

睡眠・覚醒推定と活動量評価

白水重憲

1. 睡眠研究の思い出

体動測定により睡眠・覚醒推定を行う腕時計型の「アクティグラフ」は、睡眠研究の世界で定評ある装置として広く使われている。しかし、この装置を最初に知人から紹介された時、私はその能力に関して懐疑的であった。「エッ、体動から睡眠が判るの？」

当時私は、ポリグラフを使用して脳波・眼球運動・筋電図を測定する正統派の睡眠研究に携わっていた。睡眠ステージは、脳波によって判定される。覚醒時には、“ α 波”と呼ばれる10 Hz前後の波や“ β 波”と呼ばれる周波数14～30 Hzの波が主流である。浅い睡眠である「ステージI」に入ると、 α 波が減少（消失）し、4～7 Hzの“シータ波（ θ 波）”がみられる。「ステージII」になると、12～14 Hz前後で特徴的な波形の“睡眠紡錘波”が出現する。更に「ステージIII」では“デルタ波（ δ 波）”と呼ばれる0.5～3.5 Hzぐらいで高振幅の徐波が主流（20～50%）になり、「ステージIV」ではこのデルタ波が50%以上となる。

脳波を測定する脳波計はペンレコーダーで結果を描くものと決まっていた。30秒間で1頁を描く。夜も更けていき、静かな部屋で、ペンレコーダーの紙を送る音だけがしている。ところが、「REM睡眠」に入ると状況が一変する。激しい眼球運動に伴い、対応するチャンネルのペンが激しく動く。上端から下端まで、或はその逆に。ペンの動く音、きしむ音がする。

ペンレコーダー用紙が破れたり、つまったりしない様、或いは被験者の体動により剥がれかけた電極を元に戻す為に、一晚中眠らずに監視する必要がある。と

ころが、大学等の研究室では、被験者の為の室内環境は勿論整えられているが、監視者のものは何もない。寒くて眠い夜が続く。そして、夜が明け、被験者が覚醒して測定を終了させると、分厚く重い記録結果が1冊できる。

最初の晩は測定に被験者を慣らすのが目的であり、この時の測定結果は通常データにしない。2日目が「条件A」、3日目が「条件B」と1被験者に対して最低3晩は測定しなければならない。

近年では、測定結果はデジタル化されて電子データとしても記録できる。測定結果を自動解析して、睡眠ステージを判定するアルゴリズムも鋭意研究されている。しかしながら、十分に実用で使えるものは、まだない。時々睡眠に関する学会に睡眠状態を解析する新しいアルゴリズムが発表され、少しの間は騒がれるが、1年間使用されたものは無い。従って、睡眠ステージ判定は、熟練した専門家が目視で判定する事になり、紙への出力が必要であった。

師匠が睡眠時脳波の記録結果を1頁1頁チェックしながら、“243頁ステージI”というように判定される。それを弟子が横で記録する。の記録を整理して、睡眠ステージチャートを描く訳である。私の師匠の菅野久信先生が、柑橘系の香りを被験者に嗅がせるとレム睡眠の期間が長くなることを発見されるのをお手伝いした時の話である。（香りと睡眠、アロマセラピー学雑誌 Vol. 4, 平成16年3月）

人間が覚醒していれば体動等の生活活性が大きく、睡眠していれば小さい。この生体活性“アクティグラフ”による睡眠・覚醒判定に関する研究は米国で始まった。最初の研究は1972年に出版された。（データの名前であるアクティグラフをそのまま装置名にしてい

