自動車運転中の車載情報機器操作によって生じる精神的負担の評価のための呼吸指標の検討¹

須澤将馬², 小谷賢太郎³, 鈴木 哲³, 朝尾隆文³, 篠原一光⁴, 内藤 宏^{4,5}, 藤井達史⁴, 石川貴洋⁵, 松岡 孝⁵, 石田健二⁵

The effectiveness of respiratory-related indices for assessing drivers' mental strain induced by operating in-vehicle information system (IVIS) in actual driving was examined. A total of 10 male participants operated IVIS mounted on a dashboard during following preceding vehicle on a test course. Experimental conditions included five levels of difficulty in operating IVIS and respiratory activities were monitored by two strain-gauge sensors, placed on the thorax and the abdomen areas of the body. A total of nine respiratory-related indices (respiratory rate, respiratory amplitude, respiratory speed, inspiratory speed, expiratory speed, timing, drive, minute ventilation volume, and an index describing irregular respiratory rhythm) were obtained from respiratory data. Subjective mental strain measured by using NASA-TLX was recorded at each experimental condition as well. ANOVA on subjective mental strain revealed a significant main effect of difficulty in IVIS operation, and multiple comparisons for each condition showed that subjective mental strain increased with the difficulty in IVIS operation. Respiratory indices changed with the level of difficulty in IVIS operation, however their trends varied inconsistently. Among the evaluated indices, respiratory rate was found to be the most effective index for assessing the drivers' mental strain induced by IVIS operation.

実車運転中にカーナビ操作課題を行う際に生じるドライバーの精神的負担の評価のための呼吸指標の有効性について検討した。男性10名を対象に、テストコース上で先行車を追従する運転をしながらカーナビ操作を遂行してもらい、5水準の難易度の異なるカーナビ操作を課した際の呼吸活動を胸部および腹部で計測した。計測した呼吸活動データから9種の呼吸指標群（呼吸数、呼吸振幅、呼吸速度、吸気速度、呼気速度、タイミング、ドライブ、分時換気量、呼吸不安定性）を算出した。加えて、課題条件ごとにNASA-TLXを用いて主観的な精神的負担を得た。主観的な精神的負担を分散分析した結果、カーナビ操作条件の主効果が認められ、多重比較の結果、カーナビ操作の難易度の上昇に伴い精神的負担が増加していたが、カーナビ操作の難易度に対する呼吸指標の変化は呼吸指標毎で異なっており、なかでも呼吸数が最もドライバーの精神的負担を反映していることを確認した。

（キーワード：精神的負担、車載機器操作、呼吸活動）

1. はじめに

近年、カーナビに代表される車載情報機器の使用に

よって発生する自動車事故が問題となっている。わが国における自動車運転中のカーナビ画面やメータ等の注視による交通事故発生件数は、平成17年中には平成16年11月1日の改正道路交通法施行の影響を受け前年の1253件¹⁾から812件に減少したものの²⁾、平成18年中には前年より107件増加し、921件³⁾となっている。このような背景のもと、運転者の車載情報機器の視聴覚認知に関する研究が行われ^{4~6)}、様々な知見が得られつつある。例えばSummala, *et al*⁴⁾は車載ディスプレイの注視が先行車のブレーキに対する反応遅れに影響することを報告し、篠原ら⁵⁾は自動車運転中、視線が前方にある状態においても、車載情報機器の操作によって生じる精神的負担の増

1 受付：2015年10月13日 受理：2016年5月30日

2 関西大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Engineering, Kansai University

3 関西大学システム理工学部
Faculty of Engineering, Kansai University

4 大阪大学大学院人間科学研究科
Graduate School of Human Sciences, Osaka University

5 ㈱デンソー
DENSO CORPORATION

加が見落としや反応遅れにつながることを報告している。自動車運転時の車載情報機器の使用は脇見運転や漫然運転、動静不注視などを誘発する危険性があると指摘されており、車載情報機器操作の注視や操作に過大な注意が配分されることが危険性につながる問題であると報告されている⁶⁾。これらの報告では、自動車運転時の車載情報機器の使用によって生じる事故の多くは、本来自動車運転に用いるはずの注意が車載情報機器操作に用いられること（ディストラクション）に起因したものであると指摘されている。

車載情報機器の使用が原因と推定される自動車事故を低減させるためには、運転者の注意が車載情報機器操作に過剰に向けられてディストラクションを引きおこさないよう十分に配慮することが必要であると言われている⁵⁾。ディストラクションは精神的負担による減退的効果のひとつであり^{7,8)}、車載情報機器操作によって運転者に生じる精神的負担を定量的かつ正しく評価する手法が必要であるとされている⁵⁾。このような精神的負担を感度よく評価するために適切な指標の選出が不可欠であり、これまでも多数の生理指標が運転者の精神的負担の評価に用いられるかどうか、研究が進められてきた^{9~14)}。

