

# モータ技術の基礎と 自動車駆動用モータの最近の話題

## 1. ブラシ付きDCモータ

大同大学 工学部  
電気電子工学科 加納善明

### 【質疑応答について】

- ・ 50分から60分ごとに質疑応答の時間を設けます。
- ・ 質問に、時間が許す限り回答します。
- ・ 回答し切れなかった質問は、後日改めて回答します。

## アウトライン

### 1. ブラシ付きDCモータ

- 1.1 ブラシ付きDCモータの基本構成
- 1.2 ブラシ付きDCモータの動作原理
- 1.3 ブラシ付きDCモータの構造理解

休憩

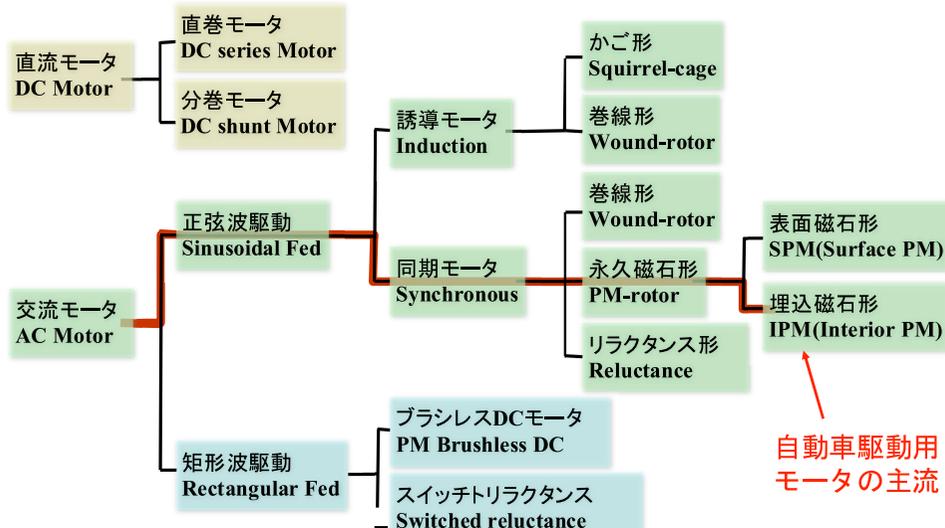
- 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出
- 1.5 ブラシ付きDCモータのトルク発生原理

休憩

- 1.6 ブラシ付きDCモータ特性と速度制御
- 1.7 ブラシ付きDCモータ特性の調整
- 1.8 ブラシ付きDCモータの問題点

休憩

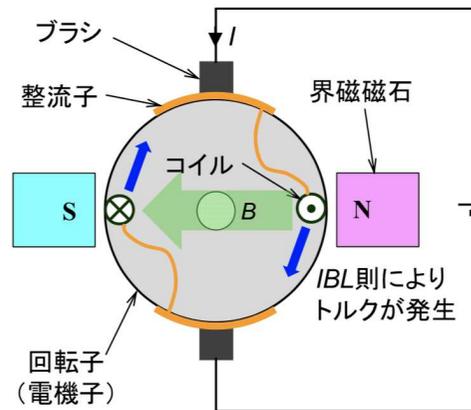
## 0. モータの種類



直流モータ：トルク・速度など全て直流量（DC電圧）で制御 → 制御が簡単  
 交流モータ：電流・電圧は三相交流。このままでは制御が難しいので、直流モータlikeに制御できるようにモデル化を行い、直流量で制御。  
 つまり、トルク発生原理等の基本は直流DCモータ

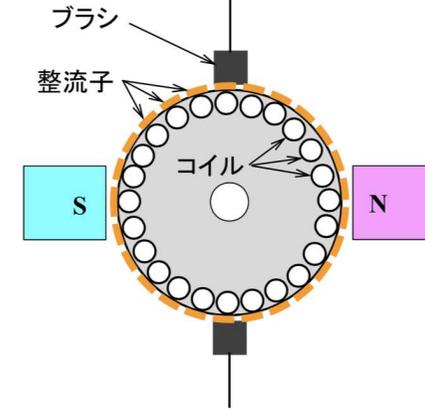
## 1.1 ブラシ付きDCモータの基本構成

### ○基本構造と動作原理



界磁による磁界中の電線に流れる電流によりフレミング左手則 (IBL則) に基づいてトルクが発生し、回転する。

### (より実際的な構成)

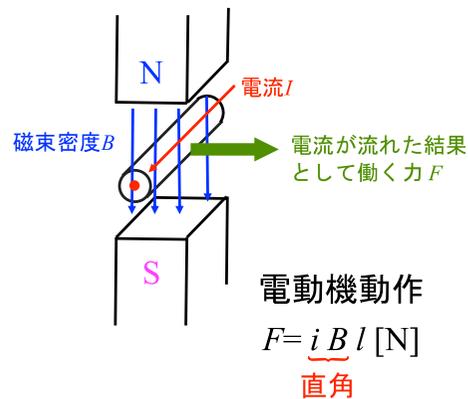


回転子は、連続的にトルクを発生するため、コイルと整流子のペアを多数分散させて配置する構造になっている。

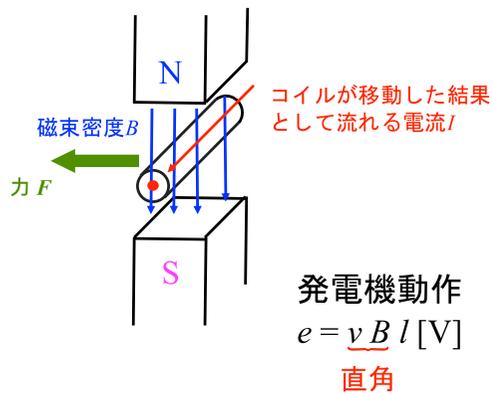
## 1.2 ブラシ付きDCモータの動作原理①：重要

5

### フレミングの左手の法則



### フレミングの右手の法則



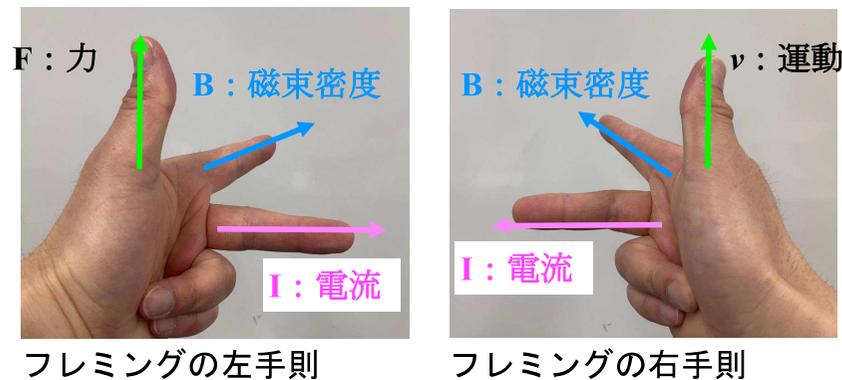
右手・左手の法則は同時に働いている

導線を動かすと、電流  $I$  が流れるが、逆に電流  $I$  が流れたことによって、力  $F$  が、始めに動かした向きと逆に発生する。

## 1.2 ブラシ付きDCモータの動作原理①：重要

6

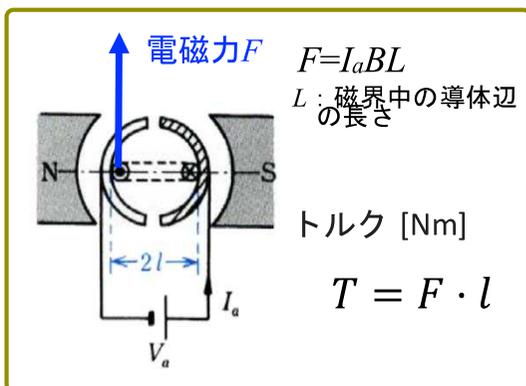
### 駆動電源からの視点で考えてみる



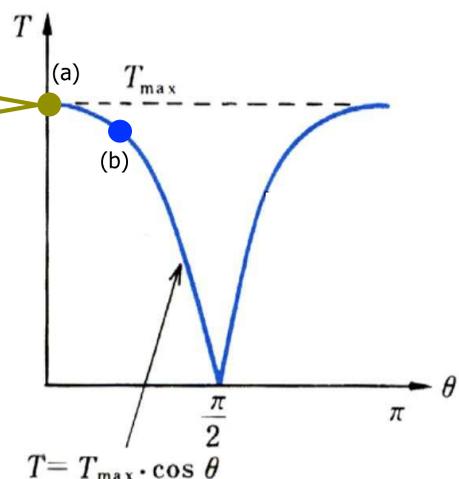
- ・力（モータの場合、トルク）を発生させようと電圧を印加しトルク電流を流す。
- ・コイルが動いたことで、右手則によってトルク電流に対し反対の電流を流そうと、内部で電圧が発生する。この電圧の方向は、上記の電流の向きからわかるように電源電圧の逆向きになる。⇒逆起電力
- ・トルク定数と起電力定数は、ある単位系で整理すると等しくなる。

## 1.2 ブラシ付きDCモータの動作原理②

7

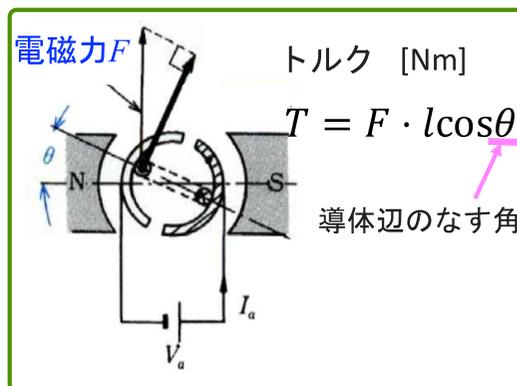


実際どのようなトルクが発生するのか？

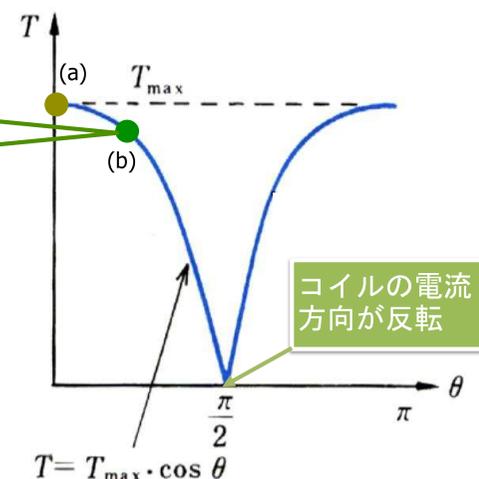


## 1.2 ブラシ付きDCモータの動作原理②

8

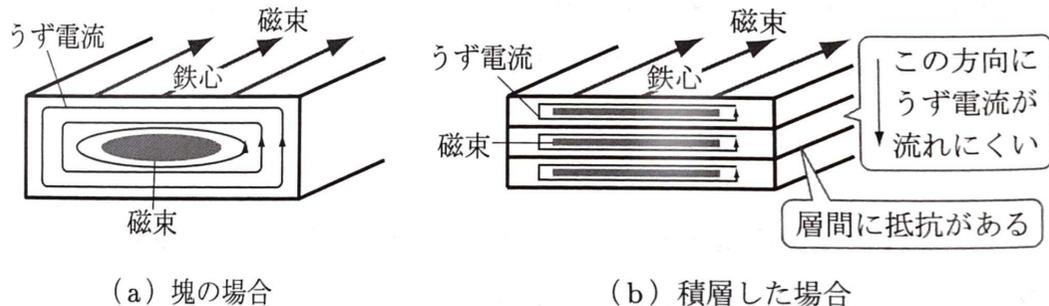


実際どのようなトルクが発生するのか？





何故、薄い鉄板を積層するのか？

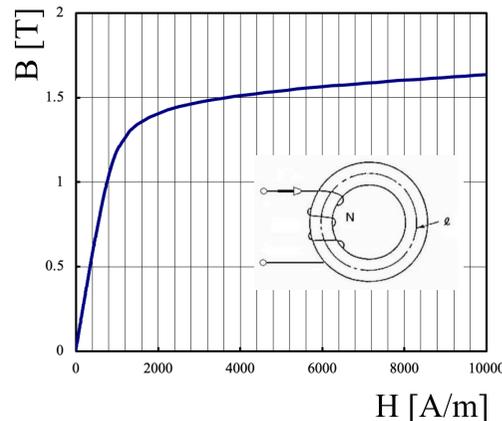


うず電流損を低減できる

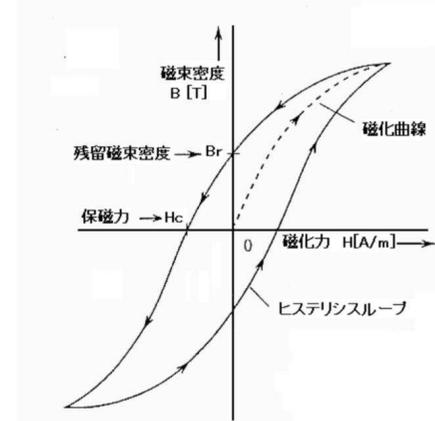
電磁鋼板は硬度が高いためせん断（プレス）により打ち抜きされ、その後積層固定される。固定法としては接着、かしめ、溶接、ボルト止めなどがある。

鉄心の特性について

B-H特性

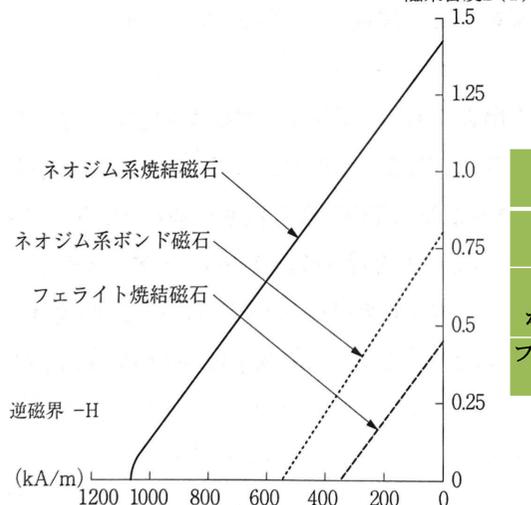


ヒステリシス現象



使用材料: 界磁磁石について

磁束密度B(T)



