

# 作業機械におけるモータ制御の最適化技術

新井 浩成, 浦池 隆文

## Optimization Technics of Motor Control in Work Machine

Hironari ARAI, Takafumi URAIKE

キーワード：誘導モータ，インバータ，IGBT，PWM，定トルク制御

### 1. はじめに

地球温暖化対策としての二酸化炭素排出削減，化石燃料の需給逼迫，内燃機関に対する効率や応答性などの優位性を背景に各種機械装置の動力源を内燃機関からモータへ移行する電動化の動きが進んでいる。ハイブリッド自動車は身近なものとなり，一次産業分野においても電動トラクタの商品化を表明した大手農業機械メーカーも現れている。

モータは，使用する電源によってDC（直流）モータとAC（交流）モータに分けられる。制御性という面では電圧と電流によって回転数が制御可能なDCモータが優位である。しかし，回転子に流れる電流を一方方向にするため，整流子を切り替えるブラシ（接点）が必要となり，電流の断続によるノイズの発生やトルク変動，機械的な摩耗の発生による定期的な保守が必要となる。ACモータでは印加電圧により回転磁界を作り出す必要があることから，商用電源周波数の50Hzや60Hzに基づく一定回転となるものが大半であった。しかし，近年のマイクロコンピュータや絶縁ゲートバイポーラトランジスタ（IGBT）に代表される電力制御素子の発達により任意の周波数および電圧の交流を生成可能なインバータとの組み合わせによって可変速制御を行う例が増えている。

本研究ではモータの中で最も多く用いられているAC誘導モータを対象に負荷となる機械が要求する応答性を得るためのインバータ制御技術に関する取り組みを行った。

### 2. AC誘導モータの原理

AC誘導モータは図1に示す回転子鉄心が筐体部外側の固定子巻線に囲まれる断面構造となっており，固定子巻線（コイル）に三相交流を印加し，回転磁界を発生させる。回転子

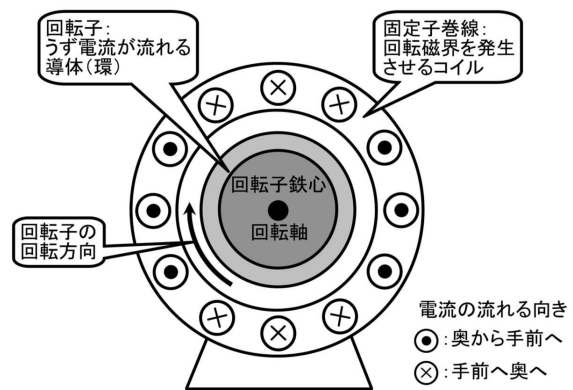


図1 モーターの断面構造

の構造例として，かご形回転子を図2に示す。回転子は回転磁界からの誘導現象によって発生するうず電流との間に作用するフレミング左手の法則に基づく力（トルク）を利用して回転する。

なお，かご形回転子はうず電流を大きくし，電流通路を整えるためスリットを設けたケイ素鋼板を積層した回転子鉄心とかご形胴体を組み合わせた構造となっている<sup>1)</sup>。なお，これらの形状や構造は各社によって異なる。