なかでも呼吸活動は心理的状態を敏感に反映する生体情報であると言われている¹⁵⁾。呼吸活動によって運転者の精神的負担を評価した研究^{10,13)}はこれまでも行われており、呼吸指標の有効性が示されている。自動車を運転することで、下野ら¹⁰⁾は運転者の呼吸の時間的な速さである呼吸重心周波数や安定度である呼吸不安定性が変化したことを報告しており、亀田ら¹³⁾も呼吸の時間的な速さである呼吸数が増加したことを報告している。しかし、呼吸には時間的な速さや安定度の他にも深さなどの要因があり¹⁵⁾、どのような呼吸指標が運転者の精神的負担の評価に適しているのかについて、我々の知る限り十分な検討がなされているとは言えない。

運転者に生じる精神的負担に限定しなければ、これまで種々の作業を行った際の精神的負担の評価にどの呼吸指標が適しているのかを検討した例は数多く見られる。しかし先行研究^{15~20)}では、精神的負担に対して呼吸指標が異なる変化を示している。梅沢^{15,16)}による実験のうち、暗算課題を用いた実験では呼吸数は増加し、呼吸の深さを意味する1回換気量はほとんど変化せず、呼吸の時間的な速さと深さの両方を反映するドライブは増加したことが報告されている。これに対してストレスフィルム課題（不快な映像を放映する課題）を用いた実験では、呼吸数および1回換気量はほとんど変化せず、ドラ

イブの増加が示され、結論としては分時換気量とポーズ時間が全般的に有効な指標であると報告している。平柳ら¹⁷⁾の暗算課題を用いた実験の場合、負荷レベルの高まりに対して呼吸数は増加する傾向があるものの、1回換気量についてはほとんど変化しなかったことが報告されている。黒原ら¹⁸⁾の暗算課題やビデオゲーム課題では、呼吸数やドライブは増加したことが報告されている。ところがCIT検査課題（裁決質問と非裁決質問を呈示して両者の末梢自律神経系の反応パターンの違いを分析する課題）を用いた実験では、ドライブは増加し、呼吸数は変化しなかったことが報告されている。一方でDenot-Ledunois, *et al*¹⁹⁾のビデオゲーム課題を用いた実験では、難易度の増加によって、呼吸周期が増加すなわち呼吸数の減少が示されている。またTakasawa, *et al*²⁰⁾の2種類の音刺激の周波数が同じかどうかを回答するTADT（tone accordance detection task）および、特定の色の光刺激または特定の周波数の音刺激を呈示されたときだけボタンを押すGo/No-Go課題を用いた実験では、吸気および呼気の加速度が減少することからドライブの減少が生じていたことが示されている。

このように、先行研究では作業で生じる精神的負担に対して呼吸活動は促進する傾向にも抑制する傾向にも変化していた。また呼吸活動が促進する傾向を示した研究^{16~18)}だけに着目しても、被験者に課した作業の種類によって、精神的負担に対する呼吸指標の変化の大きさはまちまちであった。そのため運転状況の認識や情報の記憶、必要な作業の選択などの要素を含む車載情報機器操作によって生じる精神的負担に対して、どの呼吸指標が明瞭に反応するのかといったことは、先行研究からは十分に予測することは困難である。車載情報機器操作によって生じる視覚情報処理負担や認知負担などの精神的負担の評価方法を確立するためには、まずこの精神的負担に感度よく反応する呼吸指標について検討する必要がある。

そこで本研究では、実際の運転状況で使用され则认为えられる4種類のカーナビ操作を実車運転中に行い、その時の呼吸指標の大きさがカーナビ操作の難易度の違いに追従して変化するのか調べることで、どの呼吸指標が自動車運転中のカーナビ操作によって生じる精神的負担をよく反映するのかを比較した。

2. 実験方法

この実験は大阪大学大学院人間科学研究科行動系研究倫理委員会による審査と承認を受けている。書面により

インフォームドコンセントを取得し、安全を優先した上での実験課題遂行を心がけてもらい実験を実施した。

2-1. 被験者

運転免許を保有し、右ハンドル車を週に数回以上運転する右利きの男性10名（平均年齢40.80歳・標準偏差9.68歳、平均運転年数21.1年・標準偏差10.68年）を対象とした。

2-2. 実験課題と教示

先行車の追従運転課題を主課題とし、同時にダッシュボードに設置したタッチパネル式 of 車載情報機器（以下、カーナビ）を視認操作する5水準のナビ操作課題とマルチモーダル刺激検出課題（Multimodal Stimulus Detection Task：以下、MSDT）^{5,21)}を遂行する多重課題を行った。

追従運転課題では、実験車両（LEXUS LS460）を用いて、自動車教習所のコース（キョウセイ交通大学、一周＝1 km、幅員＝約10 m）を一定速度（時速40 km/h）で時計回りに走行する先行車を、被験者が普段保っている安全な車間距離で追従した。

ナビ操作課題では、録音された音声アナウンスによるナビ操作指示の後に、ナビ画面上部に設置された小型モニターで呈示された操作内容に従ってナビ操作を行った。ナビ操作課題はナビ操作なし（CONTROL）、手移動（HAND）、地図スクロール（MAP）、ラジオ選局（RADIO）、電話番号入力（TEL）の5条件であった。各条件では以下の操作を行った。

