

充電式インパクト電動工具の締付トルク制御法

Method of Controlling Fastening Torque of Rechargeable Electrical Impact Power Tools

有村 直* · 渥美 将利* · 清水 秀規** · 宮崎 博** · 沢野 史明** · 河合 啓**
Tadashi Arimura Masatoshi Atsumi Hideki Shimizu Hiroshi Miyazaki Fumiaki Sawano Akira Kawai

インパクト機構による打撃力でねじ締め作業を行う充電式電動工具において、打撃速度と1打撃当りのねじの回転量から推定した締付トルクでねじの着座を判定するとともに、着座後は打撃回数で管理する制御アルゴリズムを開発することによって、設定した締付力に対して $\pm 25\%$ の精度を実現した。締付トルクと着座後の回転量の推定は、打撃タイミングを検出する衝撃センサの情報とブラシレスモータの回転子位置検出情報から導出している。

これにより、工場等での組立作業における締付トルクのばらつきを低減する充電式インパクト電動工具を実現した。

In a rechargeable electrical screw-fastening power tool equipped with an impact mechanism, a torque accuracy of $\pm 25\%$ to the set value has been achieved by judging screw seating from the impact velocity and fastening torque estimated by the screw rotation quantity per impact, and developing a control algorithm for controlling the number of impacts after seating. An estimation of the fastening torque and rotation quantity after seating is obtained from the information of the impact sensor for detecting the impact timing and the position detection information of the rotor of the brushless motor.

This development has enabled the commercialization of rechargeable electrical impact tools that reduce variations of the fastening torque in factories' assembly operations.

1. ま え が き

充電式インパクト電動工具は、締付トルクが大きく作業速度が速い特徴があり、一般的に造作作業やボルト締結作業などに使用されている。また近年、工場では環境問題(CO₂排出削減)に対応する必要があり、高効率な工具への関心が高まってきている。現在主に使用されているエア式工具は、駆動源であるコンプレッサの効率が悪いため高効率な電動工具へ需要がシフトしている。さらに、作業者によってねじやボルトの締め過ぎや締め不足等の不良が発生するため、作業品質(締付トルク)管理のニーズが非常に高まっている。

たとえば自動車工場では、締付トルク精度が $\pm 30\sim 40\%$ の一般部位作業と $\pm 5\sim 20\%$ の重要部位作業がある。ここで主に使用されているエア式工具は、環境問題以外にもエア配管があることや重いために使い勝手が悪いという問題を有している。

そこで筆者らは、第一段階として独自アルゴリズムに

よって締付トルク精度 $\pm 25\%$ を実現し、コードレスで使い勝手が良い充電式インパクト電動工具を開発したので以下に報告する。

2. 締付トルクと回転量の関係

図1にボルト締め時の締付トルクと回転量の変化の一例を示す。あらかじめナットが取り付けられた金属部材と別の金属部材をボルトで締付ける例である。締付け開始時は、ねじ溝切りや塗装皮膜による負荷増大のため、わずかに締付トルクが増加する場合がある。しかし、その後はボルト頭部が部材に着座するまで締付トルクがほぼ一定となり、着座後は急激に増加するという特性を有している。一方、ボルトの積算回転量は着座まではほぼ直線的に増加し、着座後は微増となり、ボルトがほとんど回転しない状態に至って締付け完了となる¹⁾。

* 電器事業本部 電器R&Dセンター Research & Development Center, Home Appliances Manufacturing Business Unit

