

# 3、直流機の特性曲線、出力トルク等①

## (1) 無負荷飽和曲線

発電機が定格回転速度、無負荷状態のとき  
図1に示すように界磁電流と端子電圧の関係を  
示したものを無負荷飽和曲線という。

## (2) 外部負荷特性曲線

回転速度、負荷電流、端子電圧を定格値に  
なるように界磁電流を調整したのち、界磁回路  
の抵抗を変えることなしに負荷電流 $I$ を変化さ  
せた場合の負荷電流 $I$ と端子電圧 $V$ の関係を  
示したものの外部負荷特性曲線という。

### 3、直流機の特性曲線、出力トルク等②

分巻発電機の外部特性曲線を図2に、直巻発電機の外部特性曲線を図3に、複巻発電機の外部特性曲線を図4に示す。

図2において、分巻発電機の外部特性曲線は、他励式の場合と異なり端子電圧の低下は、界磁電流の減少をもたらし、負荷電流の増加による端子電圧の低下は、他励式に比し大きい。また、直流発電機では図3に示すように無負荷飽和曲線から直巻界磁抵抗と電機子抵抗による電圧降下を差し引いたものとなり、負荷電流の影響が大きい。

# 3、直流機の特徴曲線、出力トルク等③

端子電圧 V [V]

磁気飽和により曲線が飽和する

残留磁気により  $I_f=0$  でも電圧が発生する

端子電圧 V [V]

他励

分巻

定格電流

他励・分巻式の外部負荷特性 図2

定格電圧

0

界磁電流  $I_f$

無負荷飽和曲線 図1

0

負荷電流

無負荷飽和曲線

端子電圧

端子電圧

直巻式の外部負荷特性 図3

端子電圧

定格電圧

過復巻

平復巻

電圧降下

不足復巻

差動復巻

0

負荷電流

0

定格電流

負荷電流

図4 復巻式特性

### 3、直流機の特性曲線、出力トルク等④

さらに、図4に示すように分巻界磁と直巻界磁とが同方向に励磁する和動複巻発電機では、分巻発電機の外部特性よりも負荷電流による電圧降下を少なくすることができる。

無負荷電圧と全負荷が等しくなるようにしたものを平複巻といい、無負荷電圧より高くなるものを過複巻という。平複巻の場合より直巻界磁の起磁力が弱いものを不足複巻という。

また、差動複巻発電機では、電流の増加とともに著しく電圧が降下する。

# 3、直流機の特性格線、出力トルク等⑤

## (3) 速度特性格線

速度特性格線は、図5に示すように、界磁回路の抵抗を定格負荷、定格回転速度の状態のまま変えることなく負荷電流を変えた場合の回転速度の変化を示すものである。電動機の手度は、次式で示される。

$$N = (V - I_a r_a) / k \phi \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad \textcircled{1}$$

①式において、電機子反作用を無視すれば、 $\phi$ が一定であるから、回転速度 $N$ は電機子電流 $I_a$ の一次式となる

### 3、直流機の特性格線、出力トルク等⑥

直流電動機では、電機子と界磁の巻線が直列であり、電機子電流が小さい範囲では、 $\phi = kI_a$ となり、回転速度は、電機子電流に反比例する。また、和動複巻電動機では、分巻電動機と直巻電動機の間となる。差動複巻電動機では、直巻巻線の起磁力が分巻巻線の励磁力を打ち消すように作用するため、負荷電流が増すに従って磁束は減少して速度が上昇する。

# 3、直流機の特性曲線、出力トルク等⑦

## (4)トルク特性曲線

トルク特性曲線は、図6に示すように、端子電圧 $V$ 、界磁回路の抵抗を一定に保ったとき、負荷電流の関数としてトルク $T$  [ $N \cdot m$ ]を表した曲線である。トルクは、次式で表せる。

$$T = k' \phi I_a \text{ [N} \cdot \text{m]} \quad \textcircled{2}$$

分巻電動機では、磁束 $\phi$ が一定であるため、トルクは電機子電流に比例し、トルク特性は、直線となる。直巻電動機では、電機子電流の小さい間では、磁束 $\phi$ は、電機子電流に比例する。