る為、混乱を防ぐために、装置名の場合は「アクティグラフ」と記す。）

2. 「アクティグラフ」の歴史

現在、広く使用されている「アクティグラフ」の装置と睡眠・覚醒判定のプログラムは、元来別々のグループで研究されていた。

1977年に、アクティグラフにより本格的な睡眠・覚醒判定を目指した研究の最初の報告が行われた。彼らは、トランスデューサから装置を自作した。

トランスデューサは、バネ状材質である脳波計のペンの清掃用ワイヤーを長さ5mmに切り出し、一端に小さな鉄製のナットを半田付けし、他の一端をピエゾセラミック素子に固定する事で作製された。ナットの錘が不安定な状態で固定されているので、このトランスデューサがどの方向に動かされても、錘は大きく動き、ワイヤーを通してピエゾセラミック素子に伝わる。ピエゾセラミック素子は刺激され、電圧を発生する。このトランスデューサは時計バンドに取り付けられた小さなアクリルの箱に固定され、テープレコーダーに接続された。信号電圧は時間データとともに24時間に亘って、カセットテープに記録された。データはポリグラフで再生され、チャート紙に出力され、目視で睡眠・覚醒が判定された。

5名の被験者で、この装置による測定と従来法（脳波、筋電図、眼球運動の測定）による睡眠測定が同時に行われ、相互に参照する事無く、それぞれのデータより睡眠・覚醒が推測された。従来法による結果と比較した結果、アクティグラフ法は睡眠区間、睡眠時間、睡眠区間中の覚醒時間が信頼できる事が明らかにされた。(Kripke DF 他, Wrist actigraphic measures of sleep and rhythms. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* Vol. 44, 674-676, 1978.)

米国でこのような研究が行われた背景には、米陸軍の要望があったようである。米陸軍に提出された報告には、以下の様な背景が記されていた。

当時、睡眠の損失と戦闘における疲労は、以下の3点により、米陸軍の大きな問題となりつつあった。

- 1) スマートな兵器や車両や無線通信やレーダーを操作する兵士にとって意識の断絶は致命的である。
- 2) 戦争はますます短時間に集中したものになり、兵士の睡眠時間は短く不規則なものになる。
- 3) 米国の軍団は、世界の遠く離れた所へ空輸された

直後に戦闘に入らなければならない。時差の影響を小さくする方法の開発が必要である。

実際的な条件での軍団の運用的パフォーマンスにおける睡眠損失、睡眠スケジュール変化、時差の影響を評価するには、コストパフォーマンスに優れ、信頼性のある睡眠覚醒判定の実用的な手法が必要であった。

この目的の為には、従来法は全く非実用的であった為、アクティグラフ法による評価装置の開発が進められた。1980年には、比較された睡眠データ対は102にのほり、94.5%の一致性が認められた。(Mullaney DJ 他, Wrist-Actigraphic Estimation of Sleep Time, *Sleep*, 3, 83-92, 1980.)

1982年になるとAD変換装置を使用して、測定結果をコンピュータに取り込み、睡眠・覚醒を自動判定しようという試みが報告されている。

2秒をエポック（単位時間）として、2秒間のデータを積算し、それをその「エポック値」とする。次に、睡眠・覚醒を判定する時間単位を1分間とし、各1分間のデータを30個のエポック値の最大のもので代表する。着目する1分間の睡眠・覚醒を判定するパラメータは、その前の4分間とその後の2分間の計7分間の代表値に重みをつけた合計として計算される。

この睡眠・覚醒を判定するパラメータの値は、定法による睡眠・覚醒をベストフィットするように定めたが、睡眠時間の一致性は94.46%であった。パラメータを定めたものではない新データの場合には、この一致性は96.02%に達した。

上記の結果を受けて、アクティグラフの収集と記録を行うマイクロコンピュータベースの小型デジタル活性モニターが開発された。大きさは15×9×5.5cm、重さ480gであった。データは測定終了後、マイクロコンピュータへ転送して解析された。(Webster JB 他, An Activity-Based Sleep Monitor System for Ambulatory Use, *Sleep*, 5, 389-399, 1982.)

