

# コンデンサモータの可变速駆動における脈動トルク低減と効率改善

Improvement of Motor-Efficiency and Reduction of Ripple-Torque on Permanent-Split-Capacitor-Motor under Condition of Variable-Speed Control

村瀬 正敬<sup>\*</sup>  
Masataka Murase  
荒川 広志<sup>\*</sup>  
Hirosaki Arakawa  
鈴木 正見<sup>\*</sup>  
Masami Suzuki

## 1 まえがき

コンデンサモータは、堅牢で安価なことから、様々な機器の動力に利用されている。また、本来、定速度運転に適したモータであるにも拘わらず、可变速運転を行う用途への適用事例も多い。3相誘導電動機が、インバータ制御技術の飛躍的な進歩により、高度な速度制御を行う用途へ応用されるようになったのに対し、コンデンサモータの応用事例は、高度な速度制御が不要で、かつ、コスト制約が厳しい用途が多い。このため、回路構成が簡単で低価格な、タップ切替えによる速度切替方式や、電圧制御方式による可变速運転が主に行われている。

コンデンサモータの電圧制御方式による可变速運転は、インバータ制御方式より、低価格な反面、脈動トルクに起因する騒音が大きく、効率も低下する傾向がある。このため、静音化・省エネ化の要請が強い空調機用室外および室内ファンなどの用途では、脈動トルクの低減・モータ効率の改善が、重要な研究テーマとなっている。

筆者らは、正弦波交流のチョッパ方式による電圧制御を、空調機ファン用のコンデンサモータの可变速運転に適用する研究を進めている。その一環として、制御電圧をモータの主巻線と補助巻線へ印加する方式の相違が、脈動トルクとモータ効率に与える影響について、実験・検討を行ったので、報告する。

## 2 対象とする電圧制御方式

コンデンサモータの電圧制御方式を、主巻線と補助巻線へ電圧を印加する方法で分類すると、下記4方式がある。

### ①主巻線・補助巻線電圧一括制御方式

主巻線・補助巻線への供給電圧を一括制御。

### ②主巻線電圧制御方式

補助巻線への供給電圧は一定とし、主巻線への供給電圧を制御。

### ③補助巻線電圧制御方式

主巻線への供給電圧は一定とし、補助巻線への供給電圧を制御。

### ④主巻線・補助巻線電圧個別制御方式

主巻線電圧、補助巻線電圧を個別制御。

このうち、本稿では①②の2つの方式について比較検討を行った。図1に①主巻線・補助巻線電圧一括制御方式

(以後、一括制御方式と記す)、図2に②主巻線電圧制御方式(以後、主巻線制御方式と記す)の回路例を示す。

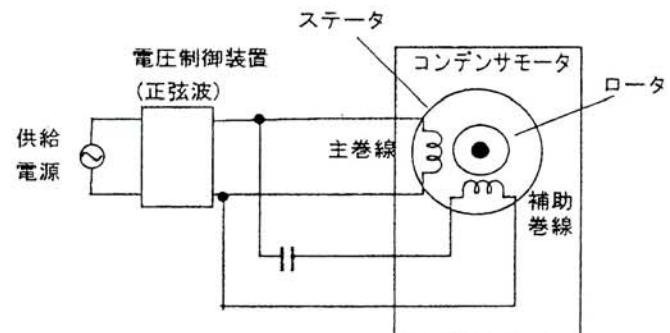


図1 主巻線・補助巻線電圧一括制御方式  
Fig. 1. Variable voltage to both winding

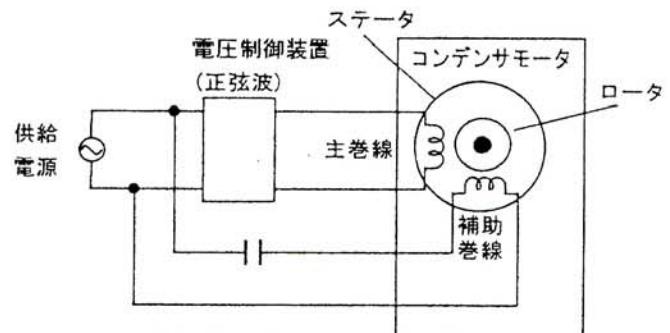


図2 主巻線電圧制御方式  
Fig. 2. Constant voltage to Auxiliary winding.  
variable voltage to Main

