砥石接近時に増大する研削液噴出現象の発現と この現象を応用したタッチセンサの試作*

中島利勝** 塚本真也** 和泉純一*** 關正憲†

Development of Touch Sensor Based on Spouting Phenomenon of Grinding Fluid During Wheel Approach

Toshikatsu NAKAJIMA, Shinya TSUKAMOTO, Jun-ichi IZUMI and Masanori SEKI

In this paper, a new touch sensor which can detect the contact point of grinding wheel with the workpiece at the beginning of grinding process, is developed on the basis of the spouting phenomenon of grinding fluid from the grinding wheel surface during the wheel approach. Main conclusions obtained are as follows : (1) The developed touch sensor is a thermal sensor which detects electric resistance changes of nichrome thin film incorporated in a bridge circuit. (2) With the touch sensor the wheel approach can be detected at $42.9\mu\text{m}$ before the contact point in this experimental conditions of plunge speed $V_p=2\mu\text{m/s}$ and grinding fluid flow rate $Q=15\text{L/min}$. (3) It is made clear that the unique phenomenon, in which the spouting volume of grinding fluid from the grinding wheel surface increases, occurs as the wheel approaches towards the contact point.

Key words: grinding, new touch sensor, spouting volume of grinding fluid, contact point of grinding wheel, nichrome thin film, wheel approach process

1. 緒 論

AE(Acoustic emission)を利用して砥石と工作物との接触開始点を検出するタッチセンシング技術に関しては、数多くの研究論文が報告されている^{1)~5)}。しかし、AEセンサでは砥石最外周砥粒が工作物を擦過したときに発生するAE信号の初発信位置を接触開始点として感知する¹⁾ため、その検出性能には物理的限界が存在する。例えば、砥石軸動力信号の立ち上がり点と比較して、接触位置を $1.6\mu\text{m}$ 早期に感知できたのが、報告されている最高検出データ²⁾である。

本研究では図1(c)のモデル図に示すように、工作物と完全に離れた位置で砥石接近を感知することが可能なセンサを試作した。すなわち、図(a)の研削抵抗 p 、 q の変化過程と比較すれば明白のように、図(b)では砥石と工作物との間隔が $42.9\mu\text{m}$ の位置からセンサ信号 E_T が降下し始め、研削時間 $t=0\text{s}$ の接触点へ近づくにつれて急減する特異な降下現象を示した。

この降下現象はニクロム箔(は)抵抗式の砥石表面温度センサの開発を試行錯誤していた研究過程で、偶然発見した現象である。もし、センサ信号 E_T の降下現象が砥石接触前の再現性のある現象であるならば、砥石接近の感知領域が極めて広範囲であることから、AEセンサよりも優れた検出性能を有するタッチセンサの開発が可能になると考えられる。

そこで本報告では、まず図1の砥石接近時における降下現象が実現象であることを検証し、この降下現象を応用したタッチセンサを試作する。さらに基本的な加工条件の変化に対するセンサの信号特性を検討している。

2. タッチセンサの構成と測定方法

図2に、試作したタッチセンサの構成を示す。厚さ $3\mu\text{m}$ のニ

Fig.1 Sensor signal E_T which shows touch sensing function before grinding

* 原稿受付 平成11年6月28日

** 正会員 岡山大学工学部 (岡山市津島中3-1-1)

*** 学生会員 岡山大学大学院 (現、日本電気硝子(株)、滋賀県伊香郡高月町高月1979)

† 学生会員 岡山大学大学院 (現、岡山大学工学部)

Fig.2 Measurement system of touch sensor

クロム箔のセンサ検出部を、2枚の亚克力板間に接着することでセンサ本体を作製した。センサの測定原理はニクロム箔の温度推移に伴う電気抵抗の変化をブリッジ回路⁶⁾で検出し、アンプで増幅したのちパソコン搭載のADボードを用いてサンプリング間隔100msでインプロセス測定している。