** パナソニック電工パワーツール株式会社 Panasonic Electric Works Power Tools Co., Ltd.

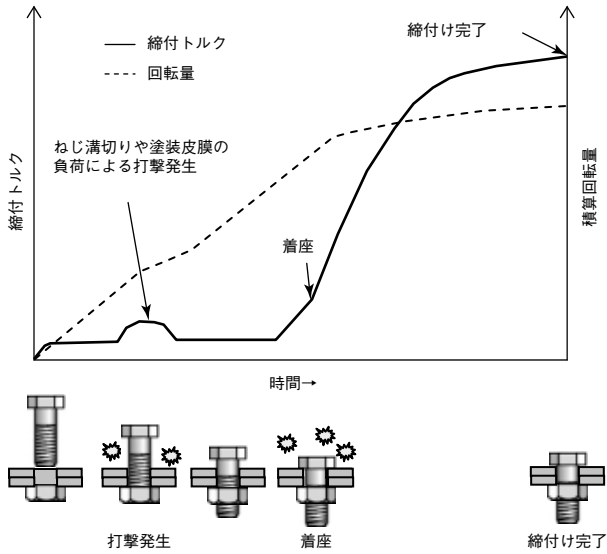


図1 締付トルクと回転量の変化

3. インパクト機構での締付トルクの推定法

図2にインパクト機構を、図3にその動作を示す。モータの回転は減速機を介して駆動軸に伝えられ、ハンマを回転させる。ハンマがアンビルを打撃する衝撃で、アンビルに取り付けられている工具先端に締付トルクを発生させる。駆動軸がほぼ半回転するごとにハンマとアンビルが衝突する。衝突後、駆動軸は回転速度が低下するが、モータの駆動力により回転し続ける。この状態でばねを圧縮させながら、ハンマが軸方向に後退する機構になっているため、ハンマがアンビルを乗り越えて次の衝突を発生させる。

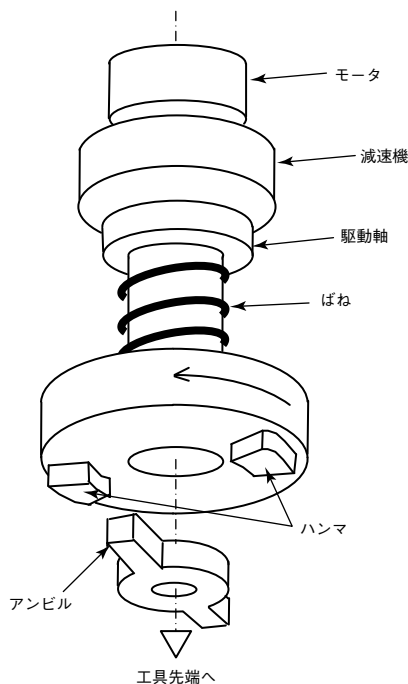


図2 インパクト機構

一打撃ごとのねじの締付エネルギー E_n は、式 (1) のように締付トルク T とアンビル回転角 ϕ で決定される。

$$E_n = T \times \phi \quad (1)$$

ばねの影響を無視し、ハンマがアンビルに衝突してハンマやモータの運動エネルギーの減少分がすべてアンビルを通じてねじ締め作業に使用されると仮定すると、ハンマの打撃によりアンビルに与えられるエネルギー E_a は、式 (2) のようにハンマの回転角速度 ω_h とハンマとモータの等価慣性モーメント J で決定される。

$$E_a = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_h^2 \quad (2)$$

したがって、一打撃ごとの運動エネルギーの収支から $E_n = E_a$ となり、式 (3) のように T を求めることができる。

$$T = \frac{1}{2\phi} \cdot J \cdot \omega_h^2 \quad (3)$$

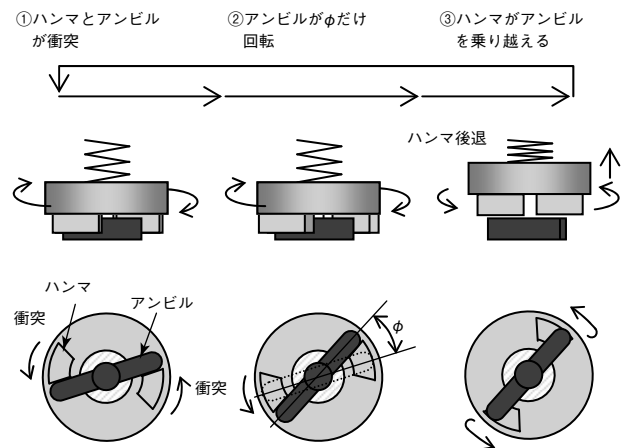


図3 インパクト機構の動作

ここで、モータの回転角速度を ω_m 、打撃間のモータ回転角を θ 、減速機の減速比を η とすると、ハンマが半回転した場合にモータ回転角は $\eta\pi$ となり、 ω_h および ϕ は式 (4)、式 (5) のように表され、推定締付トルク T_s は式 (6) から求められる²⁾。

$$\omega_h = \frac{\omega_m}{\eta} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{\theta}{\eta} - \pi \quad (5)$$

$$T = \frac{J \cdot \left(\frac{\omega_m}{\eta}\right)^2}{2 \cdot \left(\frac{\theta}{\eta} - \pi\right)} \propto \frac{\omega_m^2}{\theta - \eta\pi} = T_s \quad (6)$$

