

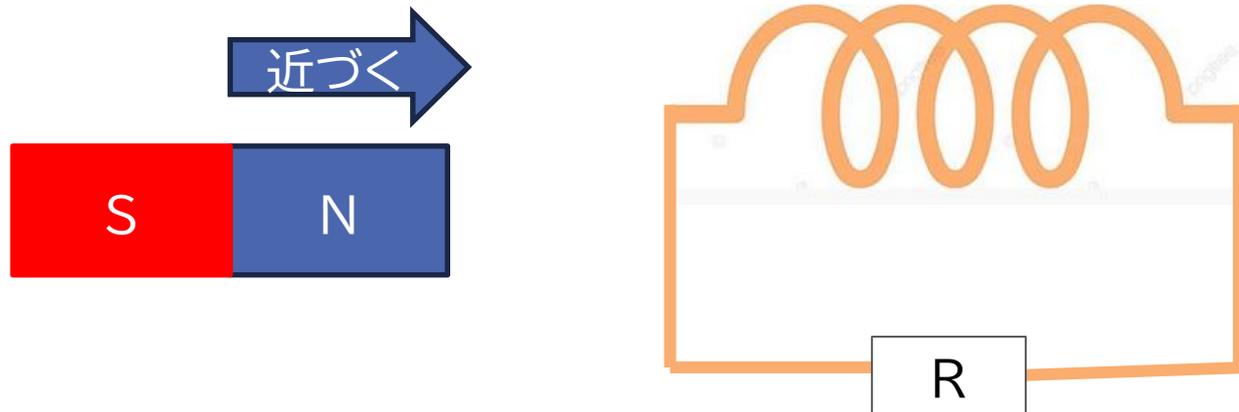
今日のテーマ 交流電源につなげる, 可変速で, 安くて, 丈夫な優れもの, 誘導モータ IM

- 動作原理を覚える
- 用途(どんなところで使われているか)を理解する
- 等価回路を使って理解する
- 可変速制御(インバータの役割を理解する)
- 製造製法を理解する
- 永久磁石モータとのすみわけを理解する

