

# アクチュエーターとシステム1

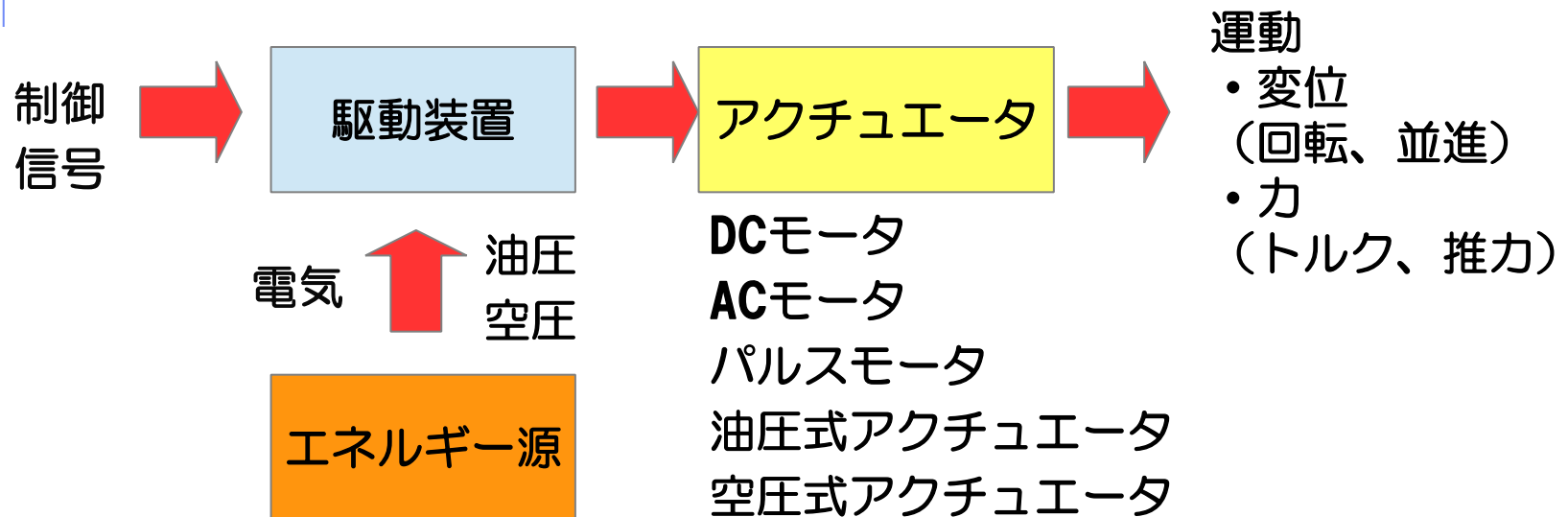
下条誠\*

\*電気通信大学

# アクチュエータとは？

英】 actuator

もともとは、「動作させるもの」という意味  
入力されたエネルギーを物理的な運動へと変換  
一般的には、電気エネルギーを運動に変換する装置



# 動作、運動の種類

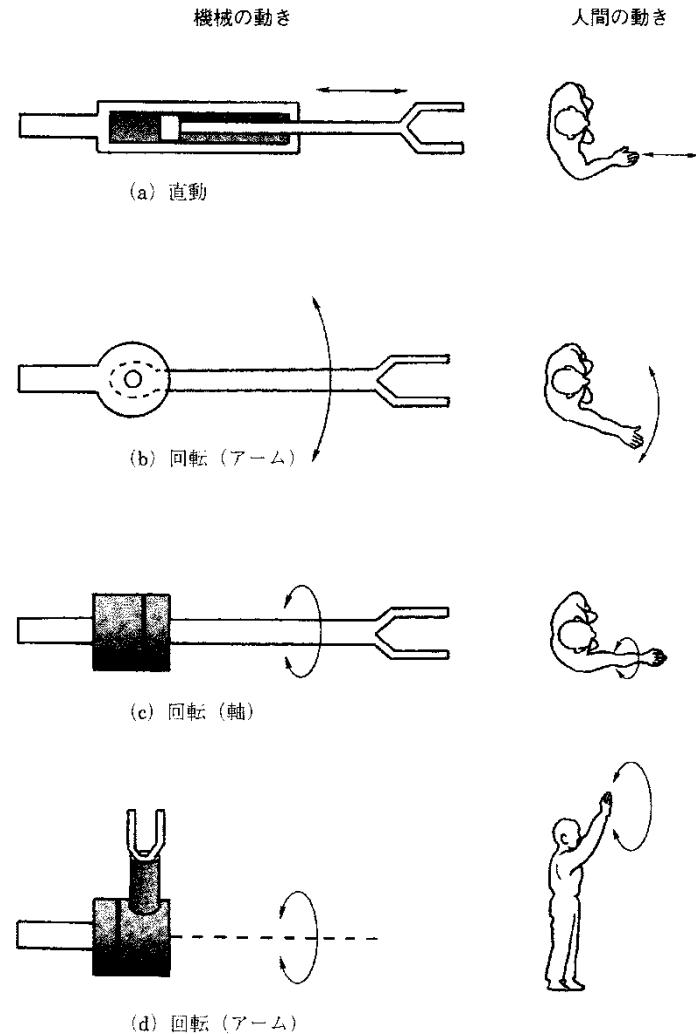
## 運動の基本：回転と直動

### 回転(角度)

- ✓ モータ
- ✓ ロータリーソレノイド

### 直動(変位)

- ✓ リニアモータ
- ✓ 圧電素子
- ✓ 油空圧アクチュエータ

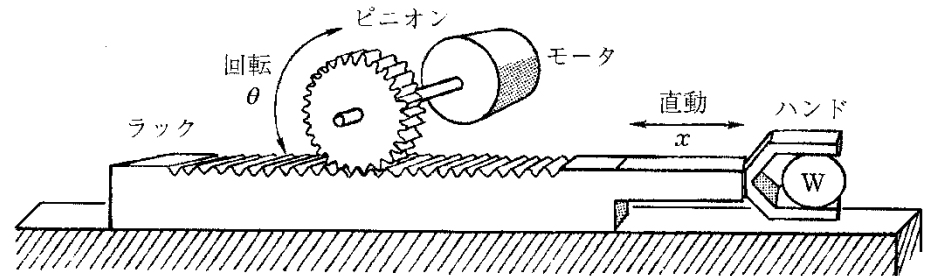
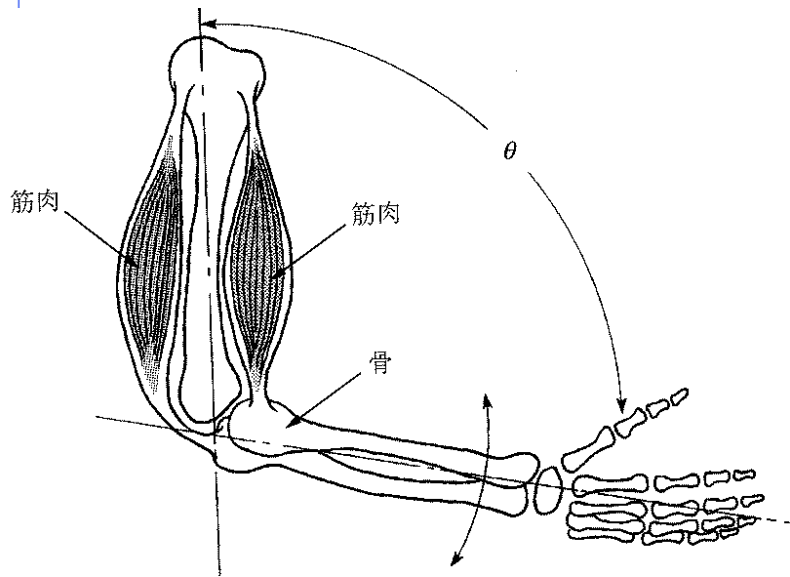


**機構（メカニズム）でそれぞれの運動を変換可能**

# 運動の変換

筋肉(アクチュエータ)の  
伸縮(直動)→関節の回転

モータ(アクチュエータ)の  
回転→シリンダの直動



# 回転型のアクチュエータの種類

## ■ 電動モータ（電動機）

- ✓ DCモータ
- ✓ DCブラシレス
- ✓ ACモータ
- ✓ ステッピングモータ
- ✓ ダイレクトドライブ



## ■ 超音波モータ

## ■ 油圧モータ

## ■ 静電モータ



# (電動)モータの種類

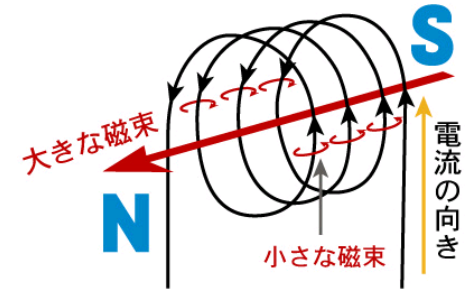
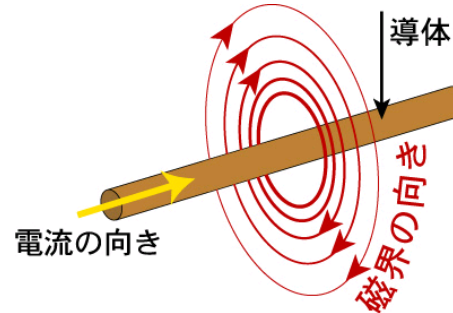
DC (直流) 電源	ブラシ付き	永久磁石界磁型	スロット型
			スロットレス型
		コアレス型	
	ブラシなし	電磁石界磁型	直巻き
			分巻き
			複巻き
AC (交流) 電源	誘導(インダクション)モータ	かご型	
		巻き線型	
	同期(シンクロナス)モータ	PM型	
		リラクタンス型	
		巻き線型	
		ヒステリシス型	

**電動モータのほとんどは、高速回転（数千rpm）、低トルクである。このため負荷を駆動するには減速機を使い、減速して、トルクをかせぐ**

# モータに関わる基本原理

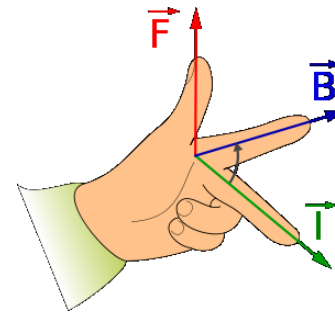
## アンペールの法則

導体に電流を流すと、右ねじを回す方向に磁界が発生



## フレミング左手の法則

$I$  (電流) は、  
 $B$  (磁界) の中で  
 $F$  (力) を受ける



## モータのポイント

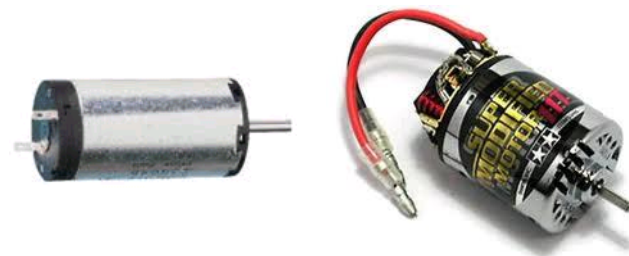
- 磁界の手段 : 永久磁石 or コイル (電磁石)
- 磁界の与え方 : 直流 or 交流
- 基本要素 : ロータ (回転子) or ステータ (固定子)

# DCモータ

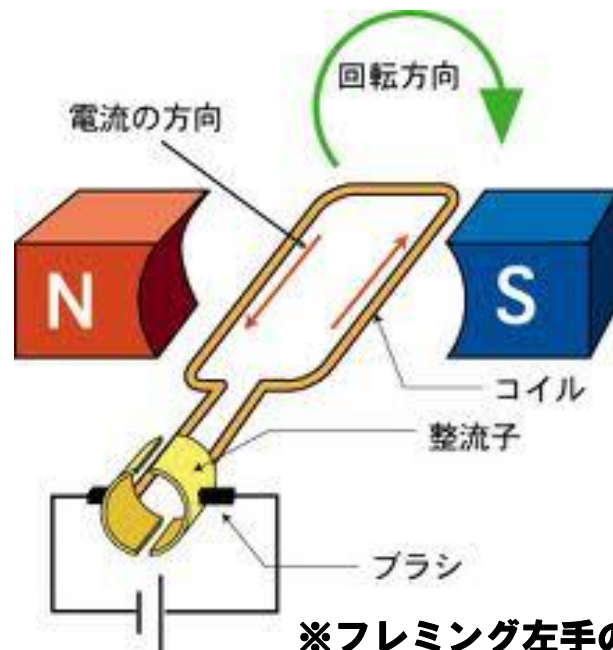
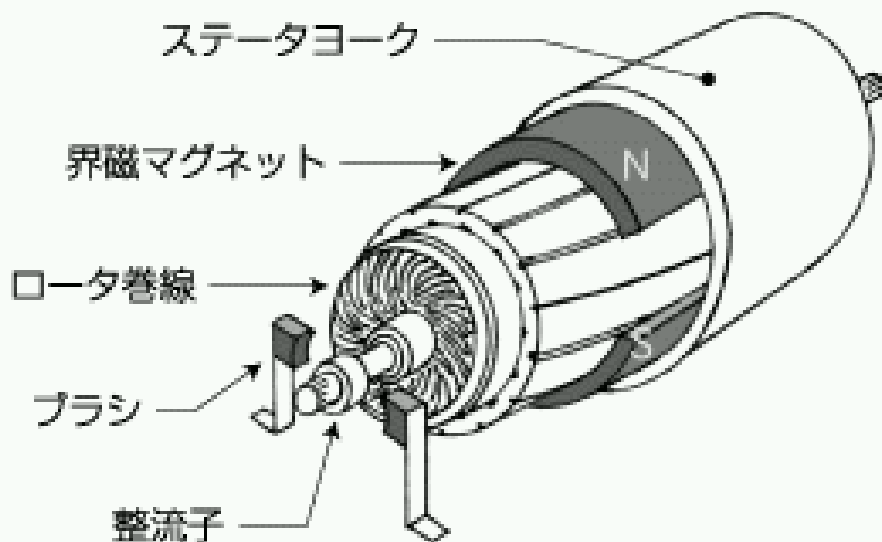
直流電源（電池など）で回せるモータ

