

令和元年度学内公募研究（実用化型）  
〔研究論文〕

## 睡眠呼吸障害スクリーニング検査のための ウェアラブル呼吸センサの開発

辛島 彰洋<sup>1)</sup>, 柳田 琢杜<sup>1)</sup>, 庭 滉詩郎<sup>1)</sup>, 今野 颯<sup>1)</sup>

### Development of Wearable Respiratory Sensor for the Screening Test of Sleep Apnea Syndrome

Akihiro KARASHIMA<sup>1)</sup>, Takuto YANAGIDA<sup>1)</sup>, Koshiro NIWA<sup>1)</sup>, Hayate KONNO<sup>1)</sup>

#### Abstract

It is important to continuously obtain information on the respiratory function on a daily basis to understand the pulmonary function, presence of diseases, psychological state, and athletic ability. Our research group has been developing the respiration measuring instrument, which measures a respiratory rate from the movement of abdominal/thoracic cavity associated with the respiration, in the joint research project of Tohoku Institute of Technology in 2018. Although the measuring instrument improved the measurement precision compared to conventional ones, it has some problems such as large size (a large battery is required due to large power consumption) and poor wearing feel of a subject. Therefore, we made miniaturization of the measuring instrument to improve the wearing feel and power saving of the measuring instrument in this year. In addition, we measured respiration during sleep to verify whether Central Sleep Apnea Syndrome can be diagnosed by the measuring instrument.

#### 1 背景

日常的に連続して呼吸数や換気量などの呼吸機能に関する情報を得ることは、肺機能や疾病の有無、心理状態、運動能力の把握に有用であると考えられている [1]。我々の研究グループでは2018年度から本学の共同プロジェクト研究において、呼吸に伴う腹腔・胸腔の動きから呼吸数を測定する呼吸測定器を開発してきた [2]。この測定器は従来のものと比べて測定精度は向上したが [3]、サイズが大きく（消費電力が大きいため大きなバッテリーが必要）被験者の装着感に課題が残った。そこで今年度は、装着感を向上させるため測定器の小型化および省電力化を行った。さらに、中枢性の睡眠時無呼吸症候群の診断に用いることが可能かどうかを検討するため、睡眠時に呼吸測定を行った。

---

1) 東北工業大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Tohoku Institute of Technology

## 2 方法

### 2.1 呼吸測定器の小型化・省電力化

背景でも述べたようにこれまで我々が作成した測定器では、筐体が大きいため装着感が悪いという課題があった。この課題を解決するため、本研究では呼吸を記録するための測定器を、「体に装着する子機」と「データを保存する親機」に分けることにした。ここで重要なのは、子機と親機との通信である。本研究では、無線通信技術の一つである Bluetooth Low Energy (BLE) を採用した。BLE には 2 つの特徴がある。1 つ目は、電力消費を最小に保つように設計されていることであり、2 つ目は、アドバタイジング機能が付加されたことで子機から親機に送信するべきデータがあることを事前に通知でき、そのメッセージに測定値を含ませることもできることである。このような特徴から、BLE は、スマートウォッチや活動量計、血圧計などのヘルスケア機器とスマートフォンとのデータの通信で広く使われている。本研究では、体に装着する子機として小型マイコン (M5StickC, 48 × 24 × 18mm, 14g) を、データを保存する親機として LCD や SD カードコネクタが内蔵されている M5Stack-Fire (54 × 54 × 21mm, 85g) を用いた。

