で、眼球運動の種類に応じて時定数を変えるという措置 (例えば、REMs に 0.3 秒、SEMs に 1.5 秒と異なる時定数による記録) を必要としないというメリットを備えていた。

本研究は終夜睡眠下で記録した EOG 記録にたいして信号性眼球運動の自動計測を試みた。その結果、昼間仮眠の成績 (広重, 1997, 1999) と同様に、夜間の入眠状態 (再入眠を含む) は SEMs が優勢な眼球運動であった。一方、レム睡眠期には REMs が多数検出されたが、レム睡眠の出現時刻によって REMs の出現様態が異なるという時間効果とともに、REMs と SEMs の複合的な出現様式を認めた。特徴抽出パラメータ間の相関関係は入眠状態とレム睡眠のいずれにおいても同様であり、信号波形の特徴が睡眠状態の差によって大きく変化することはなかった。SEMs と REMs はいずれも頂点振幅が増大すると頂点時間が延長して立ち上がり角度が大きくなるという正の相関関係があった。SEMs の結果は昼間仮眠時の成績 (広重, 1999) と基本的に一致した。

レム睡眠期に SEMs の出現を認めるとする知見はこれまでも散見される (Jacobs et al., 1971 ; 福田, 1985)。それらは直流 (DC) 増幅の EOG 記録の視察判定に基づく報告であるが、SEMs はレム睡眠の初期に現れやすく、レム睡眠期の全眼球運動の 2 割程度を占めるとされている。従来知見 (時定数無限大) と本研究結果 (時定数 6 秒) を考え併せると、レム睡眠期の眼球運動を REMs の相動的出現 (REMs の活動と沈静の交替) とする特徴づけは短時定数の低域周波数遮断効果によるものであって、レム睡眠期の眼球運動の実像を十分にとらえたものではないと考えられる。本研究の成績からみて、REMs と SEMs の共存あるいは複合的出現様式がレム睡眠期の眼球運動の基本

的な特徴であると考えられる。こうした考え方をさらに進めると、レム睡眠期の心理的特徴である夢見と眼球運動との関係について従来の走査仮説 (Dement, 1965) とは異なる視点から再検討する可能性が提供できるかもしれない。Dementの走査仮説は夢見の視覚心像をREMsが追隨するというものであるが、その評価は賛否両論に分かれている。レム睡眠期におけるREMsとSEMの複合的出現様式の一般性を確かめるには本計測法による分析例を増やす必要がある。

引用文献

- Aserinsky, E., & Kleitman, N. 1953 Regularly occurring periods of eye motility, and concomitant phenomena during sleep. *Science*, 118, 273 - 274.
- Dement, W.C. 1965 Perception during sleep. In P.H.Hock & J.Zubin (Eds.), *Psychopathology of Perception*. New York: Grunw and Stratton. Pp.257 - 270.
- 福田敏雅 1985 睡眠時眼球運動に関する研究 第1報: 正常者REM期眼球運動の分析. *日眼会誌*, 85, 50-56.
- 広重佳治 2001 入眠状態に関する生理心理学的研究. 博士論文 (筑波大学), 未刊行.
- 広重佳治 1999 入眠期眼球運動の自動検出. *脳波と筋電図*, 27, 421 - 432.
- 広重佳治 1997 入眠期緩徐眼球運動の眼電図記録における最適時定数. *脳波と筋電図*, 25, 385 - 392.
- Jacobs, L., Feldan, M., & Bender, M.B. 1971 Eye movements during sleep. I: The pattern in the normal human. *Archives of Neurology*, 25, 151 - 159.
- 日本睡眠学会コンピュータ委員会 1999 学習用PSGチャート: 睡眠ポリグラフ記録の判読法と解説. 日本睡眠学会, 東京.
- Rechtschaffen, A. & Kales, A. 1968 A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects. Washington, D.C.: Public Health Service, U.S. Government Printing Office.
- 篠 秀明・八名和夫 1999 入眠期における緩徐眼球運動パターンの検出アルゴリズム. *電子情報通信学会論文誌*, J82-D-II, 1339 - 1344.
- 菅野久信・稲永和豊 1972 眼球運動と意識状態. *臨床脳波*, 14, 169 - 171.
- 鈴木博之・森口和彦・松浦雅人・小島卓也・広重佳治・松田哲也・野田雄二 2000 異なるアルゴリズムによる閉瞼時眼球運動定量分析法の比較. *臨床神経生理学*, 28, 116.
- Varri, A, Hirvonen, K., Hakkinen, V., Hasan, J., & Loula, P. 1996 Nonlinear eye movement detection method for drowsiness. *International Journal of Bio-Medical Computing*, 43, 227 - 242.

Abstract

Automatic measurement of eye movements in hypnagogic state and REM sleep

HIROSHIGE Yoshiharu

This study presented a revised method to automatically detect and measure rapid eye movements (REMs) and slow eye movements (SEMs) in sleep. The method was based on the application of a moving linear regression analysis to detection of the peak or trough of EOG curve (Hiroshige, 1999), the evaluation of phase reversal of two (right and left)-channel EOGs and the processing of artifacts. The standard polysomnographic recording (Rechtschaffen & Kales, 1968) was made three nights for each of three adult volunteers with their consents to the purpose and procedure of the present experiment. EOGs were recorded monopolarly with a time constant of 6s, and AD converted data (EOG time series) during the hypnagogic state and REM sleep were obtained with a sampling frequency of 100Hz and analyzed consecutively every 10s.

The results indicate that the method performed well in detecting REMs and SEMs. High correlations (linearity) were found among three feature-extracted parameters of SEMs and REMs, respectively. SEMs were dominant in the hypnagogic state, whereas in REM sleep were found complex (single, combined and superimposed) forms of appearance of REMs and SEMs. The possibilities were discussed for the present method to investigate dynamics of eye movements during sleep.