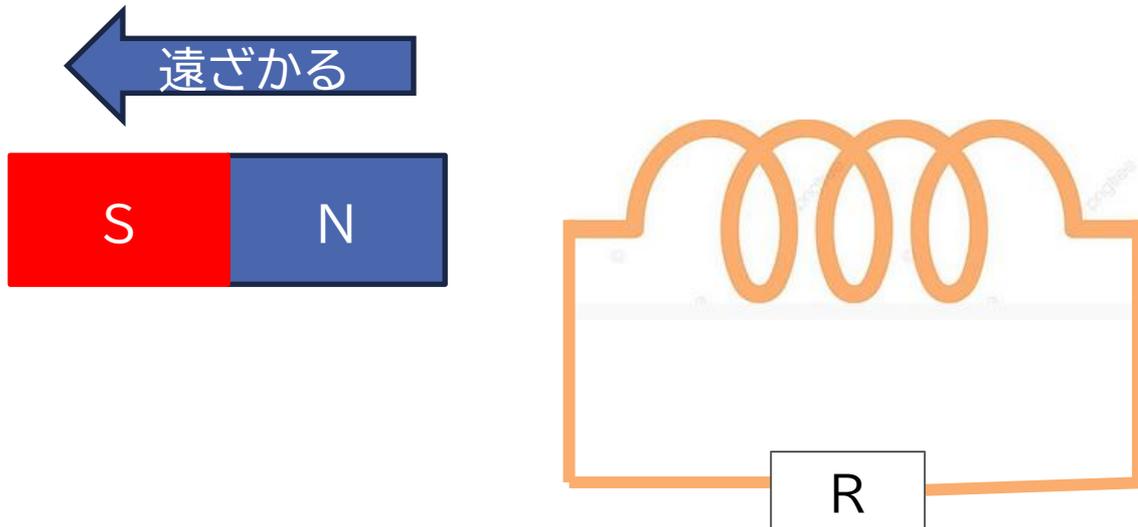
動作原理のその前に.... 誘導磁界の動きを覚えましょう

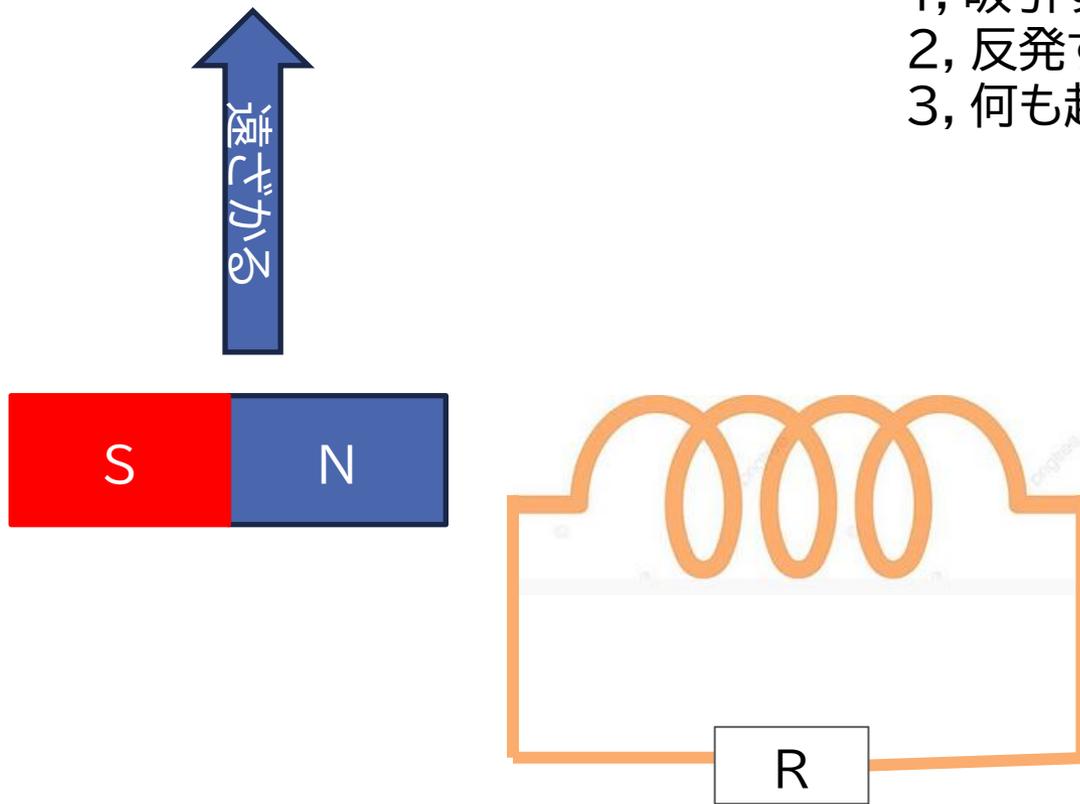
コイルに働く力は？

- 1, 吸引する
- 2, 反発する
- 3, 何も起きない



コイルに働く力は？
1, 吸引する
2, 反発する
3, 何も起きない





コイルに働く力は？

- 1, 吸引する
- 2, 反発する
- 3, 何も起きない

教科書でよくかけられるアラゴの円盤ですが、

実際にみてみましょう

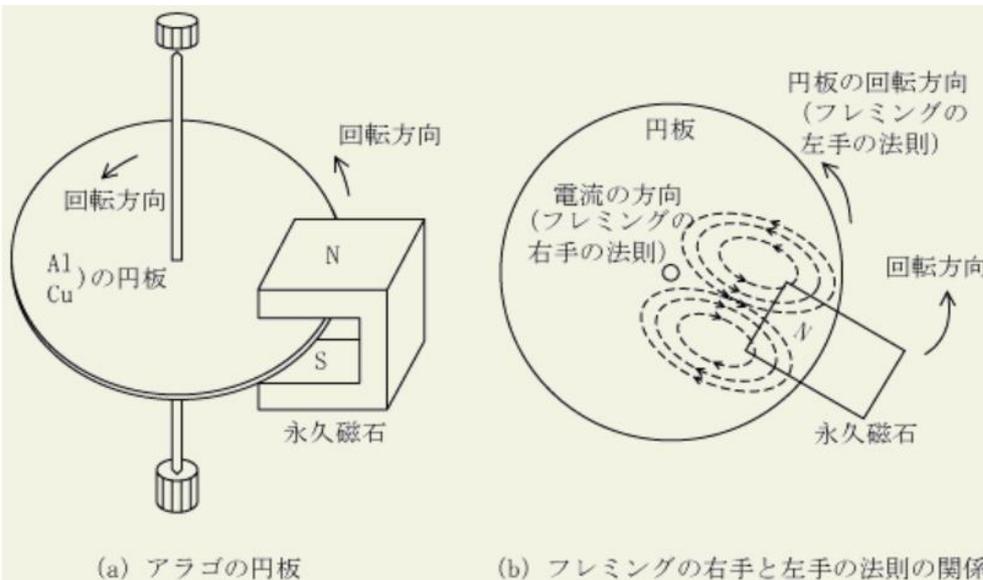


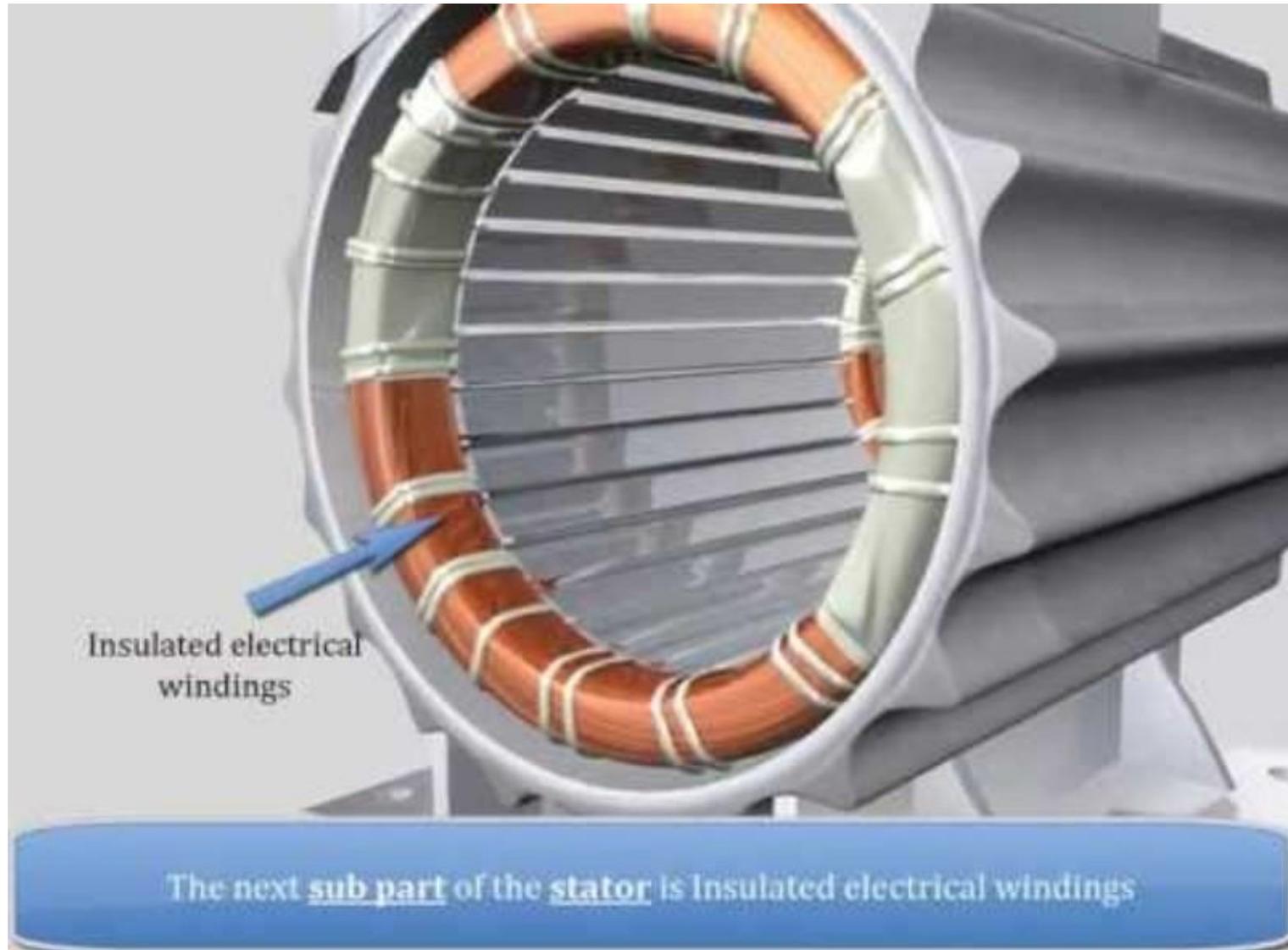
