研究論文

力覚モニター付バフ研磨機の開発

中部　昇*　五十嵐　晃*　小林　豊*　坂井　朋之*
長谷川　博**　長谷川　聡**　佐藤　高幸**　高島　伸之**

Development of Buffing Machine with a Force Feedback Function

NAKABE Noboru*，IKARASHI Akira*，KOBAYASHI Yutaka*，SAKAI Tomoyuki*
HASEGAWA Hiroshi**，HASEGAWA Satoshi**，SATO Takayuki** and TAKASHIMA Nobuyuki**

抄　　録

バフ研磨作業において作業者がワークを押し付ける力とその際にバフとの間に発生する摩擦力をリアルタイムに計測，作業者にフィードバックすることが可能なバフ研磨機を開発した。まず，研究用試作機を開発することにより，研磨時において主軸に作用する荷重を計測する軸受機構およびモータの電流変化を基にした軸トルク推定手法を確立し，実験によりこれらの妥当性を確認した。これらの結果を基に，研磨現場で実証試験を行う実証用試作機を製作した。

1. 緒　　言

バフ研磨作業は図1に示すように高速回転する布製の円盤（バフ）に工作物（ワーク）を接触させて鏡面などに研磨する作業であり，現在大量生産向けに機械化は進んでいるものの，大型，複雑形状のワークでは未だ職人による手作業に依存している。近年，研磨職人の高齢化に伴い熟練技能の伝承が急がれており，県内でも燕市磨き屋一番館での後継者育成活動などが知られている。研磨作業者はワークをムラなく均一に研磨するために，バフに押し付ける際の力加減を微妙に調整し，さらにその感覚の変化から両者の摩擦状態を読み取ることで研磨剤の投入タイミングを計るなど，作業時における力覚は仕上がりに大きく影響する要素であるといえる。

工業技術総合研究所ではこれまでバフ研磨作業の伝承支援を目的として，作業時におけるバフの動かし方や力覚を計測する装置を開発し[1)]，特に力覚において熟練者・非熟練者に差があることを明らかにした[2)]。この結果は外観から窺うことができない力覚情報を，指導する側・される側で共有することの難しさを表しており，力覚情報を可視化することは両者の情報共有を助け，より円滑な技術伝承の実現に有用である

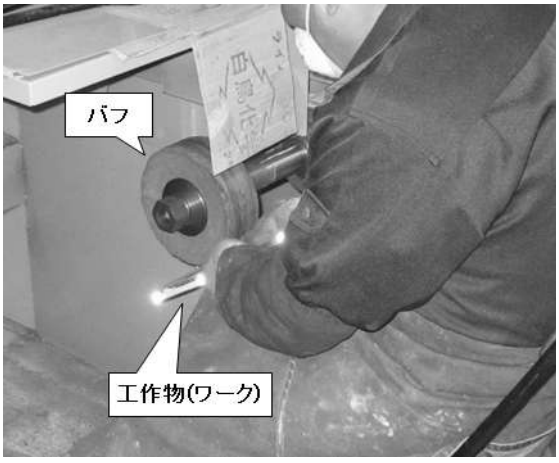
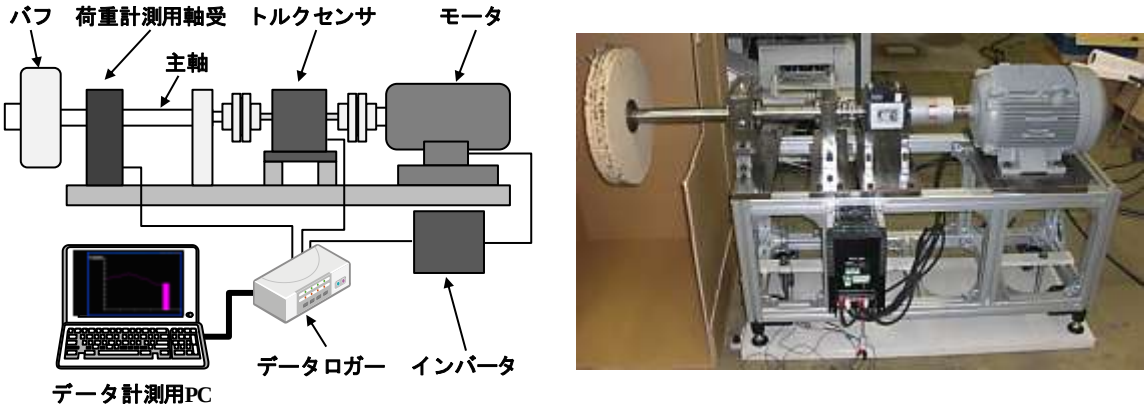


