

原著論文

50 km 競歩競技メダリストのレースペース解析を利用したペース設計
Race pace design applied by analysis for race pace of
50 km racewalking medalists

平川武仁¹⁾, 山田憲政²⁾
Takehito Hirakawa¹⁾, Norimasa Yamada²⁾

Abstract : This study aimed to assess pacing profiles of racewalkers who won medals for 50-km racewalking at the summer Olympic Games and World Championship by the International Association of Athletics Federation (IAAF). The pacing profiles were consequently used to determine the finish times associated with high probabilities of winning gold medals, design general mathematical models based on pacing profiles, and examine the extent of fit of these models with the best records for both the events. We fit polynomial approximation as well as exponential and logarithmic functions to split time for every 5 km, obtained earlier from the results of both the events. We subsequently calculated the posteriori probability of winning a gold medal with the Bayes theorem and designed general mathematical models using the most suitable pacing profiles. Finally, these models were fit to the best record for both the events. The following results were obtained: 1) the quadratic function was the highest value of the fit, 2) the posteriori probability of the causal relationship between the finish time of the best rank and the gold medalist was the highest, 3) all the general mathematical models designed using the three hypotheses were significant, and 4) the race pace estimated by this general mathematical model also fit well with the world record. The design method utilized in this study for the general mathematical model and its applications are expected to be useful in racewalking and other events where the race pace design and relevant methods are essential for winning.

Key words : pacing strategy by racewalkers, evaluation function, general mathematical model
キーワード : 競歩選手によるペース設計方略, 評価関数, 汎用的数理モデル

¹⁾大阪体育大学, ²⁾中京大学

¹⁾Osaka University of Health and Sport Sciences, ²⁾Chukyo University

E-mail : hirakawa@ouhs.ac.jp

I. 序論

スポーツの中でも、フィニッシュラインに向かって他者と競争する種目は、一定の距離を、可能な限り短時間でたどり着くことを目的とする競技である⁴⁵⁾。そのため、レースの状況を認知的に把握し、行動を決定する心理学的な過程が重要であると考えられている⁴⁸⁾。つまり、格闘技やボールを扱うチームスポーツなどは開放技能 (open skill) であるが、他者と競争する種目などは閉鎖技能 (closed skill) であるため、末梢の感覚フィードバックを得ながら、予想される残りの負荷 (例えば、フィニッシュラインまでの距離) を勘案し、運動強度を自己選択的に決定しなければいけない¹⁾。このことは、試合中の認知的な方略としての最適なペースを選択する能力が重要であり、最高のパフォーマンス発揮における必要条件となっている。これらの能力は、総じてペース設計 (pacing) と呼ばれ、選手にとって重要な能力の一つとされている³¹⁾。陸上競技に限らず、多くの競争型のスポーツ種目では、個人間の競争で勝利するためのペース設計が試合結果に対して重要な状況判断になる³⁹⁾。また、競技中に、自身の能力を越えたオーバー・ペースであることを、自身の最高のパフォーマンス発揮に対するリスクとして知覚し、ペース設計できる知覚・認知的能力が試合で重要な仲介の役割を果たす⁴²⁾。そのため、この方略的なペース設計は、主要国際大会などのマラソンを走る選手に利用されている³⁵⁾。

ペース設計に関する先行研究は、観測研究 (observational studies) と実験研究 (experimental studies) に大別される³⁹⁾。さらに、観測研究は、タイムトライアル競技 (time-trial competitions) と直接対決競技 (head-to-head competitions) に細分化される³²⁾。本研究で研究対象とした競歩は、直接対決競技に該当する。特に、直接対決競技でも、水泳⁴¹⁾ やボート競技⁵²⁾、あるいは陸上競技の 100 m から 400 m の距離で競争する短距離走³⁶⁾ はセパレートされたレーン (separate lanes) で競技する。一方で、800 m 以上の中長距離走や道路で競技されるマラソンや競歩などはレーンが

ない。そして、レーンがない場合には、集団を形成して競技が進行する時間帯もある^{34), 59)}。それゆえ、対戦相手のコースや位置取り、ペースに惑わされず、しかも一人でペース設計しながら、フィニッシュ時に自分自身の最高のパフォーマンスを発揮できるような最適なペース調整 (optimal pacing regulation) ができる能力が必要となる⁵³⁾。

陸上競技の直接対決競技を検討した先行研究¹⁾ は、ペース設計の形状 (profile: 以下、プロフィール、とする) として、スタート直後の急速な加速とレース後半の区間での速度の低下によって特徴づけられるオールアウト (100 m と 200 m などの短距離、図 1f)、競技時間の持続に伴って徐々に低下する漸減 (800 m などの中距離、図 1a)、放物線 (parabolic) プロフィールの逆 U 字と逆 J 字 (1500 m から 10000 m の中長距離、図 1c と e)、一定 (even) と競技の終盤の漸増 (マラソン、図 1b と d) などが示されている。これらのプロフィールは、オールアウトが対数、漸減や一定が線形、放物線が 2 次以上の関数、終盤漸増が指数、のそれぞれの関数で近似できる可能性を示している。

本研究で、観測研究の対象とした 50 km の距離で競技する競歩 (50 kilometers walking: 以下、50 kmW と略す) は、3 時間 30 分から 4 時間もの長い時間で競技されるため、短距離や中距離のように、スタート直後から最速の速度で競技することが困難であり、中長距離の放物線あるいはマラソン

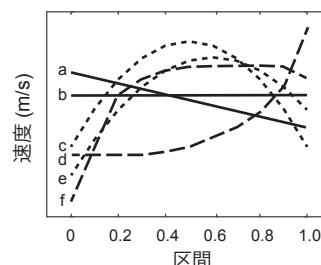


図 1 先行研究で紹介されているレース・ペースのプロフィール。(a) 漸減 (800 m などの中距離)、(b) 一定と (d) 競技の終盤の漸増 (マラソン)、(c) 放物線の逆 U 字と (e) 逆 J 字 (1500 m から 10000 m の中長距離)、(f) オールアウト (100 m と 200 m などの短距離) の典型例を示している。

ンのような一定か終盤漸増のペース設計プロフィールであることが予想される³⁷⁾。そのため、ペース再生において身体的徴候やペース配分に注意を向けることや故意に無視するなどの心理学的な方略⁵⁵⁾が勝利するために重要である。これまで、50 kmW のペース設計の検討では、1999 年から 2011 年までに開催された世界陸上競技選手権（以下、世界陸上とする）³³⁾におけるフィニッシュした 183 名の選手達、1991 年から 2011 年までの夏季に開催されたオリンピック競技大会（以下、オリンピック）と世界陸上における 6 位以上の選手達、それぞれの 5 km 毎のスプリット・タイムの結果を分析³⁷⁾している。近年、日本選手がオリンピックや世界陸上でメダルを獲得してきていることを踏まえ、本研究では、彼ら^{33), 37)}の研究をさらに発展させ、フィニッシュ・タイムが上位であるメダル獲得者のデータに限定するだけでなく、さらに近年のデータを加えて、解析する。このことによって、トレーニングの指針を得るための方法などを提供できる研究成果が、ハイパフォーマンススポーツにおける競技力向上への科学的貢献となり、指導現場あるいはトレーニングの現場にとって有益な情報になると推測される。