現在の腕時計型の「アクティグラフ」に連なる装置の最初のもは、1976年に報告された。こちらのグループの加速度センサーは一端を固定し、一端を自由端としたピエゾセラミック素子の複合体である。この素子は、加速度を受けるとたわみ、その自由端はたわみに比例した電圧を発生した。この電圧は、閾値を超えた場合に、記録された。

1985年には第二世代の装置が発表された。測定された身体活性のうち、2Hz以上のものは振動的なア

ーチファクト（例えば電動芝刈り機の振動が伝わっている）として除かれた。一方、0.25 Hz以下の周波数は電氣的なベースラインの動揺によるノイズとして除去された。活性感度の閾値は0.05 gから0.10 gであった。

曲げ要素センサーの体動（アクティグラフ）へのレスポンスは±に振れる振動性のデータになるが、この定量化法としてはピークとピーク間の0レベルを通過する回数をカウントする方法（「ゼロクロスモード」と称した）と、閾値を超える活性が検出された際に、閾値を越えていた時間をカウントする方法（「閾値モード」と称した）が考案された。なお閾値を越えていた時間は10 Hzのカウンターを使用してカウントされた。

この装置は、「プレジジョンコントロールデザイン」という会社で幾つかの改良が行われた後、A. M. I.社より商品名「モーションロガー」が出された。この半導体加速度センサーベースの装置は65 × 91 × 20 mmの大きさで、90 gであった。ナイロン性のマジックテープの腕輪で、手首や足首に固定する他、腰に装着する事もできた。プログラムによりゼロクロスモード、或いは閾値モードの双方で動作させる事ができた。

「モーションロガー」では、睡眠・覚醒の判定を行う時間単位は1秒から99分59秒までの範囲でセレクトできる。時間単位を1分間とした場合8日間の測定が可能である。被験者は、付属のボタンを押して、イベントの発生を記録する事ができた。MS-DOSで動くIBM互換機のシリアルポートに接続して、プログラムしたり、データをダウンロードする事ができた。

この「モーションロガー」は、米国陸軍で野戦歩兵部隊を被験者として使用した睡眠に関する大規模な基礎研究に使用された。

1992年に、自分達のオリジナルの装置で手首のアクティグラフィーによる睡眠・覚醒判定の研究を行ってきた最初のグループが、このモーションロガーでも同様の判定が可能である事を発表し、モーションロガーの測定データ用の睡眠・覚醒自動判別推定ソフトを公開した。論文の第一著者の名前をとって、「Cole博士等による睡眠・覚醒自動判別推定ソフト」と呼ばれる。こうして、装置としてのアクティグラフ開発と腕のアクティグラフィーによる睡眠・覚醒判定の研究の歩みがここで一つになる。この後、評価の確立した

“簡易睡眠・覚醒判定機器”としての地位を確立して行く事になった。（Cole RJ 他， Automatic Sleep/Wake Identification From Wrist Activity, Sleep, 15, 461-469, 1992.）

現在では、更に進化したバージョンが「アクティグラフ」という名前で発売されている。多数の病院や研究機関で使用され、さらに睡眠の専門誌『Sleep』にも、この「アクティグラフ」のみを評価装置とした論文が多数掲載されている。また、類似の装置も市販されるようになった。

3. 活動量評価の状況

「万歩計の精度はあてにならない。」という不満を感じるのは日本人だけでは無い様である。米国のテネシー大学のグループは、10種類の万歩計を比較・評価した論文を2003年から2005年にかけて数報出している。彼らは、10種類の万歩計を、まずトレッドミルでの歩行で比較し、次に400 m歩かせて比較し、結果を2つの論文としてまとめた。表1の性能比較表は、これらの論文に記載されている結果を基に筆者が作成したものである。ここに、“方法”の「加速度」は“加速度センサー”を使用するものである。「機械スイッチ」と「磁場トリガー」の2つは、いずれもスプリングで支持された水平のバーを使用しているものである。このバーが装着部位である臀部の垂直加速度に反応して、上下に動くようになっている。「機械式スイッチ」の場合はこのバーの動きが電子回路をON・OFFする。一方「磁場トリガー」の場合には、このバーに磁石が取り付けられており、バーの上下により磁場が変動するのをセンサーが検出してカウントする。

表1中の「EE」は“消費エネルギー”が算出されるかどうかを示している。これらの万歩計の多くは、“歩数”の他に、“距離”と“消費エネルギー”を測定し、表示できる。彼らの最初の実験は、歩行速度を変化させて、歩行速度依存性をみる為にトレッドミルを使用しているので、真の距離と歩数の情報を得る事ができる。消費エネルギーは別に測定している。

これらの中では「Yamax SW-701」が一番優秀であり、次が「Lifecorder」という事は意見が一致している。テネシー大学のグループは「NL-2000」もLifecorder並みに優れていると記述しているが、筆者は他のものと同等と判断している。「オムロン」の製

表1 10種類の万歩計の性能比較

メーカー	製品名	方法	価格	製造国	トレッドミル			400 m		
					歩数	距離	EE	歩数	距離	個体差
Freestyle	Pacer Pro	機械スイッチ	\$ 20	中国	○	○	○	△	×	△
Kenz/スズケン	Lifecorder	加速度	\$ 200	日本	○	無し	◎	○	無し	○
New Lifestyles	NL-2000	加速度	\$ 50	日本	△	無し	×	○	無し	○
オムロン	HJ-105	磁場トリガー	\$ 27	中国	○	△	△	×	×	○
Oregon Scientific	PE316CA	磁場トリガー	\$ 20	中国	×	×	×	×	×	△
Sportline	330	機械スイッチ	\$ 13	台湾	○	無し	無し	×	無し	×
Sportline	345	機械スイッチ	\$ 30	台湾	△	△	○	△	△	×
Walk4Lite	LS 2525	機械スイッチ	\$ 29	台湾	△	△	×	△	×	×
Yamax	Skeleton	磁場トリガー	\$ 15	日本	△	無し	無し	△	無し	△
Yamax	SW-701	機械スイッチ	\$ 30	日本	◎	△	○	○	×	○

文献は, S.E.Crouter他: Med Sci Sports Exerc. (2003), 35, 1455-1460ならびに
P.L.Schneider他: Med Sci Sports Exerc. (2003), 35, 1779-1784.

表2 論文に良く登場する加速度データロガー

商品名	メーカー	サイズ (mm)	重さ	装着部位	サンプリング 周波数	軸数	加速度範囲
Lifecorder	Kenz/スズケン	62.5×46.5×26	40 g	腰	32 Hz	1軸	0~1.94 G
Activtracer AC300	GMS	77×51×15	87 g	腰	100 Hz	3軸	0~4 G
CSA monitor 注1	CSA	50×40×15	43 g	臀部の上		1軸	
Tritrac monitor	Reining	111×67×32	170 g	臀部の上		3軸	
Physilog system	BioAGM	注2		臀部の上	40 Hz	3軸	±5 g

注1: Actigraph ともいう。注2: センサーはベルトにマウント。データロガーは130×68×30 mm, 285 g

品は日本製と思っていたが、彼らの区別では中国製となっている。“加速度センサー”を用いたものよりも、“機械スイッチ”方式の方が性能が良いのは面白い。

この研究グループは1996年にも5種の万歩計を使用して同様の検討を行ったが、2003年にはどれも入手できなかったとの事である。また、2004年には更に3種類増やして被験者が自由に生活する状況で性能比較を行っているが、“上位機種”は表1の検討の場合と変わっていない。一方、“機械スイッチ”式の「SW-701」に対して、“加速度”方式の「NL-2000」が劣るという結果は気に入らなかった様で、2005年には“体重超過ぎみ”或いは“肥満”した被験者には「NL-2000」の方が精度が高いという事を報告している。また、この中で、“機械スイッチ”方式は、傾けて装着してしまうと誤差が多くなるが、加速度センサー一式はその心配が無いという事を記載している。これらは全て、『Med Sci Sports Exerc.』誌に投稿されている。