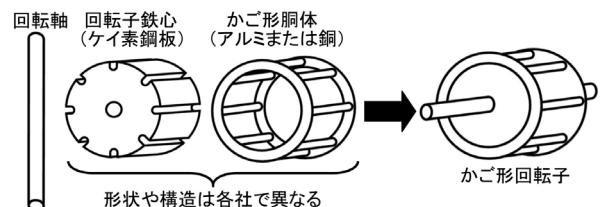


図2 かご形回転子の構造例

#### 2.1 運転特性

AC誘導モータに一定周波数・電圧を加えたときの始動から加速段階を経て一定速に至るすべり，トルク，電流は図3

事業名：経常研究  
課題名：作業機械におけるモータ制御の最適化に関する研究

のような変化をする。すべりSは回転子の回転速度n(rpm)が同期速度ns(rpm)からの相違割合であり、

$$S = \frac{ns - n}{ns} \dots\dots\dots (1)$$

と表され、概ね同期速度より数%程度遅い回転数が定格回転数となっている。

同期速度ns(rpm)は誘導モータに印加する三相交流周波数f(Hz)、モータの極数Pより、

$$ns = \frac{120f}{P} \dots\dots\dots (2)$$

で表される。

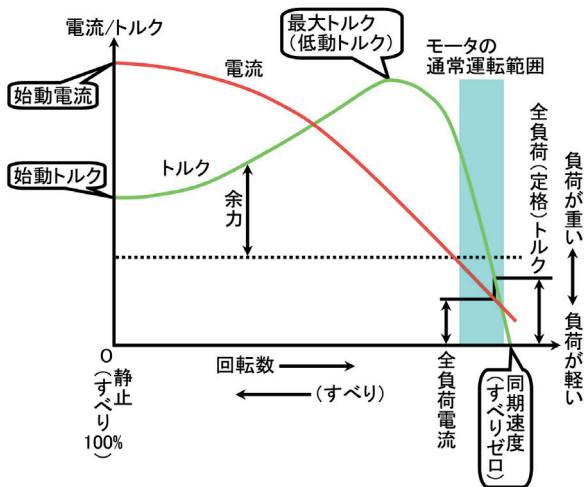


図3 誘導モータの運転特性<sup>2)</sup>

これまで誘導モータは商用電源周波数で用いられ、始動トルクは定格トルクの2~3倍程度であり、加速時に最大トルクを上回らない範囲内で通常運転領域まで移行する必要があった。また、通常運転範囲で軽負荷であっても商用電源周波数で始動が困難なため、負荷が要求する以上に大きな減速比のギア機構を選定せざるを得ない事例も多かった。

### 2.2 可変電圧可変周波数制御

インバータを用いた任意の周波数および電圧の交流生成とモータの特性に合わせて周波数・電圧を制御する可変電圧可変周波数制御は、①可変速(加減速)の実現、②始動電流(突入電流)の減少、③短時間使用定格活用によるモータの小型化、④電力消費効率の向上、⑤減速機構の簡素化などが可能となるため、ハイブリッド自動車や家電製品など幅広い分野に用いられている。

モータ固定子巻線コイルのインピーダンスZ(Ω)は、

$$Z = j\omega L \dots\dots\dots (3)$$

で表される。jは複素数で虚数、ωは交流の角周波数2πfでf

は印加電圧の周波数(Hz)、Lはコイルのインダクタンス(H)であり、(3)式からインピーダンスは周波数に比例することがわかる。そのため、固定子巻線コイルに一定電圧を印加すると周波数が低い(直流に近い)程、電流が大きくなるため、周波数に応じて適切な電流を流すために電圧を調整する必要がある。また、図3に示した特性のように一定周波数・電圧で駆動していても負荷の増大による回転数の低下(すべりの増大)と共に電流が大きくなるため、運転状況に応じて一定周波数であっても電圧の調整が必要となる。そのため、一般的な可変電圧周波数制御では、電圧は周波数に比例して大きくなる図4のような電圧-周波数(V-f)特性が用いられている。

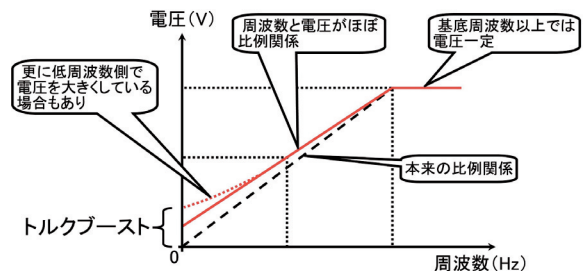


図4 インバータの電圧-周波数特性

## 3. インバータ制御システムの開発

### 3.1 電力変換制御回路

インバータは図5に示すように直流入力から三相交流出力(U,V,W)の一相当たり2個のスイッチング素子(通称、上下アームと呼ばれる)が3組とこれらスイッチング素子を制御するソフトウェアで構成される。

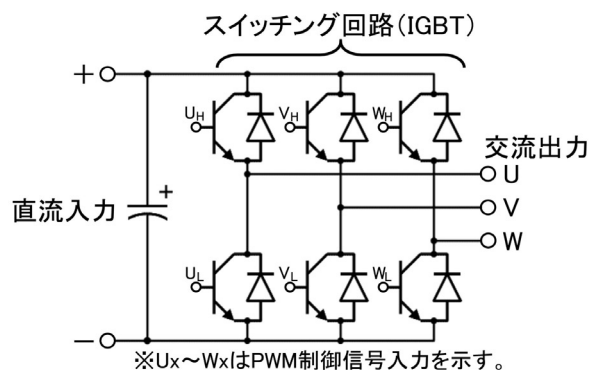


図5 インバータのスイッチング回路

本研究では任意の周波数および電圧の正弦波を生成する方法として、情報を伝達するためのキャリア(搬送波)周波数と呼ばれる一定周期中におけるパルス幅を0~100%の間で変えることで、目的の正弦波を生成するPWM(パルス幅変調)を用いた。

