

# 自転車トラック競技における 単独走とモーターバイク追走との運動負荷の比較：

エリート大学男子競技者を対象とした  
ペダル回転数・ペダリングパワー・心拍数の事例的検討から

山 口 大 貴（鹿屋体育大学）

## Comparison of Physiological Load in Solo and Motor-Paced Track Cycling:

A Case Study of Pedal Cadence, Power Output,  
and Heart Rate in an Elite Male University Cyclist

Hiroki Yamaguchi

### Abstract

This study investigated differences in exercise load between solo and motor-paced riding in track cycling by examining their effects on pedal cadence, power output, and heart rate. One elite male university cyclist performed trials at four target speeds (40-55 km/h) under both riding conditions. Cadence, power, and heart rate were measured in each trial. Analysis of covariance (ANCOVA) was used to compare the slopes of regression lines across speed levels. Results showed that motor-paced riding significantly reduced power output and heart rate compared to solo riding, with power output decreasing by 62-69% across all speeds. No significant differences were observed in cadence between conditions. These findings suggest that motor-paced riding lowers exercise load primarily through reduced aerodynamic drag and may serve as an effective training strategy to facilitate high-speed overload and enhance overall training volume in competitive track cyclists.

**Key words:** Group riding, Aerodynamic drag, Motor-pacing

### I. 研究の背景と目的

自転車の走行は、人が発揮した力をペダル→チェーン→タイヤの系に伝達し、地面に対して仕事を行うという特徴がある（星川，1993）。自転車を走行させるために必要なペダリングパワー（ $W$ ）は、チェーンやギア等による駆動抵抗（ $W_{KE}$ ）、タイヤと地面の摩擦による路面抵抗（ $W_{tr}$ ）、自転車と競技者が受ける空気抵抗（ $W_{aero}$ ）の和で成り立っている（Chung, 2012）。空気抵抗は、速度の2乗に比例して大きくなることから、走行時の抵抗が最も大きく、競技パフォーマンスに与える影響が大きくなる（淵本，2004）。

自転車競技では、複数人の競技者で隊列を作り走行する集団走行練習がある（日本自転車競技連盟，online a）。隊列の先頭を走る競技者が風除けとなり、追走する競技者はドラフティング効果によって空気抵抗が軽減される。これにより後方の追走競技者が発揮するペダリングパワーは、先頭競技者よりも30-40%程度削減されることが報告されている（Kyle, 1979；Broker et al., 1999）。一方，McCole et al. (1990) は、生理的な負担の軽減を示した研究として、段階的に設定した複数の走行（32~48km/h）における酸素摂取量（ $\dot{V}O_2$ ）を基にエネルギー需要量を算出し、ドラフティング効果によって酸素消費が抑制されることを示している。

さらにトラック競技におけるブレーキとギアの変速機がついていない専用自転車を用いた練習では、風除けの役目をモーターバイクが担うバイクペーサーと呼ばれる走行様式も存在している（シクロワイアード, online）。この練習における現場の捉え方は、自転車を追走するよりも高いドラフティング効果を得られる感覚があり、レースペースで走行しても脚力や生理的な疲労について主観的な余力があるというものである。

この点について、Blocken et al. (2020) は、CFD（数値流体力学）解析およびブレーキやギアの変速機がついているロード用自転車の実測を用いて、時速54km/hで走行した際の空気抵抗を算出すると、モーターバイク追走時の空力的恩恵は非常に大きく、後方11.5mの距離でも最大で約27.7%の空気抵抗削減があることを報告している。さらに、モーターバイクの直後0.12mという非常に近い距離では、空気抵抗削減率が約76%に達することも明らかにした。同研究はトラック競技の環境とは異なるが、バイクペーサー走行は極めて高い空力的利点を持つことを報告している。しかしながら、この先行研究では、走行時の時速を54km/hに限定した調査であることや競技者の運動の負荷を示す心拍変動については検証されていない。

さらに、モーターバイクの追走は単独走と比べて、走行時に発生する各指標がどの程度異なるかについての実証的な知見は乏しく、最終的な運動の負荷の決定は主観に頼っている。

自転車競技のトラック中距離種目においては、走行速度が40-55km/hの範囲で速度が上下する特徴がある（日本自転車競技連盟, online b）。このような速度域帯でのペダリングパワーや心拍数に関して、単独走とモーターバイク追走時とでどのような差異が生じるかを検討することは、指導者および競技者に対しては、バイクペーサーにおける運動の負荷を計画・立案する上の一助になると考えられる。

