

環境要因と被験者の体動及び心拍変動が主観的睡眠感に及ぼす影響

Effects of environmental factors, subjects body motion, and heart rate variability
on subjective feeling of sleep

近畿大学建築学部 非常勤講師

Department of Architecture, Kindai University, Part-time Lecture

太田周彰

Noriaki Ota

キーワード：睡眠(Sleeping environment)、温熱環境(Thermal environment)、
心拍数(Heart rate)、体動(Body motion)、主観的睡眠感(Subjective feeling of sleep)

1. はじめに

睡眠の質の向上は近年の社会問題として大きな課題である。睡眠の質を生理量によって客観的に評価し、生理量と環境要因の関係から最適な環境条件を明らかにする研究が行われている。例えば梁瀬¹⁾は脳波計によって睡眠深度を調査し、体温調節可能域からみた質の良い睡眠が得られる環境温度は13~29°Cに存在することを明らかにした。秋山ら²⁾は脳波や眼球運動、頤筋電図、心電図、体動、皮膚温により熱的に中立な空気温度であれば入眠潜時が短くなることや熱的平衡状態を外れると気流が影響すること等を明らかにしている。恒温動物であるヒトは、深部体温を一定の範囲内に保つために温熱的中性域で交感神経・副交感神経による皮膚血管調節によって体温調節を行う³⁾。一般的に夜間睡眠時には副交感神経が支配的となり、深い睡眠状態になるにつれて心拍数は下がり⁴⁾、覚醒やレム睡眠時に増加する⁵⁾。四十竹ら⁶⁾は睡眠時の室温と自律神経活動について心拍変動(以下、HRV)を用いて相関性を報告している。

睡眠の満足度等の主観的評価はこころの健康と強く関連することが示されている⁷⁾。睡眠による休養感は主観的な健康感や抑うつ度合いと強く関係しており⁸⁾、主観的評価は睡眠の質を評価するにあたって重要な要素である。川島ら⁹⁾は入眠潜時が短いほど睡眠感が良いことを、垣鏑ら¹⁰⁾は夏場28°C付近で睡眠感が最も良く至適温度であることを、糸井川ら¹¹⁾は放射冷房と対流冷房で共にSET*が27°C付近の場合に睡眠感が最もよくなる傾向であることを明らかにしている。これらの既往研究においては生理量の把握に接触を要する機器を用い、空調により定常的な温度条件にした実験室実験を行っている。主観的睡眠感を評価するにあたり、接触型センサーは拘束が伴うため主観的睡眠感に影響を及ぼすと考えられる。非接触型センサーを用いた研究は本多ら¹²⁾の報告が挙げられ、平均SET*27.4°C、平均室温26.7°Cで質の良い睡眠が得られることを明らかにしているが空調により定常的な温度条件下で実験が行われている。またこれらの既往研究では主観的睡眠感に環境要因が直接影響を与える評価構造を採用している。

主観的な睡眠の質を評価するにあたりOSA睡眠調査票(MA版)(以下、OSA)¹³⁾を用いる。谷田¹⁴⁾はHRVのLF/HFがOSAの第2~4因子及び合計点と有意な関連があることを示し、HRVが主観的睡眠感の推測に応用が期待できることを示した。

以上を踏まえ、本研究では外的な刺激として睡眠中の寝室環境を取りあげ、外的環境刺激による受動的変化を知る目的で体動と自律神経活動を反映する生体現象として知られるHRV¹⁵⁾に着目した。日常的な睡眠状態を再現した上で主観的な睡眠感を評価するために非接触/非拘束で連続して体動や心拍数(以下、HR)を捉えられるマット式センサーを採用し、空調温度をコントロールしない条件下で行った。起床時の主観的な睡眠感を把握して、心理量に影響を及ぼしうる環境要因や生理量を特定することを目的とし、環境要因や生理量と心理量との因果関係を明らかにするために構造方程式モデルを採用する。

2. 実験概要

2.1 実験方法と計測因子

実験は2018年7月23日~10月10日の期間である。東大阪市のワンルूमマンションで実施した^注1)。測定室の平面図及び断面図をFig. 1に示す。実験条件はTable 1とし、開口の照度環境や、放射熱環境に影響を及ぼす開口、天井面、壁面の断熱の有無について条件を変更した。

被験者は睡眠障害のない健康な 20~22 歳の男性 6 名 (A1~A6) と女性 6 名 (B1~B6) の計 12 名とする。各被験者は 5~6 夜の実験に参加し、欠測値のない計 51 夜のデータを得た。測定した生理学的要素と環境要素を Table 2 に示す。計測機器は、生理量測定にマット式センサー^{注 2)} (bio sync 社製 aams) を用い、被験者の寝床に肩甲骨付近から腰にかけて敷設した。環境要因の測定では①頭部の照度に T&D 社製 TR-74Ui、二酸化炭素濃度に T&D 社製 TR-76Ui、②室内の温湿度に T&D 社製 TR-72U、③壁体表面温度に ONSET 社製 UX120-014M を使用した。被験者には起床直後に OSA によるアンケートを実施した。実験期間中は飲酒を禁止した。場所は指定せず 19 時までに夕食を済ませ、その後 21 時までに測定室において入浴を済ませ、23 時に就寝とした。被験者毎に実験期間中は同じ着衣とした。Fig. 1 に記載するとおりウィンドウファンの風は就寝中直接人体に当たらない位置にあり常時運転させた。温度設定は自由とし、窓は常時閉めた状態とした。寝具はタオルケット 1 枚とした。7 時を起床の目安とし実際の起床時刻を自己申告させた。

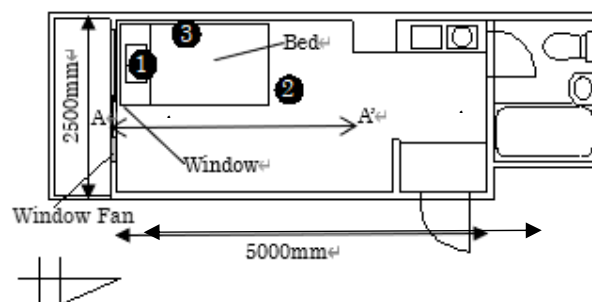
2.2 分析因子の算出方法

取得した生理学的要素と環境要素のデータから各夜の平均値や標準偏差を算出した。それぞれの算出方法を以下に記す。

HRV の周波数解析手法や対象の周波数帯はひとつに定まっていない^{14) 16)}。本研究では欧州のガイドライン¹⁷⁾に従いパワースペクトルの導出方法や対象周波数帯を決定した。なお、1 分未満の欠測値においては欠測前後のデータの平均値を用いて補間した。これらのデータを用いて 1 分毎の HR [beat/min] の逆数をとり 0.5 秒毎に RR 間隔を算出した^{注 3)}。5 分間の RR 間隔データ 600 個から AR モデル^{注 4)}を用いてパワースペクトル解析を行った。心臓交感神経と副交感神経の活動指標とされる低周波数の値 (以下 LF) を 0.05~0.15Hz のパワー積分値とし、心臓副交感神経の活動指標とされる高周波数の値 (以下 HF) を 0.15~0.40Hz のパワー積分値とした。心臓自律神経バランスの指標またはストレス指標とされている LF/HF は 1 分毎にデータをずらして算出した。LF/HF は低値なほど安静な状態であるとされている¹⁸⁾。HR については、平均値や標準偏差を算出した。

