

幼稚園児の自律神経活動の24時間モニタリング

白水重憲, 片山宗哲, 正木健雄

要旨 超小型軽量の心電・加速度・温度測定装置を開発した。この装置を使用して里山の自然環境を保育に取り込んだ“がらんこ山”の野遊び保育が有名な神奈川県横浜市のナザレ幼稚園で、年中児と年長児を対象に、この野遊びが子ども達の生活行動や自律神経活動に与える影響を把握する為の調査を実施した。年中児と年長児の睡眠時、覚醒時の平均、最高、最低心拍数及び自律神経活動の指標の値のレベルを世界で初めて求めた。野遊びの有無で、副交感神経活動・交感神経活動の指標には有意差が無かったが、年中児では最高心拍数が有意に大きくなった。その他、野遊びにより年中児、年長児とも消費エネルギーは増加し、皮膚温度は低下した。

キーワード ECG, 自律神経活動, 加速度センサー, 睡眠覚醒判定, 活動量, 子ども

1. 序論

メンタルストレスの度合いを示す心臓自律神経活動、1日の行動挙動のパラメータである活動量及び睡眠挙動の把握は、乳幼児、子どもの心身の発達の客観的指標として重要なものであり、保育や教育の方法を評価する上で指針とすべきものである。しかしながら、近年の生体計測技術の発達により、ホルタータイプの心電計もかなり小型軽量化されたとはいえ、幼稚園児を対象とした場合はまだまだ大きく重く¹⁾、これまでに調査例は皆無であった。

我々は、超小型軽量の加速度・温度測定装置を開発し、世界で初めて5歳児の集団の7日間までの日常生活行動を連続して測定する事に成功した²⁾。本研究では、更に、心臓自律神経活動評価機能を備えた超小型評価システムを開発し、幼稚園児の24時間の調査に使用可能である事を示し、合わせて幼稚園における諸活動の評価を試みた。

2. 測定と解析

2-1 測定装置

ECG測定装置の性能は、初段の計装アンプの性能と人体に装着した電極から計装アンプの入力までの導線の距離に大きく左右される。我々は、初段の計装アンプとしてテキサスインスツルメンツ社(TI, 米)のINA321を使用し、同社の推奨回路³⁾をベースに、同社のOPアンプ2336を使用した時定数1秒の積分フィードバック回路とカットオフ周波数40Hzのローパスフィルター付きの反転増幅回路からなるECG測定回路を構成した。全体のゲインは60dBである。

ECG測定回路の他に、加速度測定の為に、 $\pm 3g$ までの加速度が測定可能な3軸加速度センサーH34C(日立金属)を、温度測定の為に、温度分解能 $\pm 0.0625^\circ\text{C}$ 、誤差 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ の温度センサーTMP101(TI)を搭載した。

装置全体の制御の為にコントローラとしては、C8051F321(シリコン・ラボラトリーズ, 米)を使用し、ECGと加速度信号は、測定回路からのアナログ信号を分解能10ビットの内蔵AD変換回路で取り込み、温度信号はTMP101とI2Cシリアル・インターフェイスによる通信で取り込んだ。

データ保存用のフラッシュメモリとしては、容量 64 Mbit の M25P64 (ST マイクロエレクトロニクス社) を 4 個搭載する事で 32 M バイトの容量を確保している。

この他、専用マイクロ USB コネクタ、2032 型リチウム電池、電源スイッチ、人体に装着する電極と嵌合する為のスナップボタンのメス側 2 つ等の全てを 40 × 39 × 8 mm の中に詰め込み、重量 14 g とする事ができた。

この超小型軽量化した装置全体を、人体に装着した電極に固定する事で、電極から計装アンプの距離を事実上 0 とする事ができ、ノイズを混入させずに ECG 信号を測定する事が可能となった。

各信号のサンプリング周波数は ECG が 128 Hz、温度と加速度は 1 Hz である。連続測定可能時間は最長 36 時間強であるが現在は 25 時間としている。電源スイッチを押すと測定がスタートし、25 時間経過すると自動終了する。パソコンと USB 接続し、パソコン側の通信ソフトを使用してデータの転送、及び内蔵メモリの消去を行う。

2-2 RR 間隔の抽出

日常生活行動における心電測定では、人の動きや発汗等によるアーチファクトの混入や信号品質の低下が避けられない。本研究では、世界中で幅広く使用されている頑健なリアルタイム QRS ピーク抽出アルゴリズム⁴⁾をベースにして QRS ピーク位置を検出し、RR 間隔を求めた。このアルゴリズムでは、まず、心電図波形を、QRS ピークの成分の大半が存在する周波数帯域である 5~11 Hz のバンドパスフィルターを通し、微分し、絶対値を求め、80 m 秒の窓に渡って平均するという手順でこぶ状のピークに変形する⁴⁾。この処理によれば、QRS 群との混同が問題になる T 波は通常は小さいこぶになる⁴⁾。このように変換した波形でピークを求め、

1) より大きなピークの前後 200 m 秒間のものは無視する。

2) ピークが検出されたらオリジナルの心電信号が正と負のスロープを持っているかをチェックし、持っていないければ、ベースラインのシフトと判断する。

3) もし前に検出したピークの 360 m 秒以内にピークを検出したら、このピークの最大微分値が前のピークの最大微分値の少なくとも半分以上であるかを確認する。もし、そうでなければそのピークは T 波と判断する。