- 1) ナビ操作なし（CONTROL）：ナビ操作を実施しない
- 2) 手移動（HAND）：左手をナビの指定された領域（ナビ左下部）へと移動させる
- 3) 地図スクロール（MAP）：操作指示モニターに呈示された矢印方向に、ナビ操作画面を2回タッチすることでスクロールする（最小画面遷移数2回、タッチ数3回）
- 4) ラジオ選局（RADIO）：操作指示モニターに呈示された2つのラジオ局を順に選局する（最小画面遷移数5回、最小タッチ数6回）
- 5) 電話番号入力（TEL）：操作指示モニターに呈示された電話番号を入力し、目的地を設定する（最小画面遷移数5回、最小タッチ数15回）

なおナビ操作課題の難易度は、高い方から順にTEL＞RADIO＞MAP＞HAND＞CONTROLとなるよう設定した。

これらの多重課題のうち、優先度を高い方から順に、追従運転課題＞ナビ操作課題＞MSDTとするように被験者に教示した。なお、MSDTのパフォーマンス結果につ

いては、前報²²⁾で詳細を示す。

2-3. 実験手続き

追従運転とナビ操作の2重課題を行うブロックと、さらにMSDTも加えた3重課題を行うブロックを交互に繰り返して2ブロックずつ実施した。ただし本稿では、3重課題を解析対象とした。各ブロックは、ナビ操作課題5水準（CONTROL, HAND, MAP, RADIO, TEL）の計5条件から構成されていた。ブロック内のナビ操作課題の順序は順序による効果を防ぐために、被験者間で偏りのない順序とした。以上の課題遂行中において、胸部および腹部における呼吸活動を計測した。先行研究には腹部のみにおいて呼吸活動を計測していたもの^{10,23)}があるが、胸部および腹部において呼吸活動を計測し、胸部と腹部の呼吸指標で負荷に対して一部異なる傾向を示した研究も見られたためである²⁴⁾。そのため、本稿で生じる精神的負担の評価をする上で胸部と腹部の呼吸活動のどちらを用いるべきかを検証するため、胸部と腹部の両方で呼吸活動を計測した。また第1ブロックの各実験条件終了時において、日本語版NASA-TLX（芳賀²⁵⁾の日本語訳を使用）により主観的な精神的負担の評価を実施した。

2-4. 生体計測

呼吸活動を胸部（脇の下 of 位置の高さ）および腹部（臍の上 of 位置の高さ）に装着した呼吸ピックアップ（デジテックス研究所製AP-C021）によって取得し、32 ch変換ボックスを介した後に、生体現象用増幅器（デジテックス研究所製Polymate AP1132）と波形データ収録プログラム（デジテックス研究所製AP Monitor）を用いて、サンプリング周波数2000 Hz、高域遮断周波数15 Hzで記録した。

なお呼吸ピックアップの計測原理はひずみゲージの計測原理と同様であり、また増幅器は交流増幅（時定数＝3 sec）であった。

2-5. データ処理方法

日本語版NASA-TLXで取得した主観評価指標については、10名全ての被験者に対して解析を行った。しかしながら、呼吸データについては呼吸ピックアップの装着状態に問題が発生したため実験途中から呼吸活動を一部計測できなかった2名の被験者を解析対象から除外し、残りの8名の被験者に対して解析を行った。データ解析を行った実験課題数は、主観評価指標では1被験者あたり5個（ナビ操作課題5水準）、呼吸データについては1被

験者あたり10個（ナビ操作課題5水準×繰り返し2回）であった。したがってデータ解析を行った実験課題数は、主観評価指標では50個（1被験者あたり実験課題数5個×被験者10名）、呼吸データでは80個（1被験者あたり実験課題数10個×被験者8名）であった。

日本語版NASA-TLXからWWL得点（Weighted Workload score：WWL）を算出し、各実験課題における精神的負担の大きさの主観評価指標の代表値とした。

呼吸関連指標の解析の手順を図1に示す。計測した呼吸波形をサンプリング周波数100 Hzでリサンプリングした後、黒原ら²⁶⁾の移動平均による呼吸波形の平滑化を参考に、前後37点、計75点（750 msec）の移動平均を5回繰り返し、吸気・呼気開始点検出用の呼吸曲線を取得し、この呼吸曲線から極小点および極大点の時系列情報を取得した。次に計測した呼吸波形を再度サンプリング周波数100 Hzでリサンプリングした後、前後31点、計63点（630 msec）の移動平均を行い呼吸指標算出用の呼吸曲線を得た。移動平均処理前の呼吸曲線および2種類の移動平均処理後の呼吸曲線を図2に示す。本稿では前述のとおり、吸気・呼気開始点の検出および呼吸指標の算出のために2種類の移動平均処理を用いた。これは、図2のように呼吸指標算出用呼吸曲線には吸気および呼気の開始位置と思われる部分に複数の極値が観察され、呼吸指標算出用呼吸曲線のみからうまく吸気・呼気開始点を検出できなかったためである。そこで吸気・呼気開始点検出用の呼吸曲線から取得した極小点および極大点の時系列情報における呼吸指標算出用の呼吸曲線上の点をそれぞれ吸気開始点（呼気終了点）、呼気開始点（吸気終了点）とした。呼吸曲線の概要図を図3に示す。図3のように吸

