

健常者における神経疲労時の発話音声特徴について

新谷 純¹⁾ 塩見 格一¹⁾ 小林 康孝²⁾

要 旨：疲労状態は慢性化すると重大な過失や事故につながる重要な指標であるにもかかわらず、主観的な聴取や時間のかかる生化学検査などで評価されてきた。本研究ではタブレット端末を用いて注意機能を持続させる課題を実施し一時的な中枢神経の疲労状態を引き起こした。疲労課題前後の被験者の音声を録音し、カオス理論を用いた解析手法にて被験者の脳の覚醒度を数値化した。課題への集中が不十分であったと思われる症例を除き脳の覚醒度を示すCEM値は課題後に有意に低下していた。

(福井医療科学雑誌 18:10-14, 2021)

【Key words】 音声解析, 疲労状態, カオス理論, 脳の覚醒度

緒 言

1. 疲労研究の目的

疲労とは過度の肉体的および精神的活動、または疾病によって生じた独特の不快感と休養の願望を伴う身体の活動能力の減退状態である¹⁾。疲労状態は自動車事故や重大な判断ミスなどを引き起こす可能性があることから、社会問題として取り上げられることも多い²⁾。疲労度の評価は自覚的疲労度を聴取する方法や³⁾血中へ放出されるコルチゾールやカテコールアミンの濃度を測定する手法などによって数値化が試みられている⁴⁾。しかし疲労による業務への支障や事故を防ぐためには、疲労時や運転前に、危険な状態である疲労度を即座に測定できることが望ましく、簡便かつ迅速な疲労状態の測定手法の確立が求められている。

塩見⁵⁾は長時間のトラック走行後の疲労状態の測定に、運転者の音声サンプルに対してカオス理論を用いた解析を行い、長時間の運転における疲労(身体的疲労および中枢神経系の神経疲労)により脳の覚醒度を示す値(CEM)が低下することを報告している。佐藤ら⁶⁾は抗ヒスタミン薬を服用した被験者の音声に同様の手法を用いて検討を行っており、抗ヒスタミン薬服用後にCEM

が低下したと報告している。これらの研究で用いられた解析対象は音声信号であり、非侵襲的で簡便な手段による疲労状態の数値化を目指すものである。しかしながら、トラック運転手の疲労実験では身体的な疲労と、注意力を持続させたことによる神経疲労を区別することが困難である。また服薬による脳の覚醒度の影響は、疲労とは本質的に異なる状況である。先行研究をみても脳機能に関わる中枢神経系の疲労のみに着目して、音声信号との関係を解析した研究は見られない。本研究の目的は、中枢神経疲労時の音声信号からカオス理論を用いた解析を行い、CEM値がどのように変化するか明らかにすることである。

方 法

1. 疲労課題

ヒトのカラダは負荷や刺激が持続して加わると疲労し、休息をとることによって回復する、という過程を繰り返しながら生命活動を維持している⁷⁾。疲労時には脳の覚醒を維持する機能が低下することも報告されている⁸⁾。根本ら⁹⁾は中枢神経系の疲労を喚起する課題としてAdvanced Trail

1) 福井医療大学保健医療学部 リハビリテーション学科 言語聴覚学専攻

2) 福井医療大学大学院 保健医療学研究科

(採択日 2022年3月)