## 3 等価回路による特性解析

モータが発生する、電源周波数の2倍の周波数成分の脈動トルク(以後、 $2f$  脈動トルクと記す)と効率について、コンデンサモータの等価回路に対称座標法を適用して、特性解析を実施し、一括制御方式と主巻線制御方式での特性の相違について、比較検討を行った。

なお、解析条件として、モータの主巻線と補助巻線は互いに電気角で $90^\circ$ の位置に巻かれており、また鉄損と機械損は無視できるものとしている。

コンデンサモータは、補助巻線の電圧と回路定数を、主巻線と補助巻線の有効巻数比を用いて換算することにより、不平衡インピーダンスが接続された対称な平衡二相電動機として扱うことができる<sup>(1)(2)</sup>。図3に、上記換算を行ったコンデンサモータのモデルを示す。

\*1 機器開発事業部 商品開発部



### 3.1 脈動トルク特性

図6と図7に、前記計算により求めた、供試モータの回転数-定常トルク特性(以後、N-T。特性と記す)と回転数-2f 脈動トルク特性(以後、N-T<sub>r</sub>特性と記す)を示す。ただし、図6は一括制御方式、図7は主巻線制御方式の場合である。表1は供試モータの諸元である。なお、電源周波数は60Hzとしている。

図6と図7の定常トルクのN-T<sub>r</sub>特性を比較すると、電圧パラメータの差異はあるが、ほぼ同等の特性が得られることがわかる。一方、2f 脈動トルクのN-T<sub>r</sub>特性を比較すると、明らかに異なる特性であることがわかる。

図6と図7の、N-T<sub>r</sub>特性の差異について、以下に検討する。コンデンサモータのトルクは、主巻線と補助巻線に流れる一次電流が作る回転磁界と、ロータの2次導体に流れる2次誘導電流により生じる。主巻線と補助巻線によって作られる起磁力ベクトルの強さが同一で、かつ方向が直交する条件を、平衡運転条件<sup>(4)</sup>と呼び、2f 脈動トルクは最少となる。また、平衡運転条件では、主巻線と補助巻線による起磁力ベクトルの軌跡が真円となる。

図8に、600回転、800回転、1000回転における一括制御方式と主巻線制御方式での起磁力ベクトル図を示す。一括制御方式では、同一回転数での起磁力ベクトルの軌跡は、電圧値に拘わらず相似となる。このため、平衡運転条件に近づく回転数が一定となる(図4では1032回転で平衡運転条件に最も近づく)。これに対し、主巻線制御方式では、同一回転数においても、電圧値により、主巻線による起磁

表1 モータ諸元

Table. 1. Motor characteristics

項目	仕様・諸元
極数	6 [極]
定格周波数	50/60 [Hz]
定格電圧	200 [V]
定格出力	500 [W]
コンデンサ容量	20 [μF]

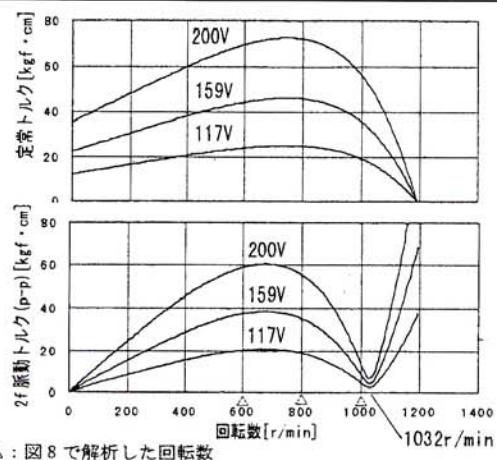


図6 一括制御方式の速度-トルク, 2f 脈動トルク特性

Fig. 6. Characteristics of Torque and 2f-ripple Torque to Revolution-speed when variable voltage is supplied both to main and to auxiliary winding

力と補助巻線による起磁力の比率が異なる。このため、主巻線制御方式では、電圧値により、起磁力ベクトル軌跡が真円に近づく回転数が変化する。

本供試モータの場合、一括制御方式では、800回転付近以下で補助巻線電流と主巻線電流の差が大きいため、起磁力ベクトル軌跡が偏平な橢円となる。このため、主巻線制御方式で、起磁力ベクトル軌跡を円に近づける様に電圧可変を行った方が、2f 脈動トルクが小さくなる。