代表特性

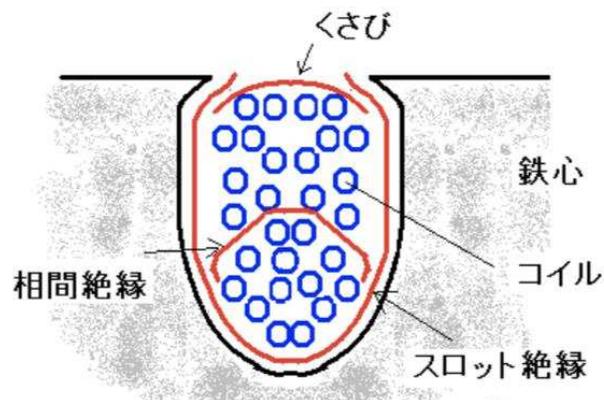
| 磁石種類      | 残留磁束密度 Br [T] | 固有保磁力 Hcj [kA/m] | 最大エネルギー積 [kJ/m <sup>3</sup> ] |
|-----------|---------------|------------------|-------------------------------|
| ネオジム焼結磁石  | 1.3~1.5       | 900~2400         | 300~400                       |
| ネオジムボンド磁石 | 0.6~0.7       | 700              | 76                            |
| フェライト磁石   | 0.4~0.5       | 200~400          | 30~40                         |

コイル（マグネットワイヤ）について

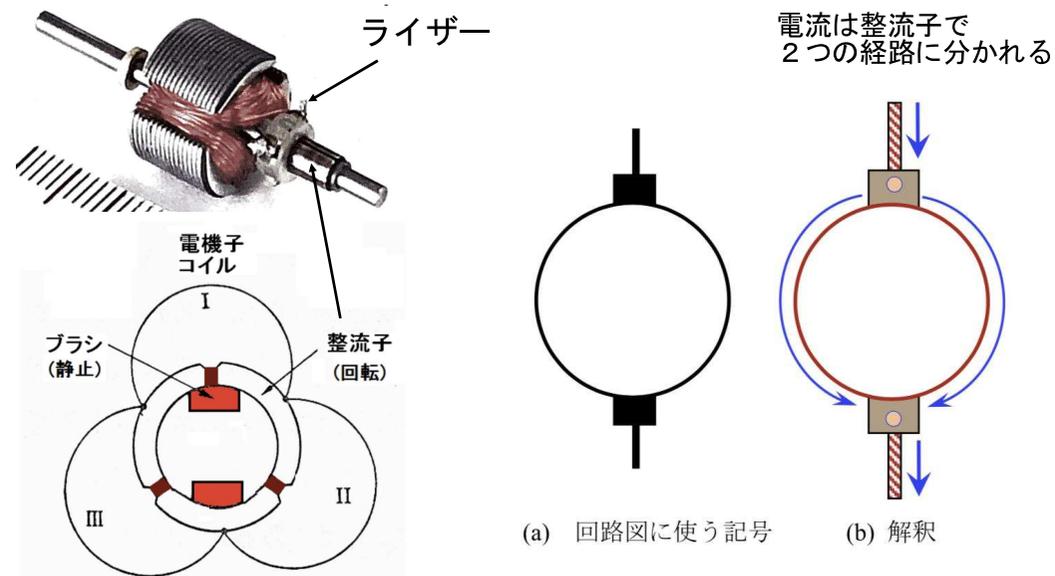
コイルにはマグネットワイヤーが使われる。マグネットワイヤーとは通称エナメル線と呼ばれ、銅の素線に絶縁物をコーティングしてある。



絶縁について（スロット内の絶縁構成）



絶縁はフィルムで行う。鉄心とコイルの間にはスロット絶縁がある。またスロットに収められたコイルにくさびでふたをする。同一スロット内に電位の異なるコイルがある場合、コイル間に相間絶縁を設ける。



ブラシ、整流子、コイルの関係      ブラシ付きDCモータの記号と解釈

## アウトライン

### 1. ブラシ付きDCモータ

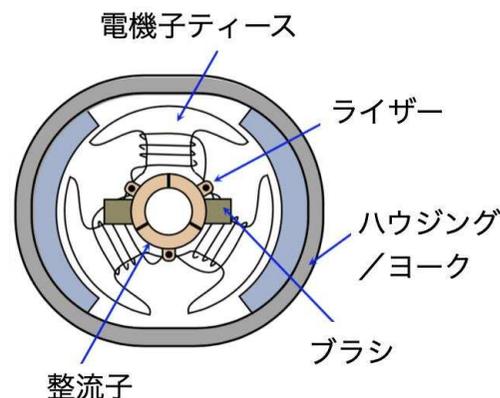
- 1.1 ブラシ付きDCモータの基本構成
- 1.2 ブラシ付きDCモータの動作原理
- 1.3 ブラシ付きDCモータの構造理解
- 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出**
- 1.5 ブラシ付きDCモータのトルク発生原理
- 1.6 ブラシ付きDCモータ特性と速度制御
- 1.7 ブラシ付きDCモータ特性の調整
- 1.8 ブラシ付きDCモータの問題点

休憩

休憩

休憩

## 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出

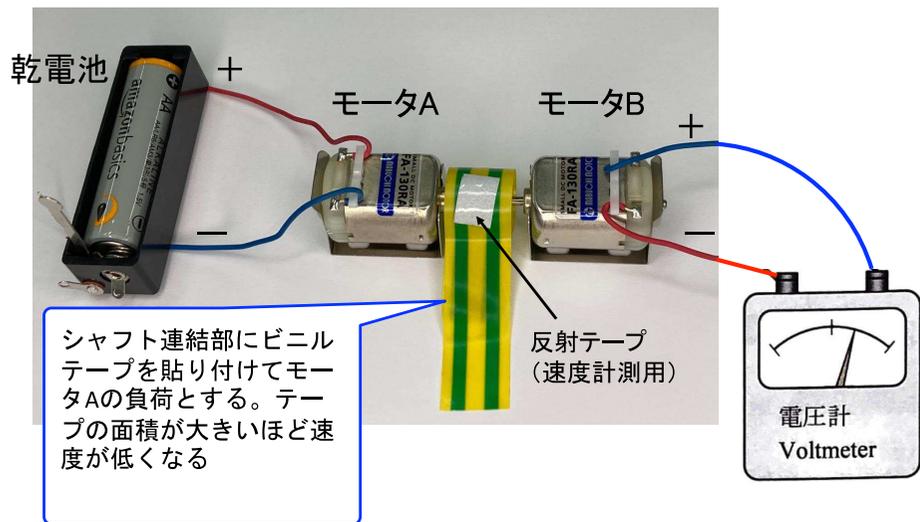


フレミングの左手の法則から、電機子鉄心なし（コアレス）のDCモータのトルクは計算できる。トルク向上のために、**多くは電機子鉄心を採用**している(左図)。この場合にトルクはどのような考えで導出すればよいか？

- ① 磁気随伴エネルギーの変化で表す方法
- ② 電氣的出力 = 機械的出力 の関係を利用する方法
- ②をDCモータを用いた簡単な実験から、等価回路を導出し、考察してみる。

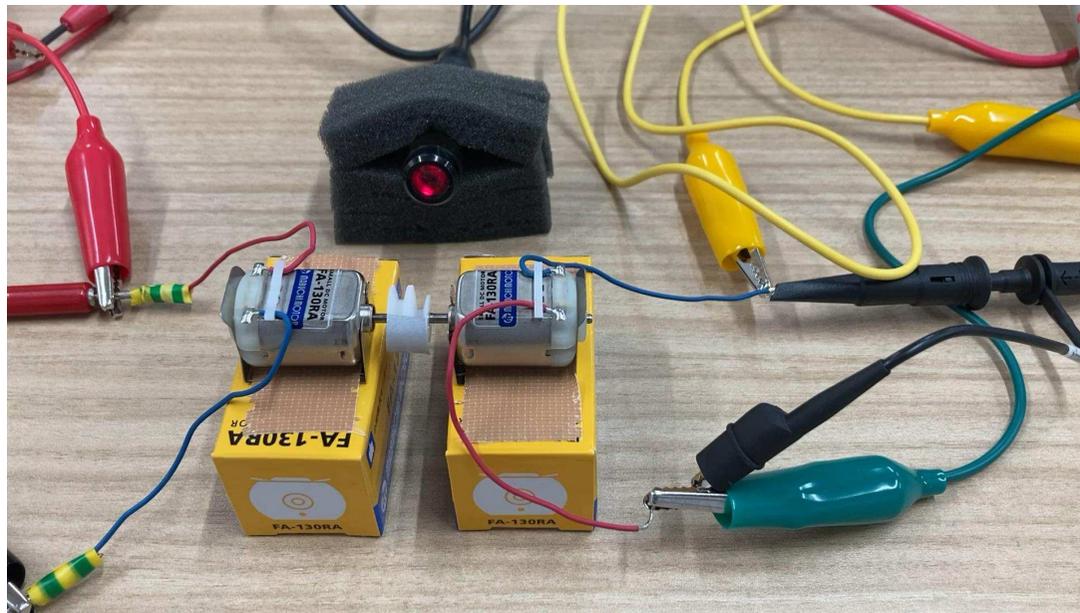
# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出

モータ2台を使って、下図のような測定系を組む。  
モータBの端子に接続した電圧計の読み（発生電圧）と  
回転速度の関係を測定する。（横軸：回転数，縦軸：電圧）

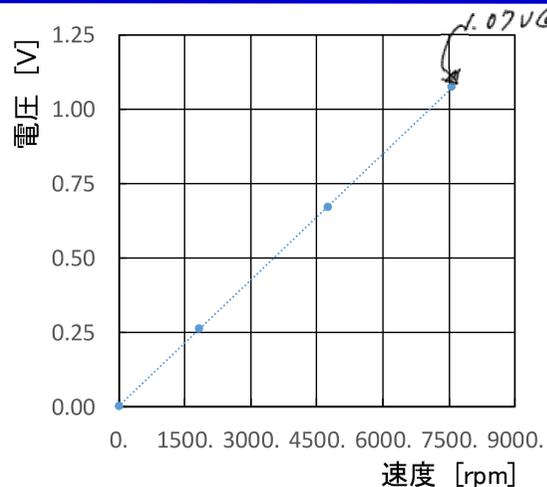


# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出

## 回転速度 対 誘起電圧 の測定実験



# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出



7560rpmを [rad/s] の単位系に変換  
rpmは分速なので、まず1/60にして秒速  
rpsに変換  
 $7560/60 = 126 \text{ rps}$   
1回転で  $2\pi \text{ rad}$  回転  
あるので、 $2\pi$  をかける  
 $126 \times 2\pi = 791.3 \text{ rad/s}$   
よって  $k_E = \frac{1.07}{791.3} = 1.35 \times 10^{-3}$   
 $1.35 \times 10^{-3} [\text{V/rad/s}]$

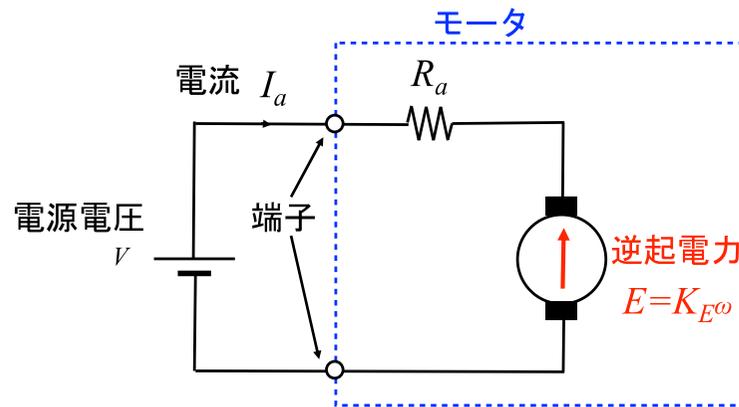
上の特性は、逆起電力定数  $K_E$  を計測するためのグラフ。速度に対し起電力は比例関係にある。この場合、傾きが  $K_E$  に相当する。

$E = K_E \omega$  として  $K_E$  を求めよ。

$\omega$  : 角速度 [rad/s]

# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出

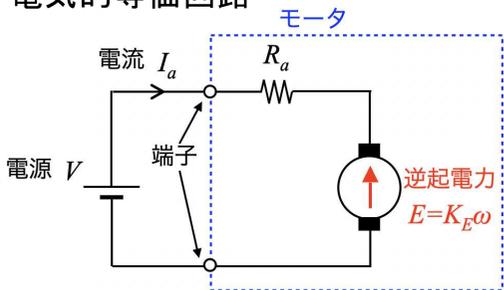
## 電氣的等価回路



電機子のコイルは銅線を巻いて作られているため、2個の端子から見た電機子抵抗の性質を1個の抵抗器  $R_a$  で表し、測定した逆起電力を1個の電圧源で表し、これが直列に結線されているものと解釈する。

# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出

## 電氣的等価回路



## 電圧方程式

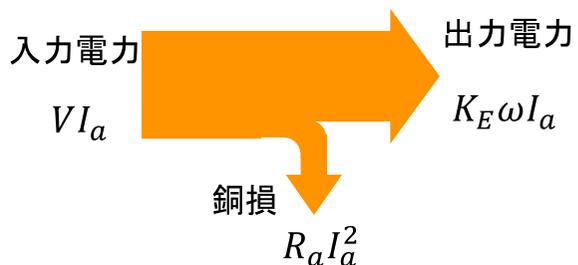
$$V = R_a I_a + K_E \omega$$



両辺に電機子電流  $I_a$  を乗算すれば、電力の式に

$$V I_a = R_a I_a^2 + K_E \omega I_a$$

## エネルギーフロー図



ブラシ・整流子間の電圧降下が無く、鉄損が無いと仮定すれば、出力電力がすべて機械的動力（機械的出力）に変換されるはず。

# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出

機械的出力  $P_o$  とトルク  $T$  との間には次の関係がある。

$$P_o = \omega T$$

まず、機械的出力  $P_o$  の単位：W（仕事率）について

1ワットは、毎秒1ジュール（J）に等しいエネルギーを生じさせる仕事率。単位は W=J/s

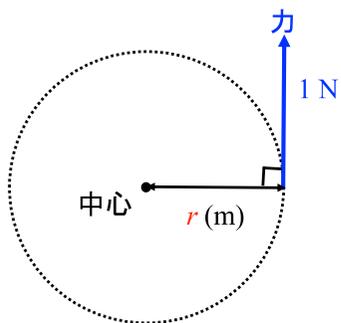
仕事  $W = F \cdot \Delta x$

↓ 一般式

$$W = \int F \cdot dx$$

ある力  $F$  で  $\Delta x$  (m) 動かす、その時のエネルギー。これを1秒で行えば、仕事率ワットとなる。  
 例えば、1Nの力で1m動かすと1J。これを1秒で行えば1W（ワット）。

# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出

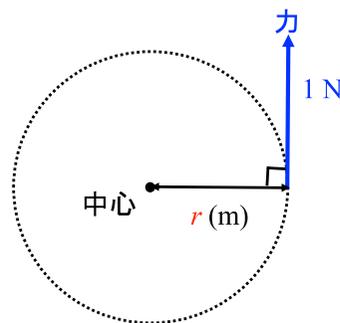


ロータの表面を考える。半径  $r$  (m) として、ある点に1Nの力を左図のように加える。

半径  $r$  (m) の円  $\Rightarrow$  1周の長さは、 $2\pi r$  (m)  
 回転数  $n$  (rps) で回転しているとすると、 $n$  は1秒間に何回転したかであるから、1秒間に  $2\pi r n$  (m) 進むことになる。  
 つまり、1秒間に1Nの力を加えた点が  $2\pi r n$  (m) 動くので、仕事率（ワット）は

$$W = F \cdot \Delta x = F \cdot 2\pi r n$$

# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出



$$W = F \cdot 2\pi r n$$

$$= \underline{F \cdot r} \cdot 2\pi n$$

トルク  $T$  に相当

$$T = F \cdot r \text{ [Nm]}$$

トルクの定義

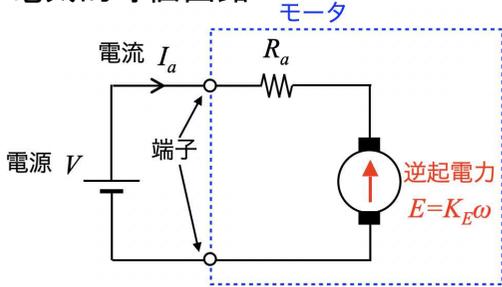
$$W = T \cdot 2\pi n = 2\pi n T = \omega T$$

つまり、 $P_o = \omega T$

# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出

電氣的等価回路

電圧方程式

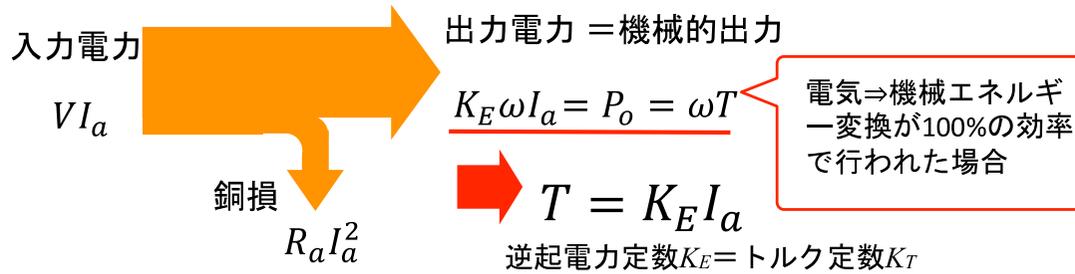


$$V = R_a I_a + K_E \omega$$

両辺に電機子電流  $I_a$  を乗算すれば、電力の式に

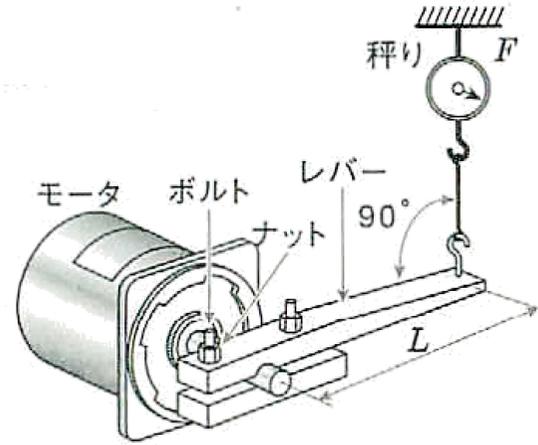
$$V I_a = R_a I_a^2 + K_E \omega I_a$$

エネルギーフロー図



# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出

電流-トルク特性の確認実験



$$\text{トルク} = F \cdot L$$

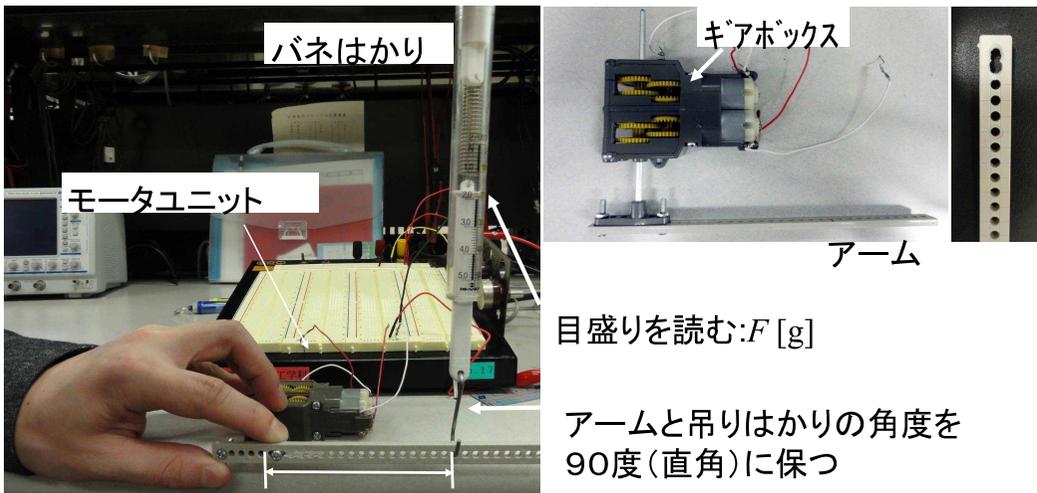
$$[\text{g} \cdot \text{cm}] \Rightarrow [\text{N} \cdot \text{m}]$$

$$1[\text{g} \cdot \text{cm}] \Rightarrow 0.09807 \times 10^{-3} [\text{N} \cdot \text{m}]$$

$$= 0.09807 [\text{mN} \cdot \text{m}]$$

# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出

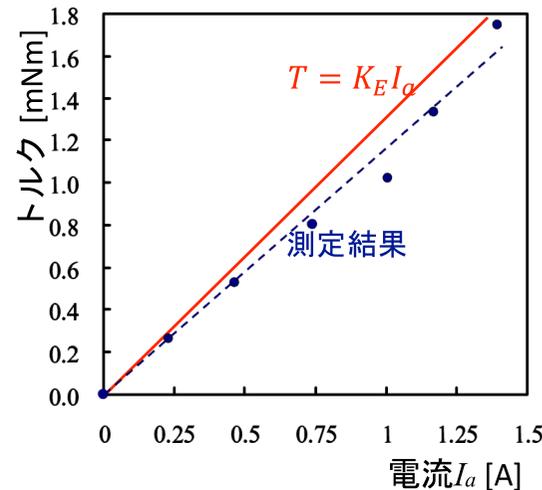
DCモータのトルク測定（静止トルク）



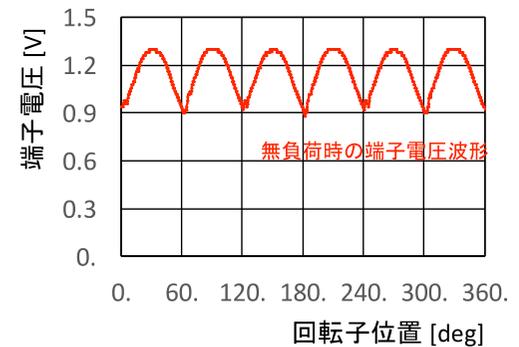
中心からバネはかりのフックまでの距離を計:L[cm]

# 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出

DCモータのトルク測定（静止トルク）



誤差要因は？  
オシロスコープで測定した電圧波形が下図のようであったことが関係している。



誘起電圧定数から算出したトルクと実測トルクは凡そ一致する。

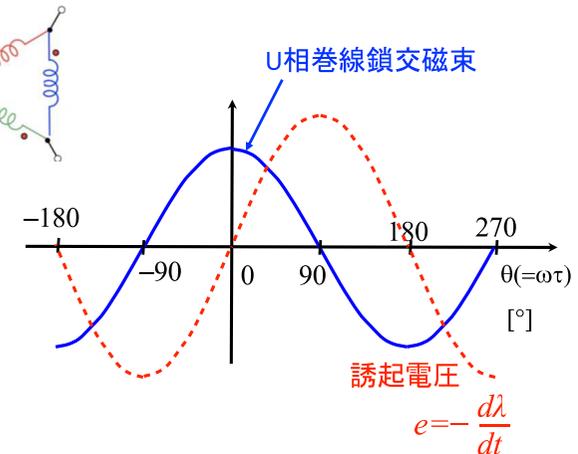
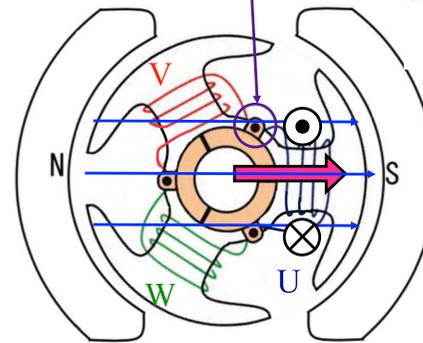
# アウトライン

## 1. ブラシ付きDCモータ

- 1.1 ブラシ付きDCモータの基本構成
- 1.2 ブラシ付きDCモータの動作原理
- 1.3 ブラシ付きDCモータの構造理解
- 休憩
- 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出
- 1.5 **ブラシ付きDCモータのトルク発生原理**
- 休憩
- 1.6 ブラシ付きDCモータ特性と速度制御
- 1.7 ブラシ付きDCモータ特性の調整
- 1.8 ブラシ付きDCモータの問題点
- 休憩

# 1.5 ブラシ付きDCモータのトルク発生原理

このライザで赤コイルの巻き終わりが青コイルの巻はじめに接続

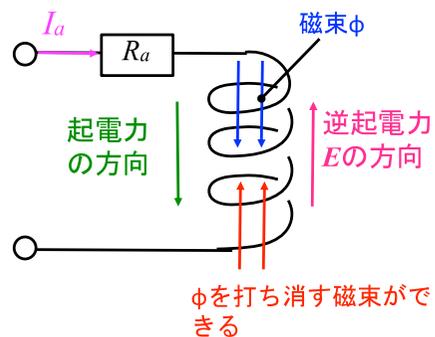


界磁磁束の方向とU相巻線に正の電流が流れた場合の発生磁束の方向 (図中 →) が一致する回転子位置を  $\theta=0^\circ$  と定義 (CW方向を正)

左図をもとに、ファラデーの電磁誘導の法則で、磁石磁束の変化に対する起電力を計算すると、間違ってしまう。

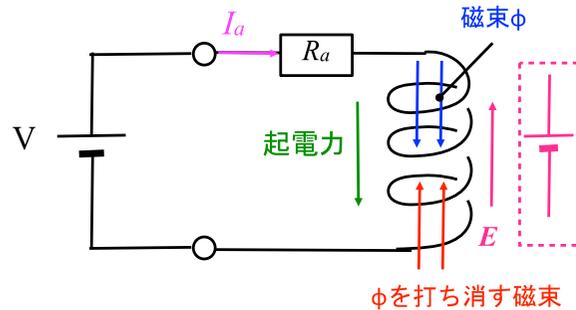
# 1.5 ブラシ付きDCモータのトルク発生原理

コイルに電流を流した場合



- ・磁束  $\phi$  を発生させるのに必要な起電力 (下向き、これを正とする)
- ・誘導起電力は上記を妨げる向きなので上向きとなる

モータに駆動回路を接続した場合

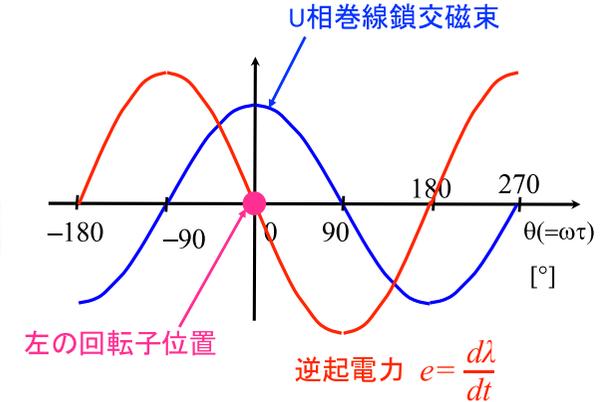
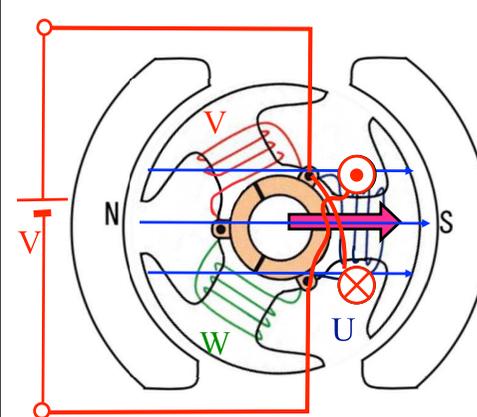


