

有酸素運動が英単語記憶課題に及ぼす影響とその条件

大原 健太郎^{1,a)} 中井 拓海^{1,b)} Andrew Vargo^{1,c)} 黄瀬 浩一^{1,d)}

概要：

ランニングやウォーキングなどの有酸素運動は、記憶課題の成績向上に有効であるとの報告がなされるにつれ、それをを用いた新しい学習方法が検討されつつある。ただし、従来の研究では有酸素運動が学習に効果的であることは示しているものの、どのような有酸素運動がどのような人に効果的かは十分明らかになっていない。そこで、本研究では英単語の記憶課題を取り上げ、有酸素運動が学習に効果的となる条件を調査する。具体的には、運動強度を調整できるランニングマシンを用いて有酸素運動を行いながら、フラッシュカードアプリで英単語を記憶する。実験参加者 24 名を対象として暗記を実施し、暗記の 1 日後、3 日後、7 日後にテストを行った結果、7 日後には有酸素運動による差が認められなかったものの、1 日後で 7 パーセント、3 日後で 9 パーセント、正答率が向上し、この差は統計的に有意であることを確認した。また、機械学習を用いて有酸素運動が効果的となる人を推定したところ、recall, precision が共に 83.3% となり、有酸素運動が学習に効果的となる人を識別することに成功した。

キーワード：知能増強, 学習増強, 有酸素運動, 英単語暗記

1. はじめに

記憶力の向上には、有酸素運動中や有酸素運動後の学習が効果的であることが知られている [1]。Chapman らは週 3 回エアロバイクとランニングマシンを交互に 1 時間用いる運動を 3 か月続けたとき、単語を暗記する能力が大幅に上昇したことを示した [2]。さらに、実験開始から早々に差がつきはじめ、6 週間後には単語の暗記能力に大きな差が生まれたことも示した。これは、有酸素運動により記憶に関係する器官である海馬への血流量が増加したことに起因する。海馬への血流量が増加すると海馬の働きが活発になる。それにより海馬で最も多く生成される Brain Derived Neurotrophic Factor (BDNF) の生成量が増えると考えられている。BDNF とは脳内の神経細胞の成長を促したり維持したりする作用をもつタンパク質である。BDNF が脳細胞同士のつながりを強化することで記憶力が強化されることが知られている [1]。

海馬への血流量を増やす方法として心拍数を上げることが考えられる。Erickson らは心拍数が上がらないストレッチと心拍数が上がる持久力系トレーニングが海馬に与え

る影響を調査した [3]。その結果、ストレッチを行ったグループは海馬は縮小したのに対し、持久力系トレーニングを行ったグループでは海馬は成長していたと報告されている。しかし湯浅らの研究 [4] では、有酸素運動が必ずしも学習効果を生むわけではなく、学習効果のないケースや、かえって逆効果であるケースも存在すると報告している。ただしこの研究では、実験参加者が 10 名でありデータが不十分である。

このことから有酸素運動による記憶力の向上効果が認められる人には何らかの条件があると考えられる。そこで有酸素運動が記憶に効果的となる条件を見つけるため、運動と記憶の関係を調査する必要があると考える。運動と記憶の関係を解明することで事前に有酸素運動が効果的となる人と効果的でない人を判別し、その人に合った最適な学習方法を提案できる。

そこで本研究では、運動と記憶の関係を調査することを目的とし、有酸素運動が及ぼす学習効果について検証する。運動習慣に関するアンケートなどの情報を用いて有酸素運動が学習に効果的な人を識別することを試みる。

24 名の実験参加者を対象に、ランニングマシンを用いて有酸素運動を行いながら英単語を記憶する実験を行った。暗記の 1 日後、3 日後、7 日後にテストを行った結果、1 日後で 7 パーセント、3 日後で 9 パーセント、正答率が向上し、この差は統計的に有意であることを確認した。また、

¹ 現在、大阪府立大学大学院工学研究科

a) ohara@m.cs.osakafu-u.ac.jp

b) nakai@m.cs.osakafu-u.ac.jp

c) awv@umich.edu

d) kise@cs.osakafu-u.ac.jp

機械学習を用いて有酸素運動が効果的となる人を推定したところ、recall, precision が共に 83.3%となり、有酸素運動が学習に効果的となる人を識別することに成功した。

なお、本研究は、大阪府立大学工学研究科倫理委員会の承認を得ている事を付記しておく。

2. 関連研究

これまでの研究から、有酸素運動が学習に効果的となるには条件があると考えられる。有酸素運動の方法次第では学習に逆効果となってしまう。そこで、どのような有酸素運動が学習に効果的となるかを調べるため、有酸素運動が学習に有効となる条件について文献調査した。具体的には、合計で 18 の有酸素運動と記憶に関する論文について実験条件と有効性について調べた [2-19]。その結果、16 の論文で有酸素運動の有効性が示され [2-17]、2 つの論文で有酸素運動の効果が見られなかった [18, 19]。

運動を伴う学習を調査した研究には、習慣的に運動しながら記憶力を長期的に測定する研究と、一過性の運動が記憶力に与える影響を調査する研究がある。一過性の運動に関する研究は運動前、運動中、運動後に学習するものに分けられる。ここでは、一過性の運動に関する研究について述べる。また、これらの研究では様々な運動強度で行われる。低強度、中強度、高強度の運動があるが、低強度は散歩程度の軽度の運動、中強度はうっすら汗ばむ程度の早歩きやジョギング、高強度はランニングなどの激しい運動を指す。