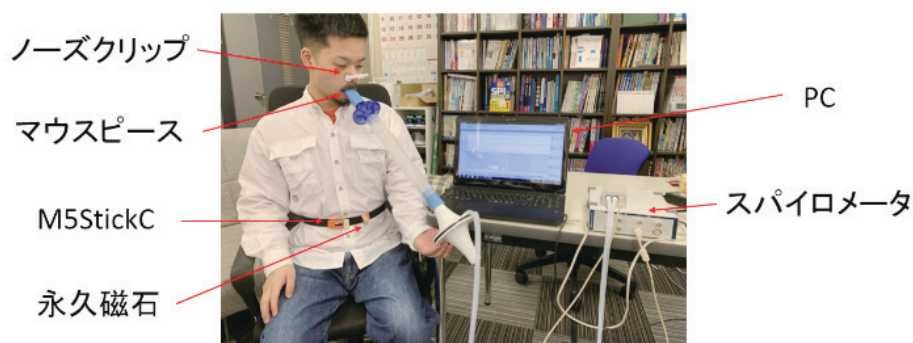


図1 測定器を腹部に装着した様子。写真では、スパイロメータで換気量も同時に測定している。

### 2.2 作成した測定器の性能評価

安静状態の 3 人の被験者から、製作した測定器を用いて呼吸を測定した。また、スパイロメータを用いて換気量を同時に測定し、測定器から得られた信号と比較をした。なお測定は 150 秒間とし、被験者には測定開始後 10 ～ 60 秒は自然な呼吸を、70 ～ 100 秒は一定周期 (4 秒周期) で呼吸を、110 ～ 140 秒は深呼吸をしていただいた (0 ～ 10 秒, 60 ～ 70 秒, 140 ～ 150 秒は呼吸を一時的に停止)。

### 2.3 睡眠時呼吸測定

睡眠時に呼吸を取得できることを確認するため、睡眠時にも呼吸測定を行った。実験には 2 人の被験者に協力を仰いだ。測定器の操作法を説明した後、自宅にて就寝から起床までの一晩分のデータを被験者自身に測定してもらった。ディスプレイ電極を 6 箇所 (額部に 2 箇所、左右の目尻に 2 箇所、左右の耳の後ろに 2 箇所) 装着していただき、脳波 (EEG) および眼電図 (EOG) を測定した。脳波や眼電図の測定には生体信号計測装置

(Polymate AP1000) を用い、サンプリング周波数 200Hz もしくは 500Hz でデジタル信号に変換し、PC カード (1 GB) にデジタルデータとして保存した。また、呼吸を測定するため、我々が作成した呼吸センサを胸部に装着していただいた。さらに、呼吸の参照信号を得るために、鼻部に気流センサ (サーミスタ) を装着していただいた。

### 3 結果

#### 3.1 作成した測定器の性能評価

図 2 A には我々が作成した呼吸測定器から得られた波形を、図 2 B には同時にスパイロメータにより記録された換気量を示している。最初の 60 秒間は自由に呼吸をしているが、正弦波様の波が観測できている様子が分かる。さらに、4 秒周期に呼吸周期を強制した 70 ~ 100 秒では、測定器で観測された波の周期も正確に 4 秒を示していた。したがって、作成した測定器でも呼吸の周期が正確に得られることが確認された。さらに、深呼吸をしている時間帯 (110 ~ 140 秒) では、換気量が増えているが、提案法でもその前と比べて波の振幅が大きくなっていることが分かる。つまり、本測定器は、呼吸数だけでなく呼吸の深さも測定できることが示唆された。さらに、他の被験者でも同様の結果が得られた。

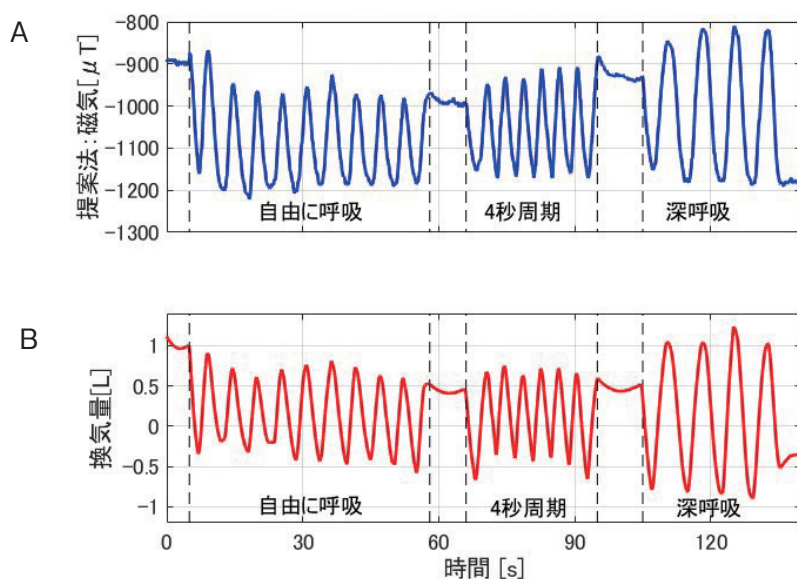


図 2 安静状態 (仰臥位) の被験者から測定した呼吸信号。上段 (青線) : 作成したセンサより記録した信号, 下段 (赤線) : スパイロメータより記録した呼吸の流量。