- ・ロータ（回転子） : コイル
- ・ステータ（固定子） : 永久磁石

電機子に流れる電流の向きを切り替えることで磁力の反発、吸引の力で回転力を生成させる



〈整流子型DCモータ〉



※フレミング左手の法則



# DCモータの特徴

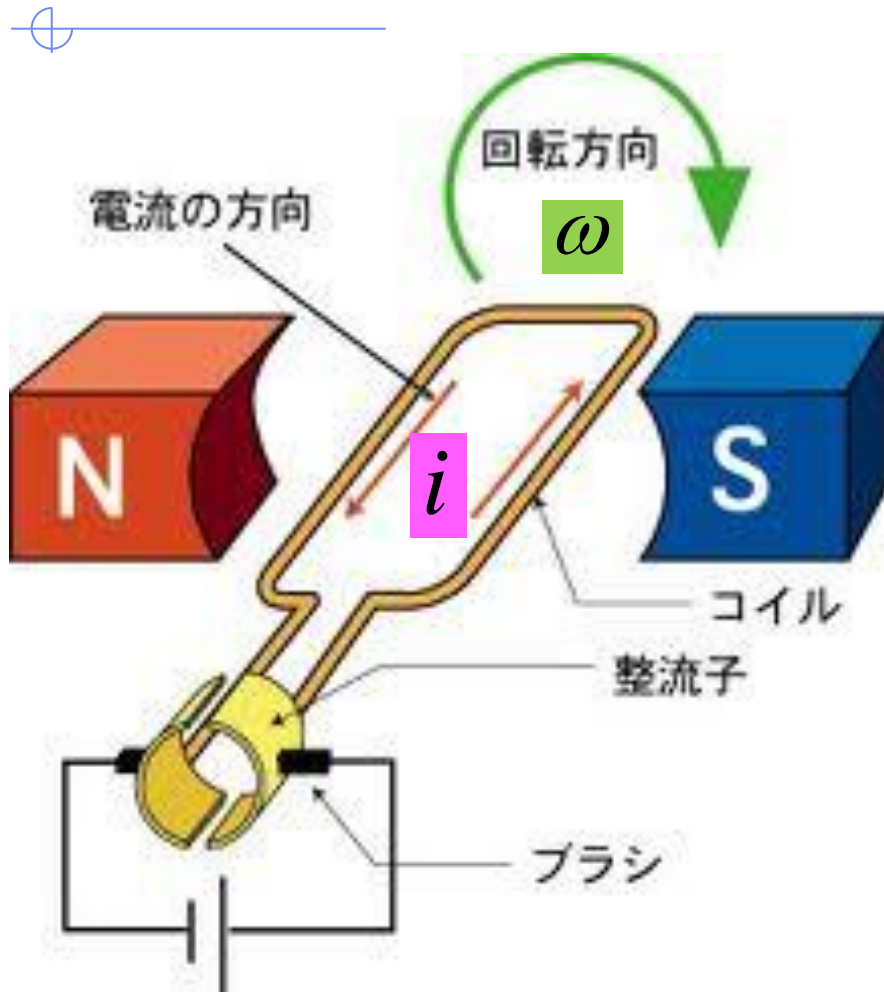
## ■長所

- ✓ 低価格（おもちゃ、ラジコン、ミニ四駆・・・）
- ✓ 小型軽量
- ✓ バッテリ駆動容易
- ✓ 電流とトルクが比例し制御容易
- ✓ 制御回路が簡単
- ✓ 回転方向が簡単に換えられる

## ■短所

- ✓ 接触部分（ブラシ）がある→**寿命**、ノイズ（火花）

# DCモータの基本方程式1/5



## (1) モータの働き

発生トルクと電流:

$$\tau = K_T i \cdots (1)$$

## (2) 発電機の働き

回転角速度と逆起電力:

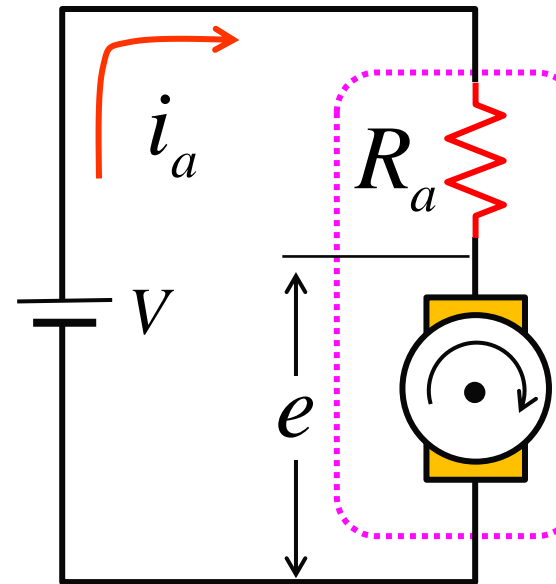
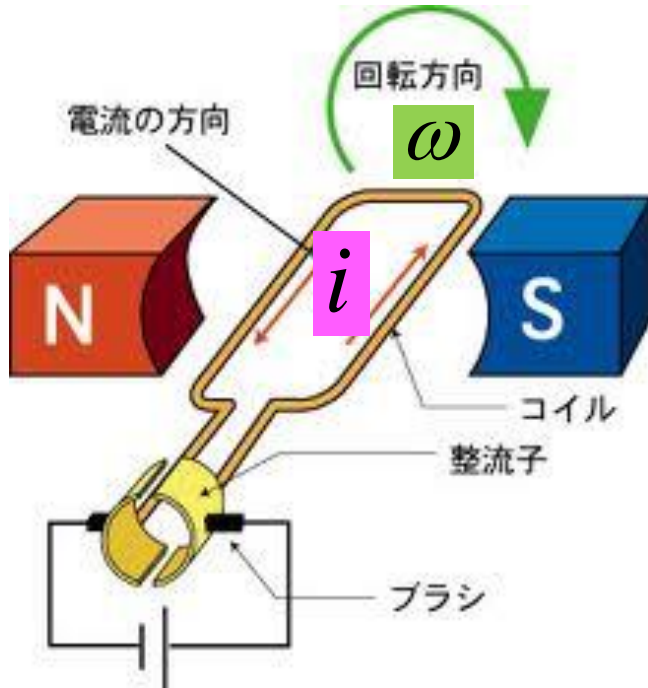
$$e = K_E \omega \cdots (2)$$

通常:  $K_T = K_E \equiv K$

# DCモータの基本方程式2/5

$$\tau = K_T i \cdots (1)$$

$$e = K_E \omega \cdots (2)$$



巻線抵抗:  $R_a$

電流:  $i$

逆起電力:  $e$

トルク:  $\tau$

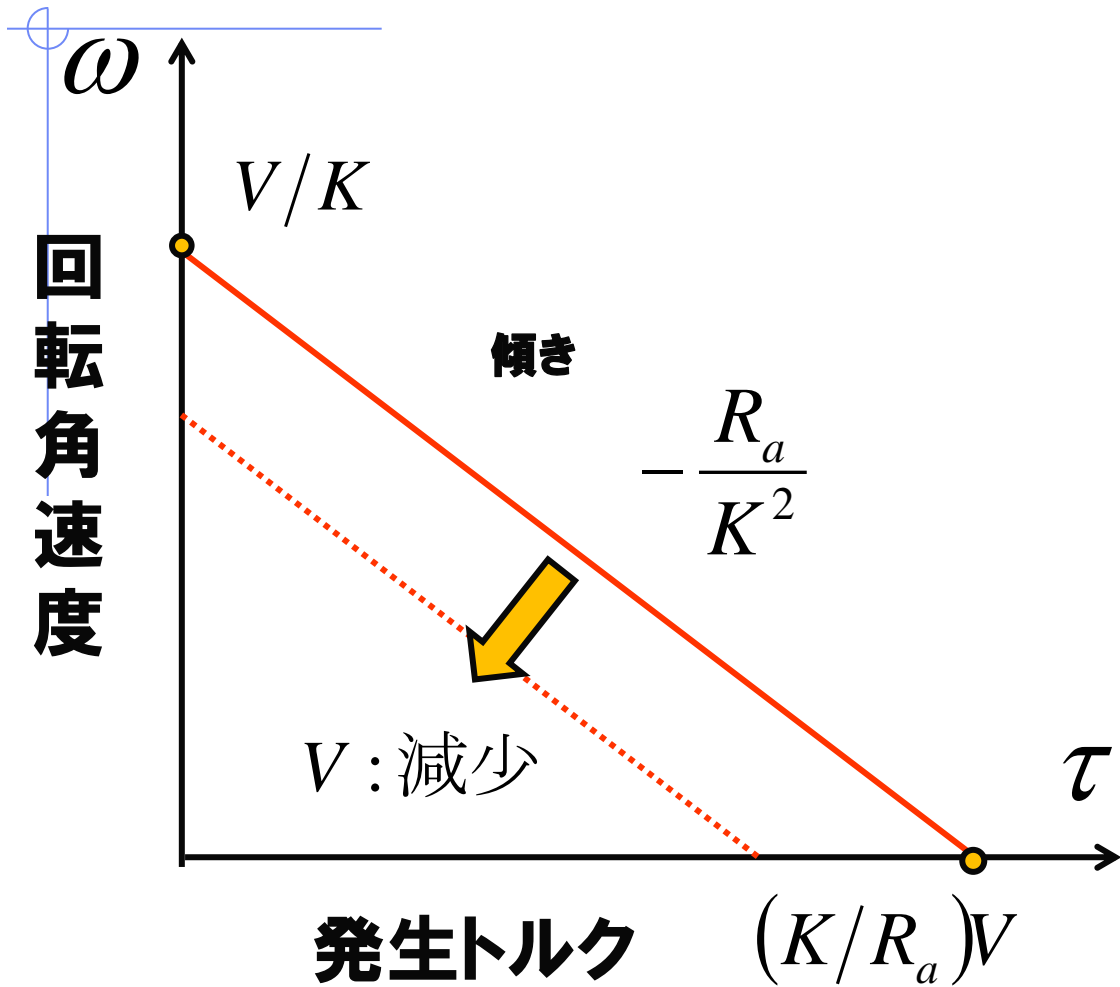
角速度:  $\omega$

DCモータ

回路の方程式:

$$V = R_a i + e(\omega) \cdots (3)$$

# DCモータの基本方程式3/5



直流モータのトルク・回転速度特性

(1),(2),(3)から

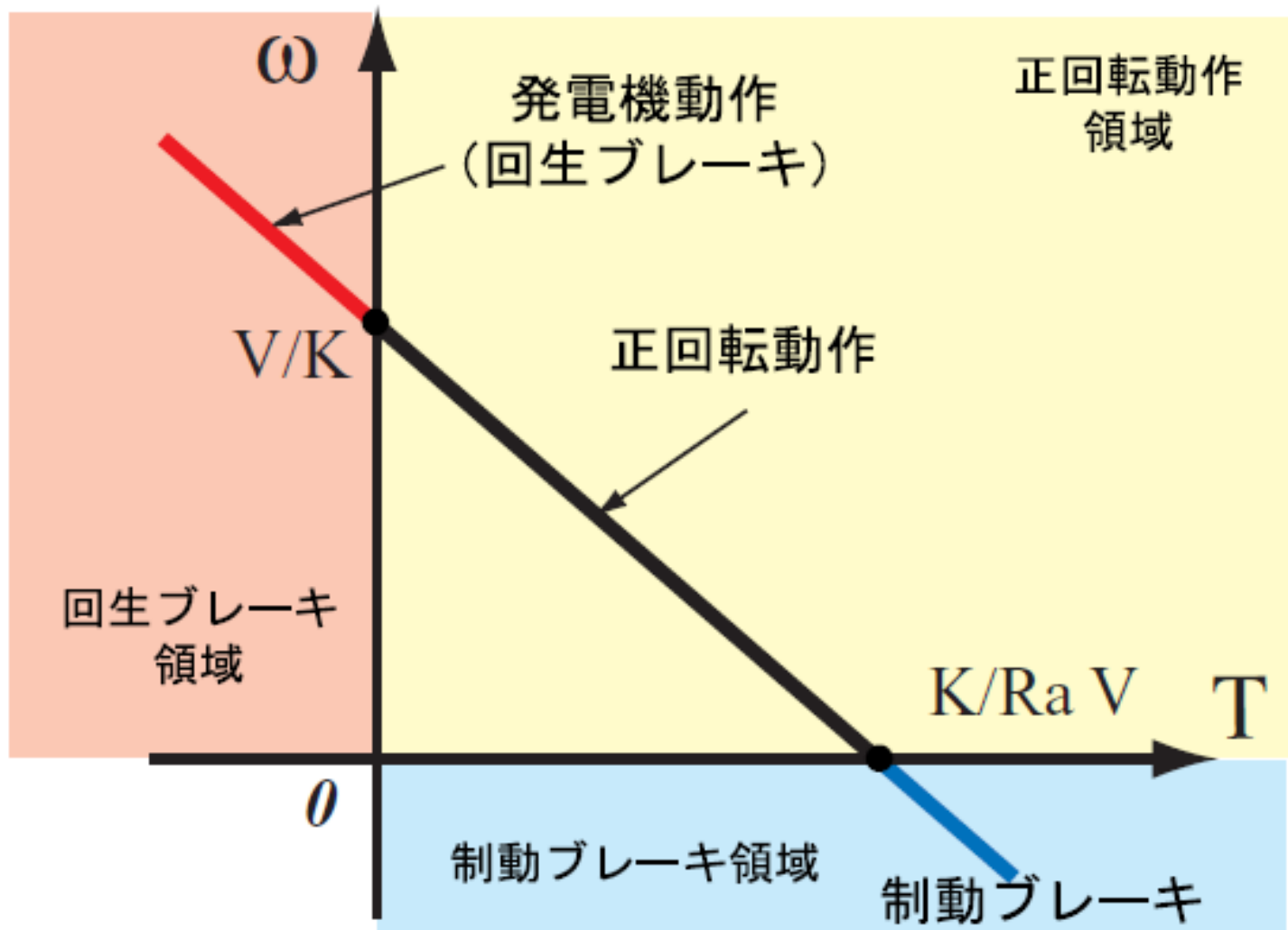
$$\begin{aligned} V &= R_a i + e(\omega) \\ &= R_a i + K_E \omega \\ &= R_a \frac{\tau}{K_T} + K_E \omega \end{aligned}$$



$$\omega = \frac{V}{K_E} - \frac{R_a}{K_E K_T} \tau$$

$$\omega = \frac{V}{K} - \frac{R_a}{K^2} \tau$$

# DCモータの基本方程式4/5



直流モータの特性(回生ブレーキと制動ブレーキ)

