

〈特別研究課題〉 省エネ・快適性に注目した夏期の室内温熱環境制御
に関する研究

助成研究者 名城大学 垣鏑 直



省エネ・快適性に注目した夏期の室内温熱 環境制御に関する研究

垣鏑 直
(名城大学)

A Study on indoor thermal environments in summer in consideration of energy conservation and thermal comfort

Naoshi Kakitsuba
(Meijo University)

Abstract

For investigating the better way of controlling indoor thermal environment in consideration of circadian rhythm, four young healthy male subjects participated night and daytime experiments from August to September, 2008. Under the four given thermal conditions during night, rectal temperature (T_{re}), skin temperatures (T_{sk}) at 7 sites, polysomnogram and oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) were continuously measured. In addition, subjective evaluation on sleep quality was recorded before sleep and at awake. Under the three given thermal conditions during daytime, T_{re} , T_{sk} , $\dot{V}O_2$ and heart rate variability were continuously measured from 9:00 to 18:00 on each occasion. In addition, thermal sensation vote and comfort vote were recorded periodically. Physiological and psychological responses resulted in that the most suitable temperature during night and daytime may be a gradual increase in room temperature in consideration of diurnal change in deep body temperature.

1. はじめに

最近の省エネに対する関心が高まっているが、室内の温熱環境を一定に制御することの是非はあまり問われていない。例えば、オフィスの夏期及び冬期のオフィス内温熱環境条件と心理反応を調査では、同じ温湿度でも午前中と午後では温冷感に差が見られ、夏期では午後暑い側にシフト

し、不快感が強くなる傾向がある。いわゆる体温のサーカディアンリズムの影響を受ける。また、性差もあり、女性は室内温熱環境に対する不満が強いことも指摘されている（垣鏑ほか，2005）。このことから、省エネかつ快適な室内温熱環境制御を目的とする場合、やはりダイナミックな温湿度制御を模索するべきと考えた。

昼間だけでなく、夜間の睡眠時においても冷暖房の重要性は認識されている。特に夏期はエアコンなどで冷房しない限り、快適な睡眠を確保できない状態になっている。先行研究では、一定制御するなら28℃/60%を目標に温熱環境制御をした方が良いという知見を得ている（川島，垣鏑，2004；川島，垣鏑，2004）。しかし、睡眠中もサーカディアンリズムの影響を受け、体温が変化していることから、質の良い睡眠を確保するためには、一定制御よりもダイナミックな温湿度制御が省エネで快適であると考えた。

以上の観点ことから、体温のサーカディアンリズムを考慮した冷房制御に注目して、実験的研究を行ったので、ここに報告する。

2. 研究の概要

睡眠実験も覚醒時の実験（昼間の実験も、名城大学理工学部環境創造学科垣鏑研究室に設置されている人工気候室を用いて、2008年8月上旬～9月上旬に実施した。

2-1. 昼間の室内温熱環境制御に関する実験的研究

2-1-1. 実験プロトコール

実験当日、被験者は8:00までに人工気候室に入室し、センサーなどを装着し、安静にした後、9:00から測定を開始、18:00まで測定を行った。服装はトランクスのみとした。朝食（400カロリー以下）は8時まで、昼食（200カロリー）は11～12時に摂取してもらった。水分摂取は500mlまでとした。

2-1-2. 温湿度条件

相対湿度は終日60%で一定とし、実験開始時（9:00）に26℃に制御し、その後18:00まで徐々に段階的に28℃まで室温を上昇させる条件（条件1）、逆に9:00に28℃に制御し、その後18:00まで徐々に段階的に26℃まで低下させる条件（条件3）と28℃で一定に制御した条件（条件2）の条件の温度制御を行った。

2-1-3. 測定項目及び使用機器

(1)被験者の体型計測

被験者の身長（身長計，ヤガミ YG-200），体重（体重計，タニタ BC303）を計測し，体表面積を算出した。また，皮下脂肪圧を栄研キャリパーの皮脂厚計（ヤガミ，MK-1）を用いて，上腕三頭筋，肩甲骨下角，上腕二頭筋，胸，腸骨稜，腸棘上，腹前面，大腿前面，下腿の皮下脂肪圧を計測した。周径と幅径は，マルチン式人体計測器（ヤガミ，YM-1）を用いて，屈曲上腕囲，腹囲，殿囲，脛脛囲の周径と上腕骨顆間幅，大腿骨顆間幅の幅囲を計測した。結果の一部表2-1-1に示す。

