

流体潤滑下で確定する焼付条件の算出 -トルク停止，熱平衡の破れ，油量不足-

Calculation of Seizure Conditions Determined Under Hydrodynamic Lubrication -Over-Torque, Thermal Nonequilibrium, Oil Shortage-

大同メタル工業 (正)*櫻井 真一 (正)幸島 元彦

Shinichi Sakurai, Motohiko Koshima

DAIDO METAL CO., LTD.

1. はじめに

焼付は最終的には凝着を伴うものであるため一般には接触を起点に論ぜられるが，事前検知や回避設計のためにはまだ流体潤滑であるうちに焼付の発生が推定できる事が望ましい．また，焼付の限度線図に示されるように軸周速で焼付メカニズムは異なる．本研究では軸周速違いの焼付試験を模擬した EHL 計算を実施し，トルク停止，熱平衡の破れ，油量不足の各焼付条件を算出する．さらに，焼付に至る熱平衡破れのメカニズムを深掘りするなか，ジャーナルすべり軸受における焼付の根本要因と思われる現象をシミュレーションで捉えた．そこにはすべり軸受の本来持つ，極限状態で焼付を回避する機能と，それを上回る過酷なしゅう動状態に晒された場合の挙動が見てとれるので紹介する．

2. EHL 計算で模擬する焼付試験の概要

EHL 計算で模擬する焼付試験機の概略図を Fig. 1 に，試験条件を Table 1 に，試験結果を Fig. 2 に示す．Figure 2 は各軸周速における面圧，軸受温度，PV 値である．軸受温度と PV 値は似た傾向を示し，軸周速 10 m/s 以下では概ね右肩上がり，軸周速 10 m/s 以上では概ね一定の値に収まるものの，レンジは随分広い．精度良い焼付予測のため，本報では試験と計算モデルとで同定をとり，シミュレーションによってやがて焼付に至るしゅう動 2 面の状態に迫る．

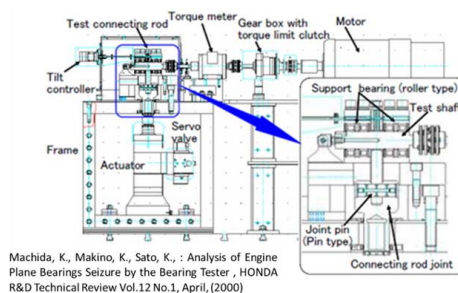


Fig. 1 Seizure test system

Table 1 Seizure test conditions

| | |
|-------------------------------|---|
| Test mode | 3.8 kN step-up loading until limit torque |
| Tangential shaft speed, m/s | 0.25, 0.5, 1, 1.5, 2.5, 4, 10, 15, 20, 25 |
| Oil supply temperature, deg.C | 50 |
| Oil supply pressure, MPa | 0.1 (gauge) |
| Oil type | 10W-30 |
| Oil clearance(dia.), μm | 60 |
| Shaft surface roughness | Ra 0.06 - 0.07 |
| Bearing material | Al-Sn-Si |
| Bearing size, mm | O.D.56, W4.5, T1.5 |

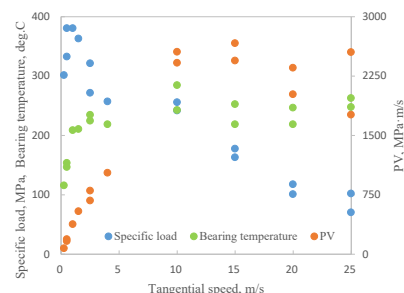


Fig. 2 Seizure test results

3. 焼付試験を模擬した EHL 計算

3.1 計算条件

計算条件は Table 1 で示した試験条件と同一であるが，軸周速のみ 2.5~25 m/s で計算した．ソルバーは AVL 社 Excite R2024.1 を用いた．油膜温度計算の温度境界条件は焼付試験で得られた軸受温度を用いた．構造体のヤング率・硬さ，及び潤滑油粘度は温度依存性を考慮し，計算点温度での物性値を用いた．Roelands モデルにより高圧粘度を考慮した．3.2 項で定義する形状なじみを考慮した．各周速での面圧を Fig. 3 に示す．橙色の D, E は試験で焼付が発生した面圧，青色の A, B, C は非焼付条件で，各軸周速での焼付面圧に対して概ね 1/4, 1/2, 3/4 の面圧を設定した．

3.2 本報における形状なじみの定義

Figure 4 は焼付直前の軸受メタル表面の軸方向プロファイルの代表例である．焼付直前にはプロファイル左端の大きなダレ形状のように，最表面の凹凸が無くなり鏡面となるが，焼付に至る過程ではプロファイル右端のダレ形状のように，最表面

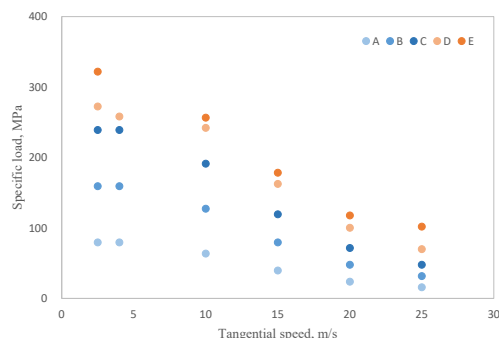


Fig. 3 Specific load for EHL calculation

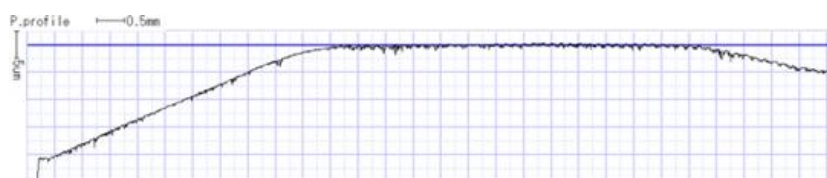


Fig. 4 Surface profile prior to seizure (15mm width, 7200rpm, 125MPa clear)

の凹凸や粗さが初期から大きく変化する事なく、凹凸の下地であるベースラインの形状変化のみ進行していた。従ってこの現象は摩耗ではない。本報では実現象に即し、粗さパラメータを固定しベースラインの形状変化のみ進行させた場合に、接触圧力や摩擦損失等の物理量が一定値へ収束した事をもって形状なじみの完了と定義する。ベースラインがフラットな表面プロファイルを初期形状とし、形状なじみ完了後の表面プロファイルをなじみ形状とする。

3.3 形状なじみ進行の計算方法

まず初期形状で計算し、得られた接触圧力分布を基に接触圧力の高い部分ほど形状変化が大きくなる様に形状変化量分布を作成、この分布の最大値が $1\mu\text{m}$ となるよう値をスケーリングし、形状なじみ $1\mu\text{m}$ の表面プロファイルを作成した。以降同様に表面プロファイルを逐次作成、計算し $6\mu\text{m}$ まで形状なじみを進行させ計算した。本報では $6\mu\text{m}$ でなじみ完了とした。接触圧力を用いた理由は、形状なじみは摩耗ではなく、力の伝達メカニズムも不明ではあるが、しゅう動2面が接触する程度に近接する事で力が伝達されていると推測されるからである。

3.4 トルク停止

Figure 5 に初期形状での摩擦損失を示す。図中に焼付試験での焼付トルクを実線で、クラッチ離断トルクを破線で示した。軸周速 10 m/s 以下では焼付条件での計算結果である D, E のプロットが、焼付試験での焼付トルクやクラッチ離断トルクと一致しており、焼付トルクをもって実現象とシミュレーションが同定されたと言える。軸周速 15 m/s 以上では焼付条件でもクラッチ離断トルクに達していないが、D, E の条件は荷重ステップの上限であるため、この面圧に到達すると発熱と温度上昇を止める事ができず、いずれクラッチ離断トルクに達し試験が停止する事を示している。

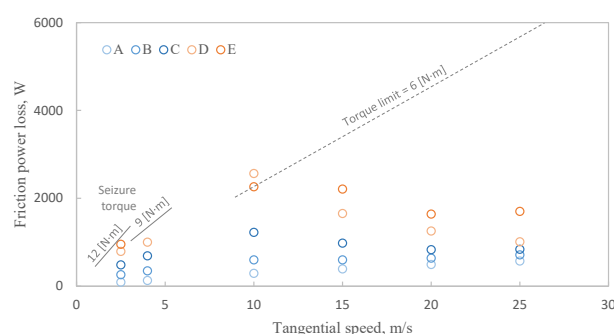


Fig. 5 Friction power loss with initial bearing surface profile

3.5 熱平衡の破れ

しゅう動面の摩擦損失を発熱量、軸受端面からのリーク油が持ち去る熱量及び軸受ハウジングへの伝熱量を冷却量とし、この合計値を熱バランスとして算出した。なじみ形状での熱バランスを Fig. 6 に示す。なじみ形状では全ての軸周速において非焼付条件である A, B, C の青色プロットが 0 W 近傍に集まっており、非焼付条件では温度一定でしゅう動する事を示している。軸周速 10 m/s 以下では、焼付条件である D, E の熱バランスは正の値を示しており、このしゅう動状態では温度上昇が止まらないと言える。つまり、この場合の焼付要因は熱平衡の破れであると言える。特に軸周速 10 m/s は特徴的で、A, B, C 全て 0 W に収束しており、D, E と明確に異なる。このメカニズムの深掘りは後の項で行う。

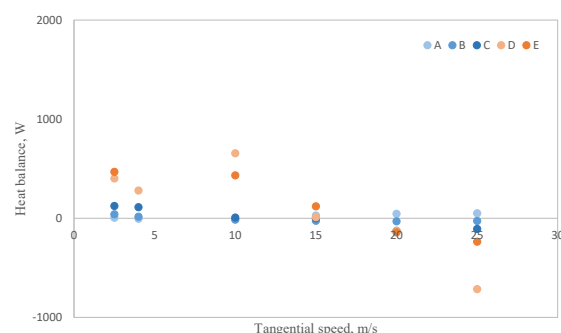


Fig. 6 Heat balance with edge dropped bearing surface profile after running-in process

3.6 油量不足

Figure 6 で、軸周速 20 m/s 以上では焼付条件である D, E の橙色プロットが負の値であり、熱平衡の破れでは焼付に至る過程を説明できない。参考文献 1)は本報で模擬する焼付試験についての内容であり、軸周速 10 m/s 以上で焼付直前に給油口で突如気泡が発生する事象が示されている。参考文献 2)では給油量の項を設けた修正レイノルズ方程式を用い、意図的に供給油量を不足させた状態で計算すると、給油口でキャビテーションが発生するという計算結果が得られたと示されている。これらの研究を参考に、供給油量が不足した状態を評価するため供給油量を変えた計算を行い、給油口圧力と供給油量の関係を調べた。焼付直前に給油口で気泡の発生が観測された軸周速 20 m/s の計算結果を Fig. 7 に示す。本報の計算モデルでは給油口の負圧を考慮できないため、大気圧より大きい給油口圧力での計算結果群から図中の破線によって低圧側へ外挿し給油口での負圧の発生を近似的に推定した。参考文献 1)の試験で、試験開始時に給油口圧力 0.2 MPa(Abs.) で、焼付時に供給油量が 0.05 L/min 程度である事が分かっているため、図中の赤色下矢印の向きに給油口圧力と供給油量の関係が変化していると考えられる。Figure 7 では、赤色下矢印の先端が大気圧 0.1 MPa(Abs.) を下回ったところで焼付の発生を示す橙色の破線と交差している。つまり給油口圧力が大気圧以下に減圧したところで焼付が発生しており、焼付直前に給油口で発生する気泡の正体は気体性キャビテーションであると推定される。試験で気泡の観測されない条件での計算結果は、赤色下矢印の先端は大気圧を下回っていなかった。従って、高周速で給油圧が低い場合は、十分な潤滑油が供給できなくなりスターブ潤滑へ移行する事で焼付が発生する可能性があると言える。

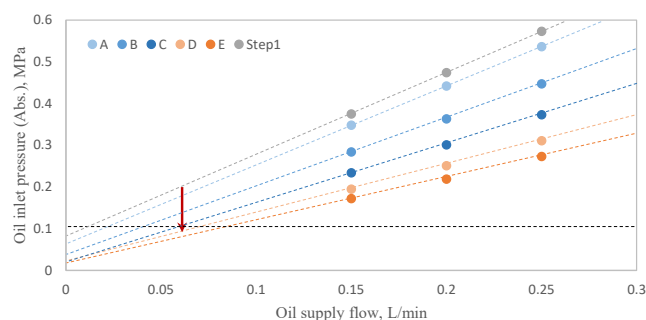


Fig. 7 Oil inlet pressure and supply oil flow

4. 焼付に至る熱平衡破れのメカニズムの深掘り

4.1 熱バランスの推移

軸周速 10 m/s の形状なじみの進行に伴う熱バランスの推移を Fig. 8 に示す。A, B, C は焼付面圧に対して概ね 1/4, 1/2, 3/4 の面圧であり開きがあるが、熱バランスは面圧に関係なく全て 0 W に収束しており、非焼付条件では温度一定でしゅう動する事を示している。一方、焼付条件である D, E では形状なじみが進行しても常に熱バランス > 0 であり、系の温度上昇が止まらない事を示している。

4.2 熱バランスの構成要素の推移

熱バランスの構成要素の内訳である、流体摩擦損失、接触摩擦損失、リーク油の持ち去る熱量、構造体への伝熱量を調べた。Fig. 9 (1) に非焼付条件 C の場合、Fig. 9 (2) に焼付条件 D の場合を示す。面圧のより大きい D の方がリーク油の持ち去る熱量も大きくなっている事から、この分が冷却量の調整代となる事で発熱量の違いを吸収し、非焼付条件では A, B, C 全て熱バランスが 0 に収束していると考えられる。つまり発熱量の増えた分がそのままリーク油の温度上昇となり、系外に排出されている訳である。明らかに接触摩擦損失の収束により熱バランスも収束しているが、焼付条件では熱バランスが正の値に収束している。リーク油の持ち去る熱量の許容量を超える接触摩擦損失が発生し続け、発熱過大の状態が形状なじみの進行によっても改善されないためであると考えられる。

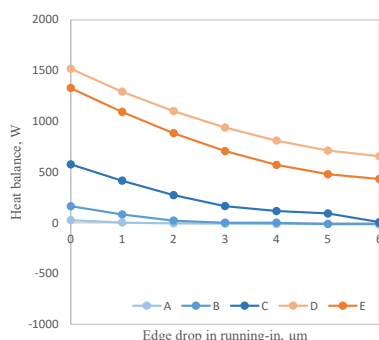


Fig. 8 Transition of heat balance at 10 m/s

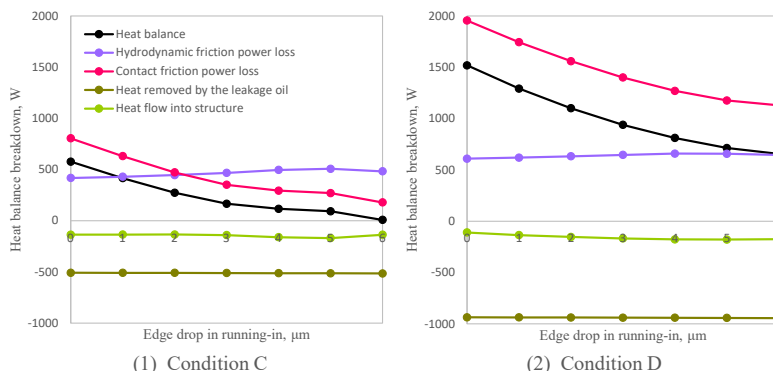


Fig. 9 Breakdown of the transition of heat balance at 10 m/s

4.3 すき間高さ分布の推移

形状なじみ進行に伴う軸方向断面でのしゅう動面のすき間高さプロファイルの推移を Fig. 10 に示す。非焼付条件 C では、形状なじみの進行(0μm→6μm)に伴いフラットな初期形状から徐々にくさび空間が形成されている。対して焼付条件 D では形状なじみが進行しているはずであるが、くさび空間の形成は認められず、くさび油膜が期待できない。

4.4 軸心位置の推移

Figure 11 に負荷の増大に伴う軸心位置の推移を示す。ジャーナルすべり軸受は負荷が増大すると軸心位置は三日月状に推移するが、焼付が生じるような大荷重になると軸受中心線に漸近する事が分かった。ジャーナルすべり軸受は、負荷と油膜圧力積分値の力の釣り合いを成立させるには、軸心位置が負荷と直交する方向へオフセットする必要があるが、焼付条件 D では形状なじみが進行しても軸心位置を負荷と直交する方向へオフセットできていない。

4.5 焼付に至る熱平衡破れのメカニズム

以上をまとめると次となる。大荷重により軸心が強制的にセンタリングし、形状なじみをもっても力の釣り合い位置を取れず、くさび空間が消失し、接触摩擦による発熱過大で熱バランスを 0 に維持できず、温度上昇を止められなくなる。焼付に至る熱平衡破れのメカニズムをフローチャートで表現し Fig. 12 に示す。

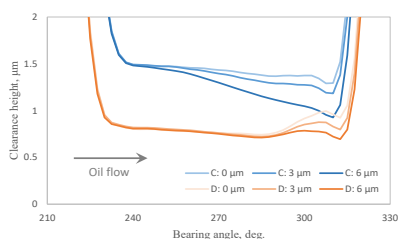


Fig. 10 Transition of clearance profile on an axial cross-section

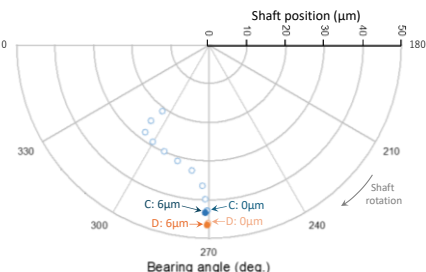


Fig. 11 Load-dependent shaft position

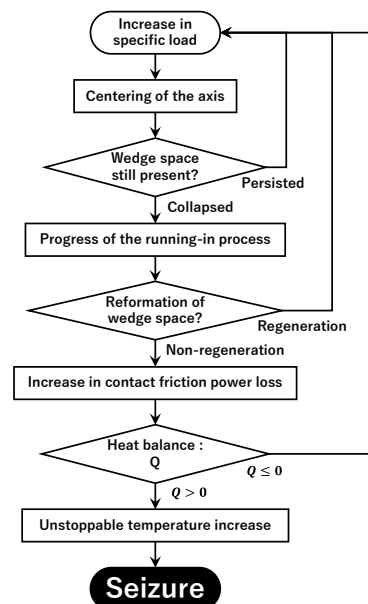


Fig. 12 Flowchart leading to seizure due to thermal non-equilibrium

文献

- 1) Motohiko Koshima: A Simplified Method for Detection of Seizure Damage in the Static Rig Test in a Sensing Study, ITC Fukuoka (2023)
- 2) 尾花 良一郎, 畠中 清史: 二相流モデルの解析手法を考慮して求めた真円軸受の性能予測, トライボロジー会議 2025 春 予稿集(2025)