

仙台市/仙台市産業振興事業団

ロボット博士の基礎からのメカトロニクスセミナー

C08/Rev 1.0

第8回

モータの基礎

仙台市地域連携フェロー

熊谷 正 朗

kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

東北学院大学工学部
ロボット開発工学研究室

RDE

今回の目的

○ モータの基礎

テーマ1：モータの役割とその種類

- ・ モータとその特徴
- ・ モータの種類

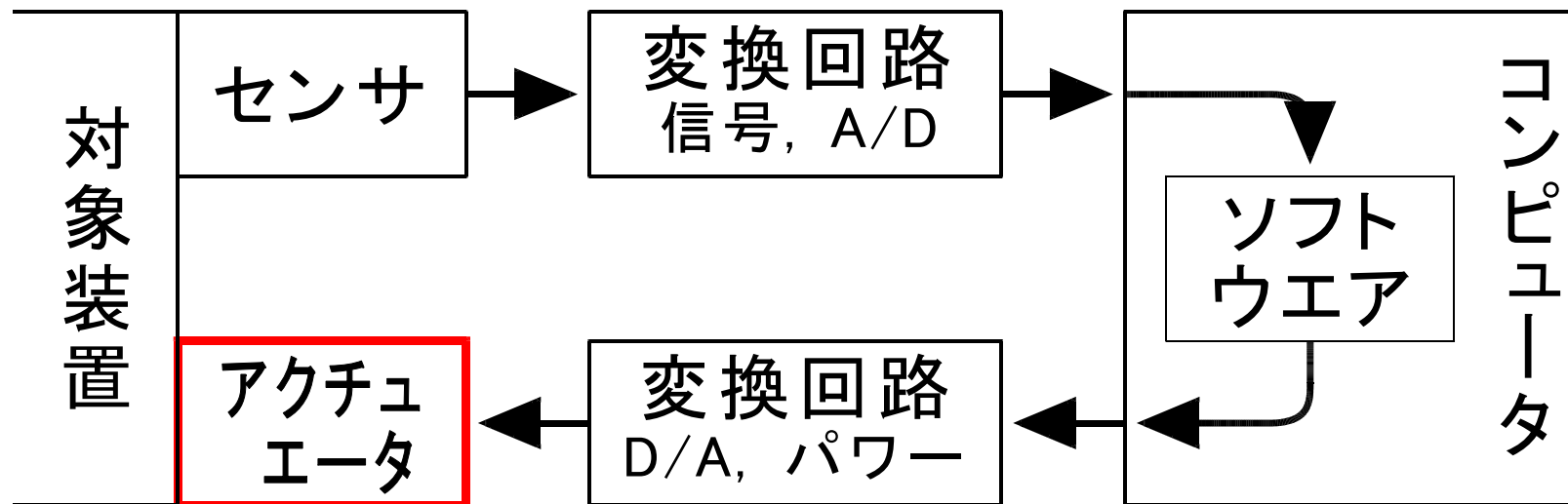
テーマ2：モータの活用

- ・ モータの使い方
- ・ モータの選定
- ・ モータの特性と制御

モータの役割

○ アクチュエータ≡モータ

- ・コンピュータの指示で動きを生み出す要素。
- ・**アクチュエータ**には多くの種類があるが、多くの場合は**電磁式のモータ**。



モータの役割



○ アクチュエータ≡モータ

◇ モータの一般的特徴（後に詳述）

- **電力**を与えると軸が回転する。
※油圧、空気圧を与える物などもある
※直線運動するものもある(リニアモータ)
- **電磁石**をもとにした原理で動く。
※その他様々な原理のものがある
- 出せるトルク(力)と速度に上限がある。
※独立した制限or密に関連した制限

モータの種類

○ 与えるエネルギーによる分類

◇ 電力（電圧&電流）

- ・ 電磁式モータ （主流、電流主体or電圧主体）
- ・ 超音波モータ （電圧主体）
- ・ 静電気力モータ （電圧主体）

◇ 流体圧力（圧力&流量）

- ・ 油圧モータ （※建機の走行部分）
- ・ 空気圧モータ （※歯科のドリル）

モータの種類

○ 電力で動作するモータ

◇ 電磁式モータ

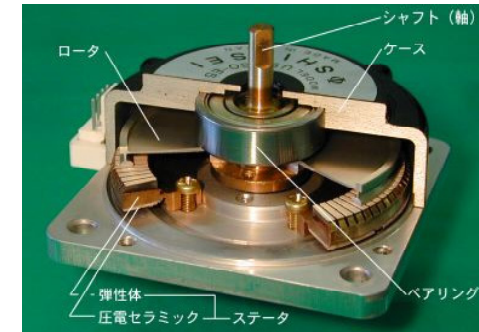
- ・ 永久磁石、電磁石、コイルなどを用いた、磁気と電流の関係、磁力の吸引反発を用いて動作するモータ。
- ・ 直流モータ
- ・ 交流モータ
- ・ ステッピングモータ など

モータの種類

○ 電力で動作するモータ

◇ 超音波モータ

- ・ 電圧で変形する圧電素子を利用。
- ・ 高い周波数(数十kHz等)で素子を振動させ、その振動を回転運動などに機械的に変換。
- ・ 出力は大きくないが、**薄型化**可能、**リング状**に作れるなど形状が比較的自由、などの特徴により、特殊用途に使われる。



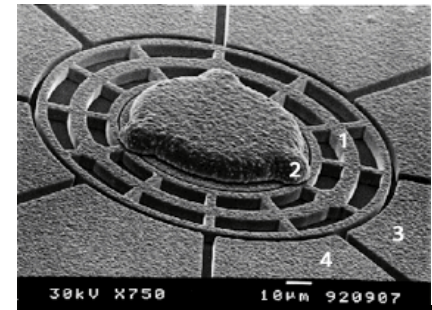
大島商船高専サイトより

モータの種類

○ 電力で動作するモータ

◇ 静電気力モータ

- ・ 静電気の引力で回転するモータ。
- ・ “日常的な大きさ”では実用的ではないが、MEMS(μm サイズ)では磁力より有望。
※大型大出力品の試作品もある
- ・ 回転式よりも直動のものが、センサを含め様々なものに利用されている。
※角速度、加速度センサ、プロジェクタ



東京大学サイトより

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 直流モータ

- ・ 直流の電力で回転するモータ。
- ・ ステータ(固定子): 永久磁石が多い
ロータ(回転子): 電磁石
- ・ 電磁石の磁極を適切に切り替えるための
ブラシと整流子がある。
- ・ 一般的に配線は2本(+アース1本)。

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 直流モータ（汎用）



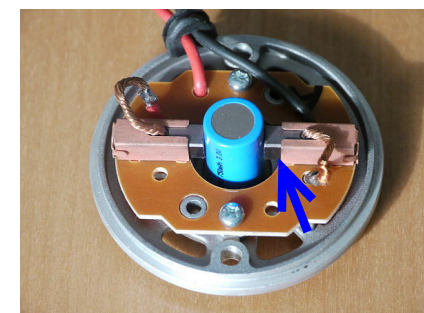
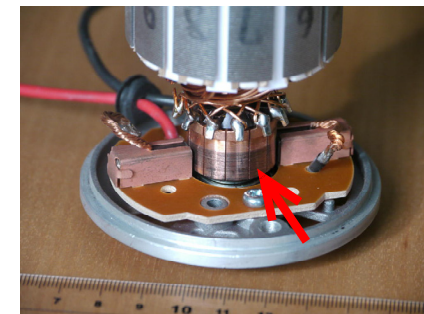
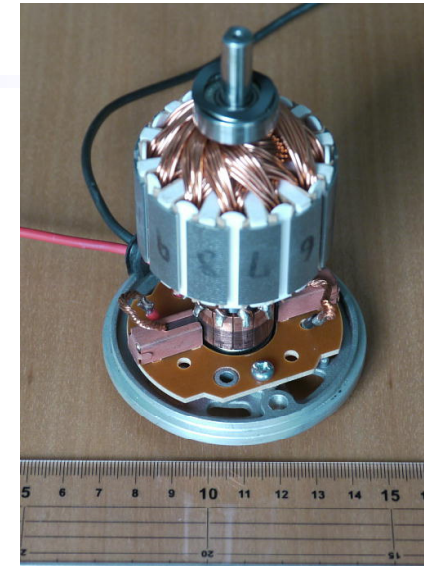
外 観