体動は 0.5 秒毎に検出があれば 1、なければ 0 とし 1 分間 120 個の合計値 CL1min を求め、CL1min

(a) Plane figure



(b) A-A' cross section

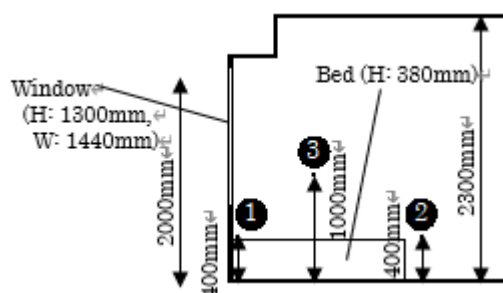


Fig. 1 Overview of experimental room. The symbols, ①, ②, and ③ in the figure mean the location of the measurement equipment to measure the environmental elements shown in Table 2.

Table 1 Experimental conditions to control the light and thermal environment in the room

No	Window	Wall & ceiling	Number of subjects (Female)
1	Covered with Curtain.	Normal	24 (11)
2	Not covered.		10 (6)
3	Covered with cardboard.		10 (4)
4	Covered with thermal insulation (λ : 0.02 [W/(m/K)], thickness: 50mm).		7 (4)

Table 2 Measurement items

Physiological element	Body motion [min], Heart rate [beat/min],
Environmental element	① Carbon dioxide concentration around the head [ppm], Illuminance around the head [lx]
	② Room center temperature [°C], Room center relative humidity [%], Room center illuminance [lx]
	③ Partition wall surface temperature [°C]

が 1 以上の場合にその 1 分間の体動 B1min を 1 [time]とした。睡眠時間中の B1min の合計値 Btotal [times]を睡眠時間 [min]で除した値を体動数 BM [times/min]とした。

環境要素においては就寝時間中の部屋中央温度 Tc [°C]、部屋中央相対湿度 Hc [%]、壁面放射温度 Tp [°C]、頭部周辺の二酸化炭素濃度 CO2 [ppm]の平均値（記号末尾に"_A"を付記）や標準偏差（記号末尾に"_SD"を付記）を用い、頭部周辺の照度については起床前 90 分間の時間平均の対数値 Lxlog_A を用いた。ただし、壁面放射温度は壁面表面温度 1 箇所を計測した値である。

これらの因子の値を算出するための時間区分については以下の 3 つの時間帯から算出した。「全睡眠時間」を一つ目の時間区分とした。睡眠開始後の最初の 90 分間にあらわれる深いノンレム睡眠が成長ホルモンの分泌などに重要とされている¹⁹⁾ため「睡眠開始後 90 分間」を二つ目の時間区分とし、更に「起床前 90 分間」を三つ目の時間区分とした。一晩の心拍数の変動の例を Fig. 2 に示す。睡眠開始後 90 分間にノンレム睡眠と思われる心拍低下が確認できる。なお、睡眠開始は 5 分間体動が検出されなかった時点を開始時刻とし、起床は自己申告時間とした。

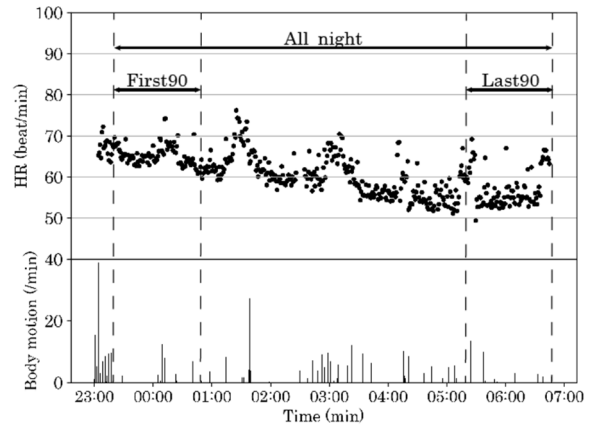


Fig. 2 Overnight HR and body motion with time period, "All_night" is the entire sleep time, "First90" is period of 90 minutes after the start of sleep, "Last90" is period of 90 minutes before getting up