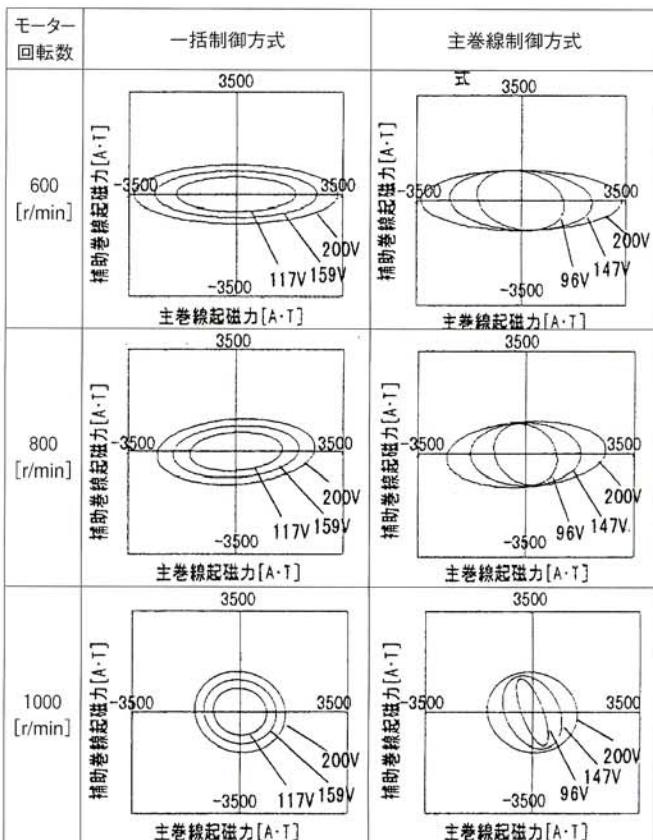


図8 起磁力ベクトル図  
Fig. 8. Trace of Magnetomotive force vector

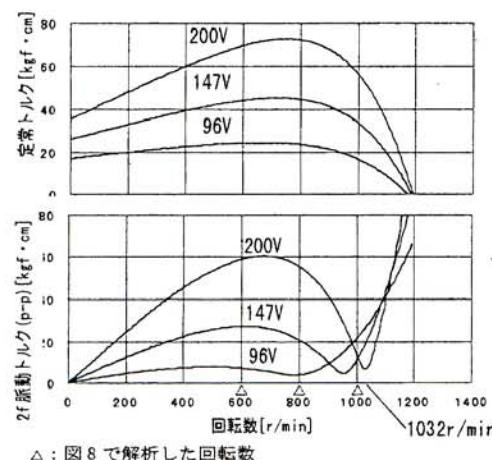


図7 主巻線制御方式の速度-トルク, 2f 脈動トルク特性

Fig. 7. Characteristics of Torque and 2f-ripple-Torque to Revolution-speed when variable voltage is supplied only to main winding

### 3.2 ファン負荷装着時の脈動トルク特性

次に、ファン負荷を装着した場合の検討・計算を行った。一般に、ファンの負荷トルク  $T_L$  は回転数  $N$  の 2 乗に比例し、式(6)で表わされる<sup>(5)</sup>。

ただし、K は比例定数（以後、ファン負荷定数と記す）である。

図9と図10に、異なるファン負荷定数（重負荷、軽負荷）のファンを装着し、一括制御方式と主巻線方式で可変速を行った場合の回転数- $2f$  脈動トルク特性（以後、N-T<sub>VL</sub>特性と記す）を示す。

今回の解析、実験に用いたファン負荷のファン負荷定数は、重負荷： $5.62 \times 10^{-5}$  軽負荷： $3.16 \times 10^{-5}$ である。以下同じファン負荷を用いて検討する。

図9の一括制御方式と主巻線制御方式のN-T<sub>VL</sub>特性の間には明らかな差があり、広い回転数範囲（本例では200[r/min]～950[r/min]）で、主巻線制御方式の2f 脈動トルクが低くなる。