# DCモータの基本方程式5/5

$$\omega = \frac{V}{K} - \frac{R_a}{K^2} \tau$$

**モータの出力:**

$$P = \tau \omega = \tau \left( \frac{V}{K} - \frac{R_a}{K^2} \tau \right) \quad \Rightarrow \quad P = \frac{V}{K} \tau - \frac{R_a}{K^2} \tau^2 \quad (\text{2次曲線})$$

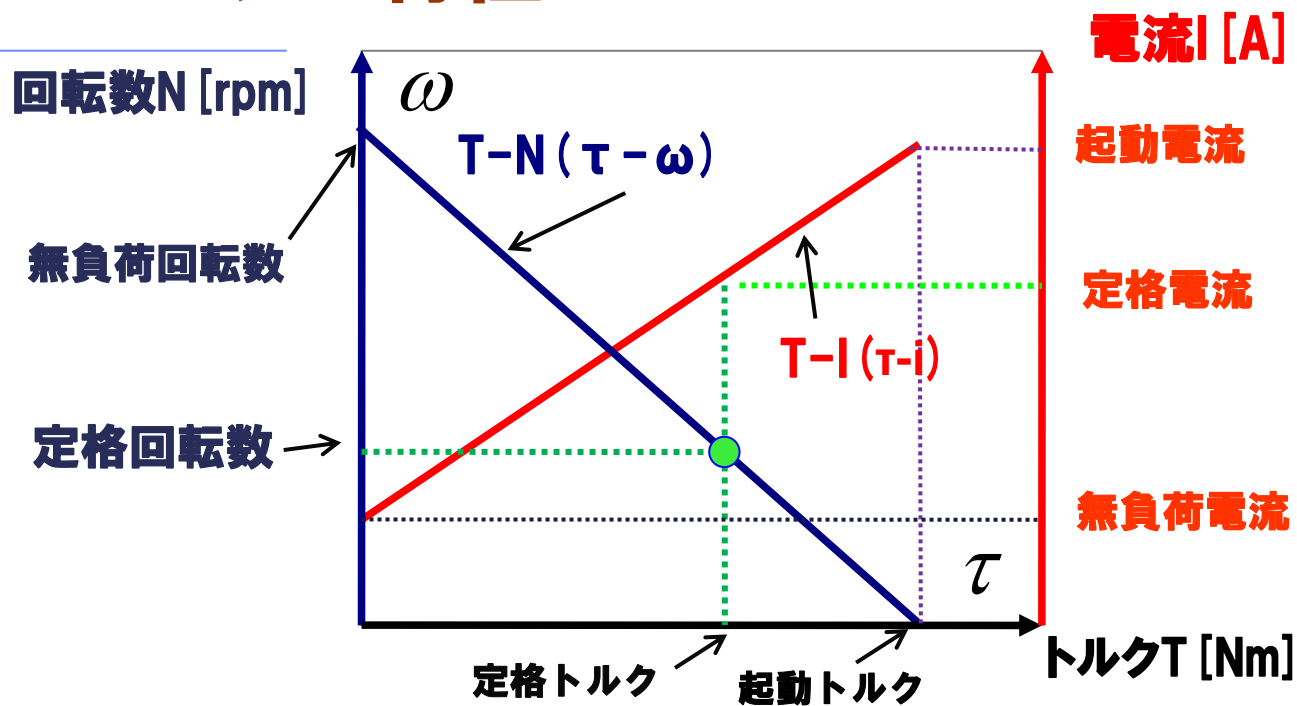
**出力の最大値を与えるトルクは:**

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{V}{K} - 2 \left( \frac{R_a}{K^2} \tau \right) \quad \Rightarrow \quad \tau_{\max} = \frac{1}{2} \left( \frac{K}{R_a} \right) \tau \quad \omega_{\max} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{K} \right) V$$

**出力の最大値:**

$$P_{\max} = \tau_{\max} \omega_{\max} = \frac{1}{4} \left( \frac{1}{R_a} \right) V^2$$

# DCモータの特性

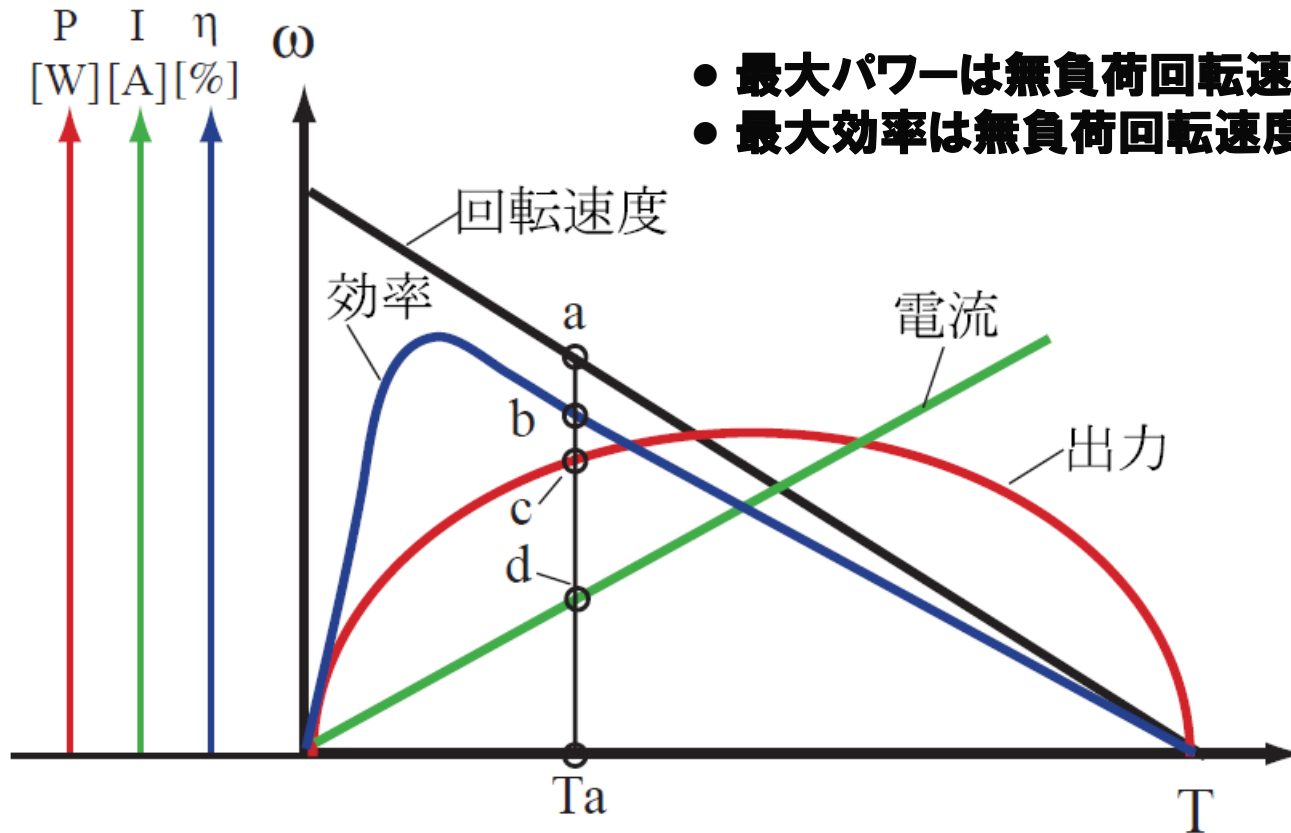


- **起動(始動)トルク** : モータが起動の瞬間に出すトルク
- **起動電流** : 起動時に流れる電流
- **定格トルク** : 連続的に定格の出力を出すときのトルク
- **定格電流** : 定格出力時に流れる電流
- **定格回転数** : モータが定格出力を出すときの回転速度
- **無負荷回転数** : 負荷がかかっていないときの回転速度
- **無負荷電流** : 負荷がかかっていないときに流れる電流

# モータ効率

モータのエネルギー  
損失

1. 回転子が空気から受ける流体抵抗による損失(風損)
2. ブラシや軸受けでの摩擦による損失(機械損)
3. 回転子の鉄心内でのウズ電流損失(鉄損)

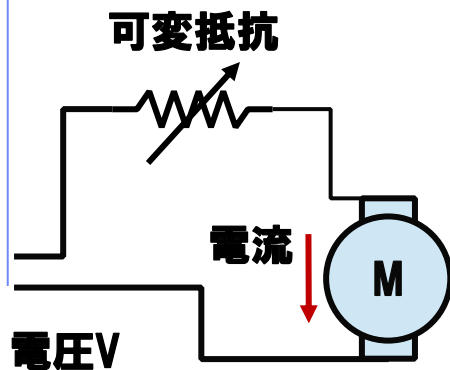


- 最大パワーは無負荷回転速度の半分
- 最大効率は無負荷回転速度の7~8割



# DCモータの駆動方法（速度変更）

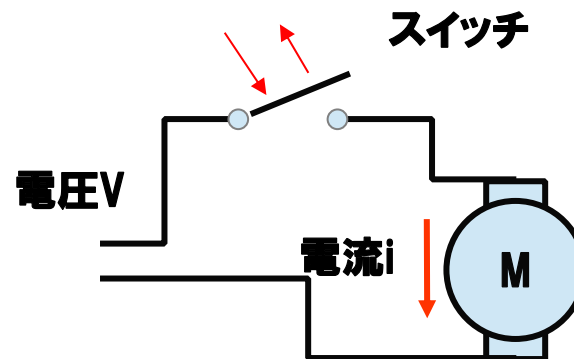
## 1. リニア制御



### 可変抵抗で電圧制御

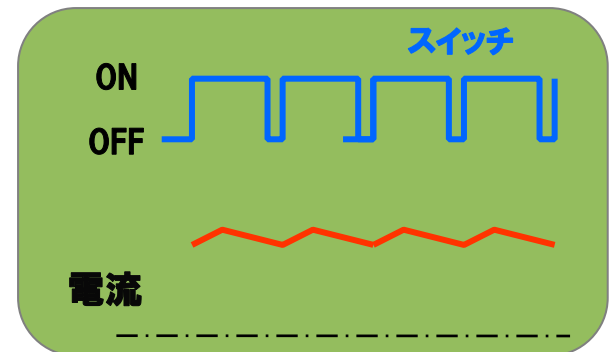
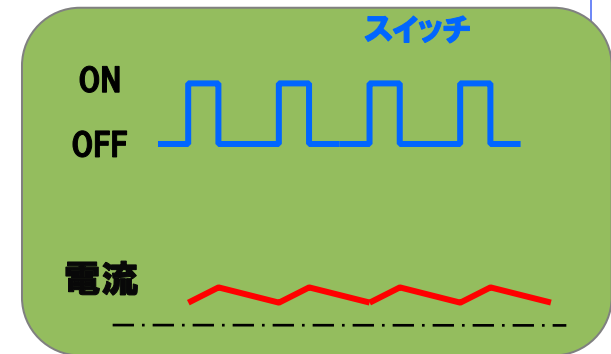
- 抵抗部での熱損失
- 可変抵抗としてトランジスタを利用