# 3、直流機の特性曲線、出力トルク等⑧

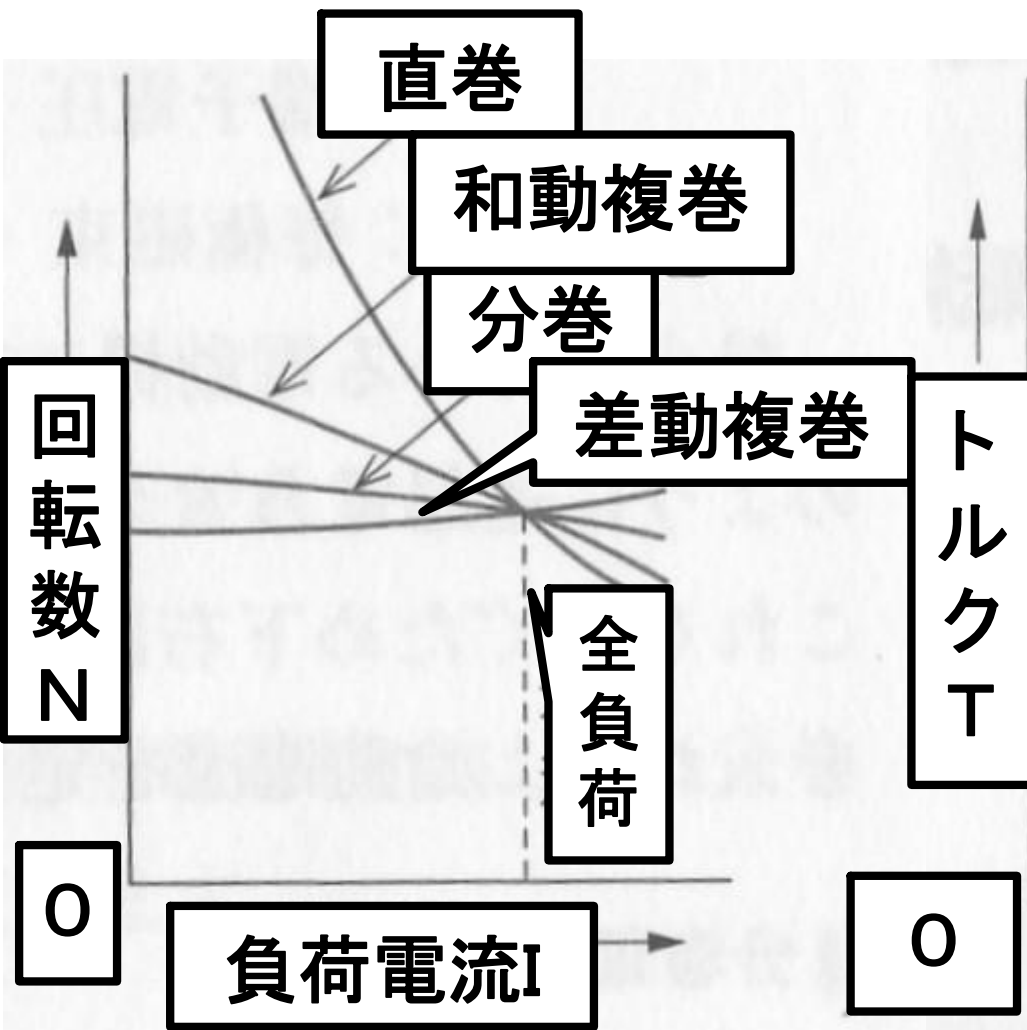


図5 速度特性曲線

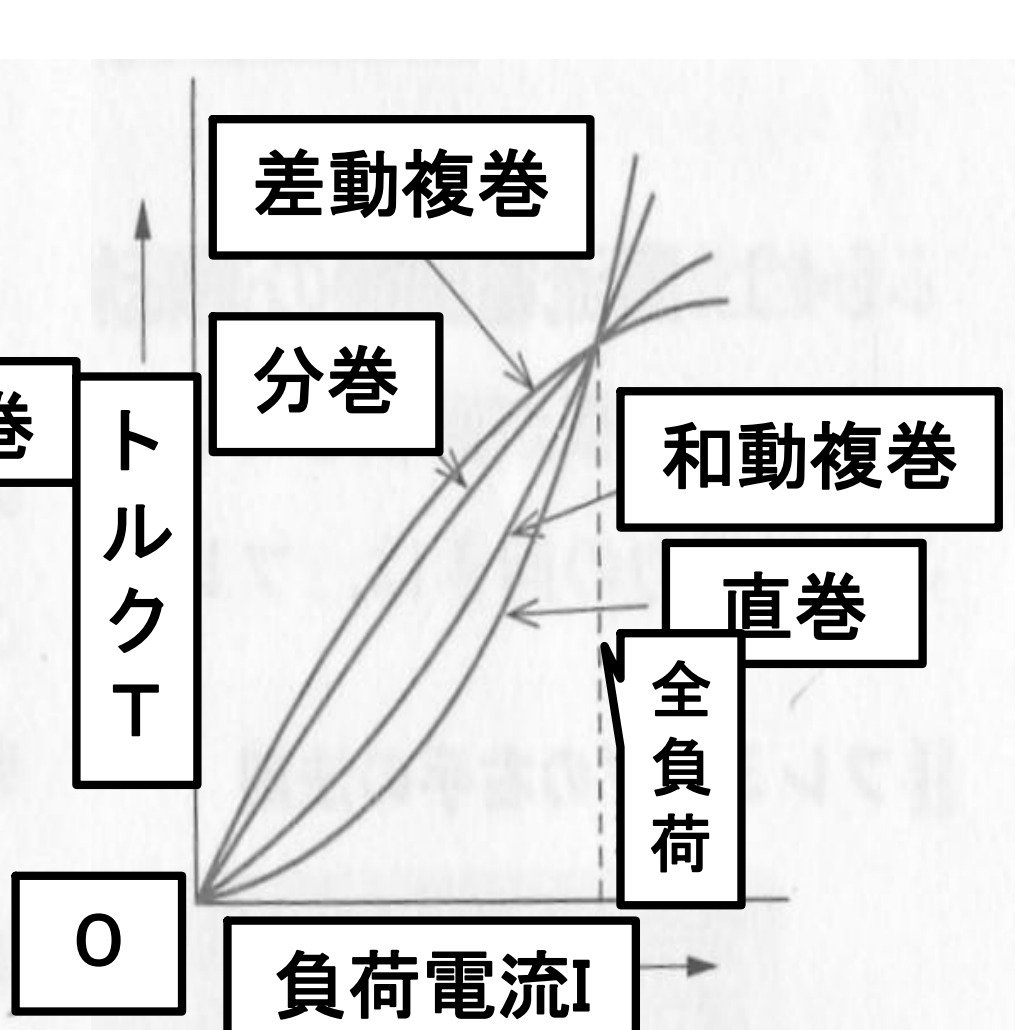


図6 トルク特性曲線



### 3、直流機の特性曲線、出力トルク等⑨

したがって、トルクは、ほぼ電機子電流の2乗に比例し、放物線となる。また、和動複巻では、分巻電動機と直巻電動機の間となる。

#### (5) 電動機の始動

電動機の電機子電流は、①式から③式のように表せる。

$I_a = (V - kN\phi) / r_a [A]$  ③ ここで、 $V$ : 端子電圧 [V]、 $k$ : 定数、 $N$ : 回転速度

[ $\text{min}^{-1}$ ]、 $\phi$ : 毎極磁束、 $r_a$ : 電機子回路の抵抗

③式において、起動時は $kN\phi$ は0である。

### 3、直流機の特性曲線、出力トルク等⑩

すなわち、静止している電動機に直接、回路の全電圧を加えて始動しようとするとき⑦式に示すように起電力 $E = kN\phi$  ( $N=0$ のため)  $= 0$ であるため、 $I_a = V / r_a$  [A]に相当する大電流が流れる。したがって、これを防止するために電機子回路に直列に始動抵抗 $r_s$ を入れて、始動電流を定格電流の1～1.5倍に抑えている(図7、図8参照)。