これまで、陸上競技での競技距離あるいは持続時間の短い種目では、電動トレッドミルなどを用いて試合水準に近似した統制されたシミュレーション実験を実施し、ペースと生理学的な関係、そしてその際の心理的方略を検討してきた²⁶⁾。しかしながら、競歩のように競技距離と持続時間が極端に長い種目で、競技距離全体（例えば、50 km）を設定したシミュレーション実験などの実験研究を実施することは困難な可能性がある。そのため、これまでの競歩のシミュレーション実験の研究²⁵⁾では、50 kmW の一流選手を対象にして生理学的反応における有益な知見を得ている一方で、実際の試合での歩行速度よりも遅いペースで実験が実施されていること、勝敗の分かれ目になる 40 km 以上の距離が測定課題に用いられていないこと、少しでも速い歩行速度での実験を実施するために、実際に競技する時間よりもかなり短

い 3 時間以内の実験になっていたこと、が挙げられる。つまり、実験研究では、競技距離全体を用いた実験設定では実際の試合でのペースよりも遅いペース、実際の試合でのペースを用いた実験設定では競技距離を短くする、といった条件を伴った設定になる。このように、実験研究による競技距離全体（例えば、50 km）を設定した検討が困難な可能性のあるスポーツ種目において、観測研究は、もっと明白に戦術を評価するための方法や最適な指標を提供することを補助できる³⁹⁾と考えられている。しかしながら、これまでの観測研究はペース設計のプロフィールを示す研究に留まっている。そのため、これまでの先行研究の成果を用いて、将来の試合でどのようなペース設計をするかは、実際にトレーニングに取り組む選手やそのコーチの主観的な判断に任されてしまっているといえる。それゆえ、メダルを獲得した選手のレース・ペースの結果を、現場で利用可能なペースを計算する方法や、その基礎となる汎用的な数理モデルを検討し、提案することが指導現場で有益な情報になるだろう。これまでに、この数理モデルの検討として、多項式近似によってモデルを推定する方法が有効であること⁵¹⁾が示されている。その際、さらにタイム順にランク分けし、そのランクと獲得したメダルの種類（金、銀、銅）の連関、そのペース設計を分析することも有益といえる。

本研究では、これまでの観測研究のように、ペースのプロフィールを示すだけでなく、そのプロフィールの傾向を複数の関数に適合し、最適な関数を明らかにすることを目的 1 とした。次に、フィニッシュ・タイムとメダルの種類との連関と獲得確率を検討し、金・銀・銅メダルをそれぞれ獲得する可能性の高いフィニッシュ・タイムの目安を明らかにすることを目的 2 とした。そして目的 1 で明らかにされたプロフィールと、選手によるペース設計のいくつかの意図を仮定した汎用的な数理モデルを設計する手続きを提案することを目的 3 とした。さらに、数理モデルとフィニッシュ・タイム別のペース設計との適合の程度を検討する

ため、これらのモデルをオリンピックと世界陸上の両大会のうちで最速の大会記録に適合し、将来的に、大会最高記録更新を狙えるペース設計への応用の可能性を検討することを目的4とした。これらの目的の最終到達点は、強化現場でトレーニングに取り組む選手とコーチに対してハイパフォーマンス発揮のためのペース設計で活用できる指針を数理的に得ることとした。

II. 方法

1. 分析データ

1991年から2019年までのオリンピックと世界陸上における50 kmWの5 km毎のスプリット・タイムを用いた。これらのデータは、ベースボール・マガジン社の陸上競技マガジン⁴⁾⁻²⁴⁾に掲載されている記録を用いた。ただし、1992年、1996年、2008年のオリンピック、1991年、1993年、1997年、2019年の世界陸上のデータには欠損値があったこと（スプリット・タイムのデータがない、あるいはデータが欠如した5 kmの区間がある）、3時間50分以上の所要時間を要したデータは、データ解析時点（2020年6月）においてオリンピック参加標準記録を満たしていないこと、という2つの理由により、解析対象とするデータから除外した。残った45データを解析対象として、各5 kmのスプリット・タイムとフィニッシュ・タイムのデータを速度（m/s）に変換した。また、これらのデータの独立変数である競技距離（5 km毎）を、最初の5 km地点を0、フィニッシュである50 km地点を1、に規格化した（例えば、図1、図3、そして図4の横軸、表4の左から2列目の区間）。規格化する理由は、目的3の汎用的数理モデルを設計する手続きを、特定の競技距離で競争する他種目に援用できる可能性があるからである。

2. 分析と設計

1) ペース設計プロフィール（近似関数）の同定

ここでの分析は、先行研究において提示されてきたレース・ペース・プロフィールに基づいて、

近似される関数（一定や漸減のペースは1次線形、逆U字と逆J字は多項式の曲線、終盤漸増は指数、オールアウトは対数のそれぞれの4種の関数）を同定することであった。

多項式近似関数では、次数が高くなると近似の程度が高くなる。しかしながら、何次までを採用するかを判定する必要がある。そこで各係数がどの程度必要な係数かを同定するために、1次線形近似関数から6次曲線近似関数までの定数と各次数の項の係数を多項式回帰⁴⁴⁾を用いて重回帰分析し、定数と各係数の有意性を検定した。検定した当該データにおいて、定数と全ての係数が有意となった近似関数を、そのデータに対する最適な近似関数とした。この方法は、目的変数と説明変数が非線形の関係で表現される場合に適している。また、目的変数に対して他の説明変数から独立した説明力をもたない定数と各項の偏回帰係数を検出できる⁴⁴⁾。次に、全45データのうち、最適な近似関数が最も多かった次数の関数を、競歩のレース・ペース・プロフィールに適している近似関数とした。

さらに、競歩だけでなく他の競技種目に関する先行研究で示された4種の近似関数の中で、50 kmWのレースペースに対して最適な関数を同定するために、線形関数、前段落の手続きで抽出された関数、指数関数、対数関数、の4種の関数を適合し、その際の決定係数（ R^2 ）、赤池情報量基準（Akaike Information Criterion : AIC ）²⁾、ベイズ型モデル評価基準（Bayesian Information Criterion : BIC ）⁵⁰⁾を計算した。 AIC は近似モデルの良さを相対比較することができること、 BIC はベイズの理論による事後確率が最も高くなるようなモデルを最適モデルとして選択できること、という異なる評価で判定できるため、この2つの指標の計算結果（値）を評価の目安とした。以下の分析においても、モデルの適合の程度の推定値については、これらの計算結果（値）を評価値として用いた。ただし、この計算結果（値）の算出において、 AIC はモデルのパラメータ数、 BIC はパラメータ数とサンプル数の影響を受ける。そのため、こ

の推定値のみでモデルの適合の程度について判定せず、決定係数 (R^2) が有意であるかどうか、を判定の主な基準とした。

これらの手続きで計算された値を用いて、近似関数を独立変数とした二要因分散分析によって、近似の程度の差を検定した。有意水準を 5% とした。

2) フィニッシュ・タイムとメダルの種類の連関と獲得確率

50 kmW のフィニッシュ・タイムから計算した平均歩行速度 (m/s) と獲得したメダルの種類の連関 (因果関係) を分析するため、まず 50 kmW における平均歩行速度 (m/s) の上位から、全 45 データを 15 データずつ 3 群に分割し、上位群からランク A、B、C とした (最速歩行速度-最低歩行速度 (m/s) は、A が 3.909-3.771、B が 3.766-3.738、C が 3.735-3.650)。