## 2. PWM制御（Pulse width modulation）

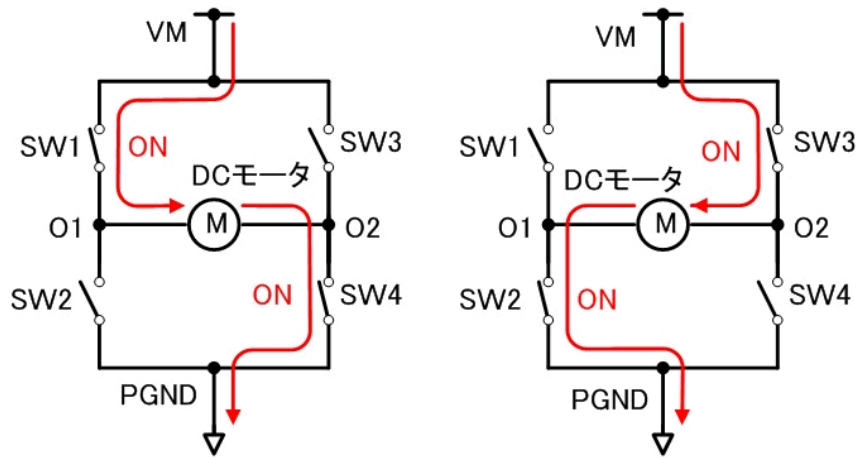


### 高速にスイッチング

- Onの時だけ電流を流す
- 実際は、スイッチの代わりにトランジスタやFETを使用
- マイコンなどの指令信号を増幅してスイッチング

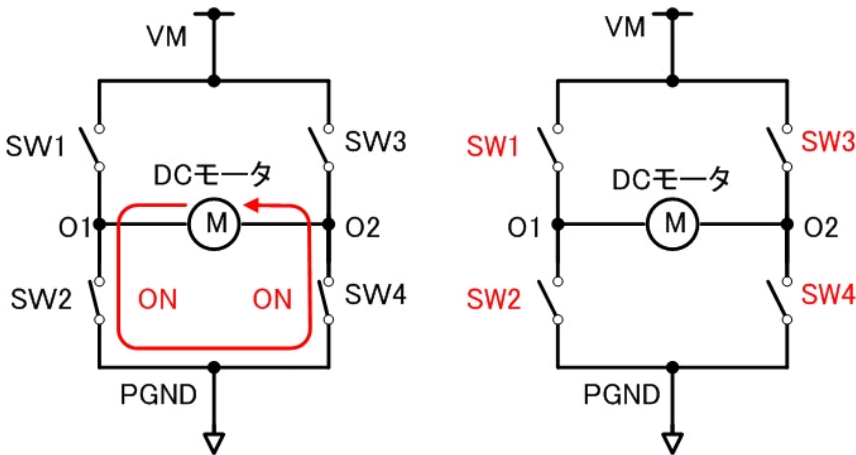


# DCモータの駆動方法



(a) 正転モード

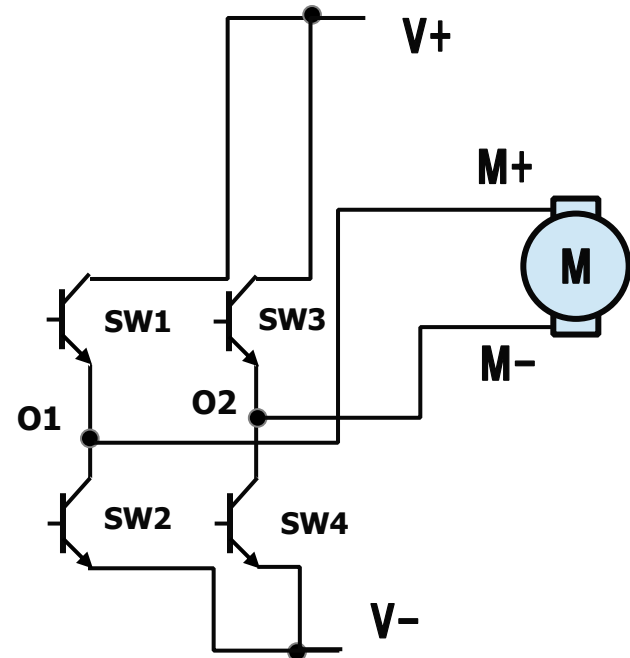
(b) 逆転モード



(c) ショートブレーキ・モード

(d) ストップ・モード

**Hブリッジ**  
 スwitchの切り替え方によってモータの両端にかかる電圧の向きを変える



具体的回路

# DCサーボモータ

**DCモータ + 位置・速度検出器 = DCサーボモータ**

物体の位置、方位、姿勢などを制御量として、目標値に追従するように自動で作動する仕組み

- ✓ 位置（回転角度）を測る → ロータリーエンコーダ
- ✓ 回転速度を測る → タコジェネレータ

ビデオdvMoter

サーボ (Servo) の語源はラテン語の "servus" (英語の slave・servant の意)

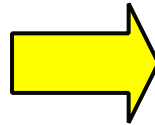
DCサーボモータは、広く産業界で使われている。

ブラシに起因する、**寿命、ノイズ**をなんとかしたい

◆ DCモータ

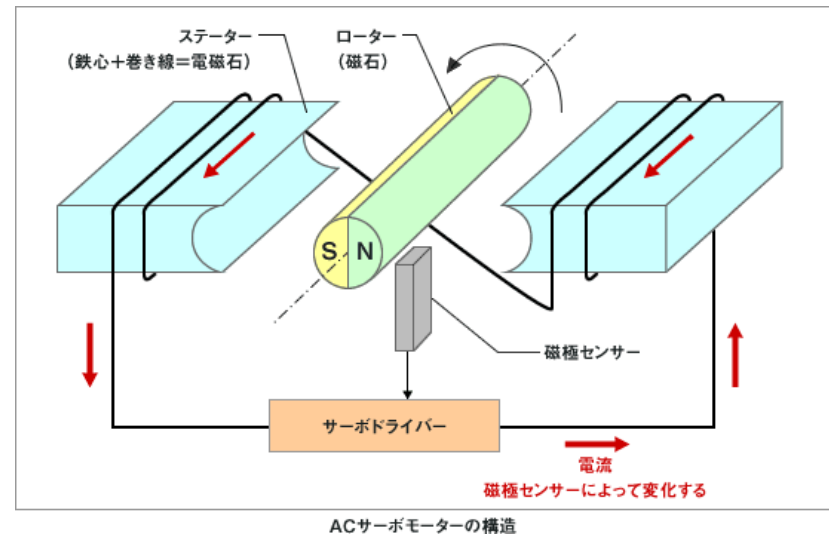
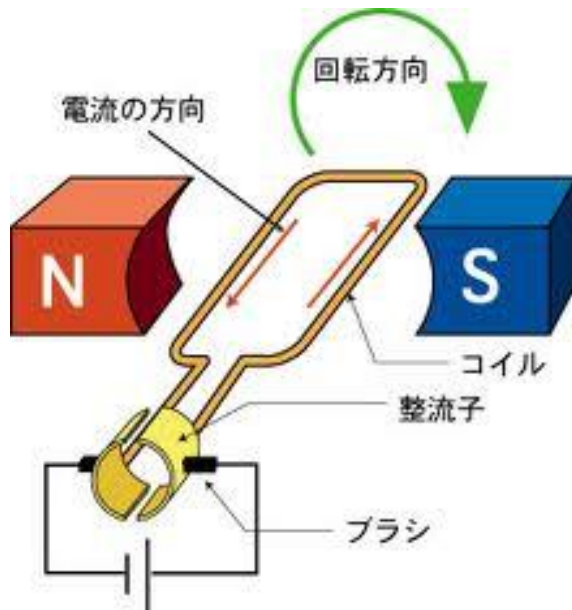
- ✓ 回転子: コイル
- ✓ 固定子: 永久磁石

ブラシが不要になる



◆ ブラシレスDCモータ

- ◆ ACモータ
- ✓ 回転子: 永久磁石
- ✓ 固定子: コイル



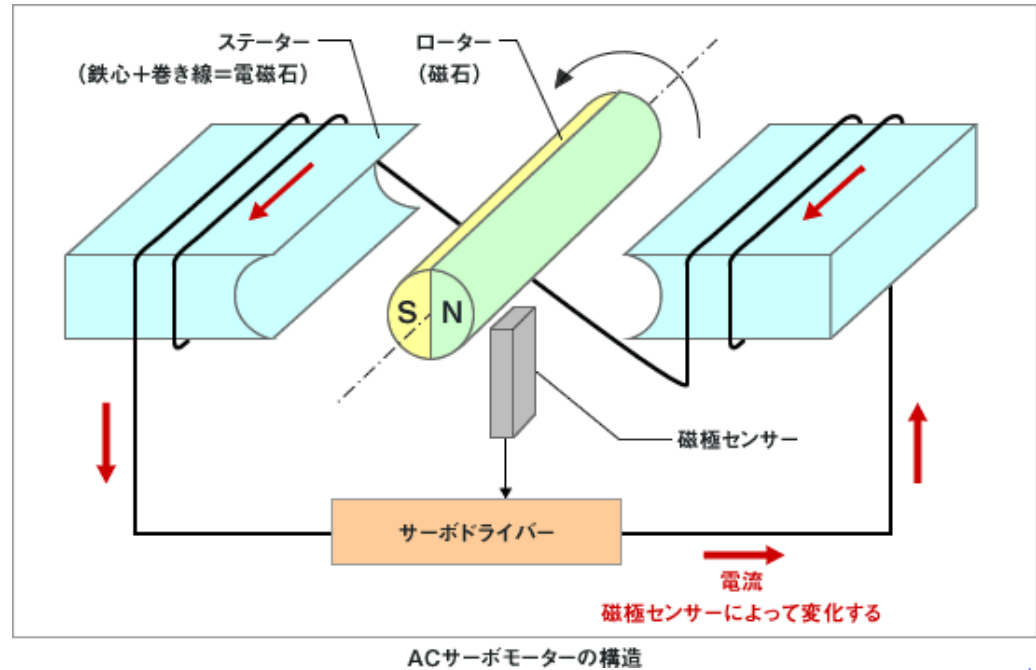
ACサーボモータの構造

# ACモータ

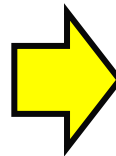
- ◆ ACモータ
- ✓ 回転子: 永久磁石
- ✓ 固定子: コイル



DCモータと比べ  
磁石とコイルの関係  
が逆



固定子コイルによって  
回転する磁界を発生



回転する磁界につら  
れて永久磁石が回転

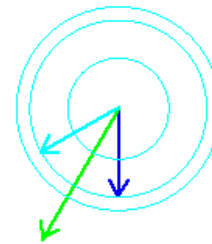
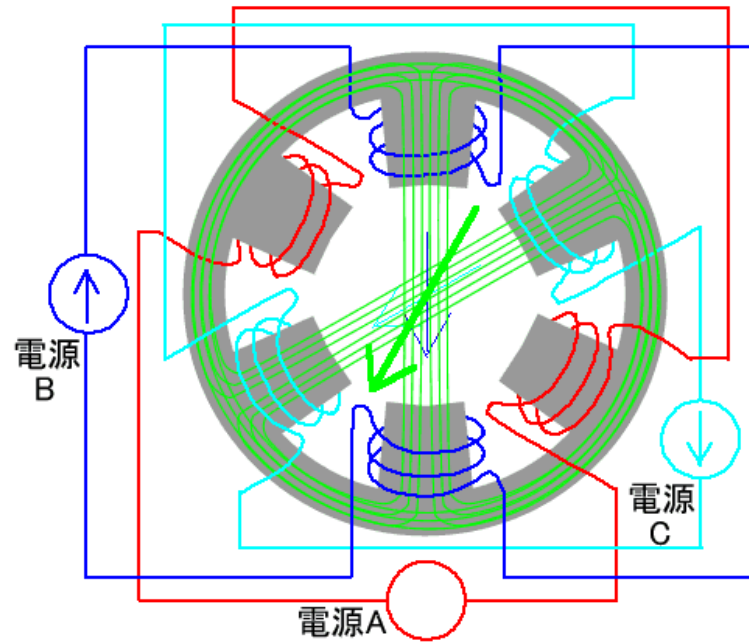
# 回転磁界