そこで本研究では、トラック競技における単独走とモーターバイク追走における運動負荷の違いを検討するために、ペダル回転数、ペダリングパワー、心拍数に及ぼす影響についてエリート大学男子自転車競技者1名を対象に事例的に検討した。

## II. 方法

### 1. 分析対象に関する情報

#### (1) 対象者の特徴

対象者は、トラック中距離種目を専門とする大学男子自転車競技者1名で、年齢は20歳、身長は170.0cm、体重は66.5kg、除脂肪体重57.3kgであった。主な戦績は、全

日本大学対抗選手権オムニウム種目の優勝者、日本自転車競技連盟の強化指定選手であった。

なお、本研究は、対象者自身が今後の競技活動におけるトレーニングを実施する際の納得感や充実度を高めるために、筆者が対象者を支援・コーチングするためにデータ取得を行った。その際、研究目的、手順、リスクおよび事故対処について十分な説明を行った。具体的には、実験に先立って対象者に対し、転倒や体調不良が生じた場合には直ちに試技を中止すること、また研究者が競技場に待機し、緊急時には速やかに救護を行うなど安全確保にあたることを説明し、同意を得た。

#### (2) 走行した自転車競技場の情報

本研究で走行した自転車競技場は、鹿児島県根占自転車競技場であった。競技場に関する詳細情報は、屋外環境で路面はアスファルト素材、周長は333.3m、最大傾斜は36.0deg、標高250mであった。

#### (3) 実験試技

対象者は、スポーツ用自転車（Electron Pro RIO, Argon 社製）とトラック用車輪（ELLIPSE, Mavic 社製）を用いて走行した。自転車のギア比は、フロント56T, リア14Tを用いた（4.00倍）。乗車姿勢は、バンチハンドルを用いて中距離種目のレース中にみられる上ハンドルを握る状態で走行した（図1）。

競技場の周回は、単独走行条件とモーターバイク（GIXXER150, Suzuki 社製）追走条件の2つを用いて走行した。走行方法は、自転車競技場のバックストレートからホームストレートまでの0.5周回を助走区間とし、その後ホームストレートから本計測となる2周回の走行を行った。走行速度の設定は、中距離種目におけるレースの速度域を再現することを目的とした。対象者は、競技場1周回ごとにラップタイムを聞いて確認し、30.0, 26.6, 24.0, 21.8秒となるように努めた。これらのタイムに対応する平均速度は、それぞれ40, 45, 50, 55km/hであった。モーターバイク追走条件の際には、モーターバイクの後輪と自転車の前輪が0.3m以内で走行できた試技を採用した。走行の可否確認は、スマートフォン（iPhone15, Apple 社製）を用いてモーターバイクと自転車および競技者の全景を動画撮影した。動画撮影時のフレームレートは60fpsとした。なお、この確認は筆者（競技歴4年、指導歴9年）と研究対象者によって行われた。

実験試技の順番は、単独走条件40, 45, 50, 55km/h・モーターバイク追走条件40, 45, 50, 55km/hで実施した。各試技間には十分な休息を設け、対象者の生理的負担を最小限に抑えることと、取得する心拍数の値を試技



図 1. 実験試技の様子  
左：単独走行条件，右：追走条件

毎に揃えるために①対象者が自覚的に次試技への準備が整ったと判断していること，②心拍数が安静時水準（100 bpm 未満）まで回復していることを確認したうえで次の試技を開始した。

## 2. データの取得および分析方法

### (1) 自転車競技場の気象条件の情報

自転車競技場の気象条件は，携帯型風速計（Kestrel 5200Link, Nielsen-Kellerman 社製）を用いて，気温，湿度，気圧，空気密度のデータを取得した。風速による影響を最小限にするために陸上競技で公認記録と判定される風速 2 m/s 以下の状況で行った。

### (2) 走行速度 (km/h)，ペダル回転数 (rpm)，ペダリングパワー (W)，心拍数 (bpm)

走行速度，ペダル回転数，ペダリングパワーは，サイクルコンピューター（Edge 530, ガーミン社製）とペダル型パワーメーター（Rally RS200, ガーミン社製），心拍数は心拍計（プレミアムハートレートセンサー，ガーミン社製）を用いて算出した。なお，サンプリング周波数は 1 Hz であった。