#### (6) 直流電動機の運転特性

直流電動機の逆起電力は、図9のとおりである。

### 3、直流機の特性曲線、出力トルク等⑪

すなわち、直流電動機が回転しているとき、電動機の導体は、磁束を切ることで起電力を誘導する。この起電力の向きは、フレミングの右手の法則によって定まり、外部から加えられる直流電圧とは逆向き、すなわち、電機子電流を減少させる向きとなる。

このため、この誘導起電力は、逆起電力と呼ばれる。直流電動機の機械的負荷が増加して回転速度が低下すると、逆起電力は減少する。これにより、電機子電流が増加し、入力も増加する。

# 3、直流機の特特性曲線、出力トルク等⑫

始動時逆起電力は0なので大きな始動電流が流れる。

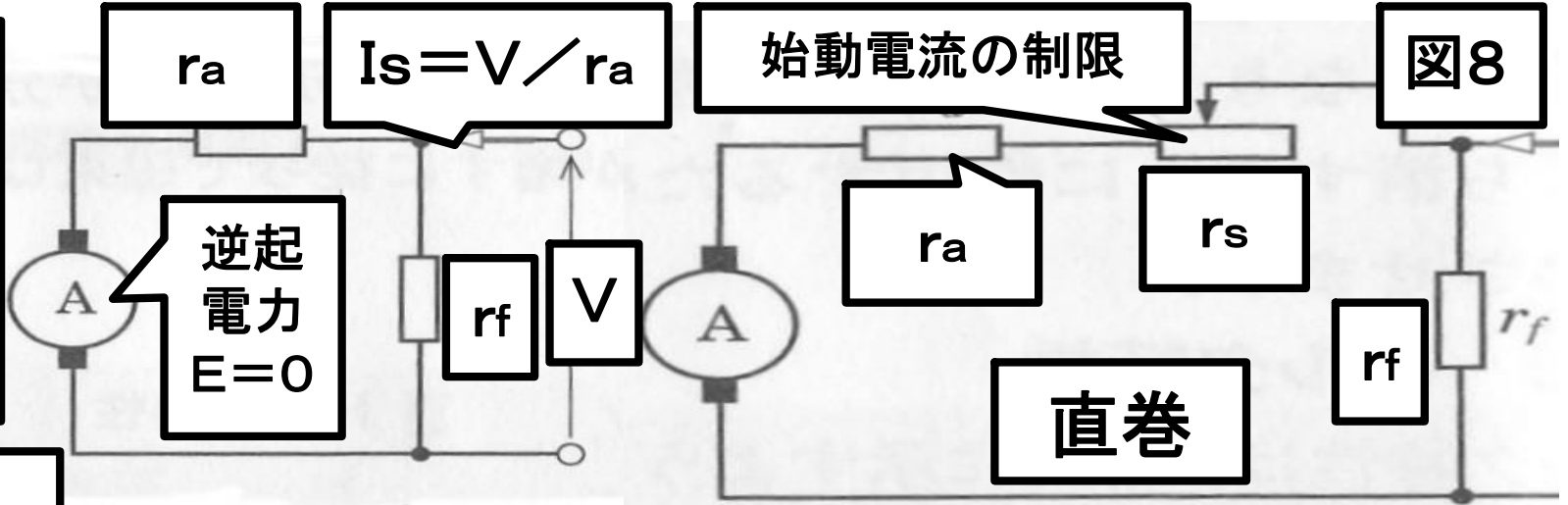


図7

負荷電流  $I$

電機子電流  $I_a$

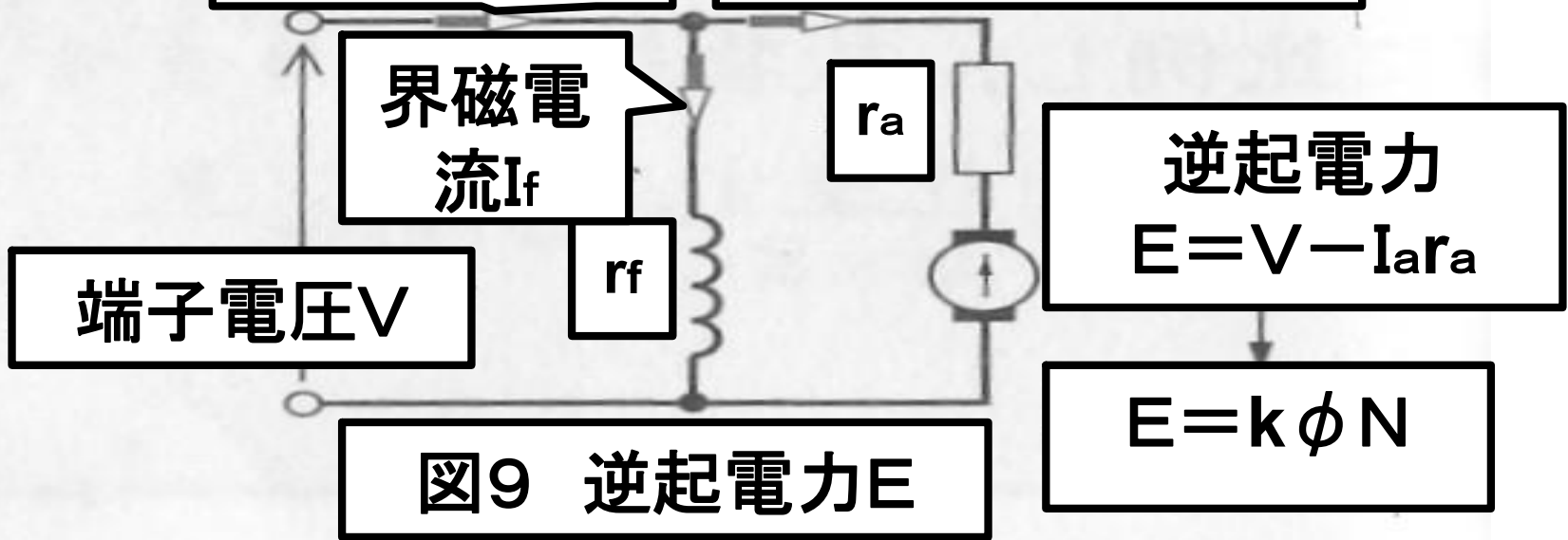


図9 逆起電力  $E$

### 3、直流機の特性曲線、出力トルク等⑬

#### (7) 電機子反作用

① 直流発電機が無負荷で電流が流れていないときの磁束の分布は、図10に示すように界磁束によるものだけである。磁束密度は、磁極の中間で0となり、この $n_1n_1'$ の位置を幾何学的中性軸という。電機子を矢印の方向に回転すると、図11の  $\otimes$   $\odot$  で示した方向に起電力が生じる。そして、起電力と同方向に電流が流れ、この電機子電流により磁束が発生する作用を電機子反作用という。

### 3、直流機の特性格線、出力トルク等⑭

実際に発電機が負荷電流を流している場合の磁束分布は、図12に示すようになる。これは、図10と図11の磁束分布の合成となり、磁束が回転方向にずれて、中性点の位置が $n_1n_1'$ から $n_2n_2'$ の位置にずれる。この位置を電気的中性軸といい、ブラシの火花を少なくするためには、ブラシを電気的中性軸に移すことが求められる。しかし、負荷の変動により絶えずその位置が変わるので、実際には、補極と補償巻線を用いて電機子反作用を軽減している。