ステータ



ロータ



ブラシと整流子

津川製作所製

C08 モータの基礎

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 直流モータ

- ・ 直流電流を流すとトルク(回転する力)が生じる。

※直流電圧をかけると回る、は副次的

- ・ 利点： 制御方法,回路が比較的簡単
- ・ 欠点： ブラシの寿命、ノイズ
- ・ 代表例： 模型用小型モータ、
自動車機器用モータ

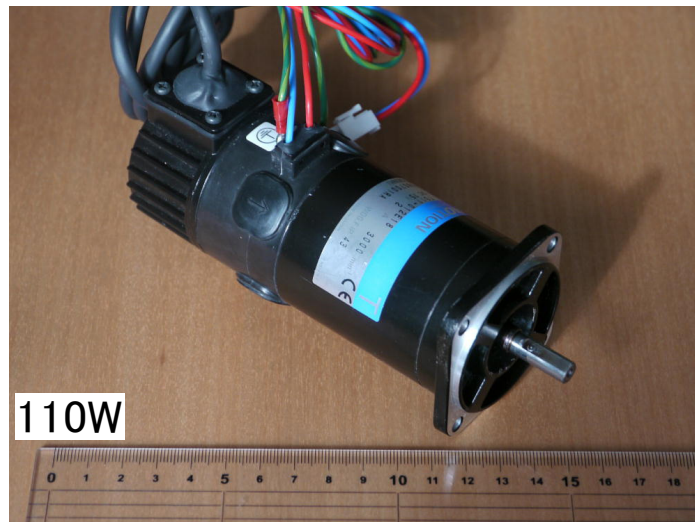
モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 直流(DC)サーボモータ

- ・ サーボ制御に使うことを念頭にしたモータ。
- ・ なめらかに回る/センサ付が多い。

※ロータリーエンコーダ等



山洋電気製

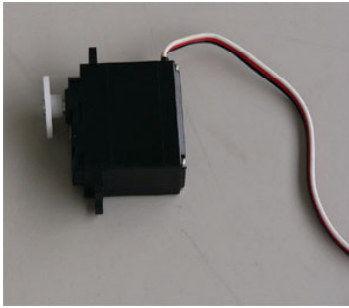
C08 モータの基礎

Page. 12 基礎からのメカトロニクスセミナー

モータの種類

○ サーボモータ と ラジコンサーボ

◇ ラジコンサーボ



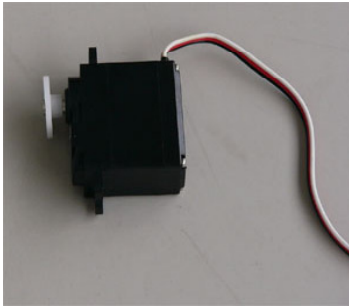
- ・ ラジコン模型に用いられていたユニットで、**モータ、電子回路**を内蔵し、コントローラの操作に応じて軸が回転する。
- ・ 電源と指令信号線のみで指定した角度に回転するため、小型のロボットの部品などに、使われるようになってきた。

モータの種類

○ サーボモータ と ラジコンサーボ

◇ 用語の混同

- ・ もとは「ラジコンサーボ」と呼ばれていたが、最近、「サーボモータ」と呼ぶ例が増加。
 - 本来の「(DC,AC)サーボモータ」と混乱するケースが多く見られるように。
- ・ 構造も用途も全く異なるため、「サーボモータ」という記述を見た場合には要注意。



モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 交流モータ

- ・ 交流電力で回転するモータ。

- ・ 同期型交流モータ

周波数に連動した回転速度

非同同期型交流モータ

周波数に連動しない回転速度

※周波数の影響を強く受けるは多い

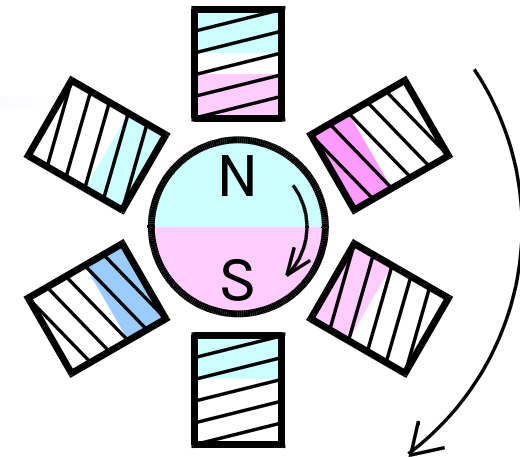
- ・ 一般に直流モータより簡単・コンパクト。

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 同期交流モータ

- ・ **ロータ**が磁極固定の**磁石**、**ステータ**の**電磁石**で**回転する磁界**が生じて、それにつられて回る。
- ・ 周波数に比例した速度で回転する。
※比例係数は構造で決定される
- ・ 回転速度を変えるには周波数を変える必要がある(インバータ装置)。
※スイッチオンで回らない可能性がある

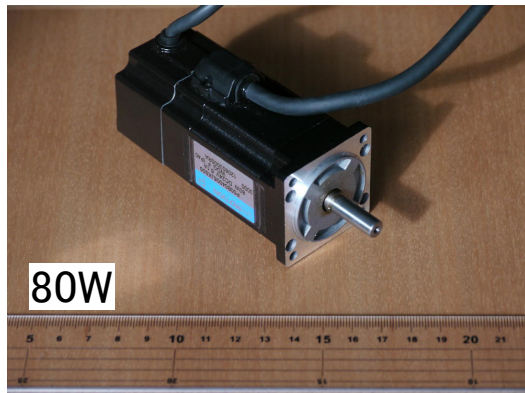


モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 交流サーボモータ

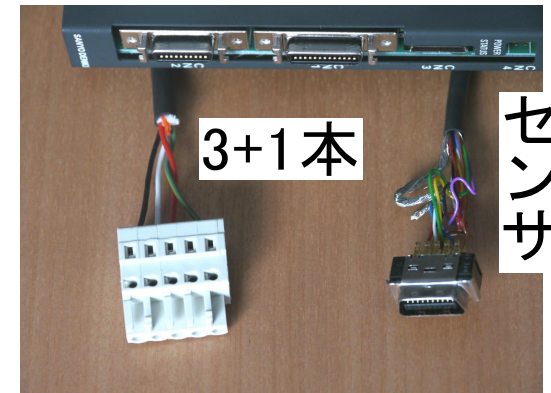
- ・ 制御用に作られた永久磁石式同期モータ。
- ・ 専用のサーボアンプ(制御インバータ)によって、回転が精密に制御される。