## 3. 統計分析

本研究のデータは，実験試技で設定した走行速度（40, 45, 50, 55 km/h）で安定して走行した各条件の 2 周回分を採用し，その平均値と標準偏差を求めて作図した。走行速度の増加に対して，各指標（ペダル回転数 (rpm)，ペダリングパワー (W)，心拍数 (bpm)）がどのように変化するか（傾向（傾き））を，条件（単独走とモーターバイク追走）間で比較することを目的として，共分散分析（Analysis of Covariance：ANCOVA）を実施した。なお，統計解析は，表計算ソフト（Microsoft Excel, Microsoft 社）の分析ツールを用いて実施し，統計的有意

水準は 5 % 未満（ $p < 0.05$ ）で判断した。

## Ⅲ. 結 果

### 1. 自転車競技場の気象条件情報

測定は，2024年11月4日，時刻は14時30分～16時30分に行った。測定開始時刻の14時30分の気温は25.6℃，湿度77.3%，気圧993.2hpa，空気密度は1.145kg/m<sup>3</sup>，測定終了時刻の16時30分の気温は24.8℃，湿度65.5%，気圧993.1hpa，空気密度は1.152kg/m<sup>3</sup>あった。

### 2. 走行速度とペダル回転数，ペダリングパワー，心拍数の関係（単独走 vs. 追走）

図 2a には，走行速度とペダル回転数の関係を示している。走行速度が 40-55 km/h に増加すると，ペダル回転数は両条件で線形に増加した（単独走： $y = 1.9128x + 2.0065$ ,  $R^2 = 0.993$ ；追走： $y = 1.9171x + 2.41914$ ,  $R^2 = 0.9975$ ）。単独走条件と追走条件の差はいずれの速度域帯でも 3 rpm 未満であった（交互作用  $p = 0.74$ ）。得られた回帰式を基に 40・45・50・55 km/h における平均ペダル回転数を算出すると，単独走条件の 79, 88, 98, 107 rpm に対し，追走条件は 79, 89, 98, 108 rpm であり，条件主効果および傾きの差では有意な差は認められなかった。

図 2b には，走行速度とペダリングパワーの関係を示している。回帰式は，単独走条件で  $y = 18.862x - 566.02$  ( $R^2 = 0.9813$ )，追走条件では  $y = 5.3959x - 144.13$  ( $R^2 = 0.9733$ ) であった。傾きの差では有意差が確認された（交互作用  $p = 0.005$ ）。得られた回帰式を基に 40・45・50・55 km/h における平均ペダリングパワーを算出すると，単独走条件の 188, 283, 377, 471 W に対し，追走条件は 72, 99, 126, 153 W と一貫して低値を示した。各速度での低減率は 62-68% の範囲にあり，条件主効果は有意であった ( $p < 0.05$ )。