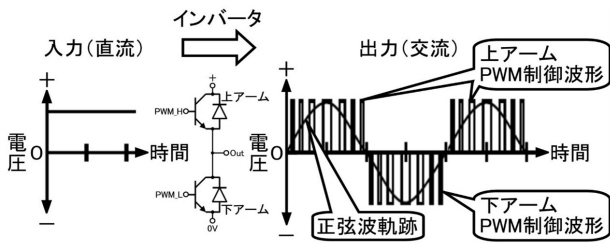


図6 PWMによるインバータ動作概念

図6にPWM動作で正弦波を得るためのインバータ動作概念を示す。本方式では入力となる直流電圧は一定で、パルス幅すなわちPWMキャリア周期に基づく単位時間当たりのON/OFF比率を表すデューティ比の増減によってスイッチング回路に用いられる2個の電力制御素子（IGBT）を制御し出力周波数および電圧を変化させる。上アームを駆動するPWM制御信号は、正弦波の正の最大振幅付近でデューティ比100%、0V付近で50%、負の期間中はゼロとなる。下アームを駆動するPWM制御信号は、正弦波の負の最大振幅付近でデューティ比100%、0V付近で50%、正の期間中はゼロとなり、上アームとは逆の関係になる。さらに、三相交流となるため120°ずつ位相が異なる正弦波を同時に生成する。

### 3.2 正弦波制御ソフトウェア

PWMの生成は使用しているマイクロコンピュータに内蔵されているマルチファンクションタイマパルスユニットの動作モードの一つである相補PWM機能を使用した。本モードは各カウンタにPWMキャリア周期、上・下アームが同時にONとなり短絡を防ぐためのデッド時間（今回、4μsに設定）、正弦波を生成するための比較データ（三相分）を書き込むことで図5に示した三相分上下アーム電力制御素子の駆動に必要な6出力（U<sub>H</sub>、U<sub>L</sub>、V<sub>H</sub>、V<sub>L</sub>、W<sub>H</sub>、W<sub>L</sub>）が得られる。

表1 正弦波データ更新条件

データ更新角度 (°)	インバータ 出力周波数(Hz)	
	上昇時	下降時
1	1~25	1~22
6	25~333	22~333

正弦波は表1のような条件で2段階のデータ更新角度の切り替えに伴いPWMキャリア周期が変わる。本来、データ更新角度は細かいほど正弦波の精度は上がるが、電力制御素子のスイッチング能力やマルチファンクションタイマパルスユニットのカウンタ分解能（16Bit）などの制約を受ける。データ更新角度が1°の場合はPWMキャリア周波数はインバータ出力周波数の360倍、6度では60倍となる。データ更新角度毎に割込が入り、出力電圧に応じ予め計算によってスケールされた三相分の正弦波比較データを書き込むことでPWM

のデューティ比が逐次変更される。

AC誘導モータを駆動した際、同じ出力周波数であってもPWMキャリア周波数によって駆動音の違いが観察された。しかし、性能面で大きな差は見られなかった。また、データ更新角度切替は周波数可変の際、境界で頻繁なPWMキャリア周波数更新を防ぐため、周波数の上昇もしくは下降に応じて3Hzの緩衝帯を設けている。図7にモータ駆動時のインバータ出力の一例を示す。電圧波形はPWM制御によるキャリア周波数の残留が見られるが、電流波形は乱れがごく小さい正弦波になっていることから意図通り制御されていることを示している。



図7 モータ駆動時のインバータ出力例

### 3.3 試験装置の検討

商用電源の三相交流200Vからインバータによって生成される任意の周波数および電圧の三相交流をAC誘導モータに印加することでモータは回転する。ただし、制御などの評価を行うためにはモータに負荷を与え、トルクを発生させる機械的な機構部が必要となる。