<https://youtu.be/xX7Wyzxp5U8?si=K1YHKWJdpa34G1EU>

磁石があれば、家でもできる



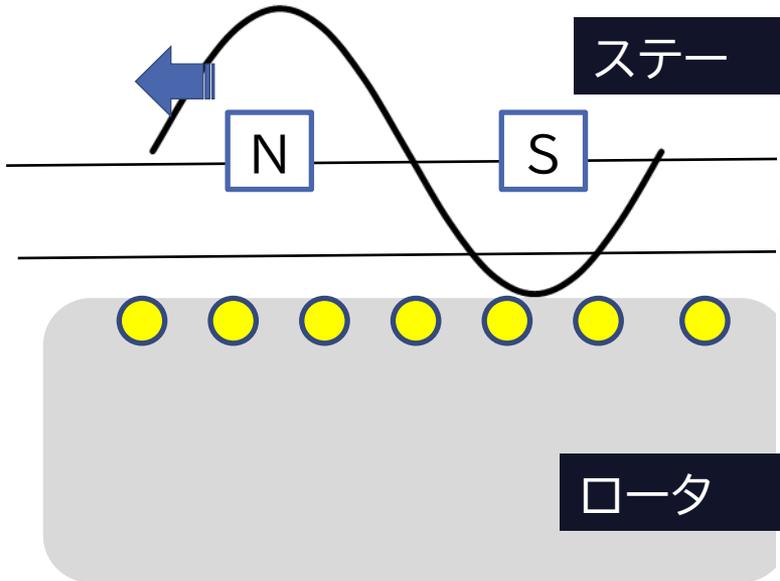
<https://youtu.be/xX7Wyzxp5U8?si=K1YHKWJdpa34G1EU>



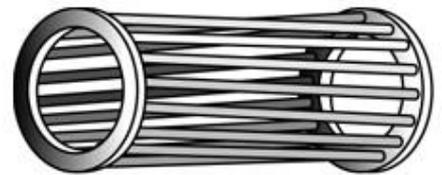
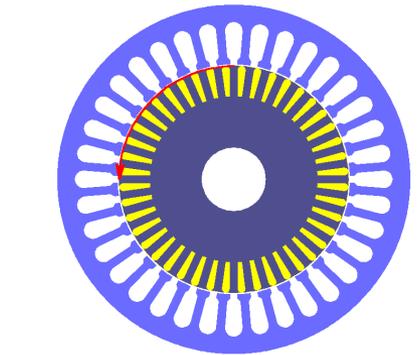
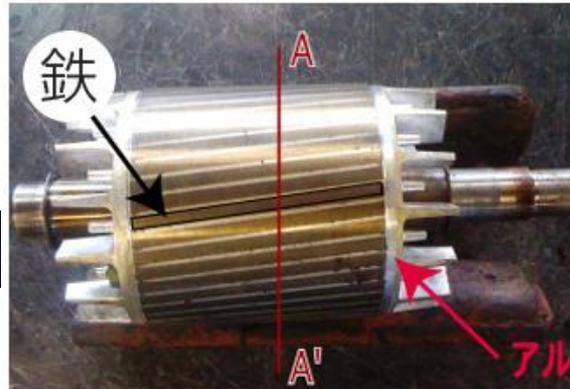
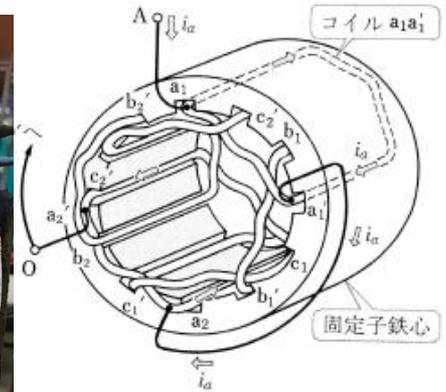