山洋製 モータ+センサ



サーボアンプ



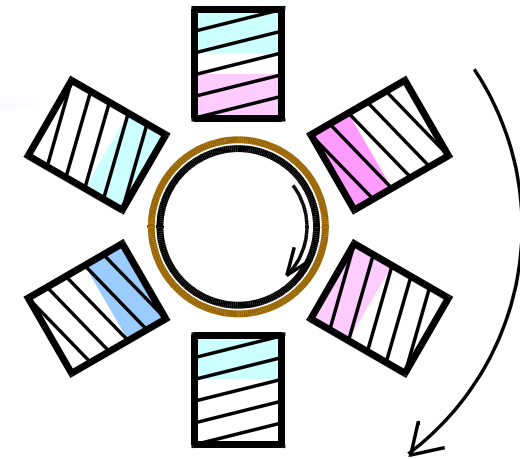
配線の例

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 誘導モータ（非同同期型）

- ・ ロータが銅と鉄のみで、**磁石を持たない**。
- ・ **回転する交流磁界**で銅に**誘導電流**が生じる
→ 誘導電流と回転する磁界の相互作用で
 ロータが回転する。
- ・ 構造が簡単で低コスト・堅牢。
- ・ ある程度、回転磁界に遅れて回る。

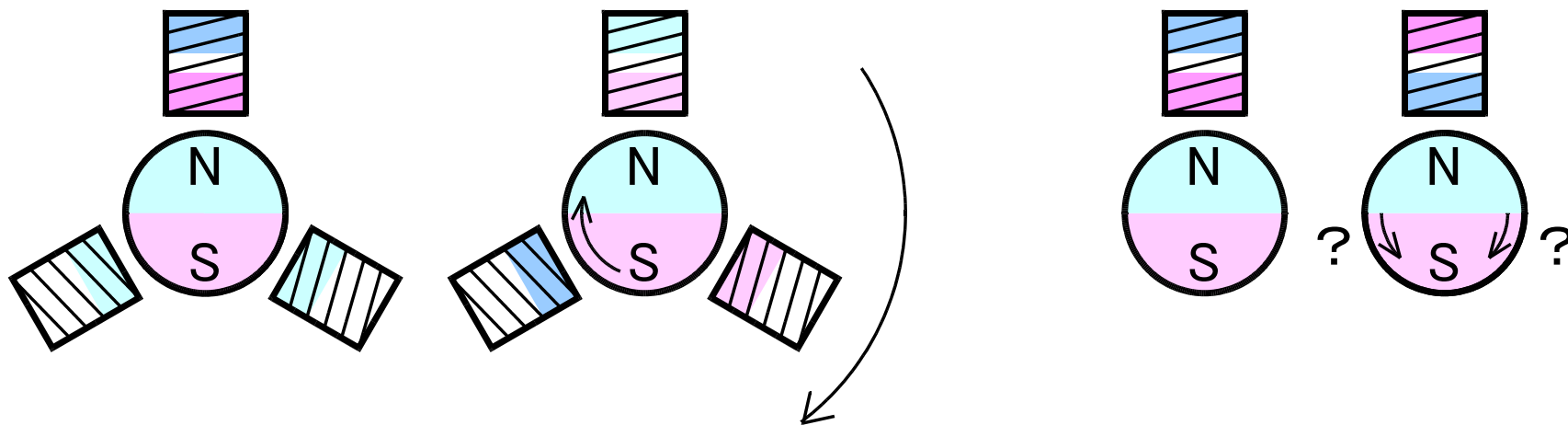


モータの種類

○ 単相交流と三相交流

◇ 単相＝2本線 三相＝3本線時間差

- ・ 三相は3系統の電磁石で回る方向がほぼ決定されるが、単相は決まらない場合あり。



モータの種類

○ 単相交流と三相交流

◇ 単相＝2本線 三相＝3本線時間差

- ・ 交流モータは回転する磁界につられて回る。
- ・ 三相交流の場合は電磁石を並べるのみで回転する磁界ができる。
- ・ 単相交流の場合は押し引き→所定の方向の回転になるような、細工が必要。
例) 補助の電磁石とコンデンサ

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ 交流モータ補足

- ・ 同期モータで永久磁石の代わりに電磁石を用いる物もある
→ 回転部分に電力を伝える接触部がある
- ・ 直流モータと同原理で、永久磁石にかえ、電磁石(極性が変わる)を用いた物もある。
(交流モータでブラシ付のもの、周波数依存なし)

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ DCブラシレスモータ

- ・ 同期型の交流モータに交流電流を流すための回路(インバータ)をセットにしたもの。
- ・ 外見では直流電力で回るモータ。
(直流モータはブラシ付が基本→「ブラシレス」)
- ・ パソコンなどのファンなど。
- ・ 商品名が「DCブラシレス」な交流モータもある。

モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ ステッピングモータ（パルスM～、ステッパM）

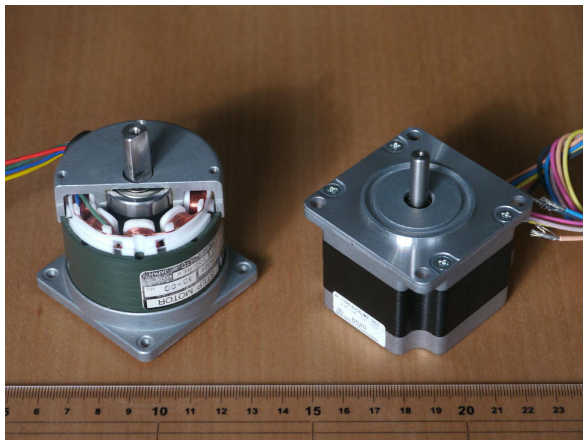
- ・ 電流を流しただけでは回らず、電流を切り替えることで一定角度ずつ回転するモータ。
- ・ 切り替えの回数・順序・タイミングのみで、指定角度、速度で回すことができるため、メカトロで多用されている。

モータの種類

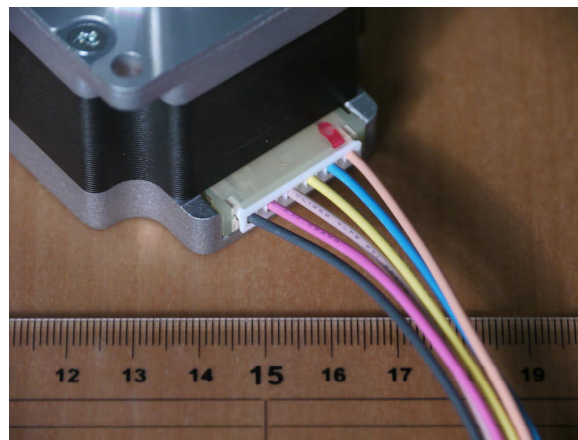
○ 電磁モータの種類

◇ ステッピングモータ

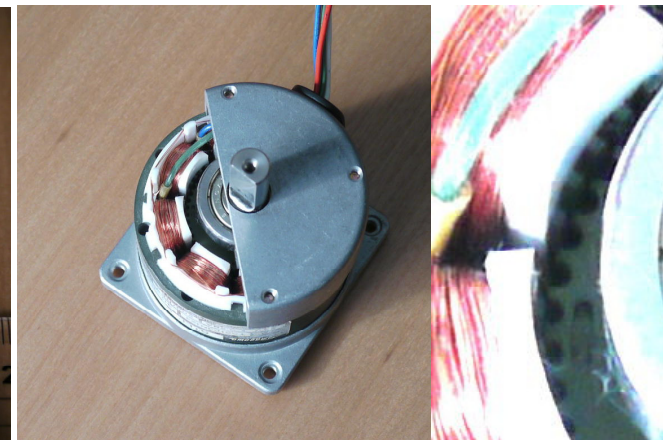
- ・ステータが複数の電磁石で構成される。
- ・電磁石ごとにON/OFFする→配線が多い。