4) ピークが検出スレシホールドより大きければ QRS ピーク、そうでなければノイズと判断する。等を主とする判断基準群を適用して QRS ピークを識別する⁴⁾。

しかしながら、日常生活の中で長時間に渡って測定した心電データには、様々のアーチファクトや電極の接触状態の悪化により心電が測定出来ない領域や、ノイズが大きな領域が存在する。この為、上記のアルゴリズムを使用しても、長すぎたり短すぎたりする偽 RR 間隔が混じってしまう。これらの存在は、RR 間隔の周波数解析の結果を全く違うものにしてしまう為に、偽 RR 間隔は取り除いてしまう必要がある。本研究では、RR 間隔データの分布挙動に着目する事により、真の RR 間隔データと偽物を分別し除去した。

2-3 RR 間隔変動の周波数解析

周波数解析には高速フーリエ変換 (FFT) や自己回帰 (AR) アルゴリズムが使用されてきたが、これらの方法により得られる結果は周波数情報のみなので、解析時間範囲の中でのデータの周波数の変化挙動は判らない。しかしながら、最近では、自律神経活動も覚醒の瞬間、驚きの瞬間といった瞬間的な挙動の評価が着目されており、時間変化を追跡できる時間周波数解析の手法が応用され始めている^{5,6)}。

我々が目的とする子どもの自律神経活動の調査においては、研究が進むに従って、覚醒、驚き、何かに注意を喚起された瞬間等の変化を追跡できる事が必須となると思われる。そこで、本研究では、時間周波数解析法の中でもベストとされており⁵⁾、殆ど一歩毎の周波数 (パワー) スペクトルを得る事⁶⁾ができる smooth pseudo Wigner-Ville (SPWV) 分布を使用した。

SPWV 分布に関しては、既に詳細な報告^{7,8)}があるので、本報ではこれらより概要のみを紹介する。

信号 $s(t)$ をフーリエ変換して得られるパワー (エネルギー密度) スペクトル $|S(\omega)|^2$ が⁵⁾、 $s(t)$ の自己相関関数 $R(\tau)$ をフーリエ変換しても得られる事は良く知られている。

$$\begin{aligned} |S(\omega)|^2 &= \left| \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int s(t) e^{-j\omega t} dt \right|^2 \\ &= \frac{1}{2\pi} \iint s^*(t) s(t) e^{j\omega(t'-t)} dt' dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \int R(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \end{aligned}$$

ここに、自己相関関数 $R(\tau)$ は、

$$R_t(\tau) = \int s^* \left(t - \frac{1}{2}\tau \right) s \left(t + \frac{1}{2}\tau \right) dt$$

となる。

時間依存性があるエネルギー密度スペクトル、つまり時間周波数分布があるものと仮定して、自己相関関数とエネルギースペクトルの関係を一般化すると、SPWV 分布の基である Wigner-Ville (WV) 分布 $P(t, \omega)$ が得られる。

$$P(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int R_t(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

ここに、自己相関関数は

$$R_t(\tau) = \int s^* \left(t - \frac{1}{2}\tau \right) s \left(t + \frac{1}{2}\tau \right) dt$$

である。この WV 分布は時間・周波数分解能が非常に大きいのであるが、信号が 2 乗の形で入っている為に、信号が複数の周波数成分を持つと干渉項が生じてしまう^{7,9)}。

この干渉項を除く為に、独立に時間的、周波数的スムージングを行ったのが SPWV 分布である。

$$P(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int h(\tau) R_t(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau$$

$$R_t(\tau) = \int g(x-t) s^* \left(x - \frac{1}{2}\tau \right) s \left(x + \frac{1}{2}\tau \right) dx$$

ここに h , g は周波数的、時間的スムージング関数である^{7,9)}。

本研究では、1 分間毎の RR 間隔データを、直線近似を使用して 2 Hz でリサンプリングして等間隔時系列にし、データ数が 128 に満たない場合は、最後のデータで残りを埋めて 128 個のデータにした。次に、Hilbert 変換を行い、実部・虚部のある解析的なデータとした。

このデータを基に、時間的にも、周波数的にも 128 点の SPWV 分布を求め、時間的に最後尾の埋めたデータの領域を削除して、1 分間毎の時間周波数エネルギー分布を得た。ここで、時間的、周波数的スムージングには、幅 13 データと 33 点データの Humming 窓をそれぞれ使用した。

この 1 分間毎のマップより周波数 0.04 Hz 以上 0.15 Hz より小の領域を低周波領域、0.15 Hz 以上 0.40 Hz 以下の領域を高周波領域として、低周波成分 (LF)、高周波成分 (HF) をそれぞれの領域の絶対値の総和として求めた。HF を副交感神経活動の指標、LF/HF

を交感神経活動の指標として、平均心拍数とともに、この 1 分間を代表する値とした。

2-3 皮膚温度

皮膚温度は、1 秒毎の測定値の 1 分間の平均値を求めた。

2-4 活動量評価

サンプリング間隔が 1 秒程度と長い場合、人体の活動の様に加速度の変化速度が速いものを対象とすると、連続した 2 回の測定結果は、連続的に変化する量を測定したものというよりは相互に関係の無い確率論的量を 2 回測定したものに近くなってしまふ。従って、各測定毎の加速度の大きさを求めその変化分の絶対値として活動量が求められて来た⁹⁾。本研究でもこれに従い、この方法による 1 分間毎の積算値を使用した。