図10は、図9よりファン負荷定数の小さいファン負荷が

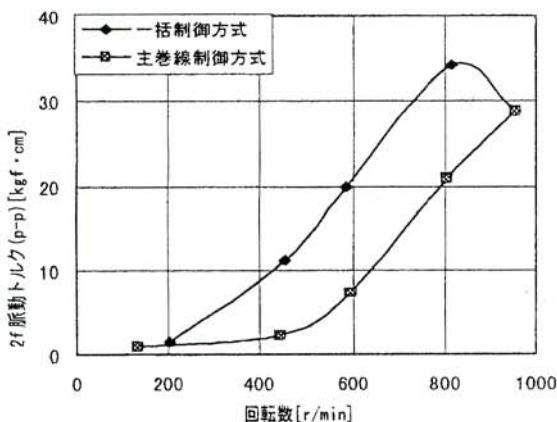


図9 回転数-2f 脈動トルク特性(重負荷)  
Fig. 9. Calculation results of Revolution-speed-2f-ripple-torque characteristics (at heavy-load)

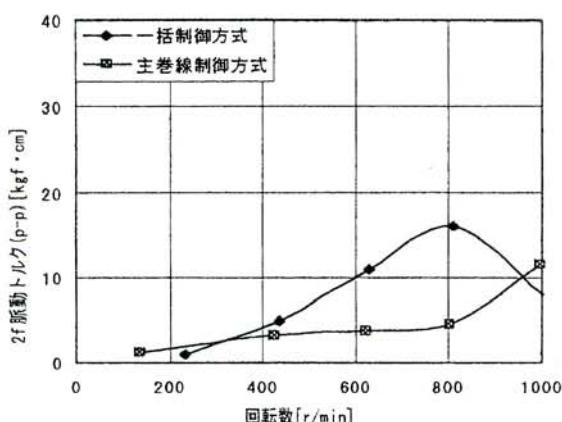


図10 回転数-2f 脈動トルク特性（軽負荷）  
Fig. 10. Calculation results of Revolution-speed-2f-ripple-torque characteristics (at light-load)

モータに装着された場合の計算結果である。この場合も図9と同様に、一括制御方式と主巻線制御方式に差が生じ、電圧制御方式の選択次第で、 $2f$  脈動トルクの低減が可能なことを示唆している。このことから、常用回転数範囲(300 [r/min]以上)では一括制御方式が有利となる。

### 3.3 モーダル効率

次に、モータ効率について検討を実施した。

図11と図12に、一括制御方式と主巻線方式で可変速を行った場合の、回転数-モータ効率特性（以後、 $N$ - $\eta$ 特性と記す）を示す。

図11、図12から、主巻線制御方式が一括制御方式より高効率となることが分かる。

これは、脈動トルク成分がエネルギーの損失となるためであり、 $2f$  脈動トルクが低い主巻線制御方式のモータ効率が高くなる。

図11と図12で、一括制御方式のN- $\eta$ 特性に差が無い。しかし、主巻線制御方式はN- $\eta$ 特性が、異なる曲線となるため、ファン負荷定数への依存性を持つことが分かる。

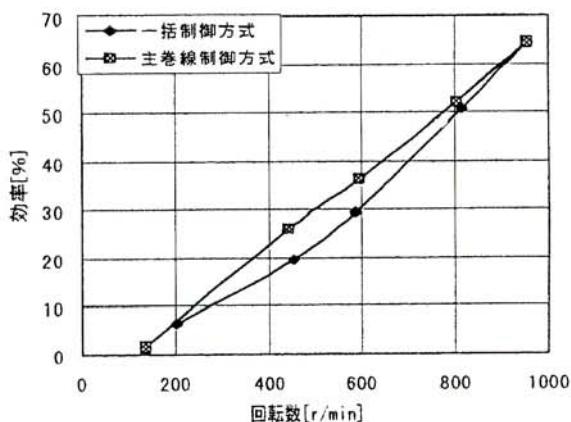


図11 回転数-効率特性(重負荷)

Fig. 11. Calculation results of Revolution-speed-Efficiency characteristics (at heavy-load)