このグループのもの以外にも、万歩計の相互比較の

論文は多々ある。

さて万歩計より上のグレードである“加速度データロガー”に関して、論文に良く登場するものを表2に集めた。「Lifecorder」は2分毎に1~9までの加速度レベルを出力するのみであるが、その他のものは定められた時間範囲での加速度、ならびに加速度の成分の平均値を出力する。これらの出力に関しては、酸素消費量、消費エネルギーとの関係が報告されている。

「Physilog system」を使用した場合については、平坦な水平面を歩行する際の出力値と酸素消費量との関係のみでなく、いくつかの斜度の斜面を歩行する際の関係も報告されている。また、「CSA monitor」や「Tritrac monitor」に関しては、ゴルフ、窓ふき、ごみ捨て、掃除機かけ、芝刈り等の活動の酸素消費量との同時測定結果も報告されている。

変わり種としては、200gのデータロガーに有線で接続された5個の小型2軸加速度(16×14×4mm, 2g)センサーからなる「IDEAA」という装置がある。姿勢の変化も測定できる為に、測定結果から日常生活

行動の種類を推定する事が可能である。“サンプリング周波数”は32 Hzであり、5個の加速度センサーの同時刻サンプリングができる。『Gait & Posture』誌に、この装置を歩行解析に使用した例が報告されているが、サンプリング周波数32 Hzではサンプリング間隔が大き過ぎる感じを受ける。

4. パラダイムの転換

これまで紹介したように、ヒトの活動量を評価するこれまでの装置の結果を出力する時間間隔は1秒以上の長いものであるが、人の歩行やその他の身体運動等の速い速度の動きを連続的に追跡する為に、1秒間に32回程度の加速度測定を繰り返し、これらの平均値等を出力している。これが、ヒトの活動量を評価しようとする世界の常識であった。

ところが、我々はこの常識に従わず、出力が10秒間隔ならば、サンプリングも10秒間隔とし、その間装置を眠らせて省電力化するというパラダイムの転換を行った。他の装置と比較すると、我々の装置が並はずれて超小型化、軽量化した上に省電力化もできた背景にはこの常識への挑戦もあった。我々の最初のモデルは、直径26 mm、厚さ7 mm、重さ5.8 g。この小型で軽量化の試みにより、要介護高齢者の24時間の生活行動調査や、更には幼児の1週間に亘る調査が可能となった。

この為、測定されたデータの性状は、他のシステムとは大きく異なる。例えば、ヒトの歩行の周波数は2 Hz程度である。この歩行時の加速度を128 Hzでサンプリングすると歩行の特徴が良く分かる。段々、サンプリング間隔を大きくすると特徴が判りにくくなるが、8 Hz程度でも歩行速度や歩行の特徴をとらえる事はできる。ところが、サンプリング間隔が2 Hzに対応する0.5秒以上になると歩行である事が判らなくなる。間隔が10秒になると連続して測定した加速度の値の前後のつながりが判らなくなり、“ある時は大きな値が、その次は小さな値が”と測定される値がサイコロを振って決めたように出鱈目に変動する。

データ解析に当たっては、1分間を単位時間とし、最大値と最小値の差として“変動成分”、1分間の平均値として“静的成分”を求めた。“静的成分”より、「姿勢変化」を求め、“動的成分”より「睡眠・覚醒判定」や、「活動量評価」を行った。「睡眠・覚醒の判定」結果や「睡眠時の姿勢変動挙動」は、専門的な睡眠評

価機関での評価と良く一致した。「活動量」は、「Lifecorder」の結果と良く一致した。

5. 要介護高齢者の日常生活行動を調査した例

(筆者らが「第42回日本理学療法学会」(平成19年5月)にて報告)