ステッピングモータ



配線：一般に多い



内部の拡大図

日本電産サーボ他

2個とも1.8度単位(1回転200分割)で回転

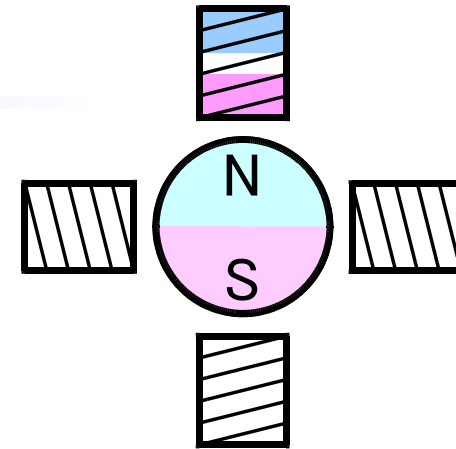
モータの種類

○ 電磁モータの種類

◇ ステッピングモータ

- ・ 同期モータと原理に近いが、連続回転が主体の交流モータに対して、ステッピングモータは1ステップずつの回転を重視。
- ・ 別途センサを用意することなく、思い通りの回転をさせることができる。
- ・ 「脱調」すると回転が停止する。

脱調＝電磁石の切り替えについて行けなくなる現象



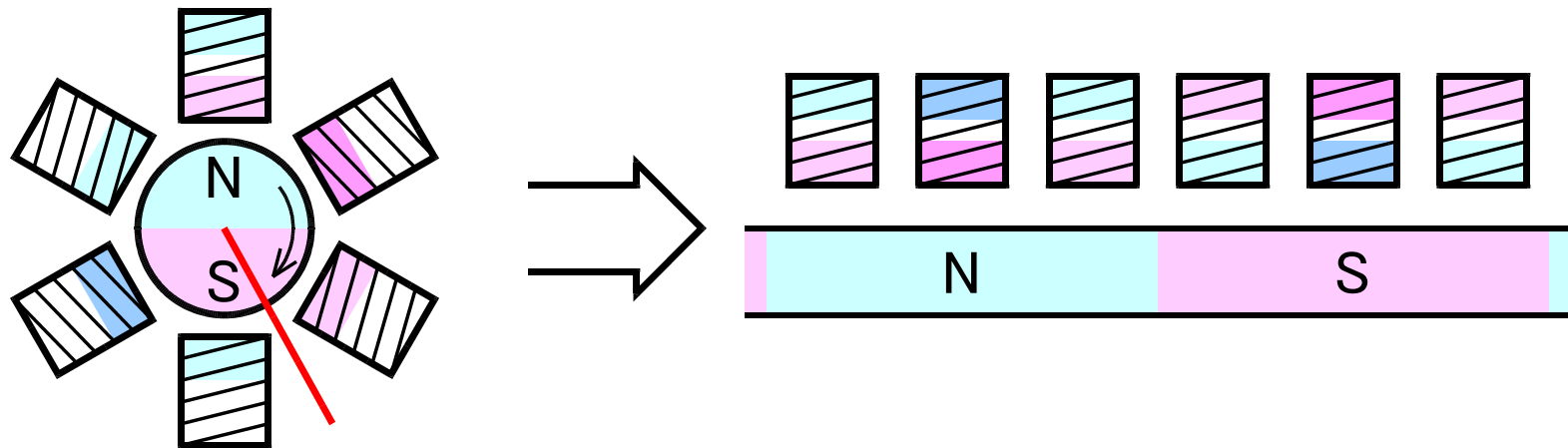
モータの種類

○ リニアモータ

◇ 直線的に動くモータ

- ・ 回転式の(交流/ステッピング)モータを切り開いて、直線的に動くようにしたもの。

例)



モータの種類

○ リニアモータ

◇ 直線的に動くモータ

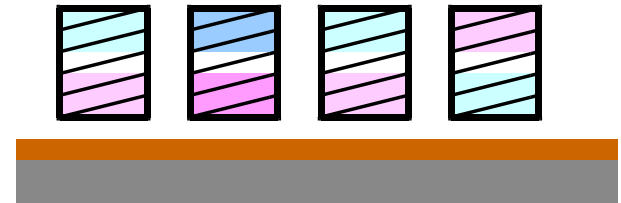
・ リニアモータの例

リニア同期モータ（使用例：工作機械）

リニア誘導モータ（使用例：地下鉄東西線）

リニアステッピングモータ（使用例：産業機器）

リニア超音波モータ



※回転モータ＋メカで直動するものもあるが、

※リニアアクチュエータであって、リニアモータではない。

今回の目的

○ モータの基礎

テーマ1: モータの役割とその種類

- ・ モータとその特徴
- ・ モータの種類

テーマ2: モータの活用

- ・ モータの使い方
- ・ モータの選定
- ・ モータの特性と制御

モータの使い方

○ モータの性能

◇ 主な性能

- **回転速度** [rpm] ※rpm=回転/分
定格回転速度、無負荷回転速度など
- **トルク** [Nm,kgcm] ※[力][長さ]の単位
回転する力の大きさ（次で詳しく説明）
- **電圧、電流**
標準的な使い方するとき / 限界値
軸を固定したときに流れる電流など

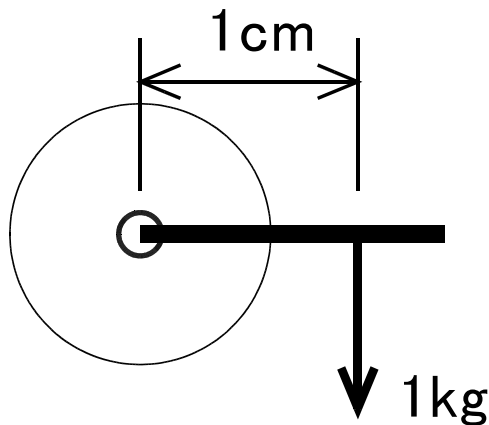
モータの使い方

○ モータの性能

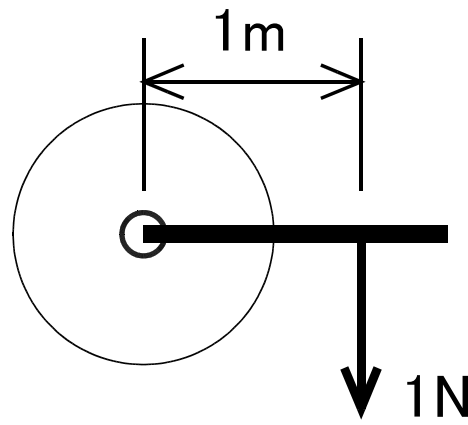
◇トルク

(負荷トルク)

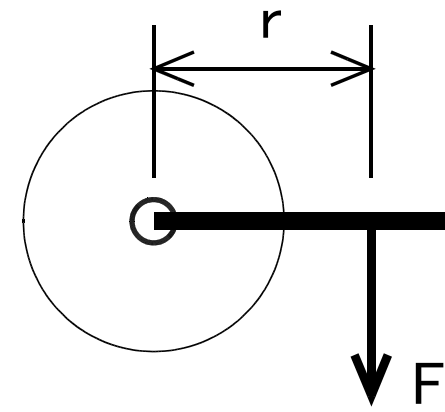
- ・ 軸を回転させる力 (軸の回転を妨げる力)



1 [kg cm]