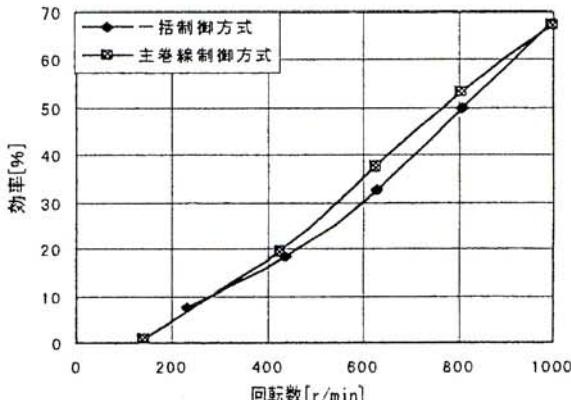


図12 回転数-効率特性（軽負荷）

Fig. 12. Calculation results of Revolution-speed-Efficiency characteristics (at light-load)

## 4 実機試験

前項で計算・検討したモータについて、実際に実験を行い、特性測定を行った。

### 4.1 脈動トルク試験

供試コンデンサモータを一括制御方式と主巻線制御方式で電圧可変し、 $N-T_{VL}$ 特性の差を調査した。負荷には渦流ブレーキを用い、ファン負荷時と同一トルクを得るように調整して、ファン負荷を模擬した。供試モータは等価回路による解析で対象とした実機である。

図13と図14に、2種類のファン実機とファン負荷定数が等価となるように渦流ブレーキを調整した場合の、 $N-T_{VL}$ 特性を示す。ファン負荷定数は、前項の計算条件と合わせた。

図13および図14から、等価回路による解析結果と同様の傾向が得られた。特に図13では、一括制御方式より主巻線制御方式の方が、 $2f$  脉動トルクが低減されている。これは、3.1項で示したように、主巻線制御方式の方が、主巻線による起磁力と補助巻線による起磁力の差を小さくできる現象が、効果的に作用した好例である。

この様に、負荷や回転数により制御方式を選択すれば、 $2f$  脉動トルクを低減する可能性があることがわかる。

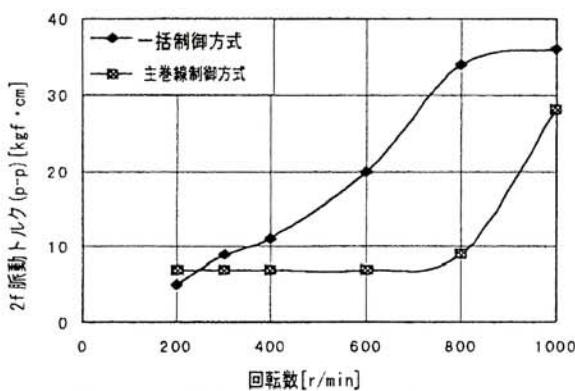


図13 回転数- $2f$  脈動トルク特性（重負荷）  
Fig. 13. Experimental results of Revolution-speed- $2f$ -ripple-torque characteristics (at heavy-load)

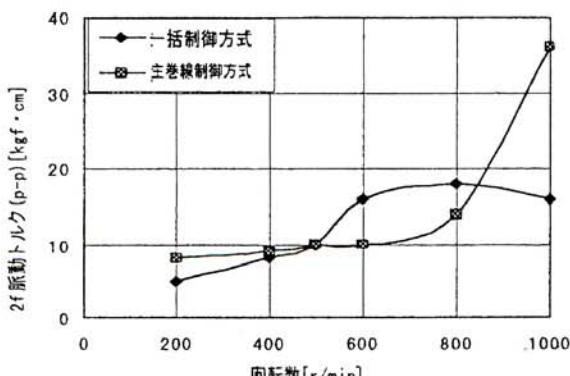


図14 回転数- $2f$  脈動トルク特性（軽負荷）  
Fig. 14. Experimental results of Revolution-speed- $2f$ -ripple-torque characteristics (at light-load)

### 4.2 モータ効率特性試験

図15と図16は、前述と同じく、2種類のファン実機を装着した場合の $N-\eta$ 特性である。このファン実機は、 $2f$  脉動トルク試験で用いた模擬負荷の条件設定に用いたものと同一である。

図15と図16より、等価回路による解析結果に近い傾向が得られた。特に図16の例では、200 [r/min] で、一括制御方式の効率が主巻線制御方式の効率に対し2倍近く良いことがわかる。