まず、これらの 3 つのランク間に平均歩行速度の差異があるかを検討するために、一要因分散分析をした。

次に、これら 3 つの各ランクにおける各メダル (金、銀、銅) の個数を頻度として分割表を作成した。ただし、全データで 45 個のみであること、各メダルの総計がそれぞれ 15 個であること、分割表内のそれぞれの頻度データで 5 以下が多いこと、という理由から、分割表の検定 (例えば、 χ^2 検定、直接確率検定など) をせず、ベイズの定理による事後確率によって連関 (因果関係) を下記の式で計算した。この手続きは、平均歩行速度 (Ave. Sp.) のランク (A、B、C) を原因、メダル (Medal) の種類 (金、銀、銅) を結果として、事後確率を算出すること (式 (1)) で、その因果関係の評価を可能にする。

$$Pr(Ave. Sp. | Medal) = \frac{Pr(Ave. Sp.) \times Pr(Medal | Ave. Sp.)}{Pr(Medal)} \quad (1)$$

3) 汎用的数理モデルの設計

5 km 毎のスプリット・タイムのデータは、5 km から 50 km を区間 $[0, 1]$ に基準化している。そのため、スタート後 5 km 地点 ($t=0$) の歩行速度を初期条件、フィニッシュ時点 ($t=1$) の歩

行速度を境界条件にできる。この設定をすれば、本研究で分析する 50 kmW だけでなく、複数の区間毎のタイム (split time) を測定できる他の競技種目にも援用できる手法となる。なお、ここでのモデルの設計では、各ランク 15 名による 5 km 毎の区間の平均歩行速度を計算し、それぞれのモデルの設計に必要な区間の平均歩行速度を用いた。

モデルの設計においては、まず、選手は、スタート直後 5 km からフィニッシュ地点までの 10 区間の全て (50 kmW であれば、スタート後 5 km 毎の 10 区間) のスプリット・タイムを競技前に計画的に設定し、実際のレースにおいてペースを設計していると仮定した。これを仮定 1 (モデル 1) とした。これは、スタート地点からフィニッシュ地点までの多数のデータ (先行研究⁵¹⁾ では 13、本研究では 10 データ) を用いて、残差二乗和を最小にする最小二乗法によって多項式近似した近似関数を求める計算方法⁵¹⁾ である。この方法は、先行研究⁶¹⁾ などで用いられているため、本研究の汎用的な数理モデルの設計の妥当性を検討するための目安となる基準である。この分析の狙いは、仮定 2 と仮定 3 で設計されたモデルを検証するための比較対象とすることでもある。

また、選手は競技前に理想とする全 10 区間のペースを設計して競技している可能性がある一方で、レースは時々刻々と状況が変化するため、競技中に競技前に計画した全 10 区間のペースを意識する、あるいは実現することが現実的に困難であると推測される。それゆえ、選手は、ある地点、あるいは、いくつかの地点でのペース (あるいはスプリット・タイム) を実現することを目安としてペース設計している可能性もある。これらを踏まえ、選手が下記の仮定 2 と 3 によるペース設計するモデルを用いているとして検討することとした。

仮定 2 (モデル 2) では、競技前に選手は、レースの序盤、中盤、終盤の 3 地点のみのペース (スプリット・タイム) を計画し、競技していると仮定した。このモデルの制約条件は、スタート直後 5 km 地点 (t_0) までの 5 km の平均歩行速度 (v_0)、

競技中盤のある地点（例えば、30 km 地点など： t_1 ）までの5 km の平均歩行速度 (v_1)、そしてフィニッシュの50 km 地点 (t_2) までの5 km の平均歩行速度 (v_2) であり、これら3地点とそこでの平均速度を競技前に計画して競技しているとした(式 (2))。総和記号 Σ の上限 m は評価関数を計算するときに利用できる数、つまりデータの数であり、そして偏微分するときの連立方程式の数に該当し、 n は多項式の項数に該当する（そのため、本研究では、多項式推定の結果が2次関数であったことを踏まえ、 $m=2$ 、 $n=2$ とした）。

$$J(t) = \sum_{i=0}^m (v_i - \sum_{j=0}^n a_j t^j)^2 \quad (2)$$

さらに、仮定3（モデル3）では、仮定2（モデル）のフィニッシュ地点での歩行速度を除いたプロフィールとした(式 (3))。式 (3) においては、データ数、つまり偏微分するときの連立方程式の数が2つであるため、本研究では、 $m=1$ とした。

$$J(t) = \sum_{i=0}^m (v_i - a_i(t_i - t_1)^2 - v_1)^2 \quad (3)$$

これは、評価関数 J (= 実測値 - 理論値) を最小にする式を各変数の偏微分で求め、その連立方程式を解いて、係数を求める計算方法でもある。一般化式は式 (4) である。この式に基づいて、モデル2（式 (2)）では、適合関数を算出するために用いた観測データ（本研究では、スタート後5 km 地点 t_0 での歩行速度 v_0 、レース途中のある地点 t_1 での歩行速度 v_1 、フィニッシュ地点 t_2 での歩行速度 v_2 ）と、予測データの係数に該当する基準値 (t_0 、 t_1 、 t_2) を入力し、係数 (a_i) を求めた。また、この偏微分では、これらの残差自乗和が最小になるように、定数項や各項の係数を最小二乗法によって計算する方法が援用できる。モデル3（式 (3)）では、フィニッシュ地点の歩行速度 v_2 を除いた2つの地点のみの歩行速度 (v_0 、 v_1) で計算できる。これらのモデル2と3で設定された境界条件によって偏微分で解くことは、モデル1のように競歩選手が全10区間のスプリット・タイムをペース設計の基準（あるいは意図）として

用いて競技しているのではなく、いくつかの区間（あるいは、ある地点：本研究では t_0 、 t_1 、 t_2 の2から3地点）のみの歩行速度 v_i (m/s) の実測値を基準として用いたペース設計を可能とし、これらの実測値を満たした近似式の設計を可能にするものである。

$$\frac{\partial J}{\partial a_k} = -\frac{\partial}{\partial a_k} \sum_{i=1}^n (v_i - \sum_{j=0}^m a_j t_{ij})^2 = 2 \left(\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=0}^m (a_j t_{ij}) - v_i \right) t_{ik} \right) \quad (4)$$

4) ペース設計への汎用的数理モデルの応用

汎用的数理モデルの応用を検討するため、まず大会最高記録3時間33分12秒を用いてモデル1から3の関数（表3の下から3行）を設計した。次に、これらの関数に、区間 t_i （表4の左から2列目）を代入して、ペース比率を算出した。そして、この記録を上回るフィニッシュ・タイム3時間33分00秒でのペースを設計するために、このペース比率に3時間33分00秒を乗算して5 km 毎の各モデルのペース比率を計算した（表4の中列）。最後に、このスプリット・タイムを用いて、5 km 毎の平均歩行速度を推定した（表4の右列）。

Ⅲ. 結果

1. ペース設計プロフィール（関数）の同定

全45データに対する最適な多項式近似関数を同定するため、1次線形から6次関数まで適合させ、定数項と各次数の係数を多項式回帰による重回帰分析し、有意だった定数と各項の係数を含む近似関数の頻度とその率を計算した結果が表1である。この頻度の結果から、本研究が採用した多項式近似関数の検定である定数と全ての係数が有意な関数は2次関数で26データ（57.8%）と最も高く、最適な多項式近似関数として認められた。次に1次線形で22データ（48.9%）が最適であると認められた。

そこで、1次関数と2次関数を近似式の候補とし、これら2つの関数に、指数近似、対数近似を加えた4つの関数における決定係数 (R^2)、 AIC 、 BIC を計算し、その平均と標準偏差を示した結果が図2である。

決定係数 (R^2) について二要因（ランク3×関数4）

表1 全45データそれぞれを重回帰分析したときに有意だった定数、および有意だった各次数の項の係数の頻度とその百分率

	近似関数					
	1次	2次	3次	4次	5次	6次
定数と全ての係数が有意な関数	22 48.9%	26 57.8%	4 8.9%	2 4.4%	5 11.1%	2 4.4%
定数といくつかの係数が有意な関数	-	7 15.6%	15 33.3%	6 13.3%	3 6.7%	3 6.7%
定数のみ有意な関数	23 51.1%	12 26.7%	26 57.8%	37 82.2%	37 82.2%	39 86.7%
定数と全ての係数が有意でない関数	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	1 2.2%

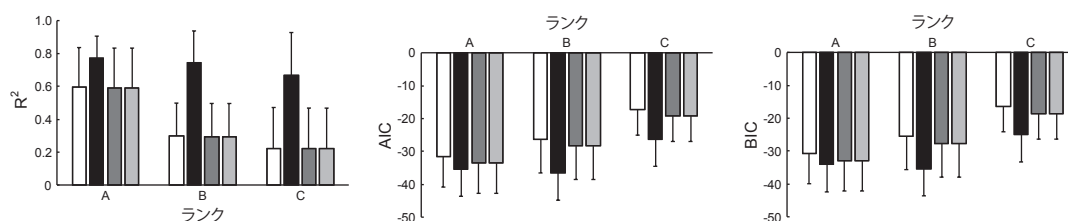


図2 決定係数 (R^2)、AIC、BIC の平均値とその標準偏差。3つのランク毎の平均と標準偏差である。白の棒グラフは1次、黒は2次、濃灰は指数、薄灰は対数、のそれぞれの近似関数の結果である。

分散分析をした結果、ランクの主効果 ($F(2, 42) = 9.05, p < .01$)、関数の主効果 ($F(3, 126) = 85.18, p < .01$)、交互作用 ($F(6, 126) = 5.34, p < .01$) が有意であった。各ランクにおける4つの関数の単純主効果において、いずれのランクであっても、2次関数近似が他の関数よりも有意に高かった (いずれのランクも、 $MSe = 0.017, p < .05$)。

AICについて二要因 (ランク3×関数4) 分散分析をした結果、ランクの要因の主効果 ($F(2, 42) = 9.00, p < .01$)、関数の要因の主効果 ($F(3, 126) = 39.14, p < .01$)、交互作用 ($F(6, 126) = 3.62, p < .01$) が有意であった。各ランクにおける4つの関数の単純主効果については、ランクAでは1次線形近似よりも2次関数近似、ランクBとCでは2次関数近似が他の関数よりも適合の程度が有意に高かった (いずれのランクも、 $MSe = 12.34, p < .05$)。

BICについて二要因 (ランク3×関数4) 分散分析をした結果、ランクの要因 ($F(2, 42) = 9.00, p < .01$)、関数の要因 ($F(3, 126) = 34.61, p < .01$)、交互作用 ($F(6, 126) = 3.62, p < .01$) が有意であった。各ランクにおける4つの関数の単純主効果については、ランクAでは差がなく、ランクBとCでは2次関数近似が他の関数よりも適合の程度が有意に高かった (いずれのランクも $MSe = 12.34, p < .05$)。

これらの結果を総すると、2次関数による近似関数が他の3種の近似関数よりも、50 kmWのペース設計のプロフィールとして最適であったことを示している。

2. フィニッシュ・タイム別とメダルの種類との関連と獲得確率
ランク間のフィニッシュ・タイムの差異を検討

するため、各ランクのフィニッシュ・タイムから計算された平均歩行速度 (m/s ; A ランク 3.824 ± 0.036 、B ランク 3.756 ± 0.010 、C ランク 3.706 ± 0.025) について、一要因 3 水準の分散分析をした結果、有意であった ($F(2, 42) = 73.17, p < .01$)。多重比較の結果、A ランクは B と C よりも、B ランクは C よりも平均歩行速度が有意に高かった ($MSe = .0007, p < .05$)。

表 2a は、3つのランク (A、B、C) において獲得されたメダル (Medal) の種類別 (金、銀、銅) の個数 (頻度) を示している。ランクを原因、メダルの種類別を結果とした因果関係として、ベイズの定理によって事後確率を推定した結果 (表 2b)、ランク A の選手は金メダル (0.60)、B は銀メダル (0.47)、C は銅メダル (0.47) を獲得する確率が最も高いことが認められた。

これらの結果は、メダルを獲得する高水準の記録であっても、獲得したいメダルの種類によって基準にする平均歩行速度があり、その歩行速度に基づいてペース設計しなければならないことを示している。

表 2 フィニッシュ・タイムによる 3つのランクと各メダルの種類の頻度 (a) と事後確率 (b)

(a)

観測度数	ランク			計
	A	B	C	
金	9	3	3	15
銀	3	7	5	15
銅	3	5	7	15
計	15	15	15	45

(b)

事後確率	ランク		
	A	B	C
金	0.60	0.20	0.20
銀	0.20	0.47	0.33
銅	0.20	0.33	0.47

3. 汎用的数理モデルの作成とペース設計への応用

1) 各ランクにおける汎用的数理モデルの作成

表 3 は、ランク A から C までの各 15 データで計算された 10 区間毎の平均歩行速度 (m/s) に対して、モデル 1 (2 次関数)、モデル 2 (式 (2))、モデル 3 (式 (3)) で計算した各項の係数と定数項、その決定係数 (R^2)、統計的検定結果 (F)、有意水準 (p)、モデルの適合の程度 (AIC 、 BIC) の結果を示している。図 3 は、モデル 1 から 3 の近似関数をプロットした結果を示している。いずれのランク、いずれのモデルでも決定係数 (R^2) は有意であった。モデルの適合の程度 (AIC 、 BIC) では、モデル 1 で最も良い傾向が認められた。

さらに表 3 下段は、オリンピックと世界陸上の両大会で最も良かった大会最高記録 (G. R.) 3 時間 33 分 12 秒に対して、モデル 1 (2 次関数)、モデル 2 (式 (2))、モデル 3 (式 (3)) によって計算した各項の係数と定数項、その決定係数 (R^2)、統計的検定結果 (F)、有意水準 (p)、モデルの適合の程度 (AIC 、 BIC) の結果を示している。いずれのモデルでも、その決定係数 (R^2) は有意であった。モデルの適合の程度 (AIC 、 BIC) では、モデル 1 の推定値が最も良い傾向が認められた。

モデルの適合の程度 (AIC 、 BIC) は、データと変数の数によって影響される。そのため、モデル間の直接的な比較はできないが、これらの結果は、先行研究などで主に用いられていた多項式近似 (本研究では 2 次関数) によるモデル作成だけでなく、モデル 2 や 3 も数理モデルとして用いることができる可能性を示している。