1 [N m]



rF

※1[N]は約100g重

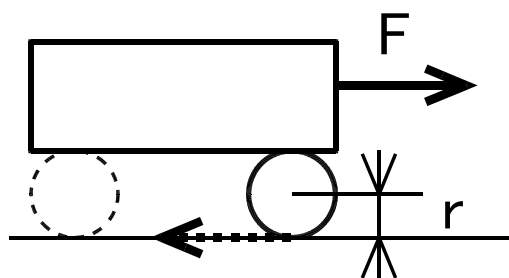
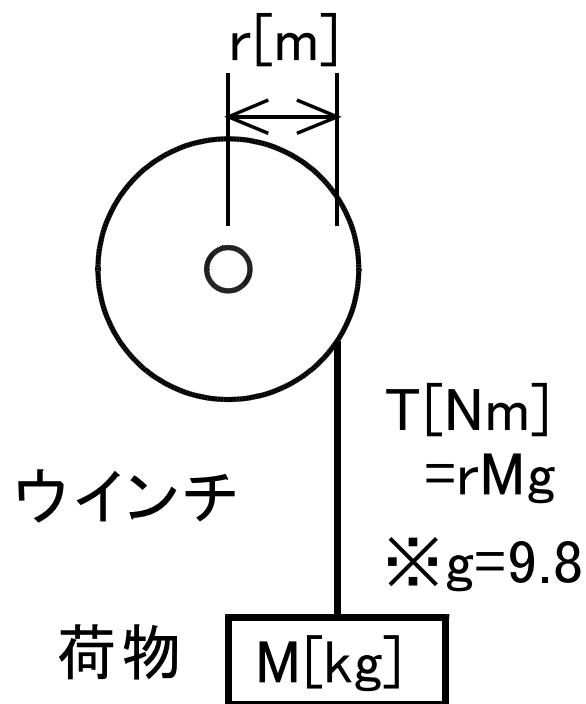
※[N]:「ニュートン」

モータの使い方

○ モータの性能

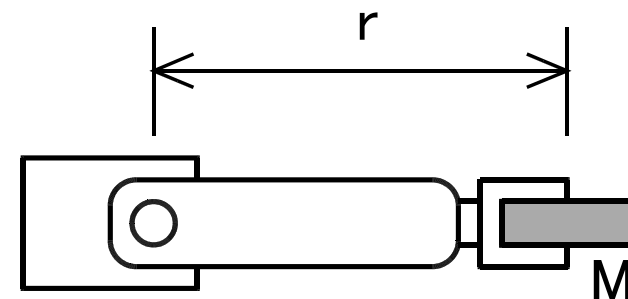
◇トルク

- ・ 具体的な用途でみるトルク



$T = Fr$
※ F : 牽引、摩擦、
※ 加速の慣性力など

車両型



$T = rMg$
※ 腕の重さも必要

腕型持ち上げ

モータの使い方

○ モータの性能

◇性能の制限

- ・トルクの最大値＝電流の最大値
 - ・温度上昇による焼損、劣化防止(積算)
 - ・電磁石の強力な磁場による、永久磁石の劣化（瞬間）
- ・回転速度の制限：
 - ・ベアリング等のメカ的耐久、寿命
 - ・遠心力による膨張などの影響

モータの使い方

○ モータの性能

◇ 主な性能

- ・ 動力/出力 [W]

$$\text{トルク[Nm]} \times \text{回転速度[rad/s]} = [\text{W}]$$

$$\text{力[N]} \times \text{速度[m/s]} = [\text{W}]$$

$$\text{電圧[V]} \times \text{電流[A]} = \text{電力} [\text{W}]$$

$$\text{※[rpm]} \rightarrow (\div 60 \times 6.28) \rightarrow [\text{rad/s}]$$

- ・ 電力[W] → 変換効率(モータ) → 動力[W]
動力[W] → 変換効率(メカ) → 動力[W]

モータの使い方

○ モータと目的の性能のミスマッチ

◇一致する物が見つからない

- ・多くのモータは
「回転は速いが、トルクが少ない」
- ・多くの用途は
「トルク・力は必要だが、速度はいらない」
- ・用途のトルクを満たそうとするとかなり
大きなモータが必要になる。
→ **変速機**(ギアボックス)を用いる。

モータの使い方

○ モータと目的の性能のミスマッチ

◇ 変速機

- ・ 速度と力の取引



$$T_1 \times S_1 (\times \text{効率}) = T_2 \times S_2 \quad [W]$$

- ・ 減速機は速度を落とす代わりにトルクを大きくできる。
- ・ 機構によって直線運動に変えることもある。

モータの使い方

○ 減速機の活用

◇モータは一般的には減速機とセットで使う

- ・ミスマッチの解消。
- ・運動の変換（回転モータ→直線運動）
- ・モータを決めるときには[W]を基準にすると検討しやすい(効率100%なら[W]が維持される)。
- ・減速機は方式が様々あるため、実はその選定/設計がモータよりも大変。
→減速機付,メカ付のモータも市販される

モータの使い方

○ モータへの電力供給

◇モータの種類、使い方で大きく変わる

- ・ただ回すだけ → しかるべき電源
- ・交流モータの変速運転
→ インバータを併用
- ・サーボモータ → 専用の制御装置
- ・ステッピングモータ → 制御装置、
自作の切り替え回路(マイコン等使用)

モータの選定

○ 必要なモータ出力の見積もり

◇トルク/速度/動力

- ・ 動かしたいものに**必要なトルク&回転速度、力&速度**を見積もる(→動力)。
- ・ 大まかに**モータに必要な動力**を見積もる。
(減速機、メカの効率を想定)
- ・ モータの選択幅が決まる。
(種類によってはその出力がないことあり)

モータの選定

○ モータの種類の選択

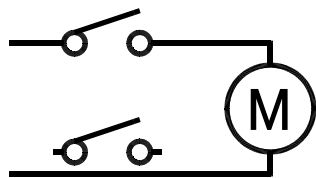
◇ただ回す場合

- ・主に、出力とコストで考えればよい。
- ・オンオフだけか、回転方向を変えるか、速度を変えるかどうか。
- ・モータによって減速機が変わるため、減速機のコスト・大きさなども合わせて。

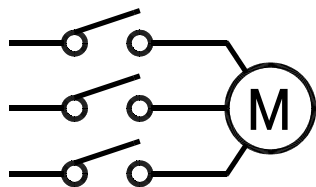
モータの選定

○ モータの種類を選択

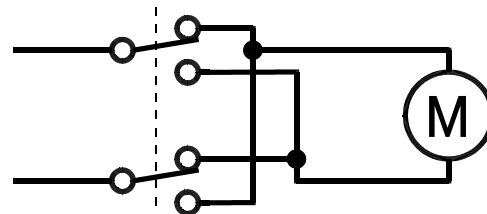
◇ただ回す場合



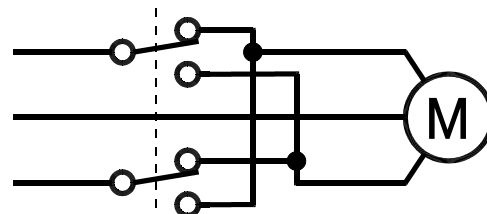
直流・単相交流
ブラシレス



三相交流



直流モータ



三相交流

直流モータを逆回転させるには、配線を交換するようなスイッチ回路をつくる。

三相交流モータは3本のうち2本を交換すると逆回転する。

単相交流は配線交換では逆転しないものが多い。

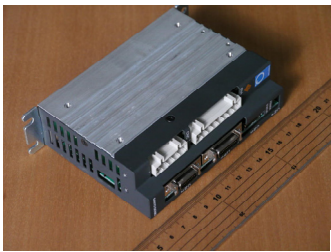
DCブラシレスも不可(逆転用の制御端子の場合有)