gifアニメ

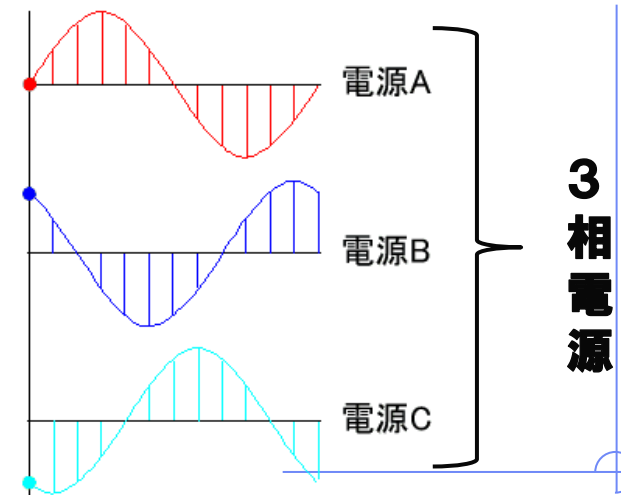
## 回転磁界

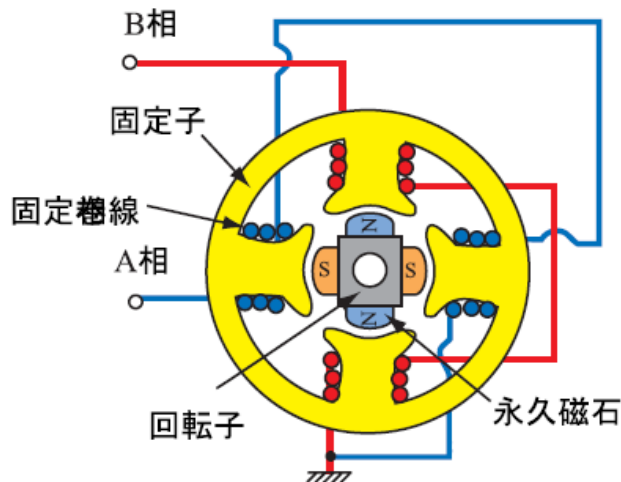
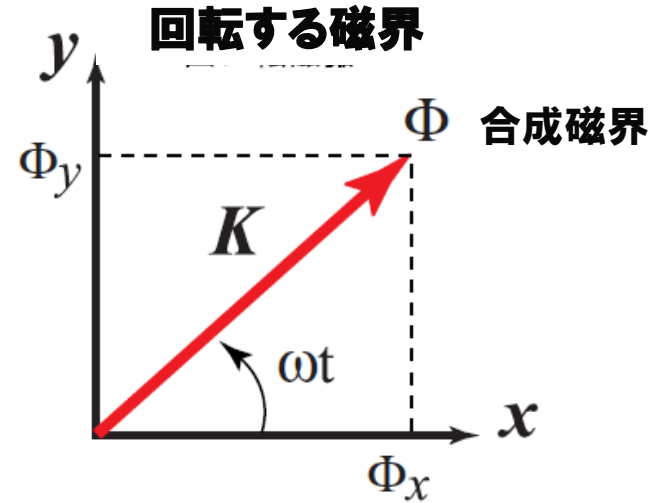
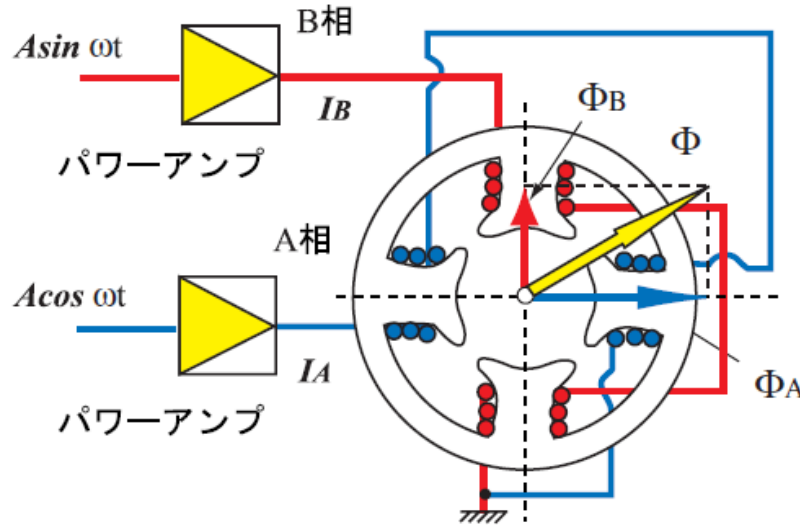
電磁石が作る磁界が回転して、永久磁石がそれ同期して回転する

位相が120度異なる3つの電源(3相電源)によって作られる磁界の向きは電源周波数と同じ回転数で回転する



合成磁界  
方向





$$\Phi_A = K \cos(\omega t), \quad \Phi_B = K \sin(\omega t)$$

$$\Phi = (\Phi_x, \Phi_y)$$

$$= (K \cos(\omega t), K \sin(\omega t))$$

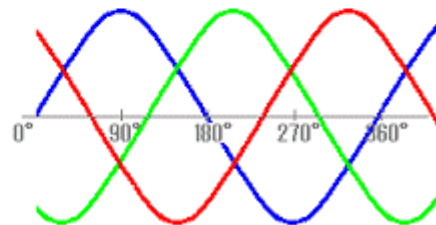
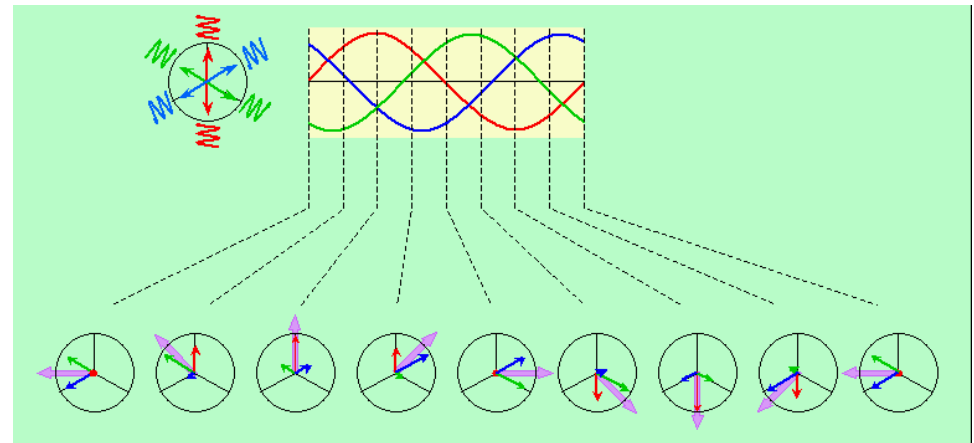
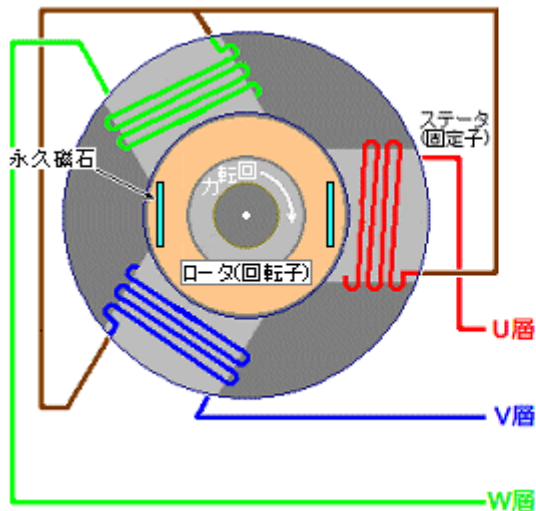
**合成磁界Φは角速度ωで回転する**

# ACモータ シンクロナス(同期)モータ

## シンクロナス(同期)モータ

ロータ:永久磁石 ステータ:コイル

正弦波磁束分布と正弦波電流によりトルクを発生



**回転磁界: 電磁石が作る  
磁界が回転して、永久磁  
石がそれ同期して回転する**



# ACモータの特徴

## ■長所

- ✓ 低価格、構造が簡単、長寿命
- ✓ おおむね一定速度での回転(テープレコーダ、レコードプレーヤー、扇風機)

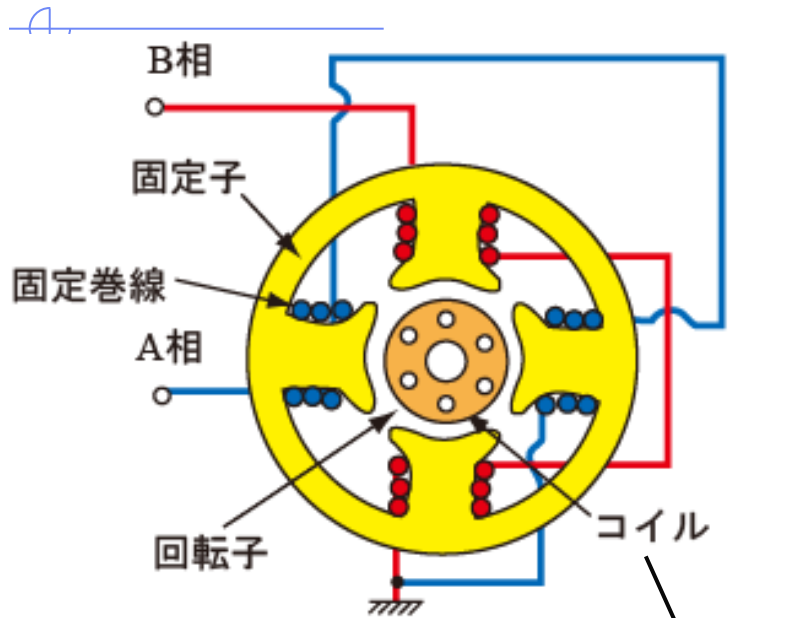
## ■短所

- ✓ 回転数を変えるためには周波数変換装置が必要
- ✓ 半導体技術が育つまで、バッテリー駆動困難であった

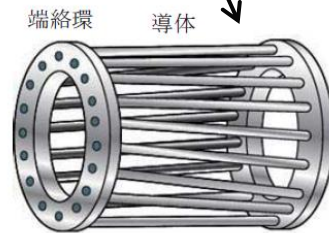
ビデオacMoter

ビデオ  
ACservoMoter

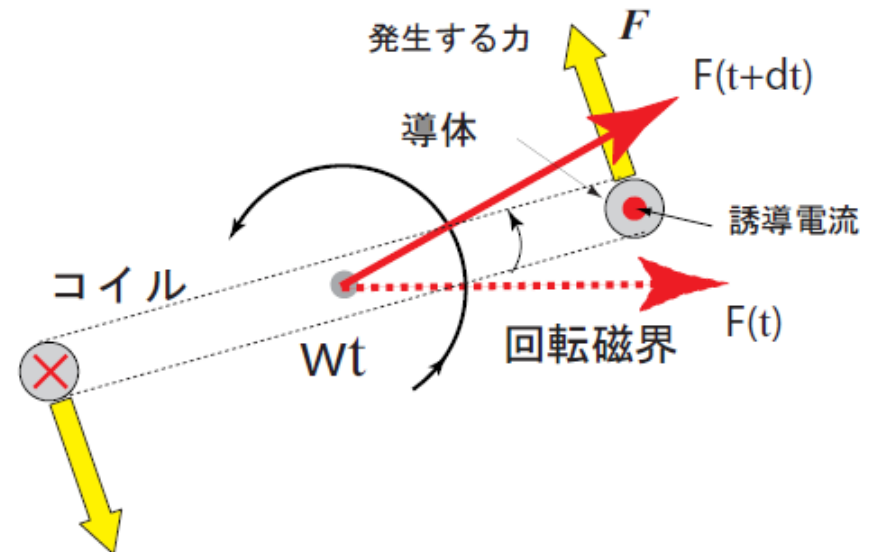
# 誘導モータ1/2



1. 回転磁界の中に導体(コイル)を配置する。
2. 回転磁界と導体の間に速度差が存在した場合、磁界が導体を横切り、導体に誘導電流が流れる。
3. このためフレミングの左手の法則により、回転子(コイル)に力が働き、回転磁界と同じ方向に回転を行う



かご型回転子



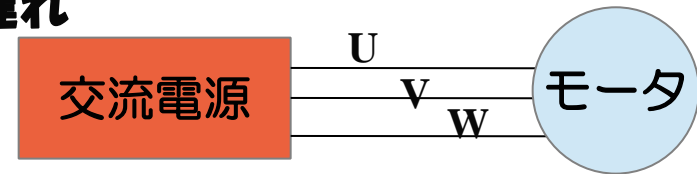
## 誘導モータ2/2

1. 但し、誘導電流が発生するためには、回転子コイルが回転磁界を横切らねばならない。  
(回転磁界回転速度 > 回転子回転速度)
2. この回転速度の差を”すべり”もしくは”スリップ”という。
3. 回転子に加わる負荷が大きくなるほどこのすべりが大きくなり、従って流れる電流が増加することになる。
4. 実際には同期速度よりも2~5 %ほど遅く回転する

