

## 重炭酸ナトリウム摂取と自発的過換気の組み合わせによる新トレーニング法の提言

土橋 康平<sup>1</sup>、仙北 真悠<sup>1</sup>、片桐 陽<sup>2</sup>

1. 北海道教育大学 旭川校
2. 筑波大学

### 1. 緒言

ハンドボールやバスケットボールなどのエネルギー供給が主に解糖系によって行われる高強度運動や高強度間欠的運動 (McInnes et al. 1995) を行うと、活動筋内に代謝産物である乳酸および水素イオン (Hydrogen ion:  $H^+$ ) が蓄積し水素イオン指数 (Potential hydrogen: pH) が低下する (i.e. 代謝性アシドーシス)(Robergs et al. 2004)。この代謝性アシドーシスは解糖系の律速酵素であるホスホフルクトキナーゼの活性の低下を介した無酸素性エネルギー供給量の減少 (Correia-Oliveira et al. 2017; McCartney et al. 1983)、興奮収縮メカニズムの低下 (Del Castillo et al. 1962; Fuchs et al. 1970; Green and Dawson 1993) などを引き起こし、運動パフォーマンスを低下させると考えられている。これに対して、生体内には発生した  $H^+$  を緩衝し、pH を維持しようとするシステムが存在しており、その主なものに重炭酸イオン (Bicarbonate ion:  $HCO_3^-$ ) があり、以下の式で緩衝される。



従って、高強度運動(i.e., トレーニング) 時のパフォーマンス低下を抑えるにはあらかじめ pH を増加させておくことが重要であり、その方法の一つに重炭酸ナトリウム (Sodium bicarbonate:  $NaHCO_3$ ) 摂取がある。 $NaHCO_3$  は、多岐にわたる運動パフォーマンスを向上させることが報告されており、例えば、 $NaHCO_3$  (0.3 g/kg 体重) 摂取により血中の  $HCO_3^-$  および pH が増加し、400 m 走、1500 m 走タイム (Bird et al. 1995; Goldfinch et al. 1988)、短時間高強度自転車運動時の発揮パワー (McNaughton 1992)、高強度間欠的スプリント自転車運動時の発揮パワー (Miller et al. 2016) が向上したことが報告されている。一方で、 $NaHCO_3$  摂取が運動パフォーマンスを改善させないという報告もあり (Callahan et al. 2017; Correia-Oliveira et al. 2017; Edge et al. 2006; Joyce et al. 2012)、結果が一致していない。その要因に  $NaHCO_3$  摂取による副作用や、 $HCO_3^-$  濃度がピークに達する時間の個人差が考えられる。Grgic (2021) は  $NaHCO_3$  により  $HCO_3^-$  や pH を増加させるためには運動の 3-7 日前から  $NaHCO_3$  を 1 日 3 回 (計 0.4 ~ 0.5g /kg 体重)、あるいは

単回摂取の場合は 0.3 g/kg 体重を運動開始の 60-180 分前に摂取する必要があることを報告している。しかしながら、 $\text{NaHCO}_3$  の単回摂取は胃痙攣、げっぷ、腹痛、腸切迫感、下痢、嘔吐、胃膨満感などの不快感の増大を引き起こす場合があり (Cameron et al. 2010; McNaughton et al. 2016; Miller et al. 2016)、この不快感の増大が運動パフォーマンスの向上を妨げている可能性がある (McNaughton et al. 2016)。

加えて、Price and Singh (2008) は  $\text{NaHCO}_3$  摂取による  $\text{HCO}_3^-$  がピークに達する時間が摂取後 60-90 分と報告しているが、Carr et al. (2011) は  $\text{NaHCO}_3$  摂取により  $\text{HCO}_3^-$  がピークに達する時間は  $\text{NaHCO}_3$  摂取後 150 分であると報告している。さらに、Miller et al. (2016) も  $\text{NaHCO}_3$  摂取による  $\text{HCO}_3^-$  がピークに達するまでの平均時間は約 70 分と、大きな個人差が存在している。

$\text{NaHCO}_3$  摂取を行わずに pH を増加させる方法として自発的過換気がある。自発的過換気とは随意的に換気量を増加させる方法で、これにより体内の二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ) が過剰に排出され、動脈血  $\text{CO}_2$  分圧の低下を介して pH が増加する (Chin et al. 2007; Leithauser et al. 2016; Sakamoto et al. 2014)。先行研究では高強度運動前や高強度間欠的運動前に自発的過換気を行うと、高強度運動時パフォーマンスが向上したことを報告している (Johnson et al. 2021; Leithauser et al. 2016; Sakamoto et al. 2014)。従って、胃の不快感を増大させないことに加え、介入後即座に pH を増加させるための方法として自発的過換気は効果的な方策である可能性がある。しかしながら、 $\text{NaHCO}_3$  摂取と自発的過換気のどちらが効果的に高強度運動時のパフォーマンスを改善させるかは明らかではない。

また、前述した胃への負担を軽減しながら効率的に  $\text{HCO}_3^-$ 、pH を増加させる方法として、少量の  $\text{NaHCO}_3$  摂取と自発的過換気の組み合わせが効果的かもしれないが、これに関しても明らかではない。自発的過換気に加え少量の  $\text{NaHCO}_3$  を摂取することで、従来推奨されている  $\text{NaHCO}_3$  摂取量よりも胃への負担を軽減しながら、運動パフォーマンスを向上させられるかもしれない。

そこで、本研究では  $\text{NaHCO}_3$  摂取と自発的過換気の組み合わせが高強度間欠的運動時のパフォーマンスおよび代謝応答に及ぼす影響を検討し、新たなトレーニング法となるかの生理学的知見を得ることを目的とする