(2)生理反応

被験者の生理反応として，皮膚温，直腸温，心電図，酸素摂取量を測定した。皮膚温，直腸温は連続測定したが，酸素摂取量と心電図は，午前（9:00～10:00），午後（13:00～14:00），夜

(17:00～18:00) の3回測定した。測定には表2-1-2に示した測定器を用いた。

(3)心理反応

表2-1-3に示す尺度を用いて温冷感、乾湿感、快適感を酸素摂取量と心電図と同じ時間帯に申告してもらった。

2-2. 睡眠時の室内温熱環境制御に関する研究

2-2-1. 実験プロトコール

実験当日は、被験者を21:30に人工気候室に入室させ、前室（28℃/60％）において電極などを23時まで装着した。その後、コントロール条件（30℃/80%）で曝露し、0:00に主室に移動し、OSA睡眠調査票に記入させ、消灯した。起床は翌朝7:00とし、OSA睡眠調査票を記入させた。

表2-1-1 被験者資料

被験者	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)
TK	24	180.4	65.0
YY	21	178.0	59.8
DH	22	168.5	55.2
MM	22	182.2	70.4
平均±SD	22.3±1.3	177.3±6.1	62.6±6.6

表2-1-2 生理計測項目と使用した測定機器

測定項目	測定機器	備考
皮膚温・直腸温	携帯用長時間体温ロガー(グラム社製, LT-8)	皮膚温は、前額部、胸部、前腕部、手背部、大腿部、下腿部、足背部の皮膚温7点を測定
心電図	生理信号計測計(DAQ, Intercross 社製)	HRVの解析は付属ソフトを使用
代謝量	呼吸代謝測定装置(VO2000, S&ME 社製)	1時間、10秒間隔で測定してその酸素消費量を測定

表2-1-3 主観申告の尺度

温冷感	乾湿感	快適感
1. 暑い (+3)	1. 非常に湿っている (+3)	1. 快適 (0)
2. 暖かい (+2)	2. 湿っている (+2)	2. やや快適 (-1)
3. やや暖かい (+1)	3. やや湿っている (+1)	3. 不快 (-2)
4. なんともない (0)	4. なんともない (0)	4. 非常に不快 (-3)
5. やや涼しい (-1)	5. やや乾燥している (-1)	
6. 涼しい (-2)	6. 乾燥している (-2)	
7. 寒い (-3)	7. 非常に乾燥している (-3)	

2-2-2. 被験者

実験開始4日前から、被験者の生活リズムを整えるために、就寝は午前0時前後、起床は午前7時前後を目安に生活させ、睡眠日誌を記録させた。また、予備実験を行い、実験室での睡眠に慣れ、睡眠に支障ないことを確かめた。実験当日は、シャワーと食事は、就寝前（食事に関しては20:00前後）までに各自で済ませてもらい、実験中における食事は禁止した。但し、水（500ml）は就寝30分前まで許可した。また、被験者の着衣は綿100％の半袖Tシャツとハーフパンツとし、寝具は綿シーツを布いたベッド、枕及びタオルケットのみとした。

2-2-3. 温湿度条件

先行研究の結果を参考に、コントロール条件として28℃/60%で一定のコントロールを条件1とし、比較条件は、湿度は常に一定にし、温度を変化させた。条件2は入眠時に28℃に制御し、徐々に段階的に低下させ、起床時に26℃にする条件、条件3は逆に入眠時に26℃に制御し、徐々に段階的に上昇させ、起床時に28℃にする条件、条件4は入眠時に28℃に制御し、その後3時間掛けて徐々に段階的に26℃まで低下させ、1時間維持した後に、徐々に段階的に上昇させ、起床時に再び28℃にする条件とした。