$$\text{すべり} = \frac{\text{回転磁界の回転速度} - \text{回転子の回転速度}}{\text{回転磁界の回転速度}}$$

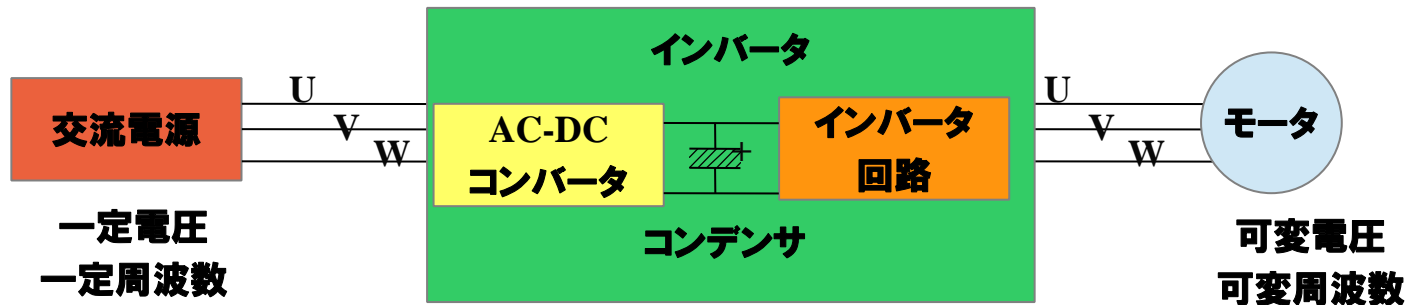
# ACモータの駆動（回転磁界の制御）

**回転方向:** 位相をずらした正弦波の進み、遅れ  
**速度変化:** 正弦波の周波数



家庭用は100V 50Hz/60Hz固定 ⇒ 一定回転  
 速度を可変させたい ⇒ 周波数可変な電源 ⇒ 大掛かり

★ 直流電源を任意の周波数の交流に変換する技術が登場（半導体技術の進歩）

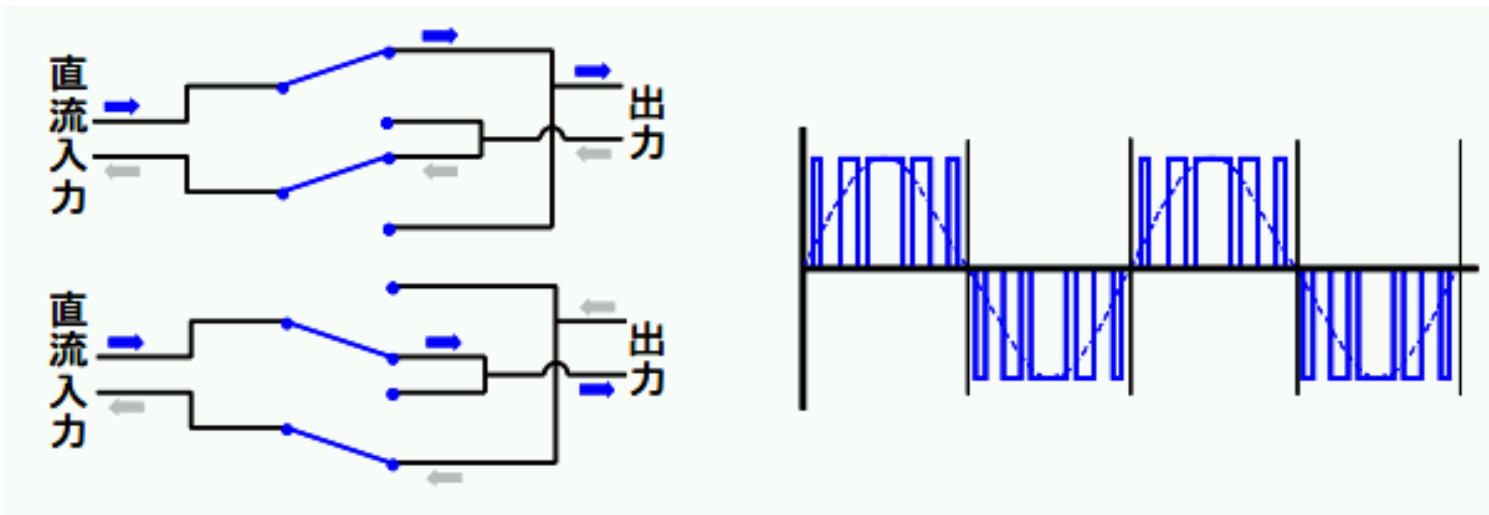


⇒ 回転検出器とセットにしたACサーボモータは、産業ロボットやNCマシン、EV、HEV、エレベータ、電車へと適用範囲を拡大

# インバータの正体

## 直流を交流に変換

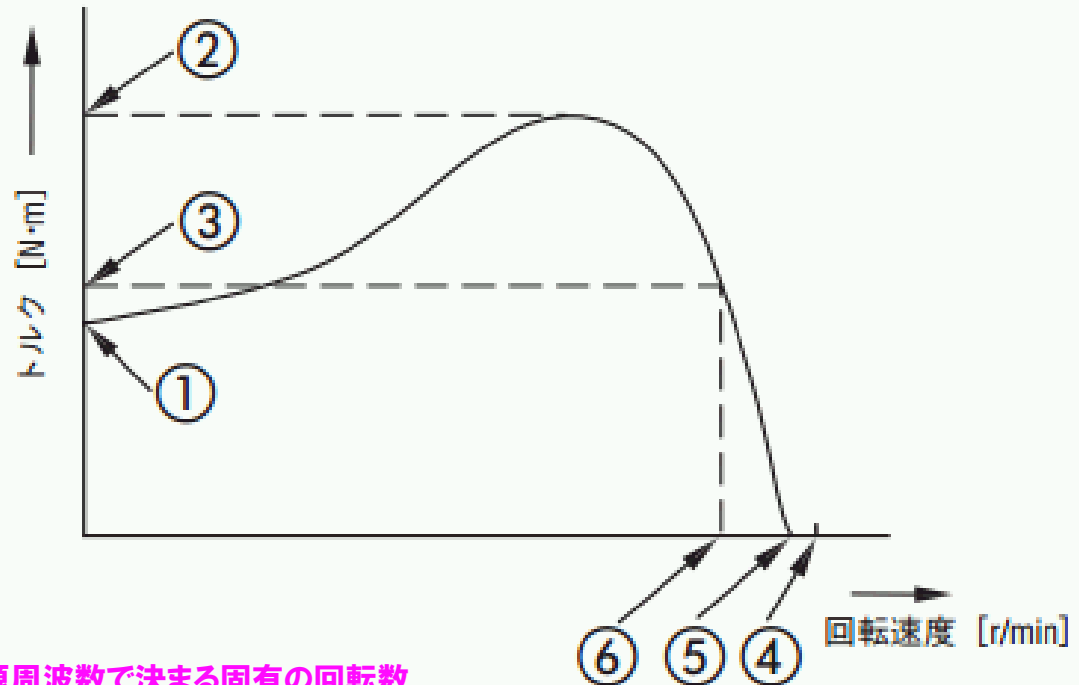
- ✓ 主に大電力の高速スイッチングが可能な半導体素子IGBT、GTOを使用。
- ✓ スイッチ切り替えの間隔を変えることで、出力側の交流の周波数、電圧を変える
- ✓ **VVVF**(Variable Voltage Variable Frequency:可変電圧可変周波数)
- ✓ **PWM**(Pulse Width Modulation:パルス幅変調)



# ACモータの特性

## 回転速度—トルク特性

- ①：起動トルク
- ②：停動トルク
- ③：定格トルク
- ④：同期回転速度
- ⑤：無負荷回転速度
- ⑥：定格回転速度



### 同期回転数

:極数と電源周波数で決まる固有の回転数

### 停動トルク

:モータが出しうる最大のトルク。これ以上負荷がかかると停止

### 起動(始動)トルク

:モータが起動の瞬間に出すトルク

### 起動電流

:起動時に流れる電流

### 定格トルク

:連続的に定格の出力を出すときのトルク

### 定格電流

:定格出力時に流れる電流

### 定格回転数

:モータが定格出力を出すときの回転速度

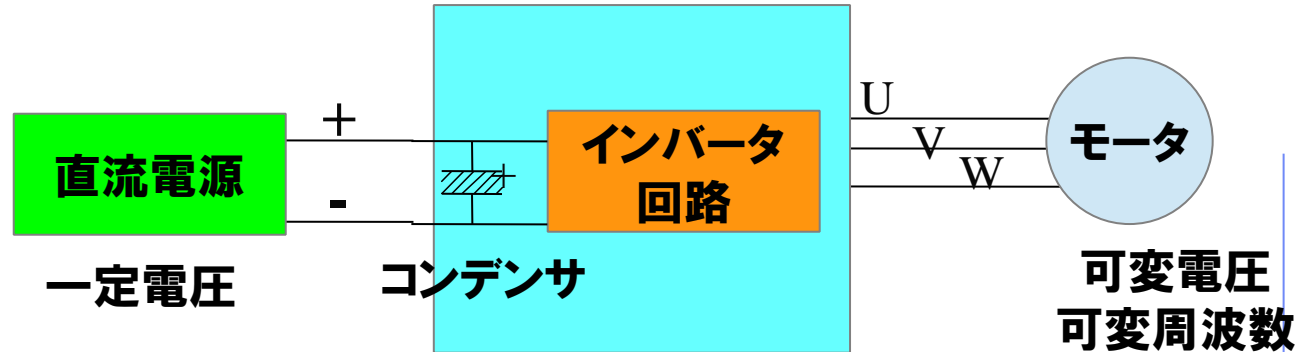
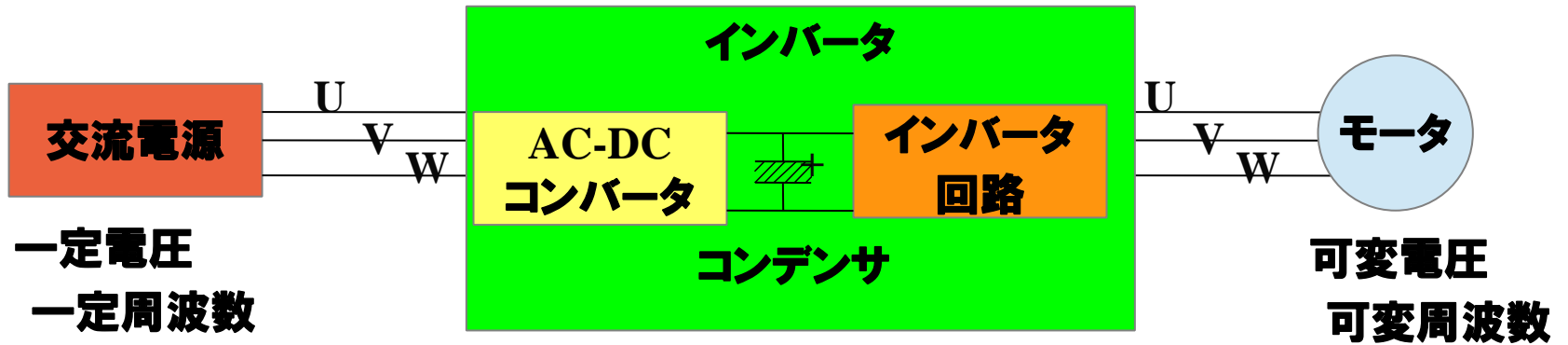
### 無負荷回転数

:負荷がかかっていないときの回転速度

### 無負荷電流

:負荷がかかっていないときに流れる電流

# ACモータ？ DCモータ？

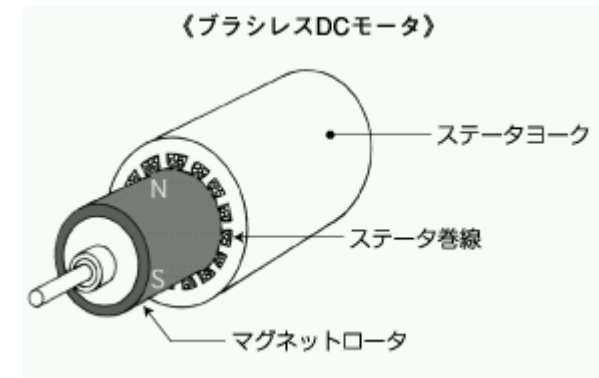
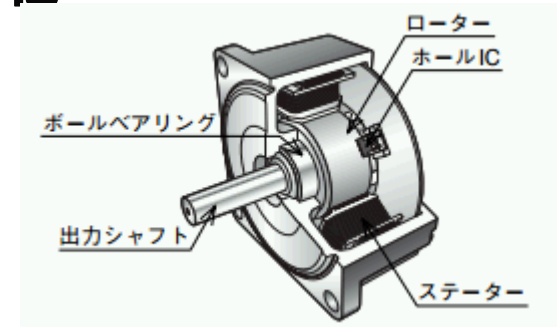
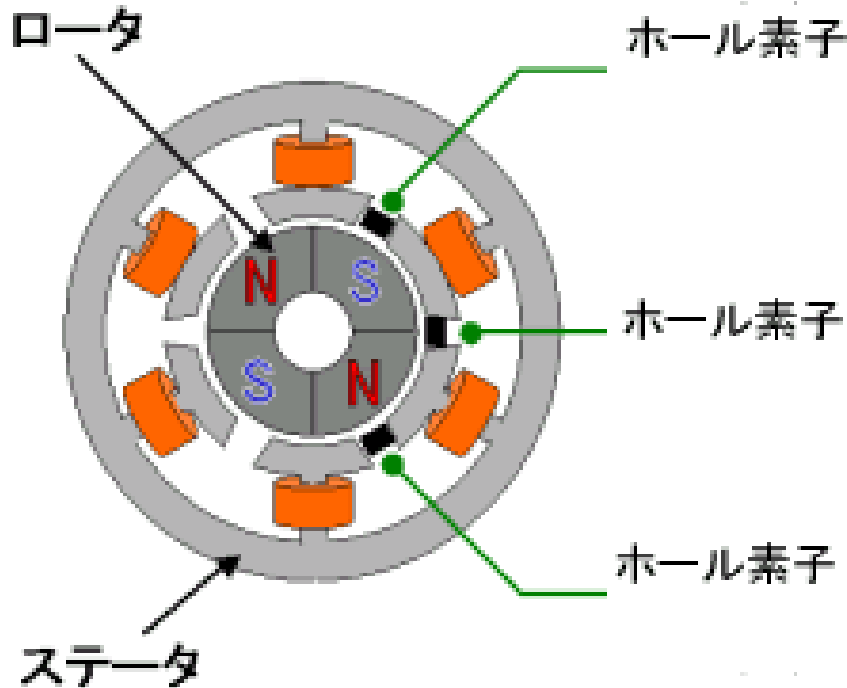