電源電圧  $V$  と電流  $I_a$ 、逆起電力  $E$  には

$$V - |E| = R_a I_a \iff V = R_a I_a + |E|$$

$$\text{電圧方程式} \quad v = R_a i_a + \frac{d\lambda}{dt}$$

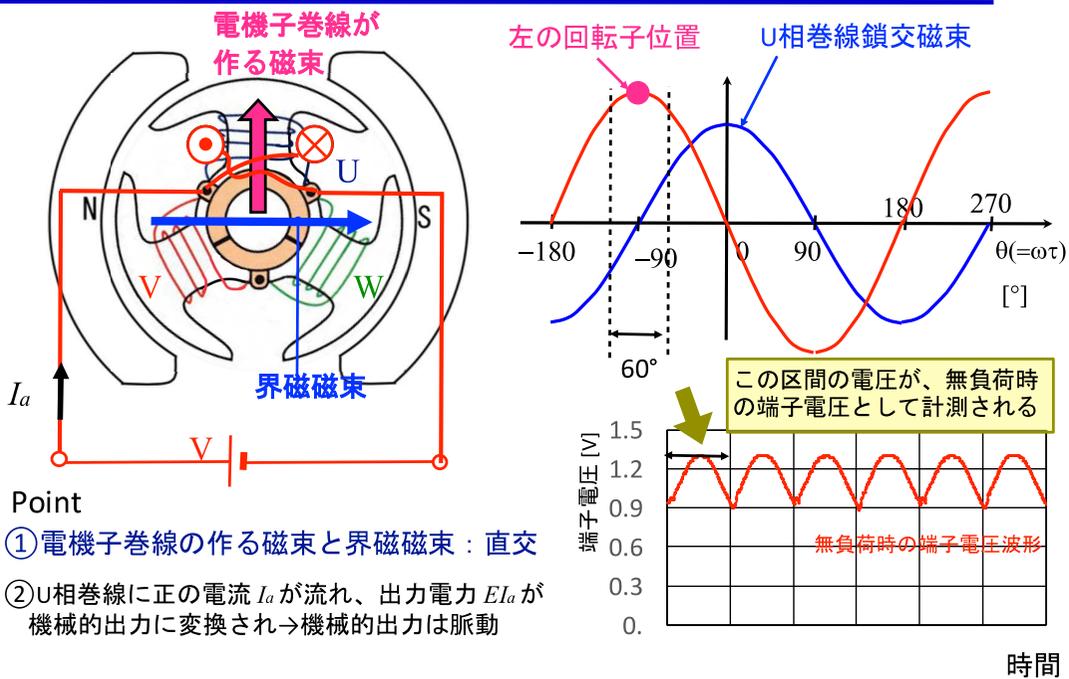
# 1.5 ブラシ付きDCモータのトルク発生原理



界磁磁束の方向とU相巻線に正の電流が流れた場合の発生磁束の方向 (図中 →) が一致する回転子位置を  $\theta=0^\circ$  と定義 (CW方向を正)

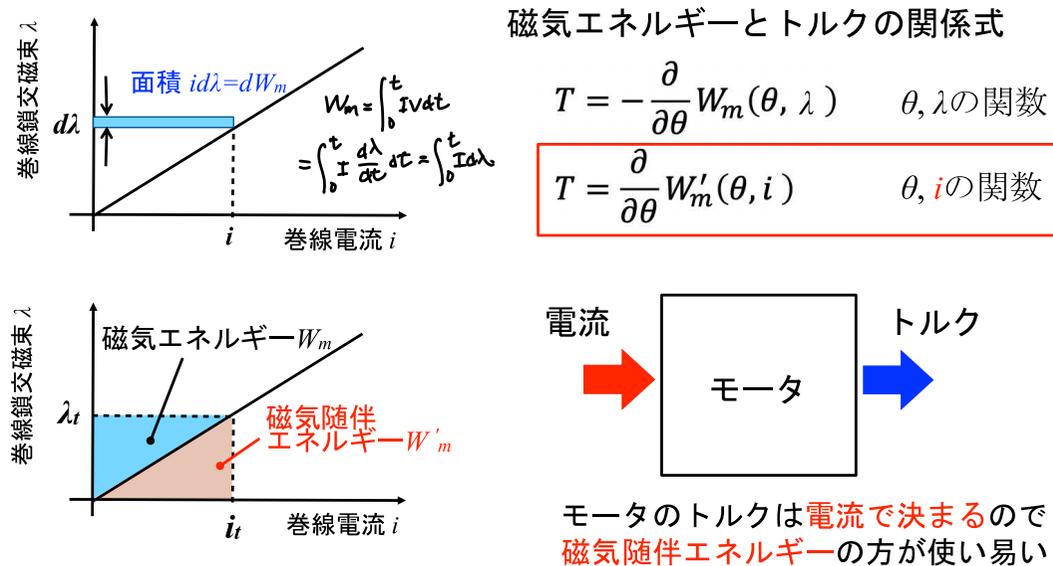
- ・逆起電力波形は、 $-\sin\theta$  分布
- ・永久磁石同期モータでは、回転子位置に対する逆起電力の波形が  $-\sin\theta$  分布となるように位置調整する。

# 1.5 ブラシ付きDCモータのトルク発生原理

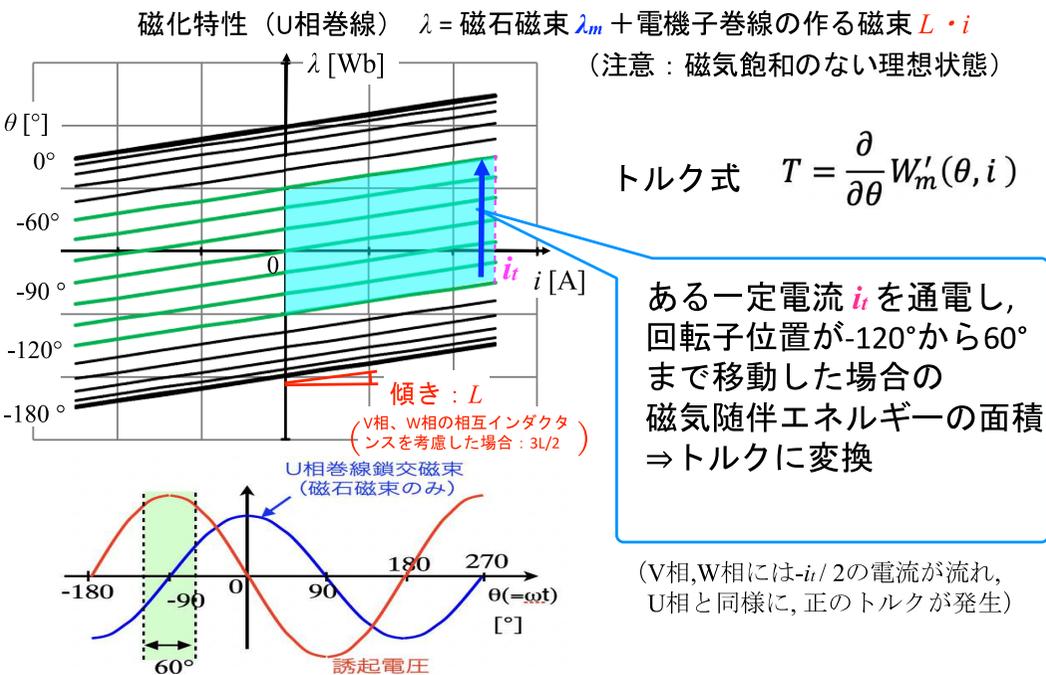


# 1.5 ブラシ付きDCモータのトルク発生原理

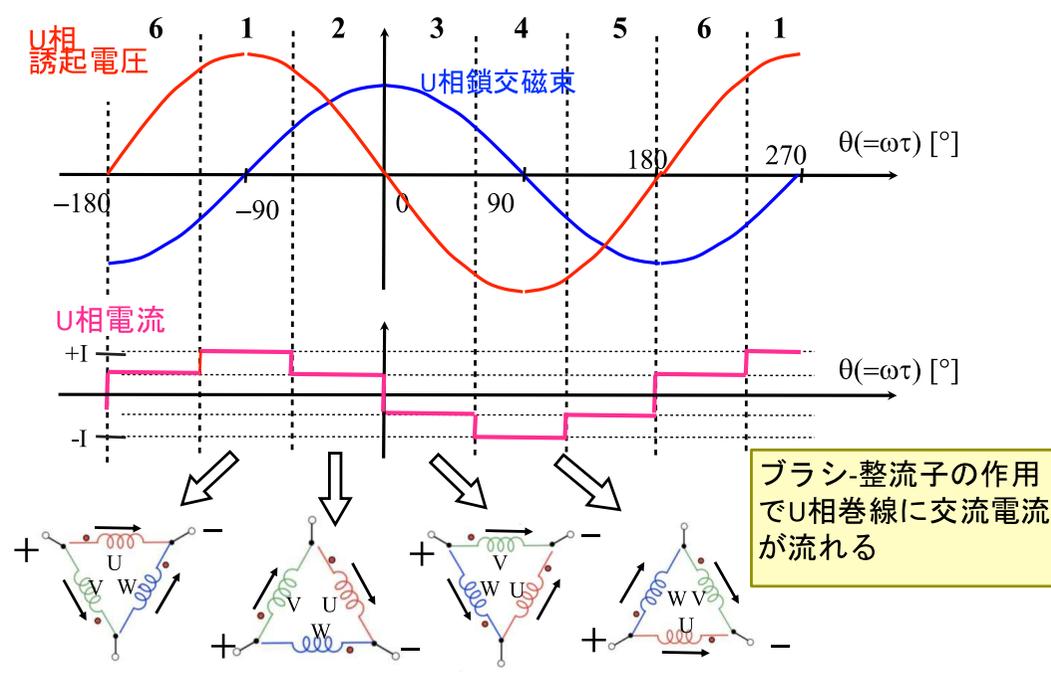
磁気(or磁気随伴)エネルギーの変化からトルクを考える



# 1.5 ブラシ付きDCモータのトルク発生原理



# 1.5 電機子巻線に流れる電流はどうなっている？



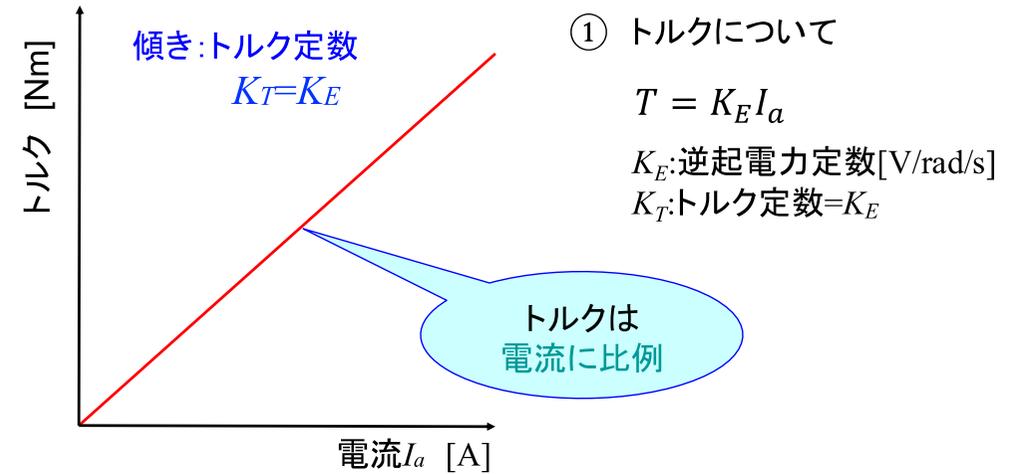
# アウトライン

## 1. ブラシ付きDCモータ

- 1.1 ブラシ付きDCモータの基本構成
- 1.2 ブラシ付きDCモータの動作原理
- 1.3 ブラシ付きDCモータの構造理解
- 休憩
- 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出
- 1.5 ブラシ付きDCモータのトルク発生原理
- 休憩
- 1.6 **ブラシ付きDCモータ特性と速度制御**
- 1.7 ブラシ付きDCモータ特性の調整
- 1.8 ブラシ付きDCモータの問題点
- 休憩

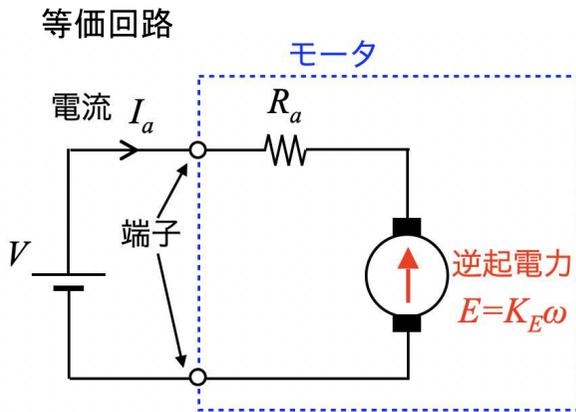
## 1.6 ブラシ付きDCモータの特性

### 電流-トルク特性 ( $I_a$ - $T$ 特性)



## 1.6 ブラシ付きDCモータの特性

### 速度-トルク特性 (N-T特性)

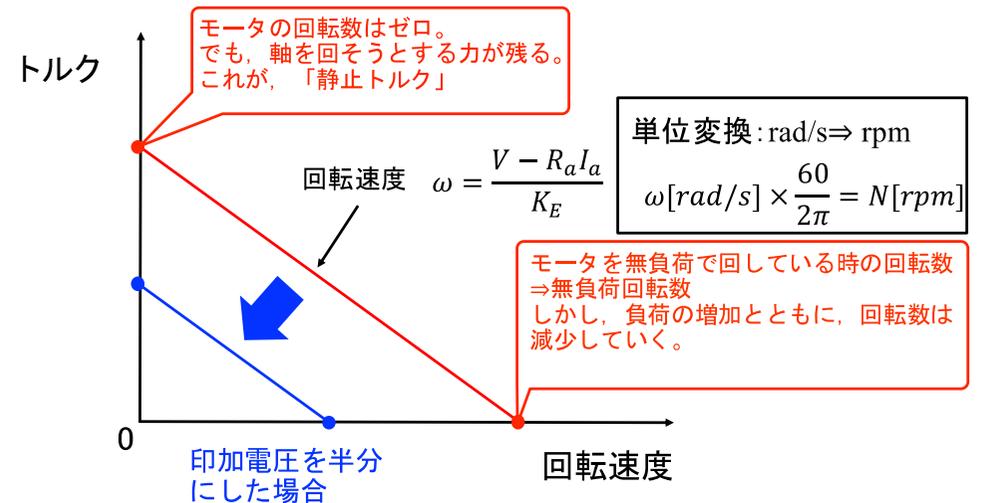


- ① 電機子電圧  $V = R_a I_a + K_E \omega$
- ② トルク  $T = K_E I_a$
- ③ 回転速度  $\omega = \frac{V - R_a I_a}{K_E}$