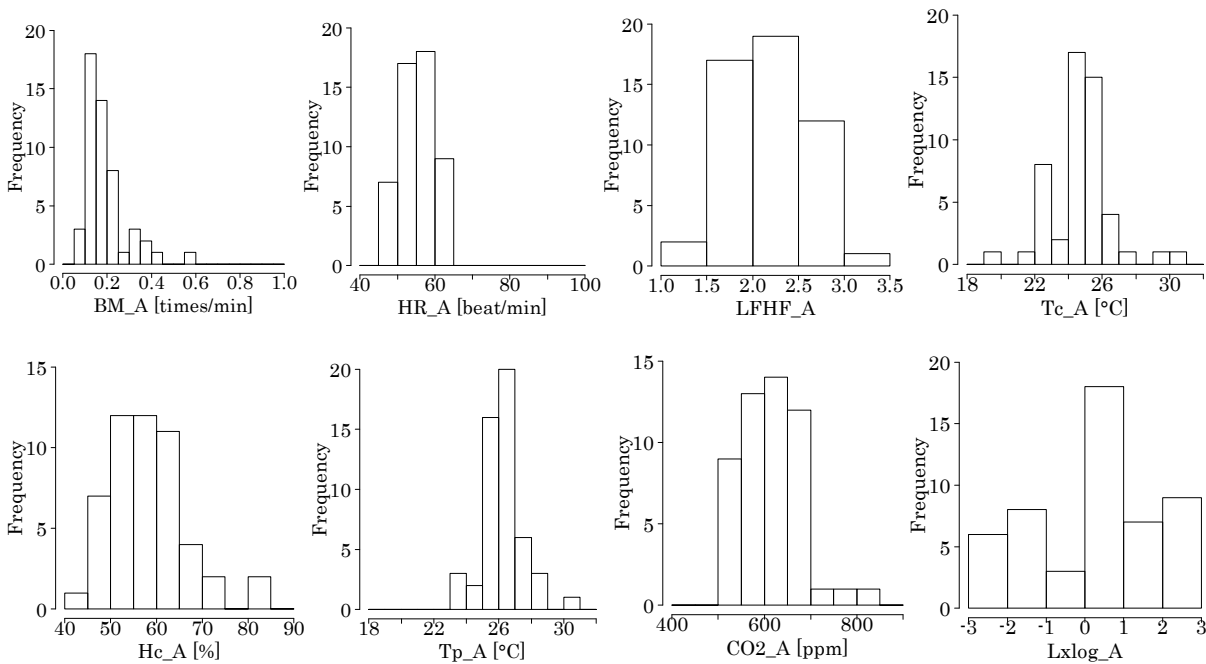


Fig. 3 Histogram of environmental and vital sign factors at all night

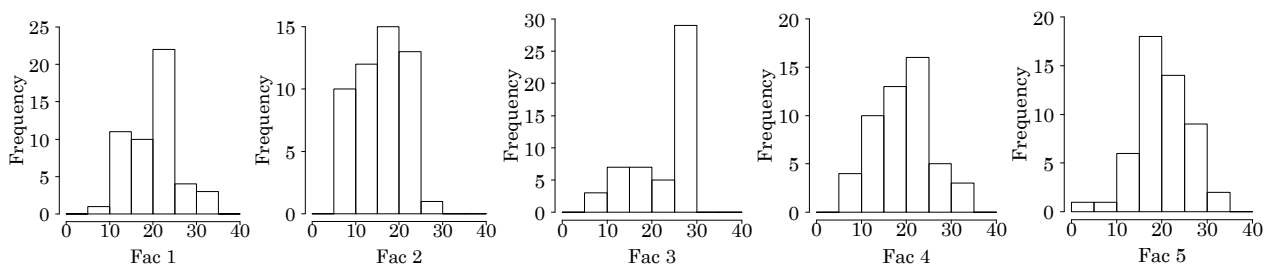


Fig. 4 Histogram of OSA sleep inventory (MA version) factors score

3. バイタル因子・環境因子と主観的睡眠感の測定結果

バイタル因子の BM_A や HR_A、LF/HF_A と環境因子の Tc_A、Hc_A、Tp_A、CO2_A、Lxlog_A の全 51 夜分のヒストグラムを Fig. 3 に示す。Tc_A から暑熱環境としての温度範囲であることがわかる。それぞれの因子について Shapiro-Wilk 検定により正規性の確認を行ったところ、BM_A、HR_A、Tc_A、CO2_A、Lxlog_A は正規性を確認できなかった。

OSA の回答項目を点数化し、第一因子：起床時眠気 (Fac 1)、第二因子：入眠と睡眠維持 (Fac 2)、第三因子：夢み (Fac 3)、第四因子：疲労回復 (Fac 4)、第五因子：睡眠時間 (Fac 5) について集計した。全 51 夜分のヒストグラムを Fig. 4 に示す。夢み (Fac3) については点数に偏りが見られ、夢を見る頻度が全体的に低かった。Shapiro-Wilk 検定により正規性の確認を行ったところ、Fac 3、5 は正規性を確認できなかった。

4. バイタル因子・環境因子と主観的睡眠感との相関関係

バイタル因子・環境因子・主観的睡眠感の因子間の関係を検討するため、三つの時間区分毎に相関行列を算出した。算出にあたって、一部の観測変数で正規性を確認できなかったため、Spearman's rank correlation coefficient を用いた。

4.1 全睡眠時間における観測因子間の相関

Table 3 に全睡眠時間のデータから得られた相関行列を示す。バイタル因子と OSA の各項目との相関をみると、BM_A は Fac1、Fac2、Fac4、Fac5 に対して負の有意な相関があり、体動が少ないことが主観的睡眠感に良い影響を与える傾向がある。また、HR_A と HR_SD はどちらも Fac4 と負の有意な相関を示しており、心拍数が低く推移することや、一晩において心拍数が安定していることが、疲労回復の要因になりうると考えられる。

LF/HF_A と LF/HF_SD については、Fac3 において負の有意な相関を示しており、LF/HF の数字が低く安静な状態であり、ばらつきのない安定な状態が続くことが睡眠中に夢を見る頻度を低くしうる。バイタル因子と環境因子との相関においては HR_A が Tp_A と正の有意な相関を示しており、壁面放射温度の上昇が心拍数を上昇させると考えられる。BM_A が CO2_SD と正の有意な相関を示しているが、因果関係については今回の実験では分からない。

環境因子と OSA の各項目との相関において、Tc_SD が Fac4 と負の有意な相関を示した。Hc_A が入眠と Fac2 と正の有意な相関を示し、CO2_A が Fac2 や Fac5 と負の有意な相関を示した。また Tp_A と TP_SD

Table 3 Spearman's rank correlation coefficient matrix between observable variable candidate at all night (*<0.05, **<0.01). " _A" and " _SD" mean the average value and standard deviation, respectively.

		Vital signs					Environment							
		BM_A	HR_A	HR_SD	LFHF_A	LFHF_SD	Tc_A	Tc_SD	Hc_A	Hc_SD	CO2_A	CO2_SD	Tp_A	Tp_SD
Vital Signs	BM_A	1.												
	HR_A	0.10	1.											
	HR_SD	0.03	0.43 **	1.										
	LFHF_A	0.01	0.06	-0.01	1.									
	LFHF_SD	-0.07	0.32 *	0.21	0.75 **	1.								
Environment	Tc_A	0.07	0.21	0.11	-0.28 *	-0.07	1.							
	Tc_SD	-0.06	0.27	0.26	0.16	0.25	0.04	1.						
	Hc_A	0.01	-0.05	-0.10	-0.20	-0.10	0.64 **	-0.07	1.					
	Hc_SD	-0.08	0.10	0.17	0.11	0.09	0.22	0.23	0.13	1.				
	CO2_A	0.27	0.09	0.32 *	0.30 *	0.10	-0.12	-0.03	-0.29 *	0.22	1.			
	CO2_SD	0.47 **	-0.10	0.18	0.15	0.18	0.27	0.09	0.15	0.12	0.03	1.		
	Tp_A	-0.13	0.42 **	0.27	-0.20	0.09	0.48 **	0.42 **	0.26	-0.02	-0.10	-0.04	1.	
Tp_SD	-0.02	0.16	0.25	0.09	0.21	-0.02	0.71 **	-0.19	0.01	0.06	0.12	0.36 **	1.	
OSA	Fac 1	-0.31 *	-0.23	-0.28 *	0.06	0.06	-0.02	-0.11	0.15	0.02	-0.21	-0.04	-0.17	-0.27 *
	Fac 2	-0.49 **	-0.16	-0.24	-0.05	0.02	0.05	-0.15	0.28 *	-0.05	-0.35 *	-0.24	-0.13	-0.22
	Fac 3	-0.18	0.13	-0.03	-0.47 **	-0.31 *	0.04	-0.11	0.12	-0.11	-0.24	-0.21	0.18	-0.06
	Fac 4	-0.29 *	-0.47 **	-0.30 *	0.19	0.08	-0.11	-0.32 *	0.14	0.02	-0.09	-0.07	-0.44 **	-0.43 **
	Fac 5	-0.42 **	-0.04	-0.07	-0.01	0.01	0.01	0.07	0.10	-0.15	-0.32 *	-0.15	0.15	-0.14