## 2. 方法

### 2.1. 被験者および環境設定

被験者は北海道教育大学旭川校ハンドボール部およびバスケットボール部に所属する 11 名であった。被験者の年齢、身体特性を Table1 に示す。あらかじめ被験者には、実験開始 24 時間前からのアルコールとカフェインの摂取を行わないように指示した。また食事は実験開始の 2 時間前までに終わらせるよう指示した。実験を開始するにあたり、すべての被験者に本研究の目的、方法および実験の危険性について口頭および紙面において説明し、実験に参加する同意を得た。なお、本研究は北海道教育大学旭川校の倫理委員会の承認を得て行われた (課題番号: 2023023002)。実験は、北海道教育大学旭川校 運動生理学実験室で行い、実験中は室温によって生理学的応答が異なることを考慮し、実験室内の温度を 23 °C に調節した。

Table 1. Physical characteristics of the participants

	Age (yrs)	Height (cm)	Body weight (kg)
Male (n = 4)	20 ± 2	174.9 ± 5.2	68.3 ± 5.2
Female (n = 7)	21 ± 2	162.5 ± 4.5	60.8 ± 8.7
Combined (n = 11)	20 ± 2	167.0 ± 13.0	63.5 ± 10.0

## 2.2. 実験デザイン

被験者は事前にエルゴメーター上での自転車運動および自発的過換気の練習を行った。実験当日、被験者は実験室に入室後体重を測定し、その後心拍数 (Heart rate: HR) モニターを装着した。実験プロトコルを Figure 1 に示す。実験開始後、被験者は塩化ナトリウム又は  $\text{NaHCO}_3$  を摂取し (詳細は後述)、40 分間の安静を保った。その後、呼気ガス測定用のマスクを着用し、エルゴメーター上で 10 分間の安静を保ち、5 分間の warm-up (男性: 体重 × 2 W, 女性: 体重 × 1.5 W) を行った。その後、再び 5 分間の休息を取ったのち、高強度間欠的自転車運動を行った。高強度間欠的自転車運動 (負荷: 男性, 体重の 7.5% k.p; 女性, 体重の 7% k.p) は 10 秒間の全力自転車運動を 50 秒間の休息を挟んで 10 回繰り返した。条件は、①塩化ナトリウム (0.208 g/kg 体重) を摂取し運動間休息時に自由呼吸で安静をとる条件 (Control)、②塩化ナトリウム (0.208 g/kg 体重) を摂取し運動間休息時に過換気を行う条件 (Hyperventilation: HV)、③ $\text{NaHCO}_3$  (0.3 g/kg 体重) を摂取し、運動間休息時に自由呼吸で安静をとる条件 ( $\text{NaHCO}_3$ ) および④少量の  $\text{NaHCO}_3$  (0.15 g/kg 体重) を摂取し運動間休息時に過換気を行う条件

(Combined) の計 4 条件とした。塩化ナトリウムが運動パフォーマンス、呼吸代謝応答、および主観的指標に及ぼす影響を考慮し、Control および HV 条件の塩化ナトリウム摂取量は、 $\text{NaHCO}_3$  条件と同等とした。塩化ナトリウム又は  $\text{NaHCO}_3$  は、全ての条件においてオブラートに包んで水 (4.5 ml/kg 体重) と共に摂取した。過換気は先行研究 (Dobashi et al. 2017, 2021, 2022a, b; Sakamoto et al. 2014) を参考に一回換気量 (Tidal volume:  $V_T$ ) を 1.5~2.5 L、呼吸回数 (respiratory frequency:  $f_R$ ) を 60 breaths/min に設定し行った。 $V_T$  はリアルタイムでモニターした値を被験者にビジュアルフィードバックさせることで調節し、 $f_R$  はメトロノームを用いて調節した。4 つの条件の実施の順番はランダムで行い、条件間で少なくとも 2 日以上空け、同じ時間帯に実施した。

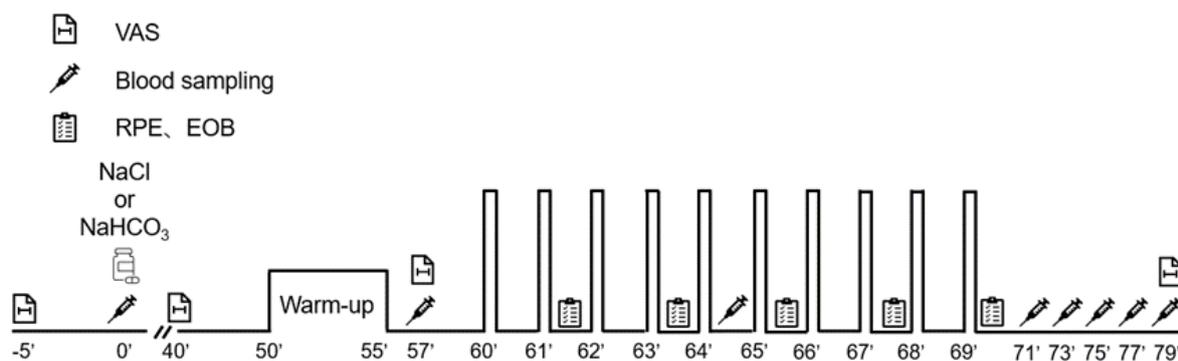


Figure 1. Experimental protocol. Participants performed a high-intensity intermittent cycling exercise (10 sets of 10-s maximal effort pedaling interspaced with 50-s recovery). In the HV and Combined trials, they performed 30-s voluntary hyperventilation ( $V_T$ : 1.5~2.5 L,  $f_R$ : 60 breaths/min) before each exercise to decrease end-tidal  $\text{CO}_2$  partial pressure. On the other hand, they rested with spontaneous breathing in the Control and  $\text{NaHCO}_3$  trials. Abbreviations: EOB, effort of breathing; RPE, Rating of perceived exertion; VAS, Visual analogue scale;  $V_T$ , Tidal volume;  $f_R$ , respiratory frequency.