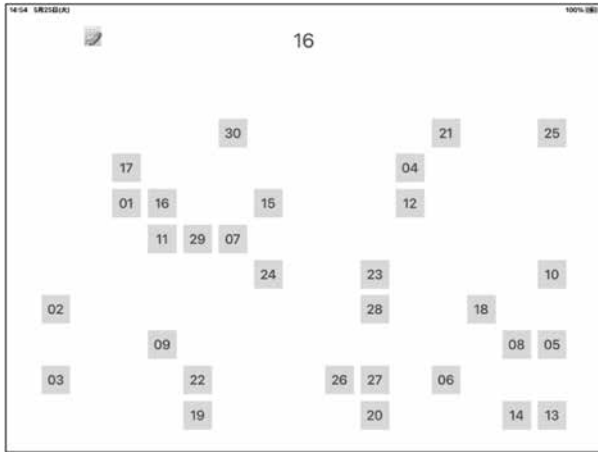


図1. タブレットを利用した疲労課題図

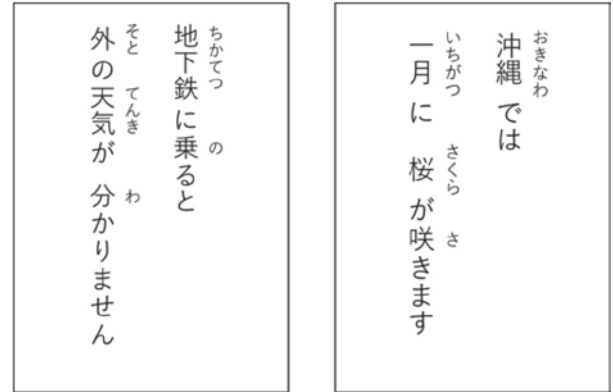


図2. 音読テキスト例

Making Test(ATMT)とよばれるタブレット上で施行される視覚探索反応課題を作成し、いくつかの精神疲労試験に用いた。120分間の試行でもエラー数、反応時間に大きな変化は生じないことが分かったが、疲労感に関する脳部位探索研究においては、ATMTによる疲労負荷により疲労感を統括する眼窩前頭野の機能低下が明らかになっている¹⁰⁾。本研究では、身体的な疲労ではなく、注意持続による中枢神経の一時的な疲労状態を引き起こすために、根本らの先行研究に倣ってタブレット上で作動する視覚性探索課題を疲労課題として作成した(図1)。

課題はタブレット(iPad)上に1~30の数字がランダムで配置され、上部に記された目標の数字を見つけてタッピングする条件とした。制限時間は10秒とし、目標の数字をタップするか、制限時間を超えると1問ごとに目標の数字と、探索用の数字30個の配置がランダムに変化するように設定した。この条件にて120分間連続で「できるだけ早く反応する」ように教示して課題を行った。正答数及び、エラー数(制限時間以内に反応できなかったもの)をとして記録した。

2. 対象

1) 被験者の選択基準

福井医療大学に通う精神疾患や脳血管障害等の既往がない大学生で、疲労課題に最後まで集中して取り組んだ者。

2) 被験者

19名の大学生(男性6名、女性13名、平均年齢22.1歳、SD=0.64)が研究協力者として実験に参加した。

3) 文書による患者の同意

説明文書の内容を理解し、かつ同意書に自署することにより自由意志により研究参加に同意する者のみ対象とした。

3. 音声収録方法

1) カオス理論を用いた音声解析方法

カオス論的な分析手法においては、デジタル化された音声信号を多次元の位相空間に置き換えることによって、ストレンジ・アトラクタと呼ばれるオブジェクトを描出することができる。長時間に渡る作業を遂行して疲労した場合や、睡眠導入剤を服用して覚醒度が低下した場合に、ストレンジ・アトラクタのゆらぎが減少することが明らかとなっている¹¹⁻¹⁵⁾。疲労の度合いを評価するためにアトラクタを数値化する必要があり、Takensの埋め込み定理によって観測時系列から時間遅れ座標への変換を行い¹⁶⁻¹⁷⁾、Sano & Sawadaによって提唱されたアルゴリズムを用いて最大リアプノフ指数を計算する¹⁸⁻¹⁹⁾。得られた数字に塩見¹⁵⁾の考案した解析手法を用いることで、脳の覚醒度を示す指数であるCEM(Cerebral Exponent Macro)と呼ばれる数値の算出を行った。すべての被験者に後述する35個の文章を音読させ、1文ずつCEM値を算出し、35文の平均値を個人のCEM値とした。

