

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 4 日現在

機関番号：14701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2008～2011

課題番号：21651013

研究課題名（和文） 自転車の潜在的な移動可能性評価に関する研究

研究課題名（英文） Study on Evaluation Method of the Mobility by Bicycle

研究代表者

山本 秀一（YAMAMOTO SYUITI）

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：30243372

研究成果の概要（和文）：

長距離サイクリングにおける自転車の最適走行計画に関する 2 つの数学モデルを比較検討した。検討するのは、疲労度最小化走行計画モデルと、出力最小化走行計画モデルである。いずれものモデルとも、自転車の乗り手の属性、自転車の種類、道路勾配を考慮して、目的を最適化する走行計画を選択する。理論分析と数値シミュレーションによって、2 つのモデルと最適走行計画の分析を行った。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of this study is to examine the two mathematical models for optimal riding plan on bicycle. Both models include three characteristics: rider's power, bike type, and slope, and under a target time constraint, rider chooses the riding plan to optimize his/her objective function. One is the model to minimize his/her exhausting level. The other is our new model to minimize his/her power level. Theoretical analysis and simulating some numerical examples on computer show the properties of both optimal riding plans.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	500,000	0	500,000
2010 年度	200,000	0	200,000
2011 年度	300,000	90,000	390,000
総計	1,000,000	90,000	1,090,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学，環境影響評価・環境政策

キーワード：モデル化，自転車，最適化

1. 研究開始当初の背景

我が国の自転車利用をめぐっては、2 つの要因によってその潜在的な力を発揮することが困難な状況にある。1 つは自転車専用道や走行レーン整備の遅れである。もう 1 つは、自転車が本来持っている移動手段としての性能、すなわち、移動可能性 (mobility) に対して日本の社会一般が持っている誤解である。

その一方で、環境や健康への関心の高まりなどから、自転車が注目を集めている。(財)自転車産業振興協会の国内販売動向調査によれば、1 店舗あたりの年間販売台数は、2002 年度以降、200 台程度で横ばいである。年度ごとの車種別の販売比率をみると、スポーツ車が 2002 年度で 2.0% にすぎなかったものが、2010 年度では 11.2% まで増加している。比率的には 1 割程度に過ぎないが、近年、急速

に販売台数を伸ばしつつある。

スポーツ車は、軽快車などと比較して高速巡行が可能で、サイクリングなどの長距離走行に適した車種である。したがって、スポーツ車の販売台数の増加は、自転車を単なる移動手段として利用するのではなく、スポーツやレジャーに利用する人たちが増加していることを伺わせる。

このような流れを受けて、長距離サイクリングイベントを、健康促進やレジャーとしてだけでなく、環境や地域を見つめ直す機会としてとらえて実施している事例が見られるようになってきている。

2. 研究の目的

自転車は、動力源が人間の力であるため、走行ペース配分を間違えると、予定していたコースを完走できなかつたり、ただただ肉体的につらいだけのものとなってしまうかねない。そのような経験が重なれば、いずれ、自転車から離れてしまうかも知れない。長距離サイクリングでは、コースの情報だけでなく、乗り手の人間が、その体をどのようにうまく活用するかについてのノウハウも重要なポイントとなる。

サイクリングは、競技から、自宅近辺を自転車で散歩する（ポタリングという）ことまで、幅広いレンジを対象としている。しかしながら、近年スポーツバイクに乗り始め、サイクリングブームの底辺を支えるのは、競技よりも、健康促進やレジャーを主目的にしたサイクリストである（ここには、レジャーや健康促進にウェイトを置いたレースイベントも含まれる）。彼ら、彼女らにとって、長距離サイクリングを無理なく完走することが最大の目的となるだろう。

どうすれば、無理なく完走できるか。具体的な数値情報として、どのようなペース配分で走行すればよいのかを求め、それによって、自転車利用促進を目指した情報発信の基礎的な部分に貢献することが、本研究の目的である。

3. 研究の方法

本研究では、長距離サイクリングを計画しているサイクリストが直面する課題を、数学的に表現する。すなわち、自転車の走行状態や、サイクリストの意思決定過程を数学的なモデルとして表現する。

自転車の走行状態とは、乗り手が出す出力とそれに対応する走行速度の関係である。この関係は、風向きや強さ、道路勾配の変化、自転車の車重などによって影響を受ける。これは、基本的には物理法則に従うものであるため、運動方程式を用いて、数学的に表現することができる。

