

球面-平面間の接触熱抵抗

豊田工業大学, 熱エネルギー工学研究室

背景・目的

高い位置決め精度が要求される工作機械では、移動部位にはボールベアリングやボールねじ等の転動体が用いられている。

近年の精密加工精度の要求・・・サブμm以下

ボールの工作精度向上

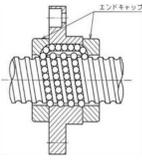
熱膨張が精度に大きく影響

5mm直径のボール(炭素鋼)が20°C温度上昇すると約1μm膨張

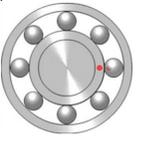
対策:一定温度に保つ温度管理手法

接触熱抵抗は固体の種類や接触面圧などの影響を受け、非常に複雑な挙動を示すため、球面-平面間のマイクロな伝熱現象を明らかにする。

特に輻射熱の過酷な環境下の宇宙空間において、冷却性能向上のため接触熱抵抗の低減は特に重要な課題である。

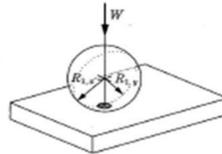


ボールねじ



ボールベアリング軸受

接触点の力学



E: ヤング率
ν: ポアソン比
R: 球の半径
W: 荷重
 $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$

$$\text{接触半径} : a = \left(\frac{3WR}{2E'} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\text{接触面積} : A = \pi a^2 = \pi \left(\frac{3WR}{2E'} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$\text{接触圧力} : P_{\max} = \frac{3}{2} P = \frac{3}{2} \frac{W}{\pi a^2}$$

ヘルツの弾性接触理論

表. 本実験での理論値 (材質: SUJ2, 1 inch 球)

荷重 (N)	接触半径 (mm)	接触面積 (mm ²)	接触圧力 (GPa)
71.6	0.1810	0.1030	10.46
716	0.3901	0.4780	22.74
2148	0.5625	0.9943	32.40
3580	0.6670	1.3977	38.42

SUJ2: 主成分 Fe

成分	含量 (%)
C	0.95~1.10
Si	0.15~0.35
Mn	0.50以下
P	0.025以下
S	0.025以下
Cr	1.30~1.60

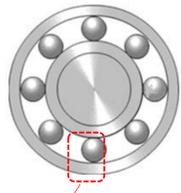
・SUJ2の降伏点 1.37 GPa に対して、接触面での圧力は10倍以上の非常に大きな圧力がかかる

実験内容

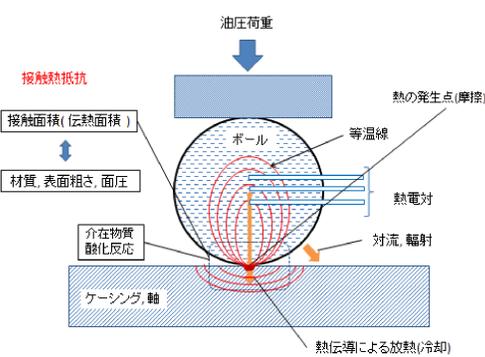
静的モデルによる基礎現象の検討
(マイクロ要素実験)

・金属球-平板の内部と表面の温度分布を細線熱電対および放射温度計により計測

・実験で得られた温度分布が再現できる接触熱抵抗、および接触面積を数値解析で評価



要素(基本現象)として取り出す



パラメータ	機構
球の径	・ $A \propto R^2$ などで影響大
材質	・ヤング率, ポアソン比により A が変化する
表面粗さ	・摩擦発熱に影響大 ・接触点の塑性変形が支配的ならば影響少
荷重	・摩擦発熱に影響大
潤滑	・摩擦(発熱)には支配的
雰囲気圧力	・代表長さが小さくなると対流伝達が大きくなるので影響大

実験方法

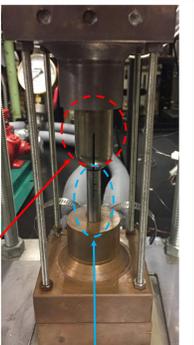
高温部 (電気ヒータ埋め込み)

供試体 (半球, SUJ2)

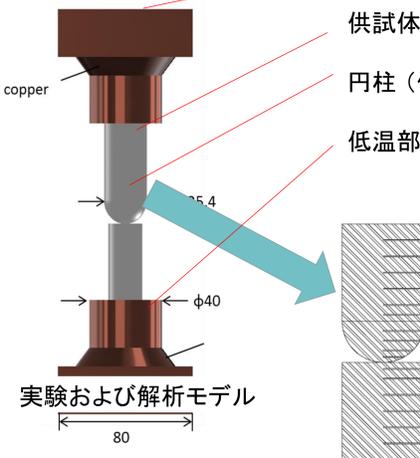
円柱 (供試体の球と同材質, 同径)

低温部 (冷却器)

材質: SUJ2
長さ: 42.4 mm
スリット幅: 1 mm
スリット長さ: 30 mm
φ 25.4 mm



材質: SUJ2
長さ: 40 mm
スリット幅: 0.5 mm
スリット長さ: 20 mm
φ 10 mm

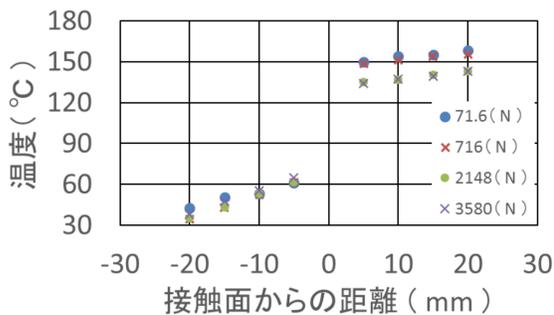


実験および解析モデル

- ・丸棒と半球からなる試験片を銅ブロックで挟み、上部の銅ブロックではヒータによる加熱、下部は冷却器による冷却を行い、油圧により荷重をかけ接触面圧を変化させる
 - ・試験片の側面に空けたスリットから赤外線カメラ及び熱電対での温度計測
 - ・シミュレーション結果との比較
- 接触円直径は、Hertzの接触理論から算出