図1　バフ研磨作業

* 研究開発センター
** 株式会社ハセガワマシーナリ



(a) 装置概略　　(b) 装置外観

図 2　研究用試作機

と考えられる。また，生産管理の観点からも，例えば比較的大量の製品を複数の作業者で分担して加工する場合や，以前に他の作業者が行った作業を引き継ぐ場合などにおいて，作業時における力覚情報を作業者間で共有することは困難であり，仕上がりのばらつきが問題になることも多い。

そこで，本研究では研磨時における作業者の力覚，すなわち作業者がワークを押し付ける力（以下押付力）とその時に発生するバフ／ワーク間の摩擦力をリアルタイムでモニター・表示可能なバフ研磨機を開発することを目的とした。

本研究ではまず力覚計測技術の確立を目的として研究用試作機を開発し，その結果を基に研磨現場で実証試験を行う実証用試作機の開発を行った。

2.　研究用試作機の開発

はじめに力覚計測技術の確立を目的として，図 2 に示す研究用試作機を開発した。以下，押付力および摩擦力計測手法について述べる。

2.1　押付力計測手法の開発

ワークの押付力を直接計測することは困難であることから，本研究では主軸を介して軸受に作用する力（以下軸受荷重）を計測し，これから押付力を間接的に推定することとした。

軸受荷重の計測には専用の荷重計測用軸受を試作して用いた。本軸受は内部に変形部を設け，その変形を計測することで軸受に作用する荷重を計測することが可能である。なお，使用者がワークを押し付ける方向が一定でないことから，変形部は使用者に対して上下および前後方向に設け，両者の変形を計測することで任意の方向における荷重が測定できるようにした。

本手法の妥当性を議論するために，荷重計測用軸受を設置した研究用試作機を用いてバフ研磨作業を行い，押付力と軸受荷重を同時に測定してその関係を比較した。ここで，押付力は自