### 3、直流機の特性曲線、出力トルク等⑮

また、直流電動機の場合は、図11の起電力と逆方向に電流が流れ、電気的中性軸は、発電機の場合と反対方向に移動する。

#### ②電機子反作用による悪影響

( i ) 主磁束が減少し、このため誘導起電力が減少する。

( ii ) 電気的中性軸が移動するため、ブラシと整流子間で火花が発生する。

( iii ) 整流子片間電圧が不均一になり、フラッシュオーバーが発生し機械が焼損する。

# 3、直流機の特性格線、出力トルク等①⑥

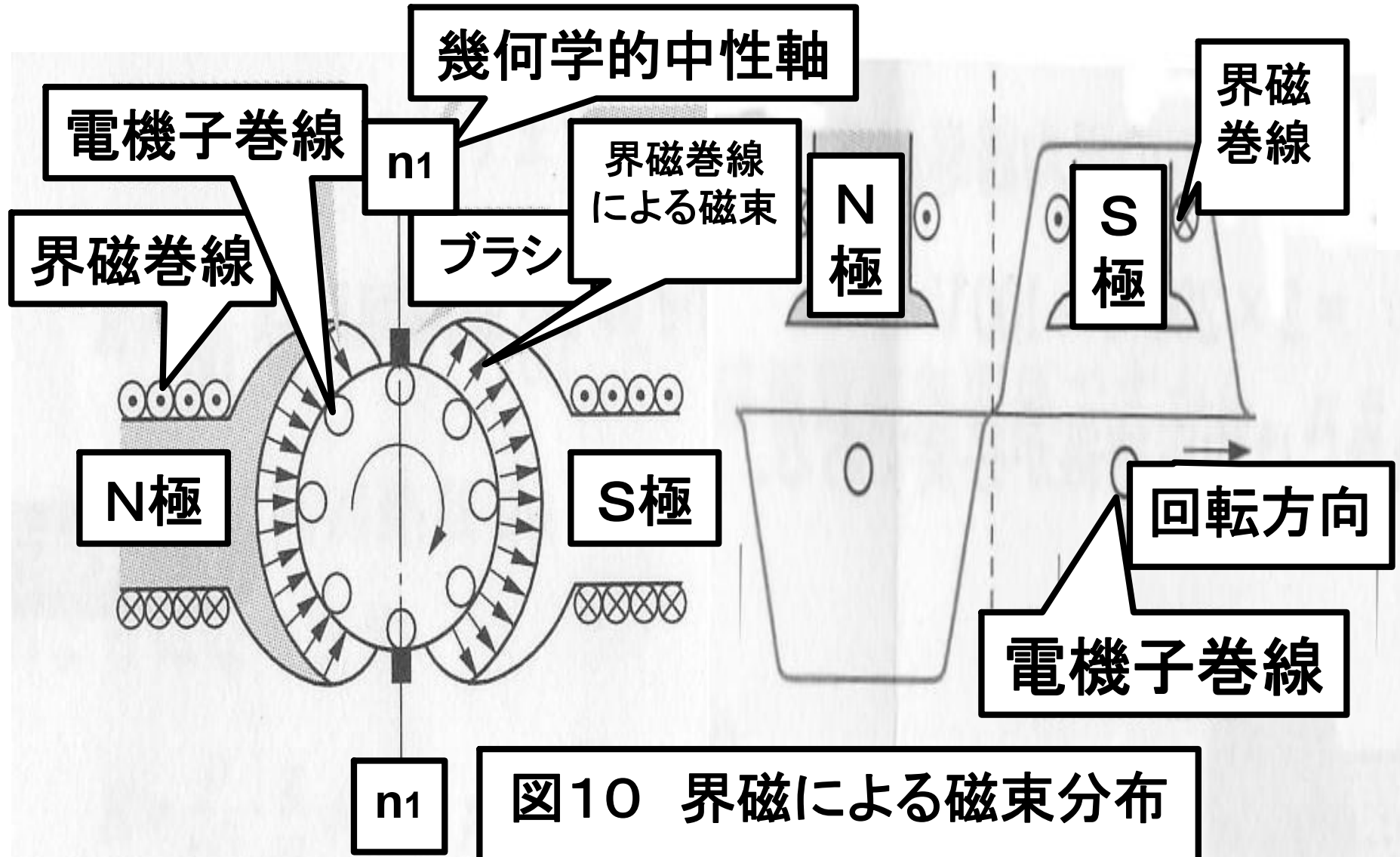


図10 界磁による磁束分布



# 3、直流機の特性曲線、出力トルク等⑱

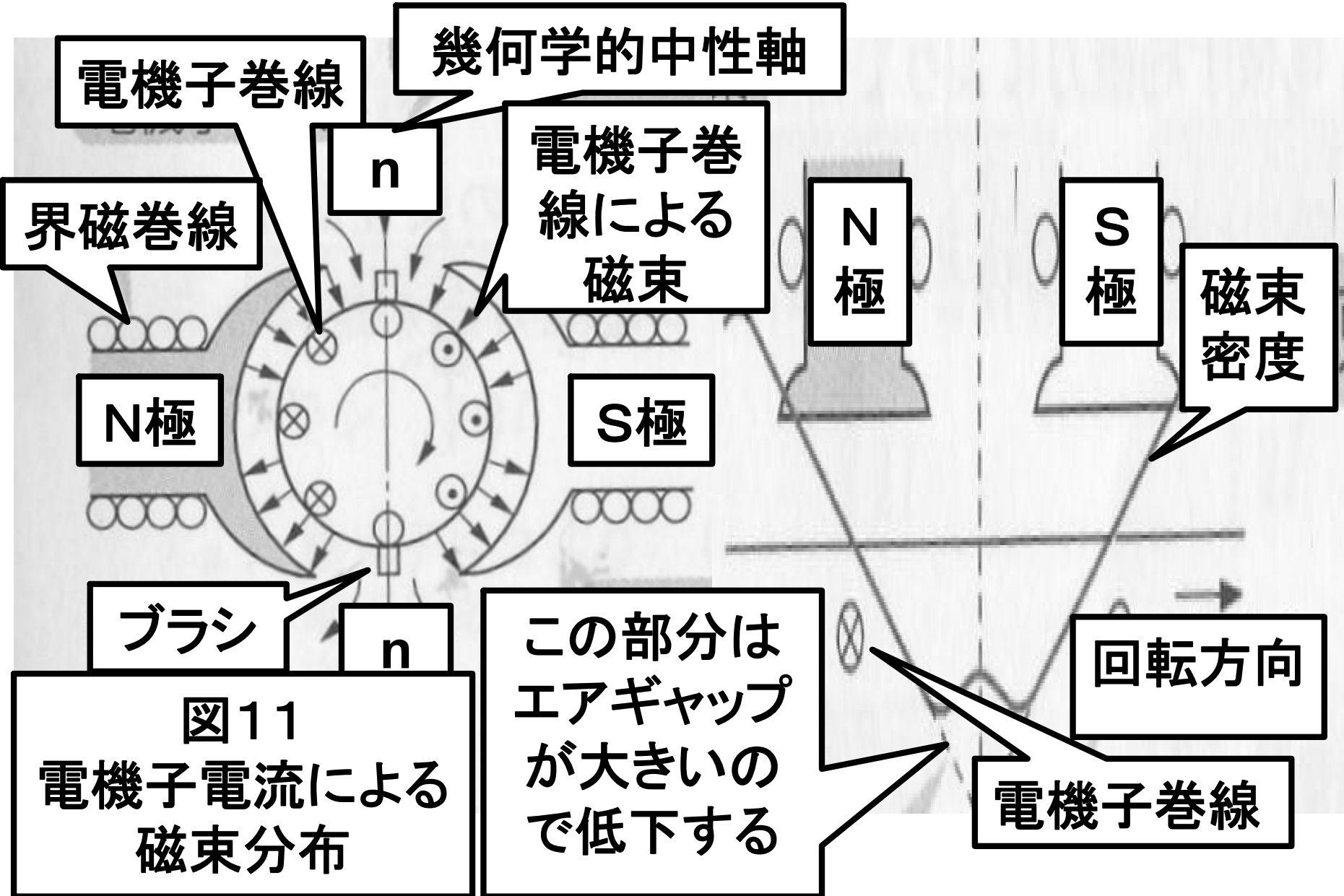


図11  
電機子電流による  
磁束分布

# 3、直流機の特徴曲線、出力トルク等⑱

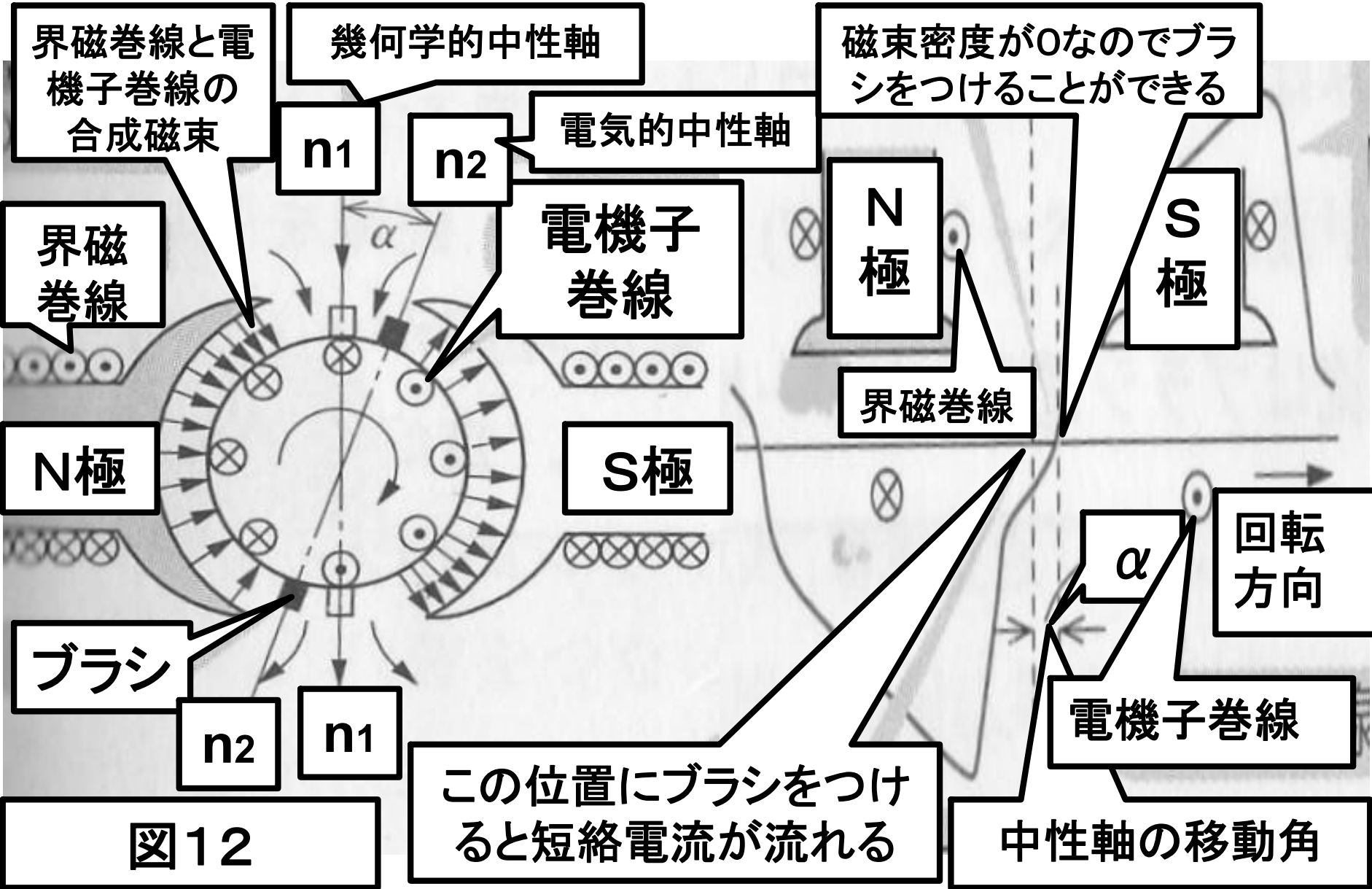


図12

# 3、直流機の特性曲線、出力トルク等①9

## ③電機子反作用対策

- ( i ) 補極の設置: 補極巻線は、電機子と直列に接続され、電機子反作用を打ち消す。
- ( ii ) 補償巻線の設置: 主磁極の磁極片の中に電機子導体と相対するように配置し、電機子電流と反対方向の電流を流して電機子電流による磁束を打ち消す。