2-5 姿勢

姿勢評価は加速度ベクトルの 1 分間毎の平均値をベースに行った。垂直軸加速度が鉛直下方となす角度が 45 度以下になった場合を、立位或いは座位とし、45 度から 135 度の間 (水平方向との角度が ± 45 度以内) の場合を横になった姿勢と判断した。

横になった姿勢の中では、法線軸が上向き (加速度の値がプラス) の場合をうつ伏位、下向き (加速度の値がマイナス) の場合を仰臥位とまず大まかにわけ、更に左右軸が鉛直上方となす角が 60 度以内の場合を左側臥位、鉛直下方となす角が 60 度以内の場合を右側臥位とした。

2-6 睡眠・覚醒推定

前報⁹⁾と同様に、1 分間毎に体動のあった 1 分間か体動のない 1 分間かを判定した。この判定では、できるだけ敏感に体動挙動を評価する為に、各加速度の成分値の変化を基にした。また、ノイズの影響を取り除く為に、実験的に定めたある閾値以下の変動は 0 とした。各測定毎に得られる 3 つの変化量のうち最大のものを選択し、さらに 1 分間中のそれらの中の最大のものをその 1 分間を代表する値とした。全測定領域でのこの値の平均値を算出してその 1/10 を閾値とし、これ以上の場合を体動のある 1 分間、これより小さい場合を体動のない 1 分間とした。

この体動のない 1 分間の連続した領域群 (非活動領域) を探し、隣り合う非活動領域の間隔が 2 分間以内ならば連結して 1 つの非活動領域とした。この非活動領域が更に集まっている領域を睡眠候補領域とする訳であるが、まず、睡眠候補領域の最初の決定に当たっ

ては、

- A) 20 分間以下の長さの非活動領域でその後 21 分間以上の活動領域が続く場合は睡眠候補領域の先頭では無い。
- B) 15 分間以下の長さの非活動領域でその後 16 分間以上の活動領域が続く場合は睡眠候補領域の先頭では無い。
- C) 10 分間以下の長さの非活動領域でその後 11 分間以上の活動領域が続く場合は睡眠候補領域の先頭では無い。
- D) 6 分間以下の長さの非活動領域でその後 6 分間以上の活動領域が続く場合は睡眠候補領域の先頭では無い。

という 4 つのルールに基づき全非活動領域をスクリーニングする事で行った。こうして得られた睡眠候補領域の先頭と後続の非活動領域の間隔が 30 分以内の場合は、この非活動領域を睡眠候補領域に連結するという手順を繰り返して睡眠候補領域群を得た。更に、長さが 30 分以下のものは睡眠候補領域から外した。

前報⁹⁾では、胸部の加速度データでもとめた体動の無い 1 分間はあくまでもその候補とし、大腿部、前腕部のデータにも体動が無い事を確認して真の体動の無い 1 分間とする事でその信頼性を高めている。この為に、本研究で言う睡眠候補領域をそのまま睡眠領域としている。しかしながら、胸部に装着した 1 つの装置によるデータのみに基づく推定を目的とした本研究では、向上した姿勢判定機能に基づく上半身が水平になっているというデータとの整合性を吟味して、睡眠領域とした。

姿勢判定においてもまず水平姿勢の 1 分間を求め、それが連続している領域を求めた。更に、人体より取り外されていた場合を除去する為に、

- A) 最低温度が 25℃以上であり 7 分間以上の長さの領域
- B) 最低温度が 25℃以下でも 60 分間以上の長さの領域

を水平姿勢の領域とし、10 分間以下の間隔の水平姿勢の領域は連結して 1 つの領域とした。

睡眠候補領域と水平姿勢の領域の整合性判定は

- A) 水平姿勢の領域を前後に 30 分間だけ延長した領域内に入ってしまう睡眠候補領域は睡眠領域
- B) 長さが 120 分以上で、水平姿勢である時間の割合が 70%以上の睡眠候補領域は睡眠領域

という 2 つのルールに基づいて行った。

2-7 測定

健康で活動的な小さな子ども達の集団の 24 時間の自律神経活動と生活行動の世界で初めての調査は、里山の自然環境を保育に取り込んだ“がらんこ山”の野遊び保育が有名な神奈川県横浜市のナザレ幼稚園で実施した。

この幼稚園では、週に何度か、園児達はバスで 10 分間程度の“がらんこ山”に行き、1 時間程度の野遊びを経験する。この野遊びが子ども達の生活行動や自律神経活動に与える影響を把握する事を目的として、野遊びを実施する日としない日の日の測定を行った。

野遊びの主な時間帯は午前中の 10 時 50 分より 11 時 20 分までの 30 分間である。野遊びの為に園を出発する前の 10 時 10 分から 30 分の間に、園児の胸部に測定装置を装着し、24 時間の測定を開始した。従って、野遊び及びその後の活動挙動とその夜の睡眠挙動を、野遊びの無い日のものと比較した事になる。年長児 30 名、年中児 48 名の野遊びの有無 2 回の測定をそれぞれ別々の日に行った。測定に当たっては、NPO 法人セルフケア総合研究所内に設置した倫理委員会でも子ども達への負担や考えられる危険性と対応法に関して事前に十分に協議し、ナザレ幼稚園に保護者に事前に説明し文書による同意を求めて頂いた。

3. 結果と考察

3-1 24 時間の測定結果例

図 1 は、24 時間の解析結果を示す解析ソフトパネルの例である。最上段は ECG 及び 3 軸加速度の生波形であり、最上段下部にあるスクロールバーを動かす事で、測定した全領域が表示できる。左端のスクロールバーの上にあるテキストボックス中には表示中の左端の時刻が示される。

