

複数接点に温度差がある場合の熱起電力に関する実験

近畿大学大学院総合理工学研究科メカニクス系工学専攻

代表者 保阪瞭太 奈良智明

近畿大学理工学部機械工学科

櫻井英人士 田端一真

1 実験背景・目的

我々は、はすば歯車の歯面温度計測についての研究を行っている^[1]。温度計測方法としては、ゼーベック効果^[2]（図 1）を応用した動的熱電対法^[3]（図 2）を用いている。ゼーベック効果とは、2つの異種金属を閉回路にし、両端に温度差を設けた時、熱起電力が発生する現象である。この現象を歯車に適用し、歯車のかみ合い部における発熱を起点とすることで生じる熱起電力を計測する方法が動的熱電対法である。この方法であれば、かみ合い部の温度を連続的かつ正確に計測することが可能である。また、動的熱電対法を用いた計測ははすば歯車で適用した事例はなく世界初である。

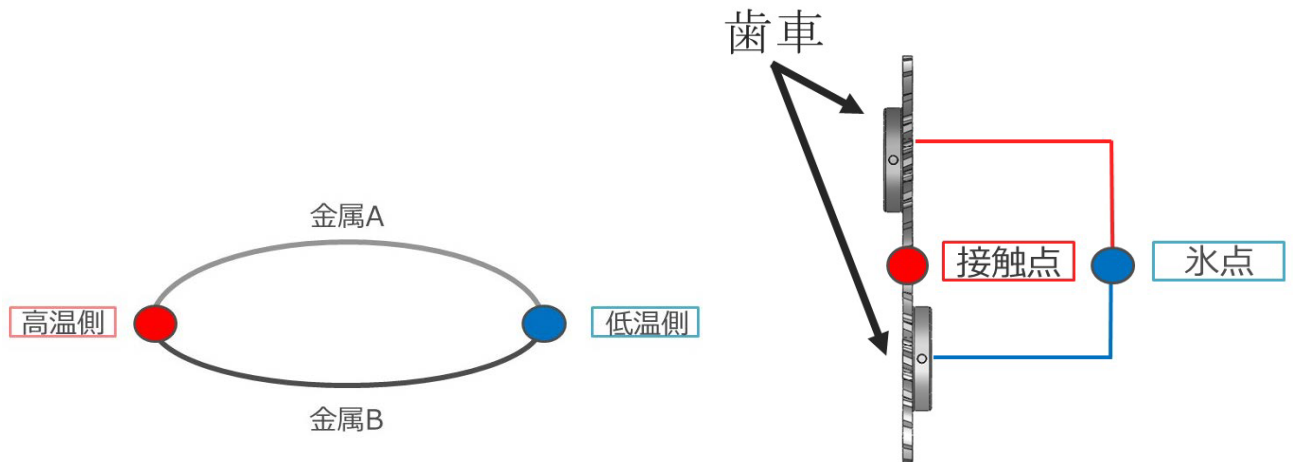


図 1 ゼーベック効果

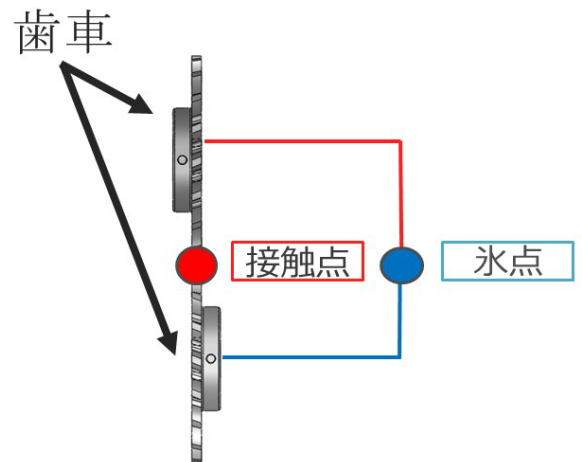


図 2 動的熱電対法

しかし、計測した際に 1つの疑問が生じた。はすば歯車は歯すじが軸に対してねじれているため、図 3のように接触線が傾いていることが特徴である。そのため、接触線上で歯面温度がかみ合い位置によって変化する（図 4）。