が Fac4 と負の有意な相関を示し、Tp_SD が Fac1 と負の有意な相関を示した。二酸化炭素が減少することで Fac2 が向上することは、井上ら²⁰⁾の先行研究と同様の結果であった。川島ら⁹⁾の相対湿度と睡眠の質に関する先行研究を参考にすると、80% RH で最も睡眠の質が下がるとしているが、Fac2 については60% RH で値が最も高くなるとしている。今回示された相関は正であるが、湿度分布は45% RH ~ 60% RH の間に殆ど入っており、同様の結果が示されたと言える。垣鏑ら¹⁰⁾は主観的睡眠感が最も高い至適温度として28°Cを挙げており、入眠時に26°Cとし徐々に28°Cに近づける方が睡眠の質が良くなるとしている。本多ら¹²⁾は室温26度以上の条件で実験を行っており、この中で平均SET*27.4°C・平均室温26.7°Cで環のよい睡眠が得られたとしている。今回の実験条件ではTc_Aが24~26°C付近であったが、室温が低かったためこの温度帯では傾向がみられなかった。

4.2 睡眠開始後 90 分間における観測因子間の相関

Table 4 に睡眠開始後 90 分間のデータから得られた相関行列を示す。バイタル因子と OSA の各項目との相関では、概ね全睡眠時間の場合と同様の傾向を示した。バイタル因子と環境因子との相関においても全睡眠時間の場合と同様の傾向が見て取れるが、BM_A が Tc_A と正の有意な相関を示した。

環境要因と OSA の各項目との相関では、有意な相関を示す因子数が減少した。これは睡眠初期の寝室環境は睡眠感に影響を及ぼしていない可能性を示している。これにも関わらず、Tp_A が Fac4 と負の有意な相関を示していることから、疲労回復には睡眠初期段階から放射温度を考慮する必要があると考えられる。

4.3 起床前 90 分間における観測因子間の相関

Table 5 に起床前 90 分間のデータから得られた相関行列を示す。バイタル因子と OSA の各項目との相関をみると、Table 3, 4 と異なる傾向を示す因子が現れる。Fac1 でみられた相関が有意でなくなり、起床直前のバイタル状況は起床時の眠気にさほど影響を与えていない。対照的に Fac3 に相関を示すバイタル因子が増え、特に LF/HF_A や LF/HF_SD が負の有意な相関を示した。これは起床前の LF/HF が低い、すなわち安静な状態で、安定しているほど夢みの点数を高くし、夢を見る頻度が低くなると考えられる。バイタル因子と環境因子との相関においても、Table 3, 4 と異なる傾向を示している。特に BM_A や HR_A と Tp_A が有意な相関を示しており、起床直前の体が起きようとする状況下では、寝室の放射温度により体動や心拍数の変動が生じやすくなると考えられる。

環境要因と OSA の各項目との相関においては、Fac2 は、全睡眠時間の場合と同様の傾向である。Fac4 については他の時間区分の場合と同様に Tp_A と負の有意な相関を示しており、時間区分によらず疲労回復には室内の放射温度が影響していると考えられる。

Table 4 Spearman's rank correlation coefficient matrix between observable variable candidate during period of 90 minutes after the start of sleep. (*<0.05, **<0.01), "_A" and "_SD" mean the average value and standard deviation, respectively.

		Vital signs					Environment							
		BM_A	HR_A	HR_SD	LFHF_A	LFHF_SD	Tc_A	Tc_SD	Hc_A	Hc_SD	CO ₂ _A	CO ₂ _SD	Tp_A	Tp_SD
Vital signs	BM_A	1.												
	HR_A	0.09	1.											
	HR_SD	0.32 *	0.33 *	1.										
	LFHF_A	0.04	0.09	0.06	1.									
	LFHF_SD	0.02	0.31 *	0.24	0.65 **	1.								
Environment	Tc_A	0.33 *	0.18	0.07	-0.16	0.07	1.							
	Tc_SD	0.03	0.24	0.34 *	0.23	0.29 *	0.10	1.						
	Hc_A	0.15	-0.03	-0.08	-0.16	-0.04	0.59 **	0.06	1.					
	Hc_SD	0.16	-0.04	0.19	-0.04	0.16	0.26	0.13	0.24	1.				
	CO ₂ _A	0.22	0.15	0.35 *	0.13	0.05	-0.12	0.12	-0.16	0.22	1.			
	CO ₂ _SD	0.26	0.20	0.37 **	0.09	0.15	0.19	0.31 *	-0.03	-0.16	0.33 *	1.		
	Tp_A	0.10	0.45 **	0.13	-0.16	0.17	0.44 **	0.25	0.16	0.05	-0.03	0.32 *	1.	
Tp_SD	0.19	0.14	0.24	0.15	0.10	-0.03	0.42 **	-0.18	-0.42 **	0.13	0.30 *	0.00	1.	
OSA	Fac 1	-0.17	-0.29 *	-0.11	0.10	0.19	0.01	0.16	0.06	0.20	-0.23	-0.09	-0.16	-0.14
	Fac 2	-0.33 *	-0.13	-0.06	0.02	0.10	0.04	0.02	0.20	0.04	-0.30 *	-0.31 *	-0.20	-0.06
	Fac 3	-0.20	0.19	-0.13	-0.40 **	-0.16	0.01	-0.12	0.15	0.01	-0.17	-0.23	0.18	0.01
	Fac 4	-0.29 *	-0.53 **	-0.13	0.16	0.12	-0.19	-0.02	0.09	0.18	-0.13	-0.21	-0.47 **	-0.17
	Fac 5	-0.36 **	-0.08	-0.15	0.01	0.03	0.06	0.16	0.05	0.09	-0.33 *	-0.21	0.14	-0.22

Table 5 Spearman's rank correlation coefficient matrix between observable variable candidate during period of 90 minutes before getting up. (*<0.05, **<0.01), "_A" and "_SD" mean the average value and standard deviation, respectively.