気開始から呼気終了までを呼吸の1サイクルとした。そして呼吸数（Respiratory Rate：RR）を1分間あたりの呼吸のサイクル数とした。また呼吸指標算出用の呼吸曲線における1サイクルの吸気開始点から吸気終了点および呼気開始点から呼気終了点までの振幅差の絶対値をそれぞれそのサイクルでの吸気量（Inspiratory Amplitude：IA）および呼気量（Expiratory Amplitude：EA）、吸気および呼気に要する時間をそれぞれそのサイクルでの吸気時間（Inspiratory Time：IT）および呼気時間（Expiratory Time：ET）とした。呼吸指標算出用の呼吸曲線の実験課題開始から終了までの各サイクルにおいて、呼吸振幅（Respiratory Amplitude：RA）を $(IA+EA)/2$ 、呼吸速度（Respiratory Speed：RS）を呼吸曲線の連続するデータ間における振幅の差分値の絶対値の合計を $(IT+ET)$ で除したものの、吸気速度（Inspiratory Speed：IS）を呼吸速度RSの吸気領域のみにおける値、呼気速度（Expiratory Speed：ES）を呼吸速度RSの呼気領域のみにおける値、タイミング（Timing）を $IT/(IT+ET)$ 、ドライブ（Drive）を IA/IT として算出し、全サイクルの平均値をその実験

図2 移動平均処理前後の呼吸曲線の例（4秒間の電圧値）

Fig. 2 Times series data showing respiratory changes along with those with moving-average processing (voltage data in 4 seconds).

図1 呼吸関連指標の手順

Fig. 1 Process of analysis for parameters associated with respiratory-related indices.

図3 呼吸曲線の各部名称

Fig. 3 Schematic pattern of respiratory changes with associated definition.

課題における呼吸振幅RA, 呼吸速度RS, 吸気速度IS, 呼気速度ES, タイミングTiming, ドライブDriveの代表値とした。そして分時換気量 (minute ventilation volume : VE) を呼吸数RRおよび呼吸振幅RAの全サイクルでの平均値の積とした。ナビ操作課題が異なるとその実験課題に要する時間すなわち呼吸サイクル数が異なっており, 各被験者について全サイクルでの平均値を呼吸指標の代表値とした。また下野¹⁰⁾を参考に, 吸気・呼気開始点検出用呼吸曲線から呼吸不安定性 (|PF-GF|) を算出した。この呼吸指標は, 5秒ずつずらした30秒間の呼吸曲線に対してFFTをかけて周波数解析を行い, 最もスペクトル強度の高い周波数であるピーク周波数 (PF), ピーク周波数PFのスペクトル強度の二分の一以上の周波数帯域を積分した際, その面積がちょうど二分される周波数である重心周波数 (GF) とし, その差の絶対値|PF-GF|をとることで算出した。なお呼吸不安定性|PF-GF|は, 実験課題開始から終了までに算出した値の平均値をその実験課題の代表値とした。

各実験課題におけるWWL得点および各呼吸指標は被験者ごとにz得点化した値 (標準得点) を分析に用いた。

条件間の比較には反復測定による一元配置分散分析 (独立変数: ナビ操作課題 (5水準), 従属変数: WWL得点の代表値および呼吸指標の代表値) およびTukey法による多重比較を用いた。なお統計的有意差を危険率5%未満, 統計的有意傾向を危険率10%未満とした。統計処理には統計処理ソフト (構造計画研究所製 Minitab14) を使用した。

3. 結果

3-1. ナビ操作と主観的な精神的負担の関係

図4にナビ操作条件間におけるWWL得点の変化を示す。分散分析の結果, WWL得点はナビ操作課題について有意差が認められた ($F(4,45) = 41.95, p < .01$)。Tukey法による多重比較の結果, HANDとMAPとの間以外の全ての条件間で有意差が認められ (CONTROL < HAND, MAP < RADIO, TEL : $p < .01$; RADIO < TEL : $p < .05$), ナビ操作難易度の上昇に伴ってWWL得点が有意に増加する傾向が見られた。

3-2. ナビ操作と呼吸指標の関係

図5はナビ操作条件間における各呼吸指標の変化を示したものである。

図4 ナビ操作条件間におけるWWL得点の変化

Fig. 4 Changes in WWL scores among five levels of difficulty in operating IVIS.

呼吸数RRは分散分析の結果, 計測位置が胸部および腹部の両場合においてナビ操作課題間で有意差が認められた (胸部 : $F(4,75) = 8.21, p < .01$; 腹部 : $F(4,75) = 12.25, p < .01$)。Tukey法による多重比較の結果, 計測位置が胸部の場合においてCONTROL, HAND, MAPとTELとの間, MAPとRADIOとの間で有意差が, CONTROLとRADIOとの間で有意傾向が認められた (CONTROL, HAND, MAP < TEL : $p < .01$; MAP < RADIO : $p < .05$; CONTROL < RADIO : $p < .1$)。計測位置が腹部の場合においてはCONTROL, HAND, MAPとTELとの間, CONTROLとRADIOとの間で有意差が, HANDとRADIOとの間に有意傾向が認められた (CONTROL, HAND, MAP < TEL : $p < .01$; CONTROL < RADIO : $p < .01$; HAND < RADIO : $p < .1$)。