モータの選定

○ モータの種類を選択

◇きっちり回す場合

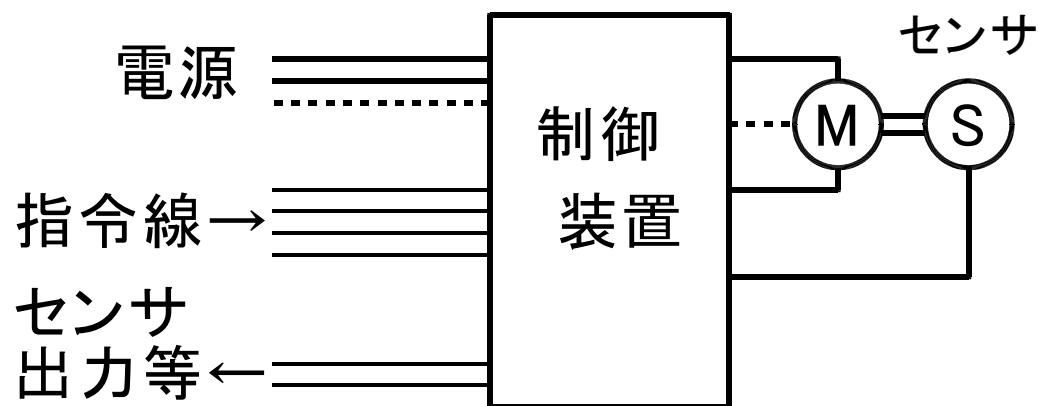
- 専用の制御装置を併用するなら、モータの方式はあまり問わない。セットのコストや、制御装置の使い勝手のほうが重要。
- 制御部を内製するなら、直流モータ、ステッピングモータが無難。
(どちらも簡単な回路でそこそこ回せる)



モータの選定

○ モータの種類を選択

◇ 制御装置を使う場合



制御装置とモータおよびセンサを直結する。

制御装置に供給する電源は、モータの交直とは関係ないが、一般にモータ電圧より高い。

指令はパルス、電圧、情報通信(シリアル、USB他)などの形式がある。角度、正転逆転、速度、トルクなど。

モータの選定

○ モータの大きさの選定

◇必要最低限

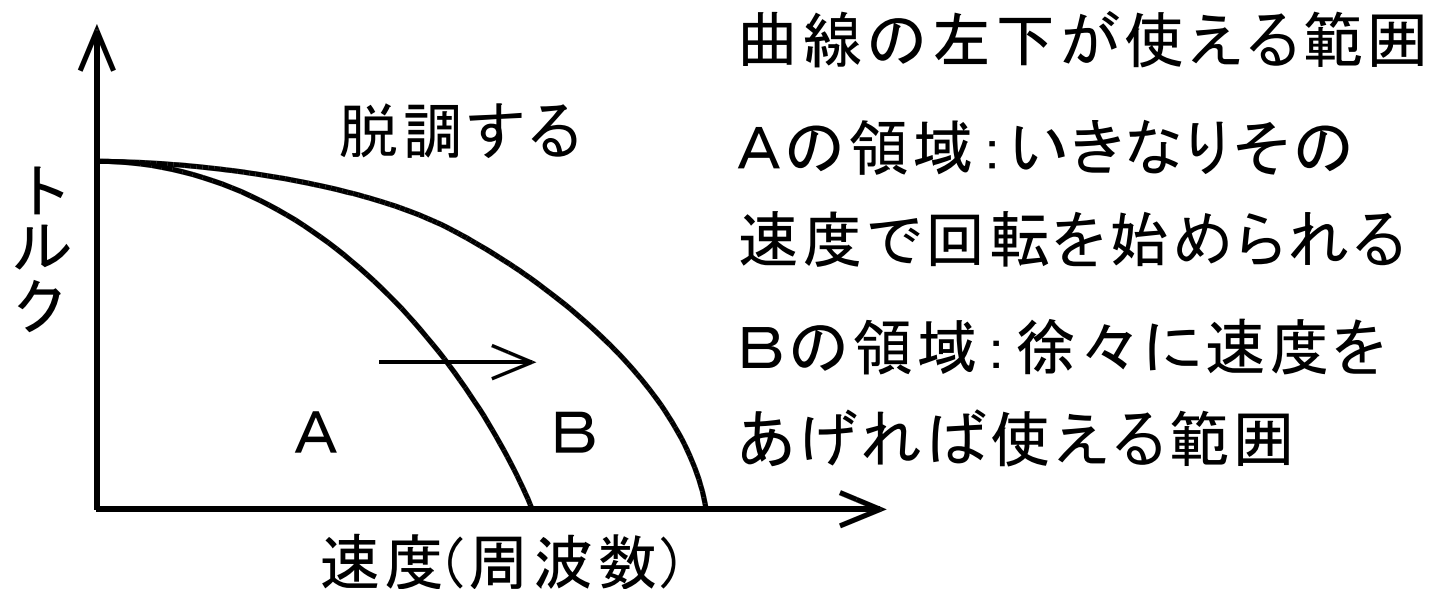
- ・ 大きすぎるモータはコスト増。
さらに重く大きくなるため、それが原因でより大きなモータが必要になることが多い。
(余裕は必要 : 動力見積の甘さ対策)
- ・ モータ仕様の**定格**と**最大(絶対、瞬時)**:
定格 : 連続して使って良い範囲
最大 : 短時間なら出せる範囲(定格より大)

モータの選定

○ ステッピングモータの場合

◇ 速度とトルクの関係

- ・ ステッピングモータは脱調しない範囲で使うように選定する。



モータの選定

○ その他留意点

◇ 制御装置を購入する場合

- ・ 制御装置の電源条件
- ・ 制御装置の入出力

◇ モータの機械的特性

- ・ 軸にかけられる力の上限
- ・ ギアヘッド付の場合は軸のでの位置
- ・ 形状（特に配線の出入り）



モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

◇ 直流モータの数式的に綺麗な入力は電流

$$\cdot [\text{モータのトルク}] = [\text{トルク定数}] \times [\text{電流}]$$

モータのトルクを調整したいときは
モータの電流を調整する。

→「モータの制御回路」はモータの特性に
対応した電流制御回路の場合が多い。

※電磁石の磁力は電流に比例する

※磁界の中で電線が受ける力も電流に比例する

モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

◇ 直流モータの電圧の式

・ [モータに加えた電圧] =

[モータの電気抵抗] × [電流] +
[起電力定数] × [回転速度]

※コイルとしての性質(インダクタンス)を省略

※電気抵抗 = 巻き線の抵抗 + ブラシ接触抵抗

・ 電圧が一定の場合：

回転が速くなると電流(トルク)が減る

モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

◇ 直流モータの電圧の式

- ・ $V = Ri \times Ks$ (i :電流(トルク), s :回転速度)

- ・ $V = \text{一定のとき}$ (モータに電圧源接続)