2-2-4. 測定項目および測定方法

(1) 生理反応

脳波、眼球電図、筋電図及び直腸温を就寝前から起床後まで連続測定した。直腸温は、直腸温用プローブを肛門より挿入し、体温ロガー（グラム LT-8）に接続し、1分間隔で測定した。電極位置はC₃・C₄と α 波が明瞭であるO₁・O₂の4部位とした。また、筋電図は、オトガイ筋とオトガイ下筋の両筋間による双極導出とした。

脳波計（EEG-1100、日本光電工業）を用いて測定し、睡眠段階はRechtschaffen and Kalesの睡眠段階判定マニュアルに従って判定し、Williamsらの各睡眠変数をもとに、睡眠経過図、総就床時間、入眠潜時、総睡眠時間、睡眠効率及び各睡眠段階出現率を算出した。また、就寝直前と起床直後に呼吸代謝測定装置（VO2000、S&ME社製）を用いて酸素消費量を測定した。

(2) 心理反応

睡眠前後の心理反応をOSA睡眠調査票を用いて調査した。睡眠調査票の回答から、主観的睡眠感の5項目の因子得点を算出した。各因子ともに高得点であれば良い睡眠感を示すと言われている。また、起床時における身体的状態を自由記入してもらった。

3. 結果と考察

3-1. 夏期の昼間の室内温熱環境制御に関する実験的研究

3-1-1. 直腸温の経時変化

昼間における被験者の直腸温の平均値の経時変化を図3-1-1に示す。各条件下における直腸温はサーカディアンリズムの影響を受け、午前から午後に上昇する傾向が見られた。通常は、起床時に最低値を記録するが、条件に関わらず、全被験者の直腸温は11時前後で最低を記録し、その後は室温の影響を大きく受けていることを確かめた。また、設定室温の違いが大きく表出するのは14:00時以降であることもわかった。つまり、室温の違いで直腸温の上昇期に大きな差が発現することを示唆している。

生理学の知見では、体温のサーカディアンリズムは環境の影響をあまり受けず、堅固なリズムであることが知られているが、生活習慣でリズムの位相がずれることも知られている。本研究では、睡眠時と覚醒時の連続13時間の実験を行った結果、後述する睡眠実験の結果でも考察するが、睡眠時は室温の影響を殆ど受けず、被験者の日常の体温の変化から推定した体温のサーカディアンリズムから大きく隔たることなく、入眠時に高く、起床時に低下する変動パターンを示した。従って、睡眠中の体温はリズム堅固であることがわかった。それに反し、覚醒時、特に午後の体温の変化は室温の影響を大きく受けたことから、体温の上昇期にはサーカデ

イアンリズムが崩れやすいと考える。この仮説が正しいとするならば、午後から夕方の体温が上昇するような環境を与えるとサーカディアンリズムが確保でき、ストレス（リズムからのずれがストレスになると仮定した場合）を低減できると推測する。よって、与えられた条件では条件1が適切な室温制御と判断できる。

3-1-2. 皮膚温の経時変化

平均皮膚温の平均値の経時変化を図3-1-2に示す。皮膚温も直腸温と同様に各条件下における皮膚温はサーカディアンリズムの影響を受け、午前から午後にかけて上昇する傾向を確かめた。各条件とも午前は低下する傾向が得られ、午後は各条件で差が見られた。条件1では11:00に最低値を記録しその後測定終了時刻まで上昇した。条件2では12:00にまで低下しその後はほぼ一定で変化はあまり見られなかった。条件3では9:00～10:00までは上昇する傾向を示したが、その後測定終了時刻まで低下し続けた。これらのことから、室温の違いにより、上昇期（午後～夕方）の皮膚温の上昇に明らかな差が見られることを確かめた。よって、直腸温の変化による評価と同様に、サーカディアンリズムを考慮する場合、条件1が適切であると判断した。