## 2.3. 各パラメータの測定方法および解析方法

### (1) 発揮パワー

発揮パワーは電磁ブレーキ式エルゴメーター (Fujin rajjin, OCL Co. Ltd., Japan) から出力し、0.1 秒ごとに記録した。各 set の 10 秒間の全力自転車運動時における平均値を平均発揮パワー、最大値を最大発揮パワーとして算出した。また、各 set で算出した平均および最大パワーを前半 (1 ~ 5 sets) と後半 (6 ~ 10 sets) に分けてそれぞれ平均した。

## (2) 呼気ガス

呼気ガス濃度および流量は呼気ガス分析器 (K4B<sub>2</sub>, COSMED Co. Ltd, Italy) を用いて breath-by-breath モードで測定した。測定開始直前に 3 L のシリンジにて流量を、標準ガス (O<sub>2</sub>: 15.91%, CO<sub>2</sub>: 4.89%, N<sub>2</sub> Balance) にてガス濃度のキャリブレーションを行った。測定項目は  $f_R$ 、 $V_T$ 、換気量 (Minute ventilation:  $\dot{V}_E$ )、酸素摂取量 (Oxygen uptake:  $\dot{V}O_2$ )、二酸化炭素排出量 (Carbon dioxide elimination:  $\dot{V}CO_2$ )、呼吸交換比 (Respiratory exchange ratio: RER)、呼気終末 O<sub>2</sub> 分圧 (End-tidal O<sub>2</sub> partial pressure:  $P_{ET}O_2$ ) および呼気終末 CO<sub>2</sub> 分圧 (End-tidal CO<sub>2</sub> partial pressure:  $P_{ET}CO_2$ ) とした。上記のすべての呼吸代謝パラメーターにおいて、Warm-up 前の安静 1 分間 (baseline) および各全力運動時の直前 5 秒間の平均値 (pre Ex. 1 ~ pre Ex. 10) をそれぞれ求めた。

## (3) 胃の不快感 (Gastrointestinal discomfort)

胃の不快感は視覚的評価スケール (Visual analogue scale: VAS) を用いて測定した。0 cm から 10 cm の範囲で被験者自身が記入し、記録した。0 cm を非常に快適、10 cm を非常に不快と定義し、0 cm を 0 点、10 cm を 100 点とした。VAS は実験開始直後 (baseline)、NaHCO<sub>3</sub> 又は塩化ナトリウム摂取直後 (post ingestion)、主運動開始直前 (pre exercise)、実験終了時 (post exercise) と計 4 回測定した。加えて、胃の不快感は被験者が就寝する直前 (before bedtime) にも 1 回測定した。

## (4) 血中乳酸濃度 (Blood lactate concentration: BLa)

BLa は乳酸分析器 (Lactate Pro 2, arkray Co. Ltd., Japan) を用いて測定した。採血は指先から行い、NaHCO<sub>3</sub> 又は塩化ナトリウム摂取直後 (baseline)、主運動開始直前 (pre exercise)、主運動 5set 目直後 (5 set)、主運動終了 2、4、6、8、10 分後に行った。測定した BLa のうち、最も高い値を最大血中乳酸濃度とした。

## (5) HR

HRは心拍センサー (Polar H10 N, Polar, Finland) を用いて1秒ごとに測定し、Warm-up 開始直前の安静1分間 (baseline)、および各高強度運動中の10秒間の平均値をそれぞれ求めた。

## (6) 主観的運動強度 (Rating of perceived exertion: RPE)、呼吸努力度 (Effort of breathing: EOB)

RPEは6から20までのBorg's scale (Borg 1982) を用い、EOBは0から10までのcategory scale (Borg 1982) を用いて高強度間欠的運動2 set 毎に測定した。

(7) pH および  $\text{HCO}_3^-$ 

静脈血中 pH および  $\text{HCO}_3^-$  は携帯型血液アナライザー (i-STAT<sup>®</sup>, Abbott, USA) を用いて測定した。採血は指先から行い実験開始直後 (baseline)、 $\text{NaHCO}_3$  又は塩化ナトリウム摂取 45 分後 (pre warm-up)、主運動前 (pre exercise)、主運動5回目直後 (5 set)、運動終了直後 (after exercise) に測定し、被験者2人を対象とした。

## 2.4. 統計処理

データはすべて平均 ± 標準偏差で表した。 $\text{NaHCO}_3$  条件において、機器の不具合により baseline の呼気ガスが測定できない被験者が1名いた。そのため、呼気ガスの比較には条件 (Trial: Control, HV,  $\text{NaHCO}_3$ , Combined) と時間 (Time) を固定効果、被験者を変量効果とする混合-効果モデル分析を用いた。それ以外の変数の経時変化は Trial と Time を要因とした二元配置分散分析を用いた。また、最大血中乳酸濃度、前半 (1 ~ 5 sets) および後半 (6 ~ 10 sets) の平均および最大発揮パワーの比較には Trial を要因とする一元配置分散分析を用いた。すべての変数において交互作用が、一元配置分散分析で Trial の主効果が見られた場合、事後検定に Tukey の多重比較を行った。すべての検定において、有意水準は 5% 未満とし、検定は統計処理ソフトを用いた (GraphPad Prism, v.8, Graph Pad Software Inc., USA)。

