

マイクロ波センサによる睡眠状態可視化技術

増田裕太^{†1} 山地隆行^{†1}

睡眠時の状態を計測するときに用いる機器として、電極を用いて被験者に装着するものや、布団に敷いて圧力変化から体の動きを測るもの、枕元に置き寝具の揺れから間接的に体動を測るなど様々なセンシング方式がある。

我々は、被験者の利便性を考慮して、ドップラ式のマイクロ波センサを用い、離れた位置から被験者の睡眠状態を計測することを可能とする研究を行っている。開発技術では、マイクロ波を被験者に照射し、被験者の動きから得られるセンサ信号を解析し、体動、心拍、呼吸の各成分を抽出する。また、センサで検出する呼吸成分の信号強度の変化より、寝ているときの体の向き（仰向け、うつ伏せ、横向き）を判定する。

1. はじめに

日本は国際比較においても睡眠時間が短く[1]、日本人の4.5人に一人は睡眠に何らかの問題を抱えているといわれている。近年、睡眠に対する関心は高まっており、個人向けに睡眠を計測する機器や、スマートフォン向けに睡眠を測るためのアプリケーションが増えている。また、2014年には11年ぶりに厚生労働省が充実した睡眠のために定めた睡眠指針[2]が改定され、睡眠が健康に与える影響について重要視されている。

睡眠を測定する機器として、病院の睡眠検査では脳波や眼球の動き、心電図、筋電図、呼吸等を計測するポリソムノグラフィ (PSG: Polysomnography) がある。家庭で簡易的に測定できるものには、リストバンド型があり、手首に装着し、加速度センサで睡眠中の体の動きを計測する[3]。使用者がセンサを装着しないものでは、布団に敷き、圧力変化から体の動きを測定するマット式[4]や、枕元に置いて寝具の振動から睡眠中の体の動きを測るもの[5]等があり、近年ではマイクロ波などの電波を用いる手法も開発されており、文献[6][7]では枕元付近やマットレスなど、被験者に近いところにセンサを設置している。

我々の研究では、同様にドップラ式のマイクロ波センサを用いているが、見守り用途との併用を考慮し、被験者から離れた天井など、部屋全体を計測する場所に設置しても、睡眠状態を精度よく算出可能とすることを目標としている。

2. 開発技術

2.1 センサ概要

センサにはドップラ式で 2.4GHz 帯のマイクロ波センサを使用しており、測定範囲は 0~約 5m である。本センサはドップラ効果を用い、電波を対象物に照射したとき、その対象物から反射される電波の周波数変化により動いたものを検出する。周波数変化について、対象物がセンサ方向に近づくと反射される電波の周波数は高くなり、遠ざかる

と低くなる。センサの出力信号は、電圧値として得られる。照射対象の反射面の大きさ、センサからの距離、センサ垂直方向への移動量が振幅値に、移動速度が周波数に反映される。

安静時の人体に照射した場合、心臓の鼓動による拡張、収縮の動き、またそれに伴う体表面の微小な振動から心拍成分、呼吸による胸部や腹部の動きから呼吸成分、それ以外の体の動きや衣服の動きなどがセンサ信号に含まれる (図 1)。

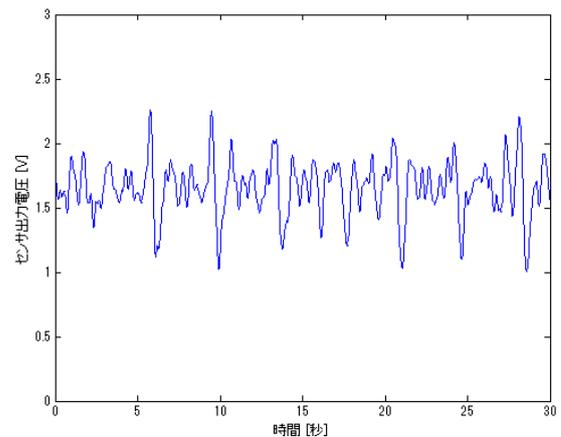


図 1. センサ信号 (安静時の人体に照射)