次の 2 段目は、最上段の ECG 波形に対応した瞬時心拍数の時系列データである。最上段の波形とは左端の時刻を合わせている。

3 段目以降は分毎に求めた値を全測定範囲で示すグラフであり、全グラフの 1 時間毎に目盛線を表示し、最下端のグラフの下に、24 時間制で時刻を表示している。

3 段目は自律神経活動の大きさを示す指標である。灰色は副交感神経活動の大きさを示す RR 間隔変動の高周波成分 HF であり、黒は交感神経活動の指標とさ

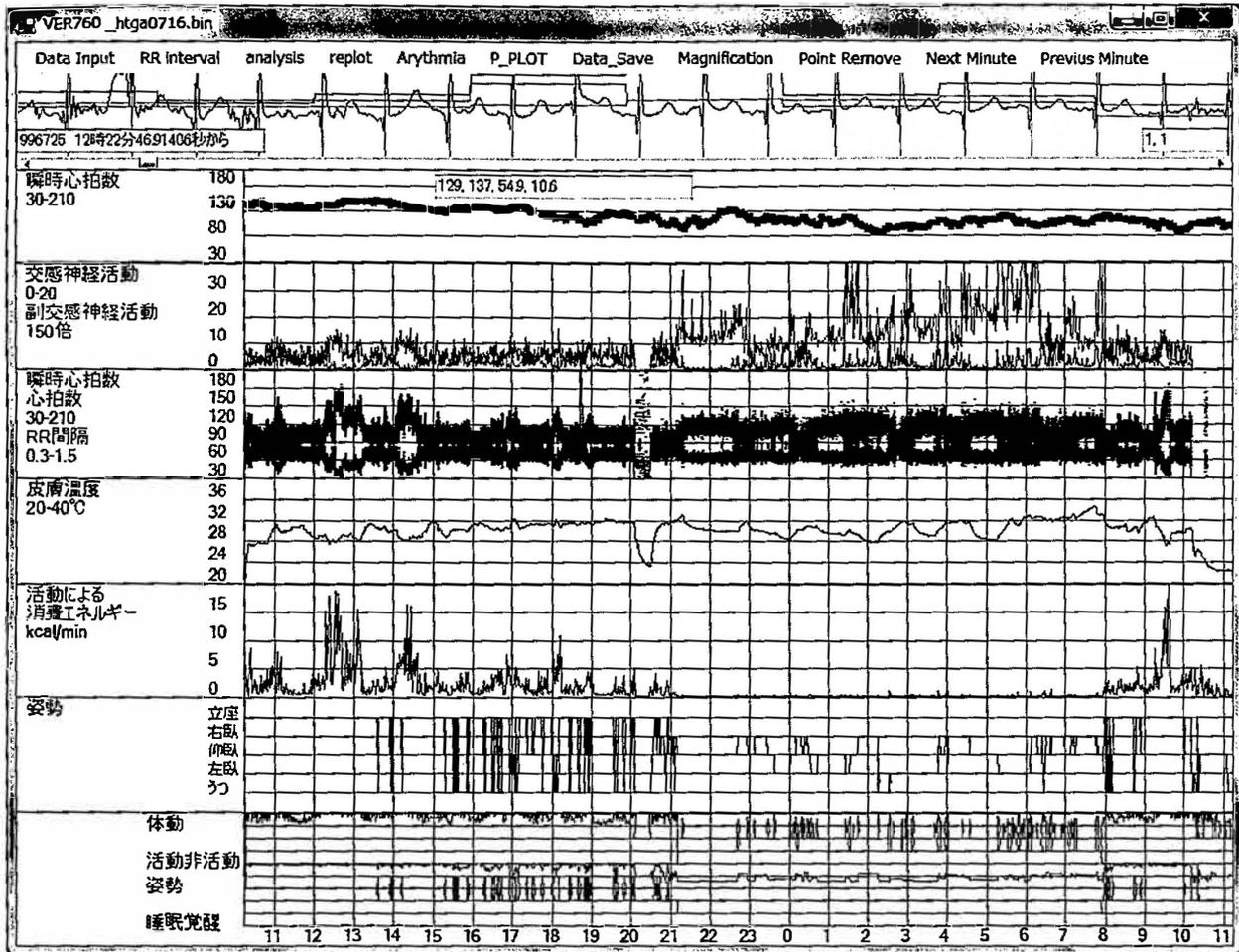


図1 解析ソフトのパネルの例

れている LF/HF である。HF の単位は msec^2 であり、LF/HF は比であるので無単位である。ここでは HF を 1/150 倍して表示している。多数のデータを解析した経験上、このような形で表示すると、交感神経・副交感神経両方の活動挙動の変化を、一緒にバランス良く表示できる為である。

4 段目は心拍数である。黒の点の集まりは、瞬時心拍数のばらつきを表し、灰色の点は RR 間隔の分布を示す。

3 段目に示した自律神経活動の指標は、RR 間隔の検出ミスが混入するとおかしな値になってしまう。その為に、必要があれば各 1 分間の瞬時心拍数と ECG 波形を確認し、もし問題があればその 1 分間の値は異常値として棄却できるようにしている。4 段目に示された瞬時心拍数の分布もその目的も兼ねて表示している。また、2 段目の瞬時心拍数の表示の黒は着目している一分間のものを示し、灰色はそれ以外の時間の瞬時心拍数を示している。