#### 3.3.1 試験装置の構成

インバータ制御システムは図8に示すような構成で、マイクロコンピュータはSH2/7045F（ルネサスエレクトロニクス製）の動作周波数28.7MHzが、これまで説明した正弦波を生成するためのPWMパルス制御、さらに2種類の加減速パターン、加減速時間などの制御に加え、トルクの計測やモータ回転数の把握、動作状況などを表示する液晶および各種設定を入力するキーボードも含めたシステム全体の制御を一括して行っている。



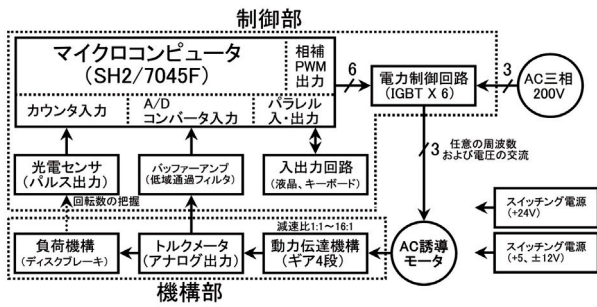


図8 インバータ制御システムの構成

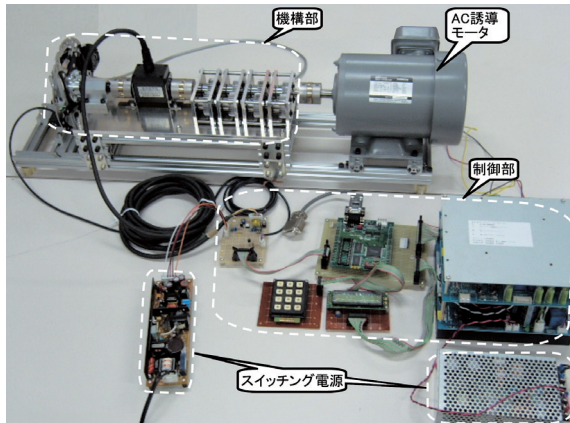


図9 インバータ制御システムの全景

図9にシステムの全景を、表2に主な仕様を示す。今回評価に使用したAC誘導モータは0.4kW、4極仕様（TFO-FK、㈱日立産機システム製）である。電力制御回路はインバータ用評価機材MWINV1R022（Mywayプラス㈱製）、出力1kVAを使用している。

表2 インバータ制御システムの主な仕様

項目	仕様	備考
出力周波数(Hz)	1~333	
出力電圧(%)	1~100	
最大出力(kVA)	1(200V)	※使用した電力制御回路に依存
可減速パターン	比例/二乗	
可減速時間(s)	1~100	
最大トルク(N・m)	10	※使用したトルクメータに依存
動力伝達機構	ギア4段	※最大16:1(5段階の切替)

### 3.3.2 動力伝達機構

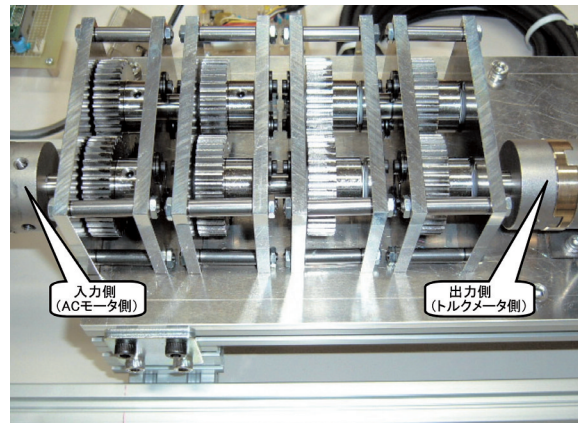


図10 4段のギア機構

負荷に対するモータのトルク不足を補う動力伝達は、図10のような4段のギア機構とした。各段には1:1もしくは2:1のギアを組み込むことで、最小1:1から最大16:1まで5段階の減速比を選択可能とした。

### 3.3.3 負荷機構

モータに負荷を与える機構として、図11に示すような自転車用のディスクブレーキを用いた。機械式のディスクブレーキで、ブレーキキャリパ内にブレーキロータを挟んでブレーキパッド（摩擦体）が対向している。ワイヤを引っ張るとキャリパ内の片側に内蔵されたピストンが押し出され（片押し式）、対向するブレーキパッドとの間でロータを挟み込み摩擦力が発生する。

