

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04225

研究課題名(和文) 曲率を有し発熱を伴う接触面における熱解析—転動体を対象とした微視的伝熱モデル構築

研究課題名(英文) Heat transfer at the contact point of rolling and heat generating elements

研究代表者

武野 計二 (Takeno, Keiji)

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号：70705201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：弾性変形による発熱と熱移動を把握するため、平面と球面の接触部位を要素現象と捉え、温度計測と実験パラメータの関係に基づく伝熱モデルを構築し、また雰囲気圧力の影響を把握した。まず上下の端面を一定温度に制御した球体-平面間の接触熱抵抗の大気中における実験により、球体や平板内部の温度分布を計測することで接触点を通る熱流束と接触熱抵抗を求め、熱伝導度、および接触面積の関係を記述できる伝熱モデルの構築とシミュレーションによる検証を実施した。さらに、接触加重(面圧)を変化できる真空チャンバーを作製し、雰囲気気体としてN₂またはHeの圧力を変化させ、雰囲気圧力の熱抵抗に及ぼす影響について調査した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工作機械など荷重がかかる精密回転体の軸受部分の多くは、ボールねじやベアリング構造となっているが、回転体軸受においてベアリングでの発熱と温度上昇の現象は過去より知られていたものの、近年の工作機械や宇宙機器における要求精度の向上により、ボールの温度管理技術が新たに重要視されている。本研究では、詳細な温度計測と実験パラメータ変化に基づく伝熱モデルの構築を行い、転動体の温度変化に関する予測を可能とした。また宇宙機器を想定し、雰囲気圧力を変化させ、分子流域での接触熱抵抗の貴重なデータが得られた。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the details of the heat generation pattern due to elastic deformation, the contact point between a flat surface and a sphere was considered as an elemental phenomenon, and a heat transfer model was constructed based on the relationship between temperature measurements and experimental parameters, as well as the effect of ambient pressure. Experiments was conducted in air on the contact heat resistance between a sphere and a flat surface with the upper and lower end surfaces controlled at a constant temperature, measured the temperature distribution inside the sphere and flat surface, obtained the heat flux through the contact point and the contact heat resistance, and constructed a heat transfer model that can describe the relationship between heat conductivity and the contact area, and verified the model by simulation. The model was verified by simulation.

研究分野：伝熱

キーワード：接触熱抵抗 球面 低圧力雰囲気 分子運動 クヌッセン流

1. 研究開始当初の背景

荷重が掛かる精密回転体の軸受部分の多くはベアリング等の回転体構造となっているが、例えば 5mm 直径の炭素鋼ボールが 20 温度上昇すると約 1 μ m 膨張する。この値はボールの工作寸法精度と同等であり、ボールの温度管理は機器の精度確保に極めて重要であると言える。この課題は、近年の工作機械や宇宙機器における位置決め要求精度の向上により、新たに温度管理技術が重要視され、2010 年以降、詳細な伝熱モデルを構築する為の実験や解析が開始されている状況にある。ベアリング等の転がり軸受けでは主にボールの弾性変形と変形回復過程で熱が発生するが、その発生速度や位置は回転体の材料条件と運用条件で決まる。その熱は蓄熱、軸および外周への放熱に分配されるが、この熱の分配は回転体の接触部で生じるので、分配は材料条件と接触面条件に依存する。しかしながら現状での軸受けに係わる熱解析では、接触点を発熱体としたマクロ的解析手法や、実験的検証が未遂の簡易的なモデル計算が主体である。これらマクロ的解析から脱却し、詳細な温度管理技術を確立するために、弾性変形による発熱の分配を知ること、即ち平面と球面の接触部位を要素現象と捉え、詳細な温度計測と実験パラメータの関係に基づく伝熱モデルの構築が不可欠である。

2. 研究の目的

弾性変形による発熱パターンを把握しその分配を明確にするため、平面と球面の接触部位を要素現象と捉え、温度計測と実験パラメータの関係に基づく伝熱モデルを構築し、また雰囲気圧力の影響を把握すること、さらに、宇宙空間を想定し、外部から接触加重(面圧)を変化できる真空チャンバーを作製し、周囲圧力の接触熱移動への影響について調査することを目的とした。

3. 研究の方法

図 1 に実験計測の概念を示す。この中で、球体と平面部分の熱移動が未知の部分であるので、図 2 に示す要素実験を考えた。試験片上部(高温部)のヒータには一定電力を供給し、ヒータで発生した熱は試験片を通過し、冷却水により一定温度に保った下部のヒートシンクへ(低温部)と流れる。微妙な圧力設定が可能な微量吐出型油圧ポンプを用いて、上部から荷重を加えることにより、接触部の押しつけ圧力(面圧)の調整を行った。また、試験片には断熱材を巻き、外部への熱損失の影響を最小限とした。なお、今回の試験では試験片は、ベアリングの回転体として代表的な耐摩耗性金属である SUJ2(高炭素クロム軸受鋼鋼材)を選定した。スケール効果については、半球に加工した試験片を直径 1 インチ(25.4mm)および 1/2 インチ(12.7mm)に変化させて調べた。

試験片の軸上に合計 8 本の熱電対を埋め込み、図 2 に示すように温度分布を計測し、熱抵抗を求めた。用いた熱電対は 0.4mm 径、絶縁シース K 型であり、恒温槽と標準白金測温抵抗体を用いて ± 0.02 の誤差以下まで校正した。そして、試験片の外形が曲率を有する部分に 5 箇所、曲率が無い円筒の部分に 4 箇所の穴を放電加工で中心軸の深さまで開け、その中に熱電対を通して設置した。

4. 研究成果

(1) 球面 - 平面間の熱移動

図 3 に、荷重を変化させた場合の、試験片中心軸の温度分布の計測結果例を示す。図より、円柱部の温度は距離に比例して変化するが、曲率がある半球の部分では熱流が縮流し、接触部位近傍で大きな温度変化を呈することがわかる。そして、荷重が小さくなる程、その温度変化は大きくなり熱抵抗が増加した。図 4 に総括熱抵抗(R_T)と荷重の関係を示す。 R_T は $R_T = \Delta T/Q$ と定義した。ここで、 T は軸上の距離と比例関係となる部分(円柱部)の温度変化を外挿し

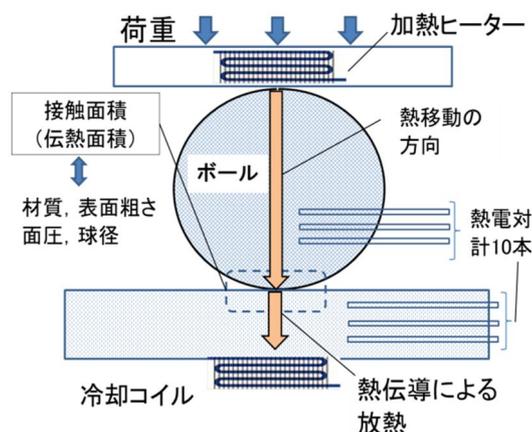


図 1 球-平面間の接触熱抵抗の概念

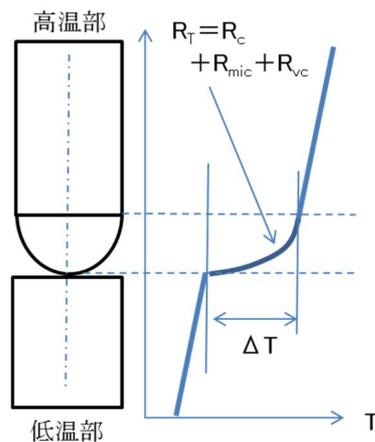


図 2 球面-平面における中心軸上の温度分布概略

て求めた接触面における温度の飛び幅を、 Q は円柱部の温度勾配を用いて求めた熱流束を表す。

図4に総括熱抵抗 (R_T) と荷重の関係を示す。図4より、荷重が大きくなるに従い R_T は減少すること、また曲率半径が大きくなると熱抵抗は減少することがわかる。また、図4における総括熱抵抗 (R_T) は、局所的接触熱抵抗 (R_c)、熱流の縮流による熱抵抗 (R_d)、接触面積 (A) の関数となるものと考えられる。

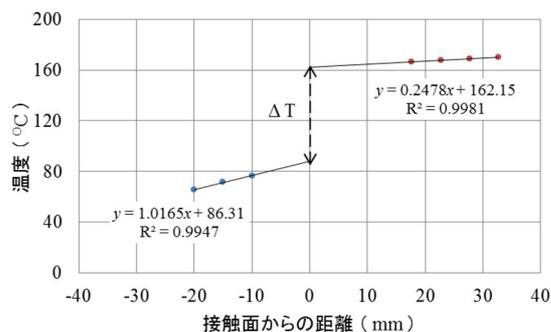


図4 接触面における総括熱抵抗 (R_T) の定義、および R_T と荷重との関係

実験において荷重を変化させると、 R_c と A が同時に変化することから、計算機シミュレーションを用いて、 R_c 、 R_d 、および A の影響を個別に評価することを試みた。上記の考え方に基づき、総括熱抵抗 (R_T) を以下の式で仮定する、

$$R_T = \Delta T / Q = \alpha R_c + \beta$$

計算機シミュレーションによって A との関係、および A との関係を求めると、前者は -1 乗 (反比例) の関係が ($\alpha = 1.0/A$)、後者はほぼ -0.5 乗の関係 ($\beta = 13.7A^{-0.47}$) があることが判った。そこで、得られた式を用いて実験結果の再現を試みた。接触面積は、Herz の弾性変形接触理論より計算した値を用いた。そして、局所的接触熱抵抗 (R_c) をパラメータとして、求めた試料片中心軸の温度分布と実験結果との比較を行った。

図6では荷重が71N~3600Nの最大と最小荷重間の条件で比較しているが、共に局所的接触熱抵抗 (R_c) が $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m}^2 / \text{kW}$ と極めて小さい値を用いた時に、実験値と計算値は良く一致する傾向があった。この R_c の値は、平面同士の接触において接触面圧が10MPaの条件での接触熱抵抗 (計測値) の1/100のオーダーであるが、Herzの理論式より計算される局所接触面圧は荷重71Nと軽荷重においても約1.5GPaと大きな値となることを考慮すると、 $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m}^2 / \text{kW}$ は R_c として妥当なオーダーであると考えられる。

(2) 低圧雰囲気における接触熱抵抗

宇宙空間を想定した接触熱抵抗を考える

上で必要となる、雰囲気圧力の影響について、実験および計算機シミュレーションを実施した。

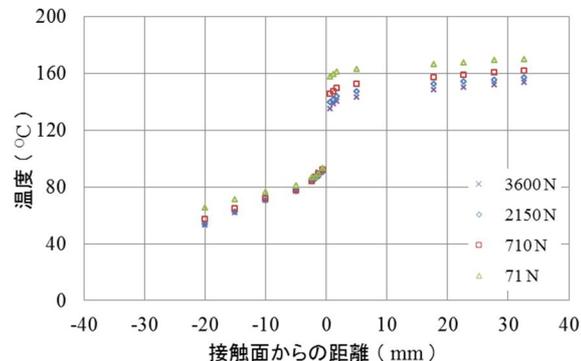


図3 試験片中心軸における温度分布計測結果例 (直径=25.4mm)

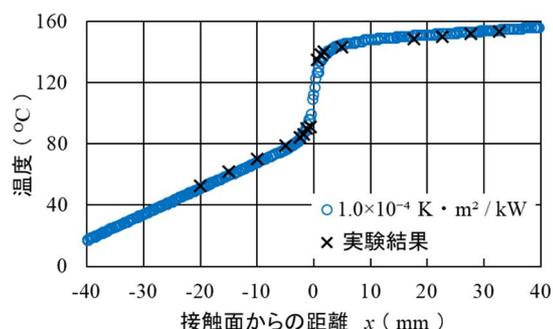
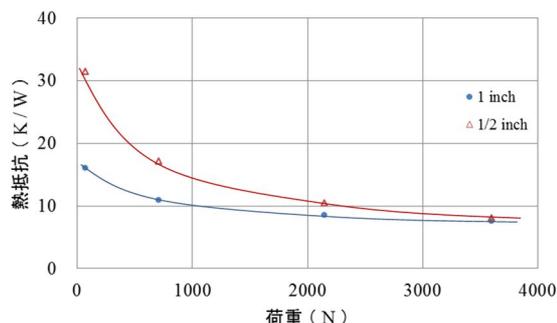


図5 構築した予測式と温度計測値の比較 (荷重=2150N)

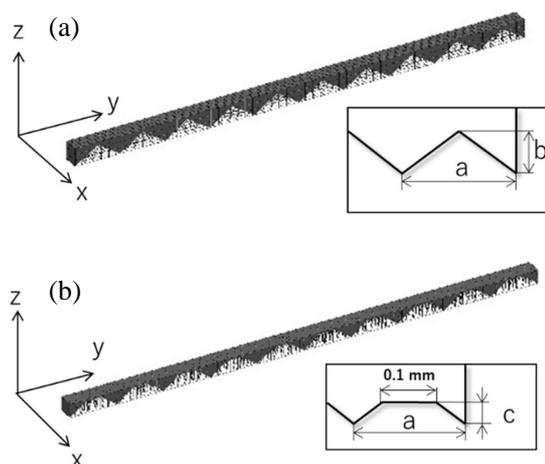


図6 Computational domain.

(a) Triangle groove model

(b) Trapezoid groove model

計算手法は、個々の分子の動きを決定論的にニュートン方程式を解く MD 法 (Molecular Dynamics Methods), および確率論的にサンプル粒子を用いてボルツマン方程式を解く DSMC 法 (Direct Simulation Monte Carlo Methods) に大別されるが、今研究では計算負荷が低い後者を用いた。

シミュレーション条件は図 6 に示すような (a) 三角溝 (ピッチ間隔 $a = 0.3 \text{ mm}$, 奥行き 0.1 mm , 最大深さ $b = 50, 75 \text{ }\mu\text{m}$) と (b) 台形溝形状 (最大深さ $c = 18.75 \text{ }\mu\text{m}$), および (c) 上下ともに平面の 3 種のモデルを用いた。x 方向と y 方向は周期的な境界条件とし、z 方向下側は表面温度 311.7 K , 上側の物体は表面温度 361.7 K の壁面境界とした。ただし、壁面において分子は Maxwell 速度分布で拡散反射する。

まず、平板モデルで壁面間距離を変更した場合の雰囲気圧力と熱流束との関係では、理論値は分子流領域にて気体の各特性値および圧力と壁面温度により求まる熱流束となる。平板モデルにおいて、下部壁面への単位時間・面積当たりの衝突頻度は $25 \text{ }\mu\text{m}$ 以下になるほど増加した。壁面間距離が短くなると、壁面間で分子が直接反射運動して、熱流束が増加する。また、本研究において注目すべき結果は、図 7 に示す最大深さまたは算術平均深さが一定となるように、3 種の条件を揃えた場合の熱流束の結果である。平面と同等の深さであっても三角溝の方が熱流束は高いことが分かる。台形溝が三角溝と平面との間にプロットされていることから、深さよりも形状の影響が大きいことが考えられる。また、図 8 に接触熱コンダクタンスの圧力依存性について実験結果と計算結果の比較を示すが、平板に関しては両者は良く一致していることがわかり、シミュレーションの妥当性が示された。

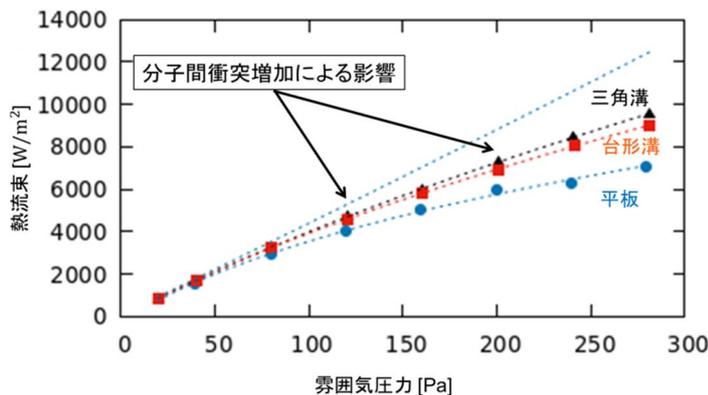


図 7 雰囲気圧力と熱流束の関係

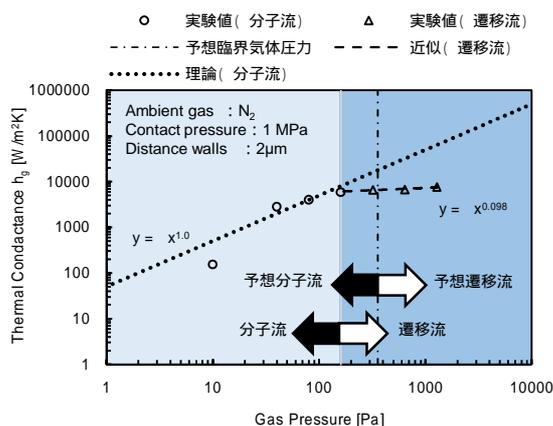


図 8 接触熱コンダクタンスの圧力依存性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Donatella Cirrone, Dmitriy Makarov, Andreas Friedrich, Joachim Grune, Keiji Takeno, Vladimir Molkov	4. 巻 3
2. 論文標題 Blast Wave Generated by Delayed Ignition of Under-Expanded Hydrogen Free Jet at Ambient and Cryogenic Temperatures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Hydrogen	6. 最初と最後の頁 433-449
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 武野計二、 武山周介、 川ノ上弘規
2. 発表標題 高粘性液体の噴霧におけるノズル内キャピテーションと微粒化効果
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木戸ひかる、 武田大樹、 武野計二
2. 発表標題 高圧水素噴流火炎の保炎特性へ衝撃波構造が及ぼす影響
3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木戸ひかる、 武田大樹、 武野計二
2. 発表標題 静電探針法を用いた高圧水素噴流火炎の保炎機構の検討
3. 学会等名 第59回燃焼シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武野計二, 塚本晴己, 石田真也
2. 発表標題 金属接触部位の表面微細形状と熱抵抗の関係
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 V. Shentsov, Hiroki Takeda, Keiji Takeno, Dimitry Makarov, Vladimir Molkov
2. 発表標題 Influence of nozzle shape on hydrogen-air mixing for high pressure hydrogen jet
3. 学会等名 H2FC SUPERGEN Researcher Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	古谷 克司 (Furutani Katsushi) (00238685)	豊田工業大学・工学部・教授 (33924)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------