2.2 解析

マイクロ波を人体に照射したときのセンサ信号を解析することにより、体動、心拍、呼吸成分を抽出する。心拍、呼吸成分は周波数解析により、該当する成分の特徴量を抽出する (図 2)。図 2 において、0.3Hz 付近のピークが呼吸成分で呼気、吸気を合わせた 1 回の呼吸の周期を表し、1.25Hz 付近のピークが心拍成分で心臓の鼓動の周期を表している。被験者から離れたところにセンサを設置して計測する場合、ノイズが混入しやすいが、各成分を抽出するときに、バンドパスフィルタの帯域幅を心拍や呼吸の早さに応じて可変することにより、精度よく算出することができる。センサ信号から呼吸成分 (図 3) と心拍成分 (図 4)

^{†1}(株)富士通研究所
イメージングコンピューティング研究部

を抽出した結果を示す。図3, 4の各波形の特徴点より、それぞれ呼吸数と心拍数を算出する。

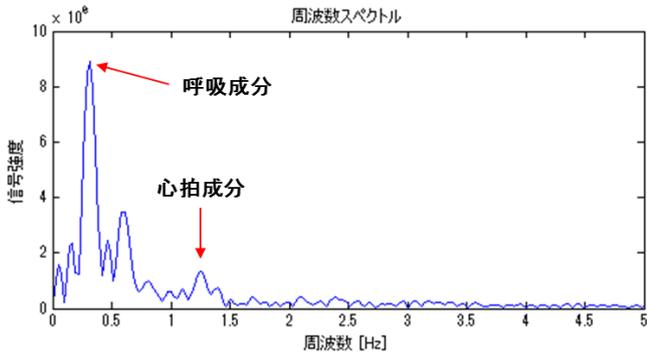


図2. センサ信号の周波数スペクトル

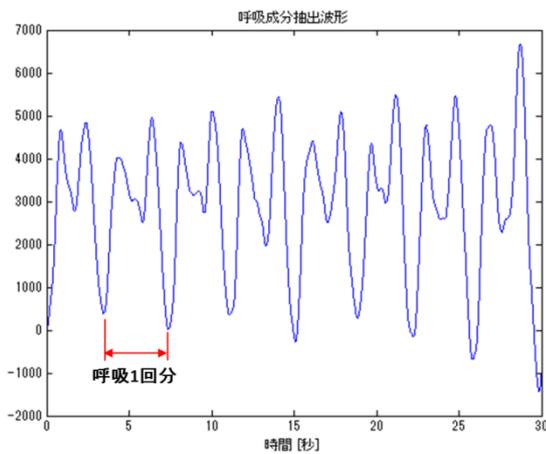


図3. 呼吸成分波形

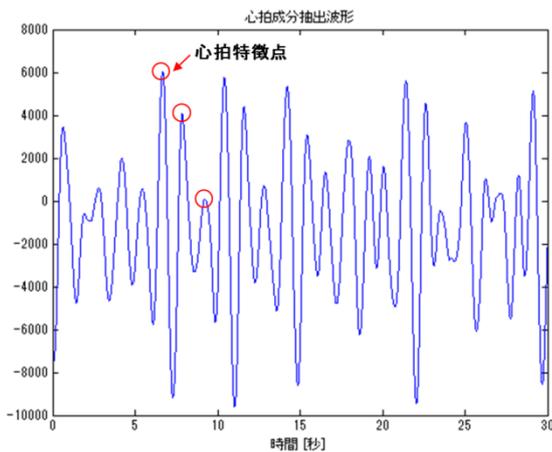


図4. 心拍成分波形

センサ信号の振幅は動きの変化量を表し、心臓の鼓動や呼吸による胸部や腹部の動きに対し、寝返りなどの体の動きは変化量が大きくなるため、センサ信号の振幅が閾値以上となるときを体動とする。体動として検出した回数を単

