

電動アシスト自転車実走行時の アシストオン・オフにおけるひずみ比較

1. 緒言

平成 29 年度の自転車等研究開発普及事業では、当所へ寄せられる相談や、社会的要請のある事象について、技術的側面からデータ収集を簡易的・予備的に行い、速やかに報告を行うことを目的とする。

平成 29 年度第 5 報となる本報告では、電動アシスト自転車の走行時、アシストが作動することで、車体への負荷がどのように変わるのかを比較するため、実走行時の車体各部のひずみ測定を実施した。アシストオン・オフ時の車体への負荷の違いについては、これまでに国内で公表されている測定結果や測定事例がなく、平成 29 年 1 月に改正した JIS D 9115 : 2017 (電動アシスト自転車) においても、電動アシスト自転車特有の強度関連の試験項目の必要性について、駆動補助装置単品の疲労試験以外に具体的な規定を策定するに至らなかった。また現在日本が主導し進めている電動アシスト自転車の ISO 規格化に際しても、走行時にアシストが作動することで、どのような差が生じるのか議論が交わされており、例えば日本国内では電動アシスト自転車扱いにはならない高出力タイプのものについては、疲労試験などの試験力を大きくするあるいは試験回数を増やす必要性が指摘されている。

それらの懸念事項に対し、本報告では、現在日本で販売されている代表的な電動アシスト自転車を用い、実走行時にどのような結果が得られるか、予備的なデータ収集を行うこととした。

2. 供試品、使用機材及び測定方法

2.1 供試品

任意の電動アシスト自転車 1 台を用い、測定を行った。車輪径は 26 インチのモータ・人力別軸チェーン合力一体式、いわゆるセンターモータ駆動方式であり、シティ車タイプ (U 形) のものである。

2.2 使用機材

ひずみ測定には(株)東京測器研究所製のマルチレコーダ TMR-200 (TMR-211+221+281) を用いた。マルチレコーダの重量は約 3 kg である。ひずみゲージは(株)共和電業製の KFR 箔ひ

ひずみゲージ（120 Ω、単軸）を用い、測定は1ゲージ法で行った。ひずみゲージは図1に示す7カ所に貼り付けた。また、自転車の前後方向の加速度を測定するため、前ハブ部に加速度計を取り付けた。

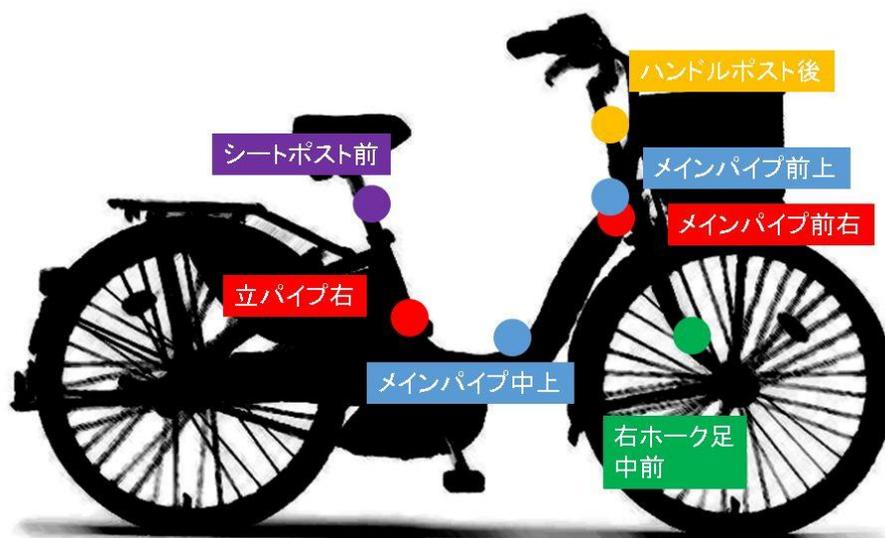


図1 ひずみゲージ貼付箇所

また、実走行時のペダリングに関するデータを取得するため、Radlabor社製ペダルセンサーを用いてペダル踏力及びクランク角度の測定を行い、得られたデータから、クランク軸入力トルクやケイデンスを計算した。重量はノートPC+レシーバ+自転車への取り付け台で約3kg、左右のペダルセンサーで約0.5kgである。機材の取り付けの様子を図2に示す。

測定周波数はひずみ測定、ペダリング測定ともに100Hzとした。なお、ひずみ測定及びペダリング測定については独立したシステムのため、データの同期は行っていない。

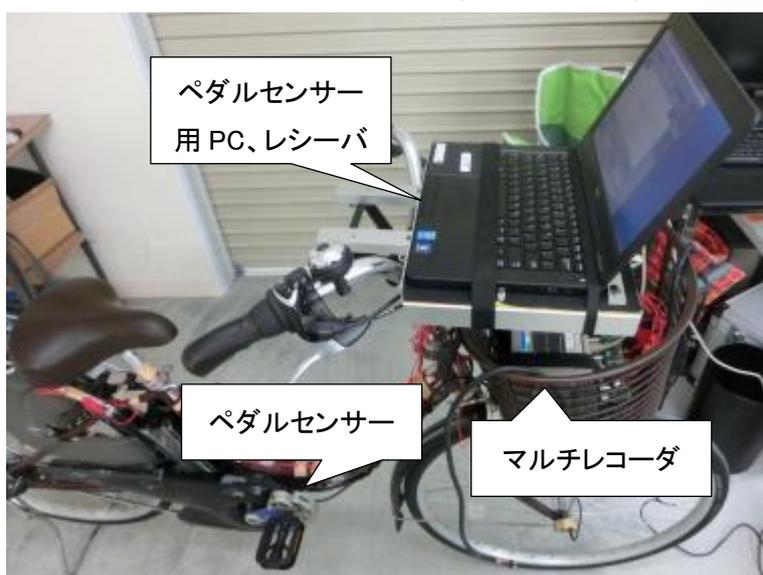


図2 測定機材取り付けの様子

2.3 測定方法

走行路面や走行状況については、アシスト制御がよく作動すると思われる 3 パターンの走行条件とした。なお、アシストオン時は、アシスト力が最も大きくなるモードで走行した。乗員は身長 170 cm、着衣時の体重 68 kg の成人男性で、乗車姿勢については極力座り漕ぎでのペダリングを意識する以外は、特に何も意識しない通常使用の状態で行った。

各走行条件の詳細について、以下まとめた。

走行条件①：発進・定常走行時

写真 1 に示す当所内の直線路にて、変速位置が最高段の状態

停止⇒発進⇒5 m で 15 km/h を目標に加速⇒約 25 m 定常走行⇒停止の走行を行った。図 3 に走行パターンをグラフ化したものを示す。



写真 1 走行条件①の走行路面（当所内直線路）

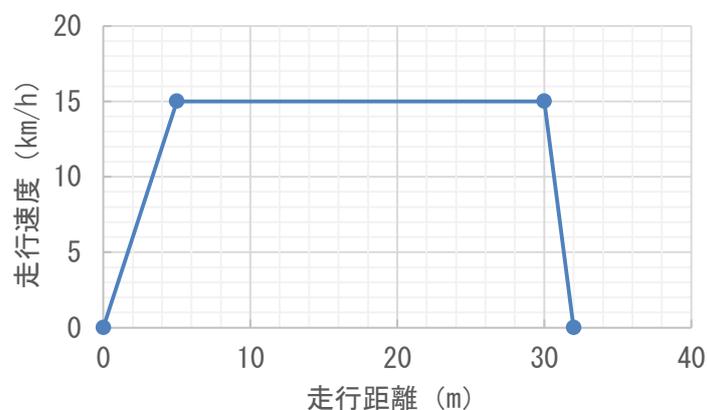


図 3 走行条件①の走行パターン

走行条件②：ゆるい勾配登坂を含む一般公道走行時

写真 2 に示す 2°程度の勾配を含む一般公道を、変速位置が最高段の状態目標走行速度 15 km/h で走行した。走行路を図 4 に示す。なお公道走行であるため、ブレーキや加減速は交通状況に応じて任意に行った。約 120 秒で 461 m を走行した（平均時速 14 km/h 程度）。



写真 2 走行条件②の走行路面の一部（勾配約 2° の箇所）



図 4 走行条件②の走行路（YAHOO! JAPAN、当所周辺の地図データ）

走行条件③：急勾配登坂時

写真 3 に示す当所内の直線路・傾斜路にて、変速位置が最低段の状態
停止⇒発進⇒5 m で 10 km/h を目標に加速⇒10 m 定常走行⇒15 °勾配を約 10 m 走行⇒停
止
の走行を実施した。図 5 に走行パターンをグラフ化したものを示す。



写真 3 走行条件③の走行路面（当所内直線路及び傾斜路）

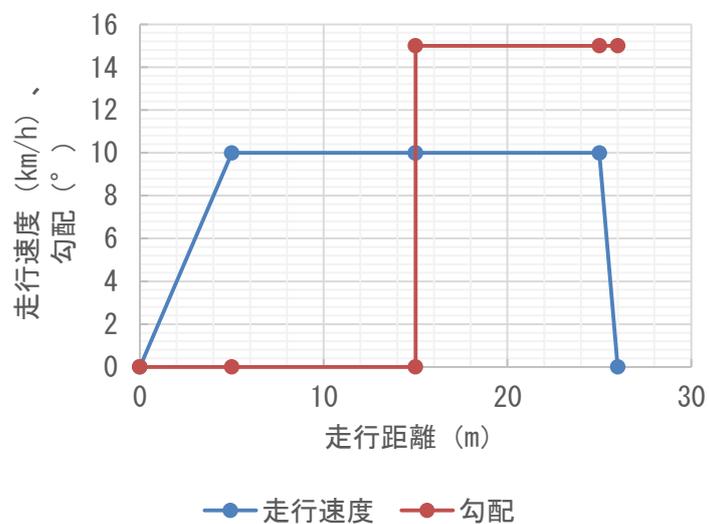


図 5 走行条件③の走行パターン

3. 測定結果及び考察

3.1 ペダルセンサーから得られたデータ

3.1.1 走行条件①：発進・定常走行時

まず、アシストオン・オフでペダリングにどのような影響が生じたかを、クランク軸入力トルクの波形およびケイデンスで比較した。走行条件①を走行中にペダルセンサーで測定・計算したクランク軸入力トルクの時間変化の様子を図 6 に、ケイデンスの時間変化の様子を図 7 に示す。

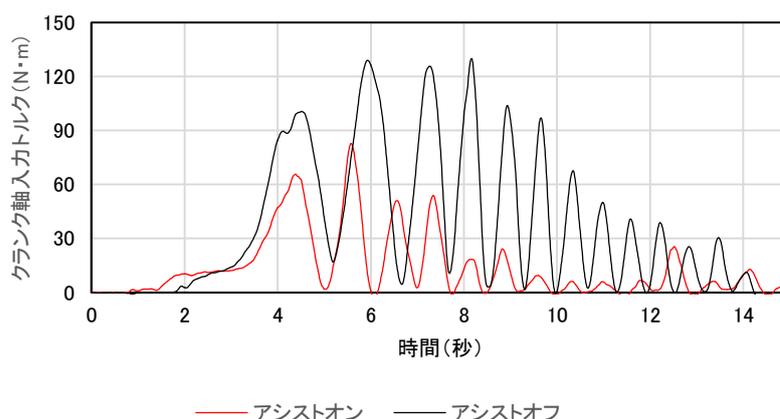


図 6 走行条件①走行時のクランク軸入力トルクの比較

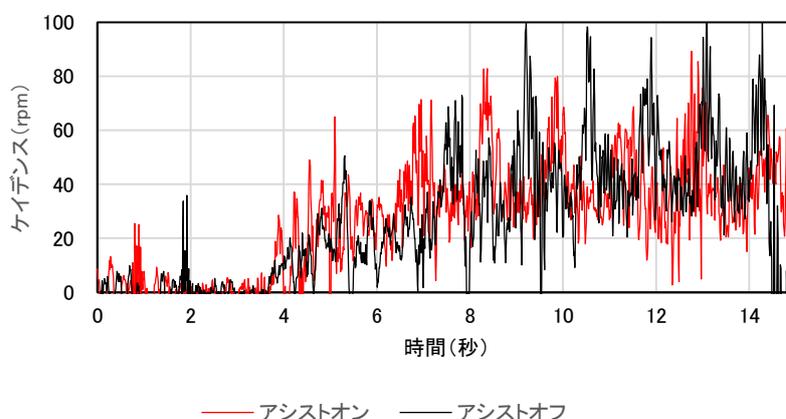


図 7 走行条件①走行時のケイデンスの比較

図 6 より、アシスト作動時にクランク軸入力トルクが小さくなることがわかった。楽にペダリングができるようになるのが、電動アシスト自転車の最大の特徴であるため、当然の結果ではあるが、漕ぎ出しの際、アシストオフ時に最大 $130 \text{ N} \cdot \text{m}$ 程度必要なトルクが、アシストオン時は最大 $80 \text{ N} \cdot \text{m}$ 程度となっていた。また、定常走行時もクランク軸入力トルクは小さくなっていた。

一方ケイデンスについては、図 7 より、15 km/h 相当である約 50 rpm 前後の値となるまでの時間には若干差があるものの、定常走行時はいずれも 50 rpm 前後の値となっていた。

3.1.2 走行条件②：ゆるい勾配登坂を含む一般公道走行時

アシストオン・オフでペダリングにどのような影響が生じたかを、クランク軸入力トルクの波形で比較した。走行条件②を走行中に、ペダルセンサーで測定・計算したクランク軸入力トルクの時間変化の様子を図 8 に示す。

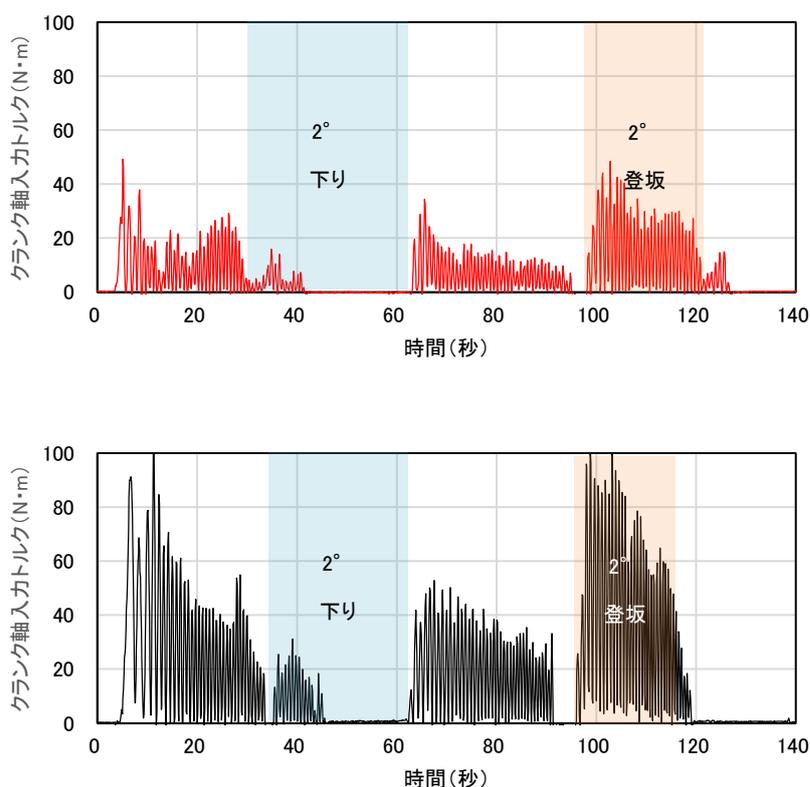


図 8 走行条件②走行時のクランク軸入力トルクの比較
(上：アシストオン、下：アシストオフ)

図 8 より、走行条件①と同様アシスト作動時にクランク軸入力トルクが小さくなっていた。特筆すべきと思われるのは、平たん路と 2° 勾配登坂時のクランク軸トルクで、アシストオンで 2° 勾配登坂の定常走行時と、アシストオフで平たん路を定常走行している際のクランク軸トルクがおおむね 20 N・m~40 N・m の間の値となっており、登坂していても平たん路走行と同じ力で走行できていたことがわかる。

3.1.3 走行条件③：急勾配登坂時

走行条件①と同様、アシストオン・オフでペダリングにどのような影響が生じたかを、クランク軸入力トルクの波形およびケイデンスで比較した。ペダルセンサーで測定・計算したクランク軸入力トルクの時間変化の様子を図 9 に、ケイデンスの時間変化の様子を図 10 に示す。

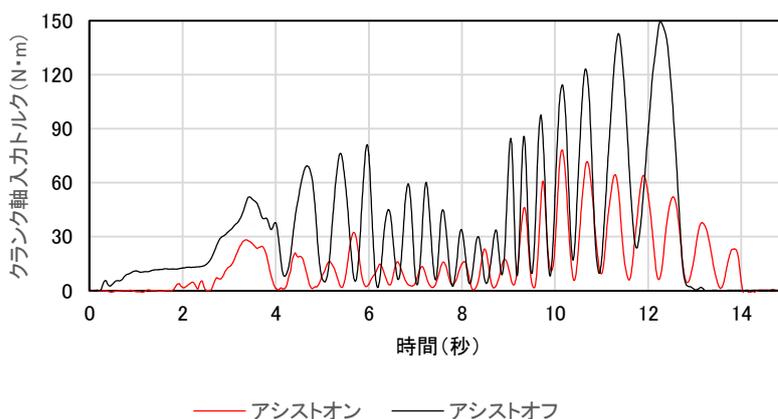


図 9 走行条件③走行時のクランク軸入力トルクの比較

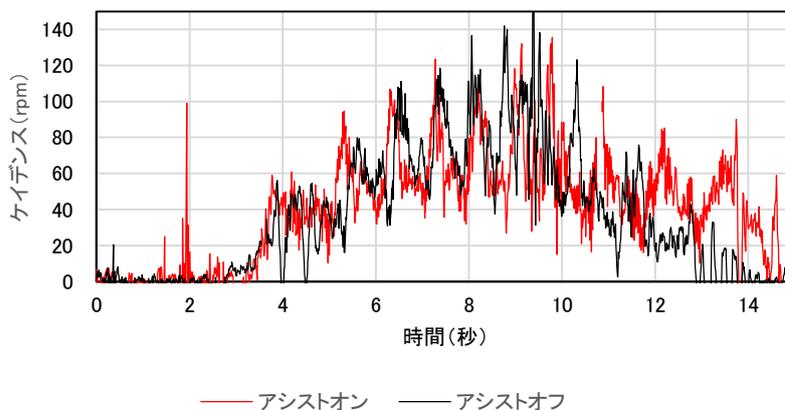


図 10 走行条件③走行時のケイデンスの比較

アシストオフ状態では 15°勾配を 10 m 完走することができなかったため、走行可能であった所までのデータ測定結果である。走行条件③においても他の走行条件と同様、アシストオン時のクランク軸入力トルクはアシストオフ時よりも小さくなっていた。また、アシストオンで 15°勾配を登坂時とアシストオフで平坦路を走行時のクランク軸入力トルクがほぼ同じ値であり、ケイデンスも登りきるまで維持できたことから、アシストが作動することによって通常自転車で平坦路を走る時と同様のペダリングで 15°勾配を登坂できたと言える。

3.2 ひずみ測定で得られたデータ

走行条件①～③を走行時に得られたひずみデータを、測定箇所別にまとめた。

3.2.1 前ホーク（右ホーク足中前）

図 11 に各走行条件で得られた測定結果をまとめた。右ホーク足中前について、アシストオン・オフでひずみ波形に極端な差は見られなかったが、強いて挙げるとすれば、走行条件①の発進時（測定開始 2 秒～6 秒付近）や走行条件③の登坂時（測定開始 7 秒付近）で、アシストオン時のほうがひずみ波形の P-P 値がやや小さくなった点である。これはペダルを強く踏み込むタイミングと一致しており、走行に必要なクランク軸トルクの違いが影響したと考えられる。

各走行条件の定常走行時については、あまり差が見られなかった。

3.2.2 ハンドル（ハンドルポスト後）

図 12 に各走行条件で得られた測定結果をまとめた。ハンドルポストの後方について、走行条件①の発進時（測定開始 2 秒～6 秒付近）や走行条件③の登坂時（測定開始 8 秒～12 秒付近）など、ペダルを強く踏み込む状況で、アシストオン時はおもに圧縮方向へのひずみが生じたのに対し、アシストオフ時は圧縮・引張両方向にひずみが生じた。これはアシストオフにて発進及び 15° 勾配登坂の際、ペダルを強く踏み込むため乗員が前傾姿勢気味となり、ハンドルを前に押すような動作を行ったためと考えられる。

また、2°登坂時については、アシストオン時のほうが圧縮方向へのひずみ量がやや小さく、ペダリングに伴う振幅も小さかった。走行に必要なクランク軸トルクの違いが乗車姿勢に影響したと考えられる。

各走行条件の定常走行時については、あまり差が見られなかった。

3.2.3 フレームの上面（メインパイプ前上、メインパイプ中上）

図 13 及び図 14 に各走行条件で得られた測定結果をまとめた。メインパイプの前上箇所については、2°勾配登坂時にアシストオフ時と比べアシストオン時の圧縮方向へのひずみ量がやや小さかったものの、全体的にひずみ波形にあまり差は見られず、右ホーク足中前と同じような傾向が見られた。

メインパイプ中上箇所については、走行条件①の発進時（測定開始 2 秒～6 秒付近）や走行条件②の 2°勾配登坂時、走行条件③の発進時（測定開始 2 秒～4 秒付近）及び登坂時（測定開始 8 秒～12 秒付近）などペダルを強く踏み込む状況で、アシストオン時に圧縮方向へのひずみが小さく、波の振幅も小さくなっていた。走行に必要なクランク軸トルクの違いが影響したと考えられる。

各走行条件の定常走行時については、あまり差が見られなかった。

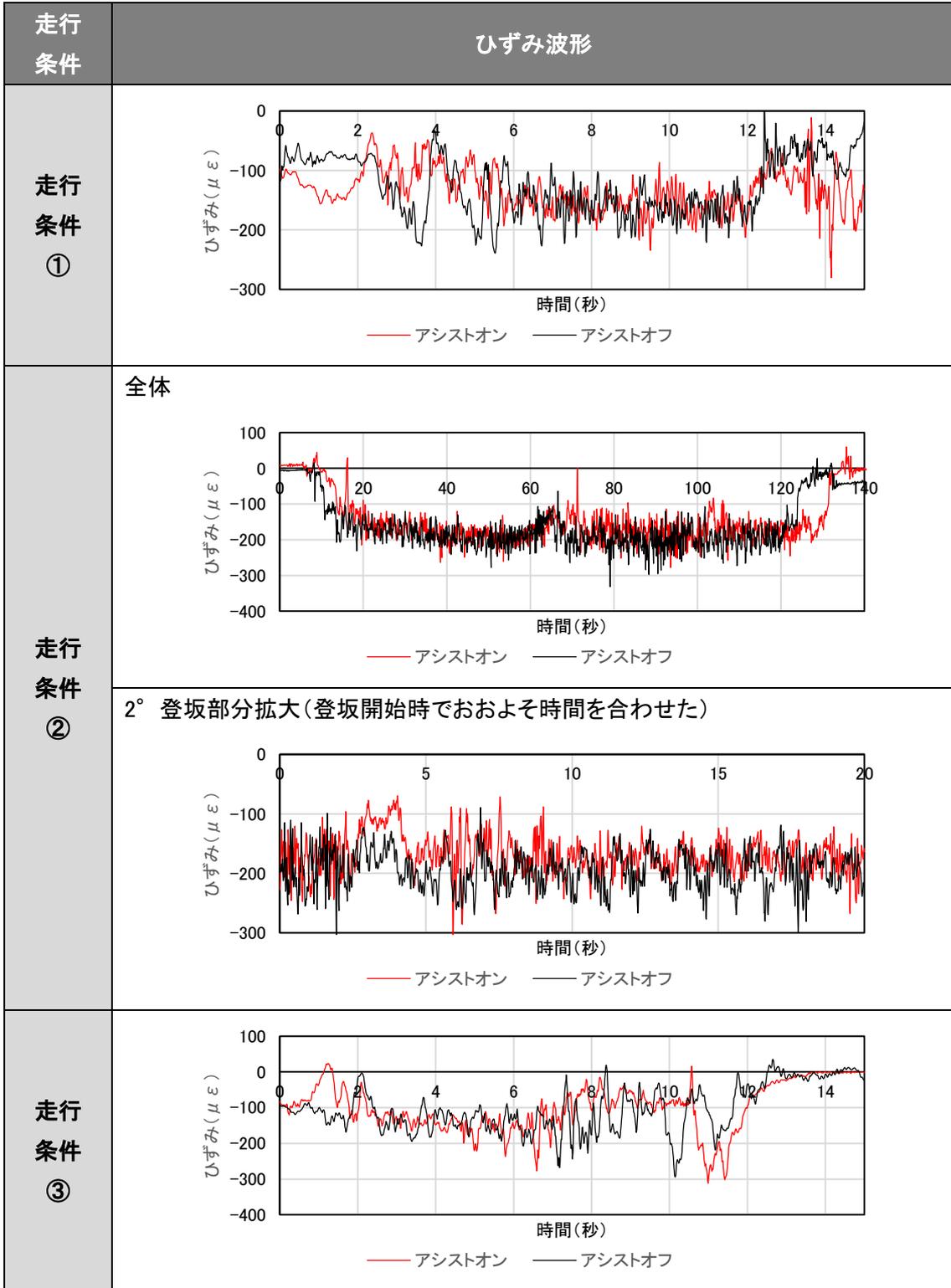


図 11 右ホーク足中前のひずみ波形

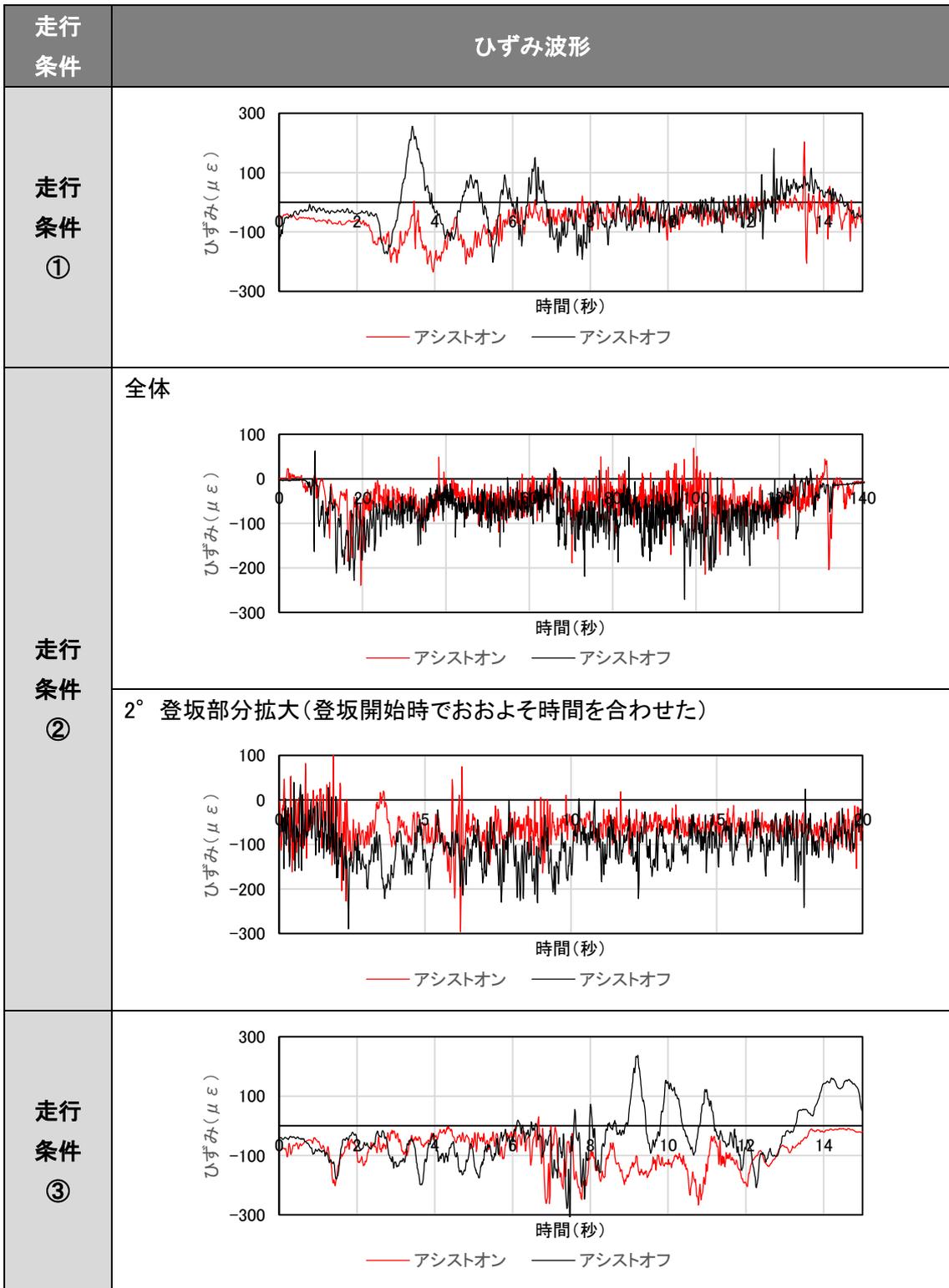


図 12 ハンドルポスト後のひずみ波形

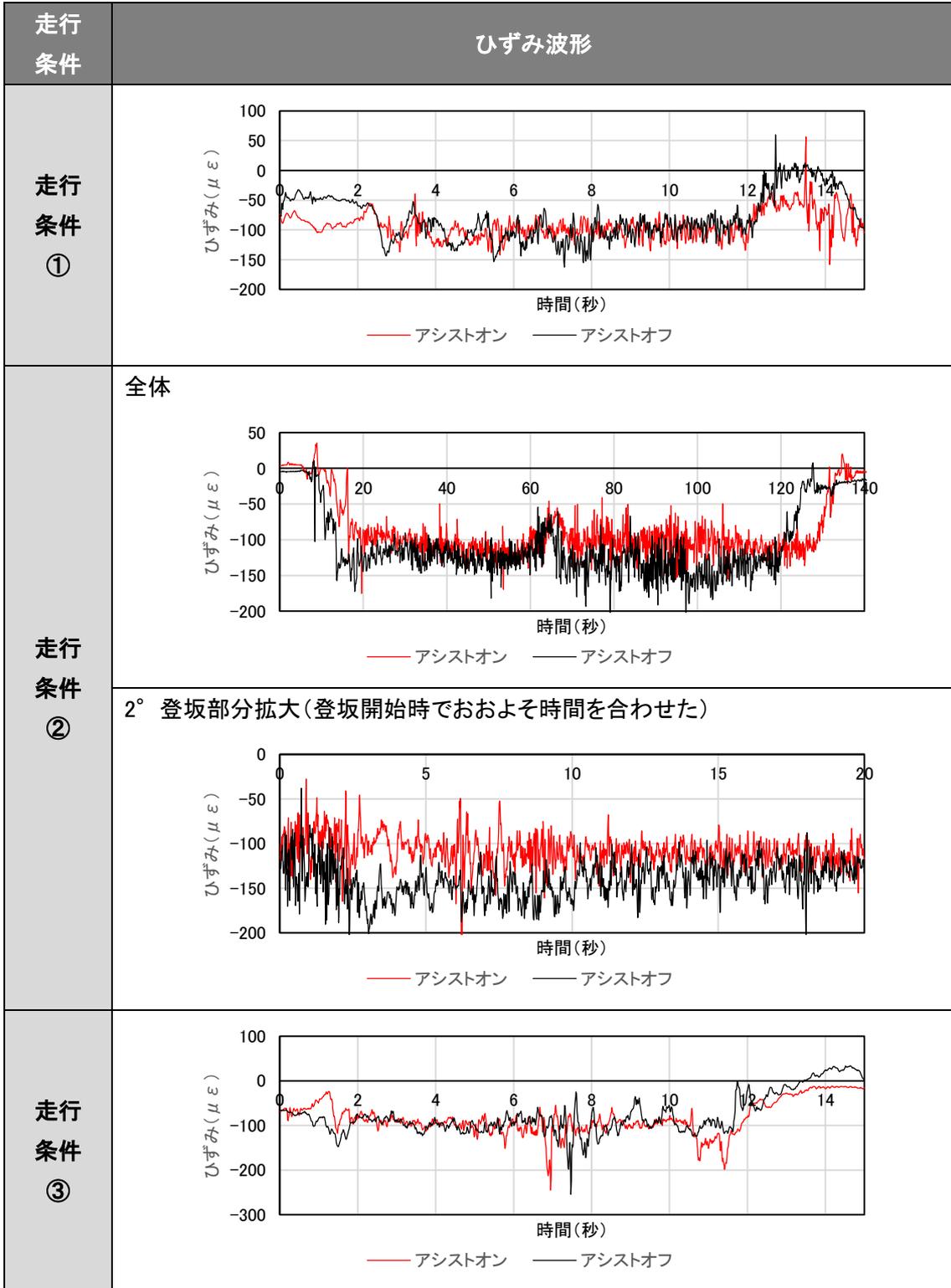


図 13 メインパイプ前上のひずみ波形

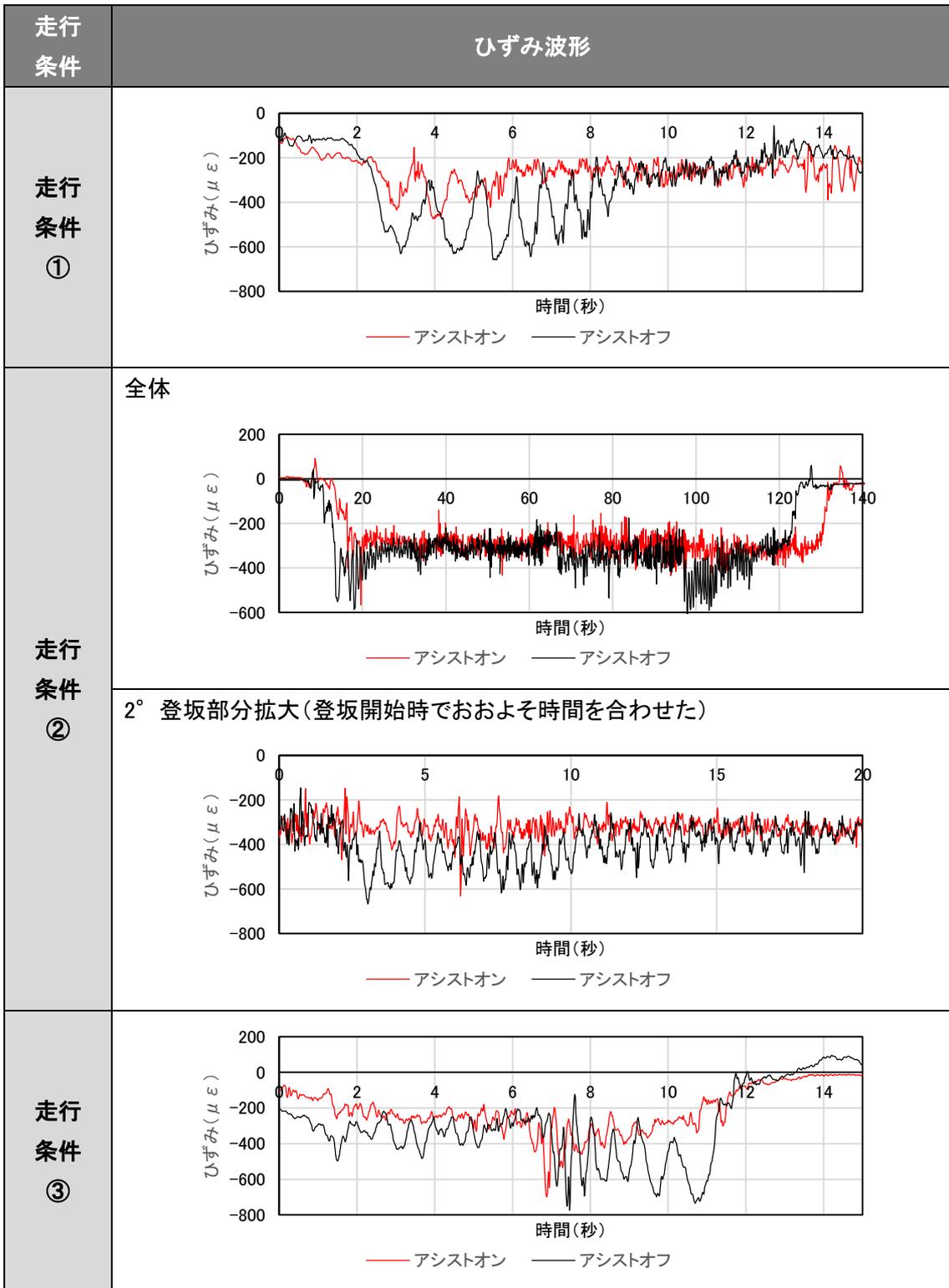


図 14 メインパイプ中上のひずみ波形

3.2.4 フレームの側面（メインパイプ前右、立パイプ下右）

図 15 及び図 16 に各走行条件で得られた測定結果をまとめた。メインパイプの前右箇所、立パイプ下右箇所ともにアシストオン時にひずみ量の絶対値が小さくなり、ペダリングに伴い生じる波の振幅も小さくなっていた。他の測定箇所に比べ、ペダルの踏み込みが最も影響するため、発進、登坂、定常走行問わず、アシストが作動する全状況で、走行に必要なクランク軸トルクの違いが影響したと考えられる。

3.2.5 シートポスト

図 17 に各走行条件で得られた測定結果をまとめた。シートポストの前箇所については、走行条件①の発進時（測定開始 2 秒～6 秒付近）や走行条件②の 2° 勾配登坂時、走行条件③の発進時（測定開始 2 秒～4 秒付近）などの状況でアシストオン時の波の振幅が小さくなっていた。アシストオフ時は強く踏み込む必要があるため、発進時や登坂時などで強い踏み込みが必要な際は、ペダルに体重を乗せるために立ち漕ぎに近い乗車姿勢となり、サドルへの負荷の増減が繰り返される。一方でアシストオン時はペダルを強く踏み込まなくても加速するため、サドルに体重を乗せた乗車姿勢でもペダリングできる。この違いにより、ひずみ波形の振幅に差が生じたと考えられる。

また、走行条件①の発進直後（測定開始 2 秒～4 秒付近）や走行条件③の発進直後（測定開始 1 秒～3 秒付近）ではアシストオン時の引張方向へのひずみ量が大きくなった。これはアシスト作動による加速に伴い、乗員の乗車姿勢が後方へ傾いた影響と考えられる。

3.2.6 まとめ

3.2.1～3.2.5 より、アシストオフ時と比較したアシストオン時に各箇所で見られたひずみ波形のおおよその傾向を表 1 にまとめた。表 1 から、今回の供試品及び走行条件では、アシストオフ時と比較し、アシストオン状態では前ホークやハンドル、フレーム各部のひずみの絶対値やひずみ波形振幅が小さくなる一方で、シートポストについては、加速局面でアシストが作動した際に、ひずみ量が大きくなる瞬間があることがわかった。

表 1 各箇所で見られたアシストオフ時と比較したアシストオン時のひずみ波形の傾向

| 箇所 | 発進 | 登坂 | 定常 |
|--------|------------|------------|------------|
| 前ホーク | 振幅減少 | 振幅減少 | |
| ハンドル | 絶対値減少、振幅減少 | 絶対値減少、振幅減少 | |
| フレーム上面 | 絶対値減少、振幅減少 | 絶対値減少、振幅減少 | |
| フレーム側面 | 絶対値減少、振幅減少 | 絶対値減少、振幅減少 | 絶対値減少、振幅減少 |
| シートポスト | 絶対値増大 | 振幅減少 | |

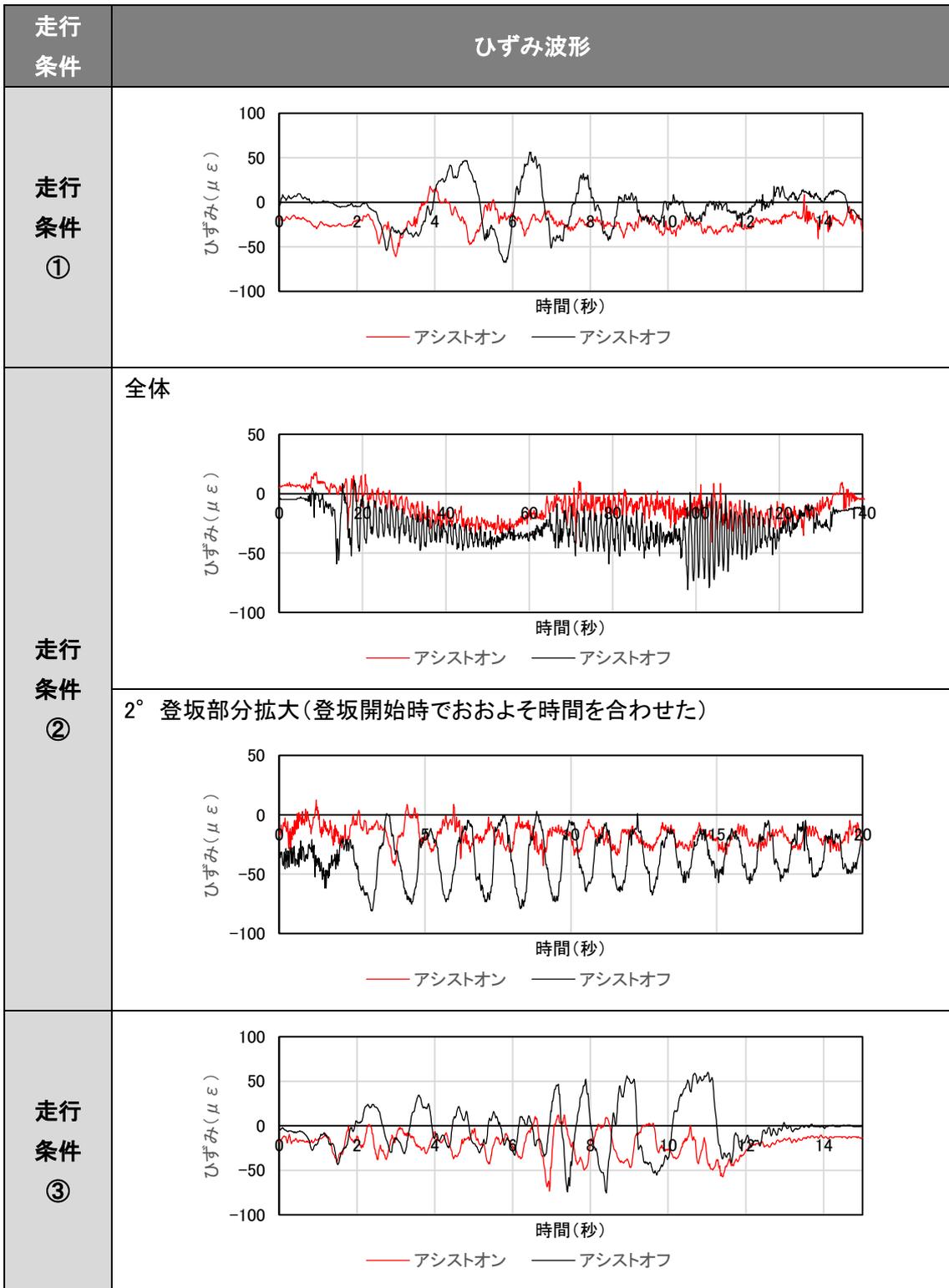


図 15 メインパイプ前右のひずみ波形

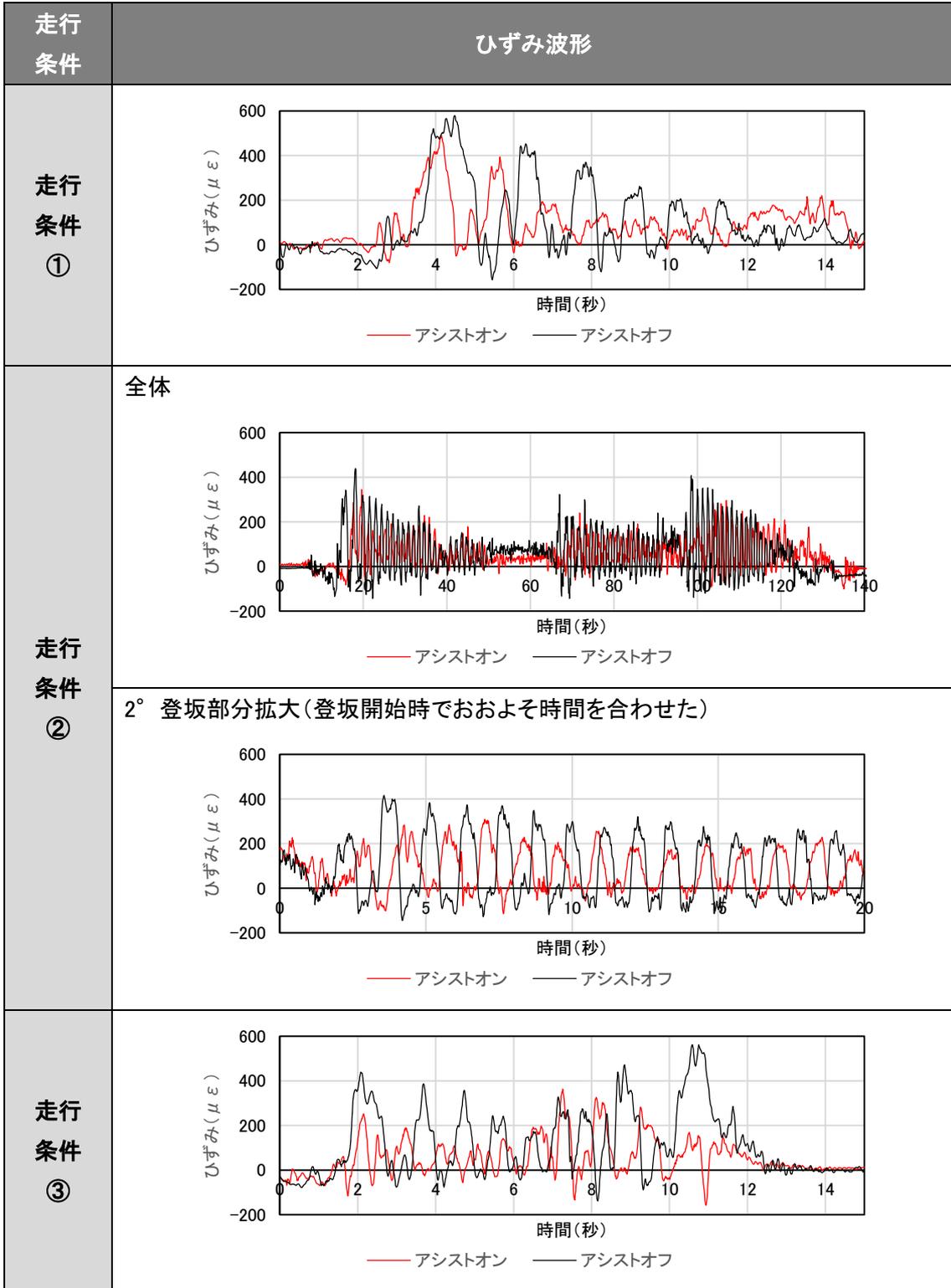


図 16 立パイプ下右のひずみ波形

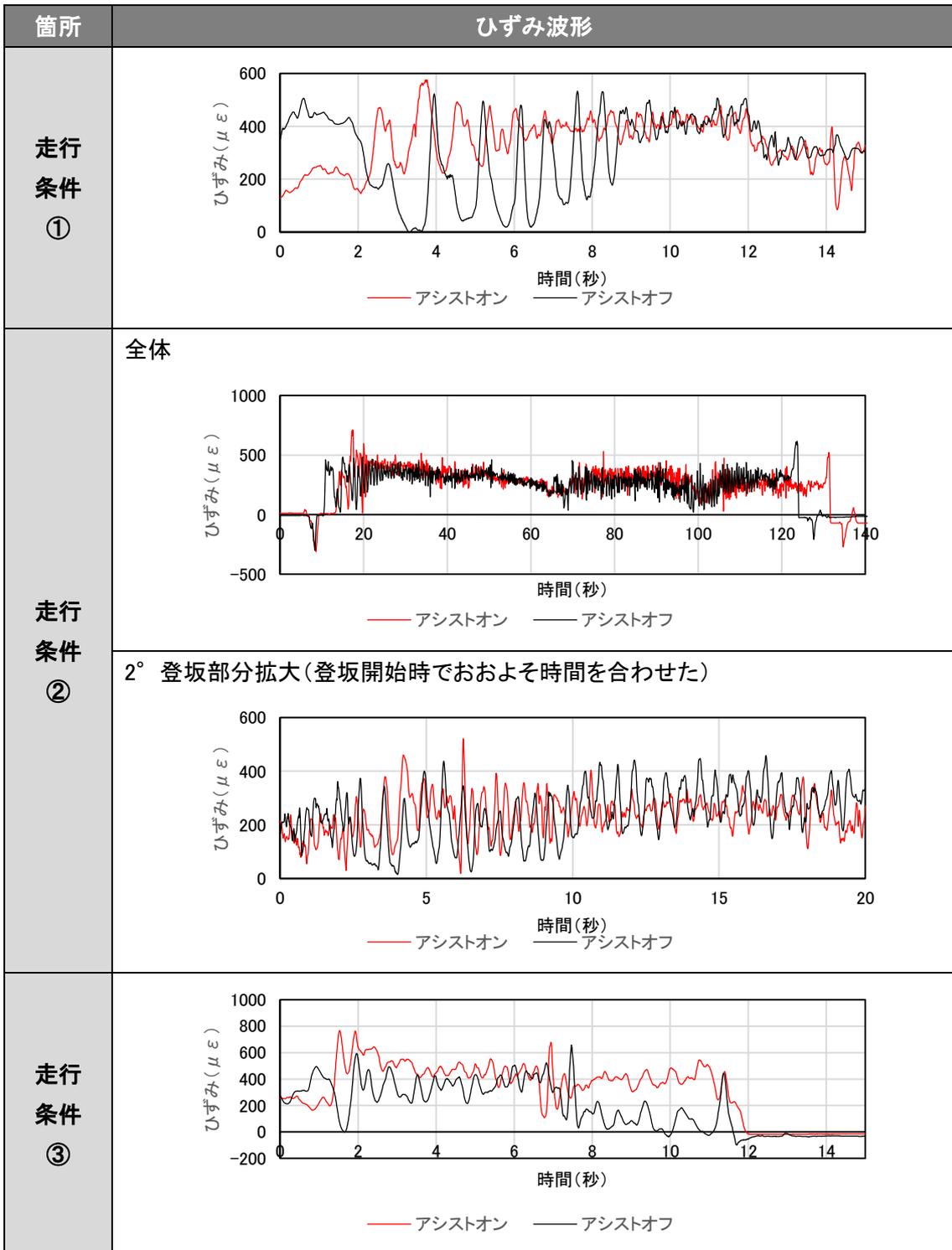


図 17 シートポスト前のひずみ波形

4. 頻度解析による疲労状況の比較

データが少ないためあくまで参考ではあるが、走行条件①～③を組み合わせることで実使用状態を仮定し、組み合わせた条件を用いてアシストオン・オフ時のひずみの頻度解析を行い、測定箇所の疲労状況を比較した。実使用状態の仮定には、供試品の1充電当たりの走行距離などの数値を元に検討することにした。

まず、今回の3つの走行条件の走行路の内訳を表2に、ペダルセンサー取得データより計算した、各走行条件におけるペダリング関連データの走行時間当たりの平均値を表3にまとめた。

表2 各走行条件の内訳

| | 測定時間 (秒) | 走行距離(m) | | | | 計 |
|-------|-------------|---------|-------------|--------------|-----|-----|
| | | 平たん路 | 2° 勾配 登坂 | 15° 勾配 登坂 | 下り坂 | |
| 走行条件① | 15 | 30 | 0 | 0 | 0 | 30 |
| 走行条件② | 140 | 253 | 90 | 0 | 118 | 461 |
| 走行条件③ | 15 | 15 | 0 | 10 | 0 | 25 |

表3 各走行条件走行時の走行時間あたりのペダリングに関するデータ

| アシスト | ケイデンス (rpm) | | クランク軸入力 トルク(N・m) | | クランク回転出力 (W) | | |
|-------|----------------|------|---------------------|------|-----------------|-------|---------|
| | オン | オフ | オン | オフ | オン | オフ | オフとオンの差 |
| 走行条件① | 26.7 | 28.7 | 13.5 | 35.2 | 37.8 | 106.1 | 68.3 |
| 走行条件② | 41.6 | 34.7 | 6.4 | 16.3 | 28.0 | 59.3 | 31.2 |
| 走行条件③ | 43.3 | 39.2 | 14.9 | 33.8 | 67.6 | 139.4 | 71.8 |

次に、各走行条件での電池の消費量を見積もった。アシストオフ時とオン時のクランク回転出力の差が電動機の仕事率に相当するため、電動機の効率を60%と仮定し、各走行条件の1回走行当たりの消費電力量を計算すると表4のようになった。

表4 走行条件1回走行当たりの消費電力量（電動機の効率を60%と仮定した場合）

| | 走行条件1回走行当たりの 消費電力量(Wh) |
|-------|---------------------------|
| 走行条件① | 0.47 |
| 走行条件② | 2.02 |
| 走行条件③ | 0.50 |

今回用いた車両では電池が 121 Wh、一充電当たりの走行距離が BAA 標準パターンのアシスト強モードで 21 km であるので、この数値にできるだけ近づくように走行条件を組み合わせたところ、表 5 のような条件を仮定できた。走行距離が 20,740m (20.7km)、走行時間 6,800 秒 (約 1.9 時間) で電池を使い切るような条件となった。この繰り返し回数を元に、発停回数や走行路の割合をまとめると表 6 のようになった。自転車の使用状況や電動機の効率について、標準的な定義は困難であるが、妥当な条件設定ができたのではないと思われる。

表 5 走行条件の組合せ

| | 繰り返し回数 (回) | 走行距離 (m) | 走行時間 (秒) | 消費電力量 (Wh) |
|-------|---------------|-------------|-------------|---------------|
| 走行条件① | 60 | 1,800 | 900 | 28.2 |
| 走行条件② | 40 | 18,440 | 5,600 | 80.8 |
| 走行条件③ | 20 | 500 | 300 | 10.0 |
| 計 | 120 | 20,740 | 6,800 | 119.0 |

表 6 組み合わせた条件での発停回数や走行路の割合

| | 発停回数 (回) | 走行距離(m) | | | |
|-------|-------------|---------|---------|----------|-------|
| | | 平坦路 | 2° 勾配登坂 | 15° 勾配登坂 | 下り坂 |
| 走行条件① | 60 | 1,800 | 0 | 0 | 0 |
| 走行条件② | 40 | 10,120 | 3,600 | 0 | 4,720 |
| 走行条件③ | 20 | 300 | 0 | 200 | 0 |
| 計 | 120 | 12,220 | 3,600 | 200 | 4,720 |

15° 勾配登坂 1%
下り坂 23%
平地 59%
2° 勾配登坂 17%

この条件から、レインフロー法を用いてひずみの頻度解析を行った。解析結果を図 18 に示す。なお、メインパイプ前右についてはひずみ量が小さいため、解析は実施していない。

図 18 より、同じ走行条件で同じ距離を走行した場合、立パイプ下右及びシートポスト前以外は頻度解析結果に大きな差は見られなかった。

立パイプ下右では、アシストオン状態のほうが全体的にグラフの左下側に分布が寄っていた。すなわち、アシストオフ時と比べ、アシスト作動によりペダルの踏み込みが弱くなり該当箇所への応力が小さくなることから、走行時に生じる繰り返しの負荷による累積疲労が小さくなっていった。

一方シートポスト前については、両対数グラフにおける SN 曲線の傾き次第ではアシストオン状態のほうが、累積疲労が大きくなる可能性があった。これはアシストオンの発進時に乗員の乗車姿勢が後方へ傾いた影響と考えられるが、乗車姿勢次第では違う傾向となるかもしれない。

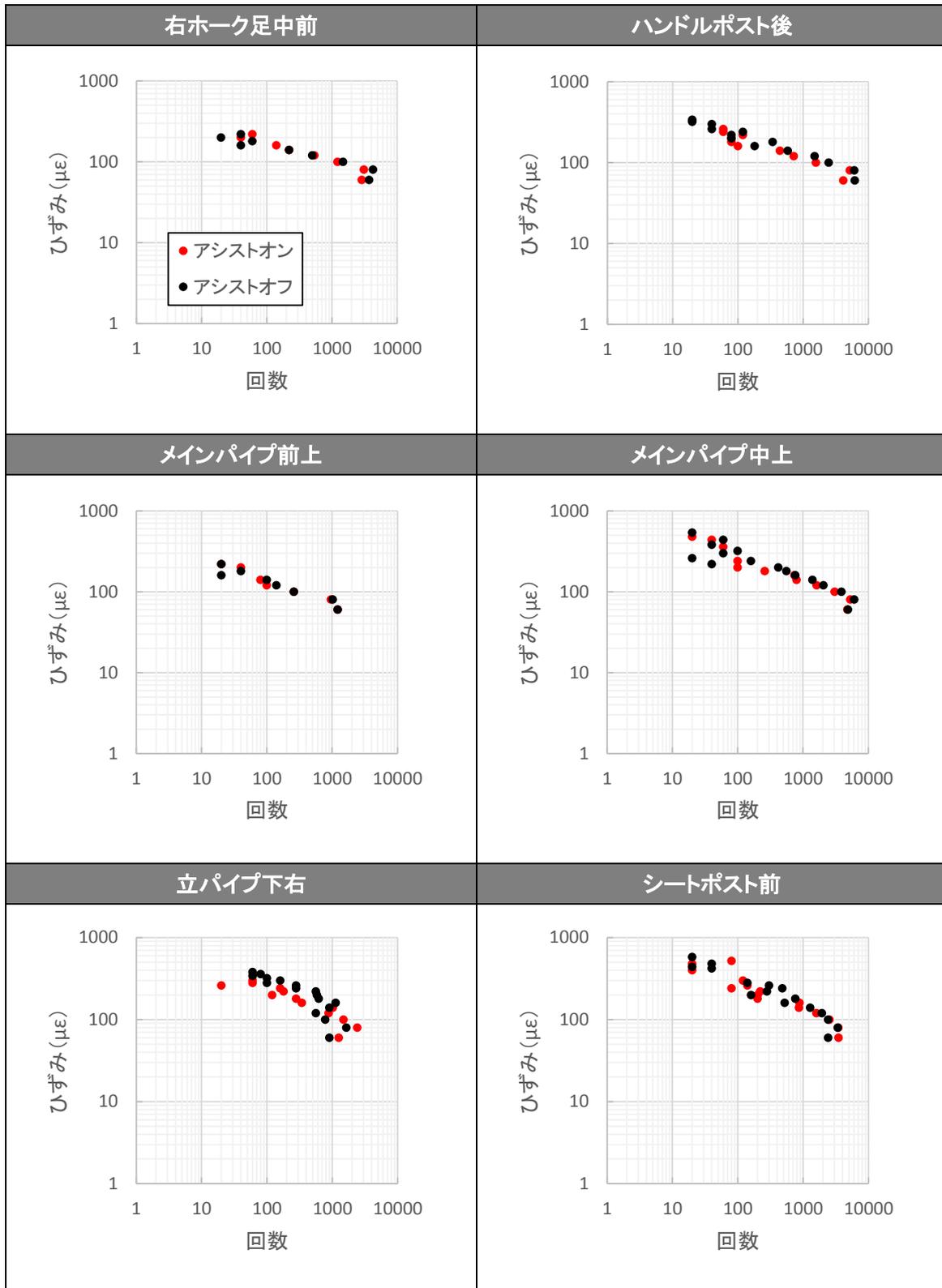


図 18 組み合わせた条件でのレインフロー法による頻度解析結果

5. 結言

今回の測定から、1 銘柄での検証ではあるが、電動アシスト自転車をアシストオン・オフ状態で同じ走行条件で使用した場合、ペダルの踏み込みに要する力が小さくなる、あるいは乗車姿勢が変わることなどから、ひずみ波形に差が見られた。

また、ひずみ波形の頻度解析の結果、同じ走行条件で同じ距離を走行した場合、アシストオンの状態では、概ね走行時の繰り返し負荷による累積疲労がアシストオフ時以下になることがわかった。一方で乗員の乗車姿勢の変化が累積疲労に影響する可能性もあった。

今回の測定は、電動アシスト自転車を同じ走行条件、走行距離で使用した場合の比較を行ったが、電動アシスト自転車使用の際は乗員への負担が軽くなることから、自転車の使用頻度や走行距離、走行速度が増加する可能性がある。例えば表 3 のクランク回転出力のオン・オフ時で比較すると、乗員が走行に必要な出力はアシストオンにすることで半分以下（今回仮定した組合せ条件で比較すると約 41 %）になるため、乗員の負担が同じであると仮定して、同じ走行条件で比較した場合は使用頻度、走行距離を 2 倍程度に増やして考える必要があるかもしれない。また、走行速度が増加する場合の比較を行う場合は、駆動補助力の比率が大きく影響し、銘柄ごとに異なる駆動補助の設定や基準とする走行速度によって傾向が変わるため、検証を行うのは非常に難しいと思われる。

アシストオン・オフ時の自転車各部の疲労具合を比較するために何を基準とするのが妥当なのかは、乗員がどのような状況や意図で電動アシスト自転車を使用し、メーカー側もどのような思想で製品を開発・販売しているかによるので、様々なデータ取得が必要であろう。