### 3. 結果

#### 3.1. $\dot{V}_E$ および $P_{ET}CO_2$

Figure 2 に Baseline および各全力自転車運動前の  $\dot{V}_E$ 、および  $P_{ET}CO_2$  の経時変化を示す。いずれの変数も条件と時間の交互作用が見られた (all  $P < 0.001$ )。Baseline における各変数はいずれも条件間に差は見られなかった。全ての高強度間欠的運動前 (i.e. pre. Ex.1~pre Ex.10) において、 $\dot{V}_E$  は HV 条件および Combined 条件で Control 条件および  $NaHCO_3$  条件より高値を示した (Figure 2A)。結果として、 $P_{ET}CO_2$  は pre Ex. 1 から pre Ex. 7 および pre Ex. 10 において、HV 条件および Combined 条件で Control 条件および  $NaHCO_3$  条件より低値を示し、pre Ex. 8 においては HV 条件で Control 条件よりも低値を、HV 条件および Combined 条件で  $NaHCO_3$  条件より低値を示した。また、 $P_{ET}CO_2$  は pre Ex. 9 において、Control 条件で  $NaHCO_3$  条件より低値を、HV 条件および Combined 条件で  $NaHCO_3$  条件より低値を示した (Figure 2B)。

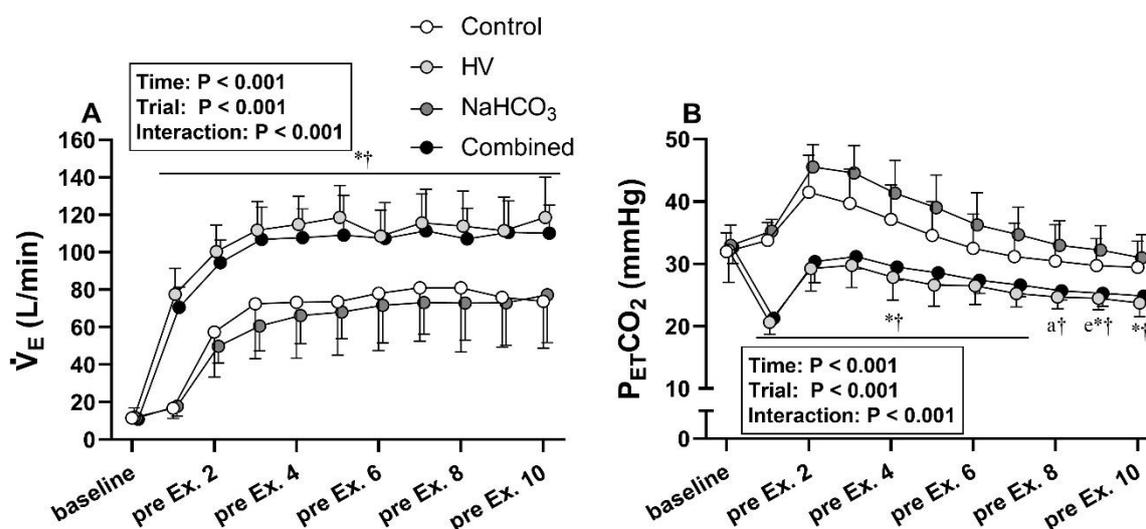


Figure 2. Time-dependent changes in  $\dot{V}_E$  (A), and  $P_{ET}CO_2$  (D) at baseline and the high-intensity intermittent cycling exercise. The values are expressed as the mean  $\pm$  standard deviation (SD). \*  $P < 0.05$ , Control vs. HV and Combined trials; †  $P < 0.05$ ,  $NaHCO_3$  vs. HV and Combined trials; a  $P < 0.05$ , Control vs. HV; e  $P < 0.05$  Control vs.  $NaHCO_3$ .

#### 3.2. 発揮パワー

Figure 3 に高強度間欠的自転車運動時の平均パワーと発揮パワーの経時変化および後半セットの平均パワーと最大パワーの平均値を示す。すべての条件で回数を重ねるごとに発揮パワーの低下が見られたが、いずれの指標も条件の主効果および条件と時間の交互作用は見られなかった (Figure 3A, B)。

後半セットの発揮パワーにおいて、いずれの指標も条件の主効果は見られなかったものの、平均パワーは Control 条件よりも HV 条件で  $4.1 \pm 6.1\%$ 、 $\text{NaHCO}_3$  条件で  $1.9 \pm 8.9\%$ 、Combined 条件で  $2.6 \pm 5.6\%$  増加した (Figure 3C)。また、後半セットの最大パワーも Control 条件より HV 条件で  $4.6 \pm 6.9\%$ 、 $\text{NaHCO}_3$  条件で  $2.0 \pm 9.9\%$ 、Combined 条件で  $2.4 \pm 4.7\%$  増加した (Figure 3D)。