タイミングTimingは分散分析の結果, 計測位置が腹部の場合においてのみナビ操作課題間で有意差が認められた ($F(4,75) = 7.35, p < .01$)。Tukey法による多重比較の結果, CONTROLとHAND, MAP, RADIO, TELとの間で有意差が認められた (CONTROL < MAP, RADIO, TEL : $p < .01$; CONTROL < HAND : $p < .05$)。

呼吸不安定性|PF-GF|は分散分析の結果, 計測位置が胸部の場合においてのみナビ操作課題間で有意差が認められた ($F(4,75) = 4.38, p < .01$)。Tukey法による多重比較の結果, CONTROLとRADIO, TELとの間で有意差が認められた (CONTROL < RADIO, TEL : $p < .01$)。

呼吸振幅RA, 呼吸速度RS, 吸気速度IS, 呼気速度ES, ドライブDrive, 分時換気量VEは分散分析の結果, 計測位置が胸部および腹部の両場合においてナビ操作課題間で有意差が認められなかった。

以上より, 最もナビ操作の難易度を判別した呼吸指標は, 計測位置が胸部, 腹部に関わらず呼吸数RRであったことがわかる。

図5 ナビ操作条件間における呼吸指標の変化

Fig. 5 Changes in respiratory-related indices among five levels of difficulty in operating IVIS.

4. 考察

本稿は呼吸指標の大きさがカーナビ操作の種類の違いに追従して変化するか調べることで、どの呼吸指標が自動車運転中のカーナビ操作によって生じる精神的負担をよく反映するのかを比較することを目的とした。実験結果から、ナビ操作課題の条件の違いを反映した呼吸指標は、計測位置が胸部、腹部の両場合における呼吸数RR、計測位置が腹部の場合におけるタイミングTiming、計測位置が胸部の場合における呼吸不安定性|PF-GF|であった。以上の通り、呼吸データを指標とする際にはどの指標を選ぶかによって精神的負担との関係に変化が生じる可能性が認められる。特に呼吸数RRはナビ操作課

題間における精神的負担の違いをより反映し、実験課題で生じた精神的負担を最も感度よく評価していたと言える。

本稿において算出した呼吸指標について、呼吸数RRは呼吸の時間的な速さを反映する時間的測度、呼吸振幅RAは呼吸の深さを反映する量的測度、呼吸速度RS、吸気速度IS、呼気速度ES、ドライブDrive、分時換気量VEは呼吸の時間的な速さと深さを反映する時間的・量的測度であると考えられる^{16,27)}。そのため、本稿における実験課題による精神的負担は呼吸の時間的な速さに関する指標（呼吸数RR）を促進させるものの、時間的な速さと深さの両方に関する指標（呼吸速度RS、吸気速度IS、呼気速度ES、ドライブDrive、分時換気量VE）、呼吸の深さのみに関する指標（呼吸振幅RA）を変化させる

表1 先行研究と本稿における実験課題と呼吸指標の関係

Tab. 1 Relationship between experimental conditions and respiratory-related indices in the previous study with the present study.

実験課題		呼吸指標								
		RR	RA	RS	IS	ES	Timing	Drive	VE	[PF-GF]
暗算課題	梅沢 ^{15,16)}	↑	—				—	↑	↑ ^[1]	
	平柳 ¹⁷⁾	↑	—						↑ ^[1]	
	黒原 ¹⁸⁾	↑					—	↑	↑	
ビデオゲーム課題	黒原 ¹⁸⁾	↑					—	↑	↑	
	Denot-Ledunois, <i>et al</i> ¹⁹⁾	↑, ↓	[1] [2]							
ストレスフィルム課題	梅沢 ^{15,16)}	—	—				—	↑	↑ ^[1]	
CIT検出課題	黒原 ¹⁸⁾	—					↓	↑	—	
	小林 ²³⁾	↓	↓	↓					↓ ^[1]	
TADT Go/No-Go課題	Takasawa, <i>et al</i> ²⁰⁾			↓ ^[1]	↓ ^[1]	↓ ^[1]		↓ ^[1]	↓ ^[1]	
トラッキング課題(緊張) ^[3]	下野 ¹⁰⁾	↑ ^[1]								—
トラッキング課題(単調) ^[4]	下野 ¹⁰⁾	序盤は↑ のちに↓ ^[1]								↑
自動車運転+カーナビ操作課題(本稿)		↑	—	—	—	—	↑	—	—	↑

↑: 増加 —: ほとんど変化せず ↓: 減少

空欄は算出されていない、もしくは推定ができない場合を表している。

[1] 直接的に示されていないが、間接的に推定できる増加・減少である。

例えば呼吸数RRの逆数である呼吸周期 T_{TOT} ($T_{TOT}=1/RR$) の増加から、呼吸数RRの減少が推定できる。

[2] 比較する条件間によって増加や減少が異なる。

[3] 作業中にミスをするすると罰が加えられる等のストレス教示を与えた緊張実験。ただし罰は実際には加えられない。

[4] 作業中にミスをするすると罰が加えられる等のストレス教示を与えず、同様の作業を繰り返す単調実験。

ようなものではなかった可能性が考えられる。またタイミングは呼吸時間における吸気時間が占める比率に関する指標であり、その値が増加すると呼吸1サイクルにおける吸気時間の比率が増加する¹⁵⁾。そのため、本稿における実験課題による精神的負担は吸気時間の比率を増加させるようなものであった可能性がある。呼吸不安定性[PF-GF]は呼吸の安定度に関する指標であり、その値が増加すると呼吸活動は不安定となる^{10,28)}。そのため、この精神的負担は呼吸活動を不安定にさせるようなものであった可能性がある。

