

2019 年度自転車等研究開発普及事業
事業実施報告書③

電動アシスト自転車走行時の 最高表面温度とその測定方法の検討

2020 年 1 月

一般財団法人 自転車産業振興協会 技術研究所

目次

1. 緒言	2
2. 供試品、測定方法及び測定手順.....	2
2.1 供試品	2
2.2 測定方法及び測定手順.....	4
3. 測定結果及び考察.....	6
3.1 表面温度が最高となる箇所及び最高表面温度	6
3.2 温度上昇の傾向とその要因.....	10
3.2.1 各供試品に関して.....	10
3.3 測定方法の考察.....	15
4. 測定方法及び測定手順の提案.....	17
5. 結言	19

1. 緒言

電動アシスト自転車は、乗員のペダリングによる力をクランク軸に加えた際に、道路交通法に規定された駆動補助力の比率の最大値を超えないよう、走行速度に応じて駆動補助力が付加され、通常の自転車よりも走行時の乗員のペダリングの負荷が少なくなる自転車である。駆動補助力の付加は電動機の実出力によるものであるため、駆動補助の際には電動機やその制御装置等が通電により発熱する。その発熱の状況について、平成30年度事業実施報告書¹⁾にて報告した。電動アシスト自転車の中には、ISO 13732-1²⁾に規定されている接触時間1秒における火傷の温度閾値の最低温度付近を超える電動アシスト自転車が存在し、温度上昇によっては故障の原因になりうるということがわかった(図1)。しかしこれは、電流値や電力値が最大になる条件で温度測定を行った結果であり、消費電力がどのような形で熱に変わるかなど発熱原因を明確にしていなかった。そのため、発熱原因を明らかにした後、温度が最高になる測定条件を設定し、測定方法を確立する必要がある。

本報告では、電動アシスト自転車の発熱原因を明らかにするため、当所所有の電動アシスト自転車用シャーシダイナモメータを用いて変速段・速度・勾配を変えながら各電動アシスト自転車の特性と温度変化を測定した。その結果をもとに、電動アシスト自転車の最高表面温度を測定する方法について提案した。

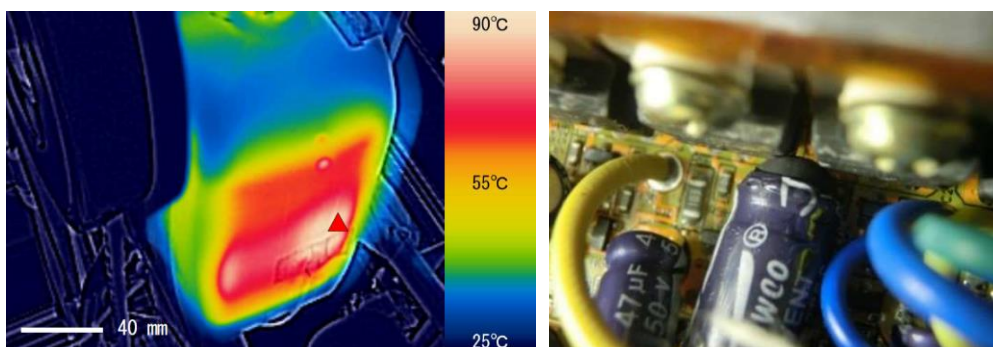


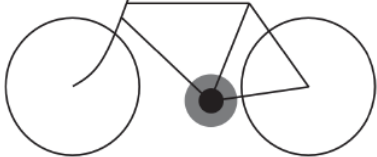
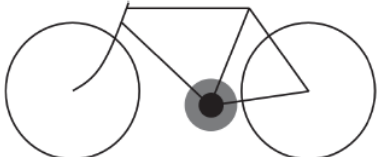
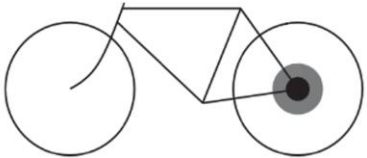
図1 平成30年度の事業実施報告書の概要(左図赤外線画像、右図故障の様子)
左図▲部は最高表面温度86.7℃、右図は電解コンデンサの膨張

2. 供試品、測定方法及び測定手順

2.1 供試品

供試品として、市販されている3銘柄3台の電動アシスト自転車を使用した。その内1台は平成30年度事業実施報告書¹⁾と同じ車両とし、結果を比較できるようにした。供試品の概要を表1にまとめた。なお、商品テストを目的としていないため、表に示す以外の電動アシスト自転車の情報は公表しない。

表1 供試品概要

供試品	完成車質量 (kg)	フレーム形状・ フレーム材質・ 車輪径	駆動補助装置の種類	駆動補助装置の電動機の箇所
供試品①	25	ダイヤモンド形・ アルミニウム合金・ 29インチ	クランク軸上合力発生 一体型 (センターモータ駆動方式)	
供試品②	23	ダイヤモンド形・ アルミニウム合金・ 26インチ	クランク軸上合力発生 一体型 (センターモータ駆動方式)	
供試品③ ※1	19	ダイヤモンド形・ アルミニウム合金・ 26インチ	後車軸合力発生型 (ハブモータ後輪駆動方式)	

※1 供試品③は平成30年度事業実施報告書¹⁾で用いた車両と同じ。

2.2 測定方法及び測定手順

まず各供試品の発熱条件とその測定結果を網羅するため、以下の方法及び手順で測定を行った。測定中の室温は 20 °C から 25 °C の間となるよう空調にて調整した。

(1) 電動アシスト自転車の設置

電動アシスト自転車をシャーシダイナモメータに設置する。サドル部分に 65 kg (乗車人員の体重を想定した質量) のおもりを取り付ける。シャーシダイナモメータに設定する等価慣性質量は、測定に供する電動アシスト自転車の質量に 65 kg を加えた質量の値に応じて、JIS D 9115:2018 (電動アシスト自転車) 附属書 D 表 D.1 の標準値に設定する。タイヤの空気圧はタイヤ側面に表示されている標準空気圧の最大値とする。走行時には走行速度に相当する冷却風を電動アシスト自転車の前面から与える。

(2) 組電池の取り付け

使用する組電池は満充電の状態まで充電し、電動アシスト自転車に取り付ける。

(3) 電動アシスト自転車の駆動補助機能の設定

電動アシスト自転車の電源をオンの状態にし、駆動補助力が最も大きくなる走行モード (強モードやパワーモードなど) を選択する。

(4) 発熱箇所の確認

シャーシダイナモメータのクランク軸駆動装置を用いて、まずは 10 km/h、4 ° 勾配、変速装置はギヤの歯数比が最大となる組み合わせで電動アシスト自転車を走行させ、発熱する箇所を赤外線サーモグラフィ (FLIR 社製 FLIR E6 を使用) にて確認する。なお、走行抵抗は JIS D 9115:2018 の附属書 D で規定されている下記の式により負荷し、勾配 θ の値を変えることで走行抵抗を調整した。

$$F=2.6+0.027V^2+9.8W\sin\theta$$

F : 走行抵抗 (N)

V : 速度 (km/h)

W : 等価慣性質量の標準値 (kg)

θ : 登坂角度 (°)

(5) 黒体テープの貼り付け

最も高温になる箇所に黒体テープを貼り付ける。

(6) 組電池の取り付けと駆動補助機能の設定

(2) 及び (3) の手順を行う。

(7) 各条件における温度測定

シャーシダイナモメータのクランク軸駆動装置を用いて電動アシスト自転車を変速段、速度、勾配を変えながら走行させる。それぞれの条件において、温度が高くなる箇所を赤外線サーモグラフィにて走行開始 30 分後に撮影する。(2) 及び (3) の手順を測定終了ごとに繰り返し行う。各条件の測定結果より、各供試品において温度が最も高くなる条件を表 2 に示す。

表 2 温度が最も高くなる条件

	供試品①	供試品②	供試品③
変速段	9	8	7
車速 (km/h)	9	13	7
勾配 (°)	4	6	6

(8) 最高表面温度の測定

シャーシダイナモメータのクランク軸駆動装置を用いて電動アシスト自転車を表 2 の条件で走行させ、それぞれの速度で温度が高くなる箇所を赤外線サーモグラフィにて数分ごとに撮影する。測定は組電池が空になる、あるいは温度上昇しなくなる熱平衡の状態 (30 分間温度変化が 2 °C 以内) になるまで実施する。

(9) 赤外線サーモグラフィの補正

測定後、赤外線サーモグラフィの温度を確認し、赤外線サーモグラフィの補正を行う。

3. 測定結果及び考察

3.1 表面温度が最高となる箇所及び最高表面温度

各供試品の表面温度が最高となった時に、赤外線サーモグラフィで得られた温度分布の画像を図2及び図3にまとめた。また、各供試品の最高表面温度と測定箇所について、表3にまとめた。

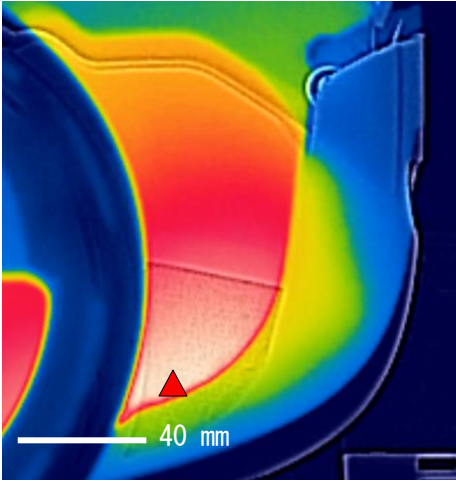
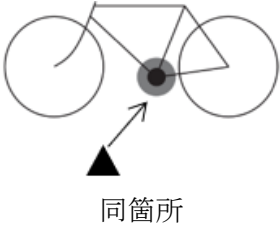
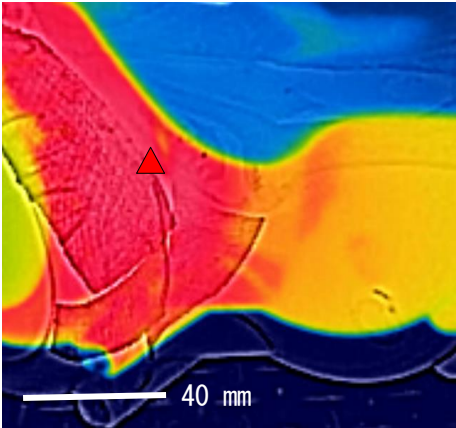
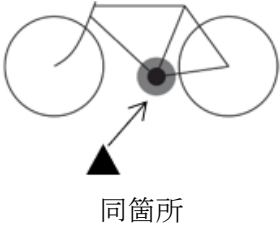
供試品	赤外線画像（▲部が最高温度）	●：駆動補助装置 ▲：最高温度箇所
供試品①		
供試品②		

図2 表面温度が最高となった箇所の赤外線画像（供試品①、②）

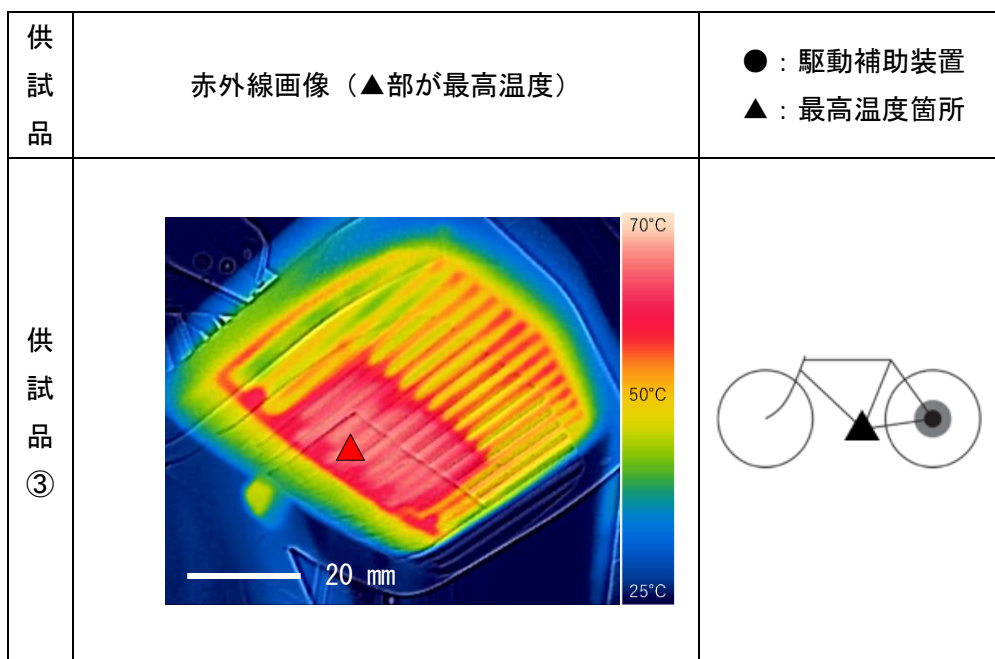


図3 表面温度が最高となった箇所の赤外線画像（供試品③）

表3 赤外線サーモグラフィで測定した最高表面温度と測定箇所

	供試品①	供試品②	供試品③
最高表面温度 (°C)	70.5	51.0	63.4 (50.7) ※2
測定箇所	駆動補助装置 制御部側面	駆動補助装置 制御部側面	駆動補助装置 制御部下面

※2 供試品③括弧内の結果は、平成30年度事業実施報告書¹⁾で測定した結果である。また、温度の差異は測定方法と測定条件の違いによるものである。

図 2 及び図 3 で表面温度が最高となったのは、駆動補助装置の制御部であった。ここは ISO13732-1²⁾ にある非連続接触面であり、電動アシスト自転車においては、通常の使用及びメンテナンス中に乗員の手、脚などに接触する可能性のある部分である。表 4 は、各供試品の最高表面温度と許容温度をまとめたものである。表面温度が最高となった箇所は非連続接触面のため、乗員の接触時間は 1 秒とした。その許容温度は、ISO 13732-1²⁾ の 4 章の図 3 及び図 7 にて示されており、接触時間 1 秒における火傷の温度閾値の最低温度付近とした。接触時間 1 秒は ISO/DIS 4210-10 (EPACs) でも検討されている内容である。表 4 より、供試品①、②及び③に関して最高温度は、接触時間 1 秒における許容温度以下の温度であった。ただし、供試品③に関しては規定の -0.6°C であり、夏場の使用や悪路など、過酷な走行条件では許容温度を超える可能性も考えられる。

表 4 赤外線サーモグラフィで測定した最高表面温度と許容温度

	供試品①	供試品②	供試品③
最高表面温度 (°C)	70.5	51.0	63.4
許容温度 (°C)	85	85	64
測定箇所の材質	プラスチック	プラスチック	金属

図 4 は各供試品における走行時間と表面温度の関係である。

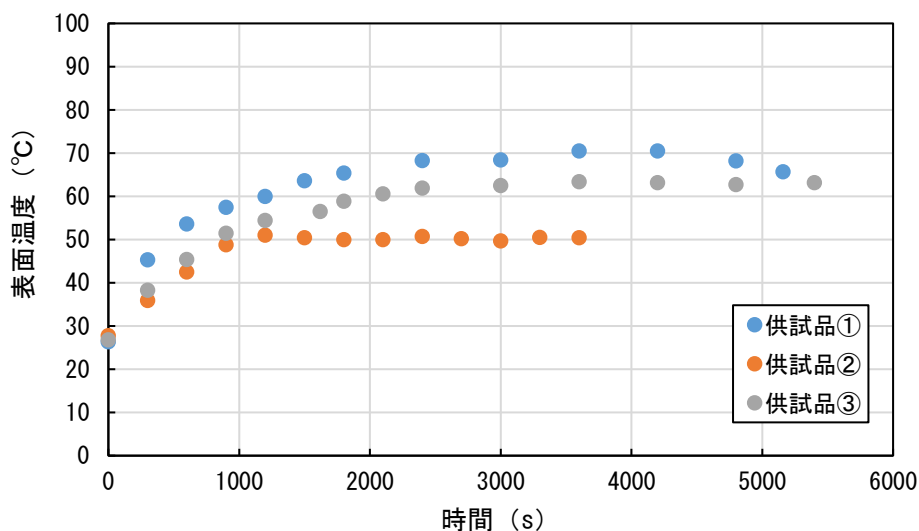


図 4 走行時間と表面温度の関係

各供試品の温度は、約 1800 秒で飽和に近い状態になった。供試品①は 5160 秒で電池が空になり、供試品②及び③は温度が熱平衡の状態になったと判断し、測定を終了した。また、

最高表面温度が高い車両ほど、走り始めの温度上昇も早くなった。

また、各供試品の走行距離と表面温度の関係を図5に示す。

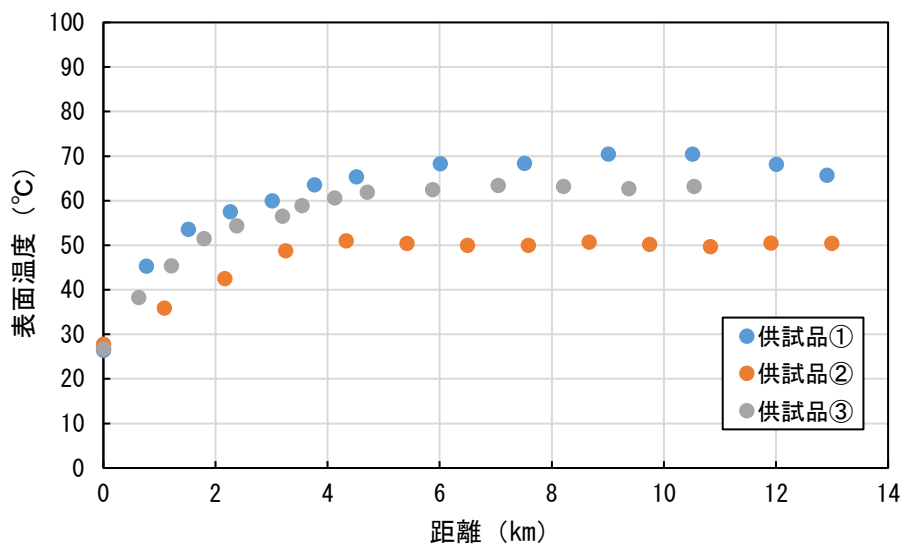


図5 走行距離と表面温度の関係

各供試品の温度は、約5 kmで飽和に近い状態になった。供試品①は12.9 km走行したところで電池が空になった。

3.2 温度上昇の傾向とその要因

最高表面温度を測定することができたが、温度が最も高くなる条件を決めるまでに多くの測定を繰り返した。供試品①の実際に行った測定条件を表5に示す。

表5 供試品①の測定条件

	変速段	速度 (km/h)	勾配 (°)		変速段	速度 (km/h)	勾配 (°)
1	4	7	2	17	6	9	6
2	4	7	4	18	6	11	4
3	4	7	6	19	6	11	6
4	4	9	4	20	6	13	2
5	4	9	6	21	6	13	4
6	4	11	4	22	6	13	6
7	4	11	6	23	6	15	4
8	4	13	2	24	6	15	6
9	4	13	4	25	8	9	4
10	4	13	6	26	8	11	4
11	4	13	8	27	8	13	4
12	4	15	4	28	9	7	4
13	4	15	6	29	9	9	4
14	6	7	4	30	9	11	4
15	6	7	6	31	9	13	4
16	6	9	4				

条件によっては走行中に駆動補助装置のエラーが発生したため、供試品①に関しては測定回数31回であった。供試品②は32回、供試品③は31回であった。これだけ多くの測定を各電動アシスト自転車で行い、最も温度が高くなる条件を決めるのは時間を要するため、効率的な測定方法を検討する必要がある。そのため、まず測定した結果を比較し、温度上昇の傾向とその要因について考察した。

3.2.1 各供試品に関して

駆動補助装置は電動機などからなる駆動部、制御部、踏力検出部及び電源部によって構成され、外部からの踏力を検出しそれに応じたトルクを発生させる装置であり、温度が上昇したのはどの車両も駆動補助装置の制御部であった。温度上昇、駆動補助装置の制御の関係を調べるため、駆動補助装置が発生させるトルク及び消費電力、そして電力に対する機械出力の比である効率にはどのような関係があるのかまとめた。

各供試品の駆動補助装置のトルク及び効率、消費電力、開始1800秒後の表面温度の関係を図6に示す。計算式は表6を用いた。

表 6 計算式

<p>駆動補助装置のトルク : T (N・m)</p> $T = T_{\text{on}} - T_{\text{off}}$ <p>T_{on} : 駆動補助装置の電源がオンの状態のトルク (N・m)</p> <p>T_{off} : 電源がオフの状態 (N・m)</p>
<p>駆動補助出力 : P (W)</p> $P = (P_2 + P_{\text{loss}} - P_{1\text{on}})$ <p>P_2 : 車両の駆動出力 (W)</p> <p>P_{loss} : 車両内部のエネルギー損失 (W)</p> <p>$P_{1\text{on}}$: 駆動補助装置の電源がオンの状態で走行した時のクランク軸回転出力 (W)</p>
<p>効率 : η (%)</p> $\eta = P/P_{\text{in}}$ <p>P : 駆動補助出力 (W)</p> <p>P_{in} : 消費電力 (W)</p>

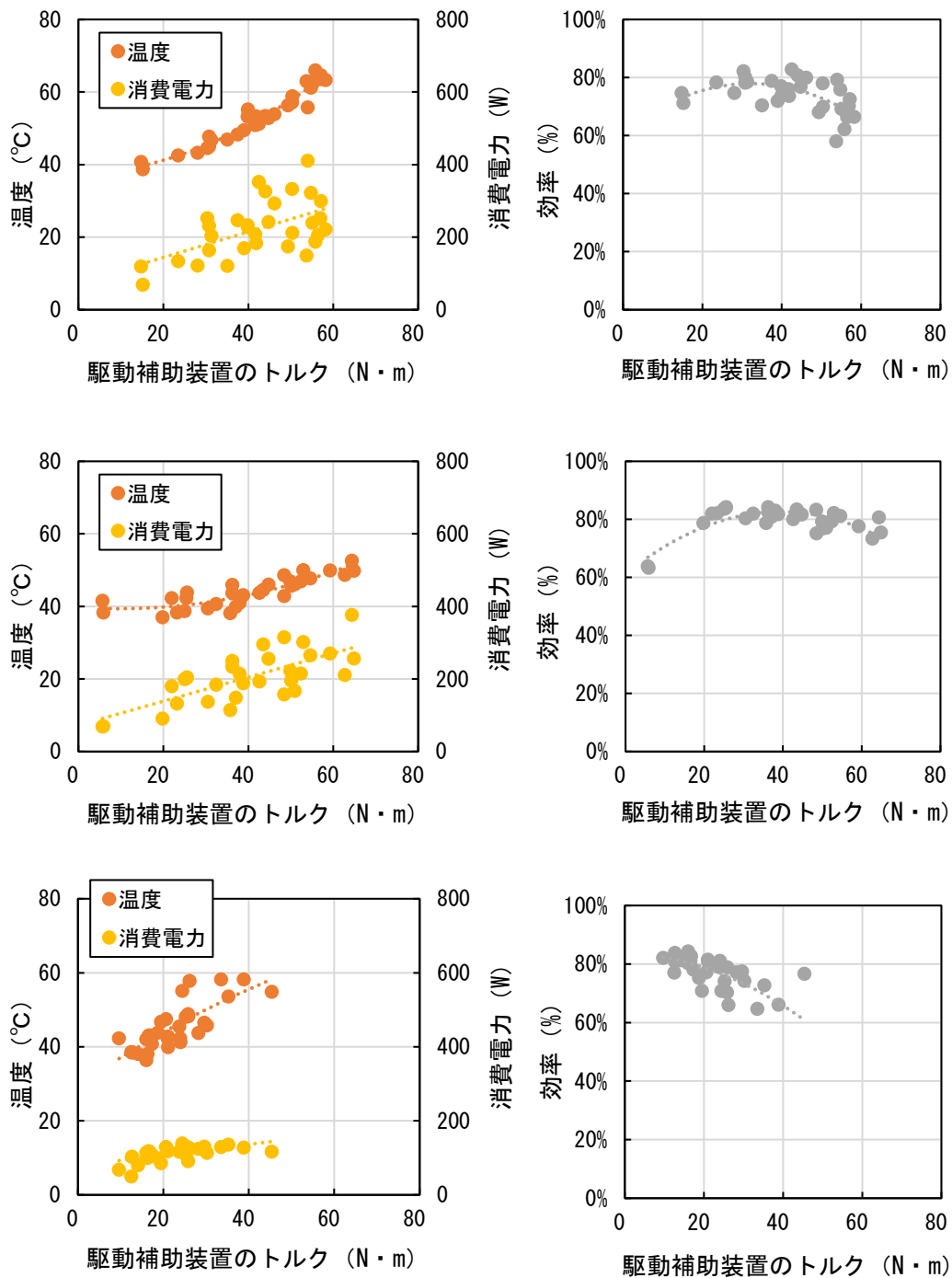


図6 各供試品の駆動補助装置のトルク及び表面温度、消費電力、効率の関係
 供試品①（上図）、供試品②（中図）、供試品③（下図）

図6の破線は近似曲線である。駆動補助装置のトルクが大きくなるほど、温度及び消費電力が大きくなり、効率はある値を過ぎると低下していく。上図の近似曲線より、供試品①の効率は約32 N·mで最大値77.9%となる。中図の近似曲線より、供試品②の効率は約

43 N・m で最大値 81.2 %となる。また下図の近似曲線より、供試品③の効率は約 10 N・m で最大値 82.3 %となる。つまり、駆動補助装置のトルクがある値を超えると効率が低下しはじめ、電力の損失が大きくなっていき、消費電力の増加以上に損失の割合が大きくなる。また、損失は熱となり温度は上昇していった。ただし、駆動補助装置のトルクが大きくなると、駆動補助装置の仕様により様々であるが、特定の値で駆動補助機能が低下、もしくは停止するものが多かった。

各供試品の駆動補助装置のトルク及び温度、損失の関係を図 7 に示す。損失 P_L は消費電力と効率から計算した値 ($P_L = P_m (1 - \eta)$) とした。

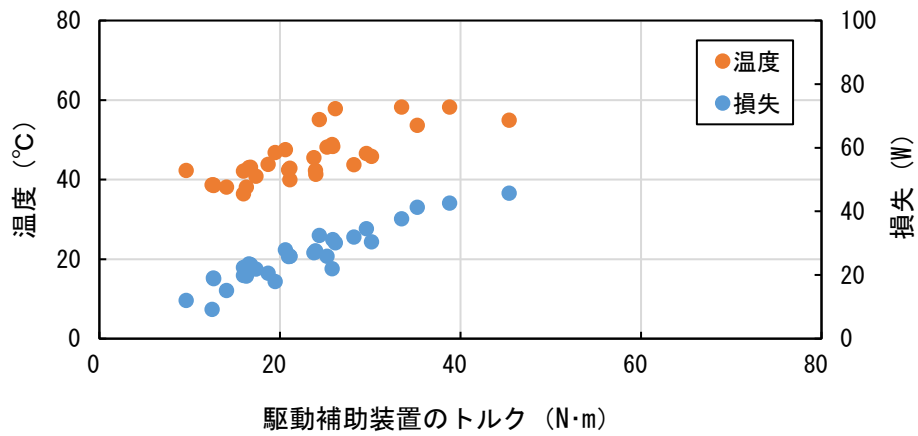
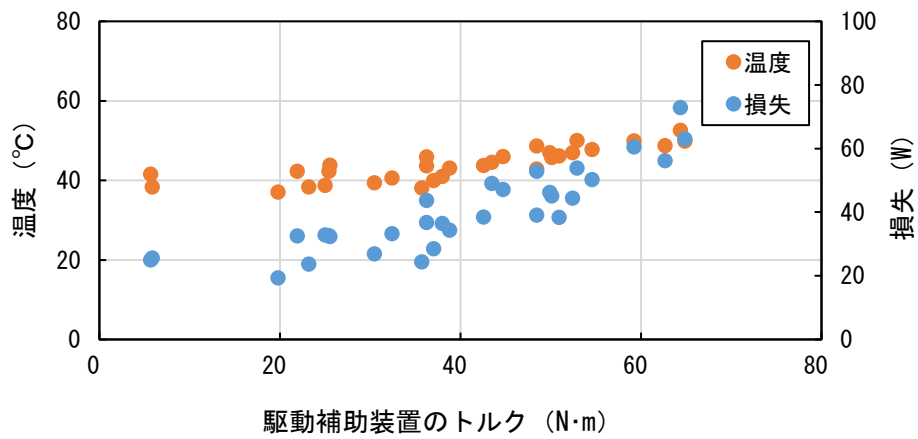
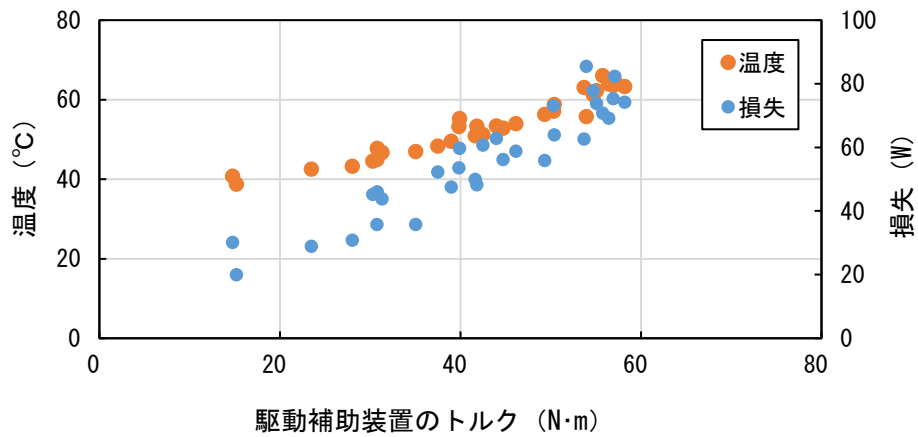


図7 各供試品の駆動補助装置のトルク及び表面温度、損失の関係
 供試品①（上図）、供試品②（中図）、供試品③（下図）

図7より、電力の損失が大きくなるほど、温度が上昇している。ただし、供試品①はメーカー規定の条件で駆動補助装置が止まる仕様になっており、実際に温度測定可能な上限は58.2 N·mまでであった。なお、供試品②及び③に関しては、駆動補助装置が停止す

る、もしくは故障する状態まで測定を行っていない。

以上より、発熱は電力を動力に変換する際の電動機の損失が主な原因となっており、その損失は消費電力と効率の関係で決められる。駆動補助装置のトルクが大きくなるほど、消費電力は大きくなり、効率は低くなっていくため、温度測定に関しては、駆動補助装置が作動可能な範囲で駆動補助装置のトルクを大きくすることで、最大表面温度の測定が可能であることがわかった。

3.3 測定方法の考察

3.2 で、駆動補助装置が作動可能な範囲で駆動補助装置のトルクを大きくすれば、表面温度が高くなることがわかった。そのため、駆動補助装置のトルクが最大になる条件として、速度、勾配及び変速段をどのように決めればよいか検討した。

図8に勾配を変えた時の速度及び駆動補助装置のトルクの関係を示す。変速段は6、勾配は4°及び6°とした。

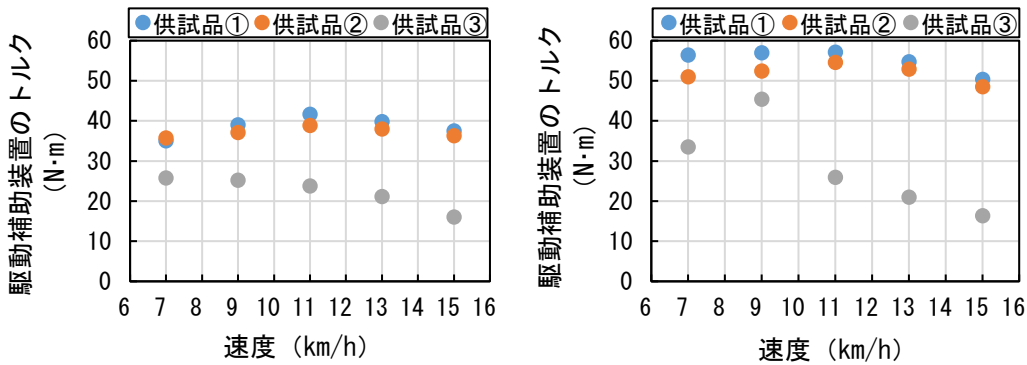


図8 速度及び駆動補助装置のトルクの関係（左図4°、右図6°）

図8より、駆動補助装置のトルクが最大になる速度は供試品ごとに異なり、また同じ供試品においても勾配を変化させることでトルクが最大となる速度は変化した。

また、図9に変速段を変えた時の速度及び駆動補助装置のトルクの関係を示す。勾配は4°、変速段は4及び6とした。

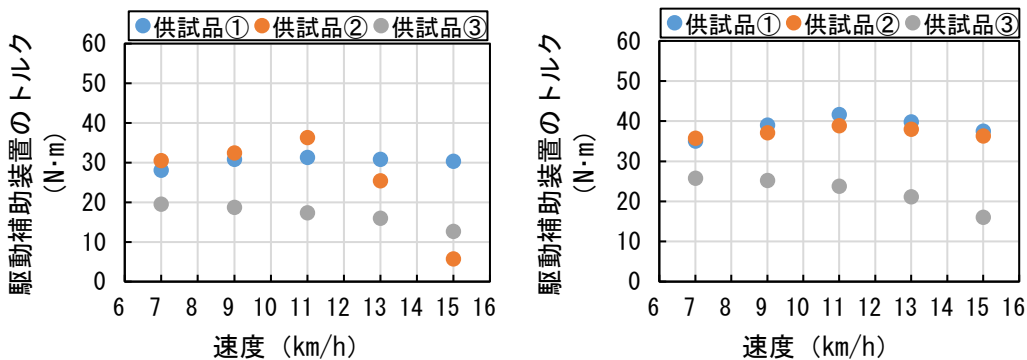


図9 速度及び駆動補助装置のトルクの関係（左図変速段4、右図変速段6）

図9より変速段を変えた時、同じ供試品で速度と駆動補助装置のトルクの傾向は変化する可能性があることがわかった。

図8及び図9より速度と駆動補助装置のトルクの関係に傾向を見つけることはできなかったが、勾配や変速段を大きくすることで駆動補助装置のトルクが変化している。そこで、次に勾配、変速段及び駆動補助装置のトルクの関係について考察した。

図10に走行抵抗及び駆動補助装置のトルクの関係と、変速段及び駆動補助装置のトルクの関係を示す。左図は変速段4、速度7 km/h、右図は速度9 km/h、勾配4°とした。

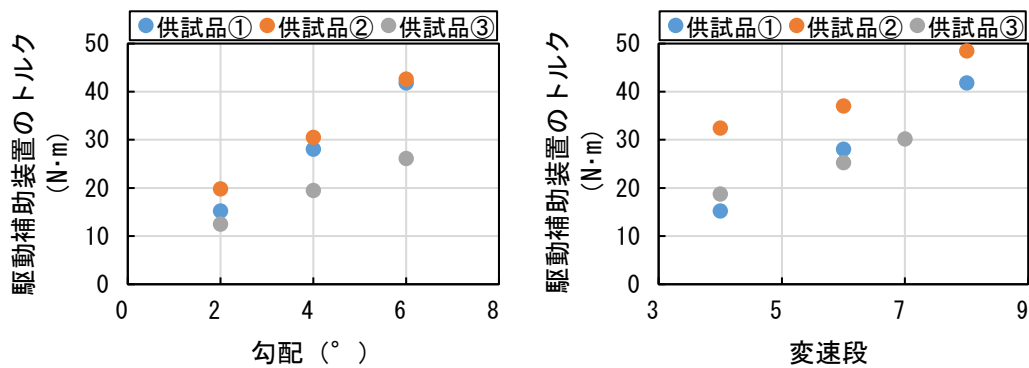


図10 勾配及び駆動補助装置のトルク（左）、変速段及び駆動補助装置のトルクの関係（右）

図10より、各供試品において走行抵抗と変速段を大きくすれば、駆動補助装置のトルクが大きくなることがわかった。勾配や変速装置の歯数比が増えると、クランク軸回転出力が増加し、駆動補助装置がペダルをこぐ力を補おうとするため、駆動補助装置のトルクが大きくなると考えられる。

以上より、勾配及び変速段を大きくすると駆動補助装置のトルクが大きくなるが、速度を変えると駆動補助装置のトルクは変化し、勾配や変速段を変えると速度及び駆動補助装置のトルクの傾向は変化する事がわかった。したがって、最高表面温度の測定条件を決める際には、最初に変速装置の歯数比を最大にし、駆動補助装置が停止しない^{※3}、かつ負荷が出来るだけ大きい勾配を確認した後、各速度で温度の上昇を測定する必要がある。

※3 駆動補助装置が停止する条件は各社様々である。例えば、熱による停止・ペダル軸のトルクによる停止・ペダル変動幅による停止などである。熱による停止が起らない機種も中にはあり、その場合、熱上昇が故障の原因につながる恐れがあるため、測定には注意が必要である。本研究においても、昨年と合わせて、測定した供試品7台中2台で熱による故障が発生している。

4. 測定方法及び測定手順の提案

3章で考察した内容に基づいて、測定方法及び測定手順を提案する。

(1) 電動アシスト自転車の設置

電動アシスト自転車をシャーシダイナモメータに設置する。サドル部分に 65 kg (乗車人員の体重を想定した質量) のおもりを取り付ける。シャーシダイナモメータに設定する等価慣性質量は、測定に供する電動アシスト自転車の質量に 65 kg を加えた質量の値に応じて、JIS D 9115:2018 (電動アシスト自転車) 附属書 D 表 D.1 の標準値に設定する。タイヤの空気圧はタイヤ側面に表示されている標準空気圧の最大値とする。変速装置についてはギヤの歯数比が最大となる組み合わせを選択する。走行時には走行速度に相当する冷却風を電動アシスト自転車の前面から与える。測定中の室温は 20 °C から 25 °C の間となるよう空調にて調整する。

(2) 組電池の取り付け

使用する組電池は満充電の状態まで充電し、電動アシスト自転車に取り付ける。

(3) 電動アシスト自転車の駆動補助機能の設定

電動アシスト自転車の電源をオンの状態にし、最も駆動補助力が大きくなる走行モード (強モードやパワーモードなど) を選択する。

(4) 電動アシスト自転車の駆動補助装置がエラーをおこさない条件の確認

シャーシダイナモメータのクランク軸駆動装置を用いて電動アシスト自転車を 10 km/h 前後で走行させ、シャーシダイナモメータのローラで負荷される走行抵抗を変えながら、走行抵抗が最大かつ駆動補助装置が走行中に停止しない条件を調べる。なお、走行抵抗は JIS D 9115:2018 の附属書 D で規定されている以下の式により負荷し、勾配 θ の値を変えることで走行抵抗を調整する。

$$F=2.6+0.027V^2+9.8W\sin\theta$$

F : 走行抵抗 (N)

V : 速度 (km/h)

W : 等価慣性質量の標準値 (kg)

θ : 登坂角度 (°)

(5) 組電池の取り付けと駆動補助機能の設定

(2) 及び (3) の手順を行う。

(6) 発熱箇所の確認

シャーシダイナモメータのクランク軸駆動装置を用いて電動アシスト自転車を(4)の走行抵抗が最大かつ駆動補助装置が走行中に停止しない条件で走行させ、発熱する箇所を赤外線サーモグラフィにて確認する。

(7) 黒体テープの貼り付け

最も高温になる箇所に黒体テープを貼り付ける。

(8) 組電池の取り付けと駆動補助機能の設定

(2) 及び (3) の手順を行う。

(9) 温度測定

シャーシダイナモメータのクランク軸駆動装置を用いて電動アシスト自転車を(4)の走行抵抗が最大かつ駆動補助装置が走行中に停止しない条件で速度を変えながら走行させ、それぞれの速度で温度が高くなる箇所を赤外線サーモグラフィにて数分ごと※4に撮影する。測定は組電池が空になる、あるいは温度上昇しなくなる熱平衡の状態になるまで実施する。

※4 数分ごとに撮影する理由は、熱平衡の状態や最高温度を確認するためである。必要でなければ、熱平衡になったと思われる時点で撮影することも出来るが、駆動補助装置の仕様により、走行途中で駆動補助力を一時的に低下させる機能や、電池残量で駆動補助力を抑えるモードに切り替わるなど、各社様々な仕様があり、最高温度が必ずしも測定開始後最も遅い時間にならない可能性もあるため、撮影ごとの間隔を長くする場合は注意が必要である。

(10) 赤外線サーモグラフィの補正

測定後、赤外線サーモグラフィの温度を確認し、赤外線サーモグラフィの補正を行う。

(参考) 赤外線サーモグラフィを用いず、熱電対を使用する場合

熱電対を使用できるのは、事前に最も高温になる箇所が分かっている場合である。(7)にて、最も高温になる箇所に黒体テープを用いず熱電対を貼り付け、(9)にて熱電対とデータロガーを用い熱平衡の状態になるまで測定を行う。

5. 結言

今回、3 銘柄 3 台の電動アシスト自転車にて、シャーシダイナモメータ、赤外線サーモグラフィを用いた最高表面温度を効率的に測定する方法及び手順を提案した。その過程で以下のことがわかった。

- 1) 温度の上昇は、電力を動力に変換する際の電動機の損失が主な原因であった。
- 2) 損失は駆動補助装置のトルクに依存し、そのトルクを大きくすれば損失が大きくなることがわかった。
- 3) 駆動補助装置のトルクが最大になる変速装置の歯数比及び勾配は、負荷が最大の組み合わせで、かつ駆動補助装置が走行中に停止しない条件であった。
- 4) 駆動補助装置のトルクが最大になる速度については、駆動補助機能に依存するため各社の制御次第であり、各供試品において傾向を見つけることは出来なかった。

今回、シャーシダイナモメータを用いた測定を実施した中で、熱による故障で測定が困難になった車両が存在した。そのため、その車両は本報告書には含めていない。故障になりうる原因を特定するため、今後、駆動補助装置の電氣的な耐久性調査、発熱などから故障に至るまでの原因究明など、電動アシスト自転車の故障に関する調査を継続して実施したい。

参考文献

- 1) (一財)自転車産業振興協会：“電動アシスト自転車走行時の発熱状況と温度測定方法の検討” 2019 年 3 月
- 2) ISO 13732-1 (Ergonomics of the thermal environment – Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces – Part1:Hot surfaces) 2006 年