モータの速度は、電流の増加（トルクの増加）とともに直線的に低下する特性

## 1.6 ブラシ付きDCモータの特性

### 速度-トルク特性 (N-T特性)

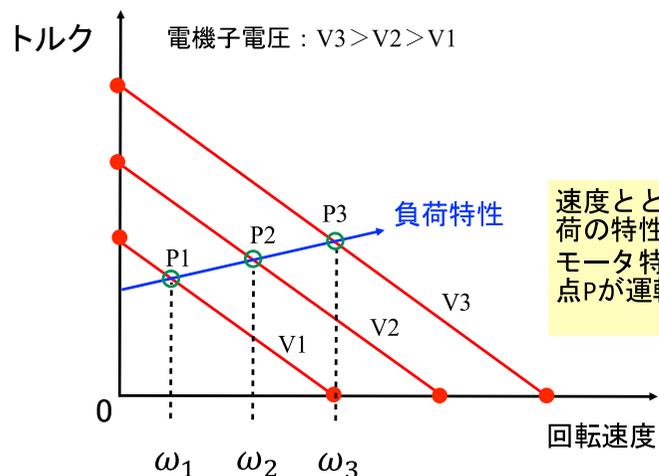


モータの速度を変える、つまり可変速制御するには・・・  
 → 電機子電圧  $V$  を変えるのが有効

## 1.6 ブラシ付きDCモータの特性

45

### 速度-トルク特性 (N-T特性)



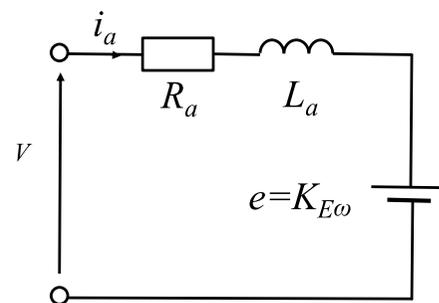
速度とともに大きくなる負荷の特性 (青線)。モータ特性 (赤線) との交点Pが運転動作点となる。

電機子電圧を変え, 可変速制御

## 1.7 ブラシ付きDCモータの速度制御

46

### 過渡項まで考えた場合の等価回路



電機子電圧

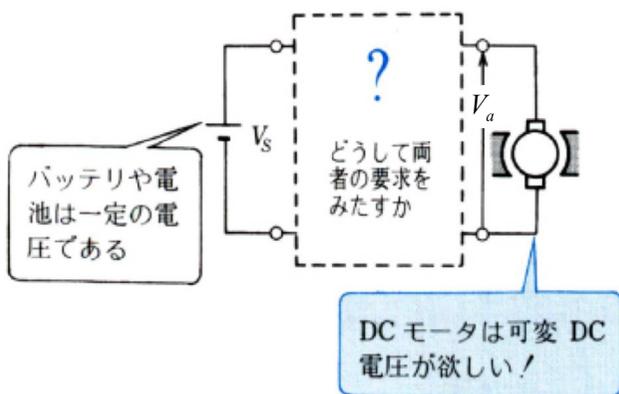
$$v = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + K_E \omega$$

多くの直流モータでは  
速度起電力  $\gg$  抵抗, リアクタンス降下

→ 電機子電圧  $V$  を制御すれば, 速度制御が可能  
電圧は降圧チョッパのON比率で制御可能

## 1.7 ブラシ付きDCモータの速度制御

47



■  $V_a$  を可変させる手段

1. 抵抗制御
2. DCチョッパ (電力変換器) による制御



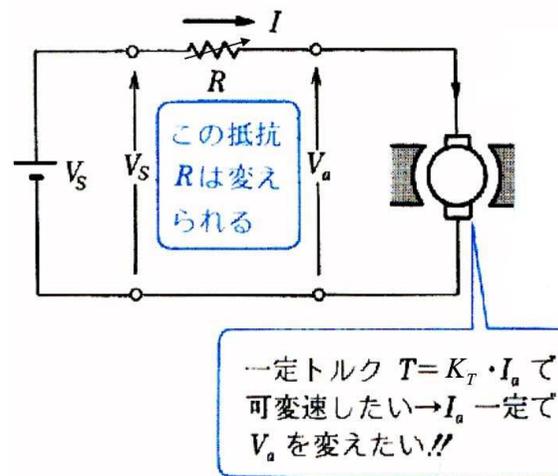
パワーエレクトロニクス

モータ速度  $\Omega_m \propto$  電機子端子電圧  $V_a$

## 1.7 ブラシ付きDCモータの速度制御

48

### 抵抗制御による電圧可変制御



電機子端子電圧は,

$$V_a = V_s - I \cdot R$$

$R = 0$  とすれば  $V_a = V_s$

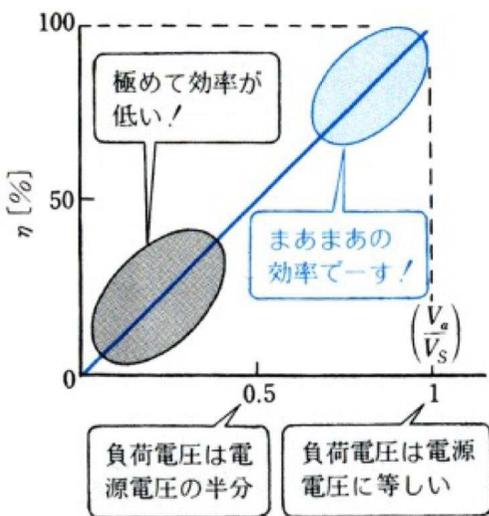
$R = V_s / I$  とすれば  $V_a = 0$



電圧を自在に可変

この場合の効率は?

抵抗制御による電圧可変制御



$$V_a = V_s - I \cdot R$$

電圧式両端に電流  $I$  を乗ると、

$$I \cdot V_a = I \cdot V_s - I^2 \cdot R$$

左辺  $I \cdot V_a$ : モータ出力

右辺  $I \cdot V_s$ : 電源入力

右辺  $I^2 \cdot R$ : 制御用抵抗での銅損

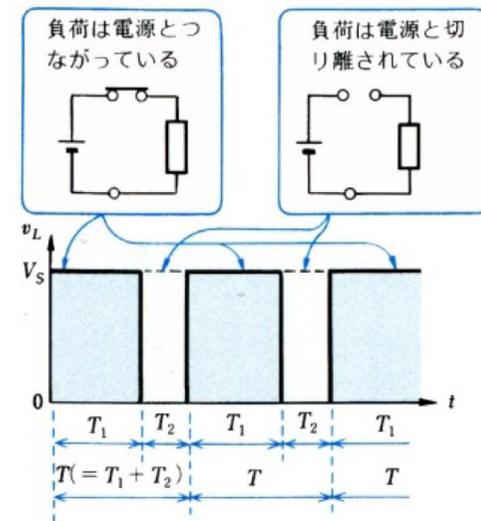
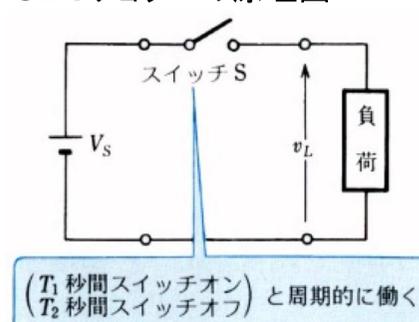
$$\text{入出力効率} \eta = \frac{\text{モータ出力}}{\text{電源入力}} \times 100[\%]$$

$$\eta = \left(1 - \frac{I \cdot R}{V_s}\right) \times 100[\%]$$

出典 「図解メカトロニクス入門シリーズ アクチュエータ入門」松井信行著 オーム社

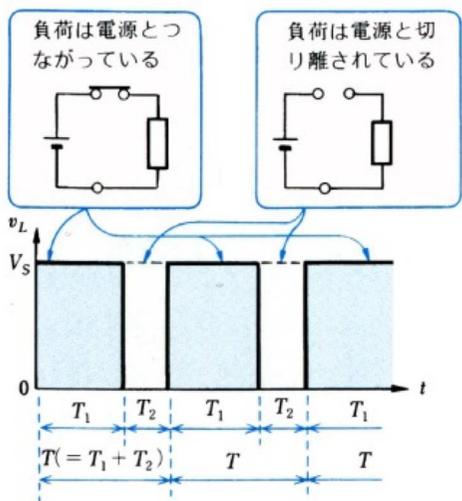
DCチョップによる電圧可変制御①

◎DCチョップの原理図



出典 「図解メカトロニクス入門シリーズアクチュエータ入門」松井信行著 オーム社

DCチョップによる電圧可変制御②



電圧波形の平均値

$$V_L = \frac{T_1}{T_1 + T_2} V_s = \frac{T_1}{T} V_s$$

$$\text{Duty Factor } \alpha = \frac{T_1}{T}$$

$T = T_1 + T_2$  一定下で、

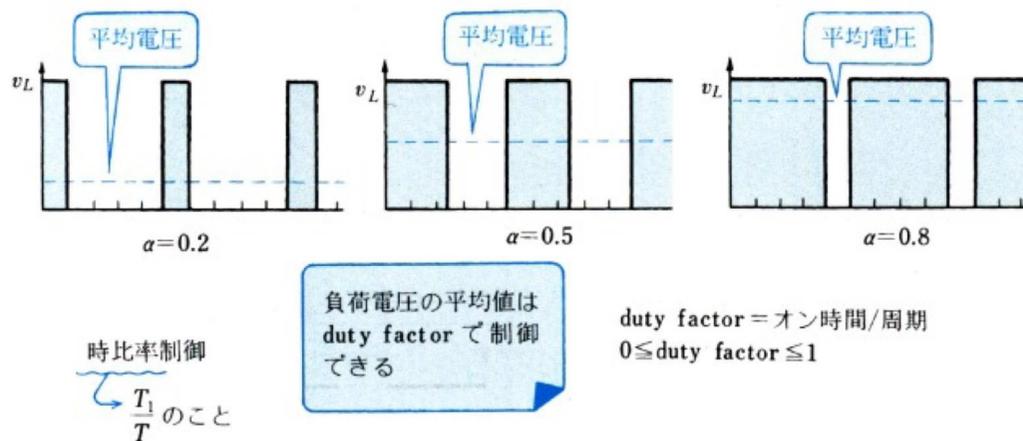
$T_1$  を  $0 \sim T$  まで可変

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

出典 「図解メカトロニクス入門シリーズアクチュエータ入門」松井信行著 オーム社

PWM(Pulse Width Modulation)制御

DCチョップによる電圧可変制御③

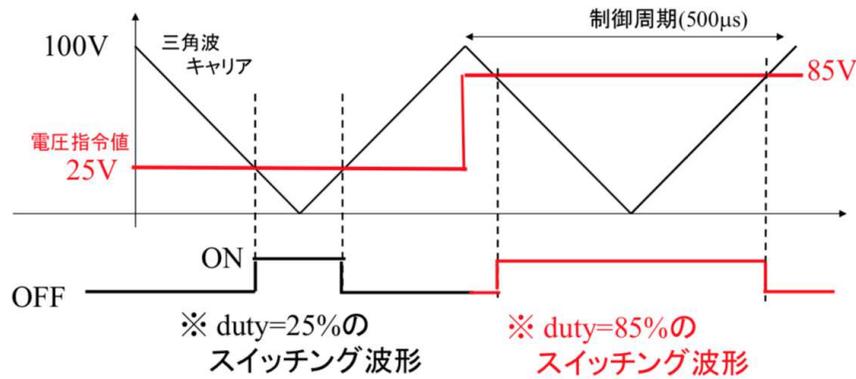


ON-OFFのスイッチングは数kHz～数十kHz(数百μsec～数十μsec)で行ないます。極めて短い時間のON-OFFですから、OFFの間もモータは慣性で廻り続けます。ですから、モータ回転がガタつくようなことはなく、滑らかに回転します。

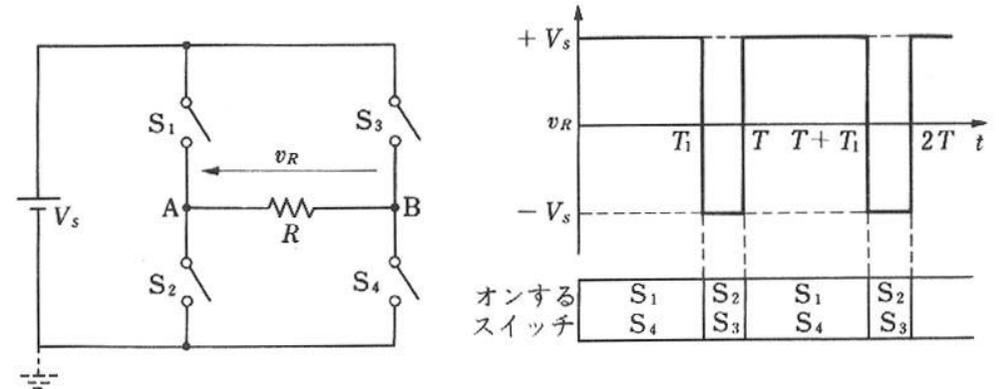
出典 「図解メカトロニクス入門シリーズ アクチュエータ入門」松井信行著 オーム社

PWMパタン生成法(三角波比較方式)

(プログラムの外部で)パルス波形の自動生成機能を追加する  
**三角波キャリア比較方式**  
 (ほとんどのパワエレ向けマイコンに Pulse Width Modulation 自動生成機能がある)