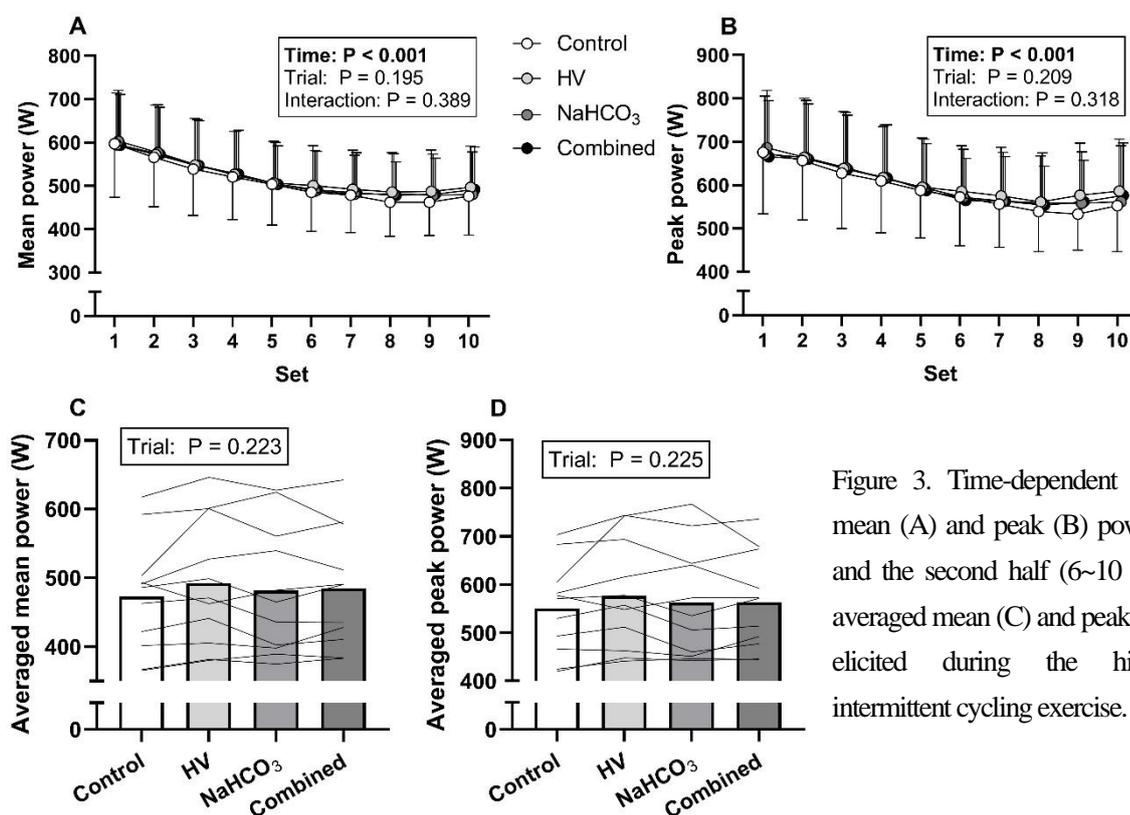


Figure 3. Time-dependent changes in mean (A) and peak (B) power outputs, and the second half (6~10 sets) of the averaged mean (C) and peak (D) outputs elicited during the high-intensity intermittent cycling exercise.

### 3.3. BLa

Figure 4 に高強度間欠的自転車運動後に見られた BLa の最高値を示す。BLa の最高値は  $\text{NaHCO}_3$  条件 ( $19.1 \pm 2.5 \text{ mmol/L}$ ) および Combined 条件 ( $18.2 \pm 2.8 \text{ mmol/L}$ ) で HV 条件 ( $15.4 \pm 2.9 \text{ mmol/L}$ ) より高値を示し、 $\text{NaHCO}_3$  条件で Control 条件 ( $16.2 \pm 3.5 \text{ mmol/L}$ ) より高値を示した (Figure 5B)。

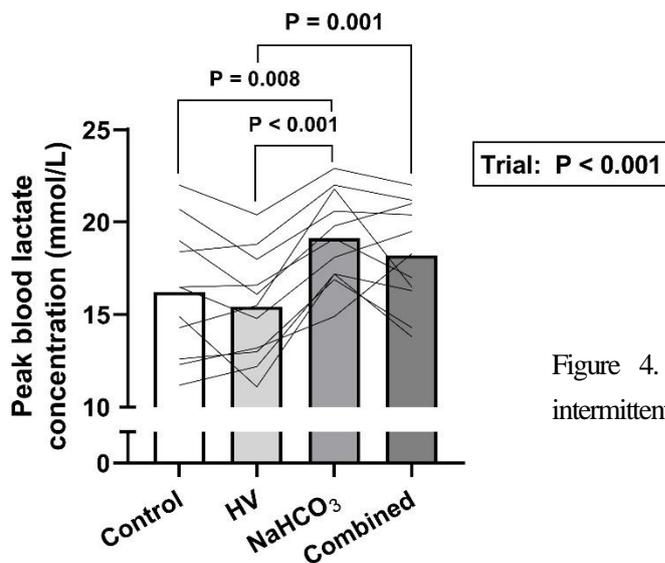


Figure 4. Peak BLA observed after the high-intensity intermittent cycling exercise.

### 3.4. 胃の不快感

Figure 5 に VAS で評価した胃の不快感の経時変化を示す。条件の主効果および条件と時間の交互作用は見られなかった (Figure 9)。

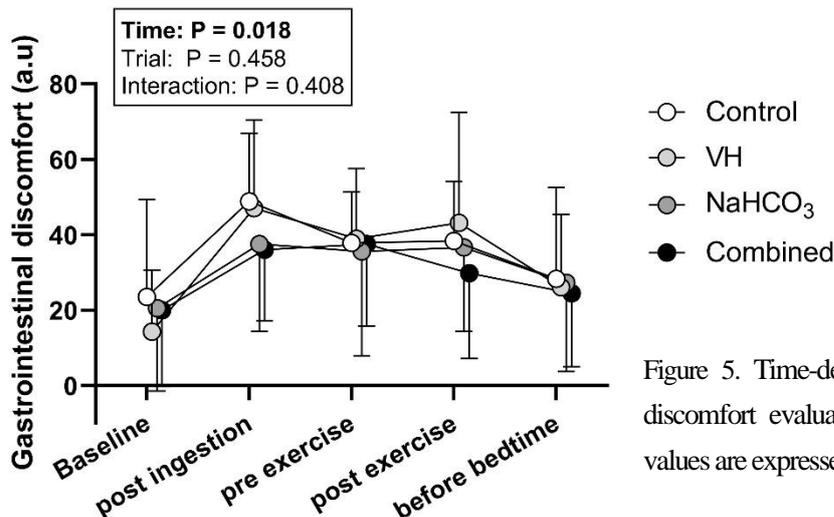


Figure 5. Time-dependent change in gastrointestinal discomfort evaluated by visual analogue scale. The values are expressed as the mean  $\pm$  SD.