5 段目は皮膚温度である。温度に関しても、目視で判定し、異常値を除去できるようにしている。

6 段目は活動量である。ヴァイン社のポータブルな高精度消費エネルギー測定装置メタヴァインを使用して求めた活動量と消費エネルギーとの関係を使用して、ここでは消費エネルギー (kcal/mol) に換算して示している。

7 段目は姿勢である。胸部に装着した加速度センサー 1 個のみで判断する為、立位と座位の区別ができないが、一方、臥位については左右側臥位、仰臥位、うつ伏せの識別が可能である。従って、睡眠時の姿勢変化を詳細に追跡できる。

8 段目は、睡眠・覚醒推定に関するデータである。8 段目のグラフの中の最上段は、睡眠・覚醒推定に使用する為の体動データそのものであり、このデータに基づき、各一分間の活動・非活動の判定結果が次の段である。そのまとまりを求めたのが 3 段目、さらにまとまりを求めた睡眠区間の候補が 4 段目である。5 段

目、6段目、7段目は臥位姿勢に関する同様のものであり、睡眠区間の候補の4段目と、7段目の臥位姿勢のまとめり区間より、7段目の睡眠区間を求める。

このパネル上で、全ての問題点を除去した後に、解析結果をファイルに保存し、次のステップの為の解析パラメータを求めた。

3-2 解析パラメータ

子ども達の生活行動、自律神経活動挙動を評価し、野遊びの影響を把握する為の解析パラメータとして、睡眠時に関しては、睡眠開始時刻ならびに終了時刻、睡眠時間の長さ、姿勢変動回数ならびに平均皮膚温度、平均・最高・最低睡眠時心拍数及び平均副交感神経活動指標と平均交感神経活動指標の10項目を使用した。

覚醒時に関しては、覚醒時間の長さ、活動によるエネルギー消費量、平均・最高・最低心拍数及び平均副交感神経活動指標と平均交感神経活動指標の7項目を使用した。

尚、ここでいう最高、最低は各被験者個人におけるものである。

3-3 睡眠時の挙動

年中児と年長児について、野遊び有りの日と野遊び無しの日での睡眠時の挙動に関するパラメータと野遊びの有無でのこれらの比較結果を表1と表2にそれぞれ示す。野遊びの有無による有意差は有意確率0.05で判断する。

3-3-1 年中児

野遊びの有無でパラメータを比較する事ができたのは14名であった。

睡眠開始時刻の平均値は、22時19分（野遊び有、以下「有」）と22時19分（野遊び無、以下「無」）であり、両者には有意差は無かった。尚、子ども達の睡眠開始時刻は20時台から24時台まで幅広く分布していた。

睡眠終了時刻の平均値は、7時13分（有）と7時

表1 年中児の睡眠時挙動

項目	被験者数	野遊び有り				野遊び無し				比較	
		平均値	標準偏差	最小値	最大値	平均値	標準偏差	最小値	最大値	平均値の差	有意確率
睡眠開始時刻	14	22:18:39	0:53:09	20:43:00	23:27:00	22:18:26	1:11:56	20:23:00	0:17:00	0:00:13	0.986
睡眠終了時刻	14	7:13:00	0:52:46	5:36:00	8:46:00	7:24:00	0:31:18	6:34:00	8:40:00	-0:11:00	0.338
睡眠時間長さ	14	8:56:21	0:40:31	8:02:00	10:02:00	9:07:34	0:56:42	7:15:00	10:40:00	-0:11:13	0.462
睡眠時姿勢変動数	14	30.5	15.0	18.0	67.0	31.2	8.6	16.0	43.0	-0.7	0.828
平均皮膚温度	14	32.9	1.0	30.9	34.4	33.0	0.9	30.7	34.3	-0.1	0.554
平均心拍数	14	78.3	6.7	63.0	90.0	83.1	9.8	67.0	110.0	-4.9	0.088
最高心拍数	14	107.3	12.7	87.0	133.0	114.8	14.4	101.0	159.0	-7.5	0.185
最低心拍数	14	64.1	7.8	47.0	79.0	70.0	8.7	57.0	92.0	-5.9	0.072
平均副交感神経活動指標	14	4131.8	2291.9	1032.7	9112.7	3327.5	2175.1	62.7	8970.1	804.3	0.103
平均交感神経活動指標	14	1.425	0.506	0.778	2.554	1.781	1.969	0.687	8.550	-0.356	0.493

表2 年長児の睡眠時挙動

項目	被験者数	野遊び有り				野遊び無し				比較	
		平均値	標準偏差	最小値	最大値	平均値	標準偏差	最小値	最大値	平均値の差	有意確率
睡眠開始時刻	7	21:47:09	0:48:59	20:45:00	22:54:00	21:39:34	0:37:10	20:50:00	22:36:00	0:07:34	0.561
睡眠終了時刻	7	7:22:51	0:32:30	6:33:00	8:10:00	7:07:17	0:37:57	6:21:00	8:00:00	0:15:34	0.394
睡眠時間長さ	7	9:37:43	0:54:54	8:18:00	10:49:00	9:29:43	1:07:12	7:47:00	10:51:00	0:08:00	0.713
睡眠時姿勢変動回数	7	33.6	10.1	19.0	50.0	44.1	25.2	22.0	94.0	-10.6	0.246
平均皮膚温度	7	33.6	0.6	32.7	34.3	33.5	0.4	32.8	34.0	0.1	0.564
平均心拍数	7	82.9	5.4	75.0	90.0	82.6	6.6	71.0	93.0	0.3	0.892
最高心拍数	7	113.9	7.5	102.0	123.0	109.1	3.2	106.0	114.0	4.7	0.200
最低心拍数	7	65.6	6.5	57.0	76.0	69.0	6.1	60.0	79.0	-3.4	0.382
平均副交感神経活動指標	7	4759.2	3021.6	994.2	8983.7	3780.4	2560.6	1742.3	8022.0	978.8	0.108
平均交感神経活動指標	7	1.169	0.352	0.684	1.723	1.262	0.299	0.731	1.554	-0.092	0.378