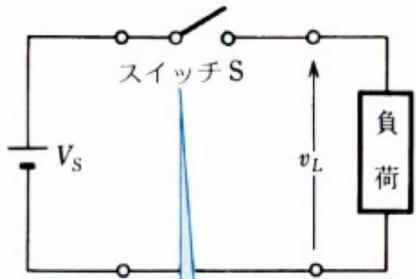
可逆運転に対して



$$V_R = (2\alpha - 1)V_S$$

出典「図解メカトロニクス入門シリーズ アクチュエータ入門」松井信行著 オーム社

DCチョッパ制御時の効率



( $T_1$  秒間スイッチオン)  
 ( $T_2$  秒間スイッチオフ) と周期的に働く

電源と負荷の間にはエネルギーを消費するものはなく、スイッチのみ

理想的には

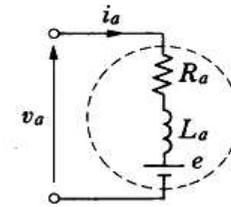
電力変換効率≒100%

厳密にはスイッチの入り切り動作に伴い、エネルギーロスが生じる

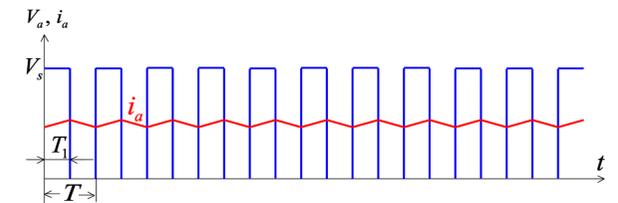
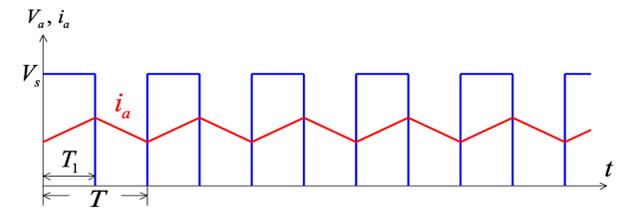
電力変換技術の使用上の注意点

現実のDCモータ用チョッパの問題

DCモータの電圧方程式  
 (電流過渡応答項を含む)



$$v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e$$



スイッチング周波数  $f_{sw} = \frac{1}{T}$  を上げると

電流脈動小=トルク脈動小

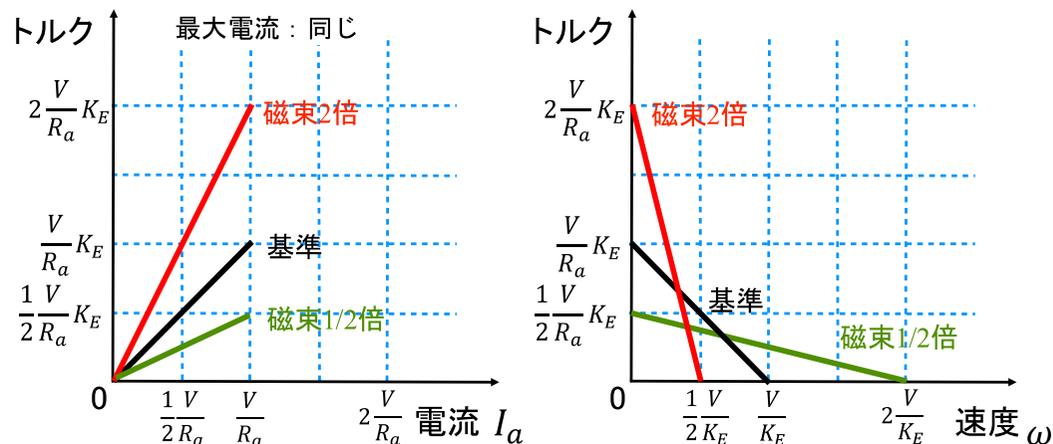
# アウトライン

## 1. ブラシ付きDCモータ

- 1.1 ブラシ付きDCモータの基本構成
- 1.2 ブラシ付きDCモータの動作原理
- 1.3 ブラシ付きDCモータの構造理解
- 休憩
- 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出
- 休憩
- 1.5 ブラシ付きDCモータのトルク発生原理
- 1.6 ブラシ付きDCモータ特性と速度制御
- 1.7 **ブラシ付きDCモータ特性の調整**
- 1.8 ブラシ付きDCモータの問題点
- 休憩

## 1.7 ブラシ付きDCモータ特性の調整

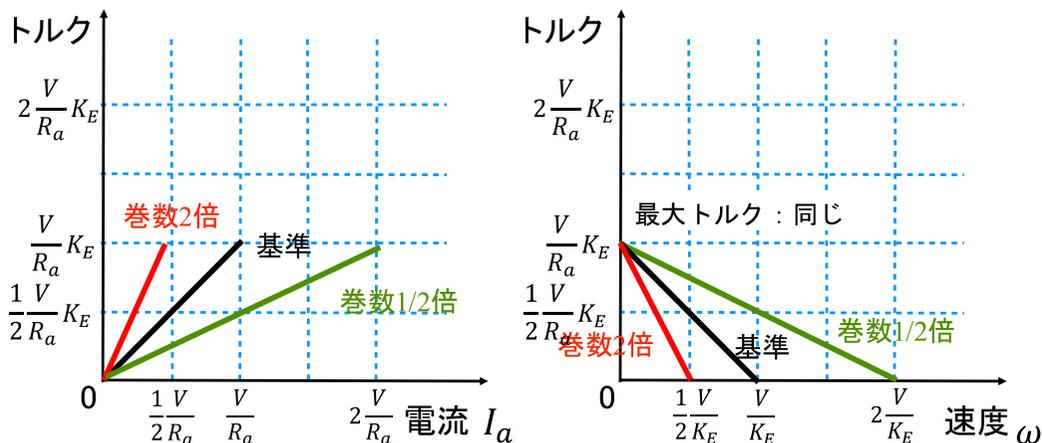
### ①磁石性能の変化



| 磁石磁束 | トルク定数   | トルク式             | 最大電流                  | トルクと速度の関係式   |
|------|---------|------------------|-----------------------|--|
| 2    | $2K_E$  | $T = 2K_E I_a$   | $I_a = \frac{V}{R_a}$ | $T = 2\frac{V}{R_a}K_E - 4\frac{K_E^2}{R_a}\omega$                     |
| 1    | $K_E$   | $T = K_E I_a$    |                       | $T = \frac{V}{R_a}K_E - \frac{K_E^2}{R_a}\omega$                       |
| 1/2  | $K_E/2$ | $T = (K_E/2)I_a$ |                       | $T = \frac{1}{2}\frac{V}{R_a}K_E - \frac{1}{4}\frac{K_E^2}{R_a}\omega$ |

## 1.7 ブラシ付きDCモータ特性の調整

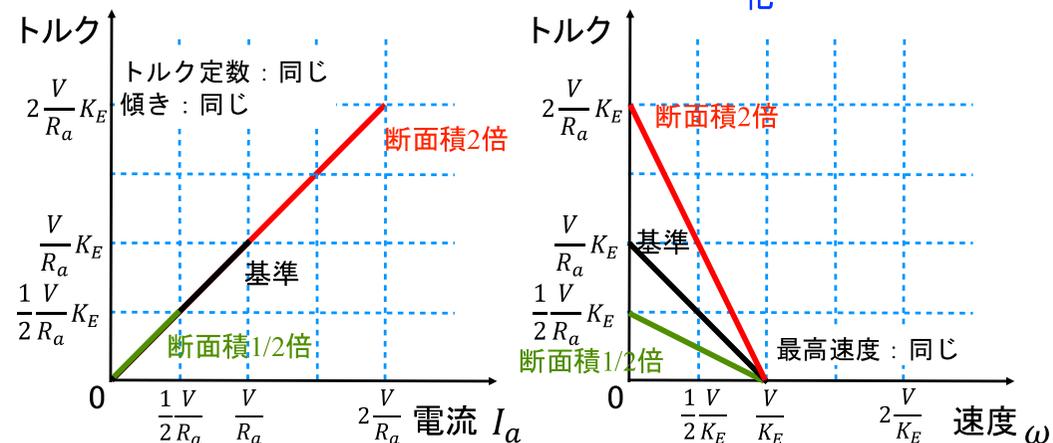
### ②巻数の変化



| 巻数  | トルク定数   | トルク式             | 最大電流                             | トルクと速度の関係式  |
|-----|---------|------------------|----------------------------------|---|
| 2   | $2K_E$  | $T = 2K_E I_a$   | $I_a = \frac{1}{2}\frac{V}{R_a}$ | $T = \frac{V}{R_a}K_E - 2\frac{K_E^2}{R_a}\omega$           |
| 1   | $K_E$   | $T = K_E I_a$    | $I_a = \frac{V}{R_a}$            | $T = \frac{V}{R_a}K_E - \frac{K_E^2}{R_a}\omega$            |
| 1/2 | $K_E/2$ | $T = (K_E/2)I_a$ | $I_a = 2\frac{V}{R_a}$           | $T = \frac{V}{R_a}K_E - \frac{1}{2}\frac{K_E^2}{R_a}\omega$ |

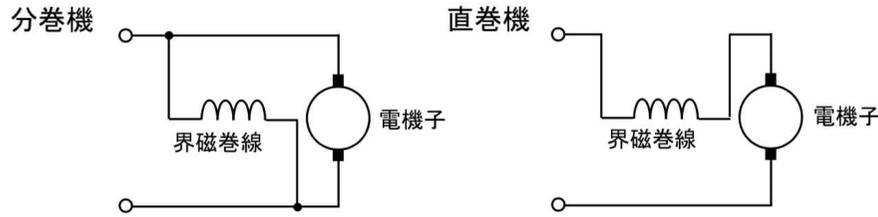
## 1.7 ブラシ付きDCモータ特性の調整

### ③巻線の断面積変化

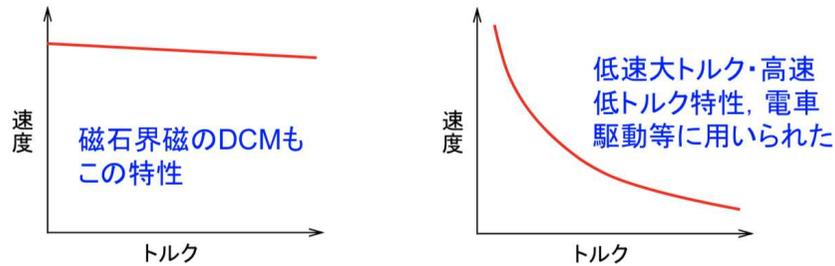


| 巻線断面積 | トルク定数 | トルク式          | 最大電流                             | トルクと速度の関係式   |
|-------|-------|---------------|----------------------------------|--|
| 2     | $K_E$ | $T = K_E I_a$ | $I_a = 2\frac{V}{R_a}$           | $T = 2\frac{V}{R_a}K_E - 2\frac{K_E^2}{R_a}\omega$                     |
| 1     |       |               | $I_a = \frac{V}{R_a}$            | $T = \frac{V}{R_a}K_E - \frac{K_E^2}{R_a}\omega$                       |
| 1/2   |       |               | $I_a = \frac{1}{2}\frac{V}{R_a}$ | $T = \frac{1}{2}\frac{V}{R_a}K_E - \frac{1}{2}\frac{K_E^2}{R_a}\omega$ |

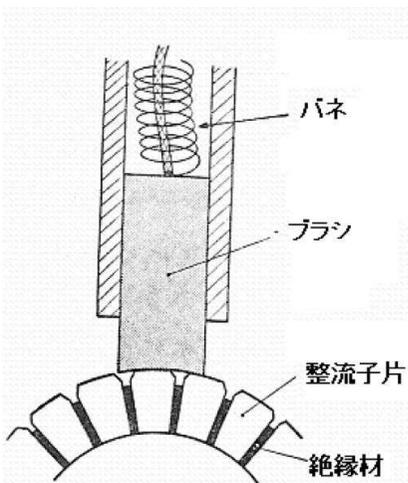
○代表的な構成と特性



定電圧での運転特性



1.8 ブラシ付きDCモータの問題点



■ブラシと整流子の機械的な構造の一例

ブラシと整流子のすり接触があるため、実用する際に次の点に注意する必要がある。

- ・ ブラシ及び整流子が摩耗する。
- ・ 火花が発生する。
- ・ ブラシと整流子に接触電位差が発生する。

1.8 ブラシ付きDCモータの問題点

アウトライン

1. ブラシ付きDCモータ

- 1.1 ブラシ付きDCモータの基本構成
- 1.2 ブラシ付きDCモータの動作原理
- 1.3 ブラシ付きDCモータの構造理解
- 1.4 実験によるDCモータの等価回路導出
- 1.5 ブラシ付きDCモータのトルク発生原理
- 1.6 ブラシ付きDCモータ特性と速度制御
- 1.7 ブラシ付きDCモータ特性の調整
- 1.8 **ブラシ付きDCモータの問題点**

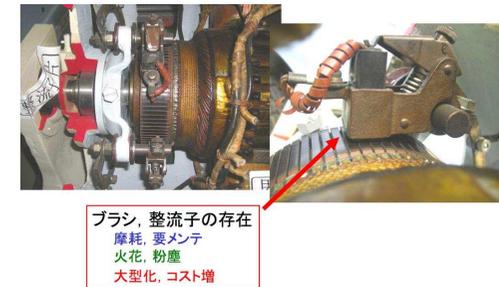
休憩

休憩

休憩

ブラシ付きDCモータ

- ・ 給電は直流給電
- ・ ブラシ・コミュテータの作用で交流電機子電流発生
- ・ 直流界磁と交流電機子電流によって持続的な回転トルクを発生



直流回路の機械的スイッチ ←機械的接触を持つブラシ・コミュテータ

- ・ 機械的磨耗→要メンテナンス
- ・ ブラシ粉末ごみ→食品機械などへの不適合
- ・ 火花の発生→誘爆性雰囲気への不適合(塗装ロボットなど)

