

# 脚自転車最大運動時のパフォーマンスに及ぼす 走行勾配感覚の影響

県立広島大学 三浦 朗  
(共同研究者) 同 遠藤(山岡)雅子

## High Intensity Cycling Performance is Influenced by Visual Sensation

by

Akira Miura, Masako Yamaoka Endo  
*Department of Exercise Science and Physiology,  
School of Health Sciences,  
Prefectural University of Hiroshima*

### ABSTRACT

The influence of perceived effort during fatiguing exercise is still not well understood. We therefore evaluated visual sensation of cycling road on performance during high-intensity ergometer exercise. Fourteen young male subjects (aged 20 to 32 years) each performed high-intensity square-wave exercise to exhaustion on an electrically braked cycle ergometer while simultaneously viewing one of three different cycling road animations: control (level) condition, up condition and down condition. The simulated speed was 4 m/s for each visual sensation. Initially, each subject performed a single high-intensity exercise trial (work rate: 100-105 % of peak VO<sub>2</sub>, pedaling rate: 70 rpm) to exhaustion while viewing a level road cycling animation. Each subject performed two more trials with the same work rate protocol, but after reaching 85 % of their control duration time, the level visual sensation was changed to up or down (randomized) until exhaustion. Pulmonary gas exchange and heart rate (HR) were measured continuously. The duration time in control condition was significantly shorter than up and down conditions (control : 175.1 ± 8.7, up :

191.2 ± 10.9, down : 192.2 ± 12.3 s). There was no significant difference between the duration time of the up condition and down condition. Interestingly, some subjects perceived the up condition as easier while others thought it was harder. Therefore, we regrouped our data and compared the duration times of those who perceived the visual sensation as easy versus those who thought it was hard, independent of visual sensation. However, 2 out of 14 subjects who perceived no different visual sensation between up and down conditions, were excluded from the comparison. Duration time of the easy trial was significantly longer than the hard trial (easy trial: 200.8 ± 12.9, hard trial: 186.6 ± 13.6 s, n=12). These results demonstrate that high-intensity cycling performance can be altered by visual sensation input.

## 要 旨

本研究では、走行路面勾配に関する視覚情報の付加が、パフォーマンスに及ぼす影響を検討した。健康な成人男性 14 名 (20 ~ 32 歳) が本実験に参加した。被験者は、一定負荷自転車エルゴメータ運動 (運動強度:  $\dot{V}O_{2max}$  の 100 ~ 105%, ペダリング回転数 70rpm) を、大型スクリーンの道路面走行動画を見ながら疲労困憊まで行った。実験条件は、道路面が終始平坦な動画をみせる control 条件、運動の終盤に平坦から走行角度が徐々に上っていく up 条件、徐々に下がっていく down 条件の 3 種類であった。最初に control 条件を行い、その後日を改めて up 条件と down 条件をランダムに行った。up 条件と down 条件では、control 条件で測定した運動継続時間の 85% の時間経過後、走行面が 4 m/秒で上りあるいは下りに変化する映像を提示した。同時に、ガス交換諸変量、心拍数を測定した。結果として、control 条件に比較して、up 条件と down 条件は、ともに、運動継続時間が有意に延長した。しかしながら、走行勾配感覚提示の違いが最も大きいと想定された up 条件と down 条件を比較したところ、有意な差は認められなかった (control 条件: 175.1 ± 8.7, up 条件: 191.2 ± 10.9, down 条件:

192.2 ± 12.3 秒)。主観的な運動遂行感覚 (相対的に楽に感じるか) が、被験者によって up 条件と down 条件間で異なったため「楽に感じた試行 (E 試行)」と「きつく感じた試行 (H 試行)」に分けて運動継続時間を比較した (ただし、up 条件と down 条件の主観的な運動遂行感覚が同じであった 2 名は除いた)。その結果、E 試行は H 試行に比べて、運動継続時間が有意に延長していた (E 試行: 200.8 ± 12.9, H 試行: 186.6 ± 13.6 秒, n=12)。これらのことから、視覚による走行勾配感覚入力、運動継続時間に影響を及ぼすことが示唆された。