2) ペース設計への汎用的数理モデルの応用

表 4 は、大会最高記録 (G. R.) 3 時間 33 分 12 秒の各 5 km 区間の平均速度 (m/s) (左から 3 列目)、モデル 1 から 3 の関数 (表 3 下段) から計算された各区間のペース比率 (中 3 列)、大会最高記録を若干上回る記録 3 時間 33 分 00 秒としてペース比率から推定した速度 (右 3 列)、その推定速度と大会最高記録の平均速度との決定係数 (R^2) と統計的検定結果 (F)、有意水準 (p)、モデルの適合の程度 (AIC 、 BIC) の結果を示している。

表3 各ランクで推定されたモデル1から3の関数の結果と、統計的検定、そしてモデル適合度 (AIC、BIC)。G. R. はオリンピックと世界陸上の両大会での大会最高記録1名に対してモデル1から3で計算した結果を示している。

ランク	モデル	関数	R^2	$F(1, 8)$	p	AIC	BIC
A	1	$v = -0.2741t^2 + 0.4287t + 3.7071$	0.972	281.784	**	-57.207	-55.997
	2	$v = -0.4011t^2 + 0.5443t + 3.7087$	0.932	109.977	**	-40.758	-39.547
	3	$v = -0.2987(t - 0.7778)^2 + 3.8894$	0.972	281.784	**	-47.651	-46.440
B	1	$v = -0.4837t^2 + 0.5214t + 3.6668$	0.951	156.627	**	-55.371	-54.161
	2	$v = -0.5222t^2 + 0.5379t + 3.6711$	0.967	100.421	**	-50.689	-49.479
	3	$v = -0.4461(t - 0.5556)^2 + 3.8088$	0.941	126.921	**	-51.596	-50.385
C	1	$v = -0.6412t^2 + 0.7442t + 3.5624$	0.933	112.029	**	-44.305	-43.095
	2	$v = -0.7961t^2 + 0.8640t + 3.5730$	0.887	62.789	**	-30.937	-32.686
	3	$v = -0.4998(t - 0.6667)^2 + 3.7951$	0.823	37.201	**	-29.726	-28.516
G. R.	1	$v = -0.3043t^2 + 0.5906t + 3.7235$	0.783	28.905	**	-23.472	-22.262
	2	$v = -0.5076t^2 + 0.9025t + 3.6603$	0.781	28.488	**	-17.663	-16.452
	3	$v = -0.6527(t - 0.7778)^2 + 4.0552$	0.759	25.146	**	-17.029	-15.819

** : $p < .01$

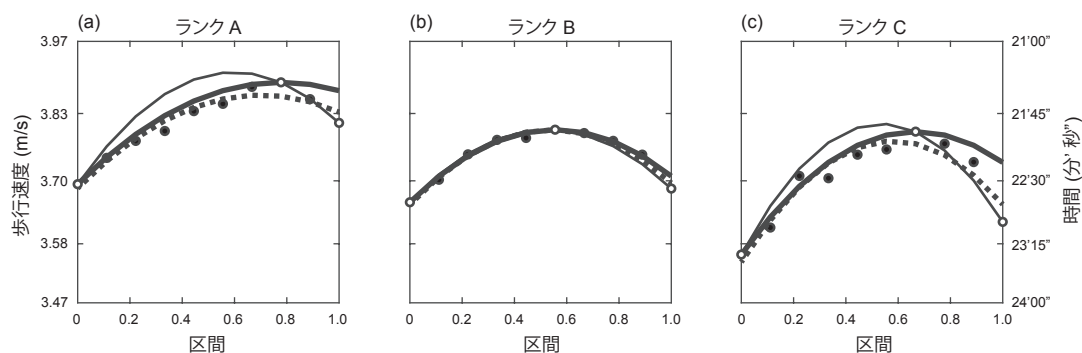


図3 ランク A から C ごとの各区間における平均歩行速度と、その速度に対するモデル1から3までを適合した結果。左側の縦軸は歩行速度、右側の縦軸は時間を示している。なお左側の縦軸の歩行速度は、右側の縦軸の歩行時間に対応した小数点第2位までの歩行速度を示しているため、メモリが等間隔になっていない。パネル (a) が全データのうちランク A15名、(b) が B15名、(c) が C15名、の5 km 毎の平均歩行速度 (m/s) を丸印でプロットしている。破線 (モデル1) が全10区間のデータに近似させた2次関数の結果である。各パネルの白丸は、左からスタート直後5 km、最高歩行速度、フィニッシュの3つの区間の平均歩行速度を示している。各パネルの細い曲線 (モデル2) が3つの白丸のデータ、太い曲線 (モデル3) がスタート直後5 km と最高歩行速度だった区間のデータをそれぞれ用いた結果である。

図4は、大会最高記録 (G. R.) の各区間の平均速度 (m/s) (黒丸) と、推定速度 (表4の右3列) の結果を示している。これらの結果から、いずれのモデルでも、その適合の程度 (R^2) は有意であった。モデルの適合の程度 (AIC、BIC) では、同程度の推定値であった。

モデルの適合の程度は、モデルのパラメータ数

とサンプル数によって影響を受けるため、モデル間の直接的な数値比較はできないが、これらの結果から、先行研究などで主に用いられていた多項式近似 (本研究では2次関数) によるモデル作成だけでなく、モデル2や3も数理モデルとして採用できる可能性がうかがえる。

表 4 大会最高記録 1 名に対してモデル 1 から 3 で推定した各 5 km 区間の比率と、目標記録 (3 時間 33 分 00 秒) に対するその比率から推定された歩行速度と大会最高記録との統計的結果と適合度 (AIC、BIC)

通過 距離 (km)	区間 (t_i) (50km に対する比率)	G. R. (m/s)	ペース比率			推定速度 (m/s)		
			モデル			モデル		
			1	2	3	1	2	3
5	0.000	3.660	0.105	0.107	0.107	3.726	3.645	3.640
10	0.111	3.840	0.103	0.105	0.104	3.788	3.739	3.744
15	0.222	3.864	0.102	0.102	0.102	3.843	3.820	3.833
20	0.333	3.919	0.101	0.101	0.100	3.890	3.889	3.905
25	0.444	3.949	0.100	0.099	0.099	3.929	3.945	3.961
30	0.556	3.885	0.099	0.098	0.098	3.961	3.989	4.001
35	0.667	3.946	0.098	0.097	0.097	3.985	4.020	4.025
40	0.778	4.055	0.098	0.097	0.097	4.002	4.039	4.033
45	0.889	3.943	0.098	0.097	0.097	4.011	4.045	4.025
50	1.000	4.055	0.097	0.097	0.098	4.013	4.039	4.001
計			1.000	1.000	1.000			
R^2						0.783	0.781	0.759
$F(1, 8)$						28.912	28.491	25.147
p						**	**	**
AIC						-29.094	-31.981	-32.817
BIC						-56.033	-54.839	-58.744

**： $p < .01$

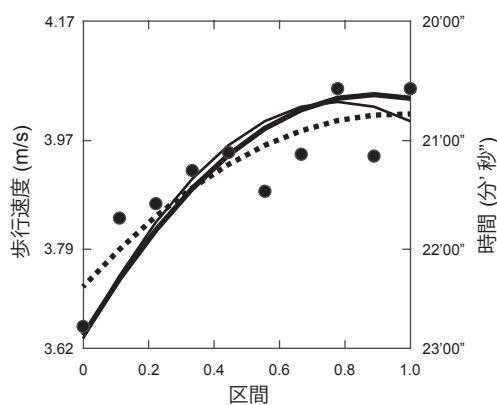


図 4 大会最高記録 1 名の各 5 km 区間の平均歩行速度 (図中の黒丸) に対してモデル 1 から 3 を適合し、それぞれのモデルから算出された比率を用いて、目標とするフィニッシュ・タイム (3 時間 33 分 00 秒) のペースを推計した結果。破線 (モデル 1)、細い曲線 (モデル 2)、太い曲線 (モデル 3) である。