ブラシ・コミュテータを持たないDCモータlikeなモータへの要求

- ・ DCモータlikeとは？
- ・ 電子的にブラシ・コミュテータ機能を果たす→**ブラシレスDCモータ**

## 2 ブラシレスDCモータ

DCモータのブラシと整流子の機能を電子回路に置き換えたモータ

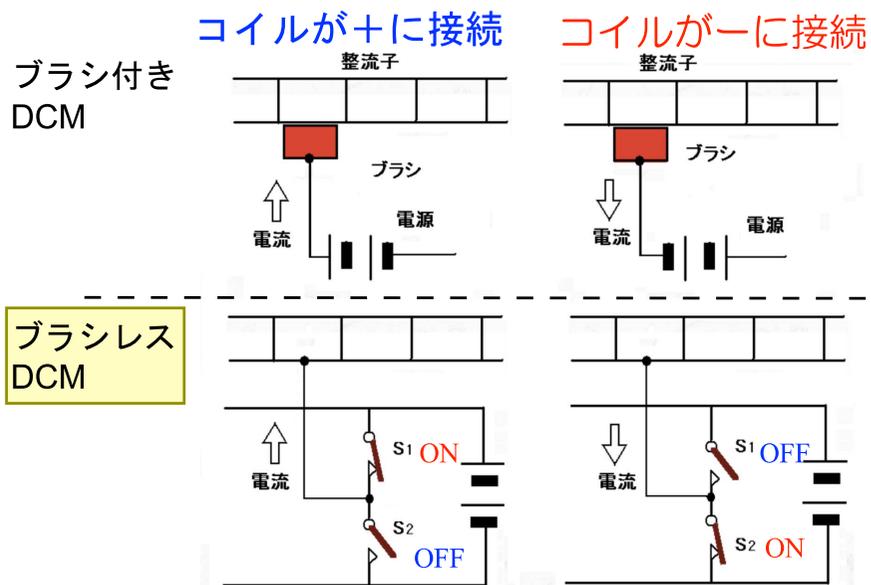
### アウトライン

#### 2. ブラシレスDCモータ

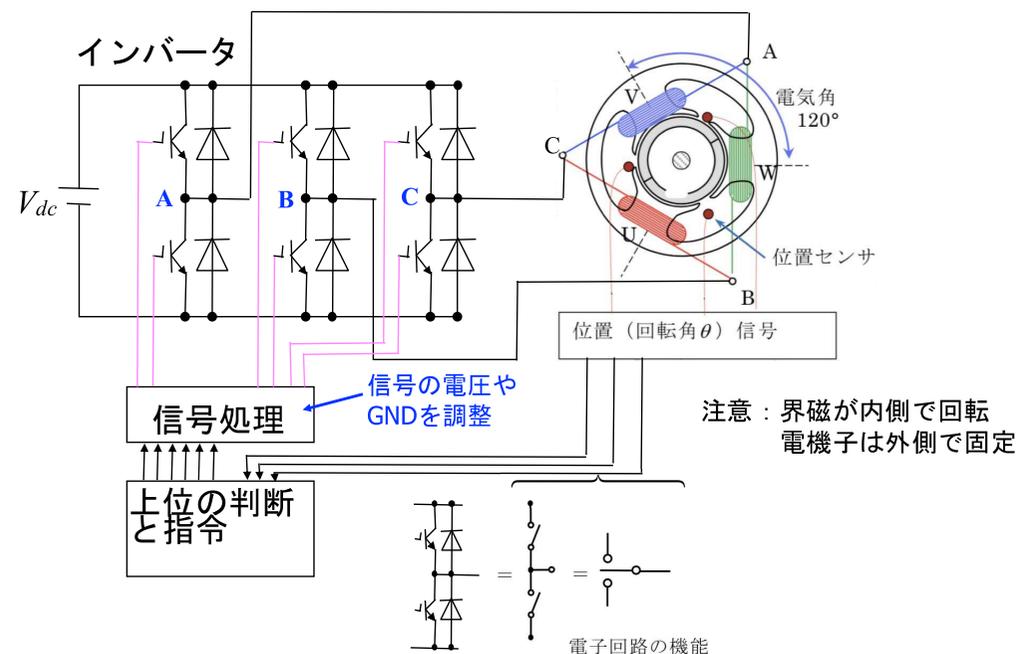
- 2.1 ブラシレスDCモータの動作原理
- 2.2 インバータのスイッチ動作
- 2.3 逆起電力波形と位置関係
- 2.4 ブラシレスDCモータの制御法と特性
- 2.5 ブラシレスDCモータのまとめ

### 2.1 ブラシレスモータの動作原理

整流作用のスイッチへの切替え

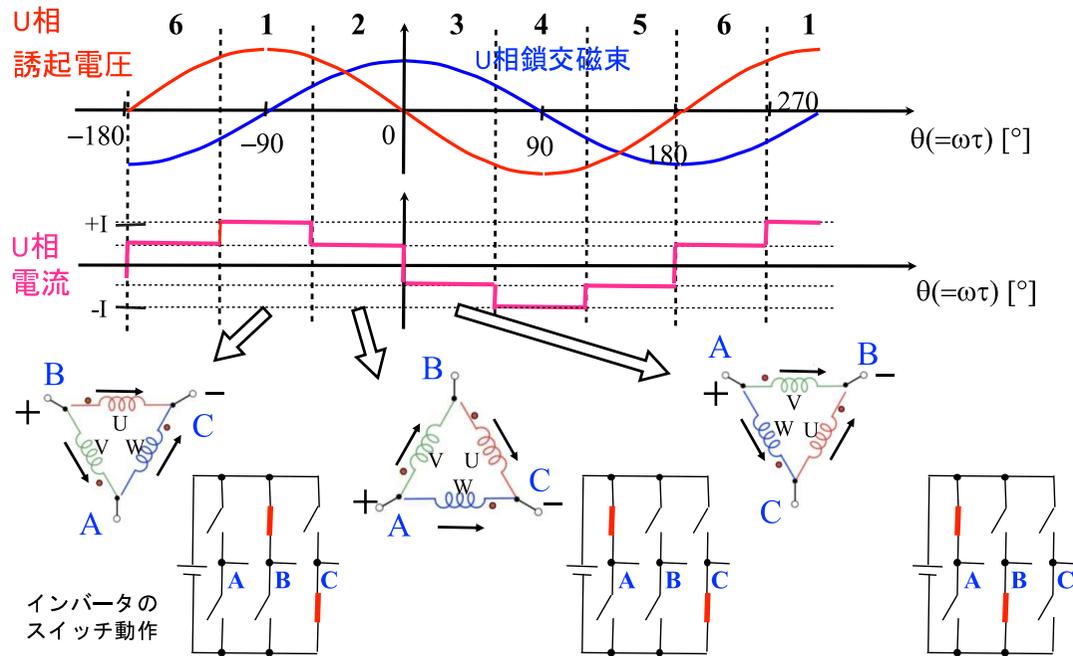


### 2.1 ブラシレスモータの動作原理：基本構造



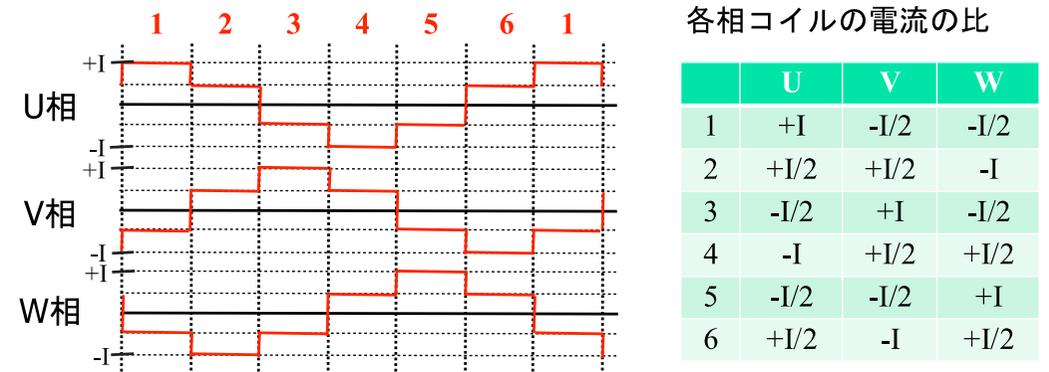
## 2.2 インバータのスイッチ動作

5



## 2.2 インバータのスイッチ動作と電流波形

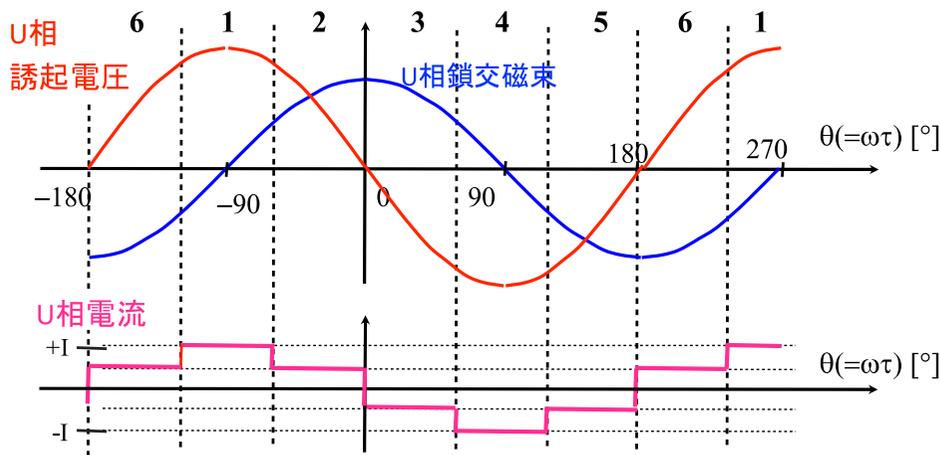
6



インバータのスイッチ動作により三相巻線に三相対称交流電流（基本波）が流れる

## 2.3 逆起電力波形と位置関係

7

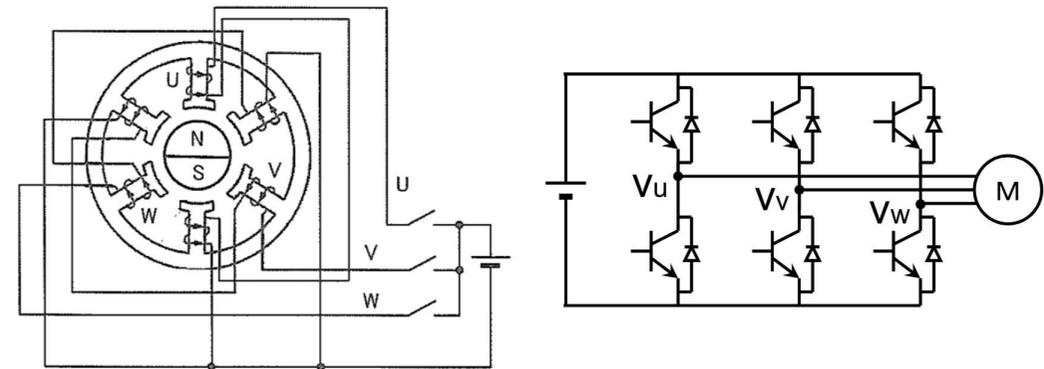


- ・ 逆起電力波形と位置関係：ブラシ付きDCモータと同じ
- ・ 回転子位置に対し逆起電力波形が  $-\sin\theta$  波形（基本波）となるように位置調整を行う。
- ・ 電流波形は逆起電力波形と同相に制御（電流波形の振幅でトルク制御）

## 2.4 ブラシレスDCモータの制御法と特性

8

三相ブラシレスDCモータ(スター結線の場合)

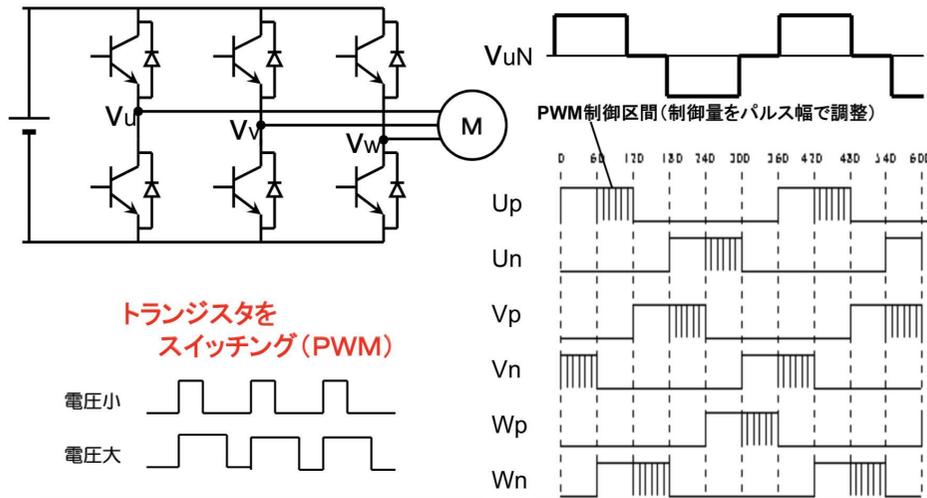


6つのトランジスタのスイッチングにより、三相交流を実現

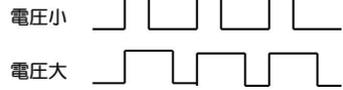
## 2.4 ブラシレスDCモータの制御法と特性

9

### PWMインバータ(矩形波駆動)



トランジスタを  
スイッチング(PWM)