		Vital signs					Environment								
		BM_A	HR_A	HR_SD	LFHF_A	LFHF_SD	Tc_A	Tc_SD	Hc_A	Hc_SD	CO ₂ _A	CO ₂ _SD	Tp_A	Tp_SD	Lxlog_A
Vital signs	BM_A	1.													
	HR_A	-0.13	1.												
	HR_SD	-0.06	0.27	1.											
	LFHF_A	0.17	0.03	-0.16	1.										
	LFHF_SD	0.05	0.30 *	0.21	0.49 **	1.									
Environment	Tc_A	0.01	0.19	0.18	-0.24	-0.08	1.								
	Tc_SD	-0.18	0.13	0.12	0.02	0.05	-0.04	1.							
	Hc_A	-0.02	-0.03	0.06	-0.31 *	-0.09	0.66 **	0.00	1.						
	Hc_SD	-0.32 *	-0.09	-0.13	-0.10	-0.09	0.03	0.21	0.13	1.					
	CO ₂ _A	0.11	0.03	0.30 *	0.33 *	0.23	-0.14	-0.09	-0.32 *	0.29 *	1.				
	CO ₂ _SD	0.45 **	-0.30 *	0.16	0.09	0.05	0.17	0.13	0.13	-0.07	0.04	1.			
	Tp_A	-0.36 **	0.39 **	0.29 *	-0.26	0.05	0.49 **	0.16	0.31 *	-0.17	-0.19	-0.15	1.		
	Tp_SD	0.18	0.03	-0.30 *	0.08	0.04	0.00	0.21	-0.18	0.02	-0.03	0.08	-0.05	1.	
	Lxlog_A	-0.13	-0.07	0.14	0.02	-0.04	-0.31 *	0.29 *	-0.27	-0.14	-0.08	0.02	0.24	0.06	1.
OSA	Fac 1	0.01	-0.23	0.02	-0.07	-0.07	0.04	0.13	0.27	0.17	-0.18	0.13	-0.15	-0.08	-0.13
	Fac 2	-0.18	-0.20	-0.29 *	-0.22	-0.14	0.13	-0.08	0.41 **	0.14	-0.33 *	-0.07	-0.08	-0.21	-0.19
	Fac 3	-0.30 *	0.03	-0.35 *	-0.49 **	-0.45 **	0.04	0.10	0.08	0.21	-0.27	-0.15	0.20	0.11	0.06
	Fac 4	-0.02	-0.43 **	-0.13	0.05	-0.07	0.01	0.01	0.24	0.36 **	-0.04	0.11	-0.36 **	-0.06	-0.18
	Fac 5	-0.10	-0.02	0.12	-0.15	-0.14	0.02	0.04	0.20	-0.09	-0.31 *	0.01	0.12	-0.33 *	0.01

5. バイタル因子・環境因子を用いた主観的睡眠感のモデル化

5.1 モデル化の方法

前章の分析から主観的睡眠感は、寝ている間の体動の回数や HRV といったバイタルの状態、更に寝室内の環境状況とも関連していることが示された。同時に寝室内の環境状況は体動や HRV とも関連している。そこで、OSA によって得られた主観的睡眠感を目的変数としてバイタル因子・環境因子によって説明し、同時にバイタル因子を目的変数として環境因子によって説明するモデルを検討する。考えられる観測変数の組み合わせを用いて分析を行い、各因子間の関係を検討し構造化するために共分散構造分析を行った。観測変数の候補としたのは前章の分析で得られた OSA の各因子と有意な相関がある変数である。モデル化は探索的にモデリングを行い、採用したすべての因子を用いた分析結果からパス係数の値が低く、統計的に有意でない因子から順番に削除して再度分析する手順を繰り返し、説明力とともに適合度が高いモデルを選択した。分析には、IBM SPSS Amos 26.0.0 を用いた。モデルの適合度指標には、母数がそれほど多くなく、モデル自体も複雑でないことから、Goodness Fit of Index (以下、GFI)、Standardized Root Mean square Residual (以下、SRMR)、カイ二乗検定、Comparative Fit of Index (以下、CFI) を用いた。

5.2 モデル化の結果

起床時眠気 (Fac1)、入眠と睡眠維持 (Fac2)、夢み (Fac3)、疲労回復 (Fac4)、睡眠時間 (Fac5) をそれぞれ目的変数とした時のパス図を Fig. 5 ~ 9 に示す。パス図の四角枠は観測変数、丸枠は誤差変数 (又は潜在変数) である。双方向矢印は変数同士の関連を表し数値は共分散を、片方向矢印は因果関係を表しパス係数は標準化推定値で相対的な関係の強さを表す。本研究の分析においては、誤差変数の分散を 1 とし、最小化には最尤法を用いて計算を行った。全てのモデルにおいて多変量正規性が確認できなかったため、それぞれ Bollen-Stine のブートストラップ検定を用いて 10,000 回の試行を行い、全ての標本が利用可能で、Fig. 5 ~ 9 において P 値が 0.381、0.064、0.375、0.238、0.064 であることを確認した。

Fig. 5 は「起床時眠気」を目的変数としたモデルである。本モデルの適合度は GFI=0.98、SRMR=0.15、カイ二乗値=3.33 (自由度 3)、CFI=0.99 であった。「起床時眠気」は「睡眠開始後 90 分間」の因子が影響している。「起床時眠気」に対して「体動数の平均値」の総合効果は-0.23 で「心拍数の平均値」の総合効果は-0.25 であった。これは睡眠初期の体動数や心拍数が低値であればあるほど起床時の眠気が抑えられる可能性を示している。「心拍数の平均値」に対する「壁面放射温度の平均値」の総合効果は 0.44、「壁面放射温度の標準偏差」の総合効果は 0.26 であり、暑熱環境において睡眠開始後 90 分間では放射温度が

低値、又はバラツキが少ないことが心拍数を低値にする可能性が示された。

Fig. 6は「入眠と睡眠維持」を目的変数としたモデルである。本モデルの適合度は GFI=0.96、SRMR=0.17、カイ二乗値=3.53（自由度 1）、CFI=0.73 であった。「入眠と睡眠維持」に対する「睡眠開始後 90 分間の体動数の平均値」の総合効果は-0.22 であった。また、「全睡眠時間の二酸化炭素濃度の平均値」の総合効果は-0.29 であった。これは、睡眠初期の体動数が低値であるほど、また睡眠中の二酸化炭素濃度が低値なほど、睡眠が持続する可能性が示された。

Fig. 7は「夢み」を目的変数としたモデルである。本モデルの適合度は GFI=0.95、SRMR=0.17、カイ二乗値=8.18（自由度 7）、CFI=0.97 であった。「夢み」に対する「起床前 90 分間の心拍数の標準偏差」の総合効果は-0.44 であった。また、「全睡眠時間の LF/HF の平均値」の総合効果は-0.44 であった。これは起床前の心拍数がバラつかないほど、または夜通し LF/HF が低値で安静な状態であるほど夢を見る頻度が低くなる可能性が示された。「起床前 90 分間の「心拍数の標準偏差」に対する「二酸化炭素濃度の平均値」の総合効果は 0.31 で、「二酸化炭素濃度の標準偏差」の総合効果は 0.30 であり「壁面放射温度の平均値」の総合効果は 0.29 であった。起床直前の二酸化炭素の濃度やバラツキが低い、または起床直前の壁面放射温度が低いと心拍数のバラツキが少ない。

Fig. 8は「疲労回復」を目的変数としたモデルである。本モデルの適合度は GFI=0.98、SRMR=0.09、カイ二乗値=3.15（自由度 2）、CFI=0.97 であった。「疲労回復」は「起床時眠気」と似たモデルであり、「睡眠開始後 90 分間の」の因子が影響している。異なる因果関係は「疲労回復」に対して「睡眠開始後 90 分間の壁面放射温度の平均値」が直接的に影響している点である。その総合効果は-0.26 で、暑熱環境において睡眠初期の壁面放射温度を低値に抑えることで疲労回復感が高くなる可能性が示された。

Fig. 9は「睡眠時間」を目的変数としたモデルである。本モデルの適合度は GFI=0.96、SRMR=0.28、カイ二乗値=3.53（自由度 1）、CFI=0.81 であった。「睡眠時間」は「入眠と睡眠維持」と同じモデルであるが、パス係数が異なる。「睡眠時間」に対する「睡眠開始後 90 分間の体動数の平均値」の総合効果は-0.36 であり、「全睡眠時間の二酸化炭素濃度の