2) 録音環境及びフォーマット等

音声収録室としては環境雑音の少ない個室を想定し、また残響を低減するために壁面には吸音パネルを設置した。被験者は、机に向かって座った状態で、紙に印刷されたテキストの音読を行うこととして、ヘッドセット・マイクロフォン及びマイクロフォン・スタンドに設置し

たハンドヘルド・スピーチ・マイクロフォンを利用し、マルチトラック・レコーディングを行った。なお、音声データ・フォーマットは24bits@48.0kHz/chとした。

4. 音読テキストの作成

研究参加者には、一定の条件に設定する音声収録環境において、共通のテキスト(35文)を朗読してもらうこととして、朗読による発話音声を収録した。なお、テキストは、PCモニター画面に1文ずつ表示し、感情を想起するような文章は使用せず、漢字にはルビをつけて提示した(図2)。

5. 統計的事項

CEM値は、ある程度の個人差が生じる数値であるため、本研究におけるCEM値の比較は、個人の疲労課題前後の数値に対して行った。35個の文章につき、1文ずつCEM値を算出し、35文の平均値を個人のCEM値とし、課題前と課題直後のCEM値について、t検定(paired t-test)を用いて、有意水準5%で差を検討した。

6. 倫理的配慮

本研究では音声データサンプル、患者基本情報、臨床評価尺度について個人情報扱うため、研究上知りえた情報を厳重に管理する必要がある。文書化した記録は、研究責任者が鍵のかかるロッカーに保管し、破棄する場合は細断した。

本研究の研究者は「ヘルシンキ宣言」および「人を対象とする医学形研究に関する倫理指針」を遵守して実施した。なお、本研究は新田塚医療福祉センターの倫理審査委員会の承認を受けている(新倫20121-31)。

結 果

1. CEM値(表1)

被験者19名のうち15名にて、疲労課題の前後でCEM値に有意な低下を示した。疲労課題のエラー数(タイムオーバーになった数)をみると、疲労課題後にCEMの低下した15名では、先行研究⁹⁾におけるエラー数の基準値(300秒間に生じるエラーの平均数; 3.25 ± 1.2)以内にすべての被験者が該当したのに対して、疲労課題後にCEM値の低下がみられなかった4名では、いずれも疲

表1. 被験者における疲労課題前後のCEM値 n=19

subject	pre		post		p-value
	mean	SD	mean	SD	
1	332.07	29.28	305.90	20.06	p<0.001
2	354.99	30.09	248.72	25.8	p<0.001
3	310.47	16.27	319.58	18.17	p=0.12
4	333.36	24.43	316.98	17.59	p<0.001
5	280.34	18.92	272.82	33.19	p=0.068
6	260.03	15.93	264.78	15.02	p=0.64
7	281.45	12.51	263.87	10.79	p=0.046
8	311.54	25.2	268.33	11.25	p<0.001
9	299.32	27.61	274.30	16.45	p<0.001
10	265.41	19.39	251.39	24.36	p=0.028
11	331.02	18.95	317.25	12.5	p<0.001
12	282.00	13.56	262.80	21.61	p=0.013
13	327.82	21.65	287.99	17.78	p<0.001
14	335.40	26.13	311.73	11.48	p<0.001
15	340.64	16.17	292.76	18.1	p<0.001
16	317.95	18.13	274.58	22.12	p<0.001
17	289.14	27.44	261.98	10.72	p<0.001
18	289.72	19.36	292.33	17.47	p=0.088
19	309.69	25.51	268.33	21.85	p<0.001