2.1 一過性の運動前後の学習に関する研究

まず、学習前の運動で効果があった実験について述べる。Loprinzi らは一過性の運動が記憶力に与える影響を調査した [6]。この研究ではランニングマシンを用いて高強度の運動を 20 分行い、その後に行う単語リスト記憶課題に及ぼす影響について検証した。ランニングマシンを用いて運動した後と安静にした後に単語リスト課題を出し、その成績を比較した。運動した日と安静にした日には 48 時間の隔たりがあるため、運動自体は互いに影響を及ぼさない。その結果、単語リスト課題の成績はランニングマシンを用いて高強度の運動を行った場合の方が有意に成績が高かった。この結果から学習前の高強度の運動は学習に有効であることが示唆されている。また、Loprinzi らは同実験で学習後の運動についても検証しており、学習後の高強度の運動と安静にしていた場合の成績に有意な差はなかった。このことから学習後よりも学習前の運動が学習に効果的であると考えられる。他の研究においても学習前の高強度、または中強度の運動が学習に効果的となった実験が多かった。

一方、学習前に中強度の有酸素運動を行い、後にテストを行う実験では有酸素運動の効果が見られなかった [18]。

これは早歩きの運動をした後に学習するものであったが、早歩き程度の運動では強度が十分でなく記憶力が上がるほど心拍数が上がらなかったと考えられる。このことから学習前の運動はある程度強度が高い運動を行うべきであると考えられる。

2.2 一過性の運動中の学習に関する研究

次に学習中の運動で効果があった実験について述べる。Schmidt らはランニングマシン上で歩行しながらの学習が単語の暗記に及ぼす影響を調査した [7]。この研究ではドイツ語を母国語とする実験参加者がポーランド語をランニングマシン上で歩行しながらの学習と椅子に座りながらの学習を行った。ランニングマシンの速度設定は実験参加者が決定した。これは低強度の運動であった。テストの結果は歩行しながらの学習のほうが椅子に座りながらの学習よりも有意にテストの成績が高かった。このことから学習中に行う低強度の運動は学習に効果的であることが分かる。

効果が見られなかったのは学習中に高強度の有酸素運動を行い、後にテストを行う実験である [19]。こうした実験では高強度の運動によって学習に集中できず、かえって成績が落ちてしまったと考えられる。このことから学習中の運動は、学習に支障が出ない低強度の運動を行うべきであることが分かる。

本章で挙げたような実験では、運動のタイミングや強度に注目しているが、個人の特性には注目していない。どのような人にこれらの条件が有効であるかは別途検証が必要である。

3. 英単語暗記の手法

湯浅らの研究 [4] では、有酸素運動が必ずしも学習効果を生むわけではないことがわかった。では、有酸素運動が学習に有効となる条件は何だろうか。有酸素運動が学習に有効となるには運動強度を適切に設定する必要があると考え、学習に適した運動強度があるのではないかと仮説を立てた。すなわち、心拍数を適切に設定して有酸素運動を行えば、学習効果が生まれるのではないかと考えた。仮説を検証するにあたって、有酸素運動が有効かどうかという指標を与えるために、式 (1) で表される得点率の差分 S_d を用いる。ここで、 S_e は運動しながら暗記した英単語のテストの得点率、 S_r は運動せず着席して暗記した英単語のテストの得点率を表す。そして、 $S_d > 0.05$ のときに有酸素運動が有効であると定義する。

$$S_d = S_e - S_r \quad (1)$$

運動を伴う学習方法には 2.1 で述べた運動後、運動前に学習する方法と、2.2 で述べた運動中に学習する方法があ

る。本手法では 2.2 で述べた運動中の学習を行う。これは、運動前後に学習する場合、運動する時間と学習する時間をとる必要があるため、学習の補助として運動中の学習のほうが扱いやすいからである。

学習中には軽度の運動強度が適切だと考えられる。これは 2.2 でも述べたように学習中に高強度の運動を行った場合、学習に集中できずかえって成績が下がってしまう恐れがあるためである [19]。よって、今回の検証では有酸素運動の種類を軽度の運動である歩行とする。

学習中の運動の強度を設定するための適切な心拍数の算出方法として予備心拍 (Heart Rate Reserve(HRR)) を用いる。予備心拍とは最大心拍数と安静時の心拍数の差のことであり、式 (2) で表される。

$$R = H_m - H_r \quad (2)$$

$$H_m = 220 - a \quad (3)$$

ここで、 R は予備心拍 (HRR) を表し、 H_m と H_r はそれぞれ最大心拍数と安静時の心拍数、 a は年齢を表す。

式 (2)、(3) を用いて、目標心拍数は式 (4) で表される。

$$T_H = [(H_m - H_r) \times I] + H_r \quad (4)$$

ここで、 T_H は目標心拍数 (Target HR) を表し、 I は予備心拍の何%の強度かを表す。例として、20 歳で安静時の心拍数が 70bpm の人に対して予備心拍の 30% を目標としたときの目標心拍数は $T_H = (220 - 20 - 70) \times 0.3 + 70 = 109$ bpm となる。この式 (4) の I を調整することで目標最低心拍数と目標最高心拍数を設定し、その範囲内の心拍数に収まるように運動強度を調整する。