4. 締付トルク制御アルゴリズム

インパクト電動工具特有の打撃による締付トルクは急峻なパルス波形であり、直接トルクを測定することが非常に難しい。従来は、設定された打撃数に達した場合に自動停止させ、締付トルクを打撃数のみで管理していた。しかし、ボルト締付け時に付随するねじ溝切りや塗装皮膜による負荷増大時に打撃が発生する場合があるため、打撃数の管理だけでは締付トルク精度が±50%以上にばらついてしまう。また、充電式電動工具は駆動するごとに電源電圧が徐々に低下して締付トルクも低下するため、締付トルクの管理が必要な工場での作業には採用されなかった。図4に従来の充電式インパクト電動工具におけるボルトの締付トルク変化を示す。

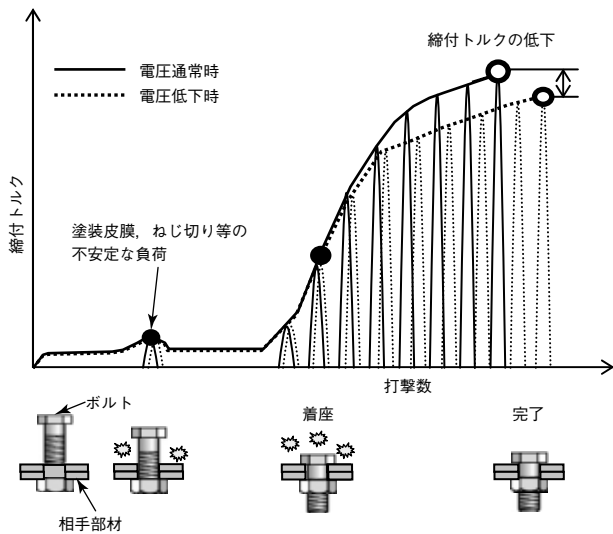


図4 充電式電動工具のボルト締め時の締付トルク変化

これらの問題の解決にあたり、以下の方針で取り組む。

- (1) ねじ溝切りや塗装皮膜に伴うわずかな締付トルクの増加は着座と判定せず、締付トルクが急増する立上り段階を着座と判定し、そこから打撃数を管理して自動停止することで締付トルク精度±25%以内を実現する。
- (2) 電源電圧の低下時は打撃数を補正することで締付トルク低下防止を実現する。

4.1 着座判定アルゴリズム

図5に本システムのブロック図を、図6に衝撃センサによる打撃検出波形と回転センサのパルス波形の関係を示す。

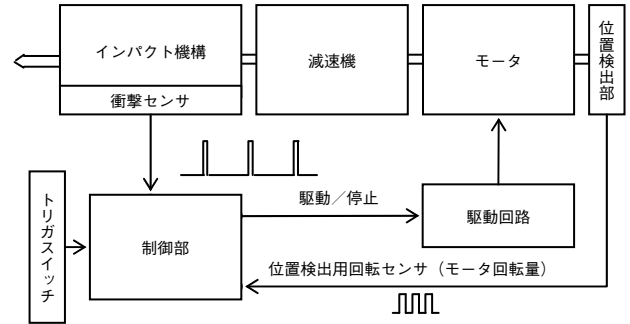


図5 システムブロック

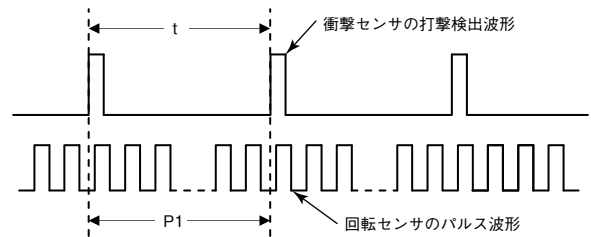


図6 打撃検出波形と回転センサのパルス波形の関係

インパクト機構部の下部に取り付けた衝撃センサから打撃タイミングを検出し、打撃間隔 t を制御部が計測する。また、回転センサであるブラシレスモータの回転子位置検出部(N パルス/1回転)からの信号により、モータの回転量を計測する。したがって、打撃間のモータ回転角 θ はその間の回転センサの出力するパルスのカウントにより計測できる。ハンマ半回転分のモータ回転量 $\eta\pi$ に相当する回転パルス数 P_2 は式(7)のように、またモータの回転角速度 ω_m に相当する打撃間モータ回転角速度 v_m は t と打撃間の回転パルス数 P_1 で式(8)のように表される。

$$P_2 = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot N \quad (7)$$

$$v_m = \frac{P_1}{t} \quad (8)$$

したがって、推定締付トルク T_s は式(9)のように表される。

$$T_s = \frac{v_m^2}{P_1 - P_2} \quad (9)$$

図7に式(9)によるボルト締付け時の締付トルクと推定締付トルクとの関係を示す。低トルク領域では相関は高く、高トルク領域では低くなる傾向にある。これは、低トルク領域では打撃間のモータ回転量が回転センサで検出可能であるが、高トルク領域では打撃間のモータ回転量が微量になり回転センサによる検出精度が低下するためである。