3-1-3. 心電図の解析

時系列のR-R間隔をFFT解析して、スペクトル分析をすると、副交感神経の活動レベルを反映するHF成分が抽出できる。各測定時間帯のHFの変化を図3-1-3に示す。条件1では、午前はHFの値は相対的に低くなかったが、午後～夜は値が低下する傾向がわかる。条件2では、全ての時間帯で値が高かったが、条件3では、夜に値が高くなる傾向が見られた。HFが亢進すると生理的にはリラックスしていると判断できるが、室温の影響を受けることも報告されているので、結果的に、室温が一定の条件2はストレスが少ない条件と考えられる。

3-1-4. 酸素摂取量

朝昼夕の各時間帯の酸素消費量（ $\dot{V}O_2$ ）を図3-1-4に示す。条件1では昼の値が上昇する傾向が見られ、条件2は経時変化は見られず、条件3では昼から夕方の摂取量が低下する傾向が見られた。残念ながら、条件の良否の判断材料にはならなかったが、昼の摂取量が上昇した条件1では、その後の体温の上昇を誘引する原動力になっていると推察される。

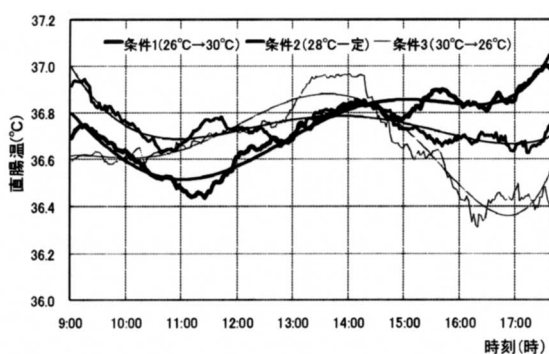


図3-1-1 覚醒時における直腸温の経時変化

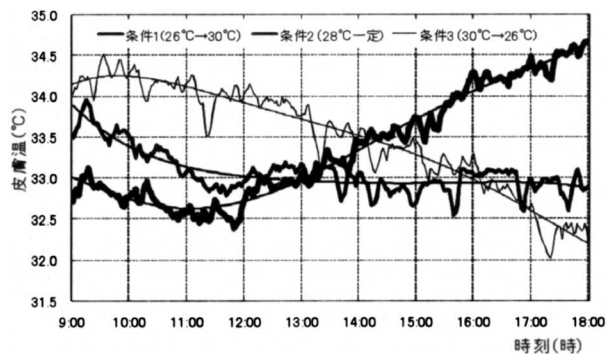


図3-1-2 覚醒時における平均皮膚温の経時変化

3-1-5. 心理反応の結果

1) 温冷感

各時間帯による温冷感申告を図3-1-5に示す。時間帯で比較すると、条件間で温冷感の申告値

に差が見られた。条件1では室温上昇に伴い温冷感が「涼しい」から「暖かい」にシフトし、条件3では室温低下に伴い「なんともない」から「涼しい」にシフトした。条件2では室温の一定だったため、温冷感に変化は見られなかった。

