

環境ストレスが運動学習に及ぼす影響の神経行動学的検討
～効率的な運動学習の実現を目指して～

西島 壮

目 次

要約	1
緒言	2
方法	3
結果	6
考察	9
謝辞	11
参考文献	12

環境ストレスが運動学習に及ぼす影響の神経行動学的検討

～効率的な運動学習の実現を目指して～

西島 壮、細川 万智、川上 将史、雨宮 誠一郎、北 一郎

要約

我々はこれまで、背景音量とラットの迷路学習成績に逆 U 字関係がみられることを明らかにした (Amemiya et al., 2010)。そこで本研究は、背景音と運動学習の間にもこのような逆 U 字関係が成立すると仮説を立て、本仮説を検証することを目的とした。さらに、背景音が習得した運動パフォーマンス発揮に及ぼす影響も検証し、最後に、実験で用いた背景音の特性を脳神経活動への影響から検討した。実験には雄性 C57Bl/6 マウスを用いて行い、ストレスラーとして異なる強度 (70dB、100dB) の背景音 (ホワイトノイズ) をマウスに曝露した。対照マウスにはホワイトノイズを呈示せず、その際の環境音は約 40dB であった。運動学習と運動パフォーマンス発揮に及ぼす影響は、全身の協調運動課題であるローターロッド・テストにより評価した。その結果、背景音量の違いが全身協調運動の運動学習に及ぼす影響は認められなかった。一方、70dB 背景音により運動パフォーマンス発揮が促進され、その促進効果は 100dB 背景音では認められなかった。これは、背景音量と運動パフォーマンス発揮に逆 U 字関係が成立することを示している。さらに背景音の強度依存的に視床下部室傍核、扁桃体中心核、および大脳帯状皮質における c-Fos 発現が増加する傾向が認められ、特に 100dB 条件ではストレス反応・情動反応・覚醒反応が亢進している可能性が示唆された。したがって、高強度背景音によって運動パフォーマンス発揮が促進されなかった原因のひとつとして、ストレス・覚醒・情動反応の過剰亢進が関与している可能性が示唆された。本結果は環境ストレスにより誘引されるこのような脳神経活動の状態変化が、その後の運動パフォーマンス発揮に影響することを示唆している。環境ストレスによりその神経活性状態をコントロールすることは、運動パフォーマンス発揮を促進するための新たなコンディショニング方略となるかもしれない。

I. 緒言

アスリートは日々、競技力向上のために様々なトレーニングを実施しているが、その練習時間は限られていることから、トレーニングの効率を上げることは極めて重要な課題である。筋力や持久力など体力の向上を目指したトレーニングに関しては、運動生理学・体力学・運動栄養学に基づく数多くの研究により、様々な知見が集積されている[1-3]。しかしながら、新たな運動技能(スキル)を獲得すること(運動学習)が競技力向上に欠かすことができないにも関わらず、運動学習の効率を高めるために有効な方略は何か、また運動学習を阻害する要因は何か、といった疑問に答えるエビデンスは乏しい。さらには、習得した運動技能を十分に発揮するために有効な方略を実証することも、重要な課題として残されている。

古くから、ストレスが運動パフォーマンスに影響することが指摘されてきた[4, 5]。Weinberg(1978)は、心理的ストレス負荷の程度が投動作の正確性に及ぼす影響を検討し、中程度の心理的ストレス負荷が投動作の正確性を高め、心理的ストレスと運動パフォーマンスに逆 U 字関係が認められることを報告した[5]。一方、ストレスが運動学習にどのように影響するかはこれまでほとんど検討されておらず、ストレスと運動学習との間にも逆 U 字関係が認められるかは明らかでない。

ストレスがヒトおよび実験動物の行動に及ぼす影響を検討する際、ストレスラーとして背景音を用いる研究が広く行われている[6-8]。背景音は、音量および音質を調整することにより異なる強度・質のストレスを生体に負荷できる。なおかつ非侵襲的であるため、再現性のあるストレスラーとして極めて有効である。我々の研究室はこれまで、背景音がラットの迷路学習に及ぼす影響を検討し、中強度の背景音(70dB)がラットの迷路学習成績を向上させる一方、その促進効果は高強度の背景音(100dB)では認められないことを明らかにした[8]。このとき、背景音の強度依存的に視床下部室傍核(hypothalamic paraventricular nucleus, PVN)、大脳皮質、および扁桃体における c-Fos 陽性細胞数が増加しており、ストレス・覚醒・情動反応の亢進がみられた。この結果は、背景音と迷路学習の間に逆 U 字関係があり、過剰なストレス・覚醒・情動反応の亢進が迷路学習を阻害することを示唆している。

そこで我々は、背景音と運動学習の間にもこのような逆 U 字関係が成立すると仮説を立て、本仮説をマウスを被験対象として検証することを目的とした(実験1)。さらに、背景音が習得した運動パフォーマンス発揮に及ぼす影響も検証した(実験2)。最後に、実験で用いた背景音の特性を脳神経活動への影響から明らかにすることにより、ストレス・覚醒・情動反応と運動学習および運動パフォーマンスの関連について検討した(実験3)。

