| | |
|---|---|
| 氏名 | やました　ちから<br>山　下　主　税 |
| 授与学位 | 博士（工学） |
| 学位授与年月日 | 平成 27 年 3 月 25 日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第 4 条第 1 項 |
| 研究科，専攻の名称 | 東北大学大学院工学研究科（博士課程）ナノメカニクス専攻 |
| 学位論文題目 | 電気鉄道における集電材料の通電摩耗機構に関する研究 |
| 指導教員 | 東北大学教授　足立　幸志 |
| 論文審査委員 | 主査　東北大学教授　坂　　真澄　　東北大学教授　横堀　壽光<br>東北大学教授　琵琶　哲志 |

# 論文内容要旨

電気鉄道では，集電材料であるトロリ線とパンタグラフすり板を接触しゅう動させ，変電所から送られる大電力を効率よく車両に供給することで，高速かつ高密度な運行を可能としている．この集電材料の寿命は摩耗によって決定され，車両の高速化に伴う集電電流の増加やパンタグラフ数削減によってジュール熱に起因する摩耗が増大する傾向にあり，摩耗管理や取替などのメンテナンスにかかるコストを削減するため，摩耗の抑制が必須の課題となっている．

これまで現地調査や定置試験結果に基づいて，集電材料の摩耗形態を凝着による「機械的摩耗形態」，および離線時のアークによって損耗する「電気的摩耗形態」に大別し，著大摩耗が発生する電気的摩耗を低減するため，離線アークの抑制を主たる摩耗対策として実施してきた．一方で，離線アーク多発箇所におけるトロリ線摩耗は非常に小さいという事例もあることから，実機で起こる通電摩耗現象はアーク損耗だけで説明しきれず，未だ解明されていないといえる．ここで，実機で発生する摩耗形態を正確に把握し，著大摩耗が発生する摩耗形態の遷移機構を解明することができれば，離線アーク抑制とは異なる新たな耐摩耗設計指針の提案が可能となる．

本論文では，ジュール熱に起因する摩耗形態を顕在化させる摩耗試験機を新たに開発し，摩耗特性および摩耗面の観察結果より，集電材料の摩耗が著大となる摩耗形態を明らかにする．また，酸化膜などの介在物を考慮した新たな接点モデルを用いた電位分布および温度分布解析により通電摩耗形態の遷移現象を解明し，摩耗形態の支配パラメータを明らかにする．さらに，摩耗形態の支配パラメータである材料特性の組合せによってトロリ線著大摩耗が発生する摩耗形態を抑制し得ることを確認し，摩耗形態制御による新たな耐摩耗設計指針の可能性を示す．本論文はこれらの研究成果をまとめたもので，全編 7 章からなる．

第 1 章では，本研究における研究背景と研究の意義，目的について述べた．

第 2 章では，通電下の摩耗形態を分別・観察するための試験方法を検討した結果，従来のようなトロリ線を円盤とする回転摩耗試験機ではなく，Fig. 1 に示すようにトロリ線を現場と同様直線的に配置し，すり板をスライダーとして間欠しゅう動させる直動型摩耗試験機を開発した．本摩耗試験機では，接触力変動の指標である標準偏差が約 0.2N と十分に小さく，摩擦条件を厳密に制御した摩耗試験が可能であり，摩耗形態混在の抑制が期待できる．また，直動型摩耗試験機の通電機構は，従来の回転型摩耗試験のようなスリップリングを必要としないため，トロリ線とすり板以外の通電しゅう動部分がなく，接触電圧の精緻な測定が可能であり，$\varphi$-$\theta$ 理論を用いることでジュール熱に起因する接点温度を精緻に把握することができる．

第 3 章では，硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せにおいて，通電電流および接触力を変化させた摩耗試験を実施し，摩耗特性および摩耗面の観察結果より，これまで機械的摩耗形態と電気的摩耗形態の 2 つのみと考えられてき

た通電下の摩耗形態を，Fig. 2 に示すように①機械的摩耗形態と②トロリ線溶融摩耗形態および③すり板溶融摩耗形態の 3 つに分類できることを明らかにした．

各摩耗形態の特徴として，機械的摩耗形態では，トロリ線およびすり板は溶融せず，摩耗特性は電流および接触力に依存しない．トロリ線溶融摩耗形態では，トロリ線のみが溶融し，通電時のトロリ線摩耗率が最大となる．すり板溶融摩耗形態では，すり板が溶融しすり板比摩耗量が著大になる一方で，トロリ線は溶融せずトロリ線摩耗率は減少する．なお，アークが発生する条件ではすり板溶融摩耗形態となり，トロリ線著大摩耗の発生要因は従来考えられているアークではなく，溶融ブリッジであることを明らかにした．

また，通電しゅう動時の接触電圧波形より，平均値+3σ(σ：標準偏差)を統計的最大接触電圧 $V_c$ とし，次式に示す φ-θ 理論より接点の最高温度 $\theta_{max}$ を推定した．

$$\theta_{max} = \left(\frac{V_c^2}{4L} + T_0^2\right)^{1/2} \qquad (1)$$

ここで，$L$ はローレンツ数(=2.4×10$^{-8}$[(K/V)$^2$])，$T_0$ は両部材のバルク温度(=室温)[K]である．電流と接触力をパラメータとした各摩耗形態の発生条件および最高接点温度の関係を Fig. 3 に示す．この図より，接点最高温度がトロリ線融点 1334K およびすり板融点 1646K に達する条件で，摩耗形態が遷移することを明らかにした．ここで，すり板溶融摩耗形態における接点最高温度はトロリ線の融点 1334K を十分に超えており，この条件でトロリ線が溶融しない現象を解明することが，トロリ線の溶融に起因する著大摩耗の抑制に繋がると考えられる．

第 4 章では，通電電流を 100A とし，すり板の見かけの接触面積を 4 段階変化させた摩耗試験を実施した．摩耗特性および摩耗面の観察結果より，各条件における摩耗形態を分類し，見かけの接触面積と接触力をパラメータとした各摩耗形態の発生条件および最高接点温度の関係を Fig. 4 に示す．この図より，接点最高温度がすり板融点 1646K に達する条件では，見かけの接触面積によらずすり板が溶融しすり板溶融摩耗形態となった．一方で，接点最高温度がトロリ線融点 1334K に達する条件では，見かけの接触面積 70mm$^2$ 以上でトロリ線溶融摩耗形態となり，見かけの接触面積 50mm$^2$ 以下では機械的摩耗形態となった．

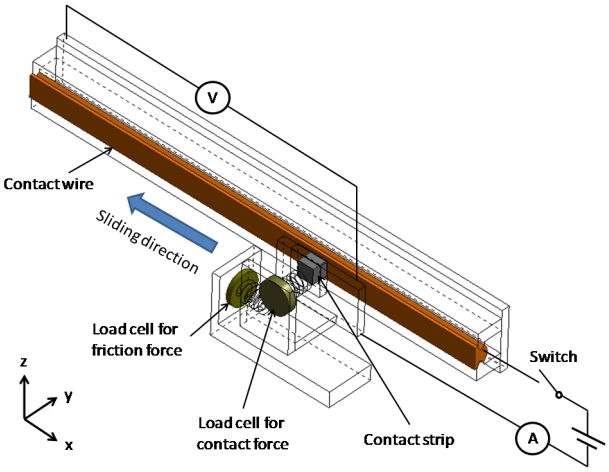



Fig. 1 Schematic diagram of linear wear test apparatus

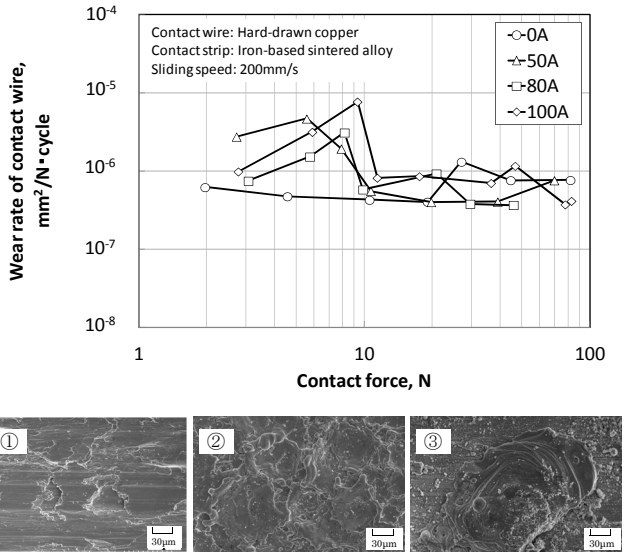



Fig. 2　Wear rate and wear surface of contact wire

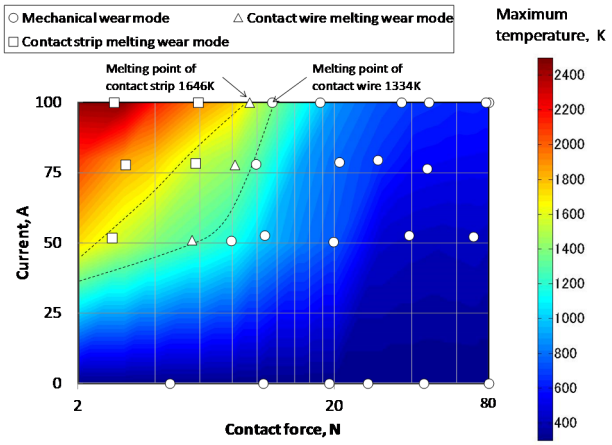



Fig. 3 Correlation between wear mode and maximum contact temperature

摩耗試験の結果，見かけの接触面積50mm²以下では，接点最高温度によらずトロリ線は溶融せず著大摩耗も発生しなかった．この現象を解明することで，トロリ線の溶融に起因する著大摩耗の抑制に繋がると考えられる．

第 5 章では，これまで確認された摩耗現象を解明するため，Fig. 5 に示すように接触界面において無視し得ない酸化膜や摩耗粒子などの被膜抵抗を考慮した接点モデルを導入し，接点最高温度のみならず接点近傍の電位分布および温度分布を解析した．

解析結果の例を Fig. 6 に示す．硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板では電気抵抗率が異なるため，電位分布や温度分布は非対象となり，接点最高温度とトロリ線表面温度は異なることが明らかとなった．また，トロリ線表面の被膜抵抗を考慮することで初めてトロリ線表面温度の上昇を再現することができ，被膜抵抗が摩耗形態遷移に大きな影響を及ぼすことを明らかにした．

Fig. 6 より，電位分布と温度分布が相似の関係であり，接触境界の温度 $\theta_c$ は次式で与えられる．

$$\theta_c = \left[\frac{V_c^2}{L}\{\alpha - \alpha^2\} + 300^2\right]^{1/2} \qquad (2)$$

$$\alpha = \frac{\dfrac{\rho_2}{4a} + \dfrac{f_2\rho_2 d_2}{\pi a^2}}{\dfrac{\rho_1 + \rho_2}{4a} + \dfrac{f_1\rho_1 d_1 + f_2\rho_2 d_2}{\pi a^2}} \qquad (3)$$

ここで，$\alpha$ は電位分布上の接触境界位置を示す無次元係数，$\rho_{1,2}$ はトロリ線およびすり板の電気抵抗率[Ωm]，$a$ は接点半径[m]，$f_{1,2}$ は母材に対する被膜抵抗の増分を示す係数，$d_{1,2}$ はトロリ線およびすり板の被膜厚さ[m]である．これらの式より，トロリ線の被膜抵抗の増加に伴い $\alpha$ は減少しトロリ線温度は上昇する．一方で，すり板の被膜抵抗の増加に伴い $\alpha$ は増加しトロリ線温度は低下する．なお，硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せにおいて，被膜抵抗のない清浄な接触状態では $\alpha_0$=0.96 となる．

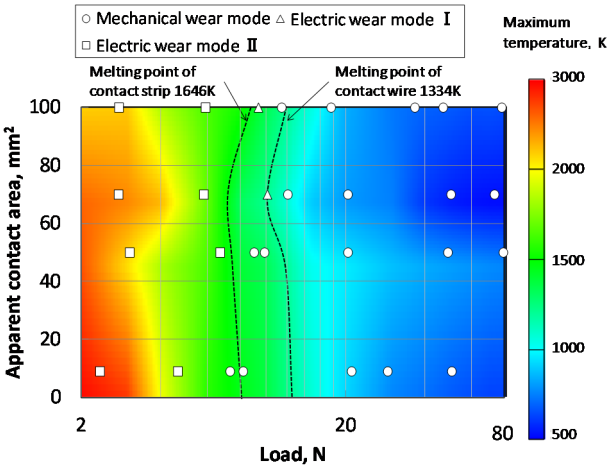



Fig. 4 Correlation between wear mode and maximum contact temperature

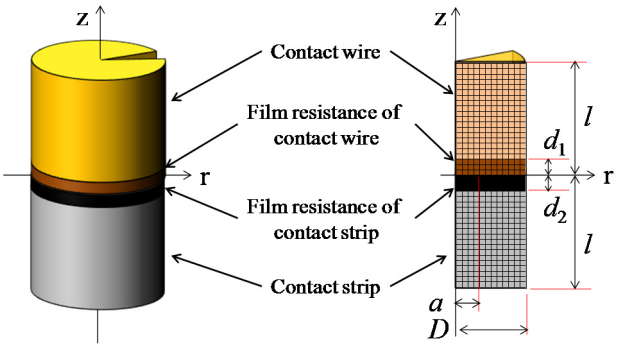



Fig. 5 Schematic diagram of analysis model with film resistance

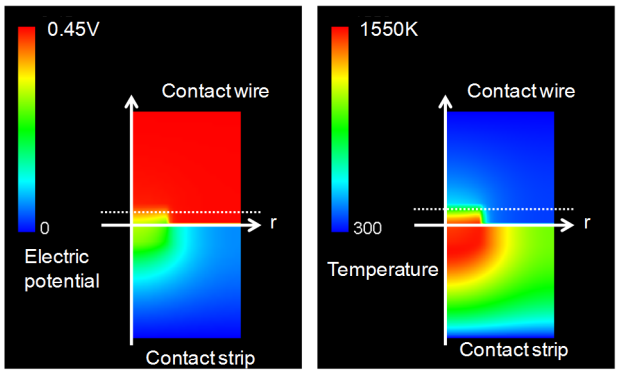



Fig. 6 Electric potential and temperature distribution (Contact voltage: 0.45V, Thickness of film resistance: 10μm, film resistance factor: f1=100)

式(1)～(3)を用いて，トロリ線およびすり板が溶融する条件を Fig. 7 に示す．第 3 章および第 4 章の試験結果より，材料の溶融が摩耗形態の遷移現象の要因であることは明らかであり，Fig. 7 は接触電圧と接触抵抗によって摩耗形態が遷移することを明示するものであり，摩耗形態マップと呼称する．

第 3 章で確認した，すり板溶融摩耗形態においてトロリ線が溶融しない現象については，式(3)および Fig. 7 より，接触電圧の増加に伴いすり板が溶融すると，すり板表面に大きな被膜抵抗が発生するため，$\alpha$ が増加しすり板のみが溶融する

状態になったと考えられる．また，第 4 章で確認した，見かけの接触面積 50mm$^2$ 以下では，接点最高温度によらずトロリ線が溶融しない現象については，見かけの接触面積の減少に伴いトロリ線の摩耗深さが増加し，式(3)の $d_1$ が減少するため，$\alpha$ が増加したものと考えられる．

いずれの通電摩耗現象も摩耗形態マップによって説明でき，摩耗形態マップを構成する接触電圧と材料融点，および接触境界係数 $\alpha$ を摩耗形態の支配パラメータとした．

第 6 章では，摩耗形態マップに基づき，摩耗形態制御によるトロリ線著大摩耗抑制の可能性を検証した．

上述した摩耗形態支配パラメータのうち，材料の組合せのみで設定可能な融点および清浄時接触境界係数 $\alpha_0$ に着目し，トロリ線溶融摩耗形態およびすり板溶融摩耗形態の発生しやすさの目安となる材料組合せマップを Fig. 8 に示す．この図において，最もトロリ線が溶融しにくい領域は①であり，トロリ線融点をすり板融点以上に設定すること，$\alpha_0$ を大きく設定する，すなわちトロリ線の電気抵抗率を小さく且つすり板の電気抵抗率を大きく設定することがトロリ線の溶融を抑制する指針となる．

本論文ではトロリ線材料として，高い融点を持ち，電気抵抗率が小さく，酸化しにくいニッケルを選定した．また，ニッケルに対して領域①となるよう，すり板材料には鉄系焼結合金を選定した．

ニッケルトロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せにおけるトロリ線の摩耗率を Fig. 9 に示す．この図より，期待通りトロリ線の溶融は発生せず，著大摩耗も発生することはなかった．このことより，集電材料の摩耗形態は制御することが可能であり，離線アークの抑制とは異なる新たな耐摩耗設計の可能性を示した．

第 7 章は本論文の結論を述べた．

以上より，本論文では実機で発生し得る集電材料の通電摩耗形態を明らかにし，トロリ線の著大摩耗の要因がこれまで考えられてきた離線アークではなく，溶融ブリッジであることを明らかにした．また，各摩耗形態の発生条件を明示する「摩耗形態マップ」を提案し，その支配パラメータ制御により摩耗形態を制御できることを確認し，新たな耐摩耗設計指針の可能性を示した．これらの結果は電気鉄道のみならず通電しゅう動分野における耐摩耗設計に応用可能である．

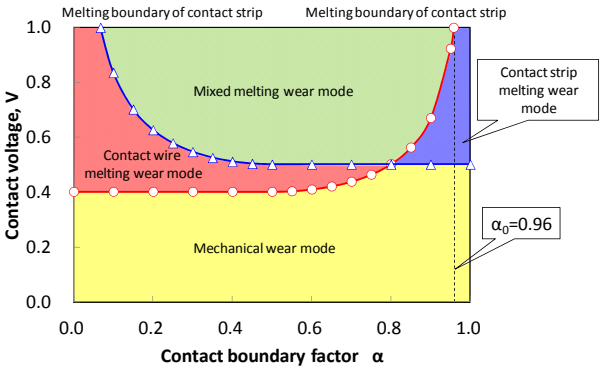



Fig. 7 Wear mode map for combination of hard-drawn copper contact wire and iron-based sintered alloy contact strip

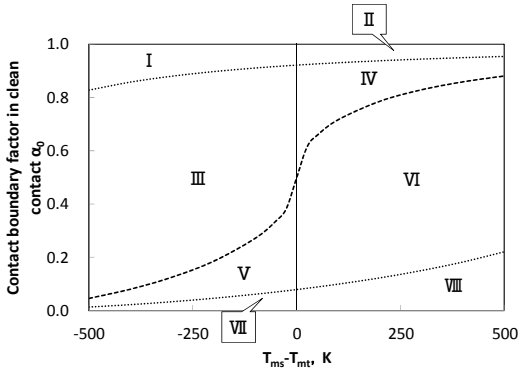
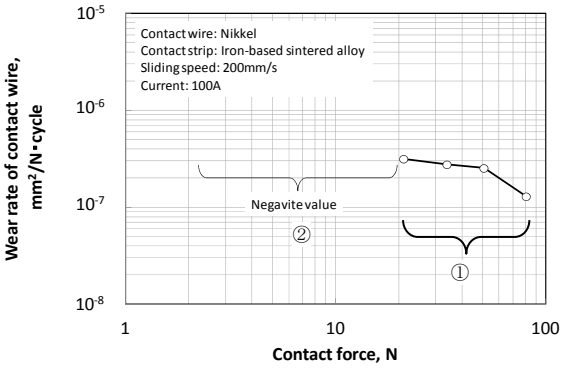



Fig. 8 Material combination based on difference of melting point and contact boundary factor in clean contact



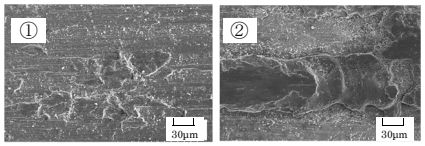




Fig. 9 Wear rate and wear surface of contact wire

# 論文審査結果の要旨

電気鉄道の集電材料であるトロリ線とパンタグラフすり板は，近年の高速化に伴う集電電流の増加ゆえに耐摩耗性に優れた材料の開発が急務の課題となっている。これに対し従来は，機械的摩耗に加え離線時のアークに起因した電気的摩耗がトロリ線の著大摩耗の主原因と認識され，離線アークの抑制が有益な摩耗対策と認識されてきた。しかし実機において発生する通電摩耗に関する情報は未だ交錯しており，抜本的な耐摩耗設計指針が存在していないのが現状である。

このような背景のもと，本論文では，ジュール熱に起因する摩耗形態を顕在化させた摩耗試験機を新たに開発し，アークの発生以上に通電時の溶融ブリッジに起因した電気的摩耗の抑制が重要であることを明らかにした。また，酸化膜や摩耗粒子などの介在物を考慮した新たな接点モデルを用いた電位分布および温度分布解析により通電摩耗形態の遷移現象を解明し，摩耗形態制御による新たな耐摩耗設計指針の可能性を示している。本論文はこれらの研究成果をまとめたものであり，全編 7 章からなる。

第 1 章は緒論であり，本研究の背景，目的および構成を述べている。

第 2 章では，摩擦条件の厳密な制御とジュール熱に起因する接点温度の精緻な測定が可能である直動型摩耗試験機を開発し，電気鉄道において実際に発生する通電下における集電材料の摩耗形態を再現できることを明らかにしている。これは，電気鉄道における集電材料の通電摩耗機構を研究する上において有益な成果である。

第 3 章では，第 2 章において開発した装置を用いることにより硬銅トロリ線と鉄系焼結合金すり板の組合せにおいて，無通電時と同様の機械的摩耗に加え，トロリ線溶融摩耗およびすり板溶融摩耗の 3 つの摩耗形態が発生することを明らかにしている。これは，トロリ線の摩耗の主要因が従来認識されているアークではなく通電時の溶融ブリッジであることを示しており，集電材料の通電摩耗機構を理解するために重要な知見である。

第 4 章では，通電摩擦時における接点最高温度がすり板の融点に達する条件すべてにおいてすり板の溶融摩耗が発生するのに対し，トロリ線は，接点最高温度がその融点に達する条件においても見かけの接触面積によって摩耗形態が変化し，50mm$^2$ 以下の見かけの接触面積では，溶融摩耗が発生しないことを明らかにしている。これは，集電材料の通電摩耗機構のモデルを構築する上で有益かつ重要な知見である。

第 5 章では，接触表面に存在する酸化膜や摩耗粒子などの被膜抵抗を考慮した接点モデルを導入し，接点最高温度のみならず接点近傍の電位分布および温度分布を解析することにより，摩擦時のトロリ線とすり板の表面温度分布や摩耗形態が被膜抵抗により大きな影響を受けることを明らかにしている。さらに接触電圧および新たに定義した接触境界係数を両軸とした「摩耗形態マップ」により集電材料の通電摩耗形態の発生条件を説明し得ることを明らかにしている。これらは，通電下における集電材料の耐摩耗設計のために重要な成果である。

第 6 章では，第 5 章において提案された摩耗形態マップに基づき集電材料の通電摩耗形態制御のための「材料組合せマップ」を提案している。さらにそのマップに基づき選定されたニッケルトロリ線と鉄系焼結合金すり板において，予測通りトロリ線の溶融に起因する著大摩耗を抑制できることを実証し，提案するマップの有効性を示している。 これは，従来の離線アーク抑制とは異なる電気鉄道の集電材料の耐摩耗設計のための重要な成果である。

第 7 章は結論である。

以上要するに本論文は，通電時のジュール熱に起因する集電材料の摩耗形態を明らかにし，接触表面の被膜抵抗を考慮した電位分布および温度分布解析により，各摩耗形態の遷移機構を明らかにするとともに，摩耗形態の発生予測および摩耗形態を制御する材料組合せの選定を示唆することが可能な電気鉄道の集電材料の耐摩耗設計指針を提案したものであり，ナノメカニクスおよび機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。