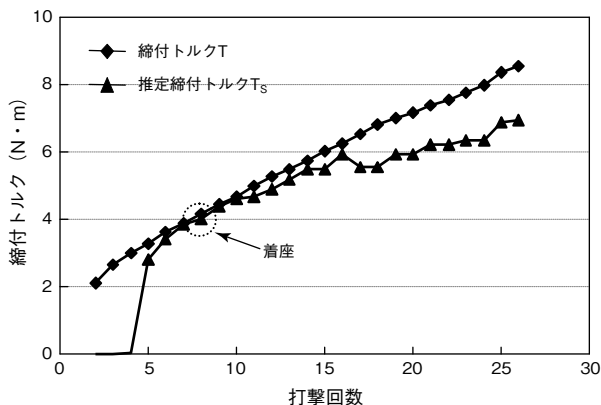


図7 締付トルクTと推定締付トルクTsの関係

そこで、相関が高い低トルク領域においてはTsが所定値に達した場合を着座と判定し、そこから打撃数をカウントして設定された打撃数で自動停止するアルゴリズムを提案する。

締付け設定レベルは1から30まで切替可能であり、締付力を調整することができる。図8に、一定電圧条件下におけるボルトの締付トルク精度を示す。ボルトの締付トルクの測定は当社標準負荷装置を使用し、測定値の標準偏差の3倍を平均値で除した値を締付トルク精度としている。各締付け設定値において締付トルク精度は約13%であり、目標の±25%以内を達成していることがわかる。

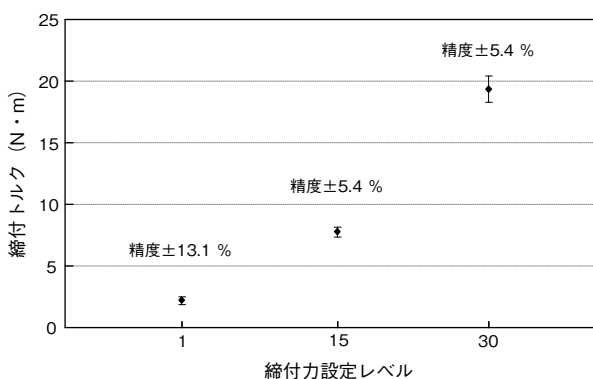


図8 ボルトの締付トルク精度

4.2 打撃補正アルゴリズム

充電式電動工具は電源として2次電池を採用している。電池電圧の低下に伴って単位時間当りのモータ回転数も低下するため、打撃による衝撃エネルギーが減少する。そのため、着座検出後の打撃数を管理するだけでは締付トルクも低下する。したがって、電池電圧の低下による締付トルクの低下を検出し、着座検出後の打撃数を補正する必要がある。

一般的に電池は使用環境（温度等）により放電性能が変化するため、電池電圧だけの監視で補正を行うのは困難である。

そこで着目したのが、つねに正確な検出が可能な打撃間のモータ回転角速度 v_m である。 v_m の低下を最大充電時における打撃間のモータ回転角速度 v_b を基準とし、 v_m の低下を制御部でつねに監視する。式(6)のように v_m の2乗を打撃による締付けエネルギーと想定しており、 v_m の低下量から不足している締付けエネルギーを推定し、補正打撃数 M を式(10)から演算する補正アルゴリズムを提案する。補正係数 k は各締付け設定レベルに対応する値である。図9に当社標準負荷装置による、打撃数補正有無の締付トルクの精度を示す。補正後は締付トルクの著しい向上がみられる。

$$M = (v_b^2 - v_m^2) \cdot k \quad (10)$$

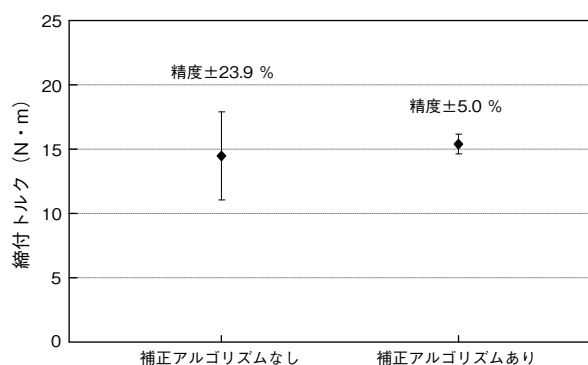


図9 打撃数補正有無の締付トルク精度

また、一般的に使用される市販ボルトや相手部材となる銅板は固体ばらつきをもつため、締付トルクのばらつきも大きくなると考えられる。図10に市販ボルトにおける締付トルク精度の測定結果を示す。この図から補正アルゴリズムを適用することにより、目標である締付トルク精度±25%以内を達成している。