II. 方法

1. 被験動物

実験には、雄性 C57BL/6 マウス(搬入時 6 週齢、日本エスエルシー)を用いた。飼育環境は、5:00～17:00 を明期とする明暗サイクルで、室温 $22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $50 \pm 10\%$ に維持した。マウスは 4～6 匹ずつプラスチックケージで飼育し、水および餌は自由摂取とした。実験1～3はそれぞれ別のマウスを用いて、全て明期(9:00～13:00)に行った。本研究は、首都大学東京南大沢キャンパスの研究安全倫理委員会の承認の下、動物実験管理規定に従い実施した。全ての処置において、被験動物の肉体的・心理的苦痛を抑えることに最大限の配慮を施した。

2. 実験装置

マウスの運動学習および運動パフォーマンス発揮は、全身の協調運動能力が必要となるローターロッド・テストにより評価した[9]。テストはマウス用ローターロッド装置(ENV-576M, MedAssociate)を用いて行い、マウスを徐々に回転速度が速くなるロッド上に乗せ、ロッドから落下するまでの時間(ロッド上滞在時間)を計測した。本研究では、マウスがロッドに捕まったまま1回転した場合も落下とみなした。背景音にはホワイトノイズ(0 - 22 kHz)を用い、ロッド上 35cmに置かれたスピーカーから、設定値(70、100 dB)の $\pm 3\text{dB}$ に収まるように呈示した。なお、ホワイトノイズを呈示しないコントロール条件では、実験室内の背景音量は約 40dB であった。

3. 異なる強度の背景音がマウスの運動学習に及ぼす影響(実験1)

3-1. 実験環境およびローターロッド装置への馴化

マウスを実験環境に馴化させるため、テストの1週間前から毎日、個飼育ケージに移したマウスを実験室に運び、1時間安静にさせた。ローターロッド装置への馴化は、テストの前日に、以下の手順で行った。マウスを実験室に移動させ約1時間安静にさせた後、無回転のロッド上に 30 秒間乗せた。続いて、ゆっくりと回転速度が増加するロッド上にマウスを乗せ(setting 5, RPM 2.0 - 20、最大 120 秒)、この試行を3回繰り返した。それぞれの試行終了後はマウスを個飼育ケージに戻し、試行間隔は 20 分とした。なお、ローターロッド装置への馴化は、ホワイトノイズを呈示しない環境下にて、全てのマウスを同一条件で行った。

3-2. 運動学習の評価

テスト当日、マウスをランダムに次の3群にグループ分けした。1)コントロール群:ホワイトノイズを呈示しない($n = 10$)、2)70dB 群:70dB のホワイトノイズを呈示する($n = 10$)、3)100dB 群:100dB のホワイトノイズを呈示する($n = 11$)。マウスを実験室に移してから 30 分間安静にさせた後、各条件のホワイトノイズを 30 分間呈示した。その後、引き続きホワイトノイズを呈示しながら、協調運動学習を評価した。運動課題の難度

を上げるため、ロッドの回転速度は馴化試行よりも速く設定した(setting 9, RPM4.0 - 40)。1試行当たり最大 300 秒、計 5 試行のローターロッド・テストを行わせ、各試行におけるロッド上滞在時間を計測した。試行間隔は 30 分とし、試行間には個飼ケージ内で安静にさせた。なお、個飼ケージ上にもスピーカーを設置し、試行間も各強度のホワイトノイズをマウスに曝露した。

4. 異なる強度の背景音がマウスの運動パフォーマンス発揮に及ぼす影響(実験 2)

4-1. ローターロッド・トレーニング

本実験では、異なる強度の背景音下において、獲得した協調運動能力の発揮が異なるか否か検討することを目的とする。そこで、マウスに事前に運動課題を習得させるため、ローターロッド・トレーニングを行わせた。実験 1 に準じて実験室環境および実験装置に馴化させた後、ローターロッド・テスト(setting 9、RPM4.0 - 40、1試行当たり最大 300 秒、計 3 試行、試行間隔 30 分)を、連続 5 日間行わせた。このローターロッド・トレーニングは、ホワイトノイズを呈示せず、全てのマウスを同一条件で行った。なお、トレーニングによりロッド上滞在時間が延長しなかった4匹のマウスは、テストに用いなかった。

4-2. パフォーマンス・テスト

テスト当日、ローターロッド・トレーニング期間におけるロッド上滞在時間の学習曲線がほぼ等しくなるよう、次の3群にマウスをグルーピングした。1)コントロール群:ホワイトノイズを呈示しない(n = 11)、2)70dB 群:70dB のホワイトノイズを呈示する(n = 12)、3)100dB 群:100dB のホワイトノイズを呈示する(n = 12)。実験 1 と同様、マウスを実験室に移してから 30 分間安静にさせた後、各条件のホワイトノイズに 30 分間曝露した。その後、引き続きホワイトノイズを呈示しながら、トレーニングと同じ回転速度のローターロッド・テストを、最大 400 秒、計 2 回行わせた。試行間隔は 30 分とし、2 試行のロッド上滞在時間の平均値をそのマウスの成績とした。