IV. 考察

3 時間 30 分以上の長時間で競技する 50 kmW では、競技中のペースを競技前のトレーニングで設計し、競技中のペース再生で成功させることが、競技で勝利するための戦術や心理的方略として重要である。本研究は、観測研究として、1990 年代から 2010 年代までのオリンピックと世界陸上における 50 kmW の競技結果である 5 km 毎のスプリット・タイムを解析した。まず高水準の競歩選手のスプリット・タイムの結果に対して複数の関数を適合し、最適な関数を同定した。次に、フィニッシュ・タイムに基づいて 3 つの競技ランクに分類し、そのランクとメダルの種類 (金、銀、銅) の連関を事後確率によって同定した。そして、ペース設計に関する 3 つの仮定に基づいて数理モデルの関数を同定した。最後に、ハイパフォーマンス

な競技達成に有用な情報となるペース設計のために、オリンピックと世界陸上の両大会で最も良かった大会記録に汎用的数理モデルを適用して、今後、大会最高記録を狙いとしたペース設計への応用を考察する結果を得た。

屋外での競技では、選手が安定した環境条件で競技できることが少なく³⁾、様々なペース設計の方略が最適化されている可能性⁴⁰⁾を考慮しなければいけない。そのため、運動中の生理学的な運動強度やパワー出力に着目する研究が多く、疲労に対する一定のパワー出力と持続時間の関係などが検討されてきた⁴³⁾。しかしながら、前述のように、50 kmW は長時間で競技するため、実際の試合のペースや歩行速度を 50 km もの距離で実験的に再現して、生理学的な測定をすることが困難である。これらのことを考慮し、本研究は 50 kmW の観測研究として、エリート競技者の試合の結果であるスプリット・タイムやフィニッシュ・タイムをデータとして用いて検討することとした。この検討によって得られた知見は、今後、日本選手がさらなるハイパフォーマンスを発揮するためのトレーニングにおける強化および記録を向上すること、に寄与する可能性を秘めている。この知見を得るためにも、まず各大会でメダルを獲得した上位の競技者の競技結果を分析対象にすることが必要である。これらのことを実現するため、フィニッシュ・タイムに基づいてランク分けし、さらに客観的に検討していく必要がある、と考えられる。

まず近似関数の最適な次数を同定した結果、2 次関数が最適な近似関数の可能性が認められた。この結果は、50 kmW の一般的なペースのプロフィールとして、比較的ゆっくりスタートし、レース序盤で徐々にペースを上げていき、ある地点(例えば、30 km 前後)で最高歩行速度に到達、それからゆるやかな漸進的なペースの低下が続くような放物線のプロフィール³³⁾であることを示している。また、この結果は、持久性種目⁵⁶⁾で観測されてきたような、レース序盤には緩徐なペースで始める結果を示していると考えられる。この

ペース設計は、長時間で競技する 50 kmW も、主なエネルギー源として、グリコーゲンから脂質への転換を利用していたこと¹⁾が考えられる。ただし、図 3 でのスタート直後 5 km 地点における 3 つの各ランクの平均歩行速度やフィニッシュ・タイムの比較検討の結果 (III. 2 第 1 段落) は、国際大会において銅メダル以上でフィニッシュしている高水準なタイムであっても、銅メダルよりも銀メダル、銀メダルよりも金メダルを獲得するためには、スタート後 5 km のペースあるいは平均歩行速度を高めるためのトレーニングも必要であることを示していると考えられる。

また、メダルを獲得した国際大会の上位の選手であっても、図 3 の結果をみると、ランク A の歩行速度が低下し始める地点は、ランク B や C に比べて、さらにレース後半の地点であった。この結果から、フィニッシュに向けて、歩行速度を大幅に低下させずに済むように、なるべくレース後半の地点で最高速度となるようにペース設計をしていたと考えられる。このことは、特に図 3a の結果から、3 分の 2 以上の競技距離を経た後に最高速度となることを狙いとしたペース設計³⁸⁾でもある。これは、生理学的なエネルギーの枯渇だけでなく、フィニッシュまで 10 km 以下であれば、フィニッシュに到達するまでの心理学的励ましが疲労や痛みに打ち勝つ効果をもっていること²⁹⁾を示している可能性も考えられる。

これらの結果に加えて、ランク A から C までの 5 km 毎の平均歩行速度 (図 3、表 3 上段と中段) と大会最高記録 (図 4、表 3 下段) にモデル 1 から 3 を適合させて汎用的数理モデルを推定した後、これらのモデルによって 5 km 毎のペース設計の比率を算出し、適合の程度を検討した。さらに、目標ゴールタイム (3 時間 33 分) から推定した逆 J 字型ペース配分と、大会最高記録のペース配分との関係を検定した結果、高い決定係数であった。この結果は、2 つから 3 つの地点での実測値 (歩行速度) によるモデル、あるいは全 10 区間の実測値によるモデルであっても、目標とするゴールタイムに対するペース設計において、ど

の程度の歩行速度あるいは区間タイムが必要か、を推定することを概ね可能としていると考えられる。これらのことから、試合時のペース設計や、目標とするゴールタイムに対する認知的ペース再生方略⁵⁵⁾の一助となる可能性が考えられる。そして、本研究では、競技距離の全体を [0, 1] に規格化してモデルを推定したため、一定の競技距離で競争する他の競技種目においても、競技前にペースを設計するための手続きとしても援用できる可能性があるだろう。このように、レースのスプリット・タイムなどに関数を近似させてプロフィールを明らかにした研究³⁷⁾からさらに、近似された関数を用いて目標とするゴールタイムに基づいてスプリット・タイムを推定できる手続きが、実際にトレーニングに取り組む選手やそのコーチの主観的な判断に加え、客観的な指針を得るために貴重な資料になると考えられる。そして、今回のペース設計の手続きを他の競技種目にも援用されることを仮定し、歩行速度に変換したが、図3の右側の軸に示したように、各競技種目で観測データとして用いられている最小区間、つまり本研究や先行研究³³⁾で解析されている5 km 毎の所要時間を使って、モデルを推計することも可能と考えられる。さらに、本研究では汎用的数理モデルの設計の基準値として、2つから3つの地点での実測値（歩行速度）を用いてモデル2と3を設計したが、モデル1を設計した際に算出された2つから3つの地点でのペース配分の結果を参考にしたレース戦略、といった援用への拡張も考えられる。

ただし、本研究の限界として、本研究が観測研究³⁹⁾であることが挙げられる。つまり、屋外で実施される競争型の競技種目では、競争相手との駆け引きによる3つの水準（個人内、個人間、グループ）^{46), 47)}、気象や暑熱⁵⁸⁾、そして風²⁸⁾などの環境変化、1周1.0-2.5 km程度で競技する比較的安定したコースとはいえ、競技する道路の地形による影響⁵⁴⁾など、試合における生態学的な影響を加味した解析^{27), 53)}ができていないこと、本研究で使用した公式発表データは5 km 単位のス