ブリッジ回路の固定抵抗 R_1 , R_2 , R_3 はすべて120Ωとし、可変抵抗 R_v ($<200\Omega$)を組み込んでニクロム箔抵抗 $R_T=3.03\Omega$ との平衡調整回路を構成させている。図中のブリッジ電圧 $e_1=2V$ に対する出力電圧 e_T は、ニクロム箔の抵抗変化を ΔR_T とすると次式で与えられる⁶⁾。

$$e_T = e_1 \cdot \Delta R_T / 4 (R_v + R_T) \quad (1)$$

さらに、 e_T をアンプで 2×10^4 倍に増幅したものが、図1のmV単位で示したセンサ信号 E_T である。本論文では試作センサの出力を、この E_T あるいは後述の温度に換算したセンサ検出温度 T_s で表記している。

図3にタッチセンサの設置状況を示す。センサ本体は超精密ステージに固定している。この超精密ステージはV溝クロスローラ方式の移動ガイドを備えており、10mmの総移動量に対する移動真直度は $5\mu m$ である。センサ検出部は、工作物直下の図中の帯で示す砥石面中央かつ砥石中心角が $\pi/4$ radの位置に設置した。

まず実験準備として、図2で作製したセンサ検出部の平面部を砥石で研削し、砥石円弧面と同じ形状に加工した。次に、ステージの固定位置とステージ内蔵バネの長さを調整することで、計測実験中はセンサ本体を砥石面に一定圧力で接触させている。この測定方式を採用した理由については、次のようである。

既述のように、本研究の端緒となったセンサ信号の降下現象は、砥石表面温度センサの開発を試みていたときに偶然発見したものである。その段階では、センサを砥石面に対して一定間隔を設けて固定し、非接触式センサとして実験していた。

図4が、非接触式センサによる降下現象発見時の測定データである。砥石—センサ検出部の間隔 $G_a=100\mu m$ に設定したとき、研削時間 $t<0s$ の砥石接近過程において、センサ信号 E_T の微小な降下現象が見られた。そのとき初めて、図示の降下現象を明確に検出するならばタッチセンサの開発が可能である、とのアイデアが想起されたのである。

解析の結果、間隔 G_a が狭いほど、センサ信号 E_T の降下量は増大することが分かった。しかし、非接触式センサのニクロ

Fig.3 Setting situation of touch sensor on grinding wheel

Fig.4 Discovery of touch sensing phenomenon

ム箔は、図中に示すようにセンサ検出部の円弧面に直接接着しているため、間隔 G_a をゼロにはできない。さらに、砥石摩耗とドレッシングによる間隔変化に伴って、センサ信号 E_T の出力値が変動してしまい、タッチセンサとしての安定度に問題があった。

以上の問題点を改良した結果、本研究の試作センサでは図2のように亚克力内部にニクロム箔を接着させ、センサ信号 E_T の降下量が最大となる間隔 $G_a=0\mu m$ の状態、つまり図3で示すセンサ検出部を一定圧力で砥石面に弾性的に接触させる測定方式とした。

当然、センサ信号 E_T の降下現象を確かかつ安定に測定するためには、センサ接触圧力の調節が重要である。本実験ではセンサ接触圧力を2.6kPa(押し付けバネ力 $P_B=0.78N$)に設定した。この設定値で、空転時のセンサ信号 E_T にゼロ点ドリフトが発生していない実験結果(図1あるいは後掲の図8参照)から、センサの弾性的接触がほぼ実現できたと考えられる。

実験は、研削液の供給をノズルから自然落下させる円筒プランジ研削方式で実施し、センサの信号特性を検討するために、次の2条件を変化させた。

プランジ速度: $V_p=1\sim3\mu m/s$

研削液供給量: $Q=5\sim28L/min (=8.33\sim46.7 \times 10^{-5} m^3/s)$

その他の実験条件は以下に示すとおりである。

研削盤: NC円筒研削盤((株)シギヤ精機製作所製、型式: G-30E)