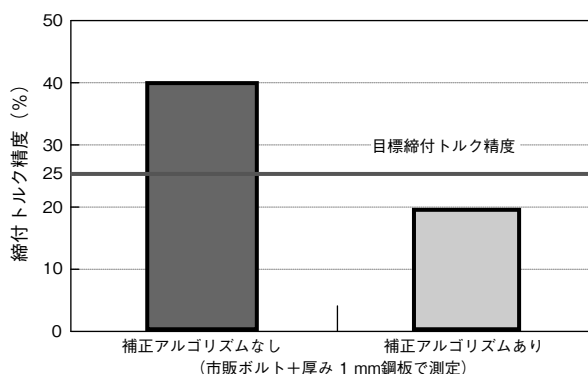


図10 市販ボルトの締付トルク精度結果

5. 開発品の概要と特徴

図11に開発した締付トルク制御アルゴリズムを実装した製品の概要を示す。制御回路はトリガスイッチの引込み量で決定されるアナログ電圧に基づき、設定されたモータ

回転角速度になるように制御を行う。回転センサ出力からモータ回転角速度と回転量を計測し、衝撃センサ出力から打撃タイミングを検出して推定締付トルクと打撃回数を算出する。

締付け設定レベルは1から30とF (Free) に切替が可能である。Fは従来の充電式インパクト電動工具と同様に自動停止機能が動作しないモードである。また、作業品質の確保が必要な工場用工具であるため、作業者が締付け設定レベルを勝手に変更できないようにリモートコントローラで設定する仕様になっている。

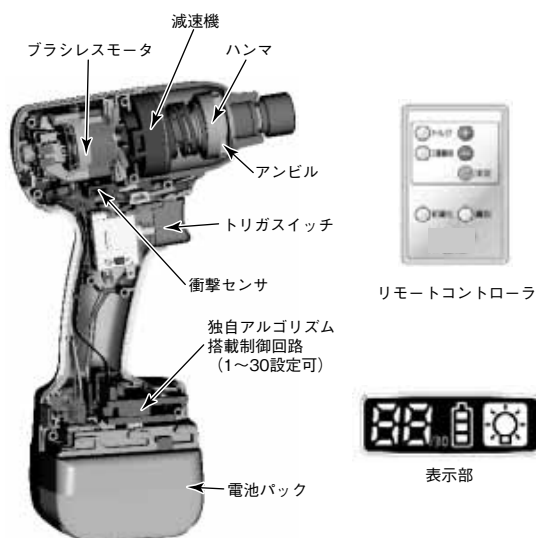


図11 開発品概要

6. あとがき

インパクト機構による打撃力でねじ締め作業を行う充電式電動工具において、打撃速度と1打撃当りのねじの回転量から推定した締付トルクでねじの着座を判定するとともに、着座後は打撃回数で管理する制御アルゴリズムを開発することによって、設定した締付力に対して±25%の精

度を実現した。締付トルクと着座後の回転量の推定は、打撃タイミングを検出する衝撃センサの情報とブラシレスモータの回転子位置検出情報から導出した。

これにより、工場等での組立作業における締付トルクのばらつきを低減する充電式インパクト電動工具を実現した。

今後は、締付トルクの精度をさらに向上させた充電式電動工具の開発を行う予定である。

*参考文献

- 1) 山本 晃：ねじ締結の原理と設計，養賢堂，(1995)
- 2) 有村 直，松本 多津彦，清水 秀規，小野 卓，細川 智弘，天野 昌幸：ねじ締めトルク検知機能付きインパクト電動工具，松下電工技報，Vol. 53, No. 3, p. 59-64 (2005)

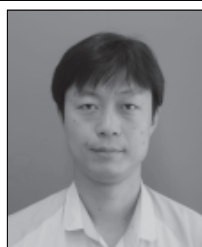
◆執筆者紹介



有村 直
電器 R & D センター



渥美 将利
電器 R & D センター



清水 秀規
パナソニック電工
パワーツール (株)



宮崎 博
パナソニック電工
パワーツール (株)



沢野 史明
パナソニック電工
パワーツール (株)



河合 啓
パナソニック電工
パワーツール (株)