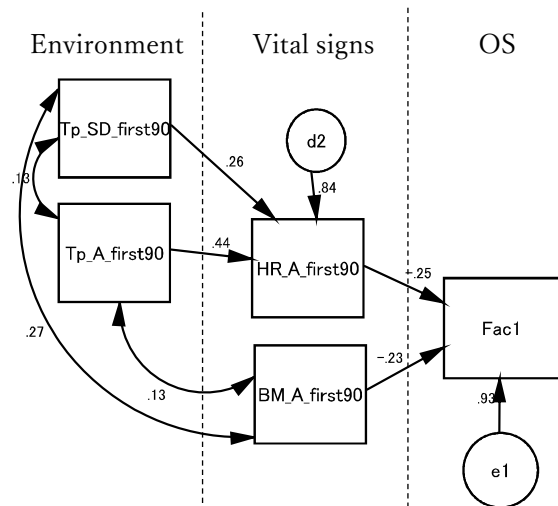


Fig. 5 Model of Sleepiness or rising (Fac 1)

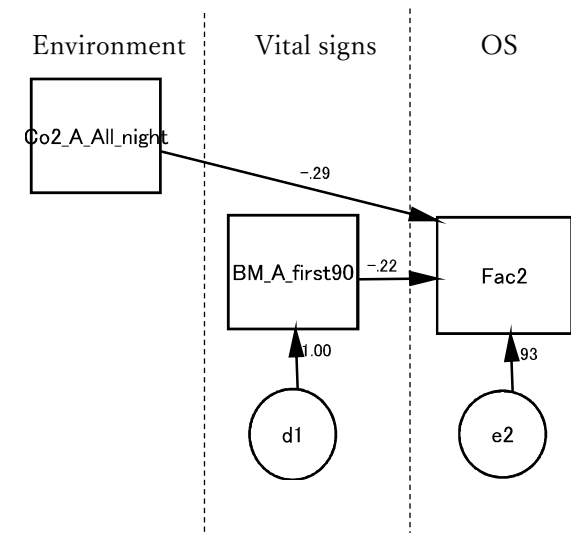


Fig. 6 Model of Initiation and maintenance of sleep (Fac 2)

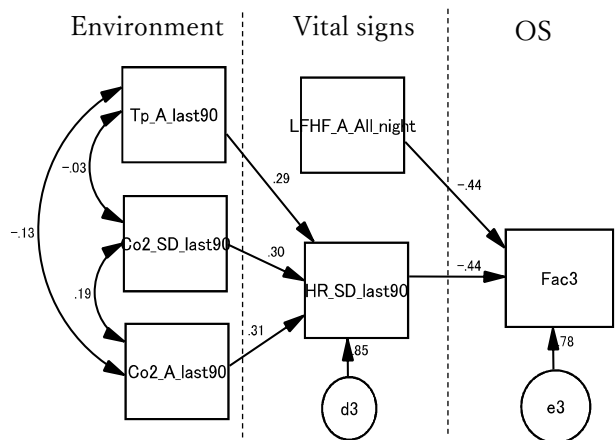


Fig. 7 Model of Frequent dreaming (Fac 3)

「入眠と睡眠維持」と比べると体動数の影響が大きくなっている。

5.3 モデルに対する考察

主観的睡眠感に影響を及ぼすバイタル因子は、睡眠開始後 90 分間の体動や心拍状況であることが多い。これは、睡眠開始後の深い睡眠が重要とする既往研究¹⁹⁾と同様である。特に体動数は OSA の 5 因子中 4 因子に影響を与えており、睡眠状況の良し悪しを決める大きな要素であると考えられる。ただし、いずれのモデルでも潜在変数のパス係数が高く、今回計測されたバイタル因子の影響よりもその他の要因の影響が大きい。考えられる因子の中でも本研究で考慮していない個人差の影響が大きいと考えている。

バイタル因子に環境因子が影響を及ぼすことを示したが、体動数と環境因子の関係を示す説明力の高いモデルは得られなかった。体動を誘引する環境因子を明らかにすることが寝室内環境の改善に繋がると考える。「起床時眠気」、「夢み」、「疲労回復」では睡眠開始後 90 分間の心拍数について、二酸化炭素濃度の高低やバラツキ具合、壁面放射温度の高低やバラツキ具合が影響している。「夢み」では二酸化炭素濃度の高低やバラツキ具合が

心拍数のバラツキ具合に影響するという因果となっているが、因果関係が逆であるとも考えられる。

検討した環境因子の中では、壁面放射温度が心拍数に影響を与えている。心拍の変動が体温調節の目的で変動することを考慮すると、本研究の実験条件下では睡眠時の暑熱感に最も影響を与えている因子は壁面放射温度である可能性を示している。この壁面放射温度の変動は人体表面の体温変動を反映している可能性があり、今後詳細に検討する必要がある。

また、「入眠と睡眠維持」、「疲労回復」、「睡眠時間」では環境因子が主観的睡眠感に直接影響を及ぼしていた。二酸化炭素濃度や壁面放射温度が影響を与えている。これは、井上ら²⁰⁾が示した換気による空気質の改善によって入眠と睡眠維持 (Fac2) の主観的睡眠感が向上するとした内容と一致した。ここから、二酸化炭素濃度が高いことは入眠や睡眠を阻害すると考えられる。温熱感が主観的睡眠感に影響を与えるという論点においては、冬期において気温が下がる程 OSA 得点が下がるとした鍋島ら²¹⁾の結果にも通じる。今回は夏季における計測のため放射温度が上がると OSA 得点は下がったが、周囲温度が主観的評価に影響がある点は一致した。今後の課題として中間期における結果を加えて、年間を通じた検討を行う必要がある。垣鏑ら¹⁰⁾は入眠時に温度を低くしておき起床時刻付近で至適温度にすると睡眠の質を向上させる効果が期待できるとしている。本研究でも、睡眠開始 90 分間に放射温度が低い方が疲労回復 (Fac4) の得点が高かった。入眠時の体温低下を促進する方が、睡眠の質を上げられる可能性を示した垣鏑ら¹⁰⁾の見解と同様の結果が得られた。以上から壁面放射温度の間接効果も含めると寝室のこれらの室内環境を整えることで、睡眠感の向上が期待できる。

睡眠感に最も影響を与えると仮説をたてていた心臓自律神経バランスの指標とされている LF/HF に関しては「夢み」には影響を与えたもののそれ以外では有意な影響は見られなかった。これは谷田¹⁴⁾が示した一晩の平均 LF/HF 値と OSA 得点とを比較し、3 因子と合計点で有意な相関を示したとする結論とは異