ある施設でリハビリテーションサービスを受けている62名の高齢者(男性14名、女性48名)に協力して頂き、日常生活行動を調査した。このうち、36名はデイケアサービスを受けており(通所利用者、以下「グループI」と略称す)、26名は入所している(入所利用者、以下「グループII」と略称す)。この調査の参加者の平均年齢は、男性が79.6歳、女性が87.0歳であった。介護を必要としない(レベル0, I-0, II-0)、部分的な介護が必要(レベル1, I-1, II-1)、中程度の介護が必要(レベル2, I-2, II-2)、高レベルの介護が必要(レベル3, I-3, II-3)、最高レベルの介護が必要(レベル4, I-4, II-4)に分けた。コントロール群として、我々は若い日本人男性のデータを使用した。(36名、平均年齢22.8歳)

我々の装置を左右胸部、左右大腿部中央、左右前腕部に装着し、24時間の測定を行った。

睡眠時間の中央値(四分位範囲)は、それぞれ、I-0で480分(340~579分)、I-1で498分(394~563分)、I-2で480分(271~563分)、II-1で47分(400~551分)、II-2で571分(348~618分)、そしてII-3で506分(294~651分)であった。コントロール430分(326~508分)と比較すると、各グループの睡眠時間は長かったが、グループ間の差異は有意ではなかった。

入所高齢者の、覚醒時の臥位の時間はコントロール群に対して有意に長かった。[II-1:451分(186~521分)、II-2:388分(182~551分)及びII-3:413分(172~571分)に対して、コントロール95分(59~229分)]。

対照的に、入所高齢者の、覚醒時における立位の時間はコントロール群と比べ有意に短かった。[II-1:121分(38~164分)、II-2:51分(4~117分)及びII-3:8分(0~352分)に対して、コントロール308分(248~364分)]。

「活動レベル」を1(最小)から4(最大)に分割して、それぞれの時間を求めた。グループII-2とII-3が「活動レベル1」であった全時間はコントロール群と

比べ有意に短かった。[II-2: 51分 (3~112分) と II-3: 7分 (0~47分) に対して, コントロール: 174分 (153~237分)]。

I-0を除く“通所利用者”と“入所利用者”の「活動レベル2」であった全時間は, コントロールに対して短かった。[I-1: 14分 (6~42分), I-2: 10分 (4~26分), II-1: 3分 (2~5分), II-2: 2分 (0~7分), そして1分 (0~2分) に対して, コントロール: 98分 (70~122分)]。

更に, 通所利用者, 入所利用者とも「活動レベル3」であった全時間は, コントロールに対して有意に短い。[I-0: 0分 (0~340分), I-1: 2分 (1~394分), I-2: 0分 (0~271分), II-1: 0分 (0~400分), II-2: 0分 (0~348分), 及びII-3: 0分 (0~294分) に対し, コントロール: 20分 (11~326分)]。

活動レベル4であった全時間は, コントロールが1分 (0~59分) であったのに対し, 全てのグループでほぼ0分であった。

入所利用高齢者の覚醒時に臥位であった全時間は, コントロール群に対して有意に長かった。一方, 入所利用高齢者の覚醒時に立位であった全時間はコントロール群に対して有意に短かった。面白い事に, I-1群の覚醒時に臥位であった全時間は, II-1群に対して有意に短かく ($p=0.04$), I-1群の覚醒時に立位であった時間はII-1群に対して有意に長かった ($p=0.09$)。これら両群の睡眠時間に関しては何らの相違も見出さなかった ($p=0.80$) ので, この結果は要介護度が同じであっても高齢者の活動に生活環境が影響を与える事を示すものと思われた。

6. 終わりに

加速度センサーによる睡眠・覚醒の推定や活動量評価に対して“反対派・懐疑派”であった私が, “賛同派”からさらに“推進派”に転向するまでの心の旅路を振り返ってみた。