プリットタイムであり、トレーニングや指導の現場で計測されるペース単位（例えば1 km 単位など）と比較すると粗いこと、が挙げられる。さらに、先行研究のように生理学的あるいは生体力学的な要因について考究できても⁵⁷⁾、50 kmW は集団で競争する時間があることと、選手自身の生理学的な体力の限界値と向き合いながら一人で競技する時間があること、を仮定するならば、個人間の相互関係が個人内の心理面に影響するペース設計と個人内の生理学的要因が影響するペース設計の両方が時々刻々と変化し、これらの影響を踏まえて考察できないことが挙げられる。そして、他の長い競技時間となる持久性種目と異なっている本競技の特徴として「歩型違反」の判定があるが、本研究ではその影響はモデル化において考慮されていない。すなわち、競歩における選手のレース設計は厳密には、ロスト・オブ・コンタクト、ベント・ニーの違反が発生したことによるペースの低下、あるいは疲労などによるレース中盤や終盤でのレッドカード判定のリスクを考慮したペース設計など、戦略的な状況判断において影響する可能性のあるリスクを含んで行われている。しかし、本研究では、まずは全体のペースを把握するモデル構築を目指した。したがって、これらの要素が分析には反映されていないという分析上の限界がある。また、他の対戦相手と競争することで自己効力感が影響すること⁶⁰⁾、ペース設計が長期的なトレーニングによる自己調整技能として知覚されうること³⁰⁾、といった知見をペース設計の解析に反映できない点も挙げられる。これらのことは、観測研究において、個々の競技者のペース設計の特徴を抽出できていない可能性があることも意味している。例えば、図4で事例的に検討した競技者のペース設計は、図3 (a) のランクAに分類され平均化されているために、この競技者の事例的な特徴としてのペース設計における情報が失われていることに注意する必要がある。

レースペースに関する研究の今後の発展として、目標設定 (goal setting) や方略的プランニング (strategic planning) など、戦術的な状況判断

に影響する要因⁴⁹⁾を解析に踏まえることができるのならば、知覚された行為に対する最適なペース設計を選択する技能も、トレーニングによって改善されること³⁹⁾が期待される。これは、様々な条件や持続時間がある中ででのペース設計に対して、知覚・認知的な影響を踏まえた研究に発展させ、さらには中枢神経系の疲労の影響¹⁾まで展開していく可能性も考えられる。

50 kmW は3時間30分以上もの長い競技時間となる持久性種目である。そのため、競技以外の測定場面では、ゆっくりとした歩行速度での長時間の歩行によって生理学的な変化を測定すること²⁵⁾は可能である。しかしながら、競技と同等の歩行速度で、しかも同等の歩行距離で、実験的にペース設計の効果を検証することは困難である。それゆえ、トレーニング現場での指導では、指導者あるいは選手の推測に基づいて練習のペースが設定されていることが予想される。そのため、本研究のように、実際の競技結果をデータに利用し、統計的検定によって客観的な知見を得る手続きを経て、ペース設計の基準を見定めることが必要であると考えられる。このことにより、競技前において競技中のペース設計することだけでなく、ハイパフォーマンスなペースを達成するためのトレーニング計画の指標に提供できる科学的知見が得られると考えられる。そのためにも、汎用的な数理モデルから計算されたペース設計に基づいて、トレーニングの負荷を設定し、歩行速度をどの程度まで上昇させ、その後どの地点あるいは距離までペースを維持するのか、といった見通しを立てることのできるトレーニングの研究に繋がっていくことが期待される。

V. 結論

本研究の目的は、オリンピックと世界陸上の両大会の50 kmWにおいて、メダルを獲得した競歩選手のペース設計のプロフィール、金メダルを獲得する確率が高いフィニッシュ・タイム、ペース設計のプロフィールに基づいた汎用的数理モデルの作成、両大会で最高記録であったフィニッシュ・

タイムに対するモデルの適合の程度、を検討した。これらの検討では、両大会でメダルを獲得した選手の5 km毎のスプリット・タイムのデータを用いて、解析をした。

その結果、1) 最も適合する関数は2次関数であったこと、2) 最も良いランクのフィニッシュ・タイムと金メダルの因果関係の事後確率が最も高かったこと、3) 3つの仮定で作成したそれぞれの汎用的数理モデルが有意であったこと、が明らかになった。3つの仮定に基づいて設計した汎用的数理モデルは、ペース設計に対する競技者の意図あるいは方略を加味したものともいえる。そのため、これらの結果は、各選手が目標としているフィニッシュ・タイムに対して、ペース設計するための一助になる可能性がある。そして本研究における汎用的数理モデルの設計の手続きは、レースペースのプロフィールが異なる他の種目、つまり本研究の2次関数以外の近似関数で適合される他の種目にも援用して検討できる有用性があると考えられる。

ただし、本研究の限界として、本研究は観測研究であるため、競争者間の駆け引き、気象や暑熱などの環境変化、地形など、試合における生態学的な影響を含めて検討することができなかったことが挙げられる。また、競技者の心理面に影響を及ぼす可能性のある競争者間の駆け引きなどの相互作用を踏まえた状況でのペース設計を検討できていないことが挙げられる。

今後、目標設定や方略的プランニングなど戦術的な状況判断に影響する要因を解析に踏まえながら、様々な条件や持続時間の中ででのペース設計に対する知覚・認知的な影響となる中枢神経系の疲労の影響¹⁾まで検討を発展していくことが必要と考えられる。

文献

- 1) Abbis CR, Laursen PB. Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Med*, 38(3): 239-252, 2008.
- 2) Akaike H. A new look at the statistical model

- identification. *IEEE Trans Automat Contr*, 19(6): 716-723, 1974.
- 3) Atkinson G, Brunskill A. Pacing strategies during a cycling time trial with simulated headwinds and tailwinds. *Ergonomics*, 43(10): 1449-1460, 2000.
 - 4) ベースボールマガジン社. 第3回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 199-200, 1991.
 - 5) ベースボールマガジン社. 第4回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 134, 1993.
 - 6) ベースボールマガジン社. 第5回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 207-208, 1995.
 - 7) ベースボールマガジン社. 第6回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 107-108, 1997.
 - 8) ベースボールマガジン社. 第7回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 89-90, 1999.
 - 9) ベースボールマガジン社. 第8回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 219, 2001.
 - 10) ベースボールマガジン社. 第9回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 223, 2003.
 - 11) ベースボールマガジン社. 第10回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 123, 2005.
 - 12) ベースボールマガジン社. 第11回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 243-244, 2007.
 - 13) ベースボールマガジン社. 第12回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 149, 2009.
 - 14) ベースボールマガジン社. 第13回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 111, 2011.
 - 15) ベースボールマガジン社. 第14回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 164, 2013.
 - 16) ベースボールマガジン社. 第15回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 105, 2015.
 - 17) ベースボールマガジン社. 第16回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 10月号: 89, 2017.
 - 18) ベースボールマガジン社. 第17回世界選手権成績. 陸上競技マガジン, 11月号: 92, 2019.
 - 19) ベースボールマガジン社. 第25回バルセロナ・オリンピック. 陸上競技マガジン, 10月号: 102-103, 1992.
 - 20) ベースボールマガジン社. 第26回アトランタ・オリンピック. 陸上競技マガジン, 8月号増刊アトランタ・オリンピック総決算号: 88, 1996.
 - 21) ベースボールマガジン社. 第27回シドニー・オリンピック. 陸上競技マガジン, 10月号: 136, 2000.
 - 22) ベースボールマガジン社. 第28回アテネ・オリンピック. 陸上競技マガジン, 10月号: 133-134, 2004.
 - 23) ベースボールマガジン社. 第30回ロンドン・オリンピック. 陸上競技マガジン, 10月号: 101, 2012.
 - 24) ベースボールマガジン社. 第31回リオデジャネイロ・オリンピック. 陸上競技マガジン, 10月号: 105, 2016.
 - 25) Brisswalter J, Fougeron B, Legros P. Effect of three hours race walk on energy cost, cardiorespiratory parameters and stride duration in elite race walkers. *Int J Sports Med*, 17(3): 182-186, 1996.
 - 26) Casado A, Hanley B, Jiménez-Reyes P, Renfree A. Pacing profiles and tactical behaviors of elite runners. *J Sport Health Sci*, 10(5): 537-549, 2021.
 - 27) Cisek P, Kalaska JF. Neural mechanisms for interacting with a world full of action choices. *Annu Rev Neurosci*, 33: 269-298, 2010.

- 28) de Koning JJ, Bobbert MF, Foster C. Determination of optimal pacing strategy in track cycling with an energy flow model. *J Sci Med Sport*, 2(3): 266–277, 1999.
- 29) de Koning JJ, Foster C, Bakkum A, Kloppenburg S, Thiel C, Joseph T, Cohen J, Porcari JP. Regulation of pacing strategy during athletic competition. *PLoS One*, 6(1): e15863, 2011.
- 30) Elferink-Gemser MT, Hettinga FJ. Pacing and self-regulation: Important skills for talent development in endurance sports. *Int J Sports Physiol Perform*, 12(6): 831–835, 2017.
- 31) Foster C, Schrager M, Snyder AC, Thompson NN. Pacing strategy and athletic performance. *Sports Med*, 17(2): 77–85, 1994.
- 32) Foster C, Snyder AC, Thompson NN, Green MA, Foley M, Schrager M. Effect of pacing strategy on cycle time trial performance. *Med Sci Sports Exerc*, 25(3): 383–388, 1993.
- 33) Hanley B. An analysis of pacing profiles of world-class racewalkers. *Int J Sports Physiol Perform*, 8(4): 435–441, 2013.
- 34) Hanley B. Gait alterations during constant pace treadmill racewalking. *J Strength Cond Res*, 29(8): 2142–2147, 2015.
- 35) Hanley B. Pacing, packing and sex-based differences in Olympic and IAAF world championship marathons. *J Sports Sci*, 34(17): 1675–1681, 2016.
- 36) Hanon C, Gajer B. Velocity and stride parameters of world-class 400-meter athletes compared with less experienced runners. *J Strength Cond Res*, 23(2): 524–531, 2009.
- 37) 平川武仁. 国際大会の 50 km 競歩におけるペースの変化. *陸上競技研究*, 91: 33–40, 2012.
- 38) Hopkins J. Improving performance in the 50 kilometers walk. *New Studies in Athletics*, 5(3): 45–48, 1990.
- 39) Konings MJ, Hettinga FJ. Pacing decision making in sport and the effects of interpersonal competition: A critical review. *Sports Med*, 48(8): 1829–1843, 2018.
- 40) Liedl MA, Swain DP, Branch JD. Physiological effects of constant versus variable power during endurance cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 31(10): 1472–1477, 1999.
- 41) Mauger AR, Neuloh J, Castle PC. Analysis of pacing strategy selection in elite 400-m freestyle swimming. *Med Sci Sports Exerc*, 44(11): 2205–2212, 2012.
- 42) Micklewright D, Parry D, Robinson T, Deacon G, Renfree A, St Clair Gibson A, Matthews WJ. Risk perception influences athletic pacing strategy. *Med Sci Sports Exerc*, 47(5): 1026–1037, 2015.
- 43) Moritani T, Nagata A, de Vries HA, Muro M. Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics*, 24(5): 339–350, 1981.
- 44) 奥野忠一. 多項式回帰による考察. 奥野忠一ら編, 続多変量解析法. 日科技連出版社, pp.44–54, 1976.
- 45) Padilla S, Mujika I, Orbañanos J, Angulo F. Exercise intensity during competition time trials in professional road cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 32(4): 850–856, 2000.
- 46) Pan X, Han CS, Dauber K, Law KH. A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations. *AI Soc*, 22(2): 113–132, 2007.
- 47) Renfree A, Casado A. Athletic races represent complex systems, and pacing behavior should be viewed as an emergent phenomenon. *Front Physiol*, 9: 1432, 2018.
- 48) Renfree A, Martin L, Micklewright D, St Clair Gibson A. Application of decision-making theory to the regulation of muscular work rate during self-paced competitive endurance activity. *Sports Med*, 44(2): 147–158, 2014.
- 49) Renfree A, St Clair Gibson A. Influence of

- different performance levels on pacing strategy during the Women's World Championship marathon race. *Int J Sports Physiol Perform*, 8 (3): 279–285, 2013.
- 50) Schwarz G. Estimating the dimension of a model. *Ann Statist*, 6(2): 461–464, 1978.
- 51) Simbaña-Escobara D, Hellard P, Seifert L. Modelling stroking parameters in competitive sprint swimming: Understanding inter-and intra-lap variability to assess pacing management. *Hum Mov Sci*, 61: 219–230, 2018.
- 52) Smith TB, Hopkins WG. Variability and predictability of finals times of elite rowers. *Med Sci Sports Exerc*, 43(11): 2155–2160, 2011.
- 53) Smits BLM, Pepping G-J, Hettinga FJ. Pacing and decision making in sport and exercise: The roles of perception and action in the regulation of exercise intensity. *Sports Med*, 44(6): 763–775, 2014.
- 54) Swain DP. A model for optimizing cycling performance by varying power on hills and in wind. *Med Sci Sports Exerc*, 29(8): 1104–1108, 1997.
- 55) 高井和夫. 長距離走者のペース再生における認知的方略. *体育学研究*, 41(2): 104–114, 1996.
- 56) Thiel C, Foster C, Banzer W, De Koning J. Pacing in Olympic track races: Competitive tactics versus best performance strategy. *J Sports Sci*, 30(11): 1107–1115, 2012.
- 57) Tucker R. The anticipatory regulation of performance: The physiological basis for pacing strategies and the development of a perception-based model for exercise performance. *Br J Sports Med*, 43(6): 392–400, 2009.
- 58) Tucker R, Marle T, Lambert EV, Noakes TD. The rate of heat storage mediates an anticipatory reduction in exercise intensity during cycling at a fixed rating of perceived exertion. *J Physiol*, 574(3): 905–915, 2006.
- 59) Vleck VE, Bentley DJ, Millet GP, Bürgi A. Pacing during an elite Olympic distance triathlon: Comparison between male and female competitors. *J Sci Med Sport*, 11(4): 424–432, 2008.
- 60) Williams EL, Jones HS, Sparks SA, Midgley AW, Marchant DC, Bridge CA, McNaughton LR. Altered psychological responses to different magnitudes of deception during cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 47(11): 2423–2430, 2015.
- 61) 山田憲政. 運動情報を伝達するための運動記述法. *北海道大学大学院教育学研究科紀要*, 98: 89–102, 2006.