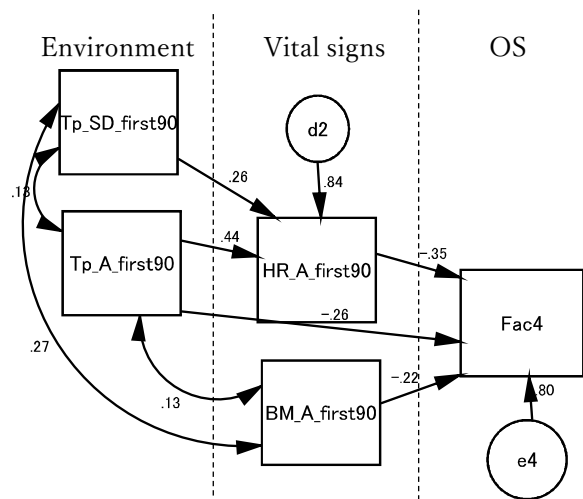


Fig. 8 Model of Refreshing (Fac 4)

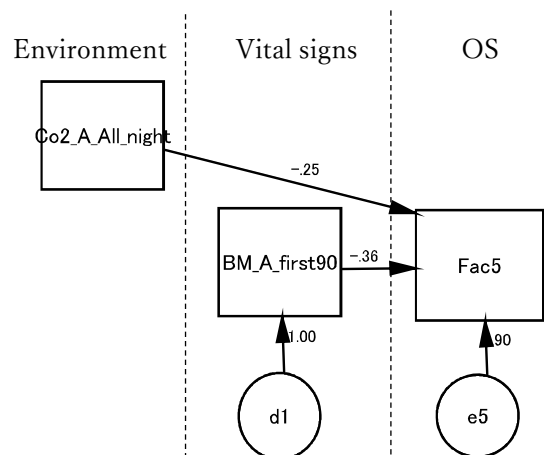


Fig. 9 Model of Sleep length (Fac 5)

なる。被験者数やサンプル数は今回の実験の方がわずかに多い。実験条件の違いとして被験者の年齢層、実験室実験であることや接触を要する PSG (Polysomnography) の利用等があり、これらが何らかの影響を及ぼしたものと考えられ、今後さらなる検討が必要である。

6. まとめと今後の展望

睡眠時の被験者実験を行い、OSA の 5 因子、体動数・心拍数・LF/HF からなるバイタル因子、壁面放射温度・二酸化炭素濃度からなる環境因子との間の相互関係を明らかにした。得られた知見を列挙する。

- ・主観的睡眠感バイタル因子や環境因子に影響を受け、バイタル因子は環境因子に影響を受けた。
- ・「起床時眠気」は睡眠開始後 90 分間の体動数、心拍数の平均値から影響を受けた。
- ・「入眠と睡眠維持」と「睡眠時間」は睡眠開始後 90 分間の体動数の平均値、一晩の二酸化炭素濃度の平均値から影響を受けた。
- ・「夢み」は全睡眠時間の LF/HF の平均値、起床前 90 分間の心拍数のバラツキから影響を受けた。
- ・「疲労回復」は睡眠開始後 90 分間の体動数、心拍数の平均値、壁面放射温度から影響を受けた。
- ・主観的睡眠感に対して睡眠開始後 90 分間の体動や心拍数の変動、壁面放射温度の状況から影響を受け、その中でも体動数から最も影響を受けた。
- ・睡眠開始後 90 分間の心拍数の平均値は壁面放射温度の平均値、バラツキから影響を受けた。
- ・起床前 90 分間の心拍数のバラツキ具合は、二酸化炭素濃度の平均値、バラツキ、壁面放射温度の平均値から影響を受けた。
- ・計測した環境因子の中では二酸化炭素濃度と壁面放射温度が、バイタル因子の中では体動数と心拍数が最も主観的睡眠感に影響を及ぼす因子である。
- ・体動を誘引する環境因子については本研究の結果だけでは特定することが出来なかった。
- ・温度条件をコントロールする既往研究と本研究において一部の項目に関して同様の傾向が見られた。

今後は本研究の睡眠感に最も影響を及ぼした睡眠開始後 90 分間の体動に対して影響を与える環境因子や、モデルで潜在変数となっていて影響度を評価できなかった因子を明らかにしていきたい。特にバイタル因子については個人差が見受けられ、その要因を明らかにすることが潜在変数の解明に繋がると考えている。その他、睡眠の質に影響を及ぼすとされる昼間の活動量や飲酒の有無、計測を行わなかった騒音の影響なども因子の候補と考えられる。本研究では暑熱環境における実験をおこなったが、寒冷環境では本研究と違った因子が影響を与える可能性も考えられる。また接触型センサーと非接触型センサーの相違が生理量や心理量に及ぼす影響については今後改めて検討する必要がある。より日常的な睡眠状態で主観的睡眠感を評価するためには自宅寝室での計測が最も適していると考えられる。今後の研究ではこれらを考慮した実験を基により良い睡眠環境を明らかにしていきたい。

謝辞

最後に、研究に際しマット式センサーをご提供頂いた bio sync 社関係各位に心から感謝の意を表します。また、実験にあたり多大なる尽力をして頂いた、当時近畿大学大学院総合理工学研究科修士課程の田中佑奈さん、当時近畿大学建築学部の岩崎健介君、同じく佐藤託夢君に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 梁瀬度子(鳥居鎮夫 編): 睡眠環境学, 朝倉書店, pp. 152-156, 1999. 10
- 2) 秋山雄一, 三宅絵美香, 松崎里穂, 尾方壮行, 都築和代, 田辺新一: 夏季の自宅寝室における温熱環境が睡眠段階を考慮した睡眠の質に及ぼす影響, 日本建築学会環境系論文集, 第 83 巻, 第 745 号, pp. 277-284, 2018. 3,
- 3) 中村和弘: 図説体温調節の中枢神経機構, 日本臨床社, 日本臨床 70 (6), pp. 922-926, 2012. 6
- 4) Carrington MJ, Barbieri R, Colrain IM, et al.: Changes in cardiovascular function during the sleep onset period in young adults. *J Appl Physiol*, 98: pp. 468-476, 2005.
- 5) P. Busek, J. Vankova, J. Opavsky, J. Salinger, S. Nevsimalova: Spectral analysis of heart rate variability in sleep, *Physiological Research*, pp. 369-376, 2005.
- 6) 四十竹美千代, 安井宏, 堀悦郎, 八塚美樹, 笠島茂, 小野武年, 西条寿夫: 温熱環境の睡眠および自律神経活動に及ぼす影響, 富山大学看護学会誌, 第 11 巻 1 号, pp. 19-28, 2012. 3
- 7) Castro LS, Castro J, Hoexter MQ, Quarantini LC, Kauati A, Mello LE, Santos-Silva R, Tufik S, Bittencourt L.: Depressive symptoms and sleep: a population-based polysomnographic study. *Psychiatry Research*, Vol 210, Issue 3, pp. 906-912, 2013.