また、人によって運動中の心拍数以外の要因が、有酸素運動の効果にかかわっている可能性がある。そこで Global Physical Activity Questionnaire(GPAQ) [20] に答えてもらい、指標として用いる。GPAQ とは週にどれほどの頻度でどれほどの強度の運動をするかを評価するアンケートである。週に何時間どれくらいの強度の運動をしているかを質問し、普段の身体活動量を総 METs 量 (Total Metabolic Equivalent of Task) として計算する。総 METs 量とは式 (5) で表される値であり、運動強度を考慮して普段の身体活動量を表すものである。総 METs 量が大きいほど普段運動していることを表す。ここで、 M は総 Mets 量を表し、 E_h は高強度の運動、 E_m は中強度の運動、 E_t は移動時の運動を表す。また、GPAQ では一日の中で座ったりごろごろしている時間も質問し、その時間を Sedentary behavior と呼ぶ。

$$M = 8E_h + 4E_m + E_t \quad (5)$$

4. 実験

本実験では運動時と安静時での記憶力を比較することで

運動が記憶力に与える影響を調査した。実験参加者は日本人大学学部生、大学院生で男性 22 名、女性 2 名の計 24 名である。年齢は 20 ~ 25 歳である。これらの実験参加者に対し、運動する場合と運動しない場合に分けて英単語暗記を行ってもらった。

4.1 実験方法

実験の流れを図 1 に示す。有酸素運動には図 2 に示すランニングマシンを用いた。これは屋外でのランニングなどの移動を伴う有酸素運動を行いながらの学習は周囲への注意力が低下し、障害物にぶつかる危険性があるためである。また、本実験では心拍数を人によって調整しながら運動してもらう必要がある。ランニングマシンであれば速度や勾配を変更することで人によって強度を調整することができる。

実験の様子を図 3 に示す。まず実験参加者をランダムにグループ A とグループ B に分ける。次に実験参加者ごとに、ランニングマシンの速度や勾配を調整する。ランニングマシンの速度や勾配は予備心拍 (HRR) によって調整する。目標心拍数は軽度の運動を行っているときの心拍数となるように強度 I を $0.3 \leq I \leq 0.4$ とした。この目標を実現するようにランニングマシンの速度や勾配を調節した。その後グループ A の実験参加者はランニングマシンを使って、グループ B の実験参加者は椅子に座って英単語を暗記してもらった。この間、図 4 の心拍センサー:WHS-3 を用いて心拍数を記録した。ランニングマシンを用いながら英単語の暗記を行う際は、途中で休憩することは認めたが、休憩中に単語を暗記することは禁止した。

暗記する英単語はそれぞれ 60 語ずつとした。単語の暗記はスマートフォン上で図 5 に示すようなフラッシュカードアプリを用いて行った。フラッシュカードアプリでは各単語に「正」または「誤」のラベルを付けることができる。実験参加者が記憶したと感じる英単語には「正」、まだ記憶していないと感じる英単語には「誤」のラベルを付与してもらった。この作業を全ての英単語に「正」のラベルが付与されるまで行ってもらった。

単語テストは暗記を終えた 5 分後に覚えた 60 語を全て出題した。また、暗記を行った日から 1 日後、3 日後、7 日後に 20 語ずつ重複なしで出題した。すべての単語テストを終えた後、グループ A の実験参加者には椅子に座って、グループ B の実験参加者にはランニングマシンを用いて、同様の英単語暗記と単語テストを行ってもらった。実験に用いた単語は American National Corpus *¹において出現頻度ランキングが 30,000 位以下のものを選んだ。また実験参加者には GPAQ に答えてもらった。