また、両者を比較すると、効率の高低が逆転する回転数は、 $N-T_{VL}$ 特性と同様に、負荷のファン負荷定数が小さい程、高い回転域に移動することがわかる。

この現象を利用して、回転数により、制御方式を選択すれば、効率向上を図ることができる。

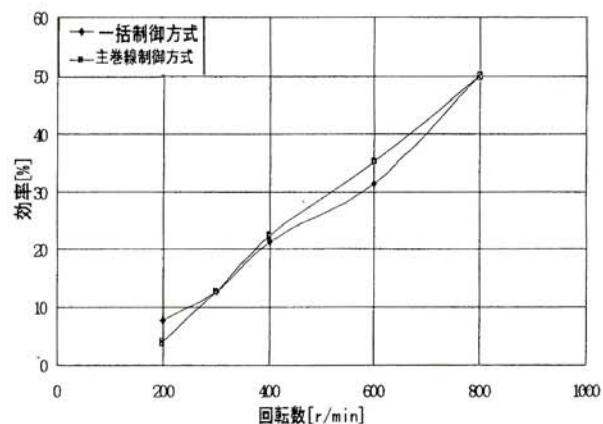


図15 回転数-効率特性（重負荷）  
Fig. 15. Experimental results of Revolution-speed-Efficiency characteristics (at heavy-load)

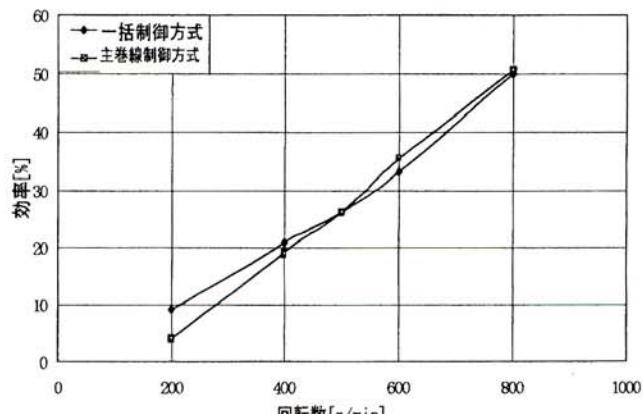


図16 回転数-効率特性（軽負荷）  
Fig. 16. Experimental results of Revolution-speed-Efficiency characteristics (at light-load)

## 5 あとがき

ファンを負荷とするコンデンサモータを可変速運転する場合に、一括制御方式と主巻線制御方式での特性の差異について計算解析と実験測定を行った。特に、 $2f$  脈動トルクとモータ効率の面から、等価回路による特性解析と実験により、比較検討を行った。

その結果として、電圧制御方式の相違により、 $2f$  脈動トルクとモータ効率に差異があり、負荷条件・利用速度範囲などを考慮して、電圧制御方式の選択を行うことにより、モータの $2f$  脈動トルクの低減と、モータ効率の改善が可能であることを示した。

次の問題として、制御方式の選択を検討する必要がある。本稿で検討した一括制御方式には、主巻線制御方式より低速度での制御が容易という特徴がある。他方、主巻線制御方式には電圧制御回路の電流容量が主巻線の電流容量で足りるという特徴がある。電圧制御方式の選択に際しては、これらの特徴にも考慮が必要となる。この様な詳細な検討は、次回の報告に譲りたい。

今後は、本成果を生かした、速度制御方式についての検討を行い、空調機などの性能改善に役立てたいと考える。

おわりに、トルク脈動計を貸与して頂いた小野測器株殿、試験装置製作に協力して頂いた当社機電事業部生産技術部、および、本稿執筆にあたり、多大な御指導・御協力をいただいた関係各位に厚くお礼申し上げる。

## 筆者紹介



村瀬 正敬

機器開発事業部 商品開発部 主任  
モータの特性、騒音、振動解析に従事



荒川 広志

機器開発事業部 商品開発部  
モータの特性、騒音、振動解析に従事



鈴木 正見

機器開発事業部 商品開発部 主査  
モータの開発および設計に従事

## 参考文献

- (1) 三宅：『小形ACモータの設計と制御』  
総合電子出版社(1984.5)
- (2) 石黒、他：『単相誘導電動機とその応用』  
オーム社(1965.5)
- (3) 横塚：「コンデンサモータの振動トルク特性」  
電気学会雑誌 vol.91 p.501(1971)
- (4) 坪井：「コンデンサ電動機の回転磁界の形と平衡運転  
条件」中部工業大学紀要(1976.8)
- (5) 坪島、他：『電動機の制御と応用』  
東京電機大学出版局 (1969.11)