DCブラシレス  
モータ

直流電源で動く  
モータとみなせる

# ブラシレスDCモータ

DCモータのブラシと整流子をトランジスタや、その他のスイッチング素子で置き換えたDCモータ



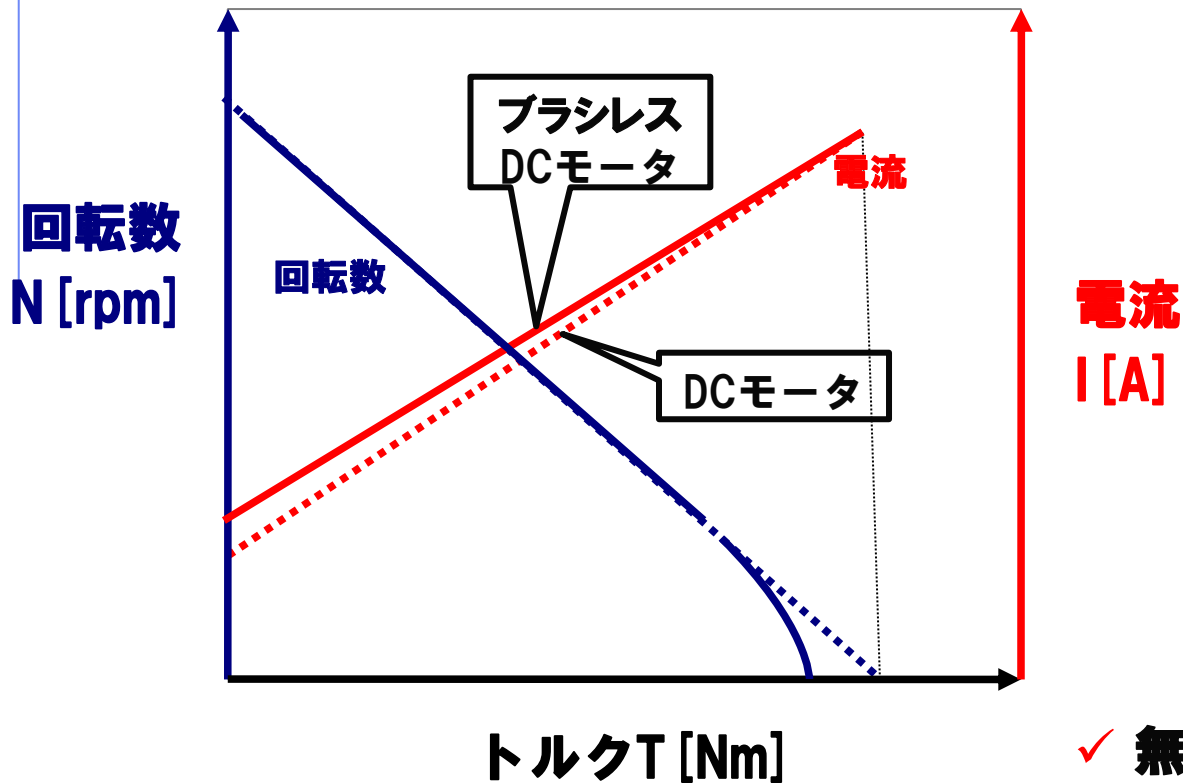
ロータ:永久磁石 ステータ:コイル

インバータ搭載AC同期モータとブラシレスDCモータの違いは???  
 「両者の呼び方には明確な定義がなく、混同されているのが実情である。」by 専門家



# ブラシレスDCモータの特性

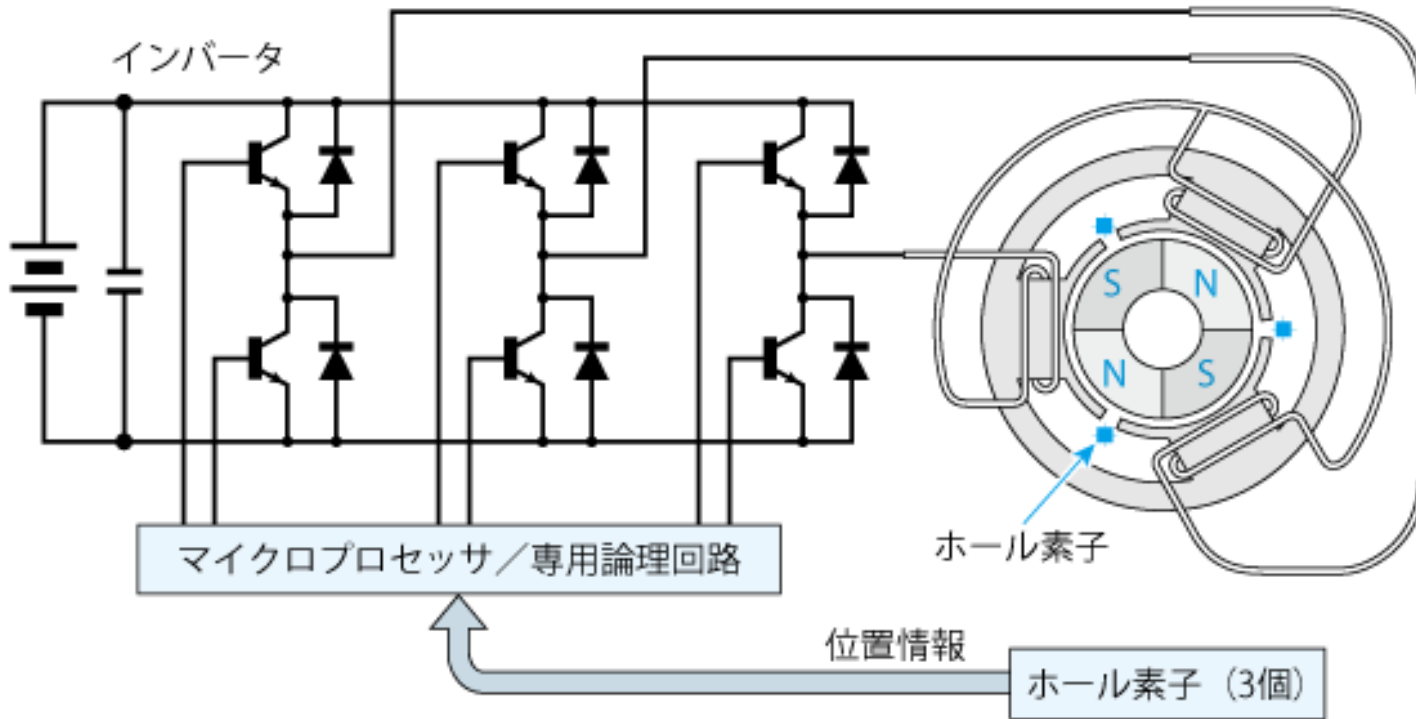
おおむね、DCモータと同様の特性



- ✓ 無負荷電流が大きい
- ✓ トルクの上限付近で理想値より減少

# ブラシレスDCモータの駆動(回路)

6個のトランジスタのスイッチングで U,V,Wの三相を駆動



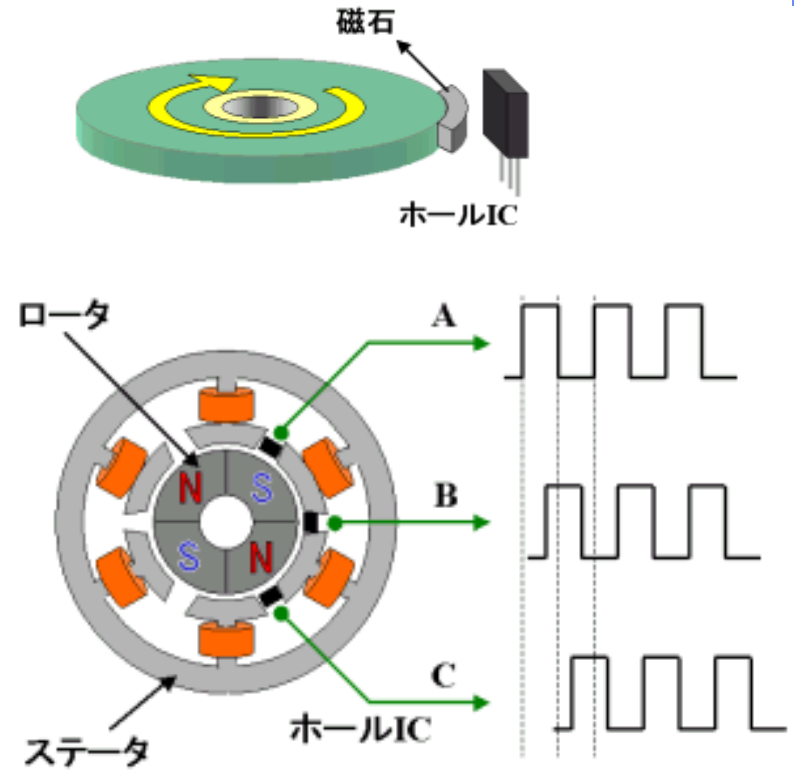
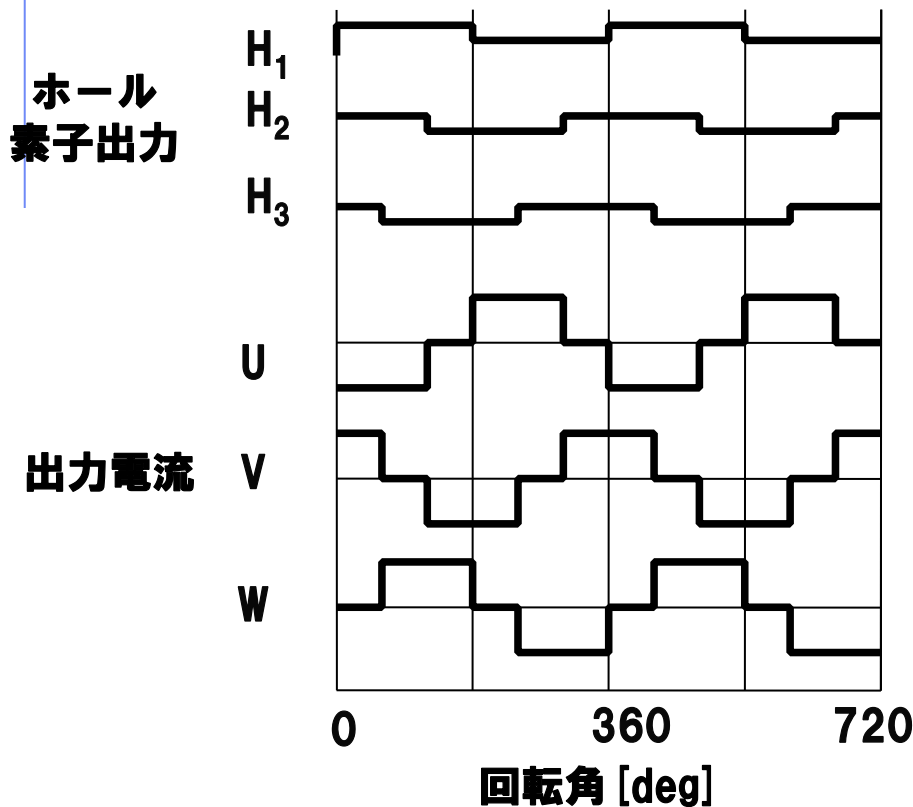
ノートパソコンのPCカード中に組み込まれたブラシレスモータ (日本電産 (株) 製) モータ自体の厚みは2mm



# ブラシレスモータの駆動

基本的にはACモータ同様

一般にブラシレスDCモータと呼ばれるものには回転角位置を検出するホール素子などがついており、その位置に応じて台形波や方形波、擬似サイン波などの電流を与える



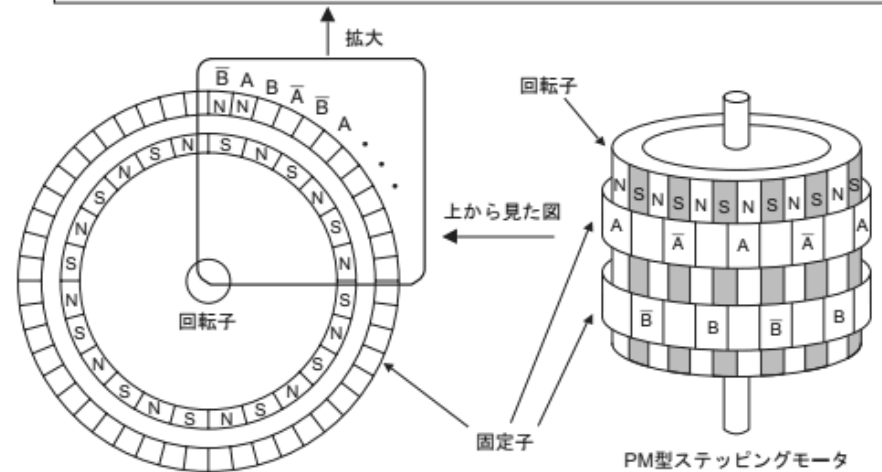
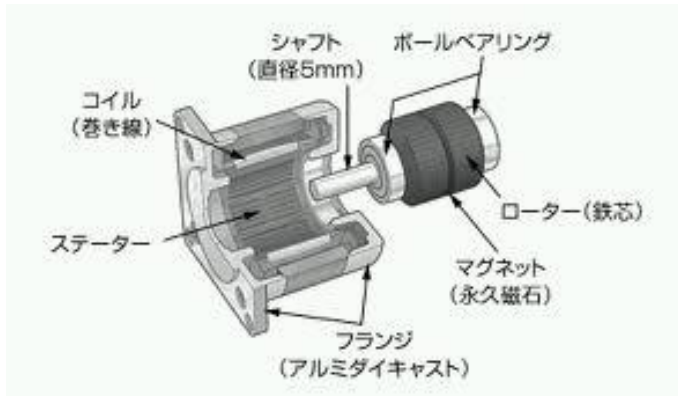
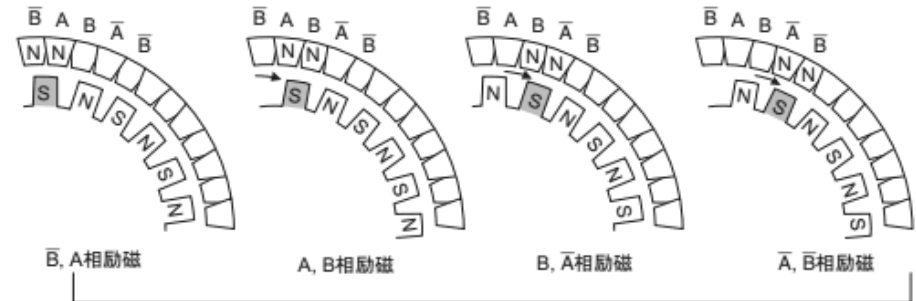
この駆動方法はほんの一例