*¹ <https://www.jamssystem.com/ancdic/index.html>

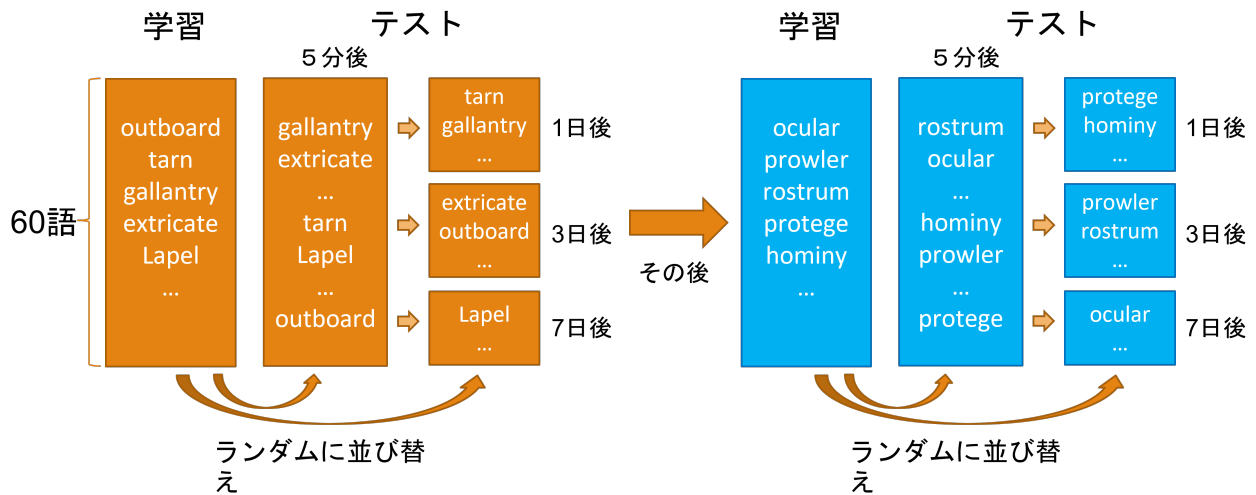


図 1: 実験の流れ



図 2: 用いるランニングマシン

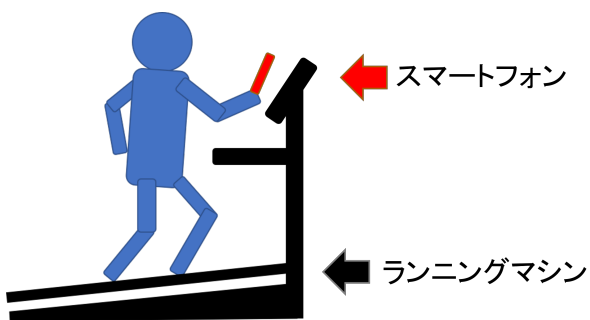


図 3: ランニングマシンを用いた暗記の実験の様子



図 4: 用いた心拍センサ:WHS-3



図 5: 用いたフラッシュカードの例

4.2 実験結果

図 6 に、ランニングマシンで覚えた単語の正解率と、座りながら覚えた単語の正解率の差分を示す。縦軸が正解率の差分を表し、横軸は実験参加者を表している。図 6 より有酸素運動が英単語学習に有効な実験参加者と逆効果となる実験参加者が存在していることが分かる。運動の効果を検証するために 2 標本 t 検定を用いた。運動しながら英単

語暗記を行ったとき (グループ 1) と運動せずに英単語暗記を行ったとき (グループ 2) の 2 つのグループ間において、帰無仮説を「2 群間に差はない」とし、対立仮説を「2 群間に正解率の差がある」とした。運動中に学習したときの単

表 1: 正解率の平均値と差

	正解率の平均 (運動)	正解率の平均 (着席)	平均の差	t 値	有意差
5 分後	0.87	0.86	0.01	0.28	$p = 0.78$ でなし
1 日後	0.83	0.76	0.07	2.4	$p = 0.02$ であり
3 日後	0.70	0.60	0.10	3.4	$p = 0.003$ であり
7 日後	0.47	0.38	0.09	1.9	$p = 0.067$ でなし

表 2: 各実験参加者のテストの正解率の差分と運動時の心拍数の平均

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12
学習 5 分後	-0.067	0.1	0.15	-0.083	0.017	-0.017	0	0.033	0	0	0.033	0.13
学習 1 日後	0.25	0	-0.05	0.15	0	0.05	0.05	0.05	0	-0.05	0.1	0
学習 3 日後	-0.05	0.1	0.15	-0.05	0	0	0.25	0.2	0	0.05	0.05	0.05
学習 1 週間後	0.35	0.15	0.05	0	-0.05	0.25	0.7	0	-0.05	0	-0.05	0
安静時の心拍数	71	78	82	65	83	67	65	78	75	78	70	78
運動時の心拍数の平均	112.9	124.4	139.1	114.9	126.6	133.0	120.0	120.8	122.7	122.9	151.7	113.9
	p13	p14	p15	p16	p17	p18	p19	p20	p21	p22	p23	p24
学習 1 日後	-0.05	0	-0.2	0.4	0.2	0.15	0.05	0.25	0.1	-0.1	0	0.4
学習 3 日後	-0.2	0.2	0.1	0.05	0.45	-0.1	0.2	0.25	0.2	0.05	0.1	0.25
学習 7 日後	0	0.15	-0.1	0.45	-0.1	-0.2	0	0.3	-0.1	0.3	0.2	-0.2
安静時の心拍数	72	58	82	72	65	82	82	81	76	65	74	72
運動時の心拍数の平均	126.2	104.8	129.7	147.6	106.7	121.6	125.7	127.8	118.1	108.3	117.3	142.3

語テストの正解率の平均値、座りながら学習したときの単語テストの正解率の平均値と t 検定の結果を表 1 に示す。表 1 中の 1 日後、3 日後、7 日後はそれぞれ英単語を暗記した日からの日数を表している。表 1 より暗記から 5 分後のテストでは有意差はみられないのに対し、1 日後と 3 日後で有意な差がみられた。予備心拍を使って心拍数を適切にコントロールすることで、有酸素運動の効果が出ることがわかった。この理由は、予備心拍を用いて各実験参加者が適切な心拍数となるよう調整することで、多くの場合、記憶課題に適した運動量を達成できることであろう。

今回の実験の目的は有酸素運動が有効となる条件を見つけることである。そこでまず、有効性の指標を用いて有酸素運動が学習に有効であった人を定義する。

表 2 に、実験参加者ごとの正解率の差分と心拍数などのデータを示す。また、有意差のあった 3 日後のテストにおいて、有効性の有無を表 3 に示す。必ずしも全ての実験参加者に有効性があるとはいえないことがわかる。