位時間で積算したものを図5に示す。図5は体動の有無を1秒毎に判定し、1分間で積算したものである。検出した体動量が閾値以上の場合を覚醒、閾値未満の場合を睡眠として判定する。

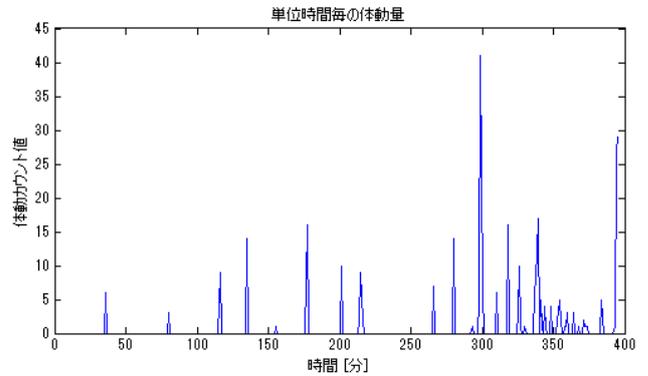


図5. 就寝中の体動検出結果

マイクロ波センサを用いた睡眠計測として、従来体動や睡眠、覚醒の判定、心拍数、呼吸数を算出する技術はあるが、寝ているときの姿勢を判定したものはない。睡眠時の状態として、体位（仰向け、うつ伏せ、横向き）も重要な要素であり、例えば、睡眠時無呼吸症候群（SAS）は仰向けのとときに舌が重力により喉に沈下し、気道が塞がれることが発症要因であることや、寝返りがなく、ずっと同じ姿勢で寝ていると床ずれ（褥瘡）ができてしまうなど、寝ているときの体の向きは睡眠状態可視化の情報として有用である。

心臓の鼓動や呼吸により胸部や腹部の動く大きさは、体の正面、背面、側面によって異なる。睡眠時に寝返りをするすることで、センサに対する体の向きが変わり、電波照射面の呼吸による胸部や腹部の動く大きさが変化する。この特性を用いれば、抽出した呼吸成分の振幅値より、睡眠時の体位（仰向け、うつ伏せ、横向き）を判定することが可能となる。図6のように天井にセンサを設置したときの、仰向け、うつ伏せ、横向きの信号強度の様子を図7~9に示す。仰向けではセンサ正面方向に胸部、腹部の動きが生じるため、呼吸成分が大きくなる。うつ伏せでは、胸部、腹部が圧迫されることに加え、マットレスにより変化が吸収されるため、仰向けに比べ呼吸成分は小さくなる。横向きでは、呼吸による胸部、腹部の動きによる変化量は体の正面に比べ、側面では小さいため、呼吸成分は仰向けやうつ伏せよりも小さくなる。これらの関係より、睡眠時の体位判定を行う。



図 6. センサの設置状況

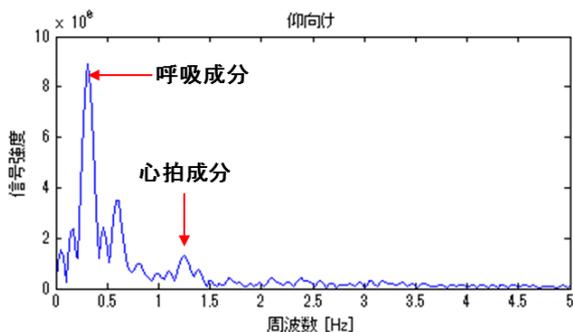


図 7. 周波数スペクトル (仰向け)

