不規則微小突起をもつ機械加工面の 接触伝熱機構 (第3報)*

——接触面の空隙部に介在物がある場合の接触熱抵抗——

柳 和 久** 塚 田 忠 夫**

Thermal Resistance Caused by Machined
Surface Asperities in Contact
(3rd Report)

—Thermal Contact Resistance with Consideration of Interstitial Material in the Clearance of Interface—

Kazuhisa YANAGI and Tadao TSUKADA

This paper deals with the comparison between the calculated values of thermal contact resistance and experimental results when interstitial material such as air or oil exists in the clearance of interface. The overall behaviour of thermal contact resistance is discussed by the calculated results which give a good fit to the experimental data. The conclusions obtained are as follows: (1) The calculation of thermal contact resistance involves

the property that the effective thermal conductivity of air or oil at the interface decreases as the mean distance of the clearance becomes small. (2) Thermal contact resistance decreases with an increase in thermal conductivity of interstitial material and undertakes smaller variation to the applied load than in vacuum environment. (3) Thermal contact resistance shows a linear increase to surface roughness on a double logarithmic chart. Although the harder contacting members enlarge the thermal contact resistance, its variation in the range of light applied load becomes considerably small with increasing thermal conductivity of interstitial material.

Key words: thermal resistance, interface, surface roughness, interstitial material, effective conductivity, clearance.

1. 緒 言

表面おうとつに方向性のある2平面の接触のうち、表面おうとつの方向を一致させた場合の接触熱抵抗について、第1報¹⁾では理論解析を示し、第2報²⁾ではSK3, SUS304, C2600Rの材料を用いた真空中の接触熱抵抗の実験結果と計算結果とを比較し、両者がよく一致することを確認した。

本報は、接触2平面間の空隙部に空気や油等が介在する場合の接触熱抵抗についての検討結果を報告する。実験は平面研削加工面の接触について行い、第2報と同様に試料の材質はSK3, SUS304, C2600Rで同種金属どうしの接触とした。なお、介在物としては大気圧空気とスピンドル油(JIS K 2210)を用い、接触面の加工変質層の影響については無視できるものとした。

2. 微小すきまにおける介在物の有効熱伝導率

2.1 接触突起間の平均すきま

接触2平面間の空隙部に熱伝導物質が介在する場合、

* 原稿受付 昭和55年12月26日。熊本地方講演会(昭和54年11月26日)にて発表。

** 正 会 員 東京工業大学工学部(東京都目黒区大岡山2-12-1)

熱は突起の接触部と空隙部の両方を通過する。このうち介在物を通過する熱量については、介在物の熱伝導率と接触面の空隙部の大きさに依存することを図1の接触モデルを用いて解析した¹⁾。

図2は、図1(b)でモデル化した隣接突起間の平均すきま b と接触荷重 P/A (P は見かけの接触面積 A に作用する垂直荷重)の関係を、 σ_e と p_m でそれぞれ無次元化して示したものである。ここで、 K_1 は微小突起の弾塑性変形の性質を表す接触係数 $4 \tan \theta_e p_m / (\pi E_e)^{3/2}$ 、 σ_e は接触2平面の表面おうとつの標準偏差を σ_1, σ_2 とおくと次式で表される等価の標準偏差

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

p_m は接触面の塑性流動応力で、軟らかい方の接触部材のビッカース硬さ、 $\tan \theta_e$ は等価された突起の半頂角を

図1 表面おうとつの接触モデル

図2 接触荷重と平均すきまの関係

図3 狭いすきまにおける気体の熱伝導

θ_e としたときの $\tan \theta_e$ の平均、 E_e は接触2部材の縦弾性係数を E_1, E_2 、ポアソン比 ν_1, ν_2 とするとき次式で与えられる有効縦弾性係数である。

$$\frac{1}{E_e} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (2)$$

図2より、平均すきま b は荷重と K_1 が大きくなるにつれて小さくなるのがわかる。また、実際の接触条件は $P/A < 100$ MPa, $p_m = 1 \sim 10$ GPa, $K_1 = 0.1 \sim 1$, $\sigma_e = 0.3 \sim 2$ μm と考えられるので、平均すきま b はほぼ 10 μm 以下の範囲に入る。このような微小なすきまでは、介在する気体等の熱伝導率が見かけ上低下することが報告されている⁴⁾。次節において、接触熱抵抗の実験に使用する大気圧空気とスピンドル油に関してこの現象の検討を行う。

2.2 平行2平面間に介在する空気と油の熱伝導

対向する滑らかな2平面間に気体がある場合の熱伝導は、図3に示す間隔 b が、気体分子の平均自由行程 l に対して $10^{-2} < l/b < 10^{-1}$ の関係にあるとき、気体層と壁面との間に温度飛躍を生じ、両壁面の温度 T_{s1}, T_{s2} から導かれる気体の有効熱伝導率 λ_a (距離 b で T_{s1} から T_{s2} に温度降下するとして気体の見かけ上の熱伝導率で、熱流束を q として $\lambda_a = q \cdot b / (T_{s1} - T_{s2})$ で与えられるもの) が低下するといわれている⁵⁾。ここでは、このような性質を把握するために図4に示す実験装置を用

1: 加熱器 (冷却器), 2: 上部試験片, 3: 2平面間の介在物, 4: 電気マイクロメータ検出器, 5: マイクロメータヘッド, 6: 下部試験片, 7: 冷却器 (加熱器), 8: 粒状発泡スチロール, 9: ガイドリング, 10: 油だめ用リング, 11: クロメル・アルメル熱電対

図4 狭いすきまの介在物の有効熱伝導率測定装置

い、以下に示す方法で2平面の間隔 b と λ_a の関係を大気圧空気に対して求めた。

試験片は図4に示すように材質がSK3の円筒形状②、⑥のものをを用いた。この試料は周囲の熱伝達の影響を少なくするために二重円筒構造となっており、円筒面間のすきま部には粒状発泡スチロール⑧を充てんした。また、上下の試験片の端面は $R_a \leq 0.05$ μm 程度の滑らかな面に仕上げた。2平面の間隔は、試験片の周囲3か所に取り付けたマイクロメータヘッド⑤で与え、このマイクロメータヘッドとは別の支え板に取り付けた3個の電気マイクロメータ検出器④で測定するようにした。上下の試験片は加熱器と冷却器を兼ねた取付台①、⑦に取り付け、実験中に熱流の方向を上向きと下向きに変えられるようにした。

実験では、間隔の設定に対する熱変形の影響を少なくするため、両試験片の端面が接触した状態で加熱、冷却し、安定した後、に所定の間隔を与えた。定常状態における試験片の温度は素線径 0.32 mmのクロメル・アルメル熱電対⑪で測定し、軸方向の温度分布と温度勾配 dT/dy を求め、端面温度 T_{s1}, T_{s2} は外挿して得るようにした。対向する2平面間の介在物の有効熱伝導率 λ_a 、および介在物の平均温度 T_m は、次式によって求めることにした。

$$\frac{\lambda_a}{\lambda} = \left| b \frac{dT}{dy} / (T_{s1} - T_{s2}) \right| \quad (3)$$

$$T_m = (T_{s1} + T_{s2}) / 2 \quad (4)$$

ここで、 λ : 試験片の熱伝導率 (48 W/mK)。

(a) b と λ_a の関係

(b) 温度勾配の影響

(c) 平均温度の影響

図5 大気圧空気の有効熱伝導率

図5に、2平面間に大気圧空気(室温の相対湿度60~70%)が介在する場合の b と λ_a の関係を示す。 λ_a は、 b の減少に伴って低下し、空気を通ずる熱流の強さにはほとんど依存しないが、2平面間の平均温度の影響を受けることがわかる。なお、実験範囲($b=5\sim100\mu\text{m}$)では熱流の方向を上向きと下向きに変えても λ_a の実験結果に差がみられなかった。

以上の方法を液体にも適用し、2平面間にスピンドル油を介在させた場合の実験を行った。その結果を図6に示す。この場合も、 λ_a は b の減少に伴って小さくなっており、2平面の間隔の影響がみられる。しかしながら、 T_m に対する λ_a の変化は実験値のばらつきの範囲に入ってしまう、明確な影響はみられなかった。なお、使用したスピンドル油は市販のものである。

さて、前節に述べたように、接触突起部の平均すきま b はほぼ $10\mu\text{m}$ 以下とみなせるので、接触面の空隙部に介在する空気、油等の有効熱伝導率はすきまの関数、空気に対しては、さらに平均温度 T_m の関数として導入することが必要であり、本研究では図5、図6の結果を接触熱抵抗の数値計算に用いることにした。しかしながら、図5と図6で $b<5\mu\text{m}$ の範囲の λ_a を実験することは非常に難しいため、この範囲の λ_a は $b=5\mu\text{m}$ のときの値を採用することにし

図6 スピンドル油の有効熱伝導率

た。

3. 接触熱抵抗の実験方法と実験条件

接触熱抵抗の実験装置、および試験片形状は前報²⁾と同一のものを用いた。本報の実験は大気圧の空気中で行うため、ガードリングと試験片との間に断熱材として粒状発泡スチロールを充てんさせ、試験片側面からの熱伝達の影響を取り除くようにした。

接触面の空隙部の介在物が空気の場合には、上下の試験片の接触面をトリクロールエチレンで洗浄した後、表面おうとつ方向と両試験片の軸心を合わせて装置に取り付けた。また、スピンドル油を介在物とするときには、試験片を加熱してから接触面にスピンドル油を付着させた。実験は、試験片の温度分布が定常状態となった時点で試験片の温度勾配 dT/dy 、接触面の見かけの温度差 ΔT 、接触荷重 P/A 、接触面の平均温度 T_m を測定し、接触熱抵抗 R_0 を次式により求めた。

$$R_0 = \frac{\Delta T}{-\lambda dT/dy} \quad (5)$$

本報では、同種金属どうしの接触について実験したが、

表1 試験片の表面特性

実験記号	材 質	σ_1 (μm)	σ_2 (μm)	σ_e (μm)	p_m (GPa)	E_e (GPa)	λ_m^* (W/mK)
SC-1	SK 3	1.77 ㊦	1.76 ㊦	2.50	2.30	112	48
SC-2		0.68 ㊦	0.64 ㊦	0.93	2.41	112	48
SC-3		0.50 ㊦	0.05 ㊦	0.50	2.40	112	48
SC-4	SK 3	1.78 ㊦	1.77 ㊦	2.51	4.63	112	46
SC-5		1.04 ㊦	0.97 ㊦	1.42	4.81	112	46
SC-6		1.48 ㊦	0.08 ㊦	1.48	2.35	112	48
SU-1	SUS 304	1.76 ㊦	0.20 ㊦	1.77	2.27	105	16
SU-2		1.20 ㊦	0.91 ㊦	1.51	2.20	105	16
SU-3		0.71 ㊦	0.05 ㊦	0.71	2.33	105	16
BR-1	C 2600 R	1.42 ㊦	0.51 ㊦	1.51	1.35	54	110
BR-2		0.73 ㊦	0.58 ㊦	0.93	1.37	54	110
BR-3		0.55 ㊦	0.31 ㊦	0.63	1.43	54	110

㊦ 平面研削加工面, ㊦ ラップ加工面

1 GPa=102 kgf/mm², 1 W/mK=0.86 kcal/mh°C

*文献6)による

(a) 材質 SK 3 の場合

(c) 材質 SUS 304 の場合

(b) 材質 SK 3 の場合

(d) 材質 C 2600 R の場合

図7 接触面に空気が介在するときの P/A と $\lambda_m R_0$ の関係

用いた試験片の特性を表1に示す。実験記号のSCは材質SK3, SUはSUS304, BRはC2600Rどうしの接触を表しており, σ は表面おうとつの標準偏差, 添字の1, 2は接触している二つの試験片の区別である。①の記号の付いた試料の表面おうとつは, 接触する相手表面のおうとつより十分に小さく, 滑らかな平面とみなせるものである。また, σ_e と E_e は式(1),(2)により等価したものである。塑性流動応力 p_m は, 接触する試料のうち軟らかい方のビッカース硬さであり, 接触面に関する等価熱伝導率 λ_m は次式によって導かれたものである¹⁾。

$$\frac{1}{\lambda_m} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} \right) \quad (6)$$

4. 実験結果と計算結果の検討

4.1 実験値と計算値の比較

大気圧空気を介在物とした場合の接触荷重 P/A と接触熱抵抗の等価長さ $\lambda_m R_0$ ¹⁾の実験値を丸印で図7に示す。各実験点は荷重過程のもので, それぞれ3回の測定の平均である。実線は表1に示した σ_1, σ_2 と E_e, p_m から第1報の計算方法により求めたものである。接触面の空隙部に介在する空気の熱伝導率 λ_a と λ_m の比 λ_a/λ_m は, 図5の値を用いた。なお, $\lambda_a=0$ の破線は介在物がない真空中の接触熱抵抗の計算値である。図7より, 大気圧空気中の $\lambda_m R_0$ は真空中の場合より著しく減少し, 荷重に対する変化が小さくなっていることがわかる。これは, 軽荷重域において, 介在する空気の熱伝分担が大きくなっているためである。この現象は λ_a が λ_m に近い場合に顕著で, λ_a/λ_m が比較的大きいSUS304の場合には他の条件の結果より荷重に対する接触熱抵抗の変化は小さくなっている。一方, 同一の接触荷重では σ_e が大きいもの

(a) 材質 SK3 の場合

(b) 材質 C2600 R の場合

図8 接触面に油が介在するときの P/A と $\lambda_m R_0$ の関係

ほど $\lambda_m R_0$ が大きくなっており, λ_a/λ_m とともに σ_e が大きく影響することがわかる. また, 図7から, 計算値は実験値によく一致しているといえる. なお, 図7(b)で SC-5 と SC-6 の計算結果が交差しているのは, 試料の硬さと λ_a/λ_m , および σ_2/σ_1 が両者で異なっているために生じたもので, これらの効果については次節で検討する.

図8は, 接触面の空隙部にスピンドル油を介在させたときの $\lambda_m R_0$ と P/A の関係を示すものである. 図7と同様に丸印が実験値で, 実線が計算結果である. $\lambda_m R_0$ は, 空気を介在させたときよりもさらに減少している. また, 荷重に対する $\lambda_m R_0$ の変化も小さく, 図8(a)の SC-5 にみるように, 硬い試料では低下の割合が非常に小さくなっている. 一方, λ_a/λ_m の小さい図8(b)では, 荷重に対する $\lambda_m R_0$ の変化は比較的大きく, 図8(a)ほど介在物の影響を受けていない. スピンドル油を接触面の空隙部に介在させた場合も, 表面おうとつの影響は空気のとときと同様に現れており, 計算値と実験値はよく一致している.

4.2 表面おうとつの大きさと接触熱抵抗

図9は, σ_e と $\lambda_m R_0$ の関係を材質 SK3 を例として, 接触している一方の表面おうとつ $\sigma_2=0$ の場合の計算結

図9 σ_e と $\lambda_m R_0$ の関係 図10 接触熱抵抗に対する σ_2/σ_1 の影響

果を示したものである. 同一の接触荷重では, $\lambda_m R_0$ と σ_e は両対数紙上でほぼ直線的な関係にあり, その傾きは接触荷重と λ_a/λ_m の値に依存している.

図10は, σ_e を一定としたときの接触2表面のおうとつの大きさの比 σ_2/σ_1 と $\lambda_m R_0$ の関係を示す. ここで, R_{00} は $\sigma_2/\sigma_1=0$ のときの R_0 の値である. R_0/R_{00} は, σ_2/σ_1 の増大とともに減少するが, σ_e が大きい場合に著しい. また, λ_a/λ_m が大きいものほど R_0/R_{00} の低下の割合が小さくなっている. 以上の性質は, σ_e が同じでも接触変形が σ_2/σ_1 によって異なってくるために生じたものであるが, 介在物質の熱伝導率が比較的大きい場合や, 小さな表面おうとつの接触面に関しては, 接触熱抵抗に対する σ_2/σ_1 の影響は一般に無視してもよい量と考えられる.

4.3 接触部材の硬さと接触熱抵抗

接触2平面の表面おうとつの大きさを一定としたときの, SK3 に対する接触部材の硬さと接触熱抵抗の関係

図11 p_m と $\lambda_m R_0$ の関係

を計算結果で図11に示す。鋼材の熱伝導率は硬さが高くなるとわずかながら減少する。図11の計算では文献6)のデータを直線補間して用いたが、接触微小突起が塑性変形したときの硬化の影響は無視した。 $\lambda_a = 0$ となる真空中の場合は、前報で明らかにしたように接触部の塑性流動応力 p_m が增大するにつれて $\lambda_m R_0$ が大きくなるが、接触面の介在物の熱伝導率 λ_a が大きくなるにつれてこの傾向は小さくなり、特に図11の実線で示す軽荷重域では p_m の影響はかなり小さい。一方、破線で示す高荷重域においては λ_a の大きいところでも p_m の影響が認められる。すなわち、荷重増加に対する接触熱抵抗の低下は、軟らかいものほど大きくなる。図7(b)においてSC-5とSC-6の曲線が交差したのは、両者の表面おうとつの大きさが近い条件で、硬さの影響が現れたためである。

4.4 接触熱抵抗に及ぼす介在物の影響

図12に、接触面の空隙部の介在物と接触部材の熱伝導率の比 λ_a/λ_m と $\lambda_m R_0$ の関係を示す。 $\lambda_m R_0$ に対する λ_a/λ_m の影響は接触荷重によって変化し、比較的小さい荷重域で $\lambda_m R_0$ の変化が大きくなっている。また、図12の接触条件では、 P/A が10 MPa程度になると $\lambda_a/\lambda_m < 10^{-4}$ に対する $\lambda_m R_0$ の値が $\lambda_a = 0$ の場合にかかり接近してくる。これは、真実接触面積の増大に伴って、比較的热伝導率の小さな介在物では伝熱分担がわずかとなり、接触突起部での縮流抵抗が接触熱抵抗の成分のほとんどとなるためである。一方、 λ_a/λ_m が大きくなるにつれて $\lambda_m R_0$ は減少してゆき、 $\lambda_a/\lambda_m > 5 \times 10^{-3}$ では非常に小さな値となる。一般に、接触伝熱問題では $\lambda_m R_0 < 1$ mm程度の接触熱抵抗は無視できる値とみなせるので、接合面の熱抵抗は $\lambda_a/\lambda_m > 5 \times 10^{-3}$ の範囲では一体形と大差がないといえる。

図12 λ_a/λ_m と $\lambda_m R_0$ の関係

5. 結 言

表面おうとつの方向を一致させた場合の接触熱抵抗について、接触面に空気、およびスピンドル油が介在する場合の検討を行い、計算値が実験結果によく一致することを明らかにし、次のような結論を得た。

- (1) 接触している2平面間の空隙部に介在している空気およびスピンドル油の有効熱伝導率は、空隙部の平均すきまの減少とともに低下することを実験で明らかにし、接触熱抵抗の計算ではこの性質を考慮する必要があることを提示した。
- (2) 接触面の空隙部における介在物の熱伝導率が大きいものほど接触熱抵抗は低下することを定量的に明らかにした。
- (3) 接触熱抵抗は、空隙部の介在物によらず、接触2平面の等価された表面おうとつの大きさに対して両対数紙上で直線的に増大する。
- (4) 接触部材が硬いものほど接触熱抵抗は大きくなるが、硬さの影響は介在物の熱伝導率が增大するにつれて小さくなる。この傾向は、軽荷重域で顕著である。

最後に、本研究を遂行するにあたり御協力いただいた加納大助技官(東京工科大学)に心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) 柳 和久, 塚田忠夫: 不規則微小突起をもつ機械加工面の接触伝熱機構(第1報), 精密機械, 47, 2 (1981) 179.
- 2) 柳 和久, 塚田忠夫: 不規則微小突起をもつ機械加工面の接触伝熱機構(第2報), 精密機械, 47, 6 (1981) 712.
- 3) 塚田忠夫, 阿武芳朗: 表面おうとつによる接触部剛性(第4報), 日本機械学会論文集, 37, 304 (1971) 2400.
- 4) R. A. Oman and R. A. Scheuing: On Slip-flow Heat Transfer to a Flat Plate, J. Aero/Space Sciences, 26, (1959) 126.
- 5) 甲藤好郎: 伝熱概論, 養賢堂(1978) 201.
- 6) Y. S. Touloukian: Thermophysical Properties of Matter, Vol. 1, IFI/Plenum, New York & Washington, (1970).