運動時の平均心拍数と 3 日後の得点率の差の関係を図 7 に示す。縦軸は暗記から 3 日後のテストの得点率の差、横軸は運動時の平均心拍数を表している。ここで有酸素運動の効果があった実験参加者を青い点、有酸素運動の効果なかった実験参加者を赤い点で表している。図 7 より運動時の平均心拍数が、必ずしも有効性の有無と強い相関があるわけではないことがわかる。また、運動時の平均心拍数が低すぎる参加者はいなかったが、一方で、p11 と p16 は平均心拍数が高く、運動強度が強すぎた可能性があるといえる。すなわち、予備心拍によって心拍数をコントロール

したにも関わらず、有酸素運動の効果なかった実験参加者もいた。

総 Mets 量と 3 日後の得点率の差の関係を図 8 に示す。総 Mets 量とは運動強度を考慮して普段の身体活動量を表すものであり、総 Mets 量が大いほど普段運動していることを表す。この図より、総 Mets 量と 3 日後のテストの得点率の差に弱い正の相関がみられた(相関係数=0.31)。このことから普段運動する人のほうが有酸素運動の効果が比較的あったということになる。安静時の心拍数と総 Mets 量の関係を図 9 に示す。図 9 から安静時の心拍数と総 Mets 量に負の相関がみられた(相関係数=-0.44)。このことから普段運動する人は安静時の心拍数が低くなることがわかる。

予備心拍は年齢と安静時の心拍数からのみ算出される値なので、普段運動する人のほうが目標心拍数が低くなる。p20 は安静時の心拍数が高くなっているが、総 Mets 量が高く普段運動しているため比較的運動強度が高くなっても適切な運動強度であった可能性がある。効果が見られなかった参加者に関しては安静時の心拍数が普段の安静時の心拍数より高く、算出された目標心拍数が適切な心拍数より高くなることで、運動時に適切な心拍数に調整できなかった可能性も考えられる。また、総 Mets 量が低く、普段運動しない人は予備心拍から算出した目標心拍数でも運動強度が高い可能性がある。逆に総 Mets 量が高く、普段運動する人は予備心拍から算出した目標心拍数では運動強度が足りない可能性がある。以上から、総 Mets 量も考慮した目標心拍数の設定が必要であると考えられる。

表 3: 3日後における有酸素運動の有効性

	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12
有効性	なし	あり	あり	なし	なし	なし	あり	あり	なし	なし	なし	なし
	p13	p14	p15	p16	p17	p18	p19	p20	p21	p22	p23	p24
有効性	なし	あり	あり	なし	あり	なし	あり	あり	あり	なし	あり	あり

Exercise - Rest

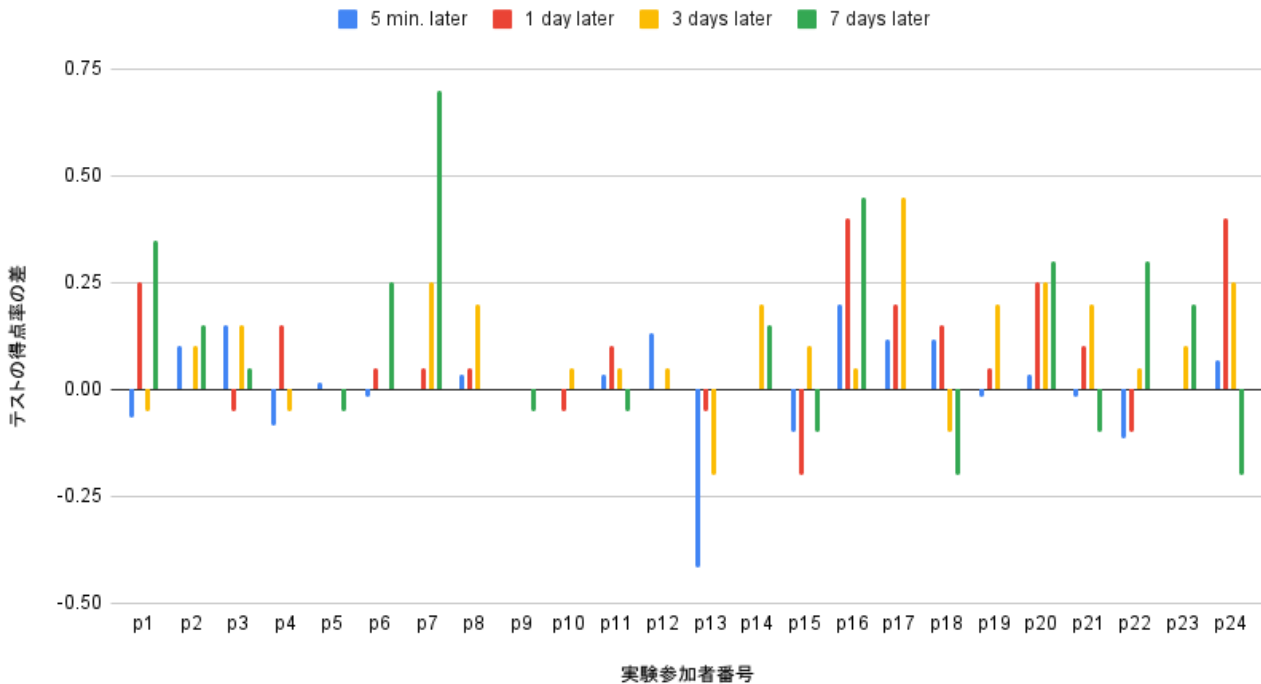


図 6: 各実験参加者のテストの得点率の差。運動ありのテストの得点率から運動なしでのテストの得点率を引いた値であり、棒グラフが 0.00 より上に伸びている場合は運動有でのテストの得点率のほうが高かったことを表す。

運動時の平均心拍数と3日後のテストの得点率の差

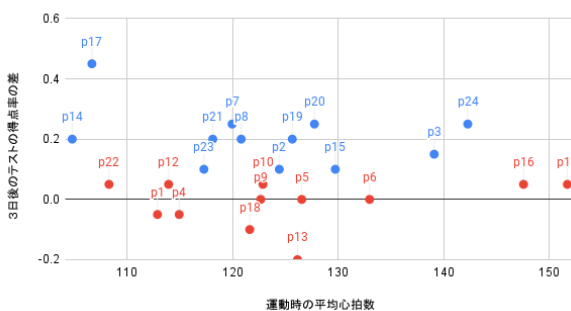


図 7: 運動時の平均心拍数と 3 日後のテストの得点率の差。青色は有酸素運動が学習に有効であった実験参加者を表し、赤色は有効でなかった実験参加者を表す。

総Mets量と3日後のテストの得点率の差

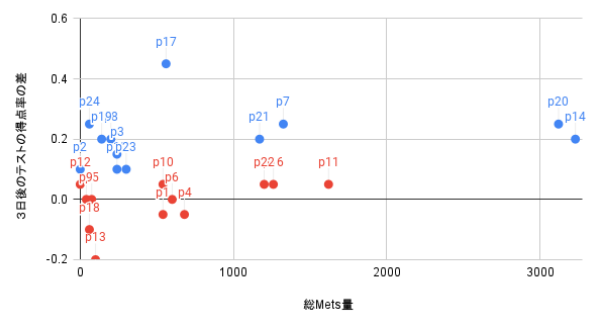


図 8: 総 Mets 量と 3 日後のテストの得点率の差。同様に青が有効、赤が有効でない実験参加者。

次に、現在の予備心拍を用いて設定した有酸素運動について、データから有効性が識別出来るかどうかを試みる。これが可能であれば、有効と予測される人に対して選択的に有酸素運動を適用することが可能となる。具体的には、

本実験で得たデータを用いて有酸素運動が有効だった人を識別する機械学習モデルを作成し、評価した。特徴量としては、安静時の心拍数と、GPAQ [20] の結果のうち、総Mets量と Sedentary behavior を用いた。これらの特徴量を用いて SVM とランダムフォレストで 1 日後、3 日後、

安静時の心拍数と総Mets量

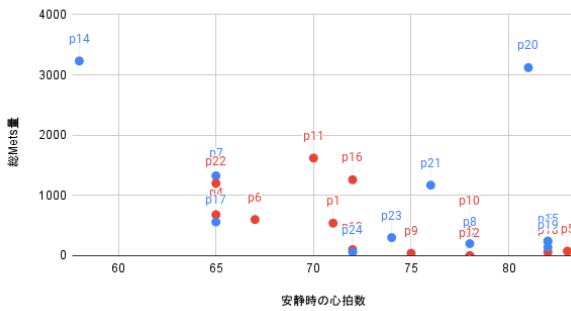


図 9: 安静時の心拍数と総 Mets 量. 同様に青が有効, 赤が有効でない実験参加者.

安静時の心拍数と3日後のテストの得点率の差

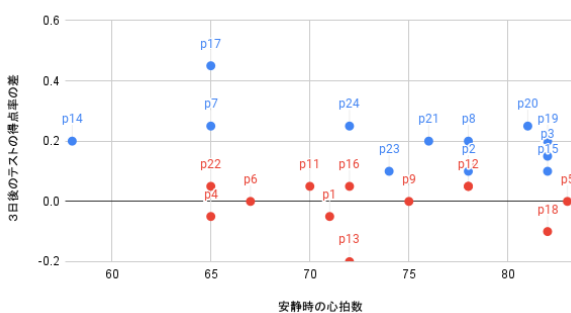


図 10: 安静時の心拍数と 3 日後のテストの得点率の差. 同様に青が有効, 赤が有効でない実験参加者.

7日後についてそれぞれ機械学習を行った. その結果に対する 11 点補完 recall-precision 曲線 (PR 曲線と呼ぶ) を, それぞれ図 11a, 図 11b, 図 11c に示す. 図中の RF はランダムフォレストでの PR 曲線を表し, Area Under the Curve(AUC) はグラフの曲線より下の面積を表す. AUC は 0 から 1 までの値を取り, 値が 1 に近いほど識別性能が高いことを表す. 図 11b より, 有意差のあった 3 日後において SVM とランダムフォレストで高精度の推定ができたことがわかる. SVM, ランダムフォレストで推定したときの precision と recall を表 4 に示す. ここで, baseline とは, 機械学習を用いずにすべての実験参加者を対象としたときの precision を表す. 1 日後, 7 日後の推定は baseline とそれほど差がなく有効とは言えないが, 3 日後では一定の recall のもと, baseline を上回る precision が得られており, 一定の有効性が確認できた. 特に SVM では, precision, recall が共に 83.3% となっており, ランダムフォレストに比べて高い精度の推定ができています.

3 日後についてランダムフォレストによって得られた特徴量の重要度を図 12 に示す. ここで, Resting HR は安静時の心拍数, total Mets は総 Mets 量である. この図より, 総 Mets 量が推定に最も大きく寄与していることがわかる.

表 4: SVM, ランダムフォレストの推定結果

	1 日後 3 日後 7 日後			
	baseline	0.375	0.5	0.375
SVM	precision	0.5	0.833	0.556
	recall	0.555	0.833	0.556
ランダムフォレスト	precision	0.375	0.769	0.5
	recall	0.333	0.833	0.444

5. まとめ・今後の課題

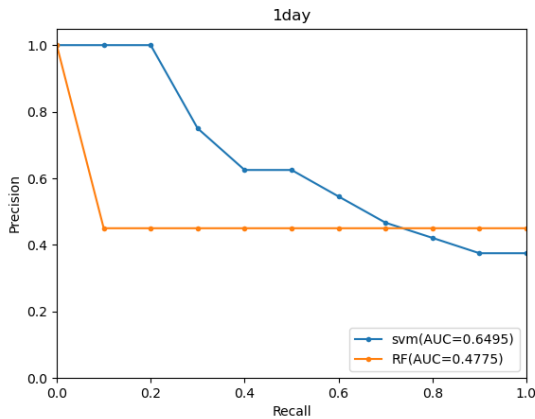
本稿では, ランニングマシンを用いた有酸素運動が英単語暗記に良い効果を与えるか否か, またどのような条件下で有酸素運動が学習に効果的となるかについて調査した. 心拍数をコントロールして実験を行った結果, 1 日後と 3 日後のテストで, 何もしない状態での学習と比べて運動中の学習のほうが成績が有意に向上した. また, 有酸素運動が有効となる人を SVM とランダムフォレストを用いて推定したところ, 暗記から 3 日後のテストにおいて高精度に識別することに成功した.

今回の実験では予備心拍を用いて目標心拍数を満たすように運動強度を調整したが, 実験の結果, 普段の運動習慣を考慮して運動強度を調整する必要があることが分かった. 今後は, さらに多くの人に実験に参加してもらい, 有酸素運動が学習に有効となる条件をより正確に検証する予定である.

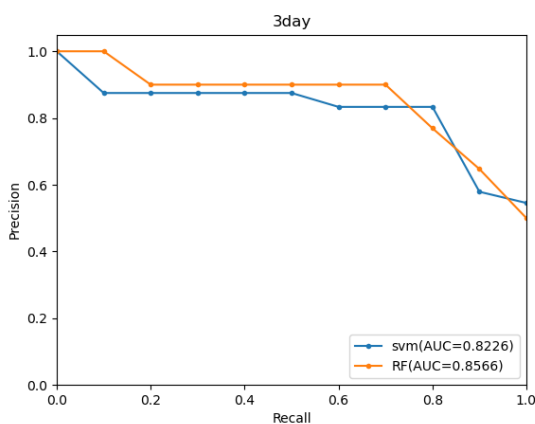
謝辞 本研究の一部は JST CREST (JPMJCR16E1), JST Trilateral AI Research (JPMJCR20G3), JSPS 科研費基盤 (B) (20H04213), JSPS 国際共同研究強化 (B) (20KK0235), 阪大 Society5.0 グランドチャレンジの補助による.

参考文献

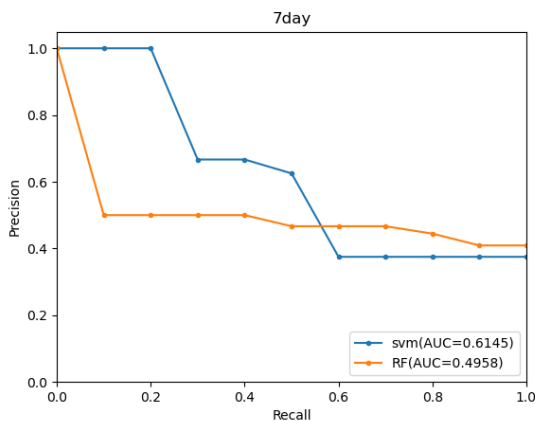
- [1] アンダース・ハンセン: 一流の頭脳, サンマーク出版 (2018).
- [2] Chapman, S. B., Aslan, S. and Lu, H.: Shorter term aerobic exercise improves brain, cognition, and cardiovascular fitness in aging., *Frontiers in aging neuroscience*, Vol. 5, p. 75 (2013).
- [3] Erickson, K. I., Voss, M. W., Prakash, R. S., Basak, C., Szabo, A., Chaddock, L., Kim, J. S., Heo, S., Alves, H., White, S. M., Wojcicki, T. R., Mailey, E., Vieira, V. J., Martin, S. A., Pence, B. D., Woods, J. A., McAuley, E. and Kramer, A. F.: Exercise training increases size of hippocampus and improves memory, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 108, No. 7, pp. 3017–3022 (2011).
- [4] 湯浅成章, 黄瀬浩一: 有酸素運動が英単語暗記に及ぼす影響の確認, 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション, Vol. 10, pp. 1–5 (2020).
- [5] 中野裕史, 安藤百恵, 梅守舞花, Hiroshi, N., Momoe, A., Maika, U.: 一過性走運動中の音楽聴取が若年女性の単語記憶と気分及び急性影響, 中村学園大学・中村学園大学短期大学部研究紀要, No. 48, pp. 187–191 (2016).
- [6] Loprinzi, P. D., Day, S., Hendry, R., Hoffman, S., Love, A., Marable, S., McKee, E., Stec, S., Watson, H. and



(a) 暗記から 1 日後の PR 曲線



(b) 暗記から 3 日後の PR 曲線



(c) 暗記から 7 日後の PR 曲線

図 11: PR 曲線

Gilliland, B.: The Effects of Acute Exercise on Short- and Long-Term Memory: Considerations for the Timing of Exercise and Phases of Memory., *Eur J Psychol*, Vol. 17(1), pp. 85–103 (2021).

- [7] Schmidt-Kassow, Zink, M., Mock, N. et al.: Treadmill walking during vocabulary encoding improves verbal long-term memory., *Behav Brain Funct* 10, p. 24 (2014).
- [8] Pontifex, M. B., Hillman, C. H., Fernhall, B., Thompson, K. M. and Valentini, T. A.: The effect of acute aerobic and resistance exercise on working memory.,

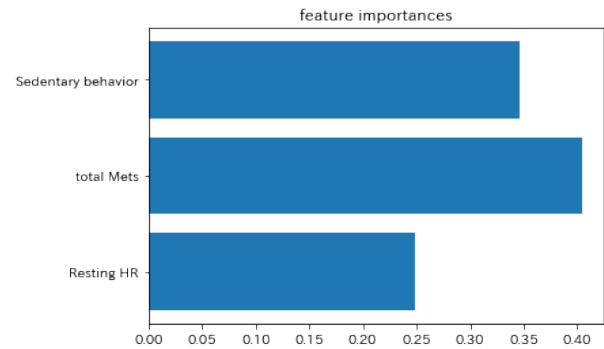


図 12: 特徴量重要度の一例

Medicine and science in sports and exercise, Vol. 41(4), p. 927–934 (2009).

- [9] Schmidt-Kassow, M., Deusser, M., Thiel, C., Otterbein, S., Montag, C., Reuter, M., Banzer, W. and Kaiser, J.: Physical exercise during encoding improves vocabulary learning in young female adults: a neuroendocrinological study., *PloS one*, Vol. 8(5), p. e64172 (2013).
- [10] Hötting, K., Schickert, N., Kaiser, J., Röder, B. and Schmidt-Kassow, M.: The Effects of Acute Physical Exercise on Memory, Peripheral BDNF, and Cortisol in Young Adults, *Neural Plasticity*, p. 12 (2016).
- [11] Coles, K. and Tomporowski, P.: Effects of acute exercise on executive processing, short-term and long-term memory, *Journal of sports sciences*, Vol. 26, pp. 333–44 (2008).
- [12] Etnier, J., Sprick, P., Labban, J., Shih, C.-H., Glass, S. and Vance, J.: Effects of an aerobic fitness test on short- and long-term memory in elementary-aged children, *Journal of Sports Sciences*, Vol. 38, pp. 1–9 (2020).
- [13] Most, S., Kennedy, B. and Petras, E.: Evidence for improved memory from 5 minutes of immediate, post-encoding exercise among women, *Cogn. Research*, Vol. 33, p. 2 (2017).
- [14] van Dongen, E. V., Kersten, I., Wagner, I. C., Morris, R. and Fernández, G.: Physical Exercise Performed Four Hours after Learning Improves Memory Retention and Increases Hippocampal Pattern Similarity during Retrieval., *Current biology : CB*, Vol. 26(13), p. 1722–1727 (2016).
- [15] Labban, J. D. and Etnier, J. L.: Effects of acute exercise on long-term memory., *Research quarterly for exercise and sport*, Vol. 82(4), p. 712–721 (2011).
- [16] McNerney, M. W. and Radvansky, G. A.: Mind racing: The influence of exercise on long-term memory consolidation, *Memory*, Vol. 23, pp. 1140 – 1151 (2015).
- [17] Winter, B., Breitenstein, C., Mooren, F. et al.: High impact running improves learning., *Neurobiol Learn Mem.*, Vol. 87(4), pp. 597–609 (2007).
- [18] Yanes, D. and Loprinzi, P. D.: Experimental effects of acute exercise on iconic memory, short-term episodic, and long-term episodic memory., *Journal of clinical medicine*, Vol. 7(6), p. 146 (2018).
- [19] Loprinzi, P., Day, S. and Deming, R.: Acute Exercise Intensity and Memory Function: Evaluation of the Transient Hypofrontality Hypothesis., *Medicina (Kaunas)*, Vol. 55(8), p. 445 (2019).
- [20] Bull, F., Maslin, T. and Armstrong, T.: Global physical activity questionnaire (GPAQ): nine country reliability and validity study., *J Phys Act Health*, pp. 790–804 (2009).