先行研究と本稿における実験課題と呼吸指標の関係を表1に示す。先行研究では、梅沢、黒原らの暗算課題^{15,16,18)}、黒原らのビデオゲーム課題¹⁸⁾においてドライブDrive、分時換気量VEの増加が見込まれ、呼吸活動が促進していた可能性がある。これらの実験課題では課題負荷が呼吸中枢に変化を与えたことで、呼吸活動の促進性変容^{18,27)}が生じたと考える。一方でTADT²⁰⁾、Go/No-Go課題²⁰⁾、CIT検出課題²³⁾では呼吸活動が抑制していた可能性がある。これらの実験課題では、呼吸活動の抑制(呼吸抑制)が観察されている。Takasawa, *et al*²⁰⁾はTADTおよびGo/No-Go課題で生じる呼吸抑制を注意レベルの増加によるものと結論付けており、黒原²⁷⁾はCIT検査そのものはストレス反応や情動反応と同様に呼吸中枢が呼吸活動に促進的な変化をもたらすものの、裁決質

問が呈示されると、より上位の中枢に呼吸活動の制御が移ることで、内的、外的環境に向かう注意レベルの上昇を反映した抑制性呼吸へと切り替わると結論づけている。またDenot-Ledunois, *et al*のビデオゲーム課題¹⁹⁾では、ビデオゲームの難易度を多段階設定しており、難易度の近いいくつかの条件間の比較では呼吸活動の促進が生じていたが、難易度に大きな差のある条件間を比較すると呼吸抑制が生じていた。Denot-Ledunois, *et al*¹⁹⁾は、画面に向ける注意量が同程度であれば作業負荷の増加に対して情動変化による呼吸活動の促進が起こり、画面に向ける注意量が増加すれば呼吸活動の抑制が起こると述べている。本稿ではこれらの先行研究と異なり、ドライブDriveおよび分時換気量VEがナビ操作課題間で有意に変化しなかったため、全般的に呼吸活動の促進または抑制が生じているとは言えなかったが、本稿における実験環境下で得られた呼吸信号は実験方法で示した通り、混入したノイズ低減のため、呼吸曲線および呼気吸気開始点の検出に2段階の移動平均処理を課しており、計測時点での呼吸信号のノイズ成分が低減されれば、梅沢^{15,16)}が推奨する分時換気量VEにも有意な変動が認められる可能性も考えられる。

本稿の実験で行ったカーナビ操作では呼吸活動の計測位置が胸部、腹部と異なることで、一部の呼吸指標において有意差の認められた実験条件の組み合わせが異なっ

ていた。このことは、同じ呼吸活動から算出した呼吸指標であっても、計測位置が異なると精神的負担の評価指標としての意味合いも異なる可能性があることを示唆している。測定位置によって有意差の認められた実験条件の組み合わせが異なっていた呼吸指標は、タイミングTiming、呼吸不安定性[PF-GF]であった。タイミングTimingでは、腹部の場合において特定のナビ操作間で有意差が認められたものの、胸部の場合ではそれらが認められなかった。一方で、呼吸不安定性[PF-GF]では、胸部の場合において特定のナビ操作間で有意差が認められたものの、腹部の場合ではそれらが認められなかった。

呼吸数RRは胸部、腹部のいずれの場合においても同様のナビ操作間で有意差または有意傾向が認められたことを考慮すると、自動車運転中のカーナビ操作によって生じる精神的負担の評価指標として、呼吸活動の時間的測度は計測位置が胸部、腹部のどちらの指標を用いてもよく、タイミングのような吸気と呼気のバランスに関する測度は腹部、呼吸活動の安定性に関する測度は胸部の指標を用いることが望ましいという結果となった。

計測位置が胸部、腹部の場合、それぞれ呼吸活動にともなう胸郭運動、腹部（横隔膜）運動を主に計測している。胸部および腹部の周囲長と呼吸量との関係について、梅沢¹⁵⁾は、胸部および腹部の周囲長が同じ長さだけ変化したとしても、胸郭運動および腹部運動による呼吸量は同じでないことを指摘している。このことから梅沢¹⁵⁾は、胸郭運動と腹部運動のどちらが優位かといった議論は、流量計測を併用して胸郭運動による呼吸流量、腹部運動による呼吸流量を推定してから行うべきだと述べている。本稿では胸部および腹部の周囲長のみから呼吸活動を計測した。そのため本稿では精神的負担が胸郭運動または腹部運動の優位性に与える影響について議論できない。今後は呼吸流量についても計測を行う必要があると考えられる。