研削砥石: WA80L7V($\phi 400mm \times 50mm$)

工作物: SCM435($\phi 110mm \times 10mm$, HV=314)

砥石周速度: $V_s=43.1m/s$

速度比: $K_v=0.013$

システム剛性: $k_{sy}=13.95N/\mu m$

ドレッシング条件: 切込み $5\mu m \times$ 送り $0.1mm/砥石一回転 \times 2$ 回

研削液: W2種1号, 80倍希釈

Fig.5 Calibration of sensor temperature T_s corresponding to sensor signal E_T

3. タッチセンシング機能の発現メカニズム

試作センサの砥石接近過程における出力信号 E_T の降下現象が再現性のある現象ならば、試作センサはタッチセンシング機能を発現していることになる。したがって、タッチセンシング機能の発現メカニズムを解明するためには、温度変化を検出しているセンサ信号 E_T をセンサ検出温度 T_s に換算する必要がある。

図5にセンサ検出温度 T_s の検定結果を示す。温度検定は以下の手順で実行した。二つの容器に、基準温度 $\theta_{f1}=293.15\text{K}$ と図中のプロット点の温度差をもつ研削液をそれぞれ満たし、センサをステージごと容器内に沈降させて測定している。図からセンサ検出温度 T_s はセンサ信号 E_T と完全な直線関係があることが分かる。得られた換算式は以下のとおりである。

$$T_s = 0.0197 E_T \quad (2)$$

ただし、この検定方法は実験中のセンサの雰囲気条件とは異なる。厳密には、実験時と同様に砥石と工作物を回転させた状態で、ノズルから温度差をもつ研削液を供給する方法で検定すべきだと判断されるかもしれない。

ところが、この場合、研削液供給量 Q の大小で式(2)の係数が変化してしまう。しかも後述するように、センサ信号 E_T の降下現象は、センサに衝突する研削液の温度が変化しない状態で発生するため、この検定方法も実際の雰囲気条件とは異なっている。そこで本実験では、砥石接近時のセンサ信号 E_T に相当する出力を得るために必要なニクロム箔全体の平均変化温度として、センサ検出温度 T_s を定義し、上記の検定方法を採用した。

図6(b)に、プランジ速度 $V_p=2\mu\text{m/s}$ 、研削液供給量 $Q=15\text{L/min}$ の条件におけるセンサ検出温度 T_s の初期値を 0°C とした相対的な温度変化を示す。一方、図6(a)は、図3のセンサ上部の砥石面から 1mm の位置に設置したCA（クロメル—アルメル）熱電対の検出温度 θ_f である。 $t \geq 0\text{s}$ の研削過程において、センサ検出温度 T_s は研削熱で昇温した砥石表面温度と研削液温度を検出し、一方、熱電対検出温度 θ_f は衝突する研削液の温度を計測しているため、両温度が研削過程で定性的に同様の変化形態となるのは、当然であろう。

ここで注目すべき箇所は、 $-21.5\text{s} < t < 0\text{s}$ の砥石接近過程における両温度の差異である。この領域で、熱電対検出温度 θ_f がゼロを維持するのに対し、センサ検出温度 T_s は降下している。すなわち、液温度が変化しないにもかかわらず、 T_s がこの領域で降下するためには、それ以前の $t \leq -21.5\text{s}$ の領域でセンサのニクロム箔が T_s の降下量だけ少なくとも昇温していなければならない。

この昇温機構は、CA熱電対と試作センサの測温原理を考慮すれば明確である。すなわち、CA熱電対は発生起電力をアン

Fig.6 Comparison of sensor temperature T_s with grinding fluid temperature θ_f

Fig.7 Collecting container of spouted grinding fluid from grinding wheel surface and its setting condition