表2. 疲労課題の正答数と総エラー数 n=19

Subject	正答数	総エラー数	300secごとのエラー数平均
1	1864	43	1.79 ± 1.3
2	1899	37	1.54 ± 1.13
3	1582	167	6.96 ± 3.12
4	1974	26	1.08 ± 0.61
5	1625	110	4.58 ± 2.45
6	1388	217	9.04 ± 3.93
7	1695	86	3.58 ± 1.18
8	1671	51	2.13 ± 0.89
9	1763	48	2.01 ± 0.68
10	1665	71	2.96 ± 1.66
11	2143	22	0.92 ± 0.46
12	1634	72	3.04 ± 0.98
13	1784	39	1.63 ± 0.43
14	1701	45	1.88 ± 0.65
15	1856	35	1.46 ± 1.2
16	1558	61	2.54 ± 1.36
17	1897	31	1.29 ± 1.01
18	1433	195	8.13 ± 2.67
19	1783	49	2.04 ± 0.93

労課題のエラー数が基準値を1SD以上超えて出現していた(表2)。この4名については疲労課題終了後の聴取にて、中盤に居眠りをしていたと回答した。そのため、課題中に休憩が生じ、十分に疲労したとは言えない状態であった。

考 察

疲労課題の施行後に被験者19名中15名では疲労課題の後で有意にCEM値が低下した。CEM値は長時間の労働などで疲労が生じた場合に低下することが報告されている¹⁶⁾。視覚探索課題は比較的長時間の負荷により注意配分の低下を伴う急性疲労や慢性疲労が生じることが報告されている通り¹⁹⁾、今回設定したタブレット上で行う視覚探索課題は、120分間「なるべく早く探索する」という条件で試行したことで、長時間にわたる持続的な刺激が一時的な中枢神経の疲労状態を引き起こしたと考えられた。

脳損傷や神経伝達物質の問題によって脳が疲労から回復できずに機能低下を起こすことが知られている²⁰⁾。脳機能とパフォーマンスに関する研究では、中枢性疲労によって心肺機能が制限されるだけでなく筋力発揮が低下することや²¹⁾、運動麻痺のない脳病変患者であっても運動パフォーマンスに低下がみられることが報告されている²²⁾。中枢神経の疲労状態は脳のネットワークを簡素化し、脳由来の生体信号である様々なパフォーマンスに変化が現れる。本研究ではタブレット端末上にアプリケーションとして作成した疲労課題を120分間継続実施することによって、数字を探索してボタンをタップするという刺激が繰り返され、一時的な中枢神経の疲労状態を引き起こすことが可能であった。通常耳で聞いてもその変化を検出することは難しく、音の高さや強さのパラメーターだけを見ても心身の状態を同定することは難しい。そのためこれまで疲労の状態を数値化することは難しく、自覚的疲労度を聴取や、時間のかかる生化学検査などによって研究されてきた。本研究では、これまでランダムノイズであると判断されていた音声信号から「疲れている」という状態を短時間で簡便かつ非侵襲的に定量化・可視化することが可能であることが示され、日々の健康状態の評価指標として実用的な解析手法であると考えられる。

本研究の限界

本研究ではCEM値の測定を課題の前後に限局して行ったが、今後は疲労状態から回復に至る経過についてもCEM値の測定を行う必要がある。また、疲労課題に

てエラー数の多い被験者4名については疲労課題後にCEM値の変化がみられなかった。特に課題施行の中盤に極端なエラー数の集中が確認されたのは、本課題が単純な視覚探索であるために、被験者の眠気を誘発し、傾眠傾向に陥っていた可能性が高い。課題途中で適度な休憩が生じたために、CEM値が低下しなかったと考えられ、課題の構成や試行環境の設定に検討の余地がある。

結 語

十分に集中した環境で持続的に課題を遂行することで、一時的な中枢神経の疲労状態を作り出すことが可能であり、疲労した状態の音声信号についてカオス理論を用いた解析を行った結果、課題への集中が不十分であったと思われる症例を除き、CEM値の減少が確認された。CEM値は人間の覚醒状態を表す指標として有用なものであると考えられる。今後は、脳疾患やうつ病による脳機能低下を生じている症例への臨床応用や、ストレス反応としての指標を確立したい。