## 緒 言

「最大運動時のパフォーマンスを決定する要因は何か?」という古典的なテーマに対しては、すでにスポーツ科学の多領域から研究がなされている。運動生理学の立場からは、基本的な要因として酸素運搬系 (心臓のポンプ機能等) の最大値の重要性が指摘されている。一方、生化学の立場では、末梢の活動筋内でのイベント (pH の低下等) が規定するという立場をとるが、いずれにせよ、活動筋や心臓といった生体内部からの各種の求心性情報に基づくフィードバック的な調節機構の働きが、パフォーマンスを規定

すると理解されている<sup>1)</sup>

それに対して、近年、Noakesら<sup>2,3,4,5)</sup>のグループは、「限界に近い最大運動を行う際、それ以上の負担を強いることで、生体内の心臓や筋が致命的なダメージを受けることを防ぐ機構が中枢に備わっていて、大脳からの意図的な指令により運動が停止する、という仮説 (central governor theory)」を提唱している。彼らは、この「防御機構」とは、運動時に生じる心臓や活動筋等からの求心性情報だけでなく、視覚や聴覚など、あらゆる入力情報を中枢で統合し、「要求されている運動の強さ」と比較することで、そこで生じる「努力達成感の知覚」に基づいて作動するという仮説を立てている。もし、彼らの仮説が正しいとすれば、この努力達成感に何らかの感覚情報を人為的に付加することで、「低下」あるいは「増加」させれば、結果として運動遂行能力は左右される可能性がある。

また、被験者に100 Wの一定負荷強度の自転車エルゴメータ運動をおこなわせ、同時に「楽である」「ふつう」「きつい」という暗示を催眠によって与えたところ、暗示を与えなかった場合に比べて、主観的な運動強度が暗示と並行する形で差異が生じたことが報告されている<sup>6)</sup>。さらに、「きつい」と暗示をかけられた被験者グループの心拍数は、与えなかったグループに比べて平均で毎分15拍高く、換気量も運動開始5分のデータが毎分15 L多くなっていた。このことから、運動強度に関する主観的な感覚は、生理応答を変化させ、そのことにより、運動パフォーマンスに変化を生じさせる可能性をうかがわせる。

そこで、本研究では、前述のcentral governor theory 仮説を確かめるために、主観的な運動遂行感覚を変化させるような、走行路面勾配に関する視覚情報の人為的な付加を行い、運動パフォーマンスに及ぼす影響が生じるかどうかを検討した。具体的には、2-3分程度の短時間で疲労困憊

に至る最大自転車こぎ運動を被験者に課し、大画面の動画によって走行路面勾配感覚（上り坂・下り坂）を人為的に変動させた際、運動パフォーマンス（運動継続時間）に影響があるか否かを検討した。

## 1. 研究方法

### 1.1 被験者

健康な成人男性14名が被験者として本実験に参加した。その年齢、身長、体重は、それぞれ $22 \pm 4.0$ 歳、 $172.5 \pm 6.6$  cm、 $62.6 \pm 5.0$  kgであった。自転車エルゴメータを用いた、ランプ負荷運動試験で得られた被験者のpeak  $\dot{V}O_2$ の平均値は、 $48.3 \pm 6.3$  ml/kg/minであり、特に運動習慣・トレーニング歴といった高い身体活動性を有した被験者はいなかった。すべての被験者は実験の目的、方法および危険性について十分な説明を受けた。彼らは実験を途中で辞退できることを周知され理解した上で、実験に参加することに承諾し同意書に署名した。

### 1.2 実験プロトコール

#### 運動負荷試験

本実験の運動負荷を決定するために、前もって本実験とは別の日に、各被験者は電磁ブレーキ式の脚自転車エルゴメータ (232CXL, コンビ社製) を用いて、ランプ負荷運動試験を行い、peak  $\dot{V}O_2$  を求めた。プロトコールは、2分間の安静の後、20 Wで4分間のウォームアップを行い、その後漸増率20W/minの漸増負荷運動を開始し、被験者が疲労困憊に至るまで運動を行った。その結果から、本実験のために、ほぼ2-3分で疲労困憊になると想定される運動強度 (peak  $\dot{V}O_2$  の100 ~ 105%) を決定した<sup>7)</sup>。