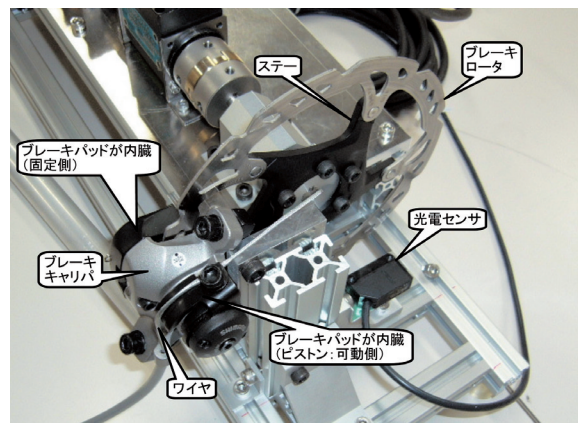


図11 負荷機構を構成するディスクブレーキ

ブレーキロータを支えるステータが5本あり、光電センサを用い、ステータからの反射の有無をカウンタへ入力し、一定時間毎のパルス数から毎分当たりの回転数を計算している。

本機構は簡便で一過性のデータを収集するには適していたが、一定の負荷を長い時間与えようとすると負荷の立ち上が

りが急であることやブレーキパッドがブレーキディスクと接触したまま引きずることによる負荷変化の難しさが課題となった。

動力伝達機構と負荷機構の間に図12に示すような最大10N・mのトルク計測可能なトルクメータを挿入した。トルクはアナログ出力で得られ、ノイズが重畳しているため、低域通過フィルタを用いてノイズを除去し、A/Dコンバータの最大入力電圧5Vに適合するように電圧を補正後、マイクロコンピュータに内蔵されている分解能10BitのA/Dコンバータへ入力している。得られたデータは、回転数や周波数、出力電圧などと共に、マイクロコンピュータのシリアル出力 (RS-232C) から出力される。

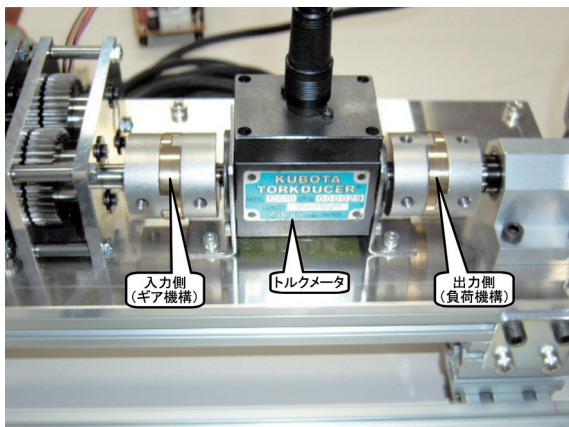


図12 トルクメータ

### 3.4 性能および特性

#### 3.4.1 定格条件の評価

インバータ制御システムを用い、初めにモータ定格条件における特性評価を行った。AC誘導モータは三相電源電圧220V (最大)、極数4、出力0.4kWであり、周波数50Hzで1,410rpm、周波数60Hzで1,690rpmのすべりを含む回転数が明記されている。その他仕様に関する記述は取扱説明書やホームページを含め一切明確にされておらず、あくまでも上記条件での使用が前提となっている。そこでモータの出力P (W)、回転速度 $\omega$  (rad/s) よりトルクT (N・m) を求めると、

$$T = \frac{P}{\omega} \dots\dots\dots (4)$$

と表される。モータの回転数Nはrpmであるため、 $\omega$ は $2 \times \pi \times N / 60$ となる。したがって(4)式は、

$$T = \frac{P \times 60}{2\pi \times N} \dots\dots\dots (5)$$

と最終的に表される。

出力400Wとすると(5)式より、周波数50Hzの回転数1,410rpmでは2.71N・m、周波数60Hzの回転数1,690rpmでは2.26N・mと約3N・m弱のトルクとなる。

図4に示したようなインバータの電圧-周波数特性による

定トルク制御を行った結果、図13のようなトルク特性が得られた。横軸は回転数、縦軸はトルクを表し、(2)式に基づき回転数はモータを駆動する周波数に応じて比例する。無負荷ではトルクはほぼゼロ、すべりもゼロであり同期速度となる。負荷を掛けることで回転数が低下し、すべりが大きくなることでトルクを得ている。本来の使用周波数である50Hzおよび60Hzでは(5)式を基に計算した値に近い定格トルクが得られている。また、周波数30Hz以上の領域で定格トルクにはほぼ等しい3N・mの始動トルクが得られていることからインバータの定トルク制御によって周波数30Hzから60Hzまで使用可能であり、また70Hz以上の周波数では始動トルクの減少は見られるが、モータ自身の機械的な摩擦などを考慮すると一時的な使用が妥当であることがわかった。