謝 辞

本研究に際し、ご協力を賜った 福井医療大学言語聴覚学専攻の方々に深く御礼申し上げます。

本研究において、開示すべき利益相反はありません。

文 献

- 1) 日本疲労学会. 抗疲労臨床評価ガイドライン 日常生活により問題となる疲労に対する抗疲労製品の効果に関する臨床評価ガイドライン.
- 2) 斎藤良夫. 労働者の疲労の研究方法に関する諸問題. 労働科学 2004 ; 80(1) : 30-37
- 3) 田口敏行. 自動車運転時の疲労評価. 豊田中央研究所R&Dレビュー 1998 ; 30(4) : 25-31.
- 4) 田中喜秀, 脇田慎一. ストレスと疲労のバイオマーカー. 日本薬理学雑誌 2011 ; 137(4) : 185-188.
- 5) 塩見格一. 過労防止のための音声分析技術開発の

- 経緯と現状. 日本航海学会誌 2010 ; 174 : 86-95.
- 6) 佐藤清, 及川太, 及川健太郎ほか. 音声のカオス論的指数値による心身状態評価に関する研究(3) : -指数値に表れた抗ヒスタミン剤服用の影響-. 人間工学 2013 ; 49(Supplement) : 260-261.
- 7) 南谷晴之. 疲労とストレス. バイオメカニズム学会誌 1997 ; 21(2) : 58-64.
- 8) 内山真. 睡眠の役割とメカニズム. 日大医学雑誌 2020 ; 79(6) : 327-331.
- 9) 梶本修身. Trail-Making-Test を改良した「ATMT 脳年齢推測 痴呆判別ソフト」の臨床的有用性. 新薬と臨床 2000 ; 49(4) : 104-115.
- 10) 水野敬. 疲労による作業能率の低下の解析. 医学のあゆみ 2009 ; 228(6) : 654-658.
- 11) 佐藤清, 澤貢, 水上直樹ほか. ドライビングシミュレータ運転中の発話音声のカオス性に及ぼす発話方法の影響. 人間工学 2008 ; 44(特別号) : 142-143.
- 12) 藤本泰成. カオス理論の工学適用と事例紹介 第三回産業応用編〜診断〜. 日本知識情報ファジィ学会誌2010 ; (5) : 583-590.
- 13) 高岡美智子, 塩見格一, 小野繁ほか. 発話音声による心身状態の診断可能性について. 総合健診 2002 ; 29(3) : 596-602.
- 14) 塩見格一. 過労防止のための音声分析技術開発の経緯と現状. 日本航海学会誌 2010 ; 174 : 86-95.
- 15) 池口徹, 合原一幸. 力学系の埋め込み定理と時系列データからのアトラクタ再構成. 応用数理 1997 ; 7(4) : 260-270.
- 16) Takens F. "Detecting Strange Attractors in Turbulence," in "Dynamical Systems and Turbulence". Lecture Notes in Mathematics 1981 : 366-381.
- 17) 池口徹, 山田泰司, 小室元政: カオス時系列解析の基礎理論. 合原一幸(編), カオス時系列解析の基礎と応用. 東京, 産業図書 ; 2000. 121-189.
- 18) M. Sano and Y. Sawada, "Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series", Phys. Rev. Lett 1985; 55: 1082-1085.
- 19) 塩見格一. カオス論的な音声分析による心身状態の評価—電子航法研究所の発話音声分析技術—. 日本航海学会誌 2014 ; 190 : 29-39.
- 20) 渡辺恭良. 疲労の科学・脳科学と抗疲労製品の開発. 日本生物学的精神医学会誌 2013 ; 24(4) : 200-210.
- 21) Crandall J, González A. Cardiovascular function in the heat - stressed human. Acta Physiol 2010 ; 199(4) : 407-423.
- 22) 後藤淳. 高次脳機能障害に対する運動療法. 関西理学 2006 ; 6 : 5-13.