

# 呼吸の同調効果を活用した エアコン動作音による知的生産性向上 Improvement of Intellectual Productivity by Air Conditioner Operating Sound Utilizing Respiratory Synchronization Effect

精密工学専攻 6号 石川 恭輔  
Kyosuke Ishikawa

## 1. はじめに

近年在宅ワークの増加により以前よりも生活空間の音環境に注目が集まり、より良いパフォーマンスが発揮できる音環境が求められている。そこで生活空間で稼働するエアコンの動作音を用いて、知的生産性を向上させるための要素を見出し、機能的な音環境を目指す。

本研究では、音源による呼吸の同調効果<sup>(1-2)</sup>に着目し、振幅変動する音源を呼吸周期に合わせるよう提示することで覚醒感<sup>(3)</sup>を高める。まず、音環境の変化によって覚醒感が変化することを把握し、覚醒感が知的生産性に影響を与えることを把握する。次に呼吸数の変化が知的生産性に与える影響を把握するとともに意識的な呼吸数の変化と無意識的な呼吸数の変化を比較することによって、同調効果による知的生産性向上の影響を明らかにする。そして、振幅変動音の変調周波数と変調度が覚醒感に与える影響を主観評価により把握する。

また、知的生産性評価についても影響の把握を行い、寄与が高いパラメータの把握を行う。また、エアコン動作音下で難易度の異なる知的作業<sup>(4)</sup>を実施した際の効果的な振幅変動させた音源を検討する。

なお、本研究のすべての評価実験において実験参加者に対し十分な実験内容の説明を行い、インフォームドコンセントを得て実験を実施している。

## 2. 同調効果による知的生産性評価

本章では、呼吸数の変化による知的生産性への影響を把握する。また、音源を呼吸周期に合わせるように提示し、呼吸数を意図的に変化させた際と無意識に変化させた際の影響把握を行う。

### 2.1 同調効果把握実験の音源<sup>(5)</sup>

評価音源として、ホワイトノイズを振幅変動させた音源を用いる。Fig. 1 に振幅変動音の波形及び呼吸の同調の様子を示す。個人ごとに呼吸の吸気及び呼気をそれぞれ振幅変動音の山に合わせるように提示する。この振幅変動音の変調周波数を変更することで、想定呼吸数を変更する。

Table 1 に呼吸数 20 /min である実験参加者の例を示す。想定呼吸数を -10%, ±0%, +10% の場合には変調周波数を 0.60 Hz, 0.67 Hz, 0.73 Hz と変化させた音源とする。音源はすべて 45 dBA に統一して提示する。

### 2.2 同調効果把握実験の実験内容<sup>(5)</sup>

呼吸数の意識的な変化と無意識的な変化にて評価を行う。実験参加者に対し、音源の想定呼吸数に合わせるよう指示する条件を呼吸統制<sup>(6)</sup>、音源提示し何も指示しない条件を呼吸同調とする。

実験参加者の前方に 24 inch モニターを配置して実験参加者は計算タスクを行う。この時ヘッドホンを装着し、音源を提示して生産性評価を行う。計算タスクには繰り返り下がりを含

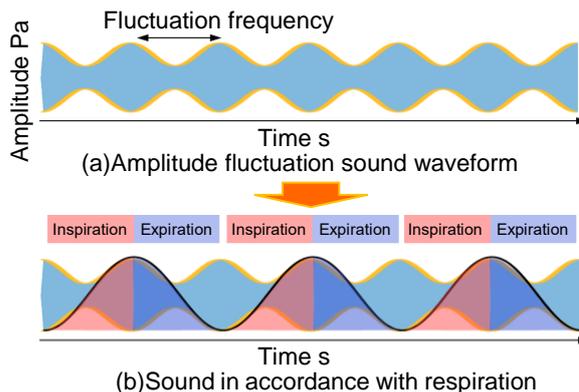


Fig. 1 Respiratory synchronization by amplitude fluctuation sound

Table 1 Example of sound source condition

Sound name	Respiratory rate 20 /min	
	Assumed respiratory rate	Fluctuation frequency
W-10%	18 /min	0.60 Hz
W±0%	20 /min	0.67 Hz
W+10%	22 /min	0.73 Hz

む3桁と2桁の減算とした。問題数30問を1試行とし、習熟の影響を低減するために本番の計測前に練習として1試行を行い、その後各音源に対して本試行を行う。

計算タスクは標準化解答時間と正答率にて評価する。ここでは式(1)のように、個人ごとに1問ごとの解答時間を平均解答時間で引き、標準偏差で割ることで、解答時間の評価を行う。

$$Z_{ans} = \frac{T_{sol} - \overline{T_{ave}}}{\sigma} \quad (1)$$

$Z_{ans}$  : 標準化解答時間  $T_{sol}$  : 1問ごとの解答時間  
 $\overline{T_{ave}}$  : 平均解答時間  $\sigma$  : 標準偏差

これは、個人の計算能力の差異による影響を低減し、各条件における音源による知的生産性への影響の明確化を目的としている。20代6名を対象に評価実験を行い、評価結果に対してHolm法による多重比較を行う。

### 2.3 同調効果把握実験の結果<sup>(5)</sup>

Fig. 2 に各条件での標準化解答時間、Fig. 3 に正答率を示す。呼吸数の変化を比較すると呼吸統制、呼吸同調の両条件で-10%から+10%と呼吸数の増加により解答時間が減少する傾向が見られる。Fig. 2(a)の呼吸統制では、-10%と+10%で有意な差が見られ、Fig. 2(b)の呼吸同調では、同様の傾向が見られるが、呼吸統制の条件よりも緩やかであった。

また、Fig. 3 より呼吸統制と呼吸同調の両条件で、-10%から+10%と呼吸数の増加により正答率も向上していることが

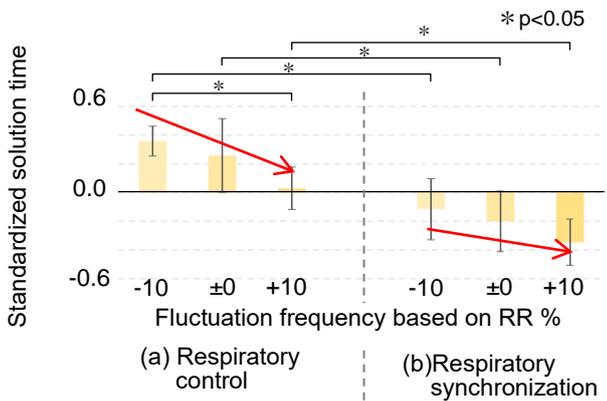


Fig. 2 Solution time for different respiratory rates

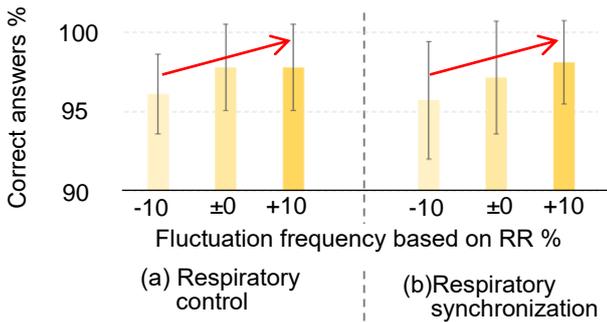


Fig. 3 Percentage of correct answers for different respiratory rates

わかる。これより、呼吸数を増加させることで知的生産性の向上効果が期待できる。

また、呼吸統制と呼吸同調を比較するとすべての想定呼吸数の条件で呼吸統制よりも呼吸同調の方で有意に知的生産性の向上効果が見られ、呼吸の変化を無意識に行う方が負荷が少ないと考えられる。以上より、呼吸同調による知的生産性の向上効果の有用性があることを見出した。

### 3. 変動パラメータによる音質評価

本章では、振幅変動音の変動パラメータである変調周波数及び変調度を変化させた際の印象変化を把握する。各パラメータの覚醒感への寄与と異なる音源を変動させた際の違いについての把握を行う。

#### 3.1 ホワイトノイズによる変動パラメータ把握実験<sup>(5)</sup>

##### 3.1.1 ホワイトノイズによるパラメータ評価の条件

半無響室で音源をヘッドホンから提示して評価を行う。14個の形容詞対を用いて7段階のリッカート尺度を用いたSD法による音質評価を実施する。

評価音源は、ホワイトノイズを振幅変動させた音源を用いる。Table 2に評価音源の条件を示す。変調周波数は個人の呼吸数をもとに変更し、F1~F6は変調度 0.500を基準とした変調周波数を-20%~+30%の音源、M1~M6は変調周波数 ±0%を基準とした変調度を0.125~0.750の音源で評価を行う。20代6名を対象に評価実験を行う。

##### 3.1.2 ホワイトノイズによるパラメータ評価の結果

因子分析により覚醒因子、快適因子、金属因子の計3因子を抽出した。Fig. 4に変調周波数、Fig. 5に変調度をそれぞれ変化させた際の快適因子と覚醒因子の因子得点を示す。

変調周波数を速くするにつれて、覚醒感が増加し、快適感は一様に増加しない傾向が確認できる。また、変調度が高くなるにつれて覚醒感が増加するが、快適感の最大値は0.500付近となり一様に増加しない傾向が確認できる。

Table 2 Sound source condition by parameters of amplitude fluctuation white noise

Sound name	Fluctuation frequency based on RR	Modulation degree
F1	-20%	0.500
F2	-10%	
F3	±0%	
F4	+10%	
F5	+20%	
F6	+30%	
M1	±0%	0.125
M2		0.250
M3		0.375
M4		0.500
M5		0.625
M6		0.750

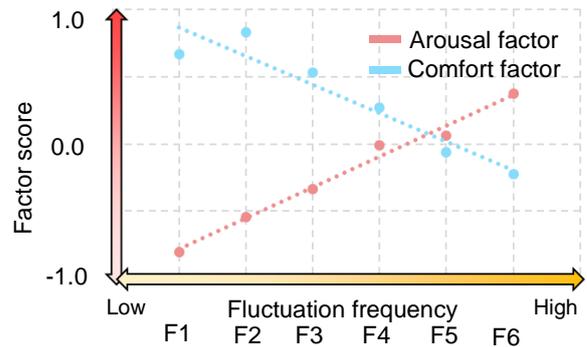


Fig. 4 Evaluation results of difference in fluctuation frequency by SD method

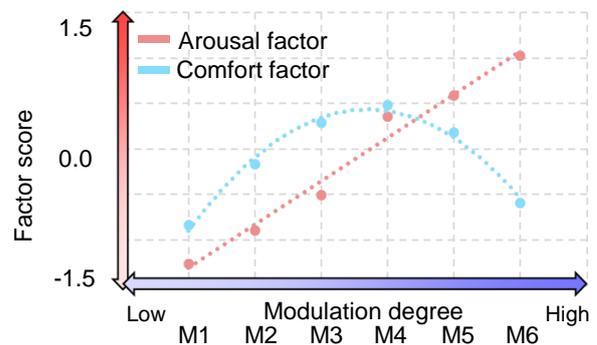


Fig. 5 Evaluation results of difference in modulation degree by SD method

#### 3.2 エアコン動作音による変動パラメータ把握実験<sup>(5)</sup>

##### 3.2.1 エアコン動作音によるパラメータ評価の条件

評価音源は、エアコン動作音を振幅変動させた音源を用いる。3.1節の結果より覚醒感と快適感のバランスに着目する。Table 3に評価音源の条件を示す。A1~A9は変調周波数 ±0%~+20%、変調度 0.375~0.625とし、それぞれの組み合わせによって両パラメータの寄与について調べる。その他の実験条件は3.1節と同様とする。

##### 3.2.2 エアコン動作音によるパラメータ評価の結果と考察

3.1節同様、因子分析により覚醒因子、快適因子、美的因子の計3因子を抽出し、Fig. 6に快適因子と覚醒因子の因子得点を示す。覚醒感の変化に着目すると、変調周波数を変化させた際の変化量より変調度を変化させた際の変化量の方が大きい。これより、主観評価における寄与が変調周波数の変化より変調度の方が大きいと考えられる。

3.1節の評価結果においても変調度の方が覚醒感の変化が大きいと、変動パラメータの寄与の大きさを確認できた。

Table 3 Sound source condition by parameters of amplitude fluctuation air conditioner operating sound

Sound name	Fluctuation frequency based on RR %	Modulation degree
A1	±0	0.375
A2	+10	
A3	+20	
A4	±0	0.500
A5	+10	
A6	+20	
A7	±0	0.625
A8	+10	
A9	+20	

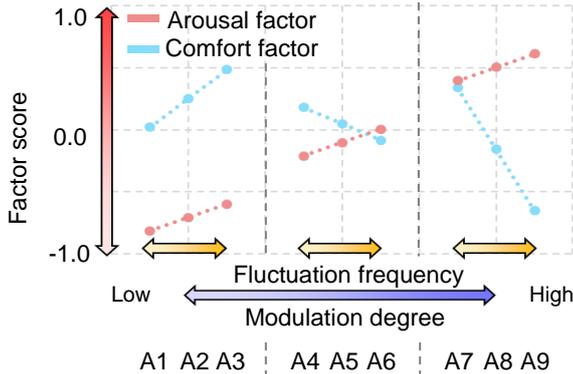


Fig. 6 Evaluation results of difference in fluctuation parameters by SD method

また、エアコン動作音においてもホワイトノイズと同様の傾向であることから、変調度の寄与について一般性があるといえる。

一方、快適感に関しては、変調度の違いで傾向が異なっている。変調度が低ければ変調周波数が速い場合に快適となり、変調度が高ければ変調周波数が遅い場合に快適となっている。これは、変調周波数の変化と変調度の変化の相乗効果が快適感の変化に寄与していると考えられる。

#### 4. 難易度を考慮した振幅変動音による知的生産性評価

本章では、エアコン動作音を用いて難易度の異なる知的作業を実施した際の効果的な振幅変動音を検討する。初めに前章の音源を用いてタスク難易度の違いによる印象の変化について把握する。その後、タスク難易度ごとに知的生産性評価を行い、効果的な振幅変動音を検討する。

##### 4.1 タスク難易度の違いによる印象評価

###### 4.1.1 実施するタスク難易度について

Fig. 7 に実験の概要と各難易度のタスクの様子を示す。音源を提示しながらタスクを行い、タスク終了後に SD 法による音質評価を行う。これを各難易度でそれぞれ評価する。2.1 節で用いたタスクを中難易度とし、低難易度と高難易度のタスクを設定する。低難易度のタスクは 2 桁どうしの繰り上がり、繰り下がりを含む 3 桁と 2 桁の減算、中難易度は繰り下がりを含む 3 桁と 2 桁の減算、高難易度は答えが 3 桁になるような 2 桁どうしの乗算と設定する。

###### 4.1.2 音源の条件

3.2 節において変調度が覚醒感に与える寄与が大きいと示された。そこで、変調度を作業難易度に応じて変更し、作業時の音の感じ方の違いについて把握する。3.2 節で用いた Table 3 に示す音源より、変調周波数 ±0%とし、変調度を

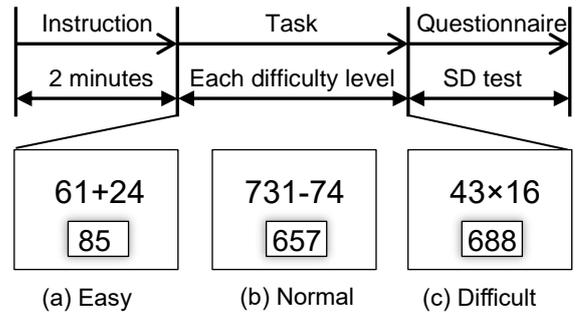


Fig. 7 Calculation-task considering difficulty level

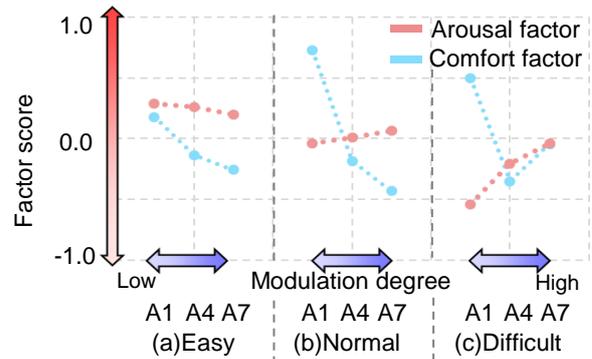


Fig. 8 Evaluation results during the task by SD method

0.375~0.625 と変更した A1, A4, A7 を使用する。20 代 6 名を対象に評価実験を行い、その他実験条件は 3.1 節と同様とする。

##### 4.1.3 タスク難易度の違いによる印象評価の結果

3.1 節同様、因子分析により覚醒因子、快適因子、金属因子の計 3 因子を抽出し、Fig. 8 に快適因子と覚醒因子の因子得点を示す。難易度ごとの覚醒感に着目すると、高難易度になるにつれて減少する傾向が見られる。高難易度のタスクでは、タスクに没入してしまうため、低難易度よりも高難易度の際に音源による覚醒の効果を得にくくなっていると考えられる。

また、変調度が低い音源ではタスク難易度による覚醒感減少の割合が大きく、変調度が高い音源では覚醒感減少の割合が小さくなっていることがわかる。このことから、変調度が小さい音源ではタスク難易度による寄与が大きく、変調度が大きい音源では寄与が小さいと考えられる。

さらに、低難易度では A1, 中難易度では A4, 高難易度では A7 で覚醒感と快適感のバランスが取れていると考えられる。

##### 4.2 タスク難易度を考慮した知的生産性評価<sup>(5)</sup>

###### 4.2.1 タスク難易度を考慮した知的生産性評価の条件

4.1 節の結果より、タスク難易度によって効果的な振幅変動音の条件を選定する。変調度は覚醒感への寄与を考慮し、難易度が高くなるにつれて高くなるように低難易度で 0.375, 中難易度で 0.500, 高難易度で 0.625 とする。変調周波数は呼吸数を早めるような条件とし、それぞれ ±0%~+30%として知的生産性評価を行う。

計算タスクの評価は 2.1 節と同様に標準化解答時間と正答率で評価する。実験参加者は 20 代 9 名とし評価結果に対して Holm 法による多重比較を行う。その他実験条件は 2.1 節と同様とする。

###### 4.2.2 難易度を考慮した知的生産性評価の結果

Fig. 9 に各条件での標準化解答時間、Fig. 10 に正答率を示す。各難易度におけるの解答時間の変化は低、中、高のすべての難易度において有意な差が存在することを確認でき

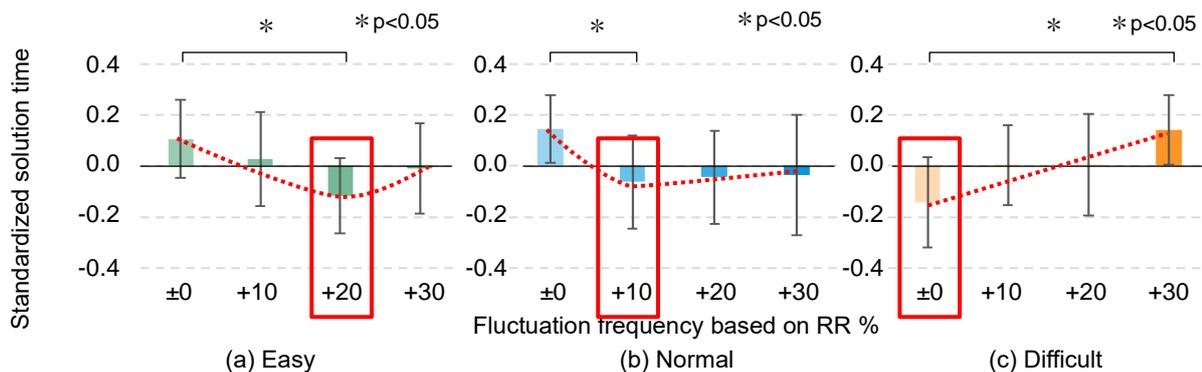


Fig. 9 Solution time using amplitude fluctuation air conditioner operating sound considering difficulty level

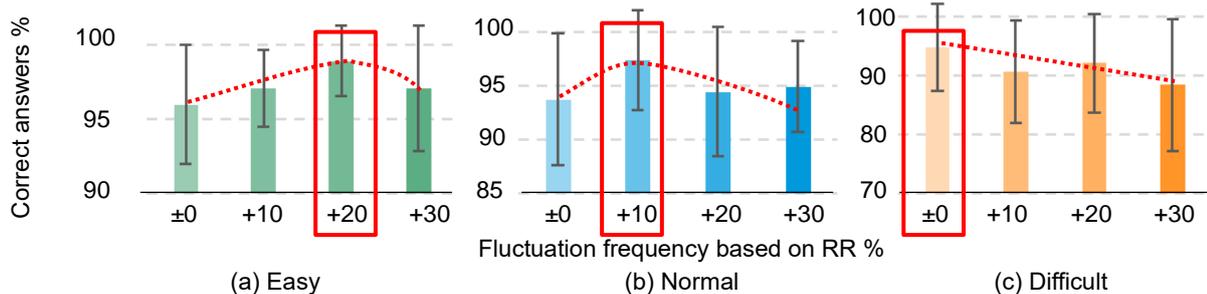


Fig. 10 Percentage of correct answers using amplitude fluctuation air conditioner operating sound considering difficulty level

る。4.1節で得られたタスクの没入について考慮すると、タスクの負荷が小さく、音源による覚醒の影響を受けやすい低難易度だけでなく、タスクの負荷が大きく、覚醒の影響を受けにくい高難易度においても有意な差を得ていることがわかる。このことから、4.1節の各難易度に対して変調度を適切に変更でき、知的生産性の向上効果を得られたと考えられる。

また、低難易度のタスクでは +20%、中難易度では +10%、高難易度では ±0%の条件でそれぞれ解答時間が減少する条件が異なっていることが確認できる。また、最も解答時間が減少した変調周波数条件を中心としてその前後では緩やかに増加する傾向が見られ、知的生産性に影響を与える効果的な変調周波数があることが確認できる。

加えて、Fig. 10の各難易度の正答率においても同様の変調周波数条件で最も正答率が高くなっており、解答時間と正答率の両結果より知的生産性の向上効果を得られていることがわかる。

さらに、3.2節の音質評価結果より、変調度が低い条件、タスクでは低難易度の条件における変調周波数が速い条件で快適感が高い。さらに変調度が高い条件、タスクでは高難易度の条件における変調周波数が遅い条件で快適感が高い。各難易度における解答時間が減少する条件が快適感の高い条件と一致していることから、音源の快適感も知的生産性の向上効果に影響を与えると考えられる。

これより、各難易度において効果的な変調周波数や変調度が異なり、呼吸同調による知的生産性の向上効果の有用性を示した。

## 5. 研究成果

- (1) 呼吸数の変化が知的生産性に影響を与えることを示すと同時に、呼吸統制と呼吸同調効果の比較より呼吸同調効果に有用性があることを示した。
- (2) 振幅変動音の変調周波数と変調度を変更し音質評価を行い、各パラメータが覚醒感と快適感に与える影響が異なることを示した。

- (3) 変調周波数と変調度の相乗効果により快適感に与えることを把握し、変調度が覚醒感に与える寄与が大きく、ホワイトノイズとエアコン動作音の同様の傾向であることを確認した。
- (4) タスク実施時に音質評価を行い、覚醒感に与える寄与が大きい変調度を変更した際の影響を把握した。タスク難易度によって印象が異なることを確認し、変調度によってその寄与が変化することを示した。
- (5) 難易度に応じた変調度の影響と各タスクの変調周波数の影響を確認した。各難易度における効果的な変調周波数や変調度が異なることを見出し、呼吸同調による振幅変動音を用いた知的生産性向上の有用性を示した。

## 参考文献

- (1) 山口雅夫, 花輪和人, 戸井武司, リズム感が聞き心地と知的生産活動に与える影響, 日本音響学会講演論文集 (春) (2013) pp. 1131-1132.
- (2) 奥川遼, 村尾和哉, 寺田努, 塚本昌彦, 聴覚情報による引き込み効果を利用したペダリングトレーニングシステムの設計と実装, 情報処理学会 MBL 研究会, 159-16 (2014) pp. 1-8.
- (3) 星野博之, 戸井武司, 音源のシャープネス値と感情極性値に基づく快適覚醒音刺激に関する考察, ヒューマンインタフェース学会論文誌, 19-3 (2017) pp. 231-242.
- (4) 石川恭輔, 松本大祐, Lee Juyon, 戸井武司, 作業難易度を考慮した機械動作音による知的生産性向上, 日本音響学会講演論文集 (春) (2022) pp. 1308-1309.
- (5) 石川恭輔, Lee Jangwoo, Ki Sunghyun, Lee Juyon, 戸井武司, 呼吸の同調効果を活用したエアコン動作音による知的生産性向上, 日本音響学会講演論文集 (春) (2023) 2-11-4.
- (6) 岩本直人, 萩原啓, 個人由来周期の呼吸統制が精神・身体的疲労後の心身に与える変化, ヒューマンインタフェース学会論文誌, 19-2 (2017) pp. 175-184.