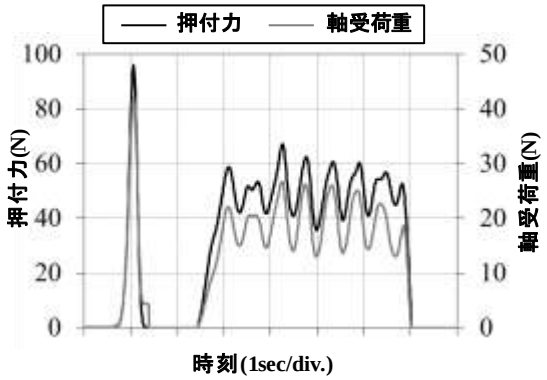


図 3　押付力，軸受荷重の時系列変化

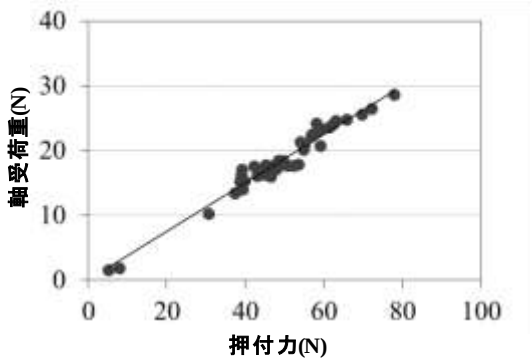


図 4　軸受荷重－押付力の関係

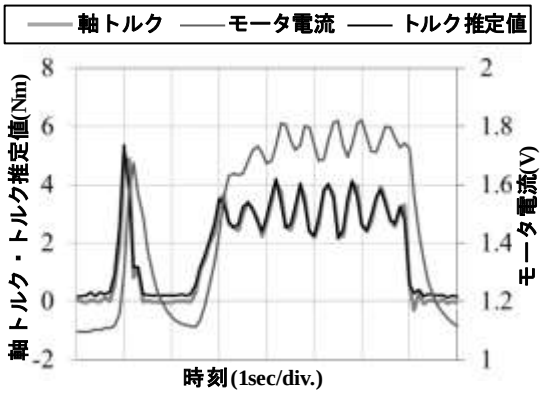


図 5　軸トルク，モータ電流の時系列変化

作したロードセル内臓のワーク台を用いて測定した。

図 3 に研磨時における押付力と軸受荷重の時系列変化の一例を，図 4 に同時刻における両者の関係をプロットした結果をそれぞれ示す。両者の作用点が異なるため，荷重の絶対値は異なるが，両者の波形パターンやピークの発生時刻はほぼ一致しており，また高い相関を示していた。以上の結果から，軸受荷重により押付力の推定は可能であると判断された。

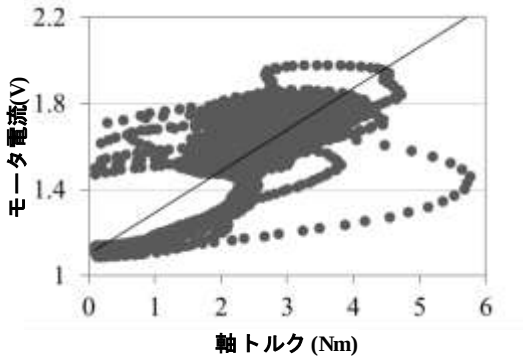


図 6　モータ電流－軸トルクの関係

2.2　摩擦力計測手法の開発

バフ／ワーク間の摩擦力の測定は，モータの電流変化から軸トルクを計算し，これを基に推定することとした。モータの電流変化はインバータから出力される電圧信号（以下モータ電流）を計測した。研究用試作機を用いて研磨作業を行い，研磨時におけるモータ電流を，試作機に取り付けたトルクセンサの出力値（以下トルク）と同時に測定し，両者の関係を比較した。

図 5 にトルクとモータ電流の時系列変化の一例を示す。トルクの変化に対応してモータ電流は変化することが認められるが，その応答はトルク増加時・減少時ともに遅れる傾向がみられ，特に減少時において顕著であった。そのため，ピーク発生時刻についても遅れが認められた。その結果，図 6 に示すように両者の相関は低いことから，モータ電流の線形変換によるトルク推定は困難であることが明らかとなった。