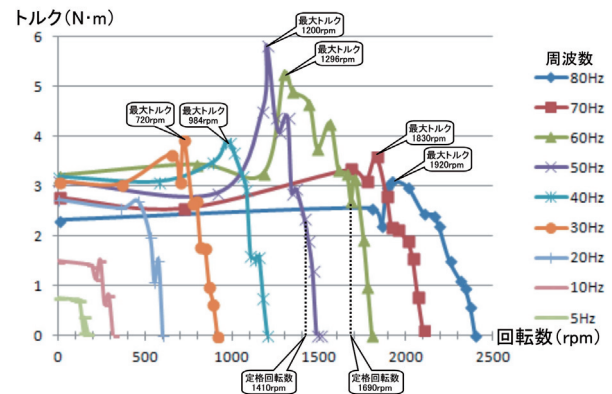


図13 AC200V定格条件における定トルク制御特性

#### 3.4.2 電圧特性の評価

インバータ制御では電圧によって回転数を低下させずにトルクを制御することが可能である。そこで周波数を一定とした時に電圧を変化させた場合のトルク特性を計測した。図14に周波数60Hzで一定とし、電圧を定格200Vから可変した場合のトルク特性を示す (データにバラつきがあるため、直線近似を付記した)。電圧60V以上の無負荷時には(2)式に基づく1,800rpmの同期速度となっている。しかし、それ以下の電圧ではモータ自身の機械的損失 (摩擦など) により、すべりによる回転数の低下が見られ、モータの正常動作範囲外となる。また、電圧60V以上100V以下の範囲では1N・m以下のトルクしか得られず、実質的に使用することは出来ない。

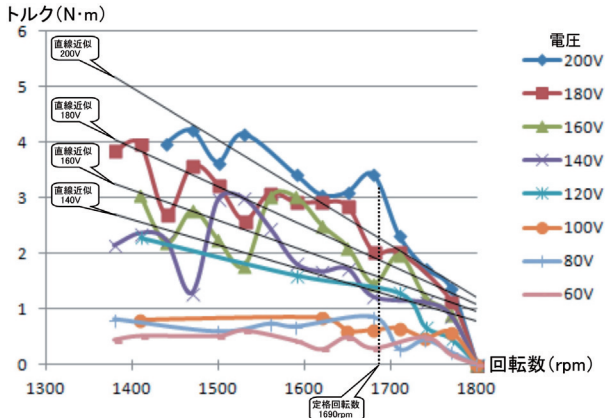


図14 電圧によるトルク特性

定格電圧である200Vから電圧を低下して行くにしたがって、回転磁界の磁束減少に伴うトルク変動が増大する傾向や最大トルクが得られる回転数を下回るとモータが停止しやすくなる傾向が見られたが、電圧120V以上、回転数1,400rpm以上の領域で出力制御可能である。なお、ここには示さないが周波数50Hzでもほぼ同様な傾向が得られた。

### 3.4.3 負荷変動による評価

実際の使用状況では、負荷の変動が考えられ、それに応じて回転数を一定とする制御が必要である。本研究では、回転数を基にした図15のようなフィードバック制御を適用した。図13で示された定トルク制御特性のように、無負荷の同期速度から最大トルクが得られるまでの回転数がAC誘導モータの使用範囲内とされる。さらに負荷が大きく回転数が低下する（すべりが大きくなる）とトルクが低下し、モータが停止しやすくなる不安定領域に入る。

そこで、定格周波数での使用を前提とし、最大トルクが得られる回転数まで低下していなければ、回転数の偏差に応じてモータ駆動周波数に偏差分に応じて加・減算し、回転数の上昇・下降制御を行い、また、最大トルクが得られる回転数を下回る場合は制御不能と判断し、定格回転周波数へモータ駆動周波数を戻している。