プで単に増幅しているものであるから発熱しないが、試作センサでは図2に示すブリッジ回路の負荷電圧 $e_i=2\text{V}$ によるジュール発熱と図3の押し付けバネ力 $P_B=0.78\text{N}$ による摩擦発熱が必然的に発生する。

以上の考察から、センサ発熱機構と後述のセンサ冷却効果を組み合わせれば、降下現象の合理的説明が可能となる。すなわち、 $-21.5\text{s} < t < 0\text{s}$ の領域において液温一定の研削液で T_s が降下するからには、センサ本体—特にニクロム箔が露出しているセンサ検出部—に衝突する研削液量が増大し、発熱したセンサの冷却効果が促進されているためだと本論文では予想した。

もっとも、研削液は空気の流れまわり層で遮断され、砥石面に接触しているセンサ検出部へは、ほとんど衝突しないのではないかと判断されるかもしれない。ところが、砥石面から研削液が噴出する現象に関しては、詳細な解析が西脇氏、齊藤氏によって既に報告されている⁷⁾。両氏は砥石と工作物との間隔をゼロに設定した平面研削で、砥石円周面に研削液を回収する装置を取り付けて、噴出量を測定している。その実験結果から、空気の流れまわり層に抗して研削液は研削点を通り、砥石回転面から噴出する現象が実証された。

したがって、砥石接近過程つまり砥石と工作物との間隔がゼロに近づく領域で、もし砥石面からの研削液噴出量が増大しているならば、 T_s の降下現象の発現メカニズムは解明できる。

本論文では研削液噴出量の変化を実測するために、図7に示すAとBの窓を設けた容器を作製した。この容器をステー

ジに固定し、工作物を研削していない砥石面AにA窓を、工作物直下のセンサ検出部と同じ砥石面Bに容器のB窓を接触させ、センサ検出時と同じ接触圧力で研削液噴出量を測定している。

図8(a)に、砥石接触点をゼロとした砥石接近距離 d に対する研削液噴出量 Q_s の測定結果を示す。 $d=-100\mu\text{m}$ の測定開始点から砥石をプランジ速度 V_p で移動させ、図中のそれぞれのプロット点で研削液の供給を停止すると同時に砥石を急速後退させ、容器内に回収された噴出液量を計測した。ここで、容器の窓A, Bを通過した単位面積当たりの研削液噴出量をそれぞれ $Q_s(A)$, $Q_s(B)$ と定義する。なお、実験はプランジ速度 $V_p=1\mu\text{m/s}$ 、研削液供給量 $Q=15\text{L/min}$ の条件で実施している。

工作物と接触しない砥石面Aからの研削液噴出量 $Q_s(A)$ は、空気の連れまわり層⁸⁾に遮断されて、わずかに増加するだけである。これに対して、工作物直下の砥石面Bから噴出する液量 $Q_s(B)$ は初め直線的に増加し、そののち増加傾向を加速させている。図8(b)は、単位時間に砥石面から噴出する研削液量、すなわち図(a)の $Q_s(A)$, $Q_s(B)$ の変化曲線を時間で微分した研削液噴出変化量 $\dot{Q}_s(A)$, $\dot{Q}_s(B)$ である。 $\dot{Q}_s(B)$ の増加傾向に対応させて、図8(c)にセンサ検出温度 T_s の変化を示す。

図8(b), (c)から、センサ検出温度 T_s の降下現象の発現メカニズムは次のように説明できる。まず、 $d \leq -41.8\mu\text{m}$ の砥石接近過程でセンサ検出温度 T_s が変化しない理由は、研削液噴出変化量 $\dot{Q}_s(B)$ によるセンサ冷却量と前述のセンサ発熱量とが共に一定であるので、発熱・冷却効果が平衡状態となったためである。