- 8) Walsh JK, Coulouvrat C, Hajak G, Lakoma MD, Petukhova M, Roth T, Sampson NA, Shahly V, Shillington A, Stephenson JJ, Kessler RC: Nighttime insomnia symptoms and perceived health in the America Insomnia Survey (AIS). *Sleep*, Vol 34, No. 8, pp. 997-1011, 2011. 8
- 9) 川島庸, 垣鏑直: 夏季の睡眠時における最適な冷房条件に関する実験的研究, *人間と生活環境*, 第 11 巻, 第 1, pp. 17-23, 2004.
- 10) 垣鏑直, 川島庸: 体温のサーカディアンリズムを考慮した夏季の睡眠時の温熱環境条件の評価, *日本生理人類学会誌*, 第 15 巻, 第 3 号, pp. 57-63, 2010.
- 11) 糸井川高徳, 羽山広文, 山岸浩: 冷房方式の違いによる睡眠時の生理心理反応の違いに関する実験的研究, *日本建築学会環境系論文集*, 第 81 巻, 720 号, pp. 133-140, 2016. 2
- 12) 本多英里, 伊香賀俊治, 大平昇, 岡島慶治, 海塩渉: 夏季の温熱環境制御が睡眠と翌日の作業効率に与える影響の経済性評価, *日本建築学会環境系論文集*, 第 81 巻, 第 724 号, pp. 523-533, 2016. 6
- 13) 山本由華史, 田中秀樹, 高瀬美紀, 山崎勝男, 阿住一雄, 白川修一郎: 中高年・高齢者を対象とした OSA 睡眠調査票 (MA 版) の開発と標準化, *脳と精神の医学*, 10 巻 4 号, pp. 401-409, 1999. 12
- 14) 谷田恵子: OSA 睡眠調査票による睡眠感と睡眠中の心拍変動パワースペクトル指標との関連, *日本看護技術学会誌*, Vol. 9 No. 3, pp. 19-26, 2010
- 15) 藤原幸一: ヘルスモニタリングのための心拍変動解析, *システム制御情報学会誌*, Vol. 61, No. 9, pp. 381-386, 2017
- 16) 谷田恵子, 楊橋隆哉, 本田智子, 柴田真志: 1 分間区分における各睡眠段階の心拍変動パワースペクトル指標の比較, *日本看護研究会雑誌*, Vol. 34, No. 1, pp. 191-198, 2011
- 17) Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology: Heart rate variability Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use, *Circulation*, 93, pp. 1043-1065, 1996.
- 18) 高田 晴子, 高田 幹夫, 金山 愛: 心拍変動周波数解析の LF 成分・HF 成分と心拍変動係数の意義—加速度脈波測定システムによる自律神経機能評価—, *日本総合検診医学会誌*, Vol. 32, No. 6, pp. 504-512, 2005
- 19) Takahashi Y, Kipnis DM, Daughaday WH: Growth hormone secretion during sleep., *The Journal of Clinical Investigation*, Vol. 47, No. 9, pp. 2079-2090, 1968
- 20) 井上莉沙, 竹内悠香, 秋山雄一, 尾方壮行, 都築和代, 田辺新一: 寝室内環境が睡眠の質に与える影響 (第 4 報) 空気室を考慮した寝室内環境が睡眠に及ぼす影響, *空気調和 衛生工学会大会 学術講演論文集*, 第 6 巻, pp. 93-96, 2018. 9
- 21) 鍋島佑基, 大畑瑛悠, 都築和代, 前田和毅, 望月要佑: 冬季の避難所を模擬した睡眠環境における人の主観申告に関する研究, *日本建築学会環境系論文集*, 第 84 巻, 第 756 号, pp. 143-150, 2019. 2

注

- 注 1) 本被験者実験の実施にあたって、近畿大学建築学部研究倫理委員会から承認番号 2018・001 の承認を受けている。
- 注 2) 実験に用いたマット式センサーの心拍計測精度については以下のように確認を行った。マット式センサーは圧力変動を感知して周波数解析を行い、0.5 秒毎にその結果をリアルタイムで出力している。そのため、心拍数データの精度検証を心電計との比較により行った。通常、HRV 解析を行う際は、サンプリング周波数 250Hz 以上の心電計により計測したデータを解析することが推奨とガイドラインで示されている²²⁾。そこでサンプリング周波数 250Hz である心電計 eMotion Faros90° (Mega Electronics 社製) と比較する。マット式センサーの 1 分毎の心拍数と心電計の RR 間隔の逆数をとり、1 分間毎に平均した値を比較した。結果を Fig. A に示す。被験者男性 2 名・女性 1 名の N 数 1775 のデータの相関 R は 0.88 であり、母集団における 95%信頼区間の母相関係数は $0.869 < \rho < 0.890$ で、マット式センサーにより出力される心拍数データは一般的なサンプリング周波数の心電計と同程度の信頼性を担保すると判断した。
- 注 3) RR 間隔とは、心電図によって計測される R 波と R 波の時間間隔のことで、心拍数の逆数に相当する。
- 注 4) AR モデルは自己回帰モデルとも言われ、以下の式で表される。

$$x_s = \sum_{j=1}^M a_j x_{s-j} + \epsilon_t$$

x_s : 時刻 t の時の x 値 M : 現時点から前のデータ数 j : 現時点から j 個前 a_j : 現時点から j 個前の係数 a ϵ_t : 時刻 t の時のノイズ

AR モデルの確率密度関数 (PSD) は以下で計算される。

$$P(f) = \frac{\sigma^2}{|1 - \sum_{j=1}^M a_j e^{-2\pi i j f}|^2}$$

$P(f)$: PSD M : 現時点から前のデータ数 j : 現時点から j 個前 i : 虚数単位 a_j : 現時点から j 個前の係数 a

f : 周波数 σ^2 : パラメータ推定で得た分散

求められた PSD の例を Fig. B に示す。

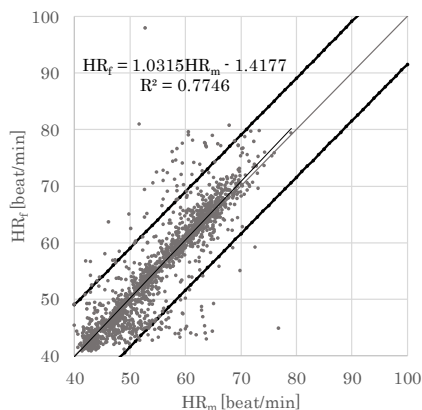


Fig. A Heart rate HR_m measured by Non-contact mat sensor compared to heart rate HR_t measured by Faros90. Bold lines show a range of two-sided 95% confidence interval. n:1775

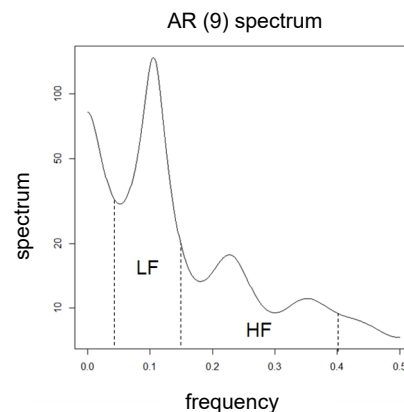


Fig. B Sample of AR spectrum