なお先行研究では吸気時間および呼気時間^{18,26)}、ポーズ時間^{16,24)}といった指標による精神的負担の評価が行われている研究も存在する。本稿ではこれらの指標を用いた評価を行っておらず、そのため本稿での実験課題によって生じた精神的負担に対し、これらの指標がどの程度有効であるのか、呼吸数RRよりも感度のよい指標なのかといったことは今後の検討を要する。また本稿では被験者は男性のみであったため、女性についても同様の結果が得られるのかについては今後計測を行ったうえで検討する必要がある。

5. おわりに

本稿では自動車運転中のカーナビ操作によって生じる精神的負担と呼吸指標の関係を、実車を用いて調査した。その結果、呼吸数、タイミングおよび呼吸不安定性において、上記の精神的負担の評価指標として有用であることが示唆された。

各呼吸指標におけるカーナビ操作の種類の判別の感度、呼吸活動の計測位置の観点を総括すると、自動車運転中のカーナビ操作によって生じる精神的負担の評価指標として、時間的測度においては計測位置が胸部、腹部に関わらず有効であり、吸気と呼気のバランスに関する測度は腹部のほうが、呼吸の安定性に関する測度は計測位置が胸部のほうが有効であった。そのため呼吸指標によって自動車運転中のカーナビ操作時に生じる精神的負担の評価を行う場合、計測装置のコストや計測の手間などを考慮して、胸部または腹部のどちらか片方のみにいて呼吸活動を計測し、時間的測度によって評価を行うことが推奨される。

参考文献

- 1) 内閣府：平成17年版交通安全白書，20-21，国立印刷局，東京，2005
- 2) 内閣府：平成18年版交通安全白書，16，国立印刷局，東京，2006
- 3) 内閣府：平成19年版交通安全白書，18，佐伯印刷，東京，2007
- 4) Summala H, Lamble D, et al: Driving experience and perception of the lead car's braking when looking at in-car targets, Accident Analysis & Prevention, 30 (4), 401-407, 1998
- 5) 篠原一光，嶋田淳，他：車載情報機器利用時のドライバの認知負担の刺激検出課題による評価，自動車技術会 学術講演会前刷集No.81-12, 13-18, 2012
- 6) 篠原一光，三浦利章：情報機器利用による自動車運転者の注意への肯定的影響と否定的影響，大阪大学大学院人間科学研究科紀要，30，15-34，2004
- 7) 森下昌彦，石田健二：車室内表示操作機器の操作性因子に関する研究，デンソーテクニカルレビュー，18，114-121，2013
- 8) 芳賀繁：メンタルワークロードの理論と測定，35-55，日本出版サービス，東京，2001
- 9) 横井都司如，井東道昌，他：ドライバの精神負荷に対する耐性を考慮した心拍変動量からの主観的精神負荷度推定，電気学会論文誌C，131 (12)，2051-2056，2011
- 10) 下野太海，大須賀美恵子，他：心拍・呼吸・血圧を用いた緊張・単調作業ストレスの評価手法の検討，人間工学，34 (3)，107-115，1998
- 11) 栗谷川幸代，景山一郎：心拍変化を用いた人間・自動

車・環境系の精神負担評価モデルの構築, 日本機械学会論文誌C編, 71(702), 533-540, 2005

- 12) 福島正紀, 山越健弘, 他: 生体反応計測・解析に基づく単調運転時の生理活性度指標の検討, 電子情報通信学会技術研究報告, MBE, MEとバイオサイバネティクス, 106(80), 13-16, 2006
- 13) 亀田裕之, 江口一彦: 心電図・呼吸測定によるドライバー状態推定システムの開発, 愛知工業大学研究報告, 45, 87-93, 2010
- 14) 野澤昭雄, 三澤裕樹, 他: 顔面熱画像解析による会話形態に関する運転者のメンタルワークロードの評価, 電気学会論文誌E, 126(8), 412-418, 2006
- 15) 梅沢章男: 呼吸活動, 宮田洋監修, 新生理心理学1巻 生理心理学の基礎, 196-209, 北大路書房, 京都, 1998
- 16) 梅沢章男: ストレス刺激に対する呼吸活動の変容生理心理学と精神心理学, 9(1), 43-55, 1991
- 17) 平柳要, 岩崎賢一, 他: メンタルワークロード (MWL) の測定・評価法に関する実験的検討, 人間工学, 32(5), 251-259, 1996
- 18) 黒原彰, 寺井堅祐, 他: 虚偽検出における呼吸系変容一裁決質問に対する抑制性呼吸の発現機序一, 生理心理学と精神生理学, 19(2), 75-86, 2001a
- 19) Denot-Ledunois S, Vardon G, et al: The effect of attentional load on the breathing pattern in children, International Journal of Psychophysiology, 29, 13-21, 1998
- 20) Takasawa N, Matsuda I, et al: Attention focusing suppresses the respiratory movement, International Journal of Psychophysiology, 54 (Abstract), 184-185, 2004
- 21) 石川貴洋, 石田健二, 他: 車載情報機器操作時の精神的負担の行動的評価手法の開発と有効性の検討, デンソーテクニカルレビュー, 18, 104-113, 2013
- 22) 藤井達史, 内藤宏, 他: IVIS機器操作に伴うドライバの精神的負担評価のためのマルチモーダル刺激検出課題の実車実験における妥当性検討, 自動車技術会論文集, 45(4), 723-728, 2014
- 23) 小林孝寛: 実務ポリグラフ検査時に生じる呼吸反応の時間的变化, 生理心理学と精神生理学, 29(3), 205-216, 2011
- 24) 高瀬弘樹: ストレスおよびリラックス状態の呼吸運動, 信州大学 人文科学論集, 人間情報学科編, 45, 81-94, 2011
- 25) 芳賀繁: NASAタスクロードインデックス日本語版の作成と試行, 鉄道総研報告, 8(1), 15-20, 1994
- 26) 黒原彰, 寺井堅祐, 他: 呼吸運動の虚偽検出マーカーが反映する呼吸系変容, 日本鑑識科学技術学会誌, 6(1), 27-34, 2001b
- 27) 黒原彰, 梅沢章男: ポリグラフ検査で出現する抑制性呼吸の発現機序, 生理心理学と精神心理学, 27(1), 35-44, 2009
- 28) 中川千鶴, 大須賀美恵子, 他: VE酔い評価手法の開発に向けての基礎的検討, 人間工学, 36(3), 131-138, 2000