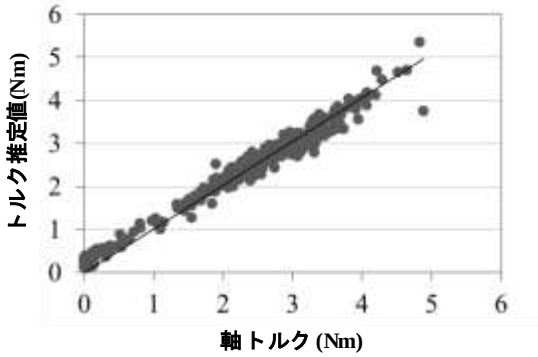
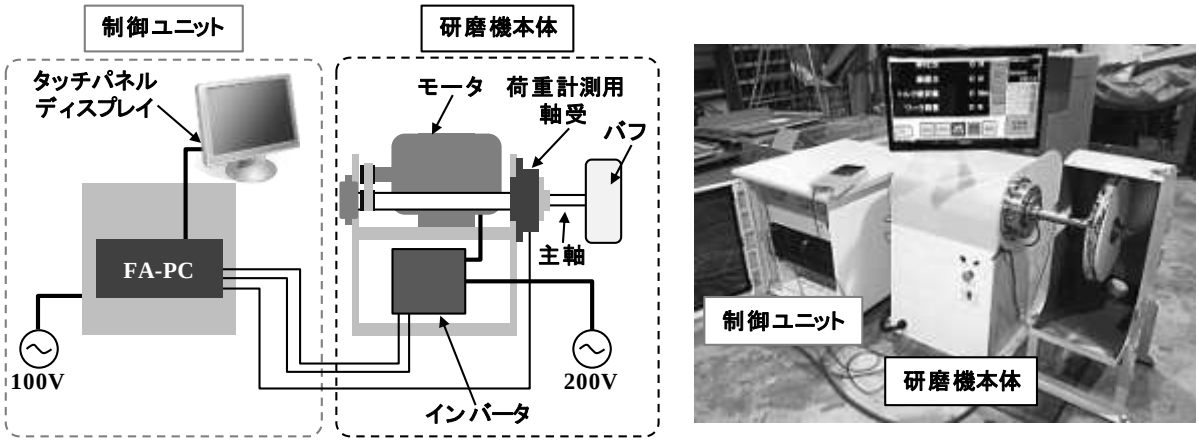


図 7　トルク推定値－軸トルクの関係



(a) 装置概略　　(b) 装置外観

図 8　開発した実証用試作機

以上の結果を踏まえ，本研究ではトルク推定に電流の応答遅れを考慮した補正を行うこととした。図 5 に併せて示したように，本手法によってモータ電流から推定したトルク（以下トルク推定値）は実測したトルクとよく対応しており，図 7 に示すように高い相関が得られた。

以上の結果より，本手法を適用することによってモータ電流からトルクを推定することが可能であった。

3.　実証用試作機の開発

研究用試作機で得られた知見を基に，研磨現場で使用可能な実証用試作機を開発した。

図 8(a)および(b)に実証用試作機の概略と外観をそれぞれ示す。試作機は研磨機本体と制御ユニットから構成される。研磨機本体についてはモータとインバータ，主軸および荷重計測用軸受で構成され，主軸はタイミングベルト駆動とした。また，制御ユニットはデータ計測・処理を行う工業用 PC と，使用者との入出力インタフェースとなるタッチパネル式液晶ディスプレイから構成される。研磨時において本体がセンシングした軸受荷重，モータ電流および主軸回転数の信号をリアルタイムで入力，処理して押付力，摩擦力を推定し，使用者へのフィードバックを行う。なお，サンプリング周期は研磨動作を考慮して 10Hz とした。

また，押付力，摩擦力のフィードバックについては，使用者が研磨作業をしながら，すなわちワークから目を離すことなく認識できることが重要であることから，これらの情報を直感的にフィードバックできる手法について検討した。使用者の視覚，聴覚，触覚に対するフィードバック手法を検討し，いくつかの方法を提案した。これらについては今後の実証試験においてそれぞれの有効性や問題点の検証を行っていく予定である。

4.　結　　言

研磨時における作業者の力覚，すなわちワーク押付力とその時に発生するバフとの摩擦力をリアルタイムでモニター・表示可能なバフ研磨機の開発を行い，以下の結果を得た。

(1)　開発した専用の荷重計測用軸受によって，ワーク押付力の推定が可能であることを確認した。

(2)　応答遅れを補正したモータ電流による軸トルク推定手法を提案し，その妥当性を確認した。

(3) 以上の結果を基に，研磨現場で実証試験が可能な実証用試作機を開発した。

参考文献

1) 五十嵐，中部，他，“ICT を活用した遠隔技能伝承アシストシステムに関する研究開発（第 2 報）”，工業技術研究報告書，41，2012，p.22-30.

2) 中部，五十嵐，“バフ研磨作業における技能伝承支援システムに関する研究”， 日本機械学会 SHD2011，2011，p.476-480.