$s=0$ (停止) $\Leftrightarrow i$ が最大(V/R) $\rightarrow$ トルク最大

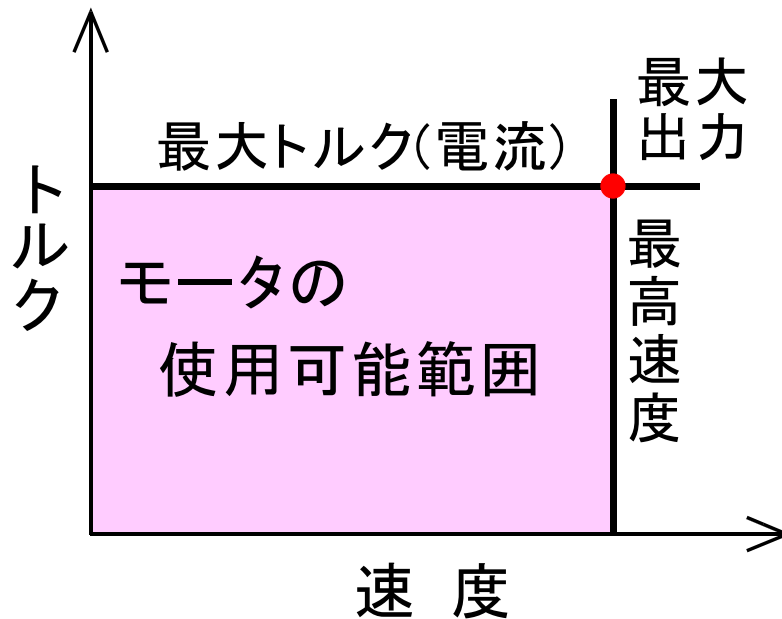
$i=0$ (トルク0) $\Leftrightarrow s$ 最大

$i = (V/R) - (K/R)s$ 右下がりの直線のグラフ

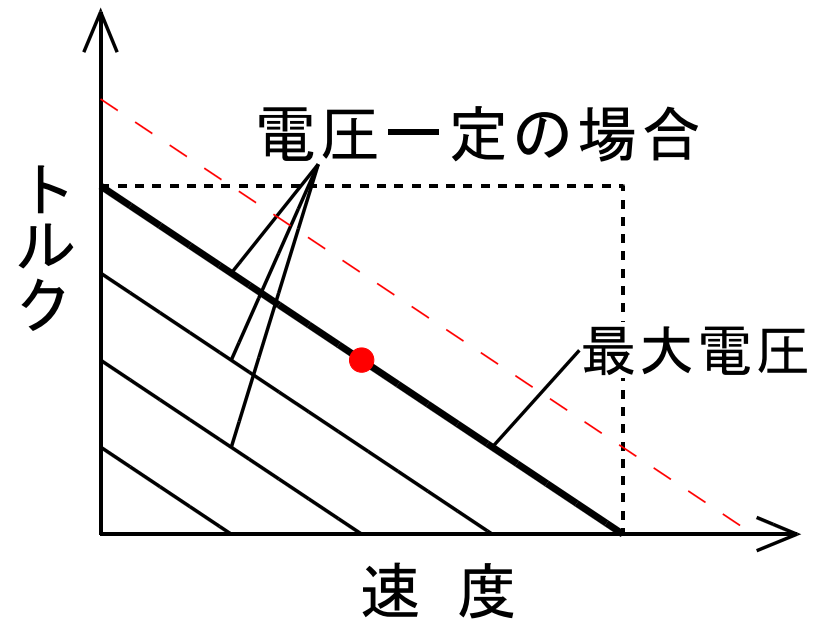
モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

◇ 直流モータの特性グラフ



モータを電流重視で使う
場合のイメージ図

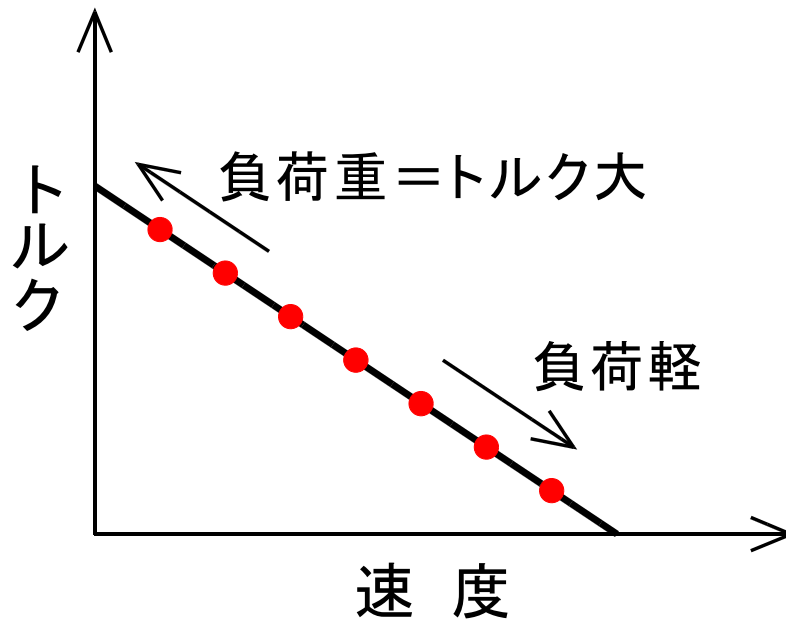


モータを電圧重視で使う
場合のイメージ図

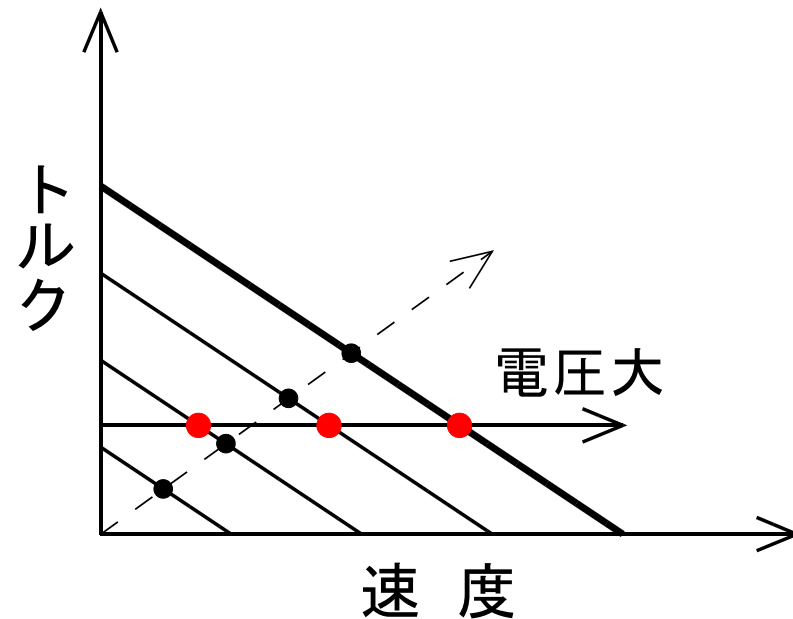
モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