## (7) 直流機の等価回路

### ①直流他励電動機の性質

図13に直流他励電動機の等価回路を示す。

### 3、直流機の特性格線、出力トルク等⑳

界磁電流 $I_f$ 一定より、磁束 $\phi$ 一定とする。

$E_a = k_e \phi N$ より誘導起電力は、回転速度に比例する。また、 $T = k_t \phi I_a$ より、トルクは電機子電流に比例する。図13により、次式が成立する。

$$V_t = E_m + r_a I_a + e_b \text{ [V]} \quad \textcircled{4}$$

$$P_o = E_m I_a = \omega T \quad (\omega = 2\pi n, n \text{ [min}^{-1}\text{)}) \text{ [W]} \quad \textcircled{5}$$

$$T = P_o / \omega = P_o / 2\pi n \text{ [N}\cdot\text{m]} \quad \textcircled{6}$$

ただし、 $E_m$ : 誘導起電力、 $r_a$ : 電機子抵抗、 $T$ : トルク

$I_a$ : 電機子電流、 $V_t$ : 端子電圧、 $P_o$ : 出力

### 3、直流機の特特性曲線、出力トルク等(21)

#### ②直流分巻電動機の性質

図14に、直流分巻電動機の等価回路を示す。図14より端子電圧 $V_t$ を一定とすると、 $I_f$ は一定となり磁束 $\phi$ は一定となる。また、誘導起電力は回転速度に比例し、トルクは電機子電流に比例し、次式が成立する。

$$V_t = E_m + r_a I_a + e_b [V] \quad \text{⑦}$$

となり、出力 $P_o$ 、トルク $T$ は⑤式、6式で表せる。

#### ③直流複巻発電機の性質

直流複巻発電機には、内分巻と外分巻がある。

### 3、直流機の特特性曲線、出力トルク等(22)

(i) 内分巻複巻発電機：図15より次式が成立する。

$$I(\text{負荷電流}) = P_o / V_t [\text{A}] \quad \textcircled{8}$$

$$I_a(\text{電機子電流}) = I + I_f [\text{A}] \quad \textcircled{9}$$

$$V_f(\text{分巻巻線電圧}) = r_s(\text{直巻巻線抵抗})I + V_t [\text{V}] \quad \textcircled{10}$$

$$I_f(\text{界磁電流}) = V_f / r_f = (r_s I + V_t) / r_f [\text{A}] \quad \textcircled{11}$$

次に、誘導起電力 $E_g$ は、次式となる。

$$E_g = r_a I_a + V_f = r_a I_a + r_s I + V_t [\text{V}] \quad \textcircled{12}$$