#### 本実験のプロトコール

control 条件：被験者は、2分間の安静の後、脚

自転車エルゴメータを用いて、20 Wで4分間のウォームアップを行い、その後、眼前に設置されたスクリーンに映し出される道路面が始終水平なサイクリングロードの映像（勾配0度の水平走行）を見ながら、peak  $\dot{V}O_2$ の100～105%の強度の一定負荷脚自転車エルゴメータ運動を行った。被験者は、運動中の自転車エルゴメータの回転数をメトロノームに合わせて、70 rpmを目標に回転数を維持するように指示された。運動終了は自転車エルゴメータの回転数が70rpmを維持できず急速に低下し50 rpmを下回った時点と定義した。

up条件とdown条件：被験者は、2分間の安静の後、20 Wで4分間のウォームアップを行い、その後道路面走行映像を見ながら、control条件と同じ強度の一定負荷脚自転車エルゴメータ運動を行った。運動開始後、最初はコントロール条件と同じ映像が映写された。その後、control条件の運動継続時間の85%に相当する継続時間を過ぎた時点で、目の前のサイクリングロード

映像は、4 m/秒で徐々に勾配が変化する上り坂（up条件）かあるいは下り坂（down条件）の坂道に変化する映像が映写された。運動終了はcontrol条件と同じ方法で決定した。なお、最初にcontrol条件を行い、その後にup条件あるいはdown条件の2条件を、少なくとも3日以上は空けた別々な日にランダムな順序で行った（図1）。

実験は薄暗くした部屋（約10ルクス程度）で行われ、映像は被験者前方のスクリーンに映写された。そして、被験者は映像に集中するよう指示された。スクリーンでの映像の画面は230 cm×170 cmの大きさで、床から80cmの位置に設置した。自転車エルゴメータに乗った被験者の目の位置の高さは約165cmの高さで、スクリーンから約250 cmの距離で設定した。

### 1.3 測定項目

control条件、up条件、down条件の全ての試行におけるプロトコール中を通して、心拍数

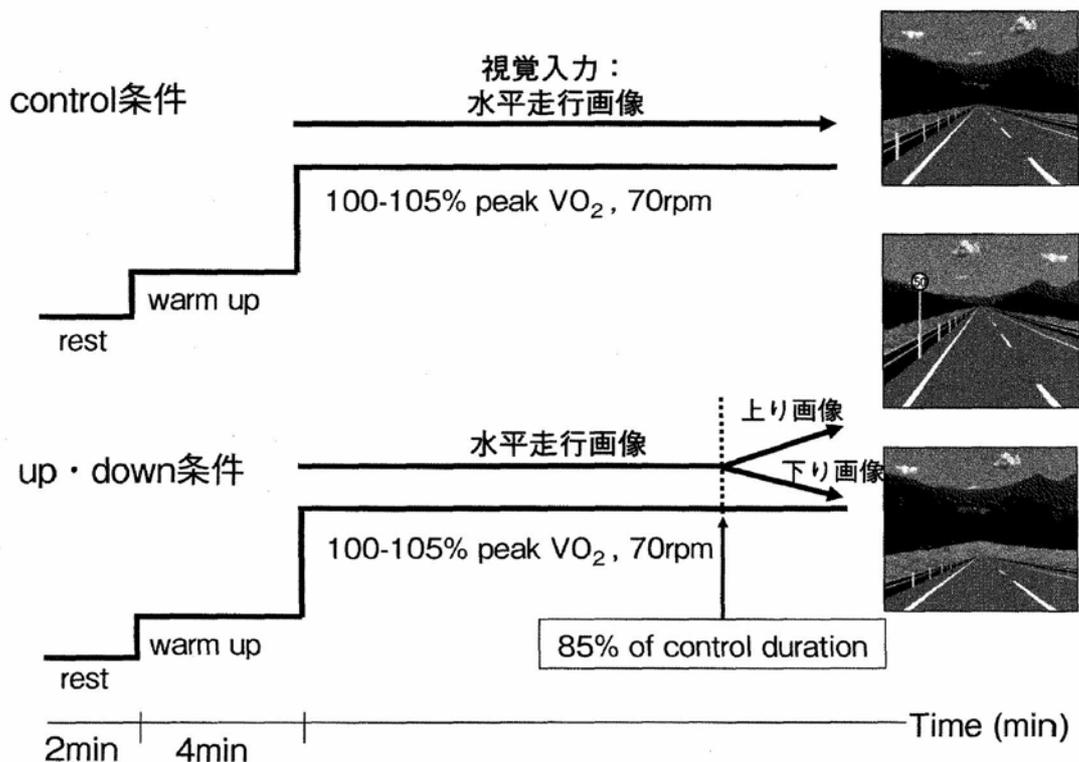


図1 実験のプロトコール

(HR) を、心電計 (BP88S, COLIN) を用いて胸部双極誘導法により測定した。また、ガス交換諸変量 ( $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ ,  $\dot{V}E$ ) は、beat-by-beat モードでエアロモニタ (AE-300S, MINATO) を用いて測定した。

また、条件間における主観的運動遂行感覚の違いを尋ねる問診を、各被験者が、3 回目の運動試行を終えた直後に行った。3 回目の運動として上り坂 (up 条件) あるいは下り坂 (down 条件) の坂道映像を運動終盤に提示された際、2 回目の逆の映像提示時の感覚と比較して、画面の坂道勾配の変化によって、相対的に「きつく感じた」、  
「楽に感じた」、あるいは「何も差を感じなかった」かについて質問した。

#### 1. 4 統計処理

各測定項目は、平均値と標準誤差 (S.E.M.) で示した。各平均値の差は、一元配置の分散分析の後、有意差が認められたものについては、対応のある t-test を行った。(SPSS for Windows, Ver. 12). 統計的有意水準は 5% とした。

## 2. 結果

### 運動継続時間

図 2 に control 条件, up 条件, down 条件の運動継続時間を示した。control 条件に比較して、up 条件と down 条件は、ともに、運動継続時間が有意に延長した。しかしながら、走行勾配感覚提示の違いが最も大きいと想定された up 条件と down 条件を比較したところ、有意な差は見られなかった (control 条件:  $175.1 \pm 8.7$ , up 条件:  $191.2 \pm 10.9$ , down 条件:  $192.2 \pm 12.3$  秒)。

up 条件と down 条件の運動継続時間の間に差異が認められなかったため、両試行の運動終了直後の主観的な運動遂行感覚についてみてみると、たとえば、「坂が下る映像によって楽に感じた。」という被験者と「映像は下り坂なのにペダ

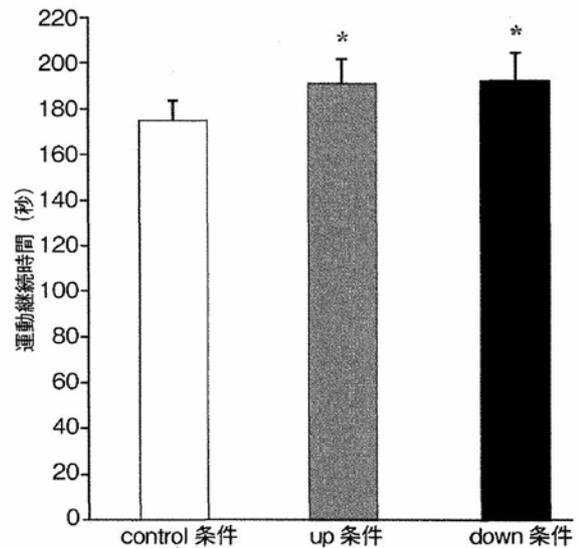


図2 control 条件, up 条件, down 条件の運動継続時間  
\*:control 条件との有意差 (p<0.05)

ルが軽くならないので、きつく感じた。」という被験者が存在し、視覚的に「楽に感じる」と予想される下り坂映像の提示が、必ずしも「楽に感じる」とは限らないことがわかった。その内訳は、down 条件を楽と感じた被験者が 8 名、up 条件を楽と感じた被験者が 4 名で、どちらも言えないが 2 名であった。

そこで両条件の結果を、楽に感じた試行 (E 試行) ときつく感じた試行 (H 試行) に分け直して、どちらも言えないと答えた被験者のデータをのぞいて運動継続時間を比較したところ、いずれの被験者においても、E 試行のほうが H 試行よりも継続時間が延長しており、両者の間に有意な差が認められた (E 試行:  $200.8 \pm 12.9$ , H 試行:  $186.6.2 \pm 13.6$  秒, 図 3)。

### 生体応答の解析

図 4 に、ガス交換諸量と HR のウォーミングアップから疲労困憊までの経時変化の典型例を示した。この被験者の E 試行と H 試行を比較すると、 $\dot{V}O_2$  動態に着目すると、運動終了時の到達  $\dot{V}O_2$  はほぼ同じであるにもかかわらず E 試行においては、運動継続時間の延長に伴い、プラトーの状態が観察された。この傾向は  $\dot{V}CO_2$  や

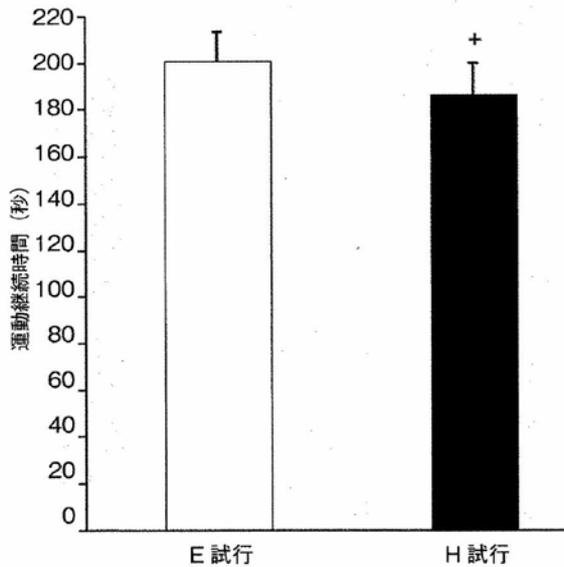


図3 E試行とH試行の運動継続時間  
+;E試行との有意差 (p<0.05)

HRにおいても見られ、特にHRにおいてはレベリングオフの状態が運動継続時間が遅延していた。各被験者のガス交換諸量とHRの運動中の変動は、E試行とH試行においてほぼ似通った経

時変化を示し、運動終了時点でのガス交換諸変量と心拍数のpeak値は、E試行とH試行で比較すると、 $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ ,  $\dot{V}E$ , HRともに有意な差は見られなかった(表1)。

表1 E試行とH試行における peak  $\dot{V}O_2$ , peak  $\dot{V}CO_2$ , peak  $\dot{V}E$ , peak HR

	E試行	H試行
peak $\dot{V}O_2$ (ml/min)	3074 ± 129.1	3129 ± 126.0
peak $\dot{V}CO_2$ (ml/min)	3992 ± 150.8	4060 ± 140.2
peak $\dot{V}E$ (l/min)	123.1 ± 6.40	126.0 ± 4.82
peak HR (beats/min)	177 ± 2.5	173 ± 2.2

peak  $\dot{V}O_2$ , peak  $\dot{V}CO_2$ , peak  $\dot{V}E$ , peak HR は、最高到達値の前後3箇所(10秒値)の平均値

#### 4. 考察

本研究では視覚的な走行坂道勾配感覚入力が、運動パフォーマンスの指標である運動継続時間と、生理的な応答であるガス交換諸変量( $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ ,  $\dot{V}E$ )、心拍数に影響が生じるか否かを検討した。

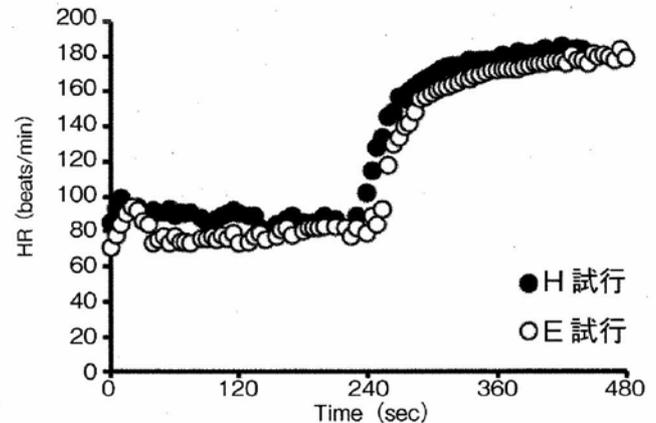
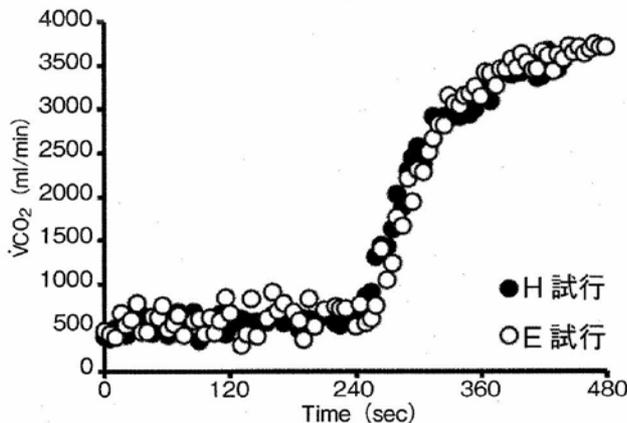
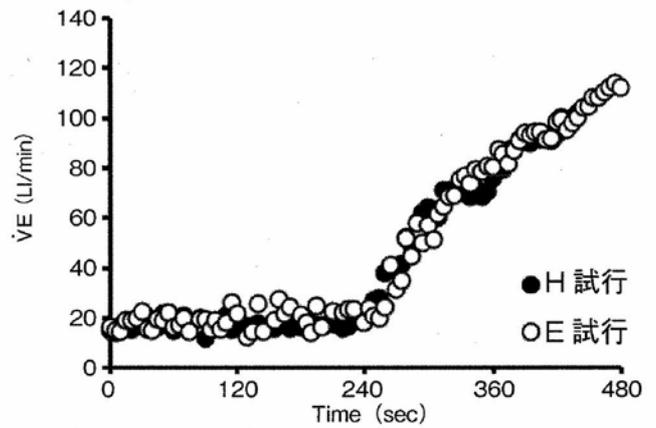
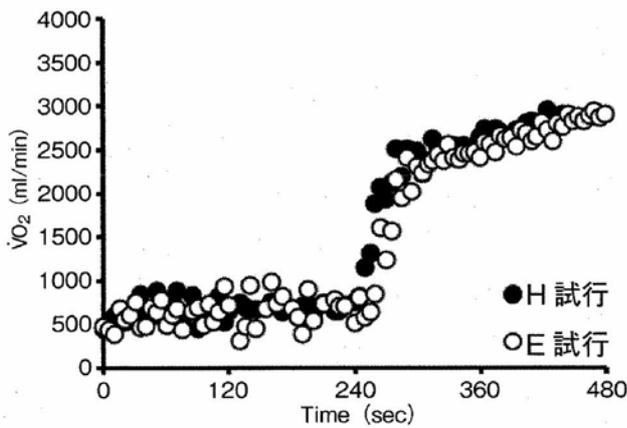


図4 ガス交換諸量 ( $\dot{V}O_2$ ,  $\dot{V}CO_2$ ,  $\dot{V}E$ ) とHRのウォーミングアップから疲労困憊までの経時変化の典型例

結果として、control条件に比較して、up条件とdown条件ともに、運動継続時間が有意に延長した。しかしながら、走行勾配感覚提示の違いが最も大きいと想定されたup条件とdown条件を比較したところ、有意な差は認められなかった。

このことに関して、興味深いことに、主観的な運動遂行感覚（相対的に楽に感じたか、きつく感じたか）は、被験者によって異なっており、例えば、同じdown条件を与えた場合では「坂が下る映像によって楽に感じた。」という被験者と「映像は下り坂なのにペダルが軽くなるので、きつく感じた。」という被験者がいた。前者は、下り坂は、ペダルが軽くなり楽になるという日常的に体験する感覚から楽に感じ、後者はペダルが軽くなると予想したにもかかわらず、実際の負荷は変化しないという感覚の mismatch から努力達成感に混乱が生じ、結果としてきつく感じたと考えられる。

up・downといった走行勾配感覚入力の違いによる条件ではなく、「楽に感じた試行（E試行）」と「きつく感じた試行（H試行）」という運動遂行感覚の違いによる条件で比較した結果、E試行のほうが有意に運動継続時間の延長が見られたことから、視覚による走行勾配感覚入力を付加したことで生じた主観的な運動遂行感覚の違いにより運動継続時間が変化したことは興味深い。

また、ガス交換諸変量、心拍数に関しては解析の対象とした被験者全員の平均を2試行間で比較した結果、疲労困憊時の値である最高到達値に差がなく、どちらの試行でも疲労困憊時には生体応答はほぼ最大の状態であったと考えられた。

Morganら<sup>6)</sup>は、被験者に、比較的低強度（100 W）の一定負荷の自転車エルゴメータ運動をおこなわせ、同時に「楽である」「ふつう」「きつい」という暗示を催眠によって与えたところ、暗示を与えなかった場合に比べて、主観的な運動強

度が「きつい」と暗示を与えた場合は高くなり、それと同時に、心拍数や換気量も高くなったことを報告している。この結果は、運動強度に関する主観的な感覚が、生体応答のレベルを左右し得るということを示唆している。我々の研究とこの結果を併せて考えると、運動強度が高い場合には、心的要因が生理的応答に反映されにくいということが示唆されよう。

興味深いことに、down条件を与えた場合では「映像は下り坂なのにペダルが軽くなるからきつく感じた。」という被験者がいた。これはペダルが軽くなると予想したにもかかわらず、実際の負荷は変化しないという感覚の不一致からきつく感じたと考えられる。この場合、気分的には不安要素が強くなっていると推察されるが、そのことによる生理的な影響は見られなかった。このことに関して、Acevedoら<sup>8)</sup>は、75%  $\dot{V}O_{2max}$  の強度でトレッドミルを走行しているランナーに、95%  $\dot{V}O_{2max}$  の強度で走行しているシビアな状態のランナーの走行映像を見せて、「この後、ビデオにランナーと同じ95%  $\dot{V}O_{2max}$  の強度に上げる」と予告し、その時のRPE, HR,  $\dot{V}E$ ,  $\dot{V}E/\dot{V}O_2$  を評価するという興味深い研究を行っている。結果として、気分（state anxiety）が有意に変化したが、RPE, HR,  $\dot{V}E$ ,  $\dot{V}E/\dot{V}O_2$  はコントロール条件（75%  $\dot{V}O_{2max}$  の強度でトレッドミルを走行しているランナーの映像を見せた場合）と差が無かったと報告している。このことは、不安感を与えたとしても、生理的な反応、すなわち、呼吸循環器系に何らの影響も与えないということを意味し、我々と同様の結果を示している。この研究の被験者が、高度にトレーニングされた持久性競技選手であったことから、「生理的にタフ」であれば、心理的にもタフであるということも考えられよう。飯塚は<sup>9)</sup>、「現実には心理状態と生理的状态との関係は一方方向性のものでなく、相互に影響しあうものだ

と考えられる。(中略)その結果生じた生理的な亢進が、心理面を変えることも十分考えられる」と指摘している。このことを逆に考えれば、生理的な減弱、すなわち体力の低下や疲労が、心理的なタフネスを低下させることを意味しており、上記の結果と併せて、パフォーマンスの向上には、生理、心理両面からのトレーニングが相互的にパフォーマンスを向上させるということ強く認識させる。

本研究の特徴は、従来いわれてきた、最大運動時のパフォーマンスは「末梢からの求心性情報に基づくフィードバック的な調節機構の働き」が規定する、という考え方から一歩踏み出して、より高次の脳の中核において、あらゆる情報を統合した認識に従って遠心性出力が決まるトップダウン的な制御メカニズムによって規定される、という新たな仮説 (central governor theory) の検証を試みたことである。視覚入力による主観的な運動遂行感覚の違いが、「努力達成感の知覚」を増減させ、最大運動時のパフォーマンスに影響を及ぼしたことは、上記の仮説を支持する結果であったと考えられる。

スポーツの新記録が生み出される背景には、選手の技術、体力、精神力、戦術が充実していなければならないことは言うまでもない。それに加えて、最終的な競技成績には、競技場での心理的状态や、競技場の物理的環境が強く影響している。本研究では、最大運動時のパフォーマンスが、視覚入力による「努力達成感の知覚」の増減によって変化することが明らかとなった。実際の運動時には、視覚のみならず、聴覚、固有感覚とよばれる身体各部の位置や動きに対するさまざまな感覚情報が利用されている<sup>10)</sup>。これらの感覚入力がパフォーマンスに影響を及ぼしていることも予想され、今後、さらなる研究が必要である。

## 謝 辞

稿を終えるにあたり、本研究に対して助成をいただいた、公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に篤く御礼を申し上げます。本研究を遂行するにあたり、県立広島大学・福場良之先生には多くのご助言とご指導を賜りました。また、本研究室の川染あかね氏の多大なる貢献によって本研究は実施することができました。ここに記して、心より感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) Rowell L.B.; Human Cardiovascular Control, Oxford Univ Press., Oxford(1993)
- 2) Hampson D.B., Gibson A.S.C., Lambert M.I. and Noakes T.D.; The Influence of Sensory Cues on the Perception of Exertion During Exercise and Central Regulation of Exercise Performance. *Sports Med.*, 31, 935-952 (2001)
- 3) Ansley L., Robson P.J., St. Clair Gibson and Noakes T.D.; Anticipatory pacing strategies during supramaximal exercise lasting longer than 30 s. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36, 309-314 (2004)
- 4) Ansley L., Schabert E., St. Clair Gibson A., Lambert M.I., Noakes T.D.; Regulation of pacing strategies during successive 4-km time trials. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36, 1819-1825 (2004)
- 5) Albertus Y., Tucker R., St. Clair Gibson A., Lambert E.V., Hampson D.B., Noakes T.D.; Effect of distance feedback on pacing strategy and perceived exertion during cycling. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 37, 461-468 (2005)
- 6) Mogan W.P.; Psychogenic factors and exercise metabolism: a review. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 17, 309-316 (1985)
- 7) Miura A., Shiragiku C., Hirotohi Y., Kitano A., Endo M.Y., Barstow T.J., Morton R.H., Fukuba Y.; The effect of prior heavy exercise on the parameters of the power-duration curve for cycle ergometry. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 34:1001-1007 (2009)
- 8) Acevedo E.O., Dziewaltowski D.A., Kubitz K.A., Kraemer R.R.; Effects of a proposed challenge on effort sense and cardiorespiratory responses during

- exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31, 1460-1465 (1999)
- 9) 飯塚太郎(平野裕一, 加賀谷敦子編集); 「心理的要因による生理応答の変化とスポーツパフォーマンス」. トレーニングによるからだの適応, スポーツ生理学トピックス(体育の科学選書), 第3章, 杏林書院, p34-39 (2002)
- 10) 北城圭一; 運動感覚のメカニズム. 体育の科学, 47, 758-763(1997)