https://youtu.be/CL2YEx4ul80?si=jEg5F2sWRL_m5Yuj

ステータ：コイルで、ロータに対して
進行磁界を作ります



バーとエンドリングで短絡した回路に
渦電流（誘導電流）が流れます

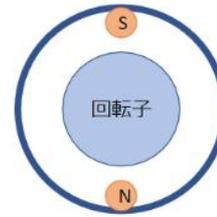


交流（通常は3相）
を流すとステータコイルによって
進行磁界が作られる

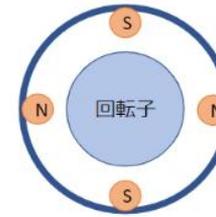
回転数rpm

$$= 60 \times f \quad / \text{極対数}$$

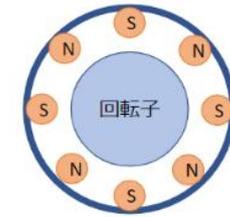
$$= 120 f \quad / \text{極数}$$



2極
1極対

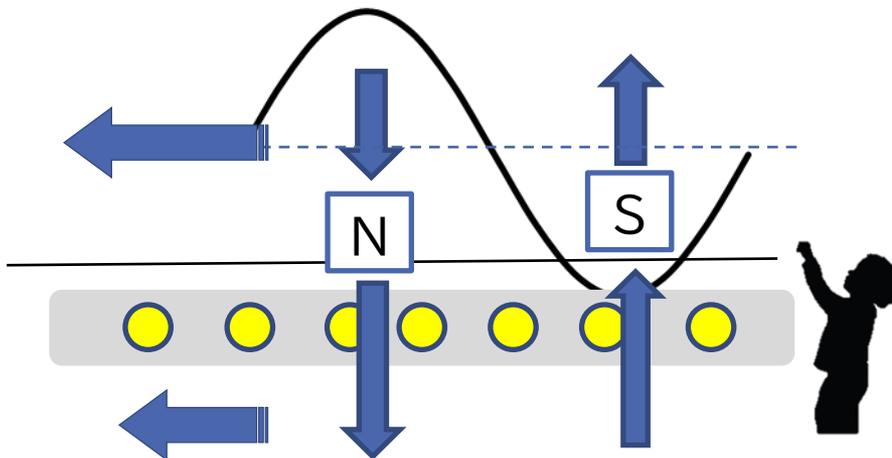


4極
2極対

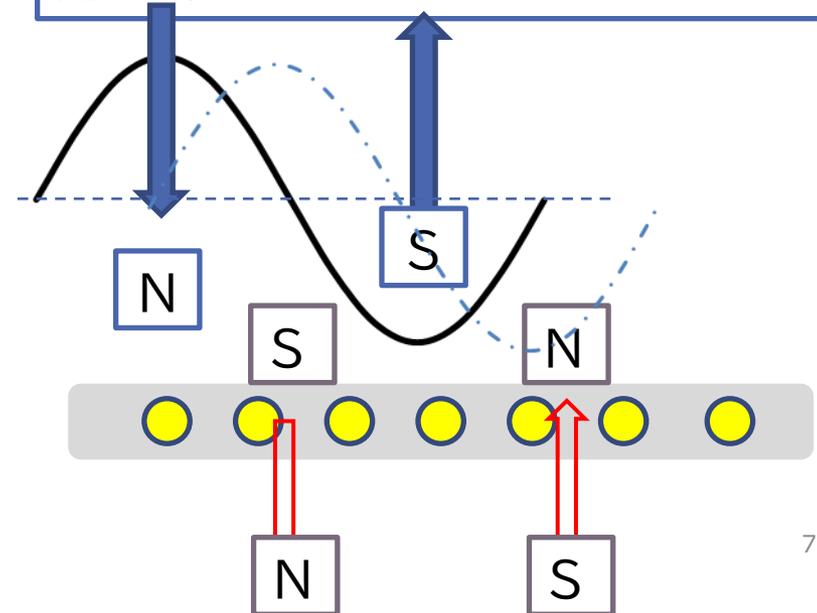


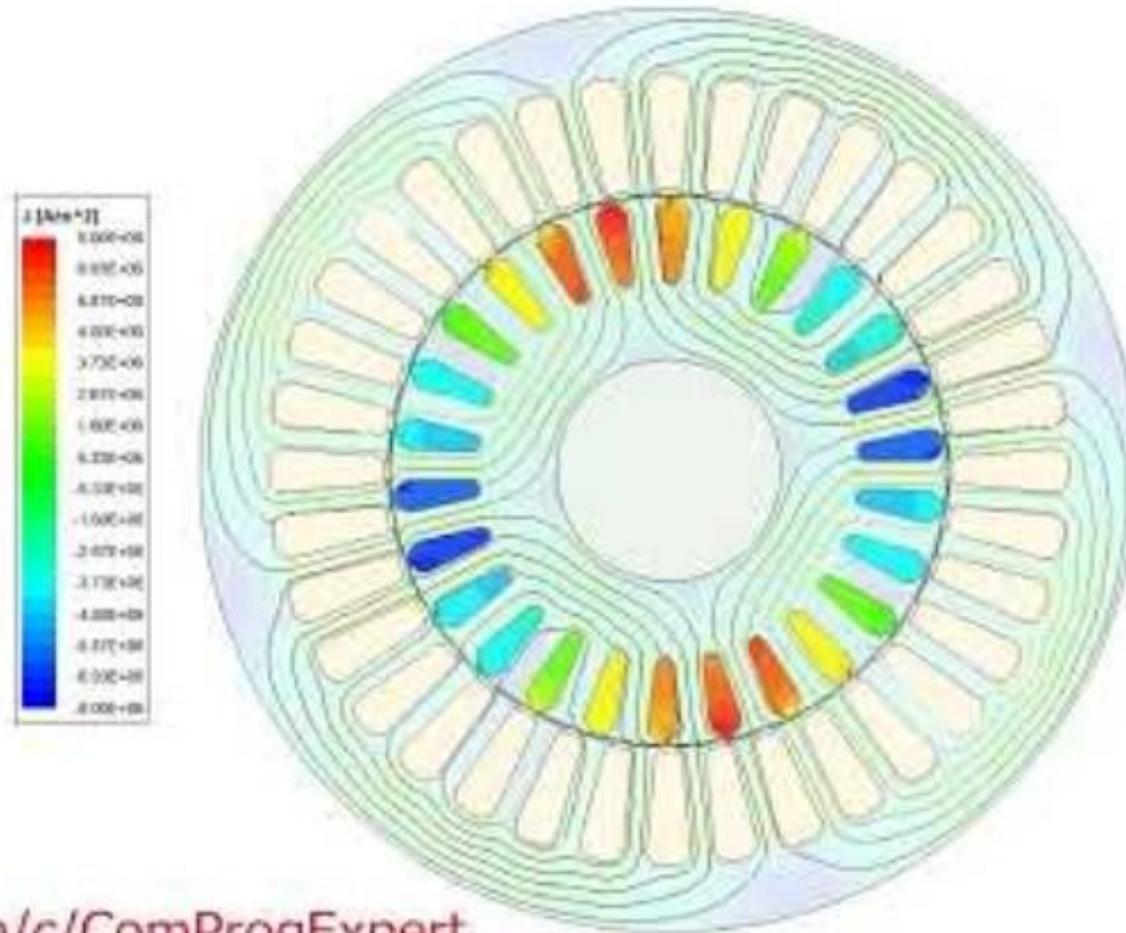
8極
4極対

ステータの進行磁界より、ロータが遅く回転すると、
ロータにいる人から見れば変動磁界が逃げて
いくように見える。



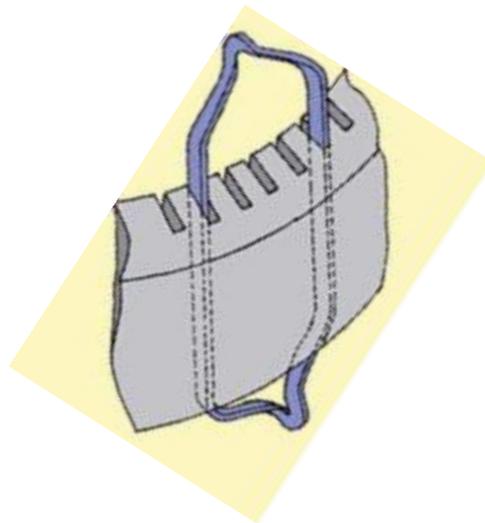
電磁誘導の法則で、逃げて減っていく
磁束を保持しようと、渦電流を流すが
時定数があるので、磁場の発生は少し
遅れて発生する。



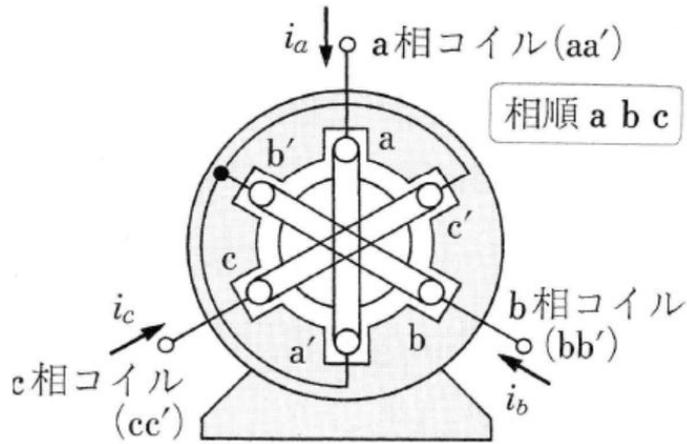


[YouTube.com/c/ComProgExpert](https://www.youtube.com/c/ComProgExpert)

低圧(~440V)分布巻きの一般的な外観図

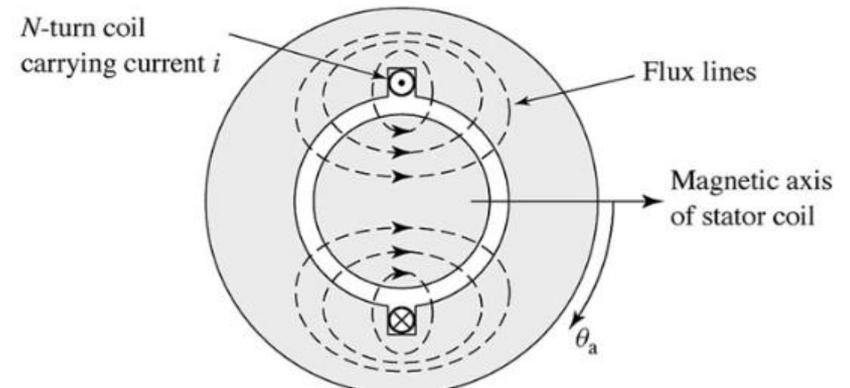
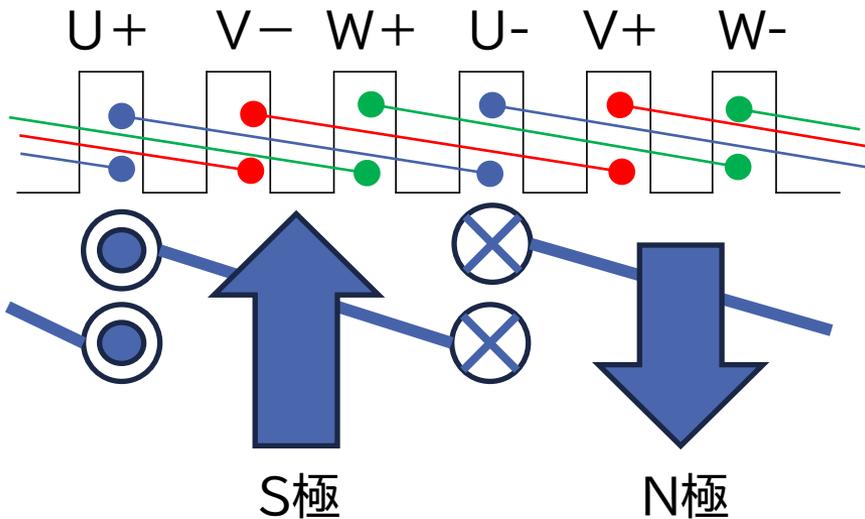


動く磁界をどうやって作りますか(3相コイルによる進行磁界)



かなり簡単化した巻き線の図

2極 巻線
每極 每相1スロット



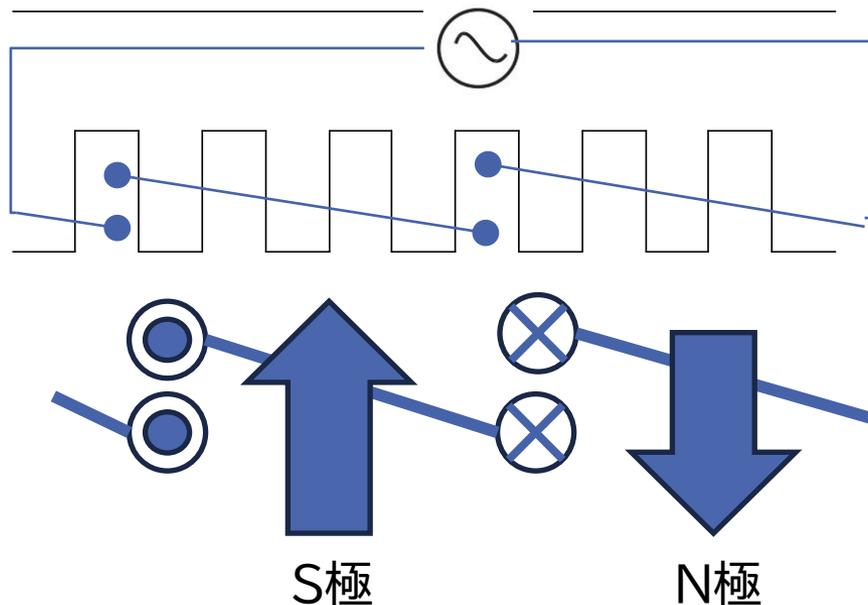
SCILABで やってみましょう

- ①正弦波をプロットする(練習です)
矩形波だとどうなるかは 参考まで

`simple_sin_wave.sci`
`simple_square_wave.sci`

- ②正弦波電流を流したコイルをイメージしてみる

`sin_withtimechange`

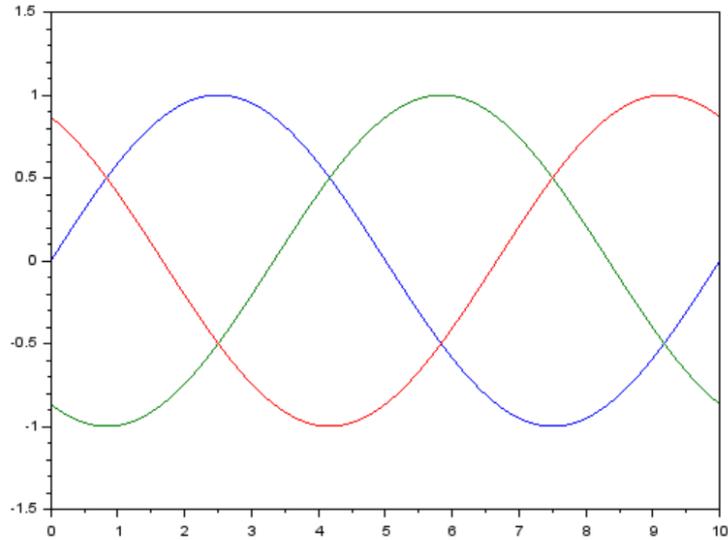


- 3相の巻き線の図(静止)

3phase.sci

- 3相コイルに電流を流した図

3phase_with_timechange.sci

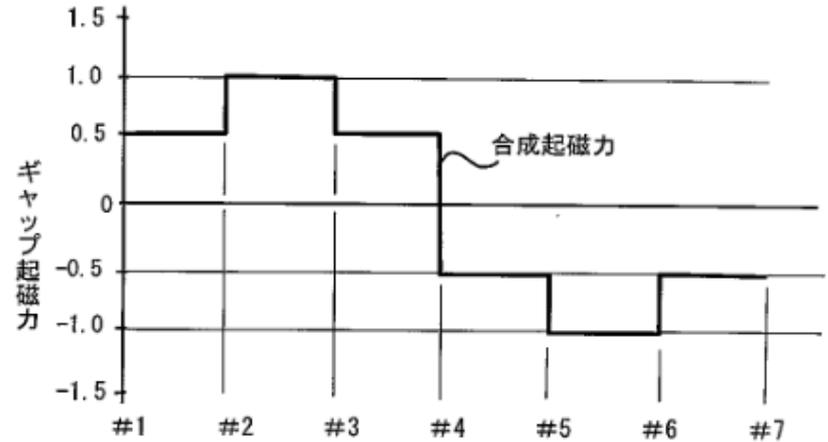
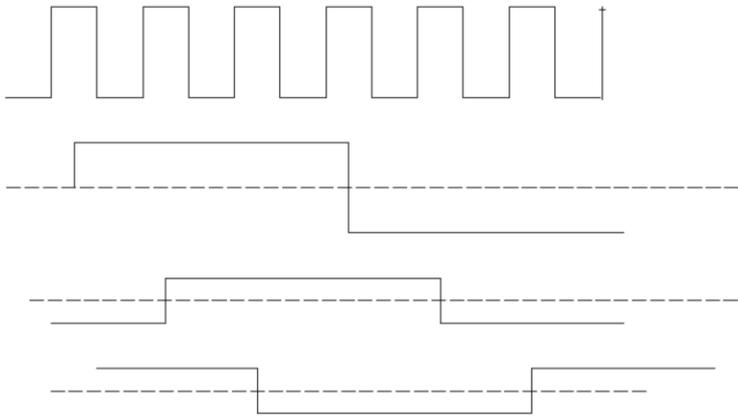


- 3相コイルに電流を流して足した図

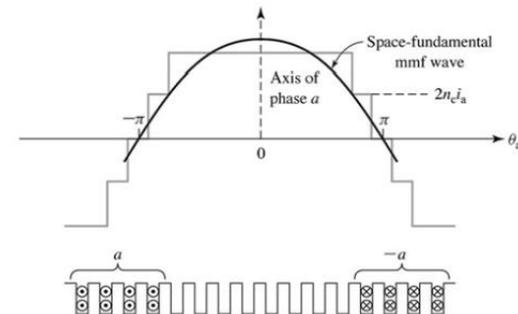
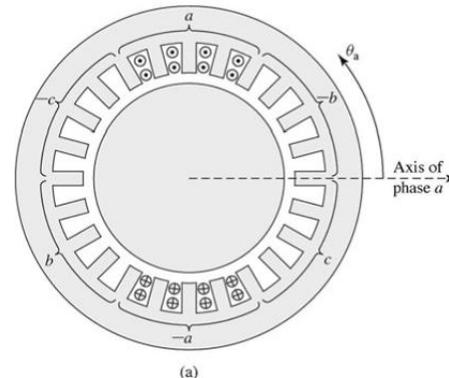
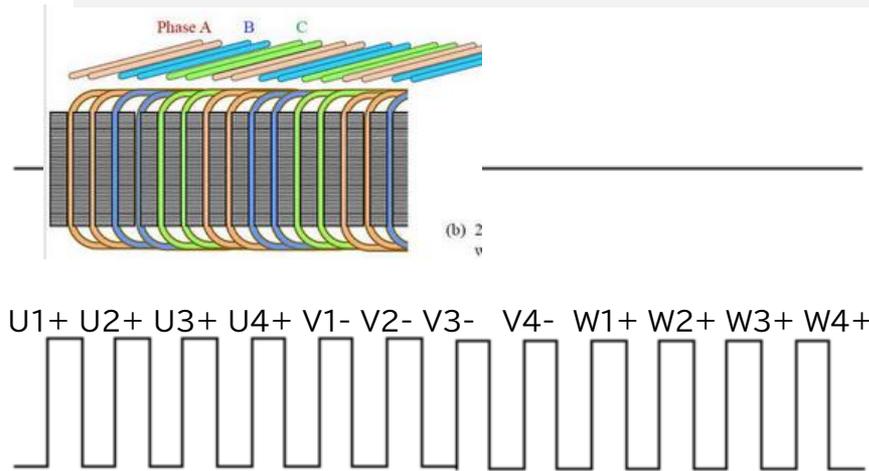
3phase_with_timechange_total.sci

実際の巻き線はもう少し複雑です

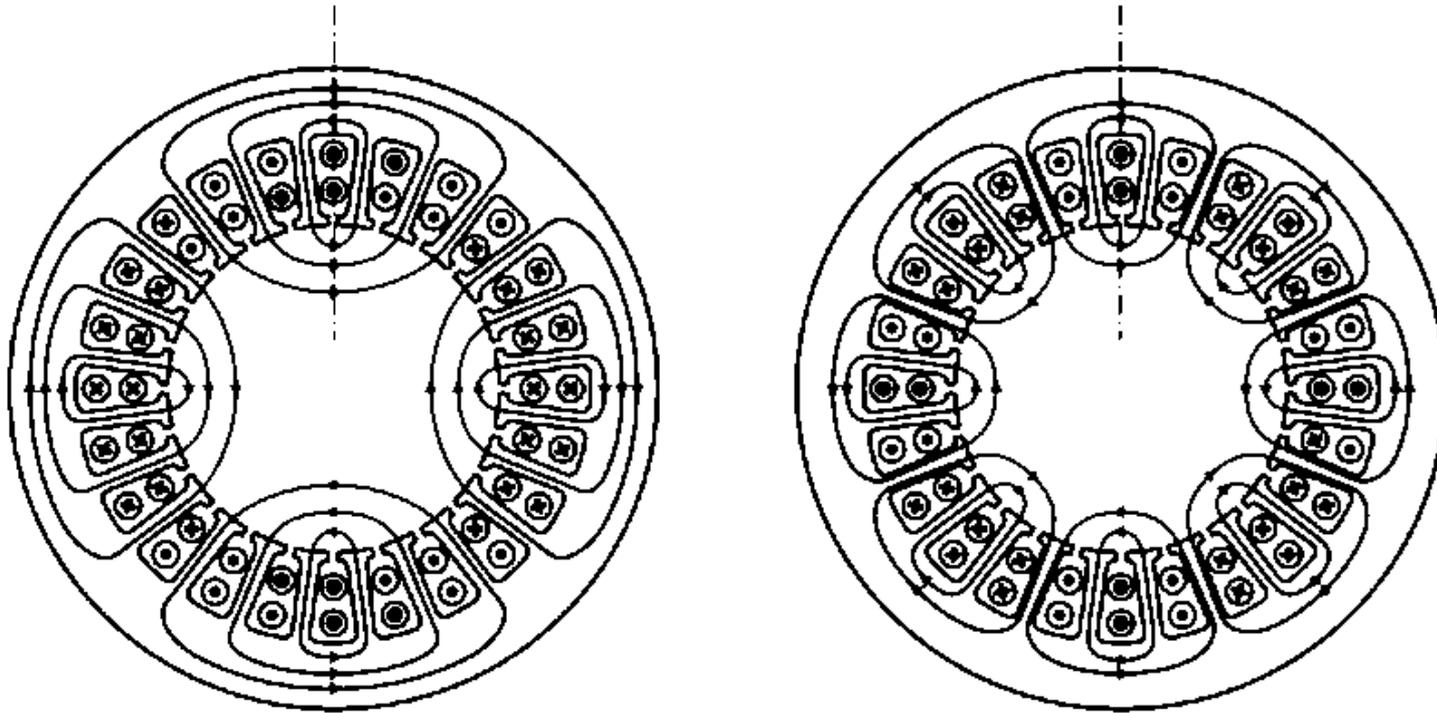
毎極毎相スロット数=1 UVW だと 波形が階段状になって正弦波+高調波になる
高調波は音や振動の要因や、鉄損を増やすためこれをなくしたい

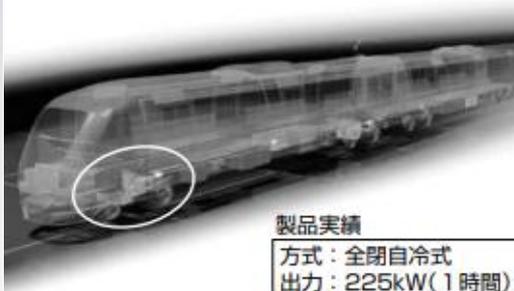


毎極毎相3~4 UUUU VVVV WWWWとして滑らかな正弦波に近づける

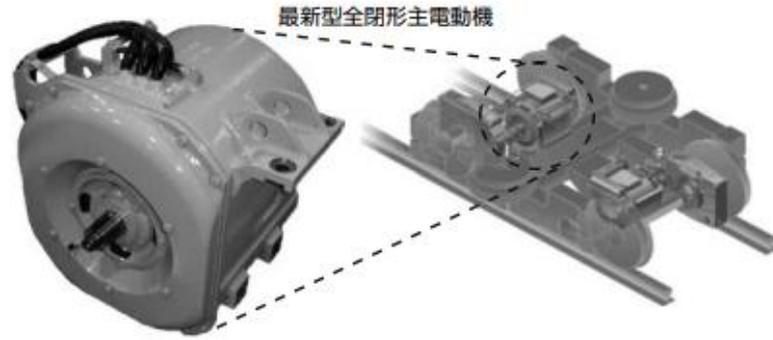


多極設計にするときの事例





製品実績
方式：全閉自冷式
出力：225kW(1時間)
質量：605kg



最新型全閉形主電動機

ROTOR

回転子は、運転時抵抗を抑制しつつ始動時特性を考慮したスロット形状。さらには、スロット数も最適化。

CORE

鉄心は、発生ロスの小さい材料を採用し、磁束の流れを見直し形状を最適化。

COIL

電線は、電線占積率の向上による電線断面積の増加や、渡り部の短縮により、抵抗を抑制。

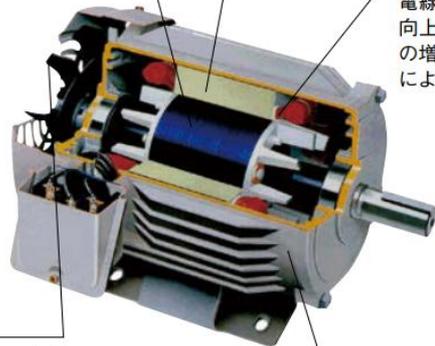