### 3、直流機の特特性曲線、出力トルク等(23)

(ii) 外分巻複巻発電機: 図16より次式が成立

$$I(\text{負荷電流}) = P_o / V_t [\text{A}] \quad (13)$$

$$I_f(\text{界磁電流}) = V_t / r_f [\text{A}] \quad (14)$$

$$I_a = I + I_f [\text{A}] \quad (15)$$

$$E_g = (r_a + r_s) I_a + V_t [\text{V}] \quad (16)$$

#### ④ 直流直巻電動機の性質

図17に直流直巻電動機の等価回路を示す。

$$E_m = k_c \phi N [\text{V}] \quad (17)$$

$$\phi = k_\phi I_a [\text{Wb}] \quad (18)$$

$$E_m = k_c k_\phi I_a N [\text{V}] \quad (19)$$

# 3、直流機の特性曲線、出力トルク等(24)

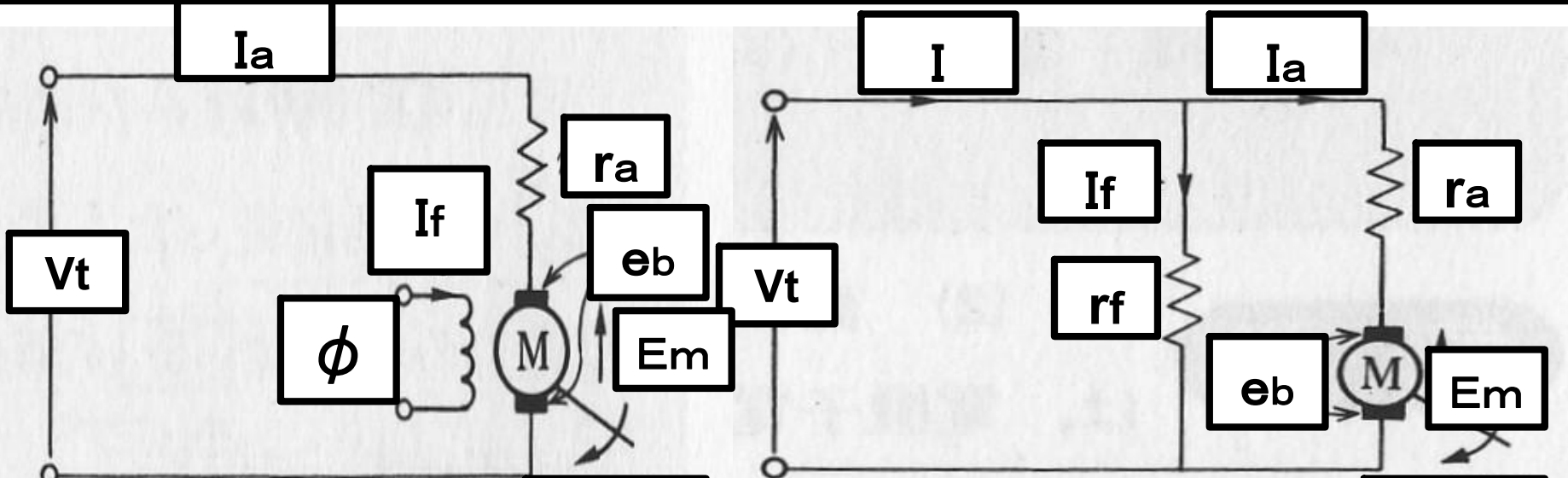


図13 他励式

$n$ 、 $T$

図14 分巻式

$n$ 、 $T$

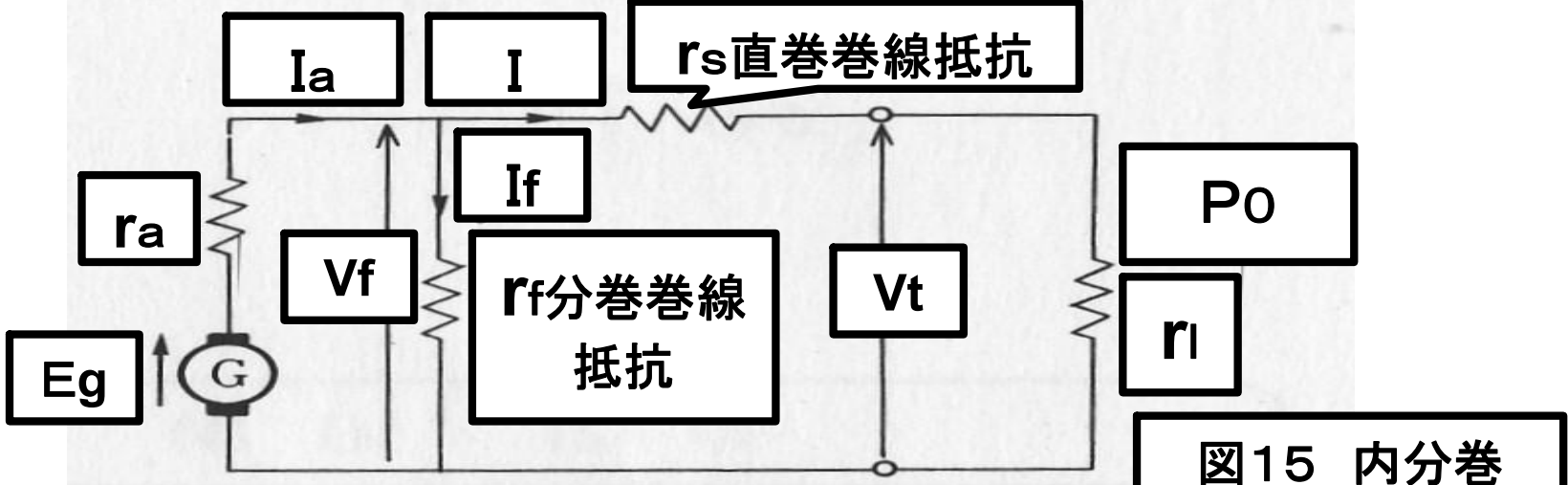