図 2c には，走行速度と心拍数の関係を示している。



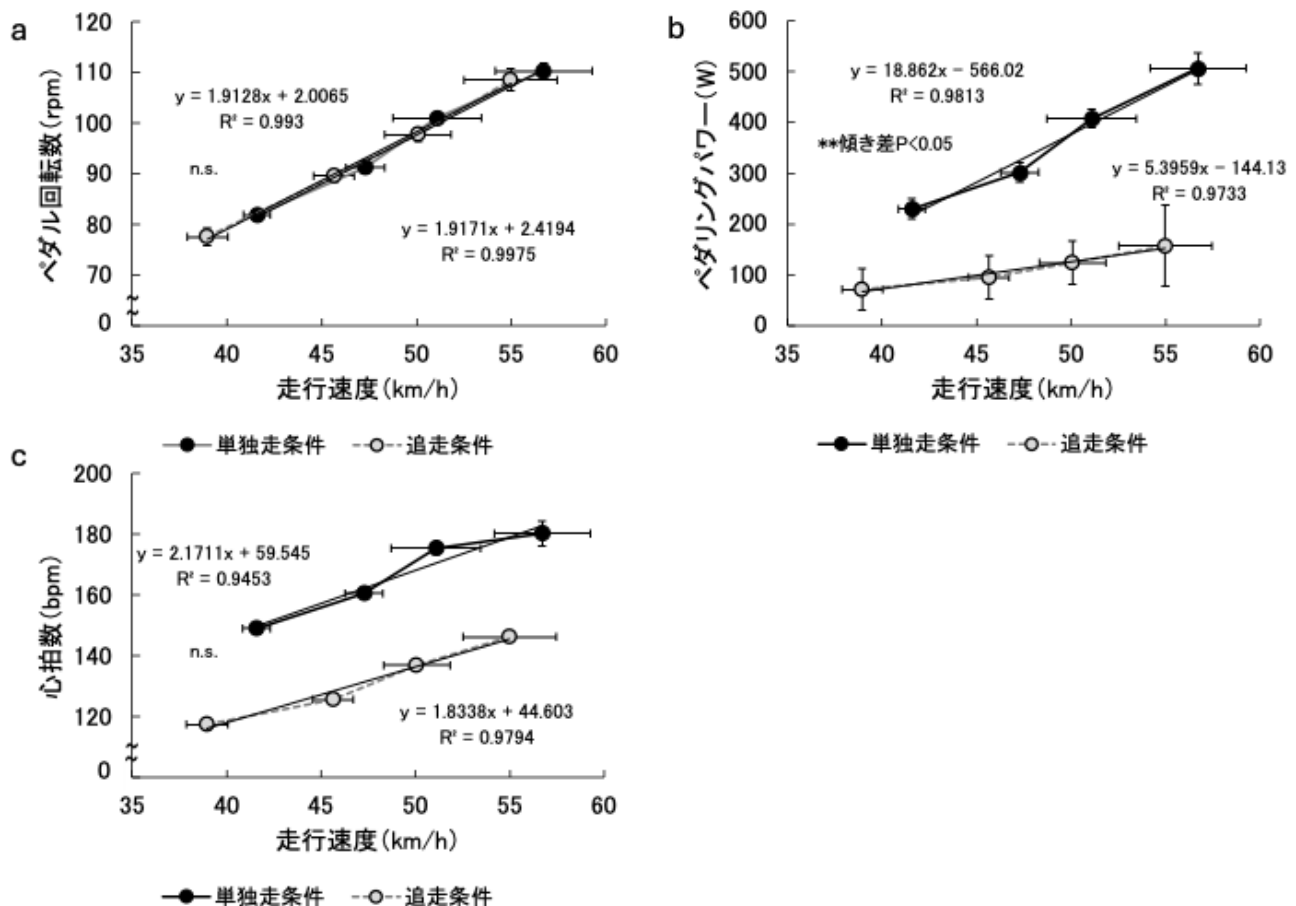


図2. 走行速度とペダル回転数, ペダリングパワー, 心拍数の関係

心拍数は速度の上昇とともに増加したが、追走時には常に低値を示した。回帰式は、単独走条件で  $y = 2.1711x + 59.545$  ( $R^2 = 0.9453$ )、追走条件は、 $y = 1.8338x + 44.603$  ( $R^2 = 0.9794$ ) であった。得られた回帰式を基に40・45・50・55 km/hにおける平均心拍数を算出すると、単独走条件146, 157, 168, 179 bpm、追走条件118, 127, 136, 145 bpmであり、各速度での単独走条件と追走条件の低減率は全ての速度域帯で19%低値を示していた。条件主効果は有意 ( $p < 0.01$ ) であった一方で、傾きの差において有意差 ( $p = 0.82$ ) は確認されなかった。

#### IV. 考 察

本研究では、トラック競技における単独走とモーターバイク追走の運動の負荷の違いについて、ペダル回転数、ペダリングパワー、心拍数を手がかりにエリート大学男子自転車競技者1名を対象に事例的に検討した。

##### 1. 実験当日の空気密度の影響

走行中の空気抵抗に影響を与える空気密度は、実験開始の時刻では1.145kg/m<sup>3</sup>、測定終了時刻では1.152kg/m<sup>3</sup>でそれぞれの差は0.007 kg/m<sup>3</sup>であった。実験当日の気象

条件の変化は、先行研究 (山口・金高, 2024) に示されている実走に影響を与えている差0.034-0.172 kg/m<sup>3</sup>と比較しても極めて小さい値であった。このことから、今回の空気密度の差異は、走行中の空気抵抗に大きな影響を及ぼしていないものだと考えて考察する。

##### 2. 走行速度とペダル回転数, ペダリングパワー, 心拍数との関係 (単独走 vs. 追走)

図2aのペダル回転数をみると、走行速度の増加に伴い (40-55 km/h)、単独走条件も追走条件も線形に増加した。また傾きと切片に有意差はなく、両条件間でペダル回転数に及ぼす影響は認められなかった。走行速度の増加に伴いペダル回転数が高まるのは、変速機が付いていないトラック競技専用の自転車に有している特徴を反映したものであった。走行速度の増加によって両条件のペダル回転数が線形に増加していたのは、対象者の自転車が斜行蛇行することなく安定したラインで走行していたことを説明している。

図2bのペダリングパワーをみると、40・45・50・55 km/hのすべての速度域帯で約160-350Wの差が確認された。各速度での単独走条件と追走条件の低減率は

62-69%であることから、先行研究 (Kyle, 1979; Broker et al., 1999) で報告されている、自転車追走時に削減されるペダリングパワー (30-40%程) よりも明らかに低値であった。これについては、モーターバイクは車体が大きく、自転車よりも空気を切り裂く力が強いいため、背後にできるドラフティングエリアの効果が大きいことによるものだと考えられた。

また、本研究ではペダリングパワーについて単独走と追走条件で傾きに有意差が認められた (図 2b) 一方で、心拍数の傾きには差が認められなかった (図 2c)。この結果は、追走条件においてペダリングパワーが大幅に低下していたにもかかわらず、心拍数の増加傾向は単独走と同様に維持されていたことを示している。すなわち、心拍数は必ずしもパワー出力の変化に比例して変動するわけではなく、自律神経系の反応や体温調節、心理的要因など複数の要因に影響を受ける可能性がある。今後は酸素摂取量や換気量といった呼吸循環応答を同時に測定することで、心拍数の挙動とパワー出力の関係をより精緻に検討する必要がある。

図 2c の心拍数をみると、走行速度とともに増加したが、追走条件は常に低値を示した。40・45・50・55 km/h における平均心拍数は、追走条件は単独走条件よりも心拍数が 30bpm 以上低いことが明らかになった。これは、ペダル回転数 (図 2a) は単独走もモーターバイク追走も同じであってもペダリングパワー (図 2b) が実走よりも 62-69% 低値となっていることが要因だと考えられ、競技者はペダルを踏み込む際の力がモーターバイクによって抑えられているため心拍数は低値になっているものだと考えられた。

### 3. 実践現場におけるバイクペーサーの活用方法の提案

ここでは、これまでの考察を受けて、実践現場におけるバイクペーサーの活用方法を検討する。本研究では、モーターバイク追走時には単独走と比較して、ペダリングパワーが平均で 62-69% 低減し、心拍数も平均で 19% 低下することが明らかになった。これらの結果を実践現場に応用するにあたり、以下の 3 つの観点からバイクペーサーの活用方法を提案する。

#### (1) スピードに対する (高速度域) 過負荷トレーニングへの活用

トラック中距離種目ではレース中に 50-55 km/h を超える高速巡行や終盤のスプリント局面が存在する。高速度域では空気抵抗が速度の 2 乗に比例して増大するため (淵本, 2004)、単独でのトレーニングは生理的・機械的

負荷が高く反復が難しい。しかし、本研究が示すように、モーターバイクを追走することでペダリングパワーや心拍数を抑えつつスピードに対する過負荷のトレーニングの実践が可能となる。

#### (2) 運動量に対する過負荷トレーニングへの活用

モーターバイクを追走することで、運動量に対する過負荷を意図的に与えることが可能である。実践現場では、モーターバイクをレースペースで先導させて追走する練習が行われる場合があるが、走行距離や周回数を増やすことで、実走や自転車追走では得られない運動量を獲得することができる。

モーターバイクの追走は、通常の単独走条件よりも走行距離や周回数を増加させることで、トレーニング負荷の全体量 (training volume) を意図的に上乘せさせることが可能になる。運動量を増加させる目安は、持久系の競技者 (陸上競技中長距離、自転車競技、クロスカントリースキー等) を対象とした先行研究 (Issurin, 2008) を参考にすると、通常練習より走行距離や周回数を 30~50% 増加させる設定が有益であると考えている。特に有酸素能力に寄与する持続的な種目においては、バイクペーサーを用いた運動量の増加は効果的な方法論だと考えられる。

なお、本研究では運動量の増加を走行距離や周回数の観点から説明したが、運動量は本来、パワー出力 (外的負荷) や心拍数などの生理的応答といった変数を含めて総合的に捉えることが望ましいと考える。追走条件ではペダリングパワーや心拍数が低値を示すため、相対的に低負荷の状態で距離や周回数を増やすことが可能となり、結果として全体のトレーニング量を上乘せできる可能性がある。今後、外的出力と生理的応答を組み合わせた運動量の指標を用いた検討を踏まえることで、トレーニングでの運動量の把握が可能となるであろう。

#### (3) 乗車姿勢の習得・維持、追走技能の習得への活用と限界

モーターバイク追走時には、ドラフティングの恩恵を受けつつ安定した乗車姿勢の習得維持や先導するバイクとの距離感覚を実践的に学習できる。また、バンチレースでの位置取りや、先頭競技者を追走する際の、車間距離 (間合い) や無駄のない走行ラインの技能の習得・養成にも寄与すると考えられる。

一方で、ドラフティング効果に依存することによって、単独走や集団走行との運動特性が乖離する可能性もあるため、実践現場では各トレーニング形態の特性を理解した上で、目的や競技者の課題に応じた適切な活用が

求められると考えられる。

#### 4. 研究の限界と今後の課題

本研究は対象者 1 名のみを対象とした事例報告であり、身体特徴や競技レベルなど個人特性が結果に大きく影響している可能性があるため、一般化する際には慎重に解釈する必要がある。また、走行速度を40-55 km/hに限定したため、スプリント局面(60-80km/h)や低速域(35 km/h)におけるドラフティング効果は直接検証できておらず、より幅広い速度域の違いを考慮する必要がある。また、データの取得については屋外の自転車競技場であることから、できる限り外的要因を排除する努力を行ったが(気温、湿度、気圧、空気密度、風速の確認)、全ての要因を排除できておらず、僅かな空気抵抗の変動が本研究のデータ内に含まれている可能性がある。したがって、本研究の回帰式や異なる環境においては、本研究で得られた知見の妥当性を再検討する必要がある。今後は、対象者の数を増やすことや性別や競技レベルを分けた検討も必要だと考えている。

さらに、本研究の結果では、特に45~50 km/h付近で境にパワーや心拍数の直線的関係からの逸脱傾向がみられた。この現象は、高速域での疲労や無酸素代謝の関与増大、ならびにモーターバイクとの距離調整の難しさなどによる影響である可能性があり、今後は複数の競技者を対象にロジスティック関数など非線形の近似により詳細に検討の余地がある。

#### 参考文献

- Blocken, B., Malizia, F., van Druenen, T., Gillmeier, S. (2020) Aerodynamic benefits for a cyclist by drafting behind a motorcycle. *Sports Engineering*, 23(1): 19-30.
- Broker, J. P., Kyle, C. R., Burke, E. R. (1999) Racing cyclist power requirements in the 4000-m individual and team pursuits. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 31(11): 1677-1685.
- Chung, R. (2012) estimating CdA with a power meter. <http://anonymous.coward.free.fr/wattage/cda/indirect-cda.pdf> (2025年7月1日閲覧).
- シクロワイアード (online) バイクペーサーで実際のレースと同じペースを作り、その後ろで交代の練習. <https://www.cyclo wired.jp/media/305580> (参照2025年7月9日)
- 淵本隆文 (2004) 自転車競技における短距離選手の走行速度とパワー. *日本バイメカニクス研究*, 8(1): 52-55.
- 星川秀利・木村裕一・玉木啓一・藤本浩志・中村好男・村岡功 (1993) ベダリング運動におけるスキル評価. *バイオメカニズム学会誌*, 17(3): 173-182.
- Issurin, V. B. (2008) Block periodization versus traditional training theory: a review. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 48(1): 65-75.
- Kyle, C. R. (1979) Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners traveling in groups. *Ergonomics*, 22(4): 387-397.
- 日本自転車競技連盟 (online a) JCF スポーツサイクル基礎スキル動画 上手になる! サイクルスポート (第3章 ロード&トラック). <https://www.youtube.com/watch?v=4UJKQVVBrew> (参照2025年7月9日)
- 日本自転車競技連盟 (online b) [https://jcf.or.jp/events/2024national\\_championships\\_tr/](https://jcf.or.jp/events/2024national_championships_tr/). 全日本自転車競技選手権大会 (トラック) コミュニケ (参照2025年7月9日)
- McCole, S. D., Claney, K., Conte, J. C., Anderson, R., Hagberg, J. M. (1990) Energy expenditure during bicycling. *Journal of Applied Physiology*, 68(2): 748-753.
- 太田洋一・高嶋渉・池田祐介・貴嶋孝太・村田正洋 (2011) 自転車競技 (200mFTT, 250mTT, 500mTT, 1kmTT, 4kmTT) における記録とレース中の速度変化特性, クランク回転数変化特性およびギア比との関係. *トレーニング科学*, 23(2): 177-195.
- 山口大貴・金高宏文 (2024) 国内の低地自転車競技場における空気密度の事例的調査: 自転車競技の競技会等における空気密度を定時観測する意義の検討に向けて. *九州体育・スポーツ学研究*, 39(1): 1-6.

(令和7年7月15日受付)  
(令和7年9月5日受理)