## 4. 考察

### 4.1. NaHCO<sub>3</sub>が高強度間欠的運動時のパフォーマンスに及ぼす影響

NaHCO<sub>3</sub> 摂取は高強度間欠的運動時のパフォーマンスを有意に改善させなかった (Figure 3)。しかしながら、被験者 11 名のうち 6 名は NaHCO<sub>3</sub> 摂取によって、後半セットの運動パフォーマンスを向上させており (Figure 3)、先行研究の結果と一致している (McNaughton 1992; Miller et al. 2016)。これは、

NaHCO<sub>3</sub>摂取 (0.3 g/kg 体重) により血中の HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>および pHが増加し体内の pHがアルカリ性に傾いたことで、高強度間欠運動を行っても代謝性アシドーシスの程度が弱まり、運動パフォーマンスが向上したためと考えられる。実際に、個人データではあるものの NaHCO<sub>3</sub>摂取により HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>および pHが上昇した被験者では Control 条件よりも NaHCO<sub>3</sub> 条件で平均および最大発揮パワーの向上が見られた。また、胃の不快感の変化に関してもパフォーマンス向上に影響している可能性がある。先述した被験者6名は pre exerciseにおける胃の不快感が NaHCO<sub>3</sub>条件で Control 条件と比較して変化が見られなかった (data not shown)。そのため、NaHCO<sub>3</sub>摂取のポジティブな影響を受けられたのかもしれない。実際に、先行研究では NaHCO<sub>3</sub> 摂取により pHが増加したものの、胃の不快感が増大した者は間欠的スプリント運動のタイムが悪化する傾向にあったことを報告している (Cameron et al. 2010)。本研究においても、NaHCO<sub>3</sub>摂取によってパフォーマンスが向上しなかった5名のうち4名の被験者は、pre exerciseにおける胃の不快感が NaHCO<sub>3</sub>条件で Control 条件よりも増加したように見られる (data not shown)。

また、運動パフォーマンスが向上しなかった要因に、NaHCO<sub>3</sub> 摂取によって HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>がピークに達する時間の個人差が大きいことが影響しているかもしれない。NaHCO<sub>3</sub> 摂取によって HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>がピークに達する時間を摂取後 60-90分と報告している研究 (Siegler and Hirscher 2010) や、摂取後 40-125分であると報告している研究 (Gough et al. 2017) があり、その個人差が大きいことを示している。実際に、本研究で pHを測定した被験者の1人は NaHCO<sub>3</sub>摂取約1時間後で baseline より pHが 0.116高くなっているのに対し、もう1人の被験者は baseline より pHが 0.053低くなっており (data not shown)、その反応に大きな個人差があることが示唆される。従って、本研究においても NaHCO<sub>3</sub> 摂取により運動パフォーマンスが向上しなかったものは pHの増加程度が不十分であった可能性がある。今後は全被験者において pHを測定することで運動パフォーマンスとの関連を見ていく必要がある。

さらに、本研究では最高 BLaが NaHCO<sub>3</sub>条件で Control 条件よりも高値を示した (Figure 4)。そのため、運動パフォーマンスが向上した被験者では解糖系による無酸素性エネルギー供給量が増加したことで、運動パフォーマンスが増加したかもしれない。

#### 4.2. 自発的過換気が高強度間欠的運動時のパフォーマンスに及ぼす影響

先行研究の結果と異なり (Johnson et al. 2021; Leithäuser et al. 2016; Sakamoto et al. 2014)、平均および最大発揮パワーは Control 条件と HV 条件で差は見られなかった (Figure 3)。しかしながら、被験者 11 名のうち 9 名が自発的過換気によって運動パフォーマンスが向上しており、一番パフォーマンスが向上した被験者では HV 条件で Control 条件よりも平均発揮パワーが 9.5% 増加した。さらに後半 (6~10 sets) の平均パワーおよび最大パワーにおいて HV 条件で Control 条件より平均パワーが  $4.1 \pm 6.1\%$ 、最大パワーが  $4.6 \pm 6.9\%$  増加した (Figure 3C, D)。Leithäuser et al. (2016) は自発的過換気によって 30 秒間の全力自転車運動時の平均発揮パワーが 5% 程度向上したと報告しており、有意な差は見られないものの本研究における発揮パワーの向上も先行研究におおむね一致していると考えられる。高強度間欠運動時の後半のパフォーマンスを向上させた要因として、自発的過換気により体内の  $\text{CO}_2$  が過剰に排出され、動脈血  $\text{CO}_2$  分圧の低下を介して pH が増加した可能性がある (Chin et al. 2007; Leithäuser et al. 2016; Sakamoto et al. 2014)。しかしながら、自発的過換気により高強度間欠運動時のパフォーマンスが有意に改善しなかったことには、 $\text{P}_{\text{ET}}\text{CO}_2$  の低下の程度が小さかったことが影響しているかもしれない。先行研究では運動間の自発的過換気により  $\text{P}_{\text{ET}}\text{CO}_2$  を終始 20-25 mmHg に維持しており (Sakamoto et al. 2014)、Chin et al. (2007) も  $\text{P}_{\text{ET}}\text{CO}_2$  を 20 mmHg に維持することで pH を 7.6 まで増加させたことを報告している。本実験では HV 条件における各運動直前の  $\text{P}_{\text{ET}}\text{CO}_2$  の平均は  $25.9 \pm 3.8$  mmHg であったため、先行研究ほど pH を上げることができず、十分にアルカローシスが誘発されていなかった可能性がある。従って、今後は  $\text{P}_{\text{ET}}\text{CO}_2$  を下げるためにより長時間の自発的過換気や換気量を増加させる方策が必要であると考えられる。