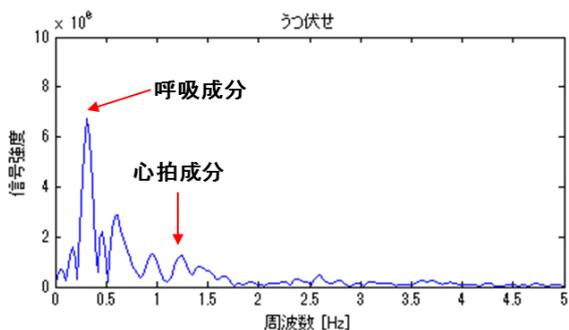


図 8. 周波数スペクトル (うつ伏せ)

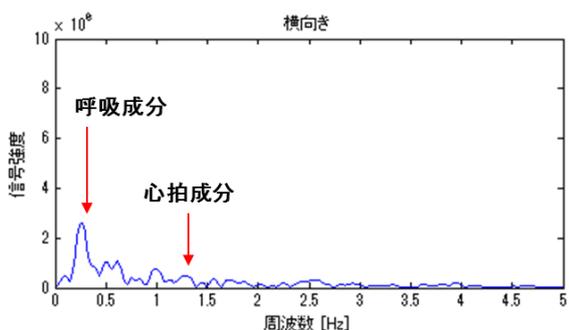


図 9. 周波数スペクトル (横向き)

3. 実験

開発技術において、体動による睡眠、覚醒の判定、心拍数、呼吸数の精度を確認するため、リファレンス機に PSG

を用いて実験を行った。PSG の被験者への装着、データ解析にあたり、日本睡眠学会の認定検査技師にご協力いただいた。マイクロ波センサは天井に設置し、測定対象までの距離は約 2m である。被験者 2 名の一晩の睡眠におけるデータを計測した。

4. 評価

4.1 体動による睡眠、覚醒判定

PSG による判定は Wake を覚醒、REM, NonREM (ステージ 1~4) を睡眠とし、マイクロ波センサによる睡眠、覚醒の判定の一致率を確認した。

一致率の計算方法は、以下とした。

- 睡眠、覚醒

PSG が睡眠または覚醒と判定したとき、マイクロ波センサによる判定が一致していれば 1、異なれば 0 とし、睡眠区間全体において一致した割合を算出。

- 全体 (睡眠+覚醒)

睡眠と覚醒を合わせた睡眠区間全体における一致の割合。

評価の単位時間は PSG による判定結果の出力時間にあわせ、20 秒毎とした。

評価結果を表 1 に示す。睡眠の判定は被験者 2 名において約 96%、覚醒は約 50% となり、睡眠と覚醒を合わせた睡眠全区間では約 93% の一致率となった。

表 1. 睡眠、覚醒判定結果

	被験者 1	被験者 2
睡眠	96.5%	96.7%
覚醒	56.4%	47.2%
全体	92.3%	94.4%

4.2 心拍数

PSG により測定した心拍数に対する、解析結果の一致率を算出した。PSG とマイクロ波センサによる心拍数算出結果の比較例を図 10 に示す。評価の単位時間は 30 秒とし、単位時間毎にリファレンスに対する一致率を式(1)より求め、睡眠区間内で一致率が 90% 以上となる割合を算出した。

$$Accuracy(t) = \left(1 - \left|1 - \frac{V_{calc}(t)}{V_{ref}(t)}\right|\right) \times 100 \quad (1)$$

式(1)について、 V_{calc} はマイクロ波センサより算出した心拍数、 V_{ref} は PSG による心拍数である。睡眠区間で一致率が 90% 以上となる割合は、被験者 2 名について、それぞれ 87.0%、76.7% となった。