図15 内分巻



# 3、直流機の特性曲線、出力トルク等(25)

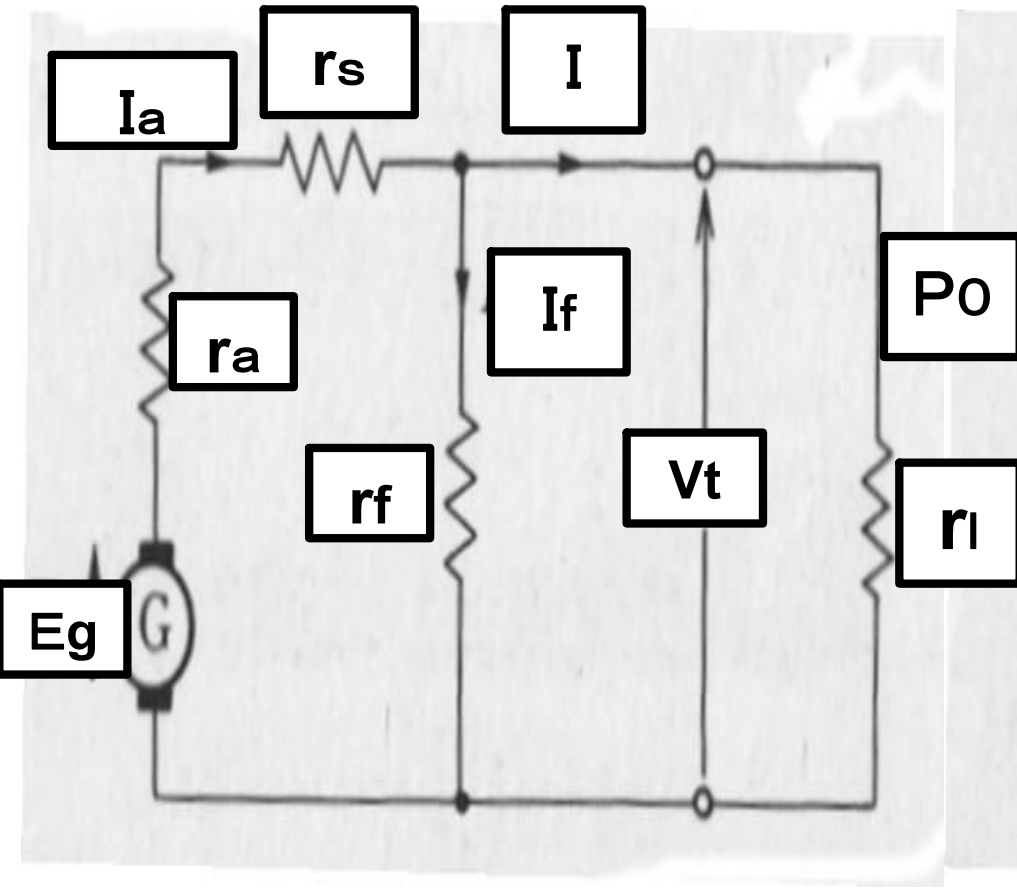


図16 外分巻

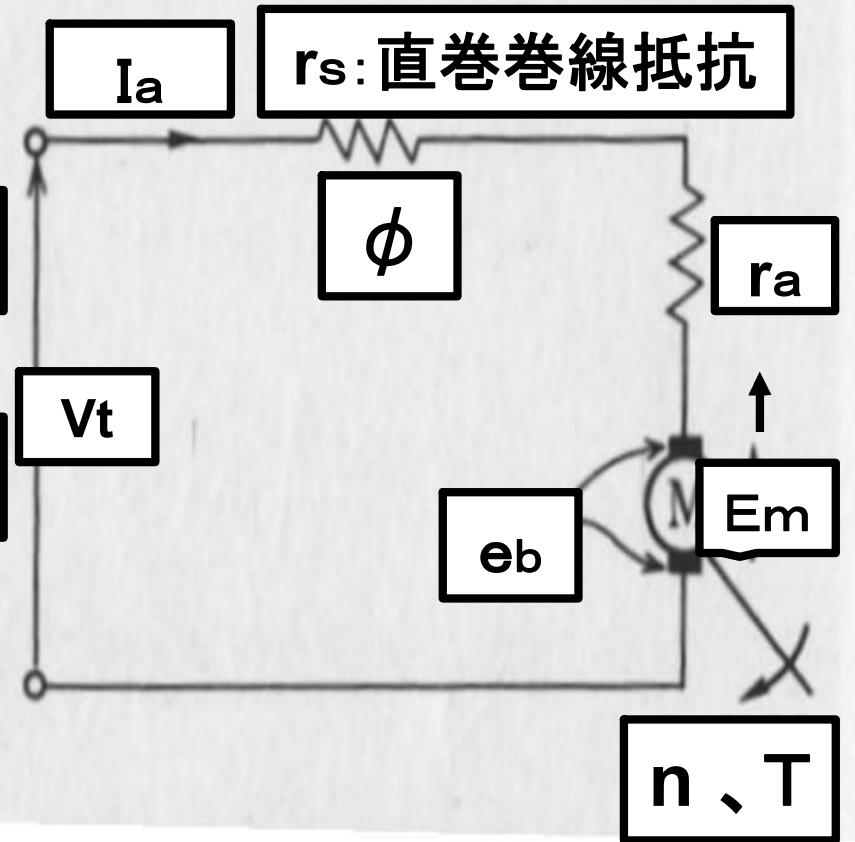


図17 直巻式

### 3、直流機の特特性曲線、出力トルク等(26)

また、誘導起電力は回転速度と電機子電流の積に比例する。したがって、トルク $T$ は、

$$T = k_t \phi I_a = k_t k_\phi I_a^2 [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (20)$$

⑳式よりトルクは電機子電流の2乗に比例する。また、端子電圧 $V_t$ と出力 $P_o$ は、それぞれ次式に示すようになる。

$$V_t = E_m + (r_a + r_s) I_a [\text{V}] \quad (21)$$

$$P_o = E_m I_a = \omega T [\text{W}] \quad (22)$$

$$T = P_o / \omega = P_o / 2\pi n [\text{N}\cdot\text{m}] \quad (23)$$