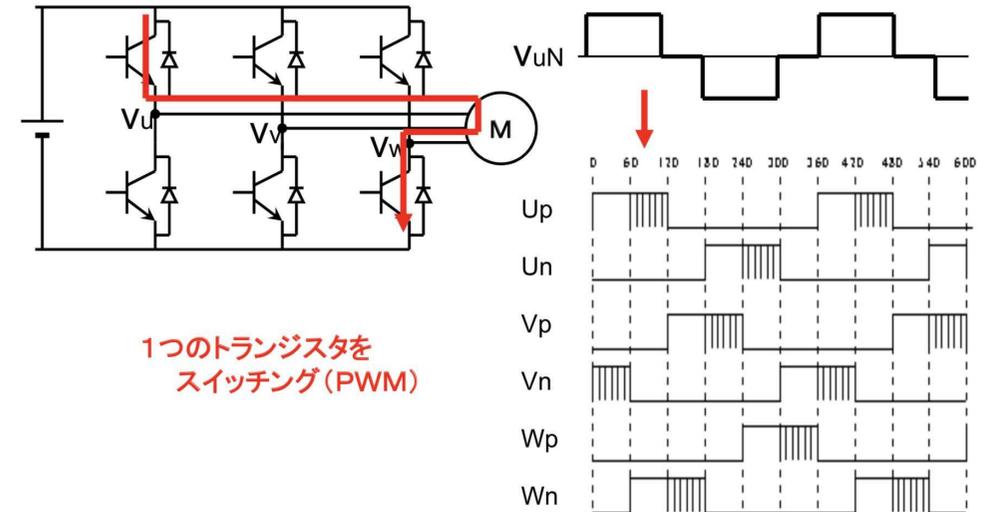


スイッチング量を変化させて電圧制御が可能

## 2.4 ブラシレスDCモータの制御法と特性

10

### PWMインバータ(矩形波駆動)



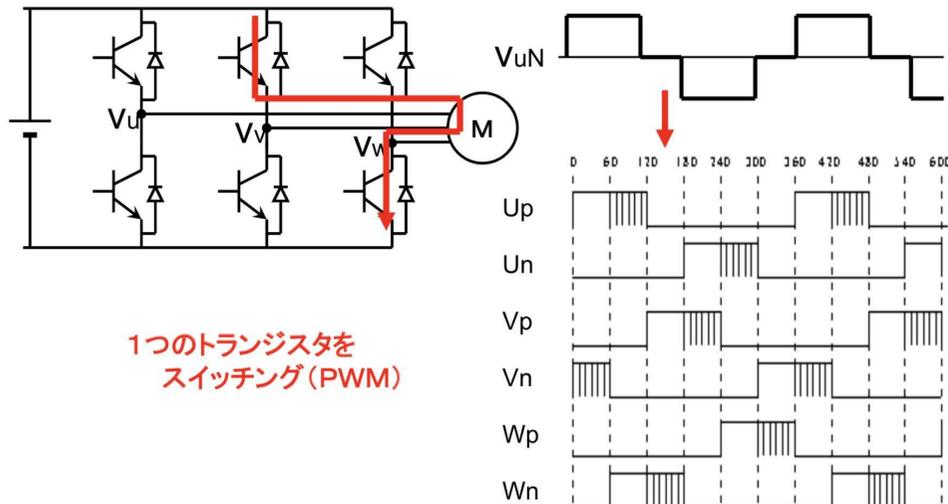
1つのトランジスタを  
スイッチング(PWM)

スイッチングする相を変化させて極性の切替が可能

## 2.4 ブラシレスDCモータの制御法と特性

11

### PWMインバータ(矩形波駆動)



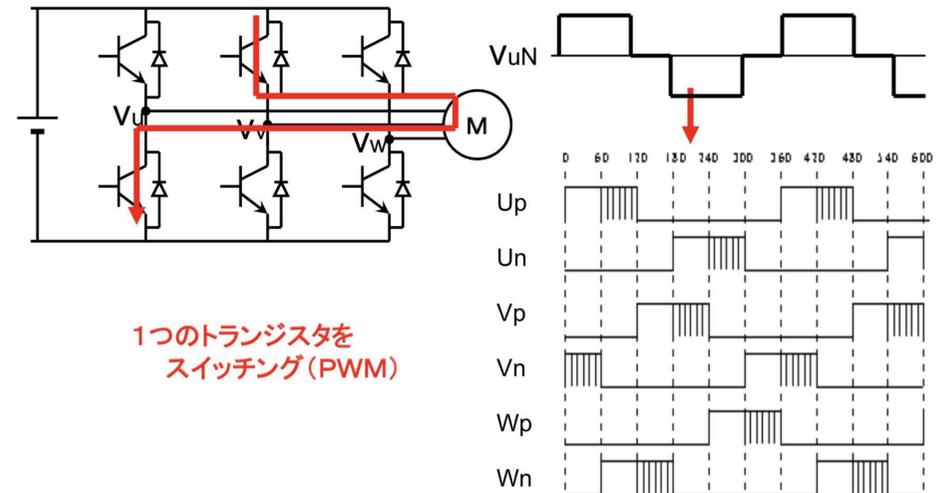
1つのトランジスタを  
スイッチング(PWM)

スイッチングする相を変化させて極性の切替が可能

## 2.4 ブラシレスDCモータの制御法と特性

12

### PWMインバータ(矩形波駆動)



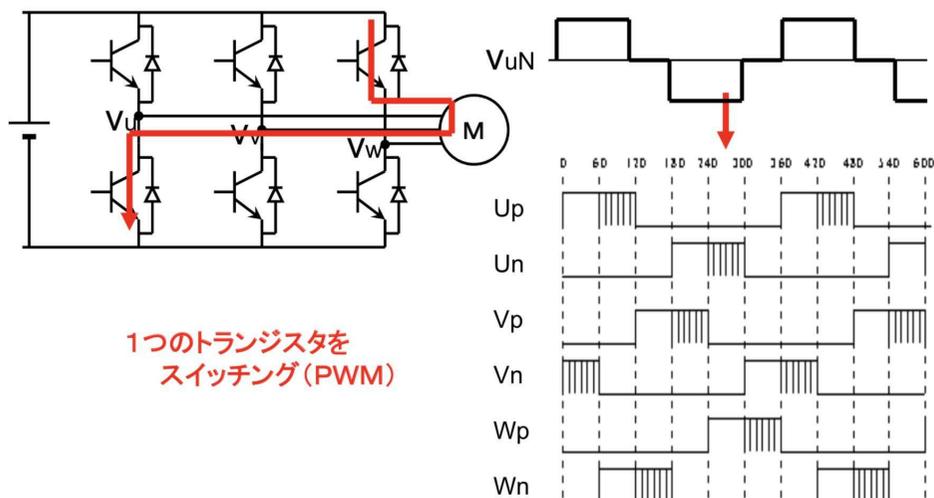
1つのトランジスタを  
スイッチング(PWM)

スイッチングする相を変化させて極性の切替が可能

## 2.4 ブラシレスDCモータの制御法と特性

13

### PWMインバータ(矩形波駆動)



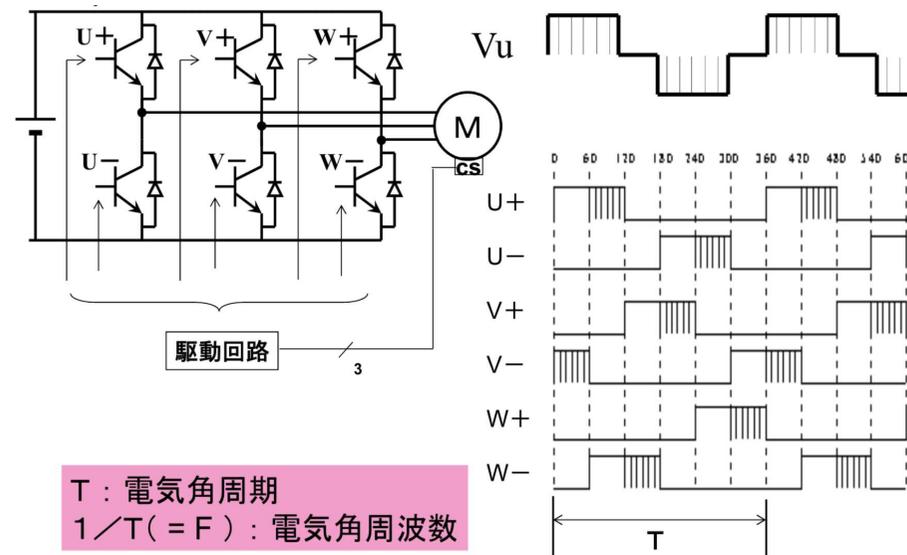
1つのトランジスタを  
スイッチング(PWM)

スイッチングする相を変化させて極性の切替が可能

## 2.4 ブラシレスDCモータの制御法と特性

14

### PWMインバータ(矩形波駆動)



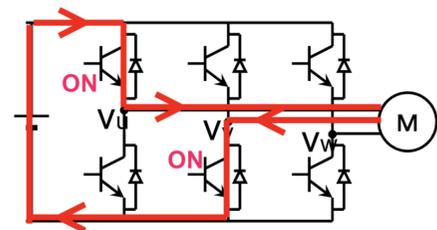
T : 電気角周期  
1/T (= F) : 電気角周波数

## 2.4 ブラシレスDCモータの制御法と特性

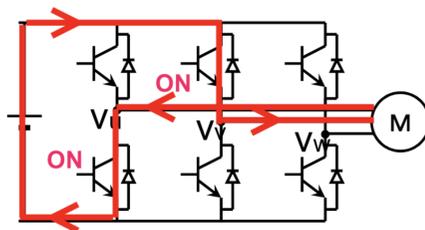
15

### フライホイールダイオードについて

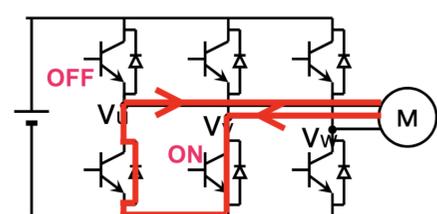
上側TrON時



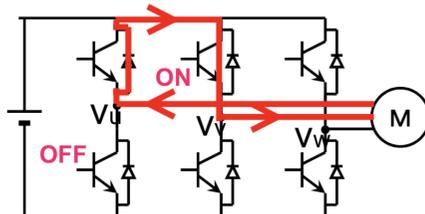
下側TrON時



上側TrOFF時



下側TrOFF時

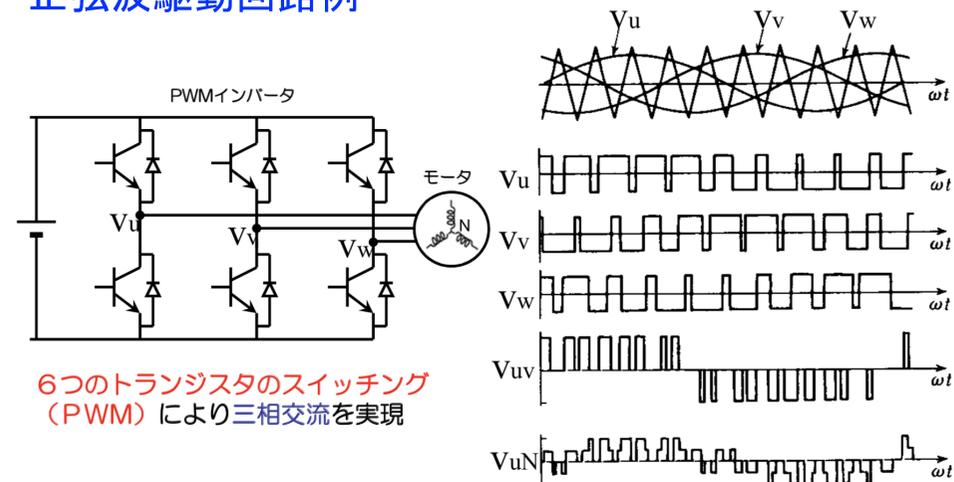


TrがOFFしても、モータ電流を連続に流すため、反スイッチング側のDiodeに電流を流す。

## 2.4 ブラシレスDCモータの制御法と特性

16

### 正弦波駆動回路例



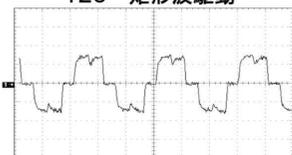
6つのトランジスタのスイッチング  
(PWM)により三相交流を実現

モータ駆動波形を正弦波状にすると共に  
その振幅、周波数、位相を制御

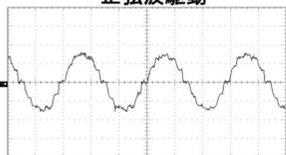
### 正弦波駆動波形例

#### ◆ 空調ファン用

120° 矩形波駆動

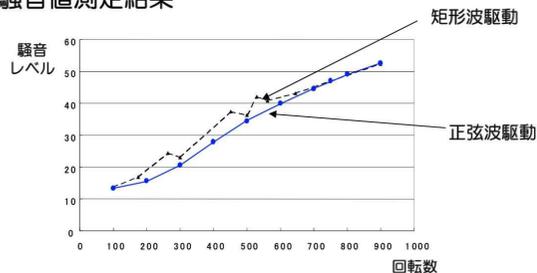


正弦波駆動



- ・5~10dBの低騒音化
- ・防振構造削減が可能

#### ◆ 騒音値測定結果



### ブラシ付きDCモータとブラシレスDCモータの比較

| 項目         | 直流電動機                             | ブラシレスDCモータ                           |
|------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 構造         | 界磁が固定子で、電機子が回転子 (電流による発熱は主として回転子) | 界磁が回転子で電機子が固定子 (電流による発熱は固定子側で冷却に適合)  |
| 特長         | 応答性、制御性に優れる                       | メンテナンスフリー、高速運転 (応答性、制御性、トルク脈動等は技術課題) |
| 転流         | 機械的なブラシ-コミュテータ                    | トランジスタ等の半導体スイッチによる電子式コミュテータ          |
| 位置検出<br>逆転 | ブラシ-コミュテータにより自動的<br>電機子電圧極性       | 位置検出器が必ず必要<br>スイッチングシーケンス            |

### ブラシレスDCモータ

- ・電源: 直流, インバータで巻線に方形波交流を給電。
- ・インバータは電子式ブラシ-コミュテータ
- ・回転子位置に応じた電氣的制御のために位置検出器が必須

### 直流機likeを担保

- ・1/6周期毎に直流起電力と電流による電機子動力を機械的動力に変換。
- ・トルクと電流の線形性が確立
- ・回転数: 周波数比例。鉄心中磁束一定なら周波数と電圧は比例

### トルクの平滑さ(トルク脈動)

- ・1/6周期間におけるトルク脈動は電流の平滑さに依存
- ・電流制御有り無し、有りの場合のチョッピング法が重要
- ・相電流の切替え時の電流過渡現象によるトルク脈動抑制が課題