24分（無）であり、これらの間には有意差は無かった。睡眠終了時刻は5時台から8時台まで幅広く分布していた。

睡眠時間の長さの平均値は、8時間56分（有）と9時間7分（無）であり、これらの間には有意差は無かった。7時間台から10時間台まで幅広く分布していた。

睡眠時姿勢変動回数の平均値は、30.5回（有）と31.2（無）であり、これらの間には有意差は無かった。

睡眠時の平均皮膚温度の平均値は、32.9℃（有）と33.0℃（無）であり、これらの間には有意差は無かった。

平均心拍数、最高心拍数、最低心拍数の平均値は、78.3, 107.3, 64.1（有）と83.1, 114.8, 70.0（無）であり、これらの間にはいずれも有意差は無かった。

副交感神経活動の指標の平均値（個人）の平均値（集団）は、4131.8 msec²（有）と3327.5 msec²（無）であり、これらの間には有意差は無かった。

交感神経活動の指標の平均値（個人）の平均値は

1.425（有）と1.781（無）であり、これらの間には有意差は無かった。

3-3-2 年長児

野遊びの有無を比較する事ができたのは7名であった。

睡眠開始時刻の平均値は、21時47分（有）と21時39分（無）であり、両者には有意差は無かった。尚、睡眠開始時刻の分布は20時台から22時台までと年中児に比較すると幅が狭かった。

睡眠終了時刻の平均値は、7時23分（有）と7時7分（無）であり、これらの間には有意差は無かった。睡眠終了時刻の分布は6時台から8時台までと年中児に比較すると幅が狭かった。

睡眠時間の長さの平均値は、9時間38分（有）と9時間30分（無）であり、これらの間には有意差は無かった。7時間台から10時間台まで幅広く分布していた。

睡眠時姿勢変動回数の平均値は、33.6回（有）と44.1（無）であり、これらの間には有意差は無かった。

睡眠時の平均皮膚温度の平均値は、33.6℃（有）と

表3 年中児の覚醒時挙動

項目	被験者数	野遊び有り				野遊び無し				比較	
		平均値	標準偏差	最小値	最大値	平均値	標準偏差	最小値	最大値	平均値の差	有意確率
覚醒時間長さ	14	12:52:00	1:11:32	9:57:00	14:20:00	13:41:21	1:17:44	10:29:00	15:41:00	-0:49:21	0.058
活動によるエネルギー消費量	14	1640.9	235.3	1150.8	2033.9	1314.8	309.2	845.4	1972.7	326.2	0.000
平均皮膚温度	14	30.1	0.6	28.8	30.9	31.1	0.5	30.0	31.7	-1.0	0.000
平均心拍数	14	112.1	6.7	101.0	129.0	110.1	8.2	94.0	126.0	2.0	0.059
最高心拍数	14	175.6	13.9	153.0	203.0	163.3	11.9	143.0	184.0	12.4	0.003
最低心拍数	14	77.2	7.1	66.0	89.0	79.1	8.0	67.0	92.0	-1.9	0.414
平均副交感神経活動指標	14	927.7	507.4	309.5	2014.3	866.6	594.0	226.1	2094.8	61.1	0.508
平均交感神経活動指標	14	3.448	0.720	2.407	4.719	3.748	1.237	2.056	7.024	-0.300	0.269

表4 年長児の覚醒時挙動

項目	被験者数	野遊び有り				野遊び無し				比較	
		平均値	標準偏差	最小値	最大値	平均値	標準偏差	最小値	最大値	平均値の差	有意確率
覚醒時間長さ	7	12:52:43	1:11:18	11:34:00	14:21:00	12:32:09	1:07:07	10:59:00	14:29:00	0:20:34	0.359
活動によるエネルギー消費量	7	1743.3	439.7	1386.8	2691.7	1442.4	384.2	993.7	2065.3	300.9	0.010
平均皮膚温度	7	30.1	1.1	28.1	31.5	31.2	0.5	30.6	31.9	-1.1	0.007
平均心拍数	7	118.7	6.0	108.0	128.0	113.6	6.7	100.0	120.0	5.1	0.161
最高心拍数	7	178.7	9.8	166.0	194.0	174.3	7.2	162.0	181.0	4.4	0.396
最低心拍数	7	84.7	7.2	72.0	93.0	80.0	7.1	66.0	88.0	4.7	0.101
平均副交感神経活動指標	7	770.0	534.9	401.1	1899.0	1019.7	747.8	283.9	2497.0	-249.7	0.381
平均交感神経活動指標	7	3.633	0.753	2.250	4.262	3.430	0.820	2.285	4.443	0.204	0.406

33.5℃(無)であり、これらの間には有意差は無かった。

平均心拍数、最高心拍数、最低心拍数の平均値は、82.9, 113.9, 65.6(有)と82.6, 109.1, 69.0(無)であり、これらの間にはいずれも有意差は無かった。

副交感神経活動の指標の平均値(個人)の平均値(集団)は、4759.2 msec²(有)と3780.4 msec²(無)であり、これらの間には有意差は無かった。

交感神経活動の指標の平均値(個人)の平均値は1.169(有)と1.262(無)であり、これらの間には有意差は無かった。

3-4 覚醒時の挙動

年中児と年長児について、野遊び有りの日と野遊び無しの日の睡眠時の挙動に関するパラメータと野遊びの有無でのこれらの比較結果を表3と表4にそれぞれ示す。野遊びの有無による有意差は有意確率0.05で判断する。

3-4-1 年中児

覚醒時間の長さの平均値は、12時間52分(有)と13時間41分(無)であり、これらの間には有意差は無かった。9時間台から15時間台まで幅広く分布していた。

活動によるエネルギー消費量の平均値は、1640.9 kcal(有)と1314.8 kcal(無)であり、野遊び有りの場合が有意に326.2 kcal大きかった。

平均皮膚温度の平均値は、30.1℃(有)と31.1℃(無)であり、野遊び有りの場合が有意に1℃低かった。

平均心拍数、最高心拍数、最低心拍数の平均値は、112.1, 175.6, 77.2(有)と110.1, 163.3, 79.1(無)であり、平均心拍数と最低心拍数は野遊びの有無による有意差は無かったが、最高心拍数は野遊び有りの日が有意に12.4大きかった。

副交感神経活動の指標の平均値(個人)の平均値(集団)は、927.7 msec²(有)と866.6 msec²(無)であり、これらの間には有意差は無かった。

交感神経活動の指標の平均値(個人)の平均値は3.448(有)と3.748(無)であり、これらの間には有意差は無かった。

3-4-2 年長児

覚醒時間の長さの平均値は、12時間53分(有)と12時間32分(無)であり、これらの間には有意差は無かった。分布は10時間台から14時間台までと年中児に比較すると狭かった。

活動によるエネルギー消費量の平均値は、1743.3 kcal(有)と1442.4 kcal(無)であり、野遊び有りの場合が有意に300.9 kcal大きかった。

平均皮膚温度の平均値は、30.1℃(有)と31.2℃(無)であり、野遊び有りの場合が有意に1.1℃低かった。

平均心拍数、最高心拍数、最低心拍数の平均値は、118.7, 178.7, 84.7(有)と113.6, 174.3, 80.0(無)であり、これらの間にはいずれも有意差は無かった。

副交感神経活動の指標の平均値(個人)の平均値(集団)は、770.0 msec²(有)と1019.7 msec²(無)であり、これらの間には有意差は無かった。

交感神経活動の指標の平均値(個人)の平均値は3.633(有)と3.430(無)であり、これらの間には有意差は無かった。

3-5 子どもの心拍数と自律神経活動の指標

本研究で初めて明らかにできたのは、睡眠時と覚醒時の子どもの平均・最高・最低心拍数と副交感神経活動・交感神経活動の指標の大きさである。

更に、もっとも特徴的なのは、平均心拍数と副交感神経活動の睡眠時と覚醒時の相違である。

子どもの心拍数は大きく変化する。睡眠時の平均心拍数の平均は80程度(78.3, 83.1, 82.9, 82.6)であるのが、覚醒時の平均心拍数の平均は110程度(112.1, 110.1, 118.7, 113.6)と睡眠時の最高心拍数の平均を超えるレベルになる。

更に、覚醒時の最低心拍数の平均は80程度(77.2, 79.1, 84.7, 80.0)であり、最高心拍数の平均は180程度(175.6, 163.3, 178.7, 174.3)と100程度の大きな変化を示す。

睡眠時の最低心拍数の平均の最も小さいものは年中児で64.1, 年長児で65.6あり、覚醒時の最高心拍数の平均の最も大きなものは年中児で175.6, 年長児で178.7と、120程度の幅がある。

覚醒時の副交感神経活動の指標の平均(個人)の平均(集団)、年中児で(927.7 msec², 899.6 msec²)、年長児で(770.0, 1019.7)である。一方、睡眠時の副交感神経活動の指標の平均(個人)の平均(集団)、年中児で(4131.8, 3237.5)年長児で(4759.2, 3780.4)と、覚醒時の5~6倍の値になる。

しかしながら、副交感神経活動の指標の平均(個人)の標準偏差は睡眠時で2000~3000, 覚醒時で500~700と大きく、個人によりまた場合により大きく変化

する。睡眠時の副交感神経活動の指標の平均（個人）の最小値は62.7と覚醒時のものより小さい。

覚醒時の交感神経活動の指標の平均（個人）の平均（集団）、年中児で（3.448, 3.748）年長児で（3.633, 3.430）である。一方、睡眠時の交感神経活動の指標の平均（個人）の平均（集団）、年中児で（1.425, 1.781）年長児で（1.169, 1.262）と覚醒時の1/3程度の値になる。

やがて研究が進めば、望ましい発達の為に変動させたい覚醒時心拍数の範囲や、正常で健康な睡眠と考えられる睡眠時心拍数の変動範囲や副交感神経活動と平均交感神経活動の平均の範囲等が明らかになり、子どもの発達を見守り、導く為のツールになるものと思われる。

3-6 測定と解析の問題と限界

野遊びの有無による2回の測定で、比較の為の全ての解析パラメータを求める事ができたのは、年中児で14名、年長児で7名であった。測定をおこなった総数の年中児48名、年長児30名と比較するとかなり減少している。この減少の理由としては、

- A) 装置の最初の装着場所が不相当であり、ECG波形の振幅が小さく、筋電の混入があったり、ノイズとの分離が不可能であったりした。
- B) 子どもの激しい活動に伴い、ベースラインが変動し、RR間隔の抽出が上手く出来なかった。
- C) 子どもの激しい活動に伴い電極の接触が悪くなった為に、データ測定できていない時間領域が多かった。
- D) 良好なECGデータは得られたが、T波がR波より大きかったり、R波の形状が一本の鋭いピークで無く振動性になったり、S波が分裂したりと、子どもの波形は大人とは随分違う事も多い為にQRSピーク検出ができなかった。

等が考えられた。

今回の測定では、多人数の集団を同時に測定した為に、短い時間に多数の子ども達に装着し、マニュアルで測定開始し、その時刻を記録する必要があった。この忙しさと要員の訓練不足が、必ずしも最適ではない部位への装着と電極の保護無しという状況を招き、上記A)とC)の一部を招いたと考えられる。これらの低減の為には、要員の訓練と手順の最適化は勿論の事、測定開始時刻の記録を不要にする、更には、ECG波形の確認ができるようにする等の装置の改造が必要と

思われた。また電極の改良や保護も重要である。

運動時のECG測定の立場からは、四肢の動きによる体動の影響や筋電の混入のできるだけ少ない部位の探索や、これらの影響を除去する為の計測回路の工夫も必要である。これらによりA)とB)によるものがかなり低減するものと思われる。

ECGデータ解析研究の立場からは、子どもの波形や筋電・ベースライン変動の混在したECGデータからQRSピーク群を抽出する方法の研究が必要である。

一方、覚醒時の活動挙動に関する詳細な議論は本報の着目する範囲から外れる為に、本報では議論していないが、活動挙動や睡眠・覚醒挙動のみであればECGデータが不足していても可能であり、使用できるデータ量は増加する。報を改めて議論したい。

4. 結論

超小型軽量の心電・加速度・温度測定装置を開発した。この装置を使用して里山の自然環境を保育に取り込んだ“がらんこ山”の野遊び保育が有名な神奈川県横浜市のナザレ幼稚園で、年中児と年長児を対象に、この野遊びが子ども達の生活行動や自律神経活動に与える影響を把握する為の調査を実施した。年中児と年長児の睡眠時、覚醒時の平均、最高、最低心拍数及び自律神経活動の指標の値のレベルを世界で初めて求めた。野遊びの有無で、副交感神経活動・交感神経活動の指標には有意差が無かったが、年中児では最高心拍数が有意に大きくなった。その他、野遊びにより年中児、年長児とも消費エネルギーは増加し、皮膚温度は低下した。

文献

- 1) 久保田博南：バイタルサイン収集論（真興貿易(株) 医書出版部、東京、2006）第1版、p. 50.
- 2) 白水重憲、片山宗哲、正木健雄：幼稚園児の一週間モニタリング、睡眠挙動と活動量：全面発達の展開 1: 18-31, 2011.
- 3) Texas Instruments: Application Report SLAA280A (Texas Instruments, Dallas, 2005).
- 4) Hamilton PS and Tompkins WJ: Quantitative investigation of QRS detection rules using the MIT/BIH arrhythmia database. *IEEE Trans Biomed Eng.* 33: 1157-1164, 1986.
- 5) Mendez MO, Bianchi AM, Montano N et al: On arousal from sleep: time-frequency analysis. *Med. Biol. Eng. Comput.* 46: 341-352, 2008.
- 6) Jasson S, Medigue C, Maison P et al: Instant Power Spectrum Analysis of Heart Rate Variability During Orthostatic

- Tilt Using a Time-Frequency-Domain Method: Circulation. 96: 3521-3526, 1997.
- 7) Cohen L: Time-Frequency Analysis (Prentice-Hall Inc, New Jersey, 1995).
- 8) Cohen L: Time-Frequency Distributions -A Review. Proc. IEEE 77: 941-981, 1989.
- 9) 高村 昇, 青柳 潔, 白水重憲他: 姿勢・体動・皮膚温度測定による睡眠と生活行動モニタリング. ITヘルスケア 1: 14-23, 2006.

24 hours Monitoring of Activities of Autonomic Nerves of Four and Five Years Old Children.

SHIGENORI SHIROZU, SOTETSU KATAYAMA, TAKEO MASAKI

A very small and light ECG, acceleration and temperature measuring device was developed. With this device, 24 hours monitoring of activities of autonomic nerves of four and five years old children were performed at Nazare kindergarten (Kanagawa), which is famous with outdoor playing at Mt. Garanko, i.e., a playing at natural environment in Satoyama. Levels of measures of the activities of autonomic nerves and average, maximum and minimum heart rates of four and five years old child during sleep and awake were obtained. The outdoor playing brought no change for the activities of autonomic nerves and average and minimum heart rate, however, maximum heart rate was increased meaningfully in four years child. The outdoor playing also increased the amount of energy expedition with physical activity and decreased skin temperature meaningfully, in both four and five years old children.

Key Words: ECG, activity of autonomic nerves, accelerometer, Sleep/Wake identification, physical activity, children