#### 4.3. $\text{NaHCO}_3$ と自発的過換気の組み合わせが高強度間欠的運動時の運動パフォーマンスに及ぼす影響

Combined 条件において、高強度間欠的運動時のパフォーマンスは改善しなかったものの、被験者 11 名のうち 7 名が Combined 条件においてパフォーマンスを向上させており、特にパフォーマンスを向上させた被験者は Control 条件より 6.8% 発揮パワーが高かった。これは、先述した 1)  $\text{NaHCO}_3$  摂取により血中の  $\text{HCO}_3^-$  および pH が増加したこと (McNaughton. 1992)、および 2) 自発的過換気によって pH が増加した (Chin et al. 2007; Leithäuser et al. 2016; Sakamoto et al. 2014) ことが要因であると示唆される。

Ferreira et al. (2019) は、0.1 g/kg 体重と 0.3 g/kg 体重の  $\text{NaHCO}_3$  を摂取した場合の効果を比較し、0.3

g/kg 体重の  $\text{NaHCO}_3$  を摂取した場合のみ pH および運動パフォーマンスが向上したと報告している。さらに、McNaughton (1992) は、0.1 g/kg 体重の  $\text{NaHCO}_3$  を摂取しても代謝性アルカローシスは誘発されず、0.2-0.5 g/kg 体重の  $\text{NaHCO}_3$  を摂取した場合に運動パフォーマンスを向上させることができると報告している。そのため、通常であれば 0.15 g/kg 体重の  $\text{NaHCO}_3$  摂取は運動パフォーマンスの改善にポジティブな影響を及ぼさないと考えられる。一方で、pH 測定した被験者の個人データを見てみると、0.15 g/kg 体重の  $\text{NaHCO}_3$  を摂取した場合でも、0.3 g/kg 体重のそれと同程度、pH が増加していた。そのため、0.15 g/kg 体重の  $\text{NaHCO}_3$  の摂取でも高強度間欠的運動時のパフォーマンスを向上させられるかもしれない。しかしながら、Combined 条件で単独介入の条件よりも更なるパフォーマンス向上が起きていないことを考慮すると、Combined 条件によってパフォーマンスが向上した人は、自発的過換気の介入の影響が大きいと考えられ、組み合わせの影響はないと考えられる。

#### 4.4. 現場への応用

本研究では、いずれの条件も高強度間欠的運動時のパフォーマンスを有意に改善させなかったが、後半 (6~10 sets) の平均パワーおよび最大パワーにおいて各介入で Control 条件よりもパフォーマンス向上の傾向が見られた。特に、HV 条件では Control 条件より平均パワーが  $4.1 \pm 6.1\%$ 、最大パワーが  $4.6 \pm 6.9\%$  増加した。自発的過換気は  $\text{NaHCO}_3$  摂取と比較して、費用がかからず胃の不快感の増大、ナトリウムの過剰摂取といった体への負担もかからない。さらに、自発的過換気は介入後即座に pH を増加させることができる。そのため、現場では自発的過換気が  $\text{NaHCO}_3$  摂取に代わり得るパフォーマンス向上の方法である可能性が高い。

## 5. 結論

統計的な有意性は認められなかったものの、自発的過換気は高強度間欠的運動時のパフォーマンスを改善させる可能性があること。また、自発的過換気と少量の  $\text{NaHCO}_3$  の摂取は単独介入と比較して高強度間欠的運動時の更なるパフォーマンス向上を生じさせないことが示唆された。これらの結果から、トレーニングや試合時の運動パフォーマンスを向上させる方法として、自発的過換気と

NaHCO<sub>3</sub> の組み合わせは効果的ではない可能性がある。また、その簡便性から、自発的過換気が高強度間欠的運動時のパフォーマンスを向上させる方法として効果的である可能性がある。

## 参考文献

Bird SR, Wiles J, Robbins J (1995) The effect of sodium bicarbonate ingestion on 1500-m racing time. *Journal of sports sciences* 13 (5):399-403. doi:10.1080/02640419508732255

Borg GA (1982) Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and science in sports and exercise* 14 (5):377-381

Callahan MJ, Parr EB, Hawley JA, Burke LM (2017) Single and Combined Effects of Beetroot Crystals and Sodium Bicarbonate on 4-km Cycling Time Trial Performance. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism* 27 (3):271-278. doi:10.1123/ijsnem.2016-0228

Cameron SL, McLay-Cooke RT, Brown RC, Gray AR, Fairbairn KA (2010) Increased blood pH but not performance with sodium bicarbonate supplementation in elite rugby union players. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism* 20 (4):307-321. doi:10.1123/ijsnem.20.4.307

Carr AJ, Slater GJ, Gore CJ, Dawson B, Burke LM (2011) Effect of sodium bicarbonate on [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>], pH, and gastrointestinal symptoms. *International journal of sport nutrition and exercise metabolism* 21 (3):189-194. doi:10.1123/ijsnem.21.3.189

Chin LM, Leigh RJ, Heigenhauser GJ, Rossiter HB, Paterson DH, Kowalchuk JM (2007) Hyperventilation-induced hypocapnic alkalosis slows the adaptation of pulmonary O<sub>2</sub> uptake during the transition to moderate-intensity exercise. *J Physiol* 583 (Pt 1):351-364. doi:10.1113/jphysiol.2007.132837

Correia-Oliveira CR, Lopes-Silva JP, Bertuzzi R, McConell GK, Bishop DJ, Lima-Silva AE, Kiss M (2017) Acidosis, but Not Alkalosis, Affects Anaerobic Metabolism and Performance in a 4-km Time Trial. *Medicine and science in sports and exercise* 49 (9):1899-1910. doi:10.1249/mss.0000000000001295

Del Castillo J, Nelson TE, Jr., Sanchez V (1962) Mechanism of the increased acetylcholine sensitivity of skeletal muscle in low pH solutions. *Journal of cellular and comparative physiology* 59:35-44. doi:10.1002/jcp.1030590105