#### 3.2 睡眠時の呼吸測定

睡眠時に記録した呼吸の波形の代表例を図 3 に示す。図 3 では、作成した測定器から記録した波形 (提案法: 上段) と同時に測定した気流センサ (サーミスタ) で記録した波形 (参照信号: 下段) を並べて表示している。図 3 A は、呼吸の周期がほぼ一定の呼吸が安定している時間帯の波形を示している。参照信号のピークの時刻に黒い縦線を引いている。この線が提案法で記録した波形の負のピークと一致していることから、提案法でも呼吸周

期を測定できることが示唆される。

図3 Bには、呼吸が揺らいで、一時的に止まっている時間帯の波形を示している。95分45秒～95分56秒に約10秒間にわたって呼吸が止まっていることが気流センサ（サーミスタ）で記録した波形から理解される。作成した測定器でも同じタイミングで波形が平坦になっていることから、呼吸努力の停止も本測定器で記録できたと言える。

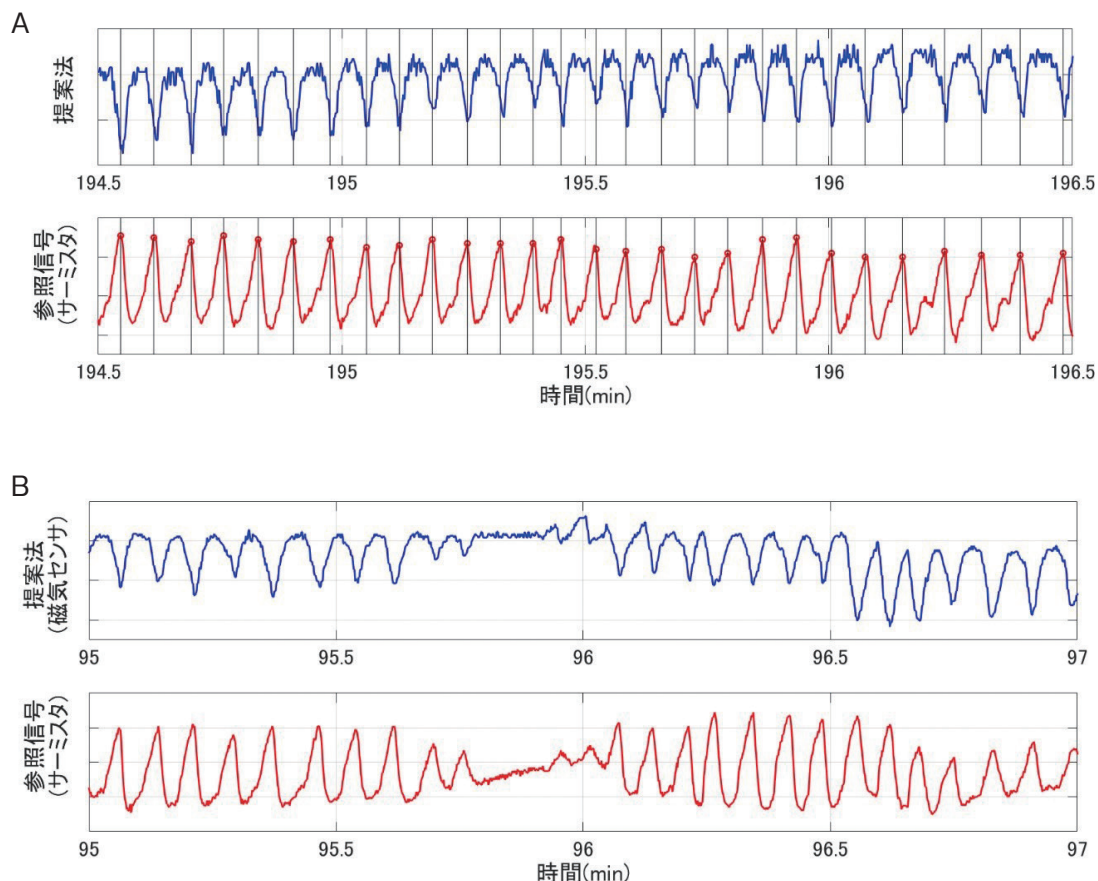


図3 睡眠時に記録した呼吸信号（2分間）。A：呼吸リズムが安定していた時間帯。サーミスタで記録した波（赤線）の正のピークのタイミングで縦線（黒線）を引いている。B：呼吸がゆらいで約10秒間程度停止していた時間帯。95分45秒～95分56秒に呼吸の波形が平坦になっていることが分かる。

脳波および眼電図から判定された睡眠-覚醒ステージおよび作成した測定器で観測された呼吸周期を図4に示す。図4の上段は睡眠-覚醒ステージであり、赤で示す時間帯がレム睡眠である。2段目には1サイクルごとの呼吸の周期の時間変化を示している。深いノンレム睡眠時には呼吸周期がほとんど変化していないことや、中途覚醒時には呼吸周期が大きく揺らいでいること、レム睡眠時にはノンレム睡眠時と比べて呼吸周期はばらつきが大きく短くなっていることが分かる。この呼吸周期の変化をより端的に示すため、図4の3段目と4段目には、1エポック（20秒）ごとに求めた呼吸周期の平均値および標準偏差の値を表している。図より、特に赤で示すレム睡眠時には呼吸周期が短く（3段目）、周期のばらつきが大きくなっている（4段目）ことが分かる。このような呼吸周期が睡眠ステージに依存して変化する現象は、すでに報告されていることであり [4～6]、我々

が作成した測定器でもその現象を確認できたと言える。

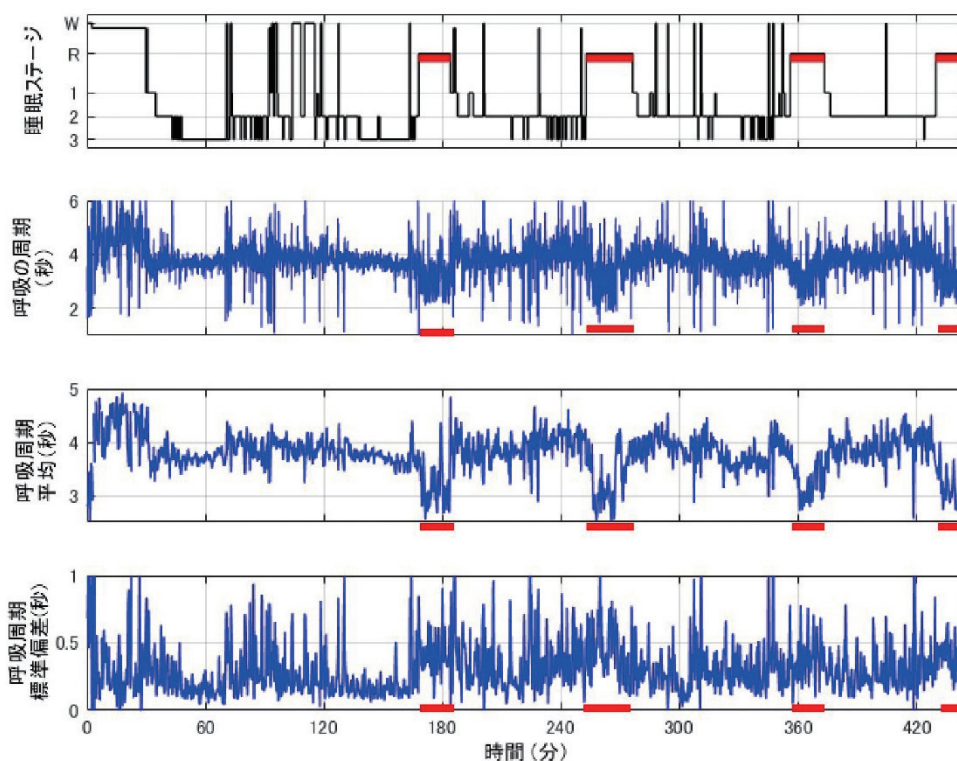


図4 睡眠ステージに依存した呼吸周期の変化。1 段目：睡眠ステージ (W：覚醒状態；1～3：ノンレム睡眠ステージ1～3；R：レム睡眠)，2 段目：呼吸周期 (1 サイクルごと)，3 段目：1 エポック (20 秒) ごとの呼吸周期の平均値，4 段目：1 エポック (20 秒) ごとの呼吸周期の標準偏差。赤線部はレム睡眠の時間帯を表している。