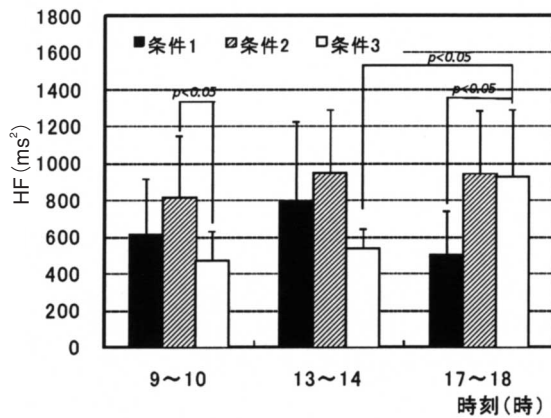


図3-1-3 HFの時間帯別変化

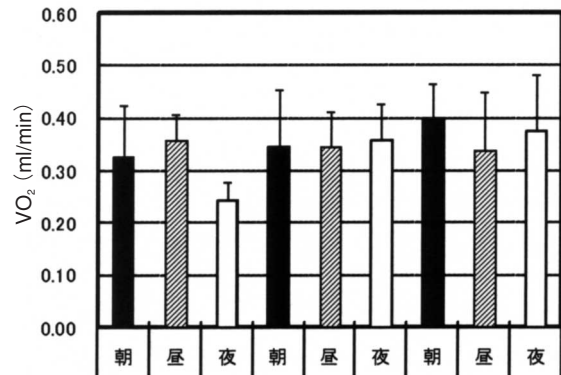


図3-1-4 時間帯・条件別の酸素消費量

2) 快適感

各時間帯による快適感申告を図3-1-6に示す。条件1では朝の時間帯に不快側を申告したが午後になるにつれて快適側へシフトした。条件3では朝と夜で不快側を申告し、条件2では終日「やや快適」と申告した。当然の結果ではあるが、室温の違いにより快適感申告に明らかな差が見られることを再確認した。体温のサーカディアンリズムを考慮した場合、やはり条件1が適切であることが示唆された。

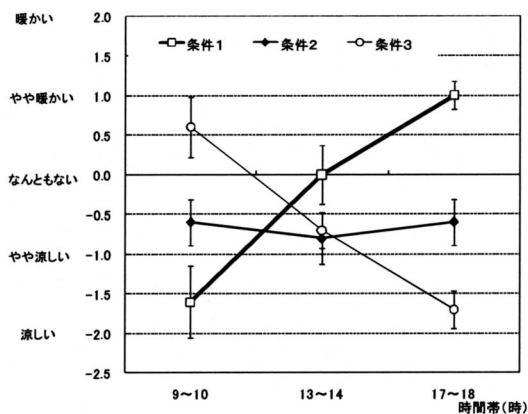


図3-1-5 時間帯別の温冷感申告

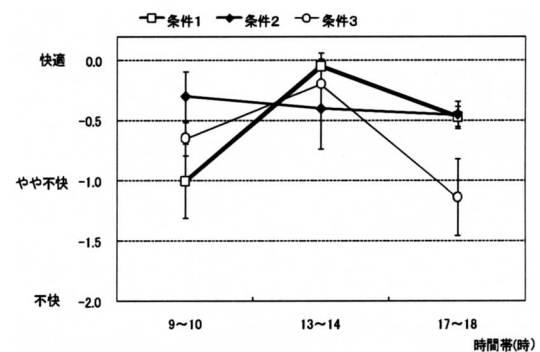


図3-1-6 時間帯別の快適感申告

3-2. 睡眠時の室内温熱環境制御に関する研究

3-2-1. 生理反応の結果

脳波解析結果から得られた各被験者の全睡眠時間における各睡眠段階の出現率の平均値と標準偏差を図3-2-1に示す。条件2では深い睡眠を表す徐波睡眠（SWS）が見られ、条件3ではレム睡眠（REM）が他の条件よりも増加したことを確かめた。睡眠効率を図3-2-2に示す。条件3の評価が高いことを確かめた。また、表3-2-1から、条件3ではレム睡眠の出現率、全睡眠時間の長さ、入眠潜時の短さ及び睡眠効率が高かったことがわかる。従って、条件3における睡眠