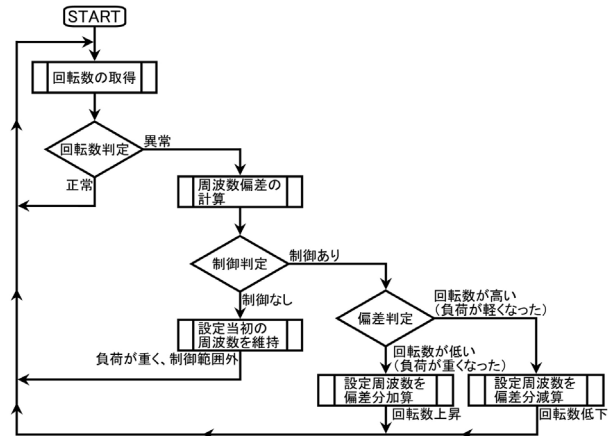


図15 回転数フィードバックに基づく負荷変動制御フロー

フィードバック制御の効果を調べるため、モータに負荷変動を与えたときの停止時間を計測した。図16に示す1.44kgの重りをブレーキ荷重とし、モータに負荷を掛け、さらに160gの重りを追加して負荷変動を与えた。その結果を表3と図17に示す。図17は最初の負荷が安定している状態の2秒後に負荷変動を与えた場合の回転数の時間変化である。



図16 重りの重量測定（左）と負荷変動測定風景（右）

表3 制御の有無停止までの時間

	停止までの時間(s)	
	制御なし	制御あり
1回目	3	18
2回目	4	20
3回目	5	16
4回目	4	17
5回目	6	18
平均	4.4	17.8



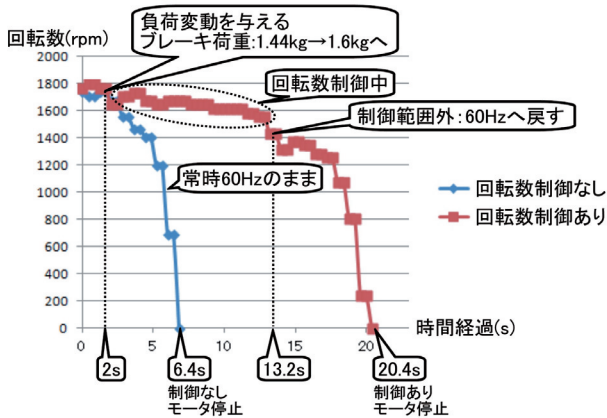


図17 負荷変動による回転数変化の一例

制御の有無によってモータが停止するまでの時間に約4倍の差が現れ、回転数の偏差に基づくモータ駆動周波数フィードバック負荷変動制御による優位性が確認された。

#### 4. まとめ

AC誘導モータを対象に、負荷となる機械が要求する応答性を得るための取り組みとしてインバータ制御システムを構築し、以下の結果が得られた。

- ①今回使用したAC誘導モータではインバータと組み合わせ、定トルク制御を行うことで周波数30Hz以上の領域で可変速制御が可能であり、使用周波数を拡大可能であることを確認した。また、定格周波数において電圧は120V以上、回転数は1,400rpm以上の範囲でトルク制御が可能であることを確認したが、最大トルクを発生する回転数を下回るような駆動条件ではモータが停止しやすくなるため、負荷が必要とするトルクを十分に確認する必要がある。
- ②AC誘導モータの定格周波数50Hzおよび60Hzでは定格トルクの約2倍となる約6N・m弱の最大トルクが得られており、最大トルクが得られる回転数1,300rpm以上の運転条件であれば、一時的に大きなトルクを必要とする加減速や負荷変動に対応可能であることを確認した。
- ③負荷変動に対する可変速制御の取り組みを行った結果、モータが停止するまでの時間が約4倍に伸び、回転数の偏差に基づく負荷変動制御の有効性が確認された。

以上のように、インバータ制御の有効性を確認したが、①～③の項目では、AC誘導モータの定格使用条件から逸脱した運転条件も含まれているため、発熱に対する冷却に十分な注意を払った上で使用する必要がある。

本研究を通じて蓄積した電力制御技術および機械設計・評価技術は当場の基盤技術として、道内の中小企業に対する技術支援へ活用して行く予定である。

#### 引用文献

- 1) 小型インダクションモータとその応用, 横河技報, Vol.45 No.2, pp.87-90, (2001)
- 2) 誘導電動機の基礎, 資料番号:HG-002A-0911 (2009年12月1日), 株式会社明電舎