サイクリストの意思決定とは、本研究では、

走行ペース配分をどのように決めればよいかを指している。望ましい走行計画を、最適走行計画という。その内容は、何を「最適にするか」という基準によって、異なると考えられる。ある基準を設定し、所定の制約条件の下で、最適な解を見つける数学的な技法を、数理計画法という。本研究では、数理計画法を用いて、サイクリストの意思決定過程を数学的に表現（数学モデルという）する。サイクリングコースが与えられたときに、そのコースをどのようなペース配分で走行すれば無理なく走行できるかという課題を、条件付き最大化問題としてとらえるのである。

数学モデルは、解析的な方法とコンピュータによるシミュレーション計算によって、モデルの構造と最適走行計画の性質を分析した。

4. 研究成果

本研究のモデルでは、対象とするサイクリングコースを、勾配（登り、下り、平坦）によっていくつかの区間に分割する。コースの属性は、各区間の距離と勾配のみに単純化して捉える。次に、コースを完走する目標時間を設定する。そして、各区間の平均速度を変数として、目標時間の制約下で、走行に必要な平均出力を最小にするペース配分（各区間の平均速度）を計算する数学モデルを構築した。また、過去の研究で開発した、前提条件は同じで走行時の疲労度を最小にすることを基準としてペース配分を計算するモデルとの比較検討を行った。

2つのモデルから導かれる最適解は、次のような性質を持つことがわかった。

前者のモデルでは、上り坂の区間はできるだけがんばって走行し、そこで稼いだタイムを利用して平坦区間での速度を抑え気味に走行することが、コース完走に必要な出力を最小にする走行計画であることがわかった。そのための数学的な条件は、全ての区間で平均速度を同一にすることを要求する。

この条件は、物理学的には正当化されるが、生理学的には正当化されない。まず、物理学的に正当化されることを説明する。コース全体の平均出力のうち、登坂に伴う重力抵抗と転がり抵抗に対する部分は、走行速度に依存しない。なぜなら、どんな走り方をしようとも、完走するために必要な仕事量は同じであるからである。走り方によって変化するのは空気抵抗に対する仕事量のみである。よって、平均出力を最小にする＝仕事を最小にする問題は、「空気抵抗を最小にするのはどんな走り方か？」という問題に集約されることになる。

空気抵抗は速度の2乗に比例するので、空気抵抗を少なくするには、目標時間制約を満たす範囲で、できるだけ速度を低く抑えるこ

とである。それには、各区間の速度を、目標時間制約をちょうど満たす値に均等化すればよいのである。これが最適解の意味することであり、物理学的に正当化される。

しかしながら、この条件を現実満たすことは、生理学的に困難である。この条件は、区間の勾配に関係なく同一の速度を維持することを要求する。自転車で、登り坂の区間を平坦区間の速度と同じ速度で走るとは困難である。また、平坦区間を登り坂と同じ速度で走るのは、遅すぎることに、現実にはあり得ないだろう。

したがって、実際の多くの場合には、登り坂では出力制約の上限にあたる速度にならざるを得ない。そして、この値は、ほとんどの場合、平坦区間の最適平均速度よりも遅くなる。

以上より、出力最小化モデルから導かれる最適走行計画を、分かりやすく述べるならば次のようになるだろう。すなわち、「登り坂では持続可能な出力レベルの上限を維持して走行し、そこで稼いだタイムを活用して、平坦区間の速度を抑えて走行する」ということである。それが、物理学的には最も効率のよい走り方なのである。

後者の疲労度最小化モデルでは、反対に、上り坂は抑え気味に、平坦区間でがんばって走行するというペース配分が最適となる。これは、乗り手が出す出力と疲労度が、直線的な比例関係ではなく、曲線になるからである。具体的には、出力の増加に伴って疲労度の増加率が増加する、べき乗関数のかたちをとる。

数値計算によって、両モデルの考察をさらに進めた。比較を容易にするため、数値計算を行うコースは、次のような単純な設定とした。数値計算を行うコースは、全体で2つの区間に分割される。内訳は、第1区間＝平坦区間（距離：30km、勾配：0%）、第2区間＝登り区間（距離：5km、勾配：5%）である。目標時間制約は、コース全体の平均速度が20km/hになるように設定した。コースの総距離は35kmなので、1時間45分となる。当然ながら、目標時間を厳しくすれば、両者の解の差異は小さくなる。ここでの設定は、現実的に走行可能な解が得られること、両モデルの出力する走行計画を比較検討するために特徴的な差異が現れるようにしたものである。また、出力の上限は最大出力の75%に設定している。数値計算の結果を表1にまとめた。

以下に、走行ペース配分、出力、疲労度のそれぞれについて検討した。

まず、走行ペース配分についての比較検討を行った。平坦区間では、出力最小化走行計画で20.6km/h、疲労度最小化走行計画で23.6km/hとなった。登り区間では、それぞれ、