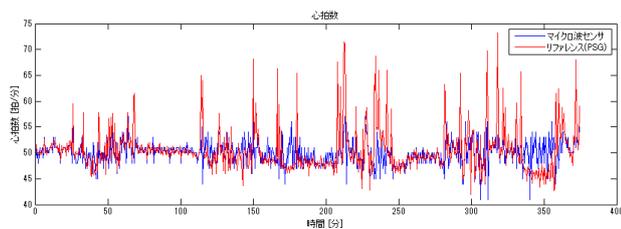


図 10. 心拍数の比較

4.3 呼吸数

PSGにより測定した呼吸数に対する、解析結果の一致率を算出した。PSGとマイクロ波センサによる心拍数算出結果の比較例を図11に示す。評価の単位時間は1分とした。心拍数と同様に式(1)を用い、 V_{calc} をマイクロ波センサより算出した呼吸数、 V_{ref} をPSGによる呼吸数として単位時間毎の一致率を求め、睡眠区間で一致率が90%以上となる割合を算出した。睡眠区間で一致率が90%以上となる割合は、被験者2名について、それぞれ75.5%、82.1%となった。

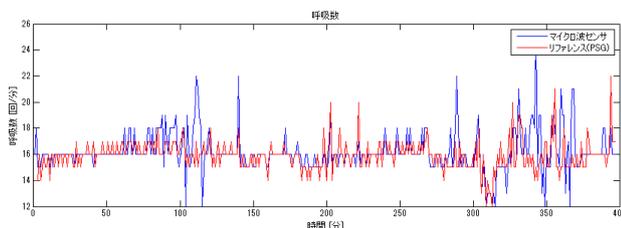


図 11. 呼吸数の比較

5. 考察

体動について、睡眠の判定制度は被験者2名とも96%以上となり、精度よく判定できている。一方、覚醒の判定精度は50%前後となっており、睡眠に比べ低くなっている。これは、マイクロ波センサで検出できていない小さな動き、脳波や眼球の動きによる判定で体の動きと一致しない部分があるためと考えられる。

心拍数について、睡眠全体の変化傾向を捉えることはできるが、寝返りなど大きい体の動きが生じたときに、一時的に心拍数が増える状態に追従できず、算出結果にずれが出てしまっている。

呼吸数についても心拍数同様に、体の動きによる影響がみられる。また、体位によっては、心拍、呼吸の動きによる成分を捉えにくい状態も確認しており、体動による急な変化への対応も含め、今後の課題である。

6. まとめ

非接触による睡眠状態の計測として、マイクロ波センサを用いたセンシング技術を開発した。実験により睡眠時の体動による覚醒、睡眠の判定、心拍数、呼吸数を算出し、

体動はリファレンスに対して、高い精度で一致していることを確認し、心拍数、呼吸数については全体の変化傾向を捉えられていることを確認した。今後、被験者数を増やして精度確認し、睡眠時の体位判定についても検証を進めていく。また、非接触によりセンシングできるという利便性を生かし、センサの設置個所の汎用性についても検討していく。

参考文献

- 1) OECD: Balancing paid work, unpaid work and leisure, 入手先 <<http://www.oecd.org/gender/data/balancingpaidworkunpaidworkandleisure.htm>> (参照 2014-05-08).
- 2) 厚生労働省健康局: 健康づくりのための睡眠指針 2014
- 3) Cole, J.R., Kripke, F.D., Gruen, W, et al.: Automatic Sleep/Wake Identification From Wrist Activity, Sleep, Vol.15, No.5, pp.461-469 (1992)
- 4) 木暮貴政: 医療介護現場における非装着型睡眠計の活用, 医療機器学, Vol.83, No.4, pp.366-370 (2013)
- 5) オムロンヘルスケア株式会社: ねむり時間計 HSL-002C, 入手先 <<http://www.healthcare.omron.co.jp/product/hsl/hsl-002c.html>> (参照 2014-05-08)
- 6) 堤正和: 健康管理に最適な非接触モニタリング, 医療機器学, Vol.83, No.4, pp.371-373 (2013)
- 7) Kagawa, M., Yoshida, Y. Kubota, M., et al: Non-contact heart rate monitoring method for elderly people in bed with random body motions using 24GHz dual radars located beneath the mattress in clinical settings, Journal of Medical Engineering & Technology, Vol.36, No.7, pp.344-350 (2012)