# ステッピングモータ(パルスモータ)

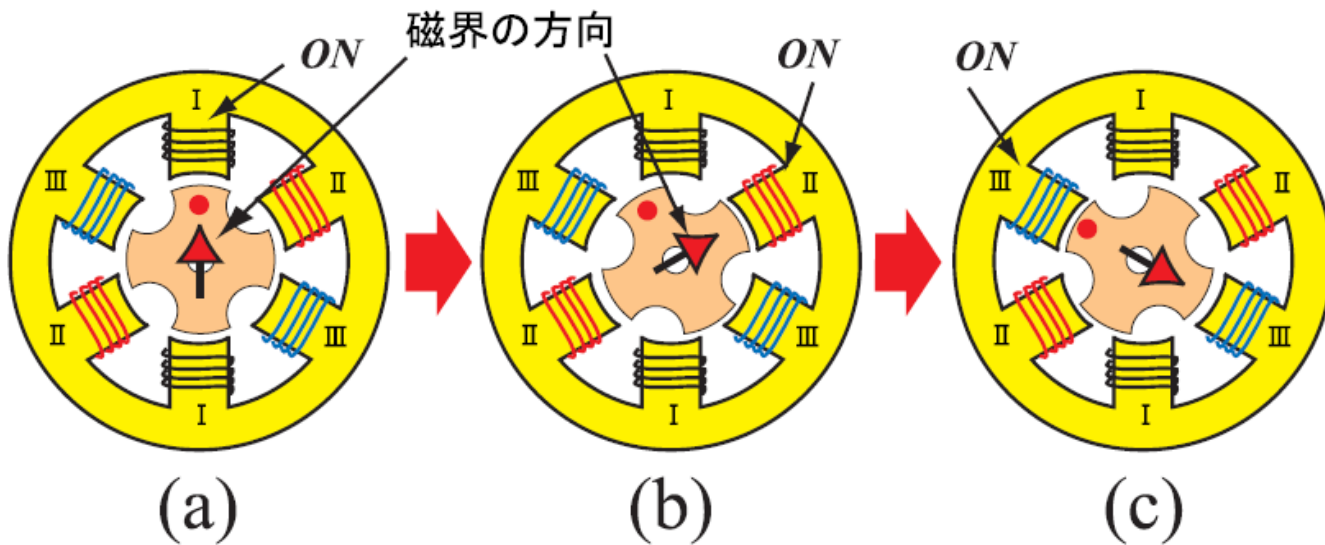
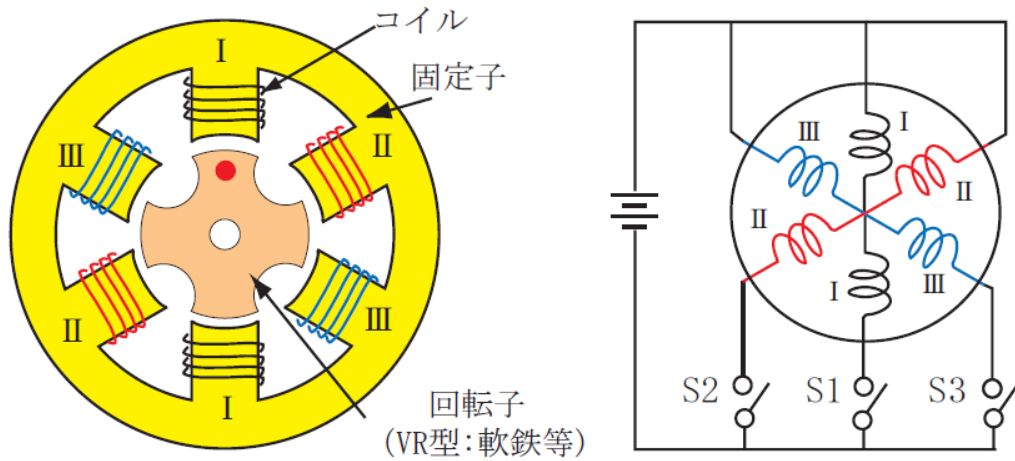
モータに与えるパルスで励磁状態が変化することによって一定の角度だけ回転。  
 励磁状態が変化しなければその位置を保持、静止  
 ステータ:コイル    ロータ:永久磁石



AC同期モータと似ているが、こちらはパルス駆動。



# ステッピングモータ原理図



# ステッピングモータの特徴

## ■長所

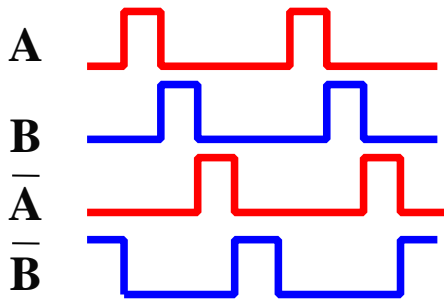
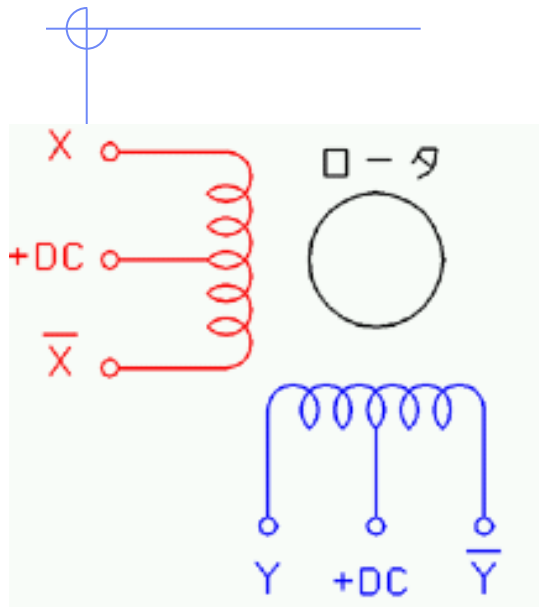
- ✓ センサなしで位置決め可能
- ✓ (時計、プリンタ…)
- ✓ マイコンとの接続が容易
- ✓ 停止時に保持トルクがある
- ✓ 負荷直結で低速駆動ができる
- ✓ メンテナンスフリーである(ブラシがない)

## ■短所

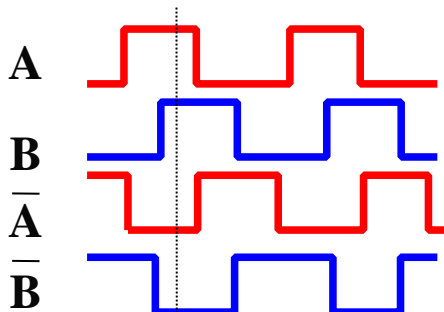
- ✓ エネルギー効率が悪い
- ✓ 同期はずれを起こしやすい(脱調)

ビデオ  
steppingMoter

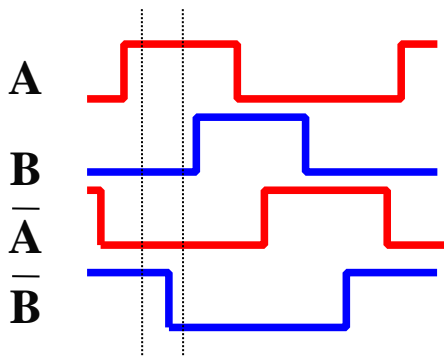
# ステッピングモータの駆動



**1相励磁**  
基本。不安定



**2相励磁**  
同時に2相。  
回転安定、保持トルク高  
しかし消費電力増



**1-2相励磁**  
上記を交互に。  
1パルスあたりの  
回転角が半分に

# ダイレクトドライブ(DD)モータ

方式ではなく使い方:減速機構を介さず、直接、負荷を駆動するモータ

## ■長所

- ・減速機の持つ摩擦やバックラッシュ(ガタ)がないので高精度
- ・伝達機構がないため構造簡素化

## ■課題

- ・小型、軽量、高トルク化
- ・低トルクリプル化(脈動)
- ・高分解能センサ

## 種類

永久磁石直流機型(DCモータ)

永久磁石同期機型(ACシンクロナスモータ)

インダクタ型(ACインダクションモータ)

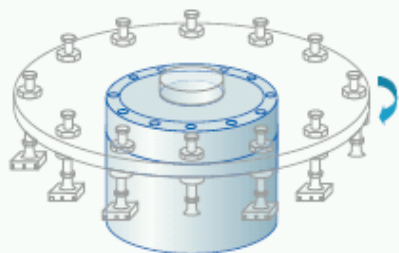




# DDモータの用途例

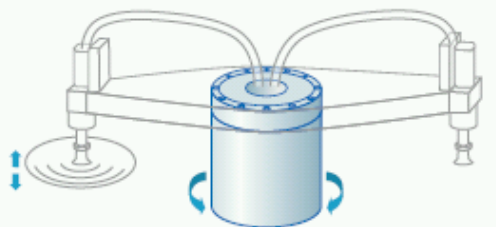
NSKカタログより

用途例1: PSシリーズ  
電子部品検査・搬送装置



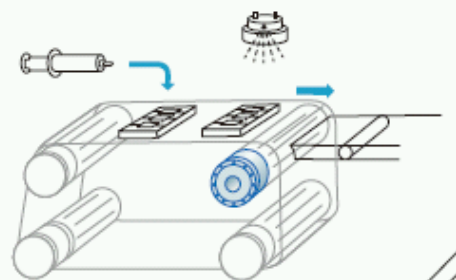
- 高速・高精度
- コンパクト性
- クリーン性
- 中空構造 (配管を通せます)

用途例2: PSシリーズ  
DVD/CDの搬送



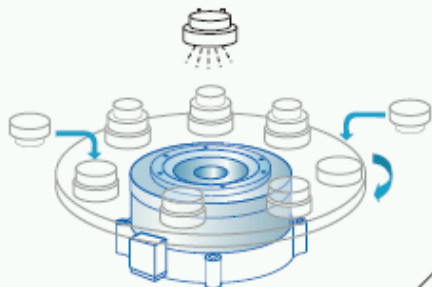
- 高速・高精度
- クリーン性
- メンテナンスフリー
- 中空構造 (配管を通せます)

用途例3: PSシリーズ  
医療器具等検査用コンベア搬送



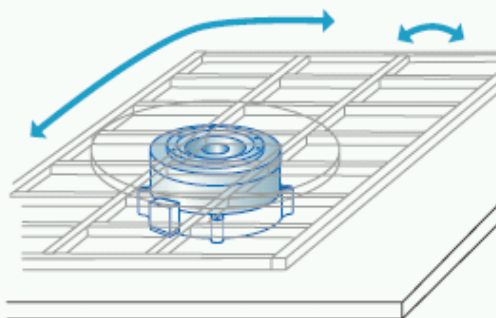
- コンパクト性
- クリーン性
- メンテナンスフリー

用途例4: PNシリーズ  
部品自動組立て装置



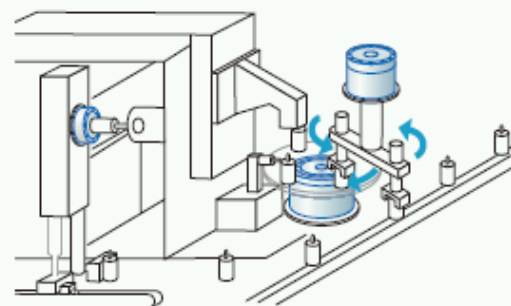
- 高速・高精度
- コンパクト性
- 高機能・不等分割位置決め・近回り位置決め

用途例5: PNシリーズ  
フラットパネルの旋回装置、アライメント装置



- コンパクト性
- メンテナンスフリー
- 高機能・微細位置決め
- 高トルク

用途例6: PNシリーズ+PSシリーズ  
電装部品加工ライン



- 高速
- コンパクト性
- メンテナンスフリー

## モータの選び方(一例)

- ✓ **低価格で位置決めしたい** → **ステッピングモータ**
- ✓ **とにかく簡単に回したい** → **DCモータ**
- ✓ **寿命やノイズが気になる** → **ACモータ**
- ✓ **バッテリーで動かないと困る** → **DCブラシレスモータ**  
**ACモータ with インバータ**
- ✓ **減速機を使わずに直接駆動したい** → **DDモータ**

## おわりに

1. 通常は、モータと制御回路(コントローラ、ドライバ)をセットで購入、使用することが多い
2. 制御回路を自作する必要に迫られなければ、制御法の複雑さなどはさほど気にすることはない
3. 実際には、それぞれのモータの得意分野を考慮して回転数、トルク、電流などが仕様を満たすかどうか