17.1km/h、10.5km/hである。また、出力最小化走行計画の登り区間の運動強度は0.75となり、出力制約の上限にあたる端点解となっていることが分かる。さらに、疲労度最小化走行計画と比較して、登り坂で稼いだタイムで平坦区間の速度を押さえていることも分かる。

一方、疲労度最小化走行計画は、登り坂のスピードを抑え、その分を平坦区間で取り返していることがわかる。両者の走行ペース配分は対照的である。

次に、出力の比較検討を行った。全区間でみた出力は、出力最小化走行計画の方が9.1W少なく、効率的である。平坦区間における両走行計画の速度差は3.0km/hにすぎないが、出力の差は25.2Wであり、空気抵抗の影響の大きさがよく分かる。また、登り区間における両走行計画の出力差は91.4Wであり、走行時間の差は11分4秒である。登り区間における両走行計画の差異は、91.4W大きな出力を出して11分4秒早く坂道から解放されるか、91.4W低い出力で11分4秒長くゆっくりと坂を登るかということである。なお、全区間完走時の消費カロリーは、出力最小化走行計画の方が約55kcal少ない。

さらに、疲労度についての比較検討を行った。数値計算結果は、出力最小化走行計画の登り区間での疲労度がかなり大きいことを示している。平坦区間の疲労度は、出力最小化走行計画の方が小さいが、登り区間の走行ペースの影響で、全区間でも出力最小化走行計画の方が疲労度は大きい。

表1 数値計算結果

<出力最小化モデル>

区間	速度 (km/h)	時間 (h. m. s)	出力 (W)	疲労度	運動強度
平坦	20.6	1.27.29	62.1	0.025	0.222
登り	17.1	17.31	210.0	0.311	0.750
全区間	20.0	1.45.00	86.8	0.336	-

<疲労度最小化モデル>

区間	速度 (km/h)	時間 (h. m. s)	出力 (W)	疲労度	運動強度
平坦	23.6	1.16.25	87.3	0.070	0.312
登り	10.5	28.35	118.6	0.073	0.424
全区間	20.0	1.45.00	95.9	0.143	-

以上の検討をもとに、両モデルの適用について考察した。

疲労度最小化モデルは、ある区間の疲労度は他の区間の疲労度に影響を与えないと仮定されている。区間の疲労度が独立であるという仮定は、持続的な走行が困難になる程には疲労は蓄積しないことを意味する。よって、

実際の適用に当たっては、出力の上限値を、運動によって生成される乳酸を分解しながら運動を持続させることが可能な水準に設定することが重要である。あるいは、目標時間制約を、そのような水準の運動強度で達成できるような余裕を持った値に設定することである。そのような設定から計算される走行ペース配分は、サイクリング初心者に適すると思われる。

一方、出力最小化走行計画は、疲労度最小化走行計画に比べて疲労度を増加させる。これは血中乳酸濃度を上昇させることを意味するが、それと引き替えに、エネルギー消費を抑えることができ、長時間走行でのエネルギー切れのリスクを低くするメリットを得ることができる。上級者ならば、初心者よりも血中乳酸濃度が高くなる強い運動強度を維持することができるだろう。また、エネルギーマネジメントを考慮しなければならないような長時間、長距離走行は初心者よりも上級者が挑戦する割合が高いと思われる。よって、出力最小化計画は、サイクリングの上級者向けであるということができよう。

このように、両モデルから得られる情報は補完的である。そして、いずれも走行の目安としやすい数値的な情報を得られるため、サイクリングを目指す人たちに有益なものとなると考えられる。

本研究の意義は、サイクリストの最適化行動を基礎に据えた自転車走行計画の数学的モデルを構築し、さらに2つのモデルの比較検討を行い、適用における意義や活用の考え方について考察したことである。

今後の課題は、両モデルについて、サイクリストが実走において直面する問題に対する適用性の検証を行うことである。自転車走行に大きな影響を与える風（の向き、強さ）をコントロールすることは困難であるが、風の弱い季節、場所を選べば、実走データによる検証はある程度可能であると思われる。また、経験豊かなサイクリストへのヒアリング調査などの情報を収集し、モデルの検証、改良を行うことも考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

山本秀一, 自転車の最適走行計画に関する数学モデルの比較検討, 環境情報科学論文集, 査読有り, 第25巻, 2011年, 465-470.

[学会発表] (計1件)

山本秀一, 自転車の最適走行計画に関する数学モデルの比較検討, 第25回環境研究発表会, 2011年11月30日, 日本大学会館.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 秀一 (YAMAMOTO SYUITI)
和歌山大学・システム工学部・准教授.
研究者番号: 30243372

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: