超高速・高面圧しゅう動体の表面溶融を伴う摩擦・摩耗特性* (第2報, 非定常熱伝導方程式に基づく溶融摩耗解析)

松 山 孝 男^{*1}

Friction and Wear with Surface Melting at High Sliding Speed and High Contact Pressure (2nd Report, A Melting Wear Analysis Based on the Non-Steady Heat Conduction Equation)

Takao MATSUYAMA^{*2}

^{*2} Ordnance Design & Engineering Dept., The Japan Steel Works, Ltd.,
1-6-1 Funakoshi-Minami, Aki-ku, Hiroshima-shi, Hiroshima, 736-8602 Japan

A new melting wear analyzing method of the slider is proposed based on the non-steady heat conduction equation. The friction coefficients calculated with the theory agreed well with those reported by previous workers. The estimated values of the slider wear also agree well with those obtained experimentally. The melting wear analyzing method is confirmed to estimate the melting wear quantitatively from thermal properties of sliders. Based on the method, a practical selection method of slider material has been established.

Key Words: Friction, Wear, Coefficient of Friction, Surface Melting, High Sliding Speed, High Contact Pressure

1. 緒 言

超高速かつ高面圧しゅう動条件ではしゅう動体は溶融摩耗と言われている。金属材料の場合には pV 値が概ね 10^8 から 10^9 MPa·m/s の条件で溶融摩耗すると筆者は考えている。溶融摩耗そのものについては負荷形態の特殊性からか研究例は少なく、Montgomery により Pin-on-disk 試験機等を用いた研究がなされている程度である¹⁾²⁾。この研究は主として実験的な方法により行われたものでいくつかの未解明事項が残されている。

筆者は前報³⁾において実機相当の内径 155mm の円筒体にしゅう動子を有する移動体を静的及び動的に押し込む試験を行い、円筒体内で移動体を加速し超高速を達成する加速装置において動的な場合にはしゅう動開始直後にしゅう動子表面の溶融によりしゅう動抵抗が低下すること、溶融遷移後においては溶融摩耗により接触面圧が低下ししゅう動抵抗が変化すること等の知見を得た。

そこで本報では、上記の加速装置での加速状況に影響を及ぼす溶融摩耗の定量的な検討を可能にするため、まず、1次元非定常熱伝導方程式を用いた簡単な解析手法を構築するとともに、一般的なしゅう動子材

料である銅合金の高温領域での熱物性値の測定を行う。次に、これらに基づく計算を行い摩擦係数、接触状態及び溶融摩耗量について今までに得られている実験結果等と比較し解析手法の妥当性に関する考察を行う。

2. おもな記号

- a_B : 円筒体の熱拡散率 (m^2/s)
- a_S : しゅう動子の熱拡散率 (m^2/s)
- h : しゅう動子溶融厚さ (m)
- H_S : しゅう動子の潜熱 (J/kgK)
- p : 接触面圧 (Pa)
- q_B : 円筒体側への熱流束 (W/m^2)
- q_S : しゅう動子側への熱流束 (W/m^2)
- Q_B : 円筒体側への熱エネルギー (J/m^2)
- Q_S : しゅう動子側への熱エネルギー (J/m^2)
- Q_T : しゅう動子通過中の発生熱エネルギー (J/m^2)
- t_b : 移動開始からの経過時間 (s)
- t_c : 円筒体のしゅう導子接触開始からの経過時間 (s)
- t_{se} : 固相接触の時間 (s)
- t_{ms} : 固相接触及び固液共存接触の合計時間 (s)
- t^* : 補正時間 (s)
- T_{MS} : しゅう動子の融点 (K)
- T_{IS} : しゅう動子初期温度 (K)
- T_{IB} : 円筒体初期温度 (K)
- v : しゅう動速度 (m/s)
- W_S : しゅう動子の長さ (m)

* 原稿受付 2001年9月17日。

^{*1} 正員, (株)日本製鋼所広島製作所 (〒736-8602 広島市安芸区船越南1-6-1)。

E-mail: matyam@sannet.ne.jp

WR : 単位時間当たりのしゅう動子摩耗率 (m/s)

Δt : しゅう動子通過時間 (s)

λ_s : しゅう動子の熱伝導率 (W/mK)

λ_b : 円筒体の熱伝導率 (W/mK)

μ_m : 平均摩擦係数 (-)

μ_s : 固相接触領域の摩擦係数 (-)

μ_l : 液相接触領域の摩擦係数 (-)

ρ_s : しゅう動子の密度 (kg/m³)

3. 解析方法

3.1 仮定及び模式化 図1は摺動子が円筒体内をしゅう動するときの接触状態、表面温度及び発生熱流束の関係を模式的に示したものである。この図から円筒体側はしゅう導子の移動とともに接触面が移動していき、移動開始からの経過時間 t_b においてしゅう導子後端と接触している円筒体の断面は時間 $t_b - \Delta t$ においてはしゅう導子前端部に接触していたことがわかる。また、この図では次の2つのことを仮定している; 1) しゅう動子の表面温度は摩擦発熱により既に融点に達した状態にある。2) しゅう動子と円筒体との接触状態は、しゅう動子前端部から後端部に向かって固相接触状態、固液共存接触状態から、完全な液相接触状態(溶融潤滑状態)に遷移する。

固相接触状態では、しゅう動子の前端近傍ではしゅう動子の表面温度は融点に達しているが潜熱のために表面は溶融していない。この状態では、固相接触摩

擦によりしゅう動子側に流入できる以上の熱流束が発生し、円筒体の表面温度を上昇させる。

固液共存接触状態では、発生する熱流束は円筒体表面温度がしゅう動子材料の融点を維持できるだけのレベルに低下していく。この熱流束の低下はしゅう動子表面の部分的溶融による摩擦係数の低下によりもたらされる。

液相接触状態では、発生する熱流束は溶融潤滑状態に相当する一定の値になる。この状態では、円筒体への熱流束はしゅう動子後端にいくにつれて接触開始からの時間が長くなるために減少する。このために、円筒体及びしゅう動子に流入しきれずにしゅう動子を溶融させる熱流束はしゅう動子後端に向かって増加する。

以上の仮定及び模式化並びに1次元非定常熱伝導方程式に基づき、円筒体の任意の点をしゅう動子が通過するときの溶融によるしゅう動子摩耗の解析方法を構築した。解析方法の細部を以下に示す。

3.2 解析方法の細部 移動開始と同時にしゅう動子の表面温度が融点に到達し、しゅう導子の表面温度が融点の状態を維持すると仮定すれば、しゅう動子への単位面積当りの熱流束(q_s)は、半無限固体における第1種(温度指定)境界条件に対する解を適用することにより(1)式のとおり定義できる。しゅう導子への熱流束は移動開始からの経過時間(t)に依存し、しゅう動方向(しゅう導子長さ方向)では一定である。なお、移動体

Fig. 1 Schematic of contact condition of slider, surface temperatures and heat flux to slider and bore sliding at a constant contact pressure and velocity

は起動後比較的短時間でしゅう動子の表面が溶融を開始することから、溶融遷移後の現象を取り扱うこの解析においてしゅう動開始と同時にしゅう動子表面温度が融点に達するという仮定は妥当なものと推測される。

$$q_s = \frac{\lambda_s(T_{MS} - T_{0s})}{\sqrt{\pi \cdot a_s \cdot t_s}} \dots\dots\dots (1)$$

しゅう導子が円筒体の任意の1断面を通過する時間(Δt)は移動開始からの経過時間に比べ非常に短く、かつ、その間の速度変化もほとんどない場合、しゅう導子通過中のしゅう動速度(v)及びしゅう導子側への熱流束(q_B)が一定であると仮定できる。この場合には $\Delta t = W_s / v$ となり、円筒体側への熱流束を円筒体のしゅう導子先端との接触開始からの時間(t_c)で定義することが可能になる。なお、この時間にしゅう動速度(v)を乗じることによりしゅう導子前端からの距離におきかえることができる。

移動開始からの経過時間 t_b において、固相接触状態での単位面積当りの円筒体側への熱流束(q_B)は、発生熱流束からしゅう動子側への熱流束を減じたものであり(2)式で定義される。

$$q_B = \mu_s \cdot p \cdot v - q_s \dots\dots\dots (2)$$

固相接触状態では円筒体側への熱流束が一定であることから、半無限固体における第2種(熱流束指定)境界条件に対する解²⁾を適用し、円筒体表面がしゅう導子との接触開始から融点に達する時間を求めると(3)式のようになる。この時間(t_{se})を固相接触の時間と定義する。

$$t_{se} = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\lambda_B^2}{a_B} \cdot \left(\frac{T_{MS} - T_{0B}}{\mu_s \cdot p \cdot v - q_s} \right)^2 \dots\dots\dots (3)$$

固液共存及び液相接触状態では円筒体の表面温度はしゅう導子の融点で一定になることから、第1種境界条件に対する解が適用可能となる。この状態での熱流束をしゅう動子との接触開始からの時間(t_c)で定義するためには第1種境界条件における熱流束が上述の(2)式の値と等しくなる時間で補正することが必要になる。この時間(t^*)は(4)式で示すとおりであり補正時間と定義した。

$$t^* = \frac{l}{\pi} \cdot \frac{\lambda_B^2}{a_B} \cdot \left(\frac{T_{MS} - T_{0B}}{\mu_s \cdot p \cdot v - q_s} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

固液共存及び液相接触状態における円筒体側への

熱流束(q_B)は第1種境界条件に対する解及びしゅう導子接触開始からの時間を用いて(5)式とおり定義される。

$$q_B = \frac{\lambda_B(T_{MS} - T_{0B})}{\sqrt{\pi \cdot a_B(t_c - t_{se} + t^*)}} \dots\dots\dots (5)$$

固相接触及び固液共存接触の合計時間(t_m)は(5)式の熱流束が液相接触状態での発生熱流束からしゅう導子側への熱流束を減じたものと等しくなる時間であり(6)式で示すとおりになる。

$$t_m = \frac{l}{\pi} \cdot \frac{\lambda_B^2}{a_B} \cdot \left(\frac{T_{MS} - T_{0B}}{\mu_l \cdot p \cdot v - q_s} \right)^2 + t_{se} - t^* \dots\dots\dots (6)$$

上述のようにしゅう導子が任意の位置にあるときの円筒体側への熱流束はしゅう導子先端との接触開始からの時間により分布状況が定義できる。

移動開始からの経過時間(t_c)に対するこれらの熱流束を $t_c=0$ から $t_c=W_s/v$ まで(しゅう導子前端から後端まで)積分するとしゅう導子が円筒体の任意の1断面を通過するときの単位面積当りの全発生エネルギー(Q_T)、摺動子側への熱エネルギー(Q_s)及び円筒体側への熱エネルギー(Q_B)となり、それぞれ(7)~(9)式で示される。

$$Q_T = \mu_s \cdot p \cdot v \cdot t_{se} + \mu_l \cdot p \cdot v \left(\frac{W_s}{v} - t_{se} \right) + \frac{2 \cdot \lambda_B(T_{MS} - T_{0B})}{\sqrt{\pi \cdot a_B}} \cdot \left(\sqrt{t_m - t_{se} + t^*} - \sqrt{t^*} \right) - q_s \cdot (t_m - t_{se}) \dots\dots\dots (7)$$

$$Q_s = \frac{\lambda_s(T_{MS} - T_{0s})}{\sqrt{\pi \cdot a_s \cdot t_B}} \cdot \frac{W_s}{v} \dots\dots\dots (8)$$

$$Q_B = \left(\mu_s \cdot p \cdot v - \frac{\lambda_s(T_{MS} - T_{0s})}{\sqrt{\pi \cdot a_s \cdot t_B}} \right) t_{se} + \frac{2 \cdot \lambda_B(T_{MS} - T_{0B})}{\sqrt{\pi \cdot a_B}} \cdot \left(\sqrt{\frac{W_s}{v} - t_{se} + t^*} - \sqrt{t^*} \right) \dots\dots\dots (9)$$

しゅう動子側及び円筒体側に流出するエネルギーの合計に比べて発生熱エネルギーのほうが高ければ、しゅう動子が溶融すると推定される。この熱エネルギーがしゅう動子を均等に溶融させると仮定したときの溶融厚さ(h)は(10)式に示すとおりである。また、この値はしゅう導子が円筒体の任意の1断面を通過する時間に対

して算出されたものであり、これをしゅう動子の通過時間で除すれば(11)式に示すとおり移動開始からの経過時間(t)におけるしゅう動子摩耗率(WR)が得られる。

$$h = \frac{Q_T - (Q_s + Q_b)}{H_s \cdot \rho_s} \dots\dots\dots (10)$$

$$WR = h \cdot v / W_s \dots\dots\dots (11)$$

しゅう動子摩耗率を移動開始から時間積分することにより全移動過程でのしゅう動子の溶融摩耗量の予測が可能になる。本解析方法により高精度で摩耗予測するためには熱物性値の測定が不可欠である。

4. しゅう動子材料の熱物性値

上記の解析方法でしゅう動子の摩耗を予測するために必要な熱物性値の測定結果は表1に示すとおりである。熱拡散率はレーザーフラッシュ法、比熱は示差走査熱量法(DSC)、融点及び潜熱は示差熱量分析(DTA)でそれぞれ測定したものである。また、熱伝導率は熱拡散率、比熱及び密度の測定結果から算出したものである。

これらのしゅう動子材料3種の中では、丹銅は他の材料に比べ熱拡散率、熱伝導率が高いため、発生した摩擦熱を母材側へ逃がしやすく、また、融点及び潜熱も高いことから溶融摩耗しにくいと予測される。

5. 計算結果及び考察

ここでは、上述の解析方法及び熱物性値に基づき摩擦係数、接触状態及び溶融摩耗量に関する計算を行い、今までに得られている実験結果等と比較しこの解析方法の妥当性に関する考察を行う。

5・1 摩擦係数 図2は接触面圧150MPa及びしゅう動速度200m/sの条件での丹銅製しゅう動子におけるしゅう動距離に対する摩擦係数の変化を異なるしゅう動子長さについて計算により求めたものである。

なお、計算に用いた接触面圧及びしゅう動速度の条件はMontgomeryが実施したpin-on-disk試験⁹⁾の条件の標準的な値である。ここでいう摩擦係数とは(12)式で示すとおりしゅう動子全長の平均的な値を示すものである。

$$\mu_m = \frac{Q_T / (W_s / v)}{p \cdot v} \dots\dots\dots (12)$$

摩擦係数はしゅう動開始直後に急激な低下が認められるが、その後しゅう動距離0.5から1.0mで変化は小さくなりほぼ一定値に収束する傾向(安定化)が認められ、しゅう動子長さが長いほど摩擦係数が低くなっていることがわかる。安定領域での摩擦係数はpin-on-disk試験に相当するしゅう動子長さ2.5mmの場合には約0.2であり、Montgomeryの報告に合致している⁹⁾。このことから、この解析方法は溶融潤滑状態の摩擦係数の定量的な予測に適用可能といえる。

Fig. 2 Relationships between slider travel and mean friction coefficient

5・2 接触状態 図3はしゅう動子長さ0.1mmから1mの範囲でのしゅう動距離に対する接触状態の変化を上記と同一のしゅう動条件で計算により求めたものである。この図からしゅう動距離が増加するにつれて接触状態の境界はしゅう動子前端側に移動する傾向が認められる。これはしゅう動距離の増加すなわち摺動

Table 1 Thermal properties of slider materials

Material	Red Brass	Brass	Al-Bronze
Density* (kg/m ³)	8710	8370	7750
Specific heat** (kJ/kg/K)	0.461	0.507	0.532
Thermal conductivity** (W/m/K)	262	153	88
Thermal diffusivity** (mm ² /s)	65.6	36.2	21.3
Melting point (K)	1310	1161	1298
Latent heat (kJ/kg)	154	105	143

* Room temperature

** 873K

開始からの時間が増加するためにしゅう動子側へ流入する熱流束が減少するためである。

この図から、pin-on-disk 試験相当の接触長さ 2.5mm 程度では固液共存接触状態しか出現しないのに対し、内径 155mm の加速装置のしゅう導子長さ (25mm から 50mm) になるにつれて固液共存接触状態の比率が大きくなりさらに液相接触状態が出現することがわかる。この解析結果から、未解明の事項であった実機と pin-on-disk 試験との摩擦係数の相違は、接触面圧が同じでも接触長さが違えば接触状態の比率が異なることに起因することが明らかになったといえる。

Fig. 3 Relationships between slider travel and contact conditions

5.3 全移動過程における溶融摩耗量 図4は円筒体内径 155mm の加速装置でのしゅう導子移動量としゅう動速度及び接触面圧との関係を示したものである。この装置における全しゅう動距離は約 7m であり、この点でのしゅう動子摩耗量の実験結果は概ね 1mm から 5mm の範囲にあり丹銅、アルミニウム青銅、黄銅の順に大きくなる傾向を示した。

Fig. 4 Relationship between slider travel, slider velocity and contact pressure on an actual equipment

図5は材質の異なるしゅう動子材料について図4のしゅう動条件でしゅう動距離とその位置におけるしゅう動子の溶融摩耗量を本解析方法に基づき計算したものである。溶融摩耗量は、全しゅう動過程において丹銅が最も少なく、アルミニウム青銅、黄銅の順に大

きくなる傾向を示している。溶融摩耗量は移動距離 4m 以上ではそれぞれ 1.5mm から 3.7mm ではほぼ一定になっている。しゅう動距離約 7m 地点での摩耗量は上記の実験結果と同等の値であり、この解析方法は溶融摩耗量予測の観点からも有効な手法といえる。

Fig. 5 Relationship between slider travel and melting wear

なお、この解析によれば熱伝導率、熱拡散率、融点及び潜熱の高い材質がしゅう動子の摩耗を低減できるといえる。即ち、今回熱物性値を測定した銅合金の中では、丹銅はアルミニウム青銅および黄銅に比べ溶融摩耗に対する抵抗性が高いといえる。

6. 結 論

超高速・高面圧条件での溶融潤滑状態での摩擦・摩耗現象を対象に 1 次元熱伝導方程式に基づく解析手法を構築し各種検討を行い、次の結論を得た。

- (1) 本理論によりしゅう動子材料の熱物性値を用いて摩擦及び摩耗に関する現象を定量的に検討することができる。
- (2) 摩擦係数はしゅう動子の長さの影響を受け、しゅう動子の長さが長いほど摩擦係数は低くなる。
- (3) 比較検討したしゅう動子材料の範囲では、熱伝導率、熱拡散率、融点及び潜熱の高い丹銅が最も適していることが裏付けられた。

文 献

- (1) Montgomery, R. S., Wear 36, (1976), 275-298
- (2) Montgomery, R. S., Wear 38, (1976), 235-243
- (3) Montgomery, R. S., ARLCB-TR-83031, (1983)
- (4) Montgomery, R. S., ARLCB-TR-78021, (1978)
- (5) Montgomery, R. S., WVT-TR-76015, (1976)
- (6) 松山, 機論, 70-689, C(2004), 266-271
- (7) 日本機械学会編, 伝熱工学資料(改定第4版), (1986), 6, 日本機械学会