#### 4 まとめ

本研究では、これまで開発してきた呼吸センサの装着感を向上させるため、測定器の小型化および省電力化を行った。体に装着する子機と、データを保存する親機に分け、子機と親機間のデータ送信には無線通信技術の一つである Bluetooth Low Energy (BLE) を利用した。以上の変更により、体に装着する測定器を小さくすることができ、装着感の向上を達成できた。作成した装置の評価をするため、スパイロメータにより記録された換気量と比較をしたが、測定器で観測された波形は換気量の波形とよく一致していた。つまり、本測定器で呼吸を測定できることを示すことができた。

作成した測定器により中枢性の睡眠時無呼吸症候群の診断に用いることが可能かどうかを検討するため、睡眠時の呼吸測定も行った。睡眠時の呼吸測定で広く用いられている気流センサ (サーミスタ) を用いた測定を同時に行い、作成した測定器を評価した。その結果、本測定器でも気流センサと同等の精度で呼吸を記録できることを確認できた。また、睡眠時に出現していた一時的な呼吸停止も本測定器で観測することができた。すなわち、作成した測定器において呼吸努力が停止する中枢性睡眠時無呼吸の診断に使用できる可能性を示すことができた。

測定された呼吸の周期と睡眠ステージとの時間関係も示した。呼吸周期の平均値や標準偏差がノンレム睡眠時とレム睡眠時で異なる特徴を示すことが良く知られているが、本測定器により測定した呼吸からもこの現象を確認することができた。

睡眠の質が下がると認知機能や免疫機能などさまざまな身体機能が低下することから、日常的に自分の睡眠を把握することは重要と考えられている [1]。睡眠の把握に重要な睡眠ステージの判定は、一般的には睡眠ポリグラフ測定によって得られる脳波や眼電図等の生体信号に基づいて行われる。この睡眠ポリグラフ測定は、頭皮や顔に電極を多数装着する必要がある、測定される人の負担は大きい。またその分析は、目視によって行われるのが一般的であり、時間や労力が必要である。以上のことから睡眠ポリグラフ測定は日常的な睡眠測定には適していないと言える [6]。睡眠ポリグラフ検査は、電極装着等の準備の段階において狭く密閉された測定室で実験者と被験者とが密に接触する必要があることから、現在のコロナ禍においてその実施はさらに困難となっている。したがって、より簡便に測定・分析できる生体信号を利用した睡眠ステージ判定法が求められている。本研究で示したように呼吸は、周期やそのばらつきが睡眠ステージに依存して変化することから、睡眠ステージ判定に利用できる可能性がいくつかの論文で指摘されている [5, 6]。したがって、呼吸測定が広く行われるようになれば、日常的な睡眠測定が普及すると期待される。

#### 謝辞

本研究は、令和元年度東北工業大学学内公募研究（実用化型）の助成を受けて実施されたものです。関係の方々に心より感謝を申し上げます。

#### 参考文献

- [1] T.L. Lee-Chiong Jr, U. Magalang, Monitoring respiration during sleep, *Respir. Care Clin. N. Am.*, 11 (4), pp.663-678, 2005.
- [2] 柳田琢社, 辛島彰洋, 磁気センサを用いた呼吸数検出システムの開発, *電子情報通信学会技術研究報告*, 119 (224), pp.29-33, 2019.
- [3] S. Milici, A. Lázaro, R. Villarino, D. Girbau, and M. Magnarosa, Wireless wearable magnetometer-based sensor for sleep quality monitoring, *IEEE Sensors J.*, 18 (5), pp.2145-2152, 2018.
- [4] G.A. Gould, M. Gugger, J. Molloy, V. Tsara, C.M. Shapiro, N.J. Douglas, Breathing pattern and eye movement density during REM sleep in humans, *Am. Rev. Respir. Dis.*, 138 (4), pp.874-877, 1988.
- [5] H. Sun, W. Ganglberger, E. Panneerselvam, M.J. Leone, S.A. Quadri, B. Goparaju, R.A. Tesh, O. Akeju, R.J. Thomas, M. Brandon Westover, Sleep staging from electrocardiography and respiration with deep learning, *Sleep*, 43 (7), zsz306, 2020.
- [6] G.S. Chung1, B.H. Choi, J-S. Lee, J.S. Lee, D-U. Jeong, K. S. Park, REM sleep estimation only using respiratory dynamics, *Physiol. Meas.*, 30 (12), pp.1327-1340, 2009.