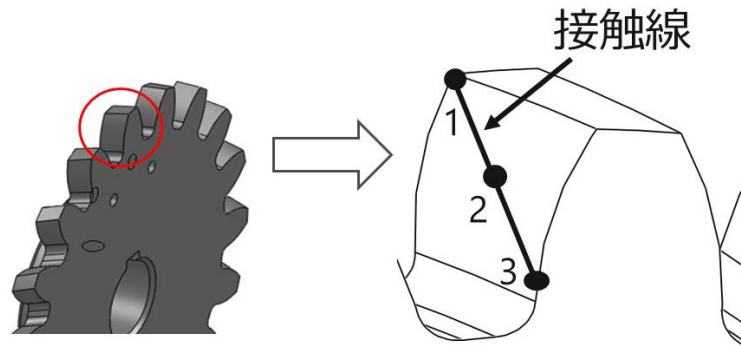


図 3 はすば歯車

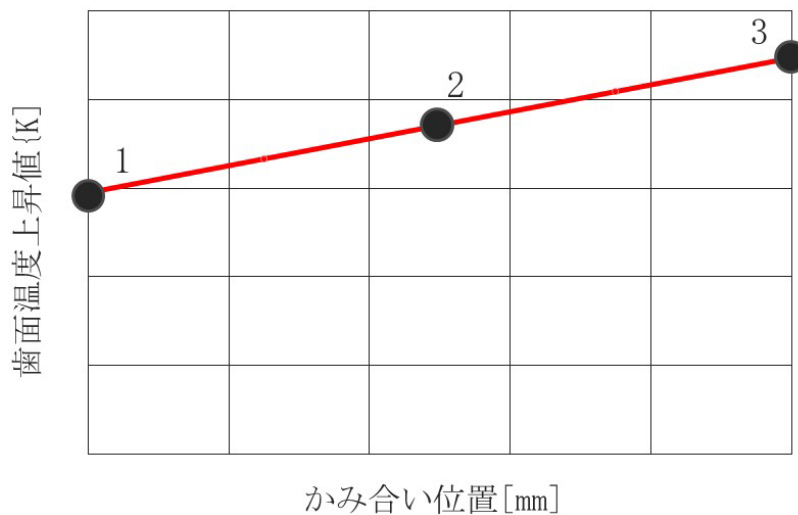


図 4 かみ合い位置歯面温度

図のように接触線上で温度が異なる場合、動的熱電対法では接触線上の温度をどのように計測しているか明らかではない。

しかし、2つの歯車がかみ合うと図3に示すように線接触となるが、これは見かけの接触面であり、本来は図5のように表面粗さの影響で無数の凸部同士で接触している、これを真実接触と呼び、歯車がかみ合ったときの微小接触部は実際、極めて多いが簡略化のため2点で考える。微小接触部1.2で接触したと仮定する。

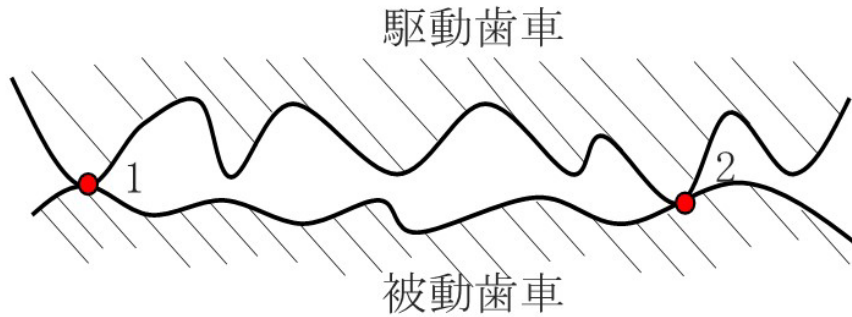


図 5 歯車の真実接触部

そこで、本実験は歯車同士のかみ合い状態を簡略的にモデル化し、複数接点に温度差が生じた時、最高温度・平均温度のどちらの熱起電力を計測するのかを明らかにする。

2 試験概要

動的熱電対法では、接触線上の温度をどのように計測しているか不明である。そこで、図 5 のように歯車が接触していると想定し、2 接点に温度差がある場合の熱起電力を調査する。図 5 を簡略的にモデル化したものが図 6 である。

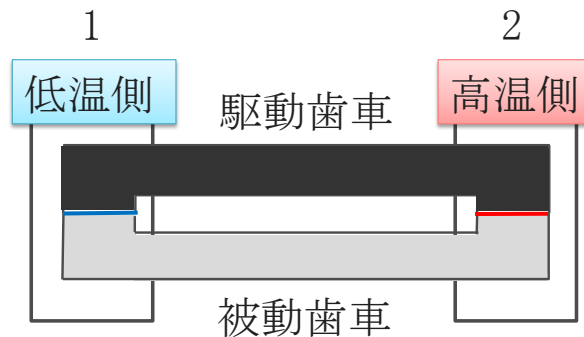


図 6 実験概略図

図 6 から 2 接点によりゼーベック効果で発生する熱起電力を計測する。試験順序としては、まず初めに温度と熱起電力の変換式を構築し、そして変換式を 2 接点の熱起電力計測試験で用いる。

3 熱起電力校正試験

3.1 試験目的

複数接点でのゼーベック効果によって発生する熱起電力測定を行うため、最初に 1 接点での温度-熱起電力変換式を構築する。

3.2 較正試験

今回は、研究で使用しているはすば歯車と材質が同じである S55C と SUS316 を採用した。はすば歯車には硬化処理を施しているが、実験で使用する試験片には硬化処理を施していない。

我々の過去の研究では、単一金属で硬化が可能で材料入手も容易である S55C と SUS316 の組み合わせが最も熱起電力が大きいことも確認されている^[4]。

熱起電力較正試験の試験装置概略図を図 7 に示す。温度誤差を抑えるために金属線と試験片の材質を同じにしているが、S55C に接続された金属線は S60C を使用している。これは、金属線の規格に S55C が存在しないためであり、S55C と比較的材質の近いものを選定している。

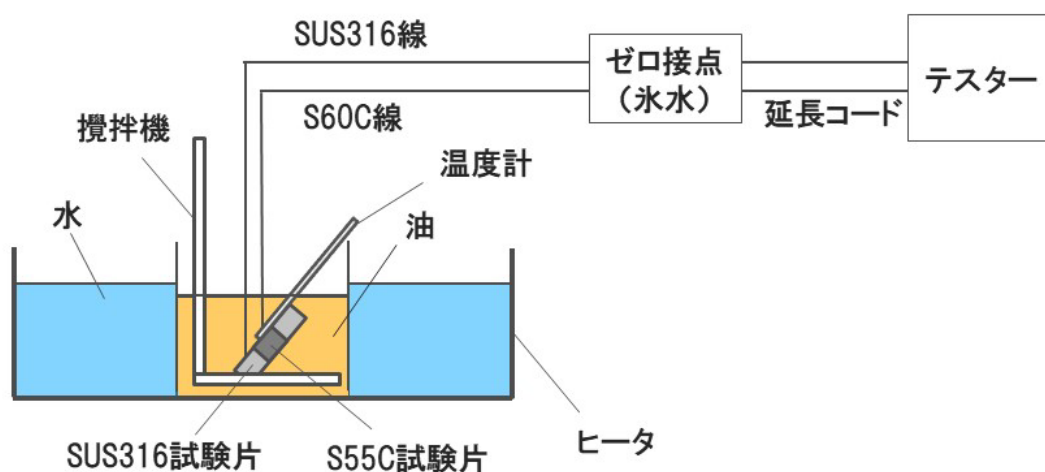


図 7 試験装置概略図

図 7 に示す試験器具を以下に示す.

- ヒータ (WATER BATH BWB_300) (図 8)



図 8 ヒータ

- 油 (JXTG エネルギー 無添加タービン油 68)
- ビーカー
- 攪拌機 (図 9)
- ゼロ接点 (氷水) (図 10)



図 9 攪拌機



図 10 ゼロ接点

- 延長コード
- テスター(DIGITALMULTIMETER RS-232C Shenzhen Yehai Sci & Tech. Deve)
(図 11)
- 温度計(DIGITAL THERMOMETER MK サイエンティフィック)(図 12)



図 11 テスター



図 12 温度計

- 金属線 (S60C, SUS316)
- 試験片 (S55C, SUS316) (図 13)

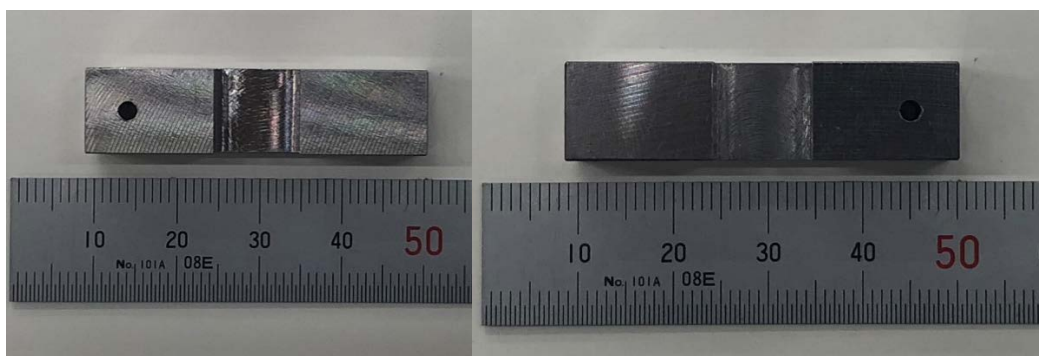


図 13 SUS316 試験片 (左)

S55C 試験片 (右)

3.3 試験方法

1. S55C 試験片と SUS316 試験片にそれぞれ S60C 線と SUS316 線を巻き付け、試験片同士を組み合わせ輪ゴムで固定する(図 14).
2. 油を入れたビーカーに組み合わせた試験片と温度計を入れ、そのビーカーを水の張ったヒータの中に入れた。
3. 保冷容器を氷水で満たし 273K まで温度を下げてゼロ接点とし、その中に温度計を入れ温度を確認した。
4. 金属線その他端を延長コードのコンセントプラグに巻き付けた。そして金属線とコンセントプラグの接触部をゼロ接点に入れた。
5. テスターに延長コードの他端を接続した。
6. 試験開始温度の熱起電力を測定し、さらに 298K~348K の 5K 間隔で熱起電力を測定した。試験中は油の温度を均一にするため攪拌機で攪拌し続けた。

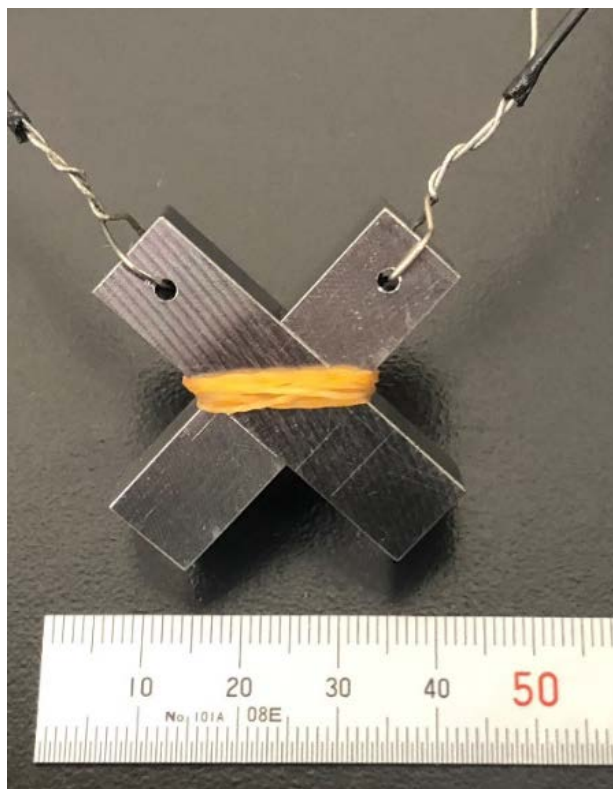


図 14 試験片固定



図 15 試験装置全体図

3.4 較正試験結果

図 16 に較正試験結果を示す。図 16 には 5 回分の試験結果をプロットしており、近似直線式は 5 回分の平均を示している。

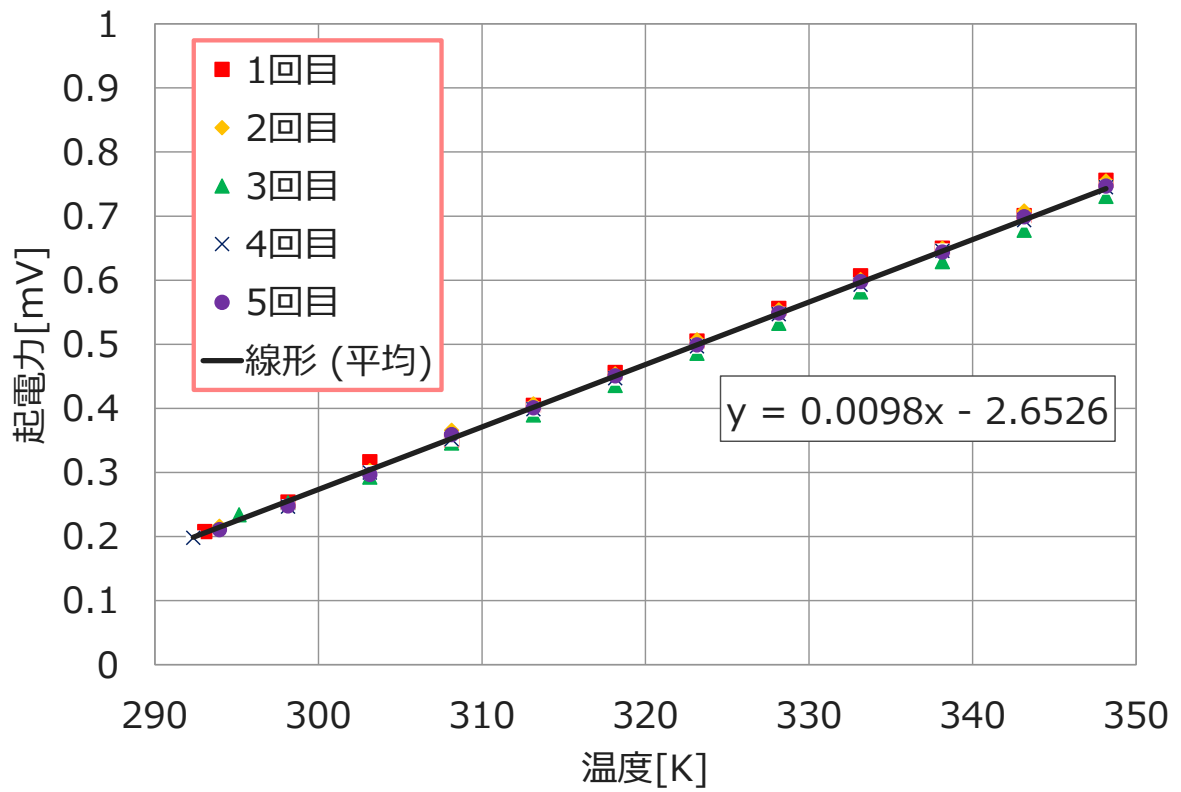


図 16 較正試験結果

3.5 まとめ

結果から得られた近似直線式より，熱起電力 V [mV]，温度 T [K]とすると，熱起電力-温度変換式は式(3.1)となる．

$$T = 102V + 271 \quad (3.1)$$

4 複数接点の熱起電力計測試験

4.1 試験目的

2 接点による熱起電力を計測し，式(3.1)代入した時，どのような関係が出るかを目的とする．組み合わせは S55C と SUS316 を用い，硬化処理は施していない．図 17 に 2 接点の熱起電力計測試験の概略図を示す．

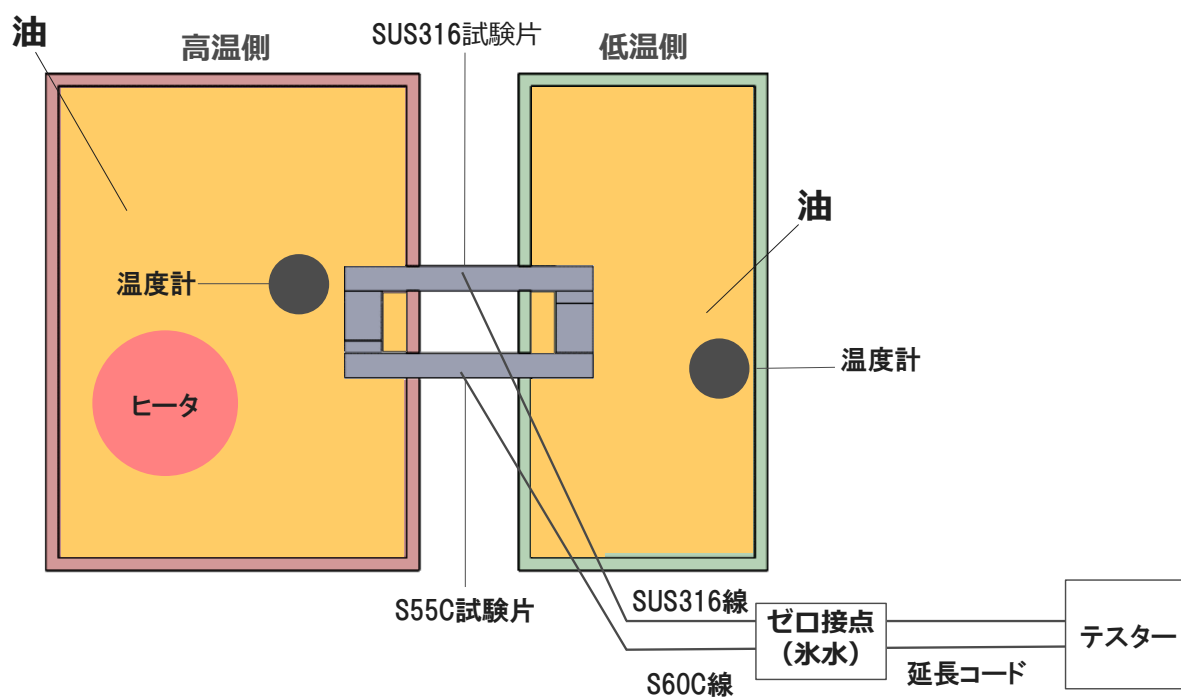


図 17 2 接点の熱起電力計測試験の概略図

- ヒータ（八光電機 A型温度コントロールセット）（図 18）



図 18 ヒータ

- アクリルケース（図 19）



図 19 アクリルケース

- 試験片(S55C 図 20, SUS316 図 21)



図 20 S55C 試験片



図 21 SUS316 試験片

4.2 試験方法

1. S55C 試験片と SUS316 試験片にそれぞれ S60C 線と SUS316 線を巻き付け、ジョイント型で試験片同士を組み合わせる(図 22).
2. 高温側と低温側のアクリルケースに油を入れ、組み合わせた試験片と温度計を入れる。そのとき、ヒータは高温側に入れる。
3. 保冷容器を氷水で満たし 273K まで温度を下げてゼロ接点とし、その中に温度計を入れ、温度を確認した。
4. 金属線その他端を延長コードのコンセントプラグに巻き付けた。そして金属線とコンセントプラグの接触部をゼロ接点に入れた。
5. テスターに延長コードの他端を接続した。
6. 試験開始温度の熱起電力を測定し、さらに高温側を 298K~348K の 5K 間隔、低温側は一定温度で熱起電力を測定した。試験中は油の温度を均一にするためミキサーで攪拌し続け、3 回計測した。

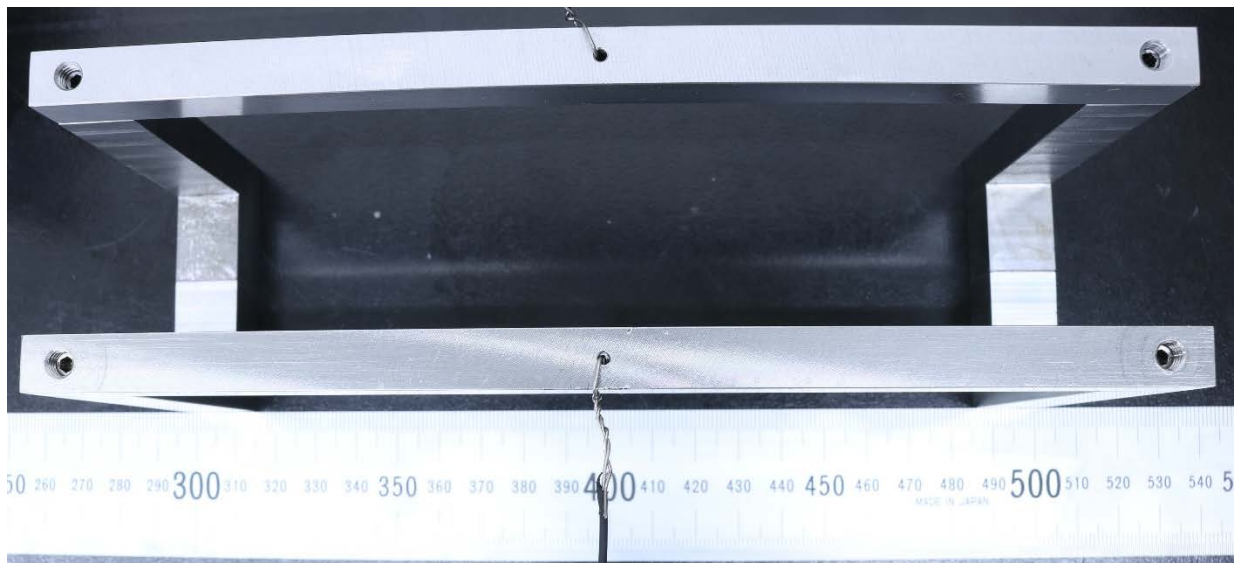


図 22 試験片組み合わせ

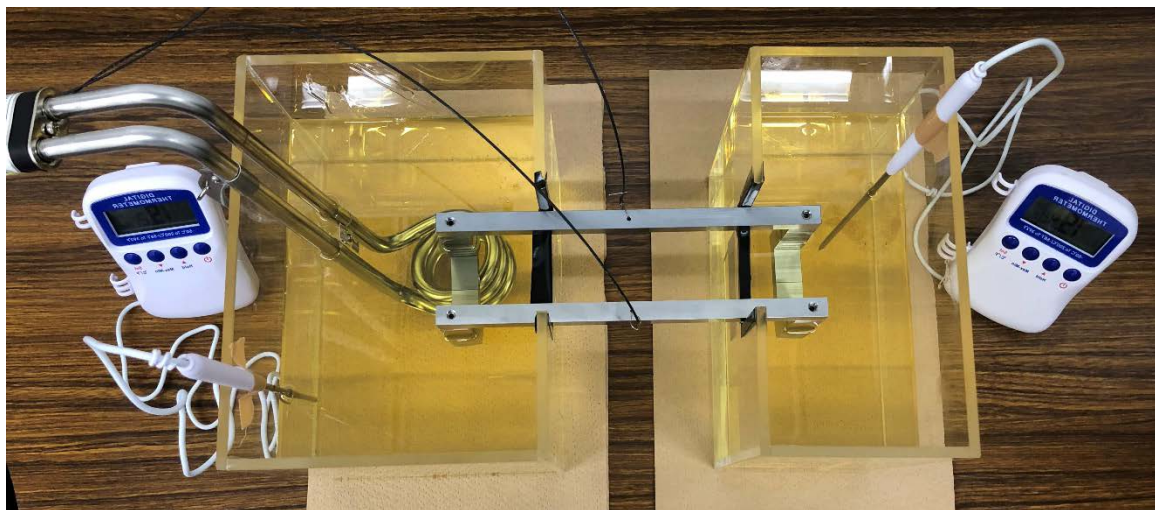


図 23 試験装置全体図

4.3 試験結果

表 1, 2, 3 に計測した試験結果を示す. 表には低温側, 高温側をそれぞれ[°C]と[K]で表している. 高温側の最初の温度は開始温度を示す. 図 24 に 3 回測定分の熱起電力, 油の平均温度, 最高温度を示す.

表 1 試験 1 回目

| 低温側[°C] | 低温側[K] | 高温側[°C] | 高温側[K] | 熱起電力[mV] |
|---------|--------|---------|--------|----------|
| 20 | 293.15 | 21.3 | 294.45 | 0.204 |
| 20 | 293.15 | 25 | 298.15 | 0.219 |
| 20 | 293.15 | 30 | 303.15 | 0.245 |
| 20 | 293.15 | 35 | 308.15 | 0.251 |
| 20 | 293.15 | 40 | 313.15 | 0.273 |
| 20 | 293.15 | 45 | 318.15 | 0.311 |
| 20 | 293.15 | 50 | 323.15 | 0.361 |
| 20 | 293.15 | 55 | 328.15 | 0.368 |
| 20 | 293.15 | 60 | 333.15 | 0.411 |
| 20 | 293.15 | 65 | 338.15 | 0.452 |
| 20 | 293.15 | 70 | 343.15 | 0.445 |
| 20 | 293.15 | 75 | 348.15 | 0.471 |

表 2 試験 2 回目

| 低温側[°C] | 低温側[K] | 高温側[°C] | 高温側[K] | 熱起電力[mV] |
|---------|--------|---------|--------|----------|
| 20 | 293.15 | 20.2 | 293.35 | 0.196 |
| 20 | 293.15 | 25 | 298.15 | 0.215 |
| 20 | 293.15 | 30 | 303.15 | 0.243 |
| 20 | 293.15 | 35 | 308.15 | 0.283 |
| 20 | 293.15 | 40 | 313.15 | 0.298 |
| 20 | 293.15 | 45 | 318.15 | 0.313 |
| 20 | 293.15 | 50 | 323.15 | 0.358 |
| 20 | 293.15 | 55 | 328.15 | 0.368 |
| 20 | 293.15 | 60 | 333.15 | 0.415 |
| 20 | 293.15 | 65 | 338.15 | 0.427 |
| 20 | 293.15 | 70 | 343.15 | 0.464 |
| 20 | 293.15 | 75 | 348.15 | 0.481 |

表 3 試験 3 回目

| 低温側 [°C] | 低温側 [K] | 高温側 [°C] | 高温側 [K] | 熱起電力 [mV] |
|----------|---------|----------|---------|-----------|
| 20 | 293.15 | 18.9 | 292.05 | 0.182 |
| 20 | 293.15 | 25 | 298.15 | 0.218 |
| 20 | 293.15 | 30 | 303.15 | 0.245 |
| 20 | 293.15 | 35 | 308.15 | 0.259 |
| 20 | 293.15 | 40 | 313.15 | 0.271 |
| 20 | 293.15 | 45 | 318.15 | 0.325 |
| 20 | 293.15 | 50 | 323.15 | 0.358 |
| 20 | 293.15 | 55 | 328.15 | 0.382 |
| 20 | 293.15 | 60 | 333.15 | 0.391 |
| 20 | 293.15 | 65 | 338.15 | 0.437 |
| 20 | 293.15 | 70 | 343.15 | 0.462 |
| 20 | 293.15 | 75 | 348.15 | 0.468 |

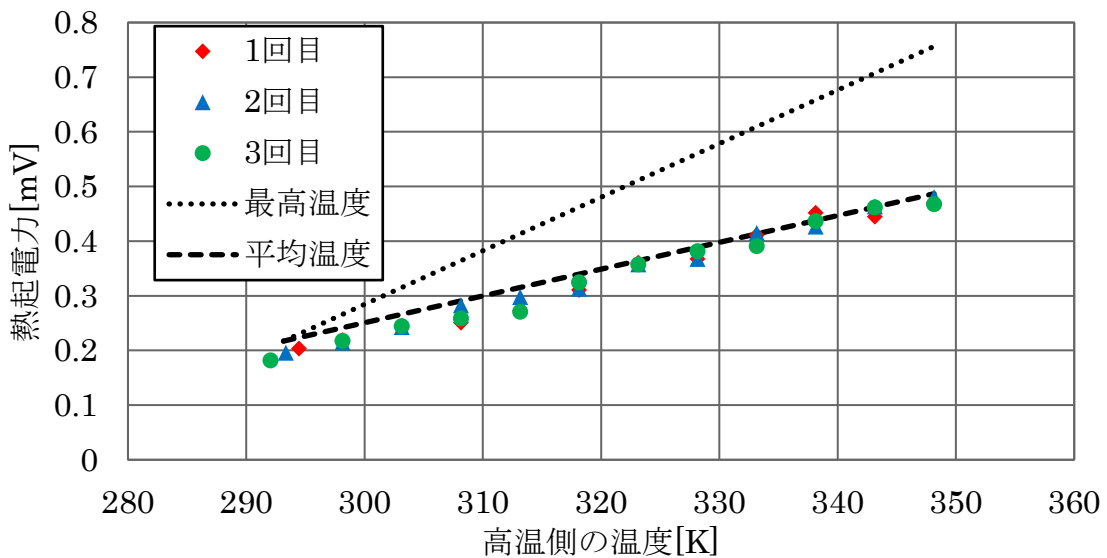


図 24 2 接点の熱起電力の試験結果

図 24 より，2 接点の熱起電力は全て同じような結果が得られたため，正しい熱起電力が計測できていると考えられる．また，油の平均温度と熱起電力が近い値を示していることがわかる．

4.5 まとめ

図 24 でのグラフの傾向より，複数接点に温度差が生じたとき，2 接点の熱起電力計測試験から平均温度に対応する熱起電力が計測されることが確認できた。

5 考察

5.1 複数接点の熱起電力

試験結果より，複数接点に温度差がある場合，平均温度に対応する熱起電力が計測した理由を考察する。

2 章の試験概要から歯車は線接触ではあるが，実際は表面粗さの影響で無数の凸部同士で接触していることを述べた，そこで，図 5 のように 2 点で接触していると仮定した場合，微小接触部における電気回路はキルヒホッフの法測から図 25 のように考えることができる。

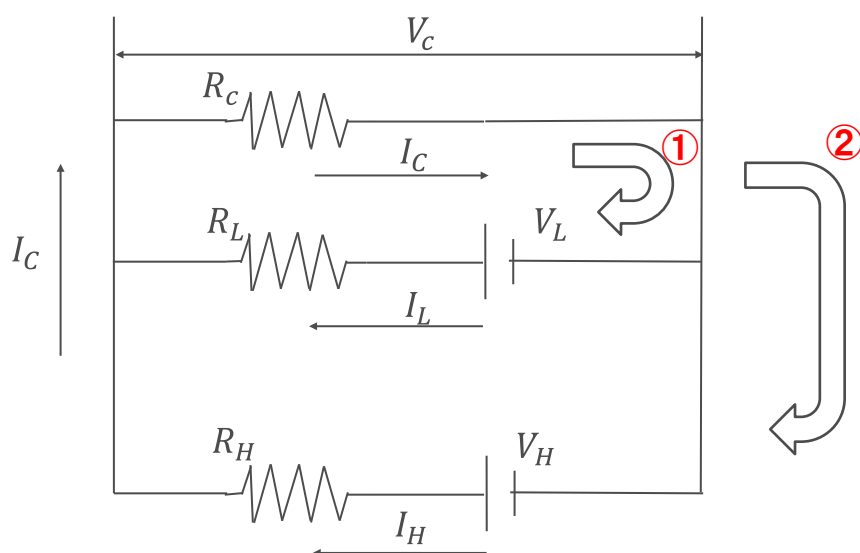


図 25 微小接触部における電気回路

V_C : 測定電圧

V_L : 低温側接点における電圧

V_H : 高温側接点における電圧

R_C : 計測器抵抗

R_L : 低温側接点における接触抵抗

R_H : 高温側接点における接触抵抗

I_C : 試験片および金属線の電流

I_L : 低温側接点における電流

I_H : 高温側接点における電流

微小接触部 1, 2 における電流は (5.1), (5.2) 式で求められ, 接触部全体の電流は (5.3) 式で求まる. ここで, キルヒホッフの法則より (5.4) 式が得られ, $R_c \gg R_L, R_H$ とし $R_L = R_H$ とすると, (5.5) 式が得られる.

$$I_L = \frac{V_L - V_c}{R_L} \quad (5.1)$$

$$I_H = \frac{V_H - V_c}{R_H} \quad (5.2)$$

$$I = \frac{V_c}{R_c} \quad (5.3)$$

$$I = I_L + I_H \quad (5.4)$$

$$V_c = \frac{V_L + V_H}{2} \quad (5.5)$$

したがって, (5.5) 式より歯車の接触線上の微小接触部 1, 2 で生じる起電力は平均値となることから, 複数接点試験の熱起電力も平均値を計測したと考えられる.

5.2 試験片の接触方法

試験片同士の接触点は, 最初の構想では図 26 のように試験片をジョイント型にし, はめ込むことで熱起電力を計測していた. 赤丸はジョイントをはめ込みしときの接触部を表している.

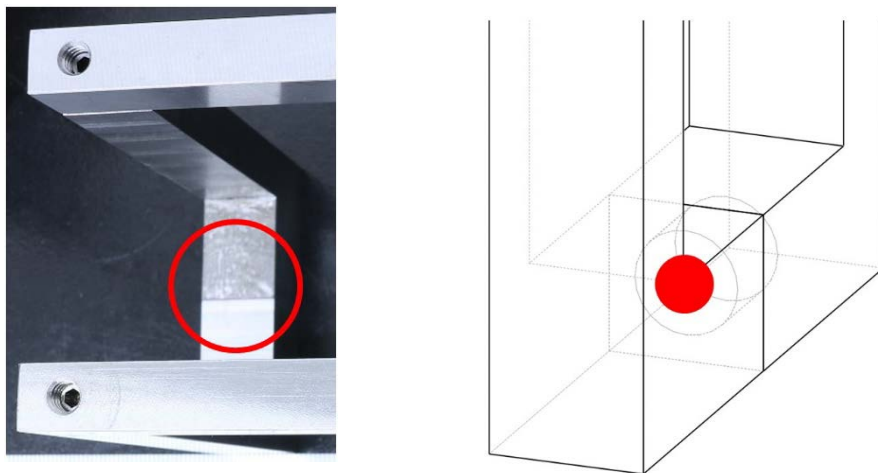


図 26 ジョイントの接触点

はめ込んだ状態で試験を行うと，試験片の接触点が内部にあるため，熱が接触点にあまり伝わらず，熱起電力を正確に計測することができず，ばらつきが出た．そこで，図 27 のように接触する場所を変更し，熱が伝わりやすいようにジョイント部分をはめ込むのではなく，少しずつらして接触させた．また，接触部分が不安定だったため，たこ糸で固定した．

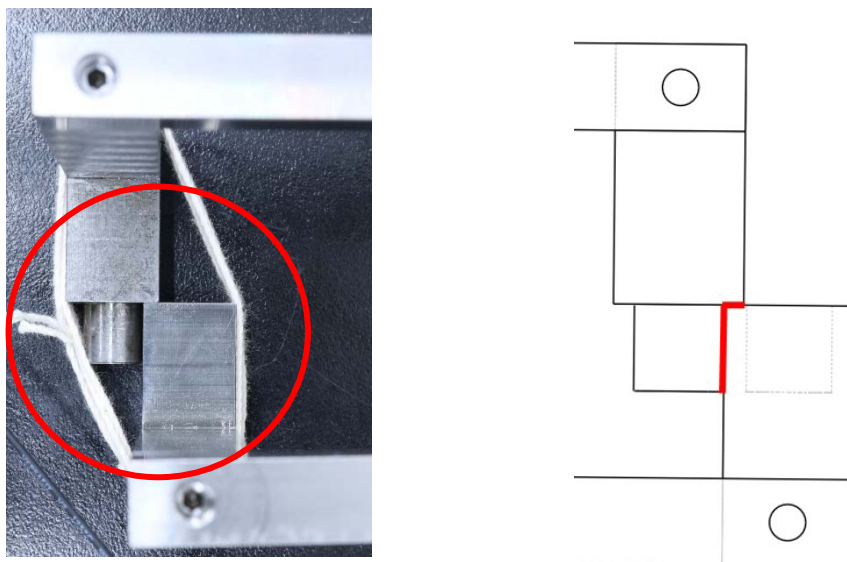


図 27 接触面積を小さくした図（赤線は接触部分）

図 28 には，改善前と改善後の比較した結果を示す．図 28 より，接触部を改善することでばらつきを抑えることができた．また，接触部は熱が伝わりやすくする必要があったことがわかった．今回は試験片の固定をタコ糸で行ったが，ずれる可能性があるため，固定法は改善が必要である．

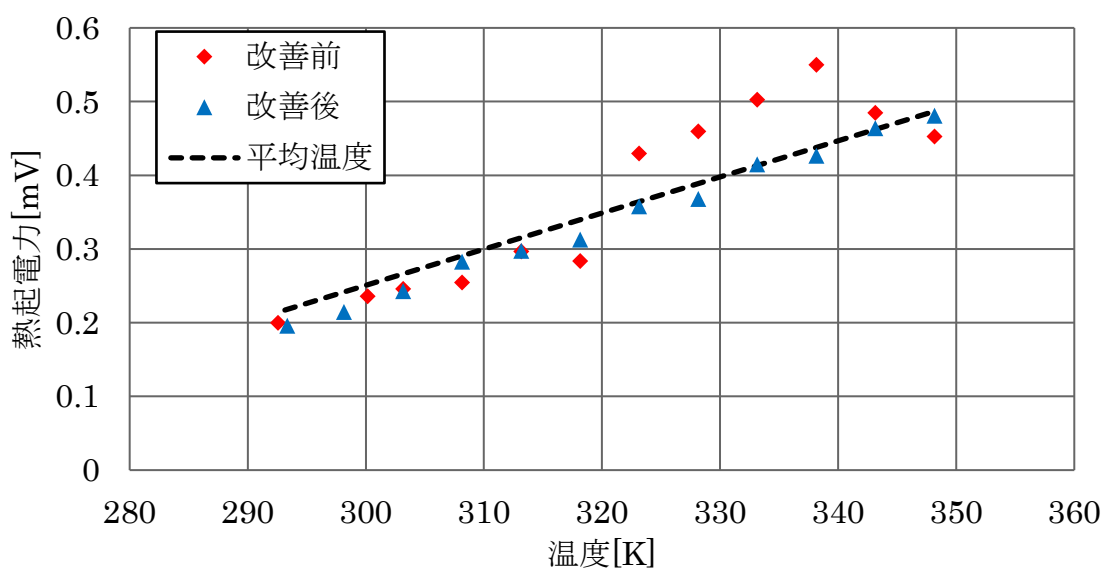


図 28 改善前と改善後の比較

6 結言

6.1 まとめ

はすば歯車の歯面温度計測において、接触線が傾いていることから、接触線上で温度が異なる。熱起電力校正試験で得た温度-熱起電力変換式を用いて、複数接点に温度差がある場合のゼーベック効果で発生する熱起電力はどのような値なのか計測を行った。

2点で高温側と低温側に温度差があった時、ゼーベック効果で発生する熱起電力は油の平均温度の熱起電力と近い値を示した。式(3.1)の温度-熱起電力変換式と比較を行うと誤差が小さく、ほぼ等しい結果になり、キルヒホッフの法則からも平均値の起電力が計測することも理論的に確認できた。また試験片に熱が伝わりにくかったため、接触方法を変更することにより、より正確に計測することが可能になった。

6.2 今後の展望

今後は、金属の組み合わせにおいて、熱起電力が大きいと歯面温度計測で必要になるため、単一素材で材料入手が容易で硬化処理が施しやすいS55CとSUS316の他に、熱起電力が大きい金属の組み合わせがないかを調査する。

また動的熱電対法で、はすば歯車の歯面温度計測を行い、試験値と推測値を比較する場合、接触線上で温度が異なるが今回の実験から平均温度を用いる。

参考文献

- (1) 東崎康嘉, 後藤卓也, 奈良智明, 保阪瞭太: 軸方向すべり速度を有する硬化はすば歯車の表面温度評価手法に関する研究, 日本機械学会論文集, vol.85, No.872, (2019), p.18-00482
- (2) 計測自動制御学会, 温度計測部会: 温度計測 基礎と応用, コロナ社, (2018), p.154-163
- (3) 寺内喜男: 歯車の歯面温度の測定, 精密機械, vol.36, No.420, (1970), p.34-41
- (4) 東崎康嘉, 松下直矢, 隅谷悠司, 後藤卓也, 田中智之: 硬化歯車の高面圧時表面温度評価手法に関する基礎的研究, 日本機械学会論文集, vol.83, No.854, (2017), p.17-00272

謝辞

本実験は「熱の実験コンテスト」において、助成と多大なご協力を頂きました株式会社八光電機様に深く感謝し、心より御礼申し上げます。

本実験の遂行並びに本レポートをまとめるにあたり、終始懇切丁寧な御指導と有益な御助言、そして暖かい励ましのお言葉を賜りました近畿大学理工学部機械工学科教授東崎康嘉先生に深く感謝し、心より御礼申し上げます。また、本実験を遂行するにあたり、様々なご指導を頂きました近畿大学理工学部機械工学科動力伝達システム研究室の先輩方に心からの気持ちと御礼を申し上げます。謝辞にかえさせていただきます。