さらに砥石が接近した $-41.8\mu\text{m} < d < 0\mu\text{m}$ の領域では、センサ発熱量は変化しないのに対して、研削液噴出変化量 $\dot{Q}_s(B)$ の急増による冷却効果が増進しているため、センサ検出温度 T_s は初め緩やかに、そののち急速に降下する変化形態、すなわち $\dot{Q}_s(B)$ の曲線を反転させた変化形態を呈するようになるのだと判断できる。

以上のことから要するに、センサ検出温度 T_s の降下現象すなわちタッチセンシング機能は、砥石接近過程で研削液噴出量が増大する現象を、本論文で試作した抵抗式センサがニクロム箔温度として検出したものである。

4. タッチセンサの信号特性

試作タッチセンサの主要な信号特性は、図8(c)に示す接近感知距離 d_T と接触点検出温度 T_{so} で評価できる。例えば、 d_T の大小でギャップ検出性能が決定され、 T_{so} とデータ信号の振幅の比で感度が定まる。ここでは、基本的な研削条件であるプランジ速度 V_p と研削液供給量 Q に対する d_T と T_{so} の変化を検討する。

図9(a)は、プランジ速度 V_p を1, 2, 3 $\mu\text{m/s}$ に変化させたときのセンサ検出温度 T_s の信号曲線を示す。横軸を砥石接近時間 t で示したこの図では、プランジ速度 V_p が小さいほど、早い時期に砥石接近を感知している。

ところが、図(b)において横軸を砥石接近距離 d で表示すると、3本の信号曲線は $d < 0\mu\text{m}$ の範囲で完全に一致する。すなわち、図(c)に示すように、接近感知距離 d_T と接触点検出温度 T_{so} はプランジ速度 V_p には影響されない値であることが分かる。

センサの応答性との兼ね合いで、信号曲線が一致する V_p 値には限界があると考えられるが、この信号特性はタッチセンシング機能としては非常に有効である。なぜならば、能率向上を目的に研削初期に砥石を急速前進させ、接近を感知した段階からプランジ速度 V_p を連続的に変化させても、センサの信号曲線が

Fig.8 Variations of spouted grinding fluid volume Q_s from grinding wheel and sensor temperature T_s

Fig.9 Variations of sensor temperature T_s with plunge speed V_p

変化しないため、砥石接触位置を正確に予測できるからである。

図10に、研削液供給量 Q を5, 15, 28 L/min に変化させたときのセンサ検出温度 T_s の信号曲線ならびに接近感知距離 d_T と接触点検出温度 T_{so} の変化を示す。研削液供給量 Q が信号特性に影響を及ぼす条件であることは図から明らかであり、 Q が大きいほど d_T と T_{so} の絶対値は共に増大している。この理由は容易に

Fig.10 Variations of sensor temperature T_s with grinding fluid flow rate Q

Fig.11 Non-dimensional analysis of sensor temperature T_s

推測できるように、研削液供給量 Q を増加させると研削液噴出量が増大し、その結果、センサが急速に冷却されるためと考えられる。

試作したタッチセンサの信号特性に影響を及ぼす研削条件としては、研削液供給量 Q 以外に研削液供給方法、砥石周速度、粒度、工作物半径などが考えられる。信号特性に対するこれらすべての影響を解析することは、実用タイプのタッチセンサには不可欠であるが、現段階では研削条件を変更したときに有効な解析手法として、以下に示す信号曲線の無次元化法を提案する。

図11に、プランジ速度 V_p と研削液供給量 Q を3段階に変化させたときの砥石接近距離 d とセンサ検出温度 T_s の関係を、接近感知距離 d_T と接触点検出温度 T_{so} で無次元化して示す。信号特性として感度の悪い $Q=5\text{L/min}$ の検出データは振幅が大きいものの、全信号の中心位置は図中の白抜き曲線と一致している。すなわち研削条件変更時には、次式の接近感知距離 d_T と接触点検出温度 T_{so} ならびに曲線形態を決定する指数 n を解析すれば、簡便にタッチセンシング機能が評価できることになる。

$$T_s / T_{so} = (1 - d / d_T)^n \quad (3)$$

5. 実用タイプのタッチセンサ開発指針

本論文のタッチセンサはまだ試作段階であり、実用タイプのタッチセンサを開発するためには、

- 大負荷電圧、大抵抗値のセンサで感度の増強
- 研削点に近い位置における計測で感度の増強
- ノイズの低減
- センサの小型化
- ギャップエリミネータのための自動化