◇ 直流モータの電圧を調整して使う場合



軸に負荷がかかると
回転が遅くなる。

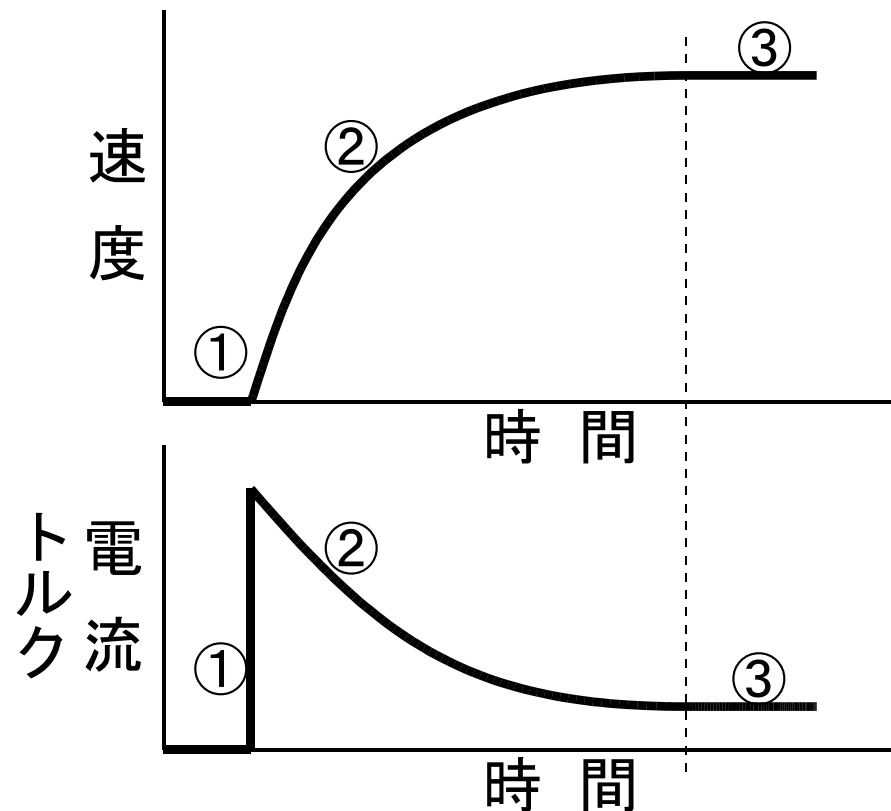


電圧を上げていくと
速度があがる。

モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

◇ 直流モータをスイッチオンしたとき



① スイッチオンとともに、電流が流れる。速度ゼロなので、大きな電流が流れる。

電流→トルク→加速する。

② 速度が上がるとともに電流が減りトルクが減って、加速が悪くなる。

③ 摩擦などとトルクが釣り合ったところで一定速度となる。

モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

◇ 直流モータの制御

- ・ モータの性能を引き出すためには、最大速度を超えない範囲でトルク(電流)を調整するようにする。
- ・ メカの制御をする場合も、特性を安定させやすいのは、トルク制御。

※特にロボット類

※市販の制御装置でも一般的に内部で使われる

モータの特性と制御

○ 直流モータの特性

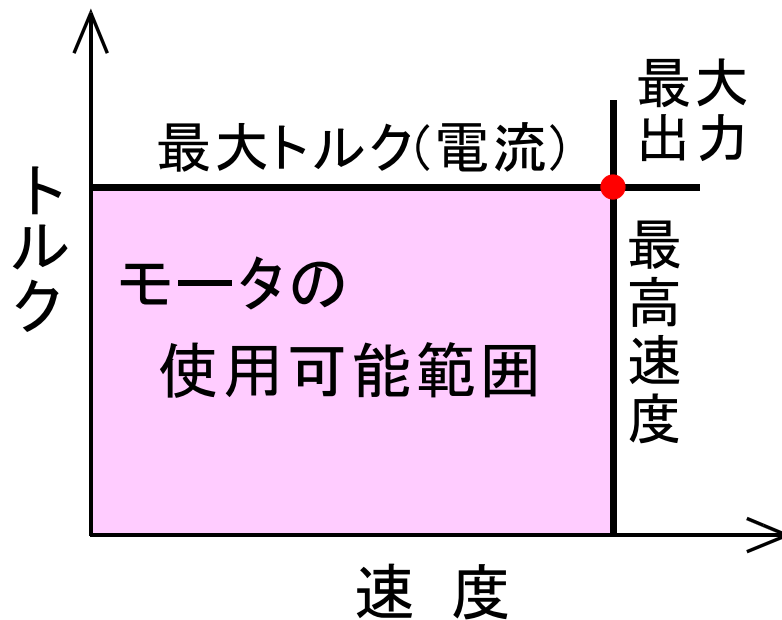
◇ 直流モータの制御

- ・ 動作が決まっている場合、負荷が一定の場合、細かな制御を要さない場合は、**電圧**の制御でも調整できる。
- ・ **速度が低いとき**の電圧のかけ過ぎに注意：
 - ・ 過負荷で回らないと**過電流**の恐れ。
 - ・ より危険なのは急な逆回転。
(原理的に倍の電流が流れる)

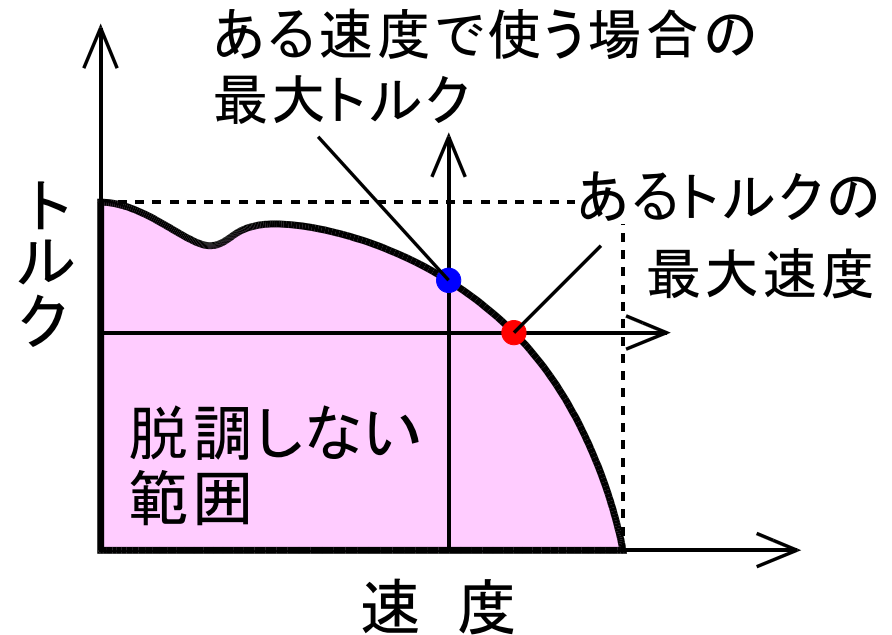
モータの特性と制御

○ ステッピングモータの特性

◇ 直流モータとの比較



トルクと速度は独立



トルクと速度が複雑な関係。
条件でこのグラフも変わる。

モータの特性と制御

○ ステッピングモータの特性

◇ 直流モータとの比較

- ・ 使用可能範囲はメーカーのグラフを読み取る。
(他のモータと違って[数値]では示されない
※速度ゼロのトルクは示される: 静止トルク)
- ・ 直流モータに負荷をかけると速度が落ちる。
ステッピングモータは脱調しない限りは
速度は落ちないが、限界を超えると脱調
して停止、トルクもほとんど無くなる。

モータの特性と制御

○ 交流モータの特性

◇多くは周波数に依存する

- ・同期式は完全に周波数に比例して回転。
- ・誘導式は周波数に比例した速度から、
負荷トルクに応じて若干速度が落ちる。
(すべりと呼ばれる)
速度ゼロでは、大きくすべりつつも、
トルクがあるため、加速はできる。

モータの特性と制御

○ 交流モータの制御

◇周波数を可変する制御

- ・周波数を調整することで速度調整。
- ・ただし、電圧が同じ場合は低速のときに大きな電流が流れる→電圧も下げる
＝VVVF制御インバータ

◇トルクを可変する制御

- ・ベクトル制御インバータ
数式処理で直流モータと似た制御を行う。

まとめ

○ モータの基礎・種類

- ・ 一般的なモータは電力を入力することで回転動力(トルク&速度)を出力する。
- ・ 磁気と電流の相互作用を用いたものが主に用いられている。
- ・ 大まかには直流/交流/ステッピングに分類されるが、かなり多くの原理、種類があり、それぞれ特徴が異なる。

まとめ

○ モータの活用

- ・ モータを使う場合、ある程度はモータの特性を知っておいたほうがよい。
- ・ モータの選定では、モータに要求されるトルクと回転速度が重要な数値である。
- ・ 実際の選定では動力を用いると便利。
- ・ 専用の制御装置を用いずに、自分で制御を行う場合は、特性に応じた電流/電圧の制御が必要である。