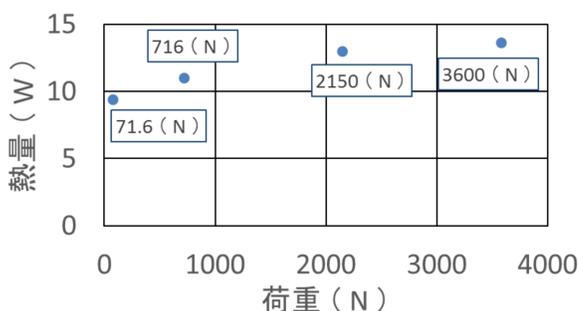
実験結果

冷却部 (-15°C), ヒータの電力 (50.4 A) の条件で荷重を変化させたときの供試体と円柱の中心の温度を熱電対で計測した。



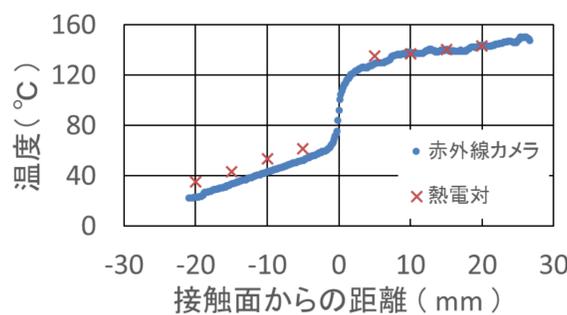
・上図の測定した試料片 A の温度を線形近似することで高温側の温度分布を算出する。

その後、フーリエの法則 ($q = -\lambda \frac{dT}{dx}$) を用いてそれぞれの熱流束を求め、熱量を算出した。



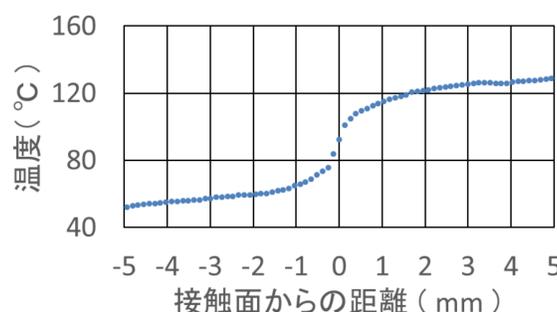
- ・荷重の増加に伴い熱量は増加していることが分かる。荷重の増加に伴い接触面積が増加するため、移動熱量が増加した。
- ・移動熱量の増加率は荷重の増加に伴い減少する。

接触面近傍の温度を熱電対で計測することは困難であるため、赤外線カメラでの計測を行った。以下では、荷重 (2148 N) での結果を示す。



- ・高温側の試料片 A に関して、赤外線カメラと熱電対の計測した値はほぼ一致している。
- ・低温側の試料片 B に関して、スリットの幅が狭いため赤外線カメラの結果より高い温度を示している。
- ・荷重条件を変化させた場合においても同様の結果がみられた。

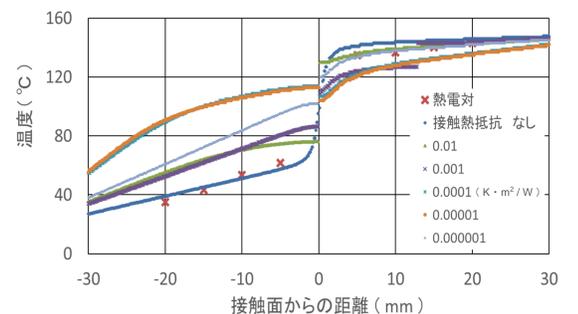
接触面近傍の温度変化を以下に示す。



- ・接触面 1 ~ 2 mm にかけて急激な温度変化を示す。試験片 A の下端が半球で構成されており、接触面に近づくにつれて断面積が小さくなることによる縮流の影響が考えられる。

計測結果をもとにシミュレーションを行った。境界条件として、接触面積 0.994 mm², 試料片 A の上端を 150°C, 試料片 B の下端を 15°C を与え、接触熱抵抗を変化させた場合の温度分布を以下に示す。なお、対流、外部への熱放射は考慮していない。

$$\text{接触熱抵抗} : R_c = \frac{\Delta T}{q} \quad (\text{K} \cdot \text{m}^2 / \text{W})$$



- ・接触熱抵抗を変化させた場合、熱電対での計測結果と差異がある。
- ・接触熱抵抗を与えない場合、大きな差異は見られないが高温側である試料片 A の半球部分 (接触面から 12.7 mm) での温度に誤差があり完全に接触熱抵抗がないといえない。
- ・ $1 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{m}^2 / \text{W}$ 以下の値になると接触面での温度が逆転している。

今後の課題

- ・接触面近傍の正確な温度を熱電対を用いて計測する必要がある。
- ・ $A \propto R^2$ であるため球の径を変化させた場合の考察も必要である。