など、多くの改良を重ねる必要がある。

したがって、センサ開発に不可欠な性能評価—感度、応答性、SN比、安定度—に関しては、実用タイプのタッチセンサの開発に際して調査すべき課題と判断し、本論文ではタッチセンサの試作とタッチセンシング機能の発現メカニズムの解明までに留めている。

6. 結 論

本論文では、砥石接近時に増大する研削液噴出現象を応用したタッチセンサを試作し、基本的な研削条件に対するセンサの信号特性を検討した。得られた主な結論は以下のとおりである。

- 砥石面に弾性的に接触させてブリッジ回路で信号検出するニクロム箔抵抗式のタッチセンサを試作した。
- センサ検出温度 T_s は、砥石接近を感知し始めた位置から急減する特異な降下現象を示した。 T_s の降下現象を適用すれば、プランジ速度 $V_p=2\mu\text{m/s}$ 、研削液供給量 $Q=15\text{L/min}$ の本実験条件において、砥石接触点から $42.9\mu\text{m}$ 離れた位置で砥石接近を感知することができる。
- 砥石接近時に増大する研削液噴出現象を実証した。すなわち、工作物直下の砥石面から噴出する研削液量が砥石接近過程で急増する現象を実測により確認した。
- センサ検出温度 T_s の降下現象すなわちタッチセンシング機能は、砥石接近過程で増大する研削液噴出現象を、試作した抵抗式センサがニクロム箔温度として検出したものである。
- センサ信号特性の接近感知距離 d_T と接触点検出温度 T_{so} はプランジ速度 V_p には影響されない値である。一方、研削液供給量 Q が大きいほど d_T と T_{so} は増大する。
- 信号特性評価に有効な解析手法として、次式の無次元化法を提案した。 $T_s / T_{so} = (1 - d / d_T)^n$ 式中の d_T と T_{so} ならびに曲線形態を決定する指数 n を解析すれば、簡便にタッチセンシング機能を評価できる可能性がある。
- 感度の増強、ノイズの低減、センサの小型化など実用タイプのタッチセンサ開発指針を明示した。

参 考 文 献

- 江田 弘, 貴志浩三, 垣野義昭, 藤原彰彦, 山田卓郎: AEを用いた砥石—工作物のタッチセンサ, センサ技術, 3,11(1983)54.
- 稲崎一郎: AEによるドレッシング技術および研削プロセスの監視, 機械と工具, 31,4(1987)18.
- 村上 功: セラミック精密加工でのAEセンサの応用, Fine Ceramics Report, 16,8(1998)212.
- 杉崎卓雄: CNC精密成形研削盤の利用方法の提案, 機械と工具, 33,8(1989)53.
- 越智敏宏, 渡辺直嗣, 平野為義: 研削盤における計測・監視技術, 機械と工具, 33,10(1989)50.
- 渡辺 理: ひずみゲージとその応用, 日刊工業新聞社(1968)65.
- 西脇信彦, 斉藤義夫: 研削点の圧力・熱伝達率分布を解析—冷却効果を高め加工精度の向上狙う—, 日経メカニカル, 3,14(1983)62.
- 斉藤義夫, 伊東 諒, 西脇信彦, 山田健次郎: 砥石車の透過率と周辺の流れの挙動, 精密機械, 44,12(1978)1501.
- 西脇信彦, 斉藤義夫: 砥石車周辺の熱と流れの挙動, 精密機械, 45,2(1979)214.