Dobashi K, Fujii N, Ichinose M, Fujimoto T, Nishiyasu T (2021) Voluntary hypocapnic hyperventilation lasting 5 min and 20 min similarly reduce aerobic metabolism without affecting power outputs during Wingate anaerobic test. *European journal of sport science* 21 (8):1148-1155. doi:10.1080/17461391.2020.1812728

Dobashi K, Fujii N, Watanabe K, Tsuji B, Sasaki Y, Fujimoto T, Tanigawa S, Nishiyasu T (2017) Effect of voluntary hypocapnic hyperventilation or moderate hypoxia on metabolic and heart rate responses during high-intensity intermittent exercise. *European journal of applied physiology* 117 (8):1573-1583. doi:10.1007/s00421-017-3646-5

Dobashi K, Ichinose M, Fujii N, Fujimoto T, Nishiyasu T (2023a) Effects of Pre-Exercise Voluntary Hyperventilation on Metabolic and Cardiovascular Responses During and After Intense Exercise. *Research quarterly for exercise and sport* 94 (4):1141-1152. doi:10.1080/02701367.2022.2121371

Dobashi K, Katagiri A, Fujii N, Nishiyasu T (2023b) Combined Effects of Hypocapnic Hyperventilation and Hypoxia on Exercise Performance and Metabolic Responses During the Wingate Anaerobic Test. *International journal of sports physiology and performance* 18 (1):69-76. doi:10.1123/ijssp.2022-0121

Edge J, Bishop D, Goodman C (2006) Effects of chronic NaHCO<sub>3</sub> ingestion during interval training on changes to muscle buffer capacity, metabolism, and short-term endurance performance. *Journal of applied physiology* (Bethesda, Md : 1985) 101 (3):918-925. doi:10.1152/jappphysiol.01534.2005

Fuchs F, Reddy Y, Briggs FN (1970) The interaction of cations with the calcium-binding site of troponin. *Biochimica et biophysica acta* 221 (2):407-409. doi:10.1016/0005-2795(70)90290-4

Goldfinch J, Mc Naughton L, Davies P (1988) Induced metabolic alkalosis and its effects on 400-m racing time. *European journal of applied physiology and occupational physiology* 57 (1):45-48. doi:10.1007/bf00691236

Gough LA, Deb SK, Sparks A, McNaughton LR (2017) The Reproducibility of 4-km Time Trial (TT) Performance Following Individualised Sodium Bicarbonate Supplementation: a Randomised Controlled Trial in Trained Cyclists. *Sports medicine - open* 3 (1):34. doi:10.1186/s40798-017-0101-4

Green S, Dawson B (1993) Measurement of anaerobic capacities in humans. Definitions, limitations and unsolved problems. *Sports medicine (Auckland, NZ)* 15 (5):312-327. doi:10.2165/00007256-199315050-00003

Grgic J (2021) Effects of Combining Caffeine and Sodium Bicarbonate on Exercise Performance: A Review with Suggestions for Future Research. *Journal of dietary supplements* 18 (4):444-460. doi:10.1080/19390211.2020.1783422

Johnson MA, Sharpe GR, Needham RS, Williams NC (2021) Effects of Prior Voluntary Hyperventilation on the 3-min All-Out Cycling Test in Men. *Medicine and science in sports and exercise* 53 (7):1482-1494. doi:10.1249/mss.0000000000002608

Joyce S, Minahan C, Anderson M, Osborne M (2012) Acute and chronic loading of sodium bicarbonate in highly trained swimmers. *European journal of applied physiology* 112 (2):461-469. doi:10.1007/s00421-011-1995-z

Leithauser RM, Boning D, Hutler M, Beneke R (2016) Enhancement on Wingate Anaerobic Test Performance With Hyperventilation. *International journal of sports physiology and performance* 11 (7):627-634. doi:10.1123/ijssp.2015-0001

McCartney N, Heigenhauser GJ, Jones NL (1983) Effects of pH on maximal power output and fatigue during short-term dynamic exercise. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 55 (1 Pt 1):225-229. doi:10.1152/jappl.1983.55.1.225

McInnes SE, Carlson JS, Jones CJ, McKenna MJ (1995) The physiological load imposed on basketball players during

competition. *Journal of sports sciences* 13 (5):387-397. doi:10.1080/02640419508732254

McNaughton LR (1992) Bicarbonate ingestion: effects of dosage on 60 s cycle ergometry. *Journal of sports sciences* 10 (5):415-423. doi:10.1080/02640419208729940

McNaughton LR, Gough L, Deb S, Bentley D, Sparks SA (2016) Recent Developments in the Use of Sodium Bicarbonate as an Ergogenic Aid. *Current sports medicine reports* 15 (4):233-244. doi:10.1249/jsr.0000000000000283

Miller P, Robinson AL, Sparks SA, Bridge CA, Bentley DJ, McNaughton LR (2016) The Effects of Novel Ingestion of Sodium Bicarbonate on Repeated Sprint Ability. *Journal of strength and conditioning research* 30 (2):561-568. doi:10.1519/jsc.0000000000001126

Price MJ, Singh M (2008) Time course of blood bicarbonate and pH three hours after sodium bicarbonate ingestion. *International journal of sports physiology and performance* 3 (2):240-242. doi:10.1123/ijsp.3.2.240

Robergs RA, Ghiasvand F, Parker D (2004) Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *American journal of physiology Regulatory, integrative and comparative physiology* 287 (3):R502-516. doi:10.1152/ajpregu.00114.2004

Sakamoto A, Naito H, Chow CM (2014) Hyperventilation as a strategy for improved repeated sprint performance. *J Strength Cond Res* 28 (4):1119-1126. doi:10.1519/JSC.0b013e3182a1fe5c

Siegler JC, Hirscher K (2010) Sodium bicarbonate ingestion and boxing performance. *Journal of strength and conditioning research* 24 (1):103-108. doi:10.1519/JSC.0b013e3181a392b2