の質が高かったと判断できる。睡眠中の直腸温の変化を図3-2-3に示す。室温設定が異なるにも関わらず、直腸温の変化には条件間の差が見られなかった。

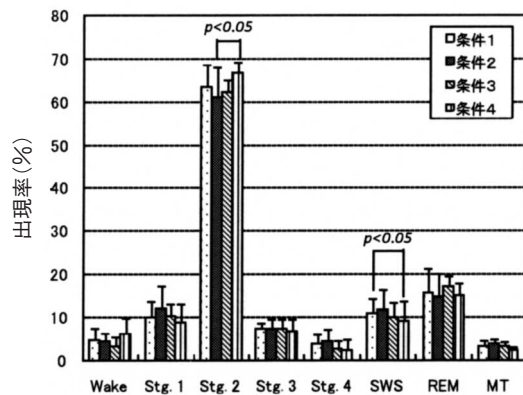


図3-2-1 平均出現率

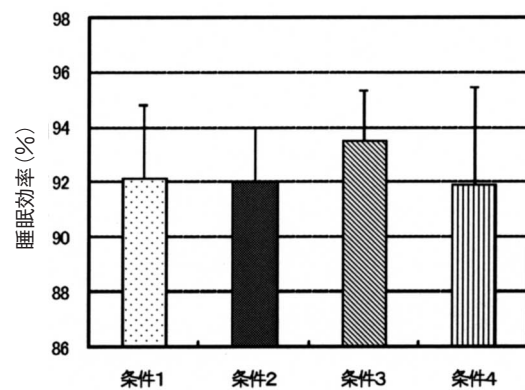


図3-2-2 睡眠効率

表3-2-1 各条件における全睡眠時間・入眠潜時・中途覚醒回数

	条件1	条件2	条件3	条件4
全睡眠時間[分]	379.5±10.1	380.5±7.9	387.5±7.6	379.8±14.9
入眠潜時[分]	9.0±7.4	5.8±3.8	4.6±2.8	15.6±10.8
中途覚醒回数	2.3±1.7	1.8±2.4	0.5±1.0	0.8±0.5

3-2-2. OSA睡眠調査票による各心理反応

主観的睡眠感の5因子（ねむけ因子・睡眠維持因子・気がかり因子・総合的睡眠の因子・寝つきの因子）の各条件の得点を図3-2-4に示す。また、全てのスコアが高いと睡眠の質が高いことを意味している。ねむけ因子においては条件1、条件4の得点が高く、有意差($p < 0.05$)も見られた。睡眠維持因子においては、条件2、条件3のスコアが高かった。また、気がかり因子については、条件1、条件2でスコアが高く、条件1と条件4の間に有意差 ($p < 0.05$) も見られた。総合的睡眠及び寝つきの因子においては、条件1と条件3のスコアが高かった。これらの結果から、主観的睡眠感では条件1及び条件3で睡眠の質が高かったことと、起床時に眠気が少ない安定した睡眠を得られることを確かめた。

4. まとめ

日中の覚醒時における最適な室温制御を検討した。体温のサーカディアンリズムと比較するために、各条件における直腸温の経時変化の一例を図4-1-1に示す。太線で示した体温の変化は被験者の事前調査の結果から推定した体温のサーカディアンリズムである。睡眠中の室温制御に関しては後述するが、睡眠中は室温の違いによる影響は少なく、太線で示した体温のサーカディアンリズムに同調していることがわかる。一方、日中の体温の変化に注目すると、個人差は見られるが、午後に室温を上昇させる条件の方がサーカディアンリズムに同調しやすい結果を示している。生理・心理反応から総合的に判断すると、昼間の室温制御は、午前中は低めに設定し、午後から夕方には高めに設定する制御は、体温のサーカディアンリズムを乱さないことが示唆された。このようなダイナミックな室温制御は省エネにもなると考える。

睡眠時の室温制御を考察すると、入眠時に低温側にして体温の低下を誘引し、入眠後は条件3の

ように体温のサーカディアンリズムが徐々に低下するのに対して、室温を逆に上昇させていくことが望ましいと判断した。睡眠時及び覚醒時での実験結果から、体温の降下期（睡眠時）には、その後の体温上昇を誘引するために室温を徐々に高くする制御が適切で、覚醒時には体温のサーカディアンリズムが室温の影響を受けやすいことを考慮して、体温上昇を補完するような室温制御が適切であると考ええる。

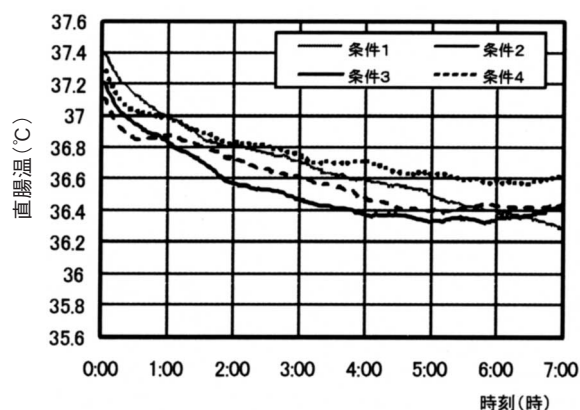


図3-2-3 直腸温の経時変化

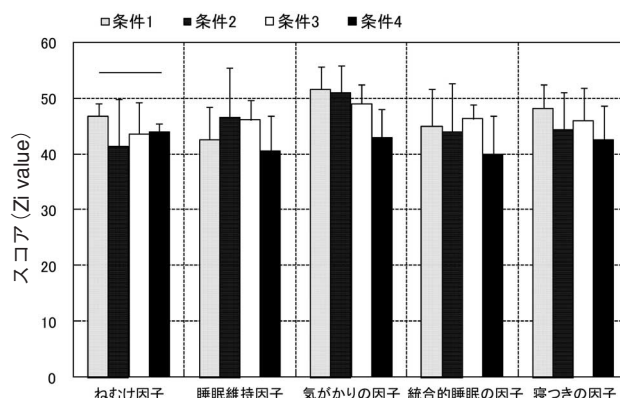


図3-2-4 主観的睡眠感

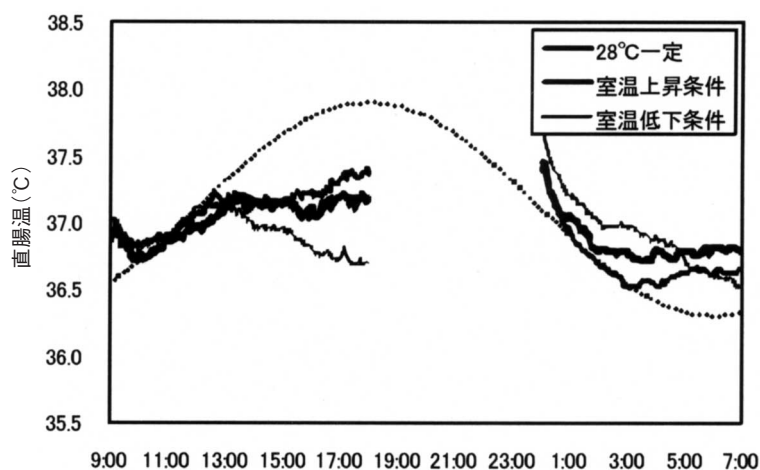


図4-1-1 体温のサーカディアンリズムと各条件における体温変化の一例(被験者：MM)

体温のサーカディアンリズムは、人間が地球上で生活を始めて生得した生理機能の一つである。環境の影響は受けやすいが、リズムを維持して生活するのが健康であるはずである。日常生活では意識下でない生理現象ではあるが、本研究で得られた知見から睡眠中も日中の覚醒時もダイナミックな室温制御が望ましいことを確かめた。特に、睡眠時は室温の違いの影響を受け難いが、覚醒時特には午後から夕方に影響が大きいことから、午後の室温はやや高めに制御の方が健康的且つ快適であると考ええる。

参考文献

- 1) 垣鍔直, 正田浩三, 杖先壽里: オフィス内の快適温熱環境の季節差・性差・時間差, 日本建築学会大会・日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.185－186, 2005.9
- 2) 垣鍔直, 鈴木健次, 井上義美: 集合住宅のエアコン利用と住戸内温熱環境, 日本建築学会大会・日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.207－208, 1995.2
- 3) 垣鍔直, 井上義美, 辻陽一: 寒冷暴露に対する生理・心理反応の加齢・性差の影響に関する考察, 日本生理人類学会大会・第44回日本生理人類学会大会要旨集, pp.86－87, 2000.11
- 4) 垣鍔直: 夏期におけるパッシブ集合住宅の住戸内温熱環境の調査, 日本建築学会大会・日本建築学会大会学術講演梗概集 (横浜), pp.49－502, 2006.9
- 5) 川島庸, 垣鍔直: 夏期の睡眠時の最適冷房環境に関する実験的研究, 人間-生活環境系会議・雑誌人間と生活環境, vol.11, no.1: pp.17-23, 2004.12
- 6) 川島庸, 垣鍔直: 夏期の睡眠時における気流曝露の影響に関する実験的研究, 人間-生活環境系会議雑誌人間と生活環境, vol.11, no.1: pp.25-30, 2004.12