5. 異なる強度の背景音がマウスの脳内神経活動に及ぼす影響(実験3)

5.1. 背景音への新規曝露

実験 1 および実験 2 はどちらも、マウスを背景音(ホワイトノイズ)に初めて曝露した状況下において、運動学習および運動パフォーマンス発揮を評価している。そこで実験 3 では、このホワイトノイズへの新規曝露がマウスの脳神経活動に及ぼす影響を検討し、実験に用いた背景音の特性を明らかにすることを目的とした。本実験における対象脳部位は、視床下部室傍核(ストレス反応)、大脳帯状皮質(覚醒反応)、扁桃体中心核(情動反応)とした。

実験 1 および実験 2 と同様、実験室環境に馴化させたマウスを、テスト当日、ランダムに次の3群にグルーピングした。1)コントロール群:ホワイトノイズを呈示しない(n = 6)、2)70dB 群:70dB のホワイトノイズを呈示する(n = 6)、3)100dB 群:100dB のホワイトノイズを呈示する(n = 6)。実験室で 30 分間安静にさせた後、

各条件のホワイトノイズを呈示した。

各脳部位における神経活動は、免疫組織化学的手法により神経活動マーカーである c-Fos タンパクを可視化・定量することにより評価した。c-Fos タンパクは、刺激の約 90～120 分後に発現量がピークになることが報告されている[10]。実験 1 および実験 2 では背景音に 30 分間曝露させた後に各テストを行っていることから、ホワイトノイズ呈示後 30 分(テスト開始時)における脳神経活動を評価することを意図して、ホワイトノイズ呈示開始から 120 分後に、以下の手順で脳を摘出し、摘出脳を免疫組織化学染色に供した。

5.2. 脳の摘出、脳切片の作成、および免疫組織化学染色

マウスに過剰量のペントバルビタールナトリウム(100 mg/kg BW、ソムノペンチル、共立製薬)を腹腔内投与し、深麻酔下で左心室より生理食塩水(4℃)を灌流した。脳を摘出後、固定液(4%パラホルムアルデヒド、0.1 M PBS)に浸し、組織固定を行った(4℃、24 時間)。固定後、脳を 30%スクロース溶液に移して脱水処理を行った後、凍結し、滑走型マイクロームを用いて脳切片(40 μ m)を作成した。

Free-Floating 法による免疫組織化学染色により、c-Fos タンパクを可視化した。H₂O₂ 処理により内因性ペルオキシターゼ除去を行った後、一次抗体反応(rabbit anti-c-Fos antibody、Santa Cruz、1:500、4℃、24 時間)を行った。十分に洗浄した後、二次抗体反応(donkey anti-rabbit IgG antibody、Chemicon、1:800、室温、2 時間)を行い、さらにアビジン-ビオチン複合体の形成(Vectastain ABC Standard Kit、Vector)、および発色(0.02% 3,3-diaminobenzidine、1% nickel ammonium sulfate、0.01% H₂O₂、0.1M PBS)を行った。染色後、切片はスライドガラス上に並べ、十分な乾燥と脱水処理を行った後、封入剤(Parmount、Fisher Scientific)を用いて封入した。染色切片は光学顕微鏡(BX-53、オリンパス)およびイメージングソフトウェア(cellSens、オリンパス)を用いて解析した。マウス脳地図[11]を参照しながら関心領域(region of interest、ROI)を設定し、画像閾値化法により c-Fos 免疫陽性発現量(%ROI)を定量した。

6. 統計・解析

実験 1 におけるローターロッド滞在時間の変化は、背景音量(3 水準)および試行回数(5 水準、対応あり)を 2 要因とする二元配置分散分析により解析した。実験 2 のローターロッド・トレーニング時のローターロッド滞在時間の変化も、背景音量(3 水準)および試行日数(5 水準、対応あり)を 2 要因とする二元配置分散分析により解析した。運動パフォーマンス発揮は、テスト当日のロッド上滞在時間およびトレーニング最終日に対する滞在時間の変化をそれぞれ、一元配置分散分析および多重比較検定(Fisher's LSD)により解析した。なお、テスト当日のロッド上滞在時間が 5 日目の値より著しく変化した 2 匹のデータは解析から除外したため、解析に用いた個体数は各群 11 匹であった。各脳部位における c-Fos タンパク発現量は、一元配置分散分析および多重比較検定(Fisher's LSD)により解析した。データは全て平均値±標準誤差で示し、統計的有意水準は 5%以下とした。

Ⅲ. 結果

1. 異なる強度の背景音がマウスの運動学習に及ぼす影響(実験1)

Figure 1 に、異なる強度の背景音下でマウスにローターロッド・テストを繰り返し行わせた際の、ロッド上滞在時間の変化(学習曲線)を示した。二元配置分散分析の結果、試行回数に有意な主効果が認められたが($F(4, 139) = 3.892, p < 0.01$)、背景音の主効果($F(2, 139) = 0.861, p = 0.425$)および交互作用(試行回数×背景音量)($F(8, 139) = 0.268, p = 0.975$)は認められなかった。この結果から、全ての群において試行回数を重ねるごとにロッド上滞在時間が延長した、すなわちローターロッド運動を学習したが、背景音量は運動学習の効率に影響しないことが明らかとなった。

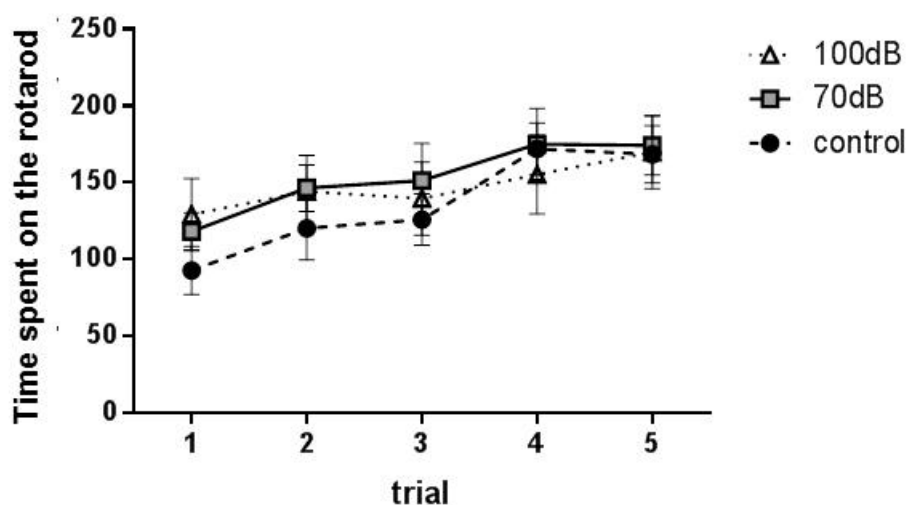


Figure 1. Exposure to back ground noise of different intensities (control, 70 dB, 100 dB) had no effect on motor learning assessed by rotarod in mice. Mean $\pm$ SE. control: $n = 10$, 70 dB: $n = 10$, 100 dB: $n = 11$.

2. 異なる強度の背景音がマウスの運動パフォーマンス発揮に及ぼす影響(実験 2)

Figure 2A に、ローターロッド・トレーニング期間におけるロッド上滞在時間の変化を示した。試行日数の主効果は認められたが($F(4, 150) = 23.92, p < 0.0001$)、当然のことながら群の主効果($F(2, 150) = 1.987, p = 0.141$)、そして交互作用(試行日数×群)($F(8, 150) = 0.378, p = 0.931$)はいずれも認められなかった。Figure 2B に、パフォーマンス・テストにおけるロッド上滞在時間を示した。70dB 群でロッド上滞在時間が長い傾向が認められたが、一元配置分散分析の結果は統計的有意水準に達しなかった($F(2,30) = 2.494, p = 0.010$)。そこで、各個体内変動を検討するため、パフォーマンス・テスト時とトレーニング最終日のロッド上滞在時間の差分値を求め、統計解析を行った(Figure 2C)。一元配置分散分析の結果、群間に統計的有意差が認められ($F(2, 30) = 3.390, p < 0.05$)、70dB 群のロッド上滞在時間差分値が他の2群と比較して有意に高い値を示した($P < 0.05$)。なお、control 群と100dB 群において、ロッド上滞在時間差分値の増減は認

められなかった。以上の結果から、70dB の背景音曝露が習得した協調運動のパフォーマンス発揮を促進し、その促進効果は 100dB の背景音では認められないことが示唆された。

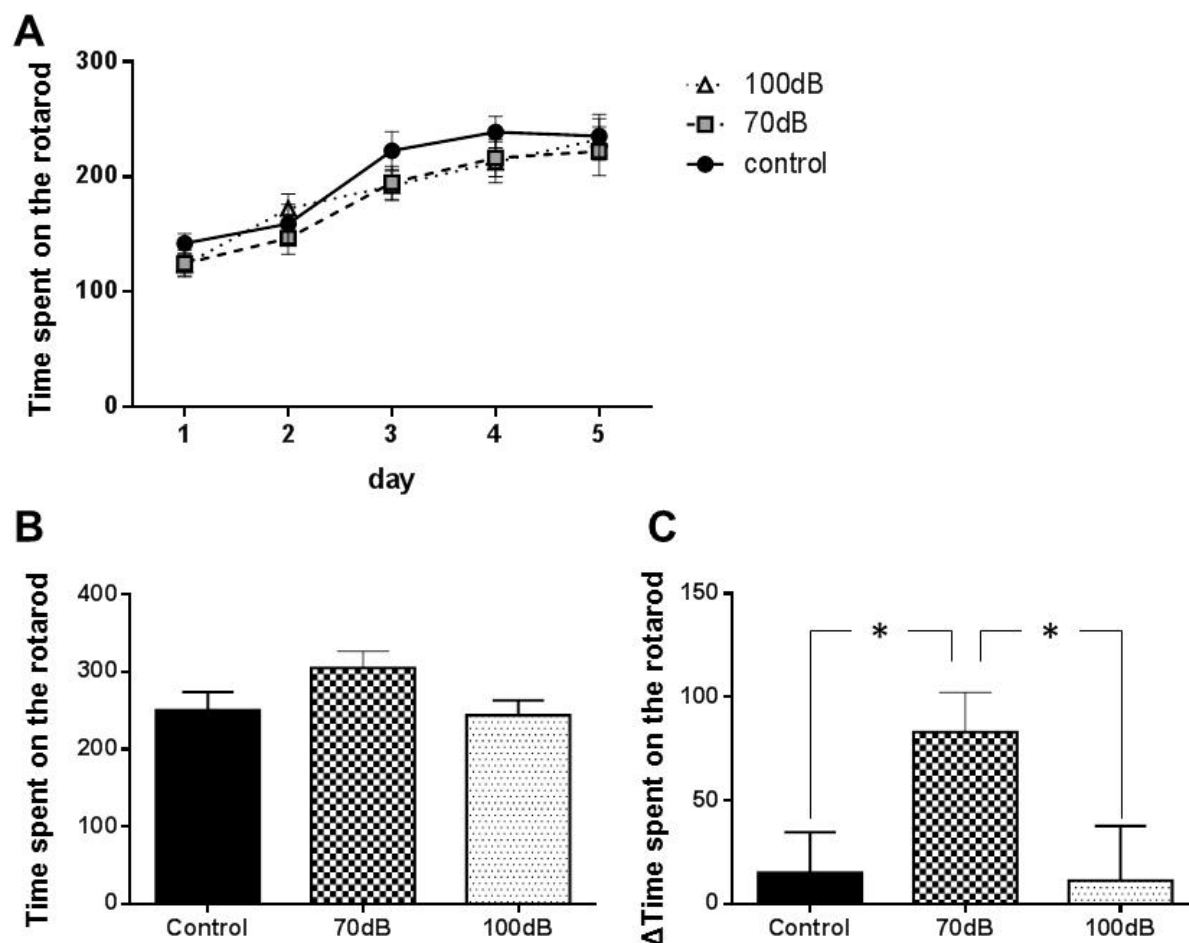


Figure 2. Effects of back ground noise of different intensities (control, 70 dB, 100 dB) on motor performance on rotarod in mice. A) In advance, all the mice have undergone rotarod training for 5 consecutive days without exposure to back ground noise. B) Time spent on the rotarod at performance test was not significantly different between groups, although the effect of noise was marginal. C) Δ Time spent on the rotarod (time spent on the rotarod at performance test minus at the 5th day of training) was significantly higher in the mice exposed to back ground noise of 70 dB-intensity compared to the other two groups. Mean $\pm$ SE. * $p < 0.05$. $n = 11$ in all group.

3. 異なる強度の背景音がマウスの脳内神経活動に及ぼす影響(実験3)

Figure 3 に異なる強度の背景音に曝露されたマウスの視床下部室傍核 (hypothalamic paraventricular nucleus, PVN)、扁桃体中心核 (central amygdala, CeA)、および帯状皮質 (cingulate cortex, CgC) における c-Fos タンパクの免疫陽性像の典型例を、Figure 4 に各 ROI 内における c-Fos 免疫陽性発現量 (%ROI) を示した。解析対象とした3つの脳部位全てにおいて 100dB 群で c-Fos 免疫陽性発現量が増加していた

が、一元配置分散分析の結果、統計的有意差は認められなかった (PVN, $F(2, 15) = 3.299$, $p = 0.065$; CeA, $F(2, 15) = 2.736$, $p = 0.097$; CgC, $F(2, 15) = 3.215$, $p = 0.069$)。

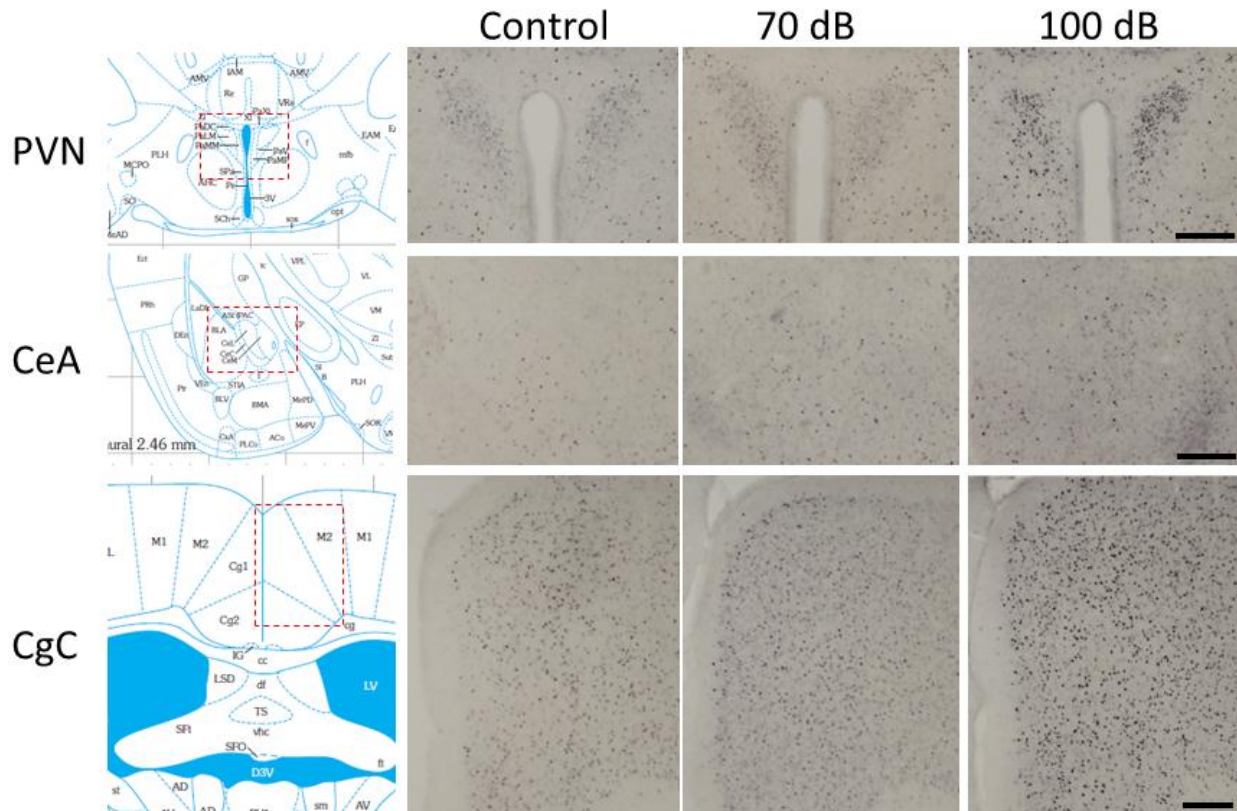


Figure 3. Representative images of c-Fos immunostaining in the hypothalamic paraventricular nucleus (PVN, top), the central amygdala (CeA, middle), and the cingulate cortex (CgC, bottom) in mice exposed to different intensities of back ground noise. Scale bar = 200 μm.

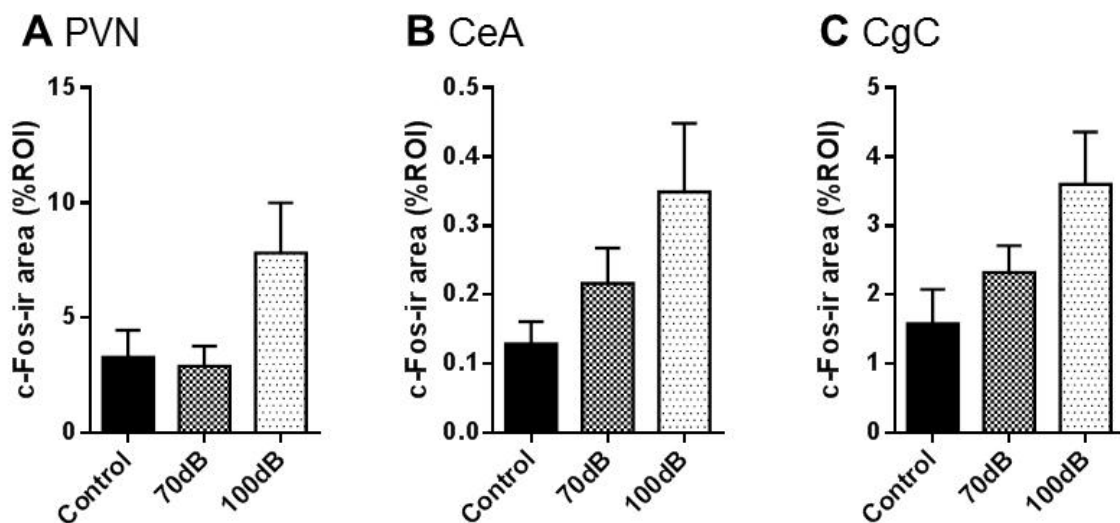


Figure 4. Exposure to back ground noise tended to increase c-Fos immunoreactivity in the PVN (A), CeA (B), and CgC (C) in intensity-dependent manner. Mean $\pm$ SE. $n = 6$ in all group.

IV. 考察

本研究では、ストレスラーとして異なる強度の背景音(ホワイトノイズ)をマウスに曝露し、ストレス負荷が運動学習と運動パフォーマンス発揮に及ぼす影響をローターロッド・テストにより評価した。その結果、背景音は全身協調運動の運動学習に影響しないことが明らかとなった。一方、70dB 背景音により運動パフォーマンス発揮が促進され、その促進効果は 100dB 背景音では認められなかった。これは、背景音量と運動パフォーマンス発揮に逆 U 字関係が成立することを示している。さらに背景音の強度依存的に PVN、CeA、CgC における c-Fos 発現が増加する傾向が認められ、特に 100dB 条件ではストレス反応・情動反応・覚醒反応が亢進している可能性が示唆された。したがって、高強度背景音によって運動パフォーマンス発揮が促進されなかった原因のひとつとして、ストレス・覚醒・情動反応の過剰亢進が関与している可能性が示唆された。

本実験で用いたローターロッド・テストは、ラットやマウスの協調運動能力を評価する最も一般的なテストとして、病態解明や新薬有効性評価など様々な研究領域で汎用されている[12-14]。本実験でも見られたように、繰り返しローターロッド・テストを行わせるとロッド上滞在時間は延長することから、運動学習曲線を描くことができる[9]。本研究では、70dB の背景音によりこの運動学習曲線の勾配が高まることを作業仮説に設定していたが、その仮説に反して、背景音が運動学習に及ぼす影響はみられなかった。我々はこれまで、70dB の背景音がラットの迷路学習を促進することを明らかにしている[8]。本研究の結果を踏まえると、背景音による学習促進効果が得られるか否かは、その学習課題に依存する可能性が示唆された。また、Shors (2001)は、ラットの瞬目反射条件付け学習(eyeblink conditioning)は、身体的ストレス(電気刺激)では促進されるが、背景音(ホワイトノイズ、95dB)では促進されなかったことを報告している。なお、この実験ではラットに電気刺激および背景音を曝露した際の血中グルココルチコイド濃度がほぼ等しく、ストレス強度は同じだったと考えられる。したがって Shors の報告は、ストレスによる学習促進効果は、そのストレスの種類にも依存することを示している[6]。このように、ストレスによる学習促進効果が得られるか否かは、ストレスと学習課題の組み合わせに依存すると考えられるため、本研究の結果から、ストレスは運動学習を促進しないと結論することは早計であろう。今後は、ストレスの種類にも着目し、運動学習との関連を検討する必要がある。

これまで、背景音がヒトの持久的運動パフォーマンスに及ぼす影響を検討した研究がいくつか報告されている[15, 16]。Edworthy と Waring (2006)は、異なる音量とテンポの組み合わせの背景音下で快適と感じる速度のトレッドミル走(10 分間)を被験者に課した。その結果、高音量・高テンポ(80 dB/200 bpm)の背景音下において、自己選択した走速度が速かった。心拍数も走速度の増加に伴い高まったが、興味深いことに主観的運動強度は条件間で差が認められなかった。この結果は、高音量・高テンポの背景音下では、主観的なきつさを上げることなく、より高負荷の走運動を実施できたことを示している[15]。また Terry ら(2012)は、やる気を引き起こす音楽(motivational)と気分への影響が中性的な音楽(neutral)の効果を、最

大下運動時のランニング・エコノミーと、最大運動時の疲労困憊までの運動時間から検討した。その結果、motivational および neutral どちらの音楽によってもランニング・エコノミーの向上と疲労困憊までの運動時間が延長し、さらに運動後の疲労感はmotivationalな音楽が呈示された時が最も低かったことを明らかにした。これらの研究は、背景音(音楽)は、その条件によってヒトの持久的運動パフォーマンスを向上させることを示している。しかしながら、ヒトを対象にした研究だけでは、背景音が生理機能(特に脳神経活動)に及ぼす影響を詳細に検討することができない。また、持久的運動能力ではなく、協調運動能力が必要とされる運動課題を用いた実験的検証はこれまで行われていない。

実験2では、全てのマウスにあらかじめローターロッド・トレーニングを行わせた。トレーニング後半はロッド上滞在時間がプラトーに達したことから、マウスはローターロッド運動に十分習熟していたと言える。このマウスを用いて、異なる強度の背景音下で協調運動のパフォーマンス発揮を検討したところ、70dB 背景音によりロッド上滞在時間が延長し、100dB 背景音と背景音を呈示しない対照条件では滞在時間に変化はみられなかった。この結果は、中程度の背景音が習得した協調運動のパフォーマンス発揮を促進することを示している。どのような生理反応を介して背景音が協調運動パフォーマンスに影響を及ぼすかは今後さらに検討する必要があるが、本研究により初めて、ストレスが運動パフォーマンスに及ぼす効果が持久的運動パフォーマンスに限られるのではなく、協調運動パフォーマンスにも及ぶことが明らかになった。協調運動は様々なスポーツの競技力に関わる極めて重要な運動能力であるため、本研究成果は、ヒトを対象にストレスと協調運動に関する研究の積極的展開を刺激する端緒となるかもしれない。

本研究では、背景音として70dBと100dBの背景音をマウスに呈示し、対照マウスには背景音を呈示せず、この時の背景音は約40dBであった。一般的に、40dBは閑静な住宅街、70dBは騒々しい事務所、100dBは電車通過時の鉄道のガード下の騒音に相当すると言われている。これまでラットを用いて、背景音量(60～105dB)が脳神経活動(*c-fos* mRNA 発現)とストレスホルモン(ACTH、グルココルチコイド)分泌に及ぼす影響が詳細に検討されている[17, 18]。それによると、80dB以上の背景音はACTHおよびグルココルチコイド分泌を惹起し、ストレス反応中枢であるPVNの*c-fos* mRNA発現を顕著に高めることから、強いストレスラーであることが明らかにされている。本研究においても、70dBおよび100dBの背景音がマウスの脳神経活動に及ぼす影響を、c-Fos タンパク発現により検討した。その結果、本実験では各群の個体数が不十分であったため、統計結果(p value)が設定した有意水準にわずかに達しなかった。しかし、その結果をみると、100dBの背景音は、ストレス反応調節の中枢であるPVN、情動反応の調節を担うCeA、および覚醒反応を反映しうるCgCの神経活動を高め可能性が高い。個体数を増やすとともに、他の脳領域における解析をさらに行う必要があるが、本結果は環境ストレスにより誘引されるこのような脳神経活動の状態変化が、その後の運動パフォーマンス発揮に影響することを示唆している。したがって、環境ストレスによりその神経活性状態をコントロールすることは、運動パフォーマンス発揮を促進するための新たなコンディショニング方略となるかもしれない。

アスリートが最高のパフォーマンスを発揮するためには、身体的コンディショニングだけでなく、中枢神経

系のコンディショニングも重要である[19]。中枢神経系の機能の多くが外環境から受けるストレスによって影響され、中枢神経系の機能変化は様々な学習・パフォーマンスに影響する。環境ストレスが生体に及ぼす影響を理解し、その影響を活用することは、運動学習および運動パフォーマンスを促進する新たな方略となるだろう。しかし残念ながら、そのような実験的検証は積極的に行われておらず、科学的知見の集積は極めて乏しい。スポーツ科学分野において、本研究のような神経行動学的手法を用いた研究のさらなる展開が求められる。

V. 謝辞

本研究は、財団法人上月スポーツ・教育財団スポーツ研究助成事業の援助により行われました。ここに深い感謝の意を表します。

VI. 参考文献

1. Billaut, F., C.J. Gore, and R.J. Aughey, *Enhancing team-sport athlete performance: is altitude training relevant?* Sports Med, 2012. **42**(9): p. 751-67.
2. Hawley, J.A., et al., *Nutritional modulation of training-induced skeletal muscle adaptations.* J Appl Physiol, 2011. **110**(3): p. 834-45.
3. Knuttgen, H.G., *Strength training and aerobic exercise: comparison and contrast.* J Strength Cond Res, 2007. **21**(3): p. 973-8.
4. Carron, A.V., *Motor performance under stress.* Res Q, 1968. **39**(3): p. 463-9.
5. Weinberg, R.S. and J. Ragan, *Motor performance under three levels of trait anxiety and stress.* J Mot Behav, 1978. **10**(3): p. 169-76.
6. Shors, T.J., *Acute stress rapidly and persistently enhances memory formation in the male rat.* Neurobiol Learn Mem, 2001. **75**(1): p. 10-29.
7. Quartermain, D., E.A. Stone, and G. Charbonneau, *Acute stress disrupts risk assessment behavior in mice.* Physiol Behav, 1996. **59**(4-5): p. 937-40.
8. Amemiya, S., et al., *Differential effects of background noise of various intensities on neuronal activation associated with arousal and stress response in a maze task.* Physiol Behav, 2010. **99**(4): p. 521-8.
9. Richwine, A.F., et al., *Improved psychomotor performance in aged mice fed diet high in antioxidants is associated with reduced ex vivo brain interleukin-6 production.* Brain Behav Immun, 2005. **19**(6): p. 512-20.
10. Nestler, E.J., M. Barrot, and D.W. Self, *DeltaFosB: a sustained molecular switch for addiction.* Proc Natl Acad Sci U S A, 2001. **98**(20): p. 11042-6.
11. Franklin, K.B.J. and G. Paxinos, *The Mouse Brain in Stereotaxic Coordinates.* 3rd ed. 2008, San Diego: Academic Press.
12. Tesla, R., et al., *Neuroprotective efficacy of aminopropyl carbazoles in a mouse model of amyotrophic lateral sclerosis.* Proc Natl Acad Sci U S A, 2012. **109**(42): p. 17016-21.
13. Carlisle, H.J., et al., *Deletion of densin-180 results in abnormal behaviors associated with mental illness and reduces mGluR5 and DISC1 in the postsynaptic density fraction.* J Neurosci, 2011. **31**(45): p. 16194-207.
14. Tang, A.H., et al., *Anxiolytic-like effects of PNU-101017, a partial agonist at the*

- benzodiazepine receptor*. Psychopharmacology (Berl), 1997. **131**(3): p. 255-63.
15. Edworthy, J. and H. Waring, *The effects of music tempo and loudness level on treadmill exercise*. Ergonomics, 2006. **49**(15): p. 1597-610.
 16. Terry, P.C., et al., *Effects of synchronous music on treadmill running among elite triathletes*. J Sci Med Sport, 2012. **15**(1): p. 52-7.
 17. Campeau, S. and S.J. Watson, *Neuroendocrine and behavioral responses and brain pattern of c-fos induction associated with audiogenic stress*. J Neuroendocrinol, 1997. **9**(8): p. 577-88.
 18. Burow, A., H.E. Day, and S. Campeau, *A detailed characterization of loud noise stress: Intensity analysis of hypothalamo-pituitary-adrenocortical axis and brain activation*. Brain Res, 2005. **1062**(1-2): p. 63-73.
 19. Gilbert, C., *Optimal physical performance in athletes: key roles of dopamine in a specific neurotransmitter/hormonal mechanism*. Mech Ageing Dev, 1995. **84**(2): p. 83-102.