著者情報

須澤将馬 (すざわしょうま)

2016年関西大学大学院理工学研究科システム理工学専攻機械工学分野博士課程前期課程修了。同年4月より現職であるオムロンオートモーティブエレクトロニクス(株)へ入社し、現在に至る。修士(工学, 2016年関西大学大学院)。ドライバーに生じる精神的負担の評価や、作業者の蓄積疲労の評価に関する研究に従事。

小谷賢太郎 (こたにけんたろう, 正会員, 連絡著者)

1996年ペンシルバニア州立大学産業工学科修了, Ph.D.. 1996年4月関西大学工学部管理工学科助手, 専任講師, 助教授, 准教授を経て2010年より関西大学システム理工学部機械工学科教授。2010年より日本人間工学会理事(国際協力担当)。専門領域: 視覚, 触覚, 筋電図などの生体信号

の処理と応用。

連絡先: kotani@kansai-u.ac.jp

鈴木 哲 (すずきさとし, 正会員)

1998年青山学院大学大学院理工学研究科博士課程修了。博士(工学)。ドイツ・アーヘン工科大学労働科学研究所研究員(ドイツ学術交流会奨学生)。青山学院大学理工学部助手, 首都大学東京システムデザイン学部助教を経て, 2011年より関西大学システム理工学部准教授。専門は人間工学, 生体医工学, マン・マシンインタフェース。

朝尾隆文 (あさおたかふみ, 正会員)

2007年香川大学大学院博士後期課程修了。博士(工学)。同年より関西大学システム理工学部機械工学科助教。2014～2015年スウェーデン・ハルムスタッド大学客員研究員(関西大学在外研究員)。人間-機械系, ヒトの視覚・知覚に関する研究に従事。日本人間工学会, 自動車技術会, 日本機械学会等の会員。

篠原一光 (しのはらかずみつ, 正会員)

大阪大学大学院人間科学研究科博士後期課程中退, 2001年博士(人間科学)。1995年大阪大学人間科学部助手, 2013年より大阪大学大学院人間科学研究科教授。専門は自動車運転場面や労働場面, 日常生活における行動の応用認知心理学的研究。日本人間工学会, 日本心理学会, 日本認知心理学会, モバイル学会等会員。

内藤 宏 (ないとうひろし, 正会員)

2002年大阪大学人間科学部卒。博士(人間科学)。日本学術振興会特別研究員, 大阪大学大学院人間科学研究科助教を経て, 2014年より(株)デンソーに勤務。専門領域は認知心理学。車載HMI, ドライバ状態評価に関する研究に従事。

連絡先: hiroshi_naito@denso.co.jp

藤井達史（ふじいたつふみ）

2014年大阪大学大学院人間科学研究科博士前期課程修了。修士（人間科学）。同大学、博士後期課程在学中。また、2015年より日本学術振興会特別研究員。専門領域：認知心理学、所属学会：日本心理学会、日本認知心理学会、自動車技術会ほか。

石川貴洋（いしかわたかひろ）

1999年名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻を卒業し、(株)デンソーに勤務。HMI開発、人間特性評価に従事。

松岡孝（まつおかたかし）

2012年立命館大学理工学研究科卒。2012年より(株)デンソーに勤務。ドライバの覚醒疲労に関する研究に従事。専門領域：ヒューマンマシンインタフェース開発、ドライバ状態評価、生体計測。

連絡先：takashi_m_matsuoka@denso.co.jp

石田健二（いしだけんじ，正会員）

1991年信州大学大学院工学系研究科修士課程修了。1991年～2001年マツダ(株)。2001年～2004年ヤマハ(株)。2005年より(株)デンソーに勤務。2010年信州大学大学院総合工学系研究科、博士（工学）人間工学、筋活動・ユーザビリティ／ユニバーサルデザイン、安全・事故、生理心理学に関する研究に従事。認定人間工学専門家（CPE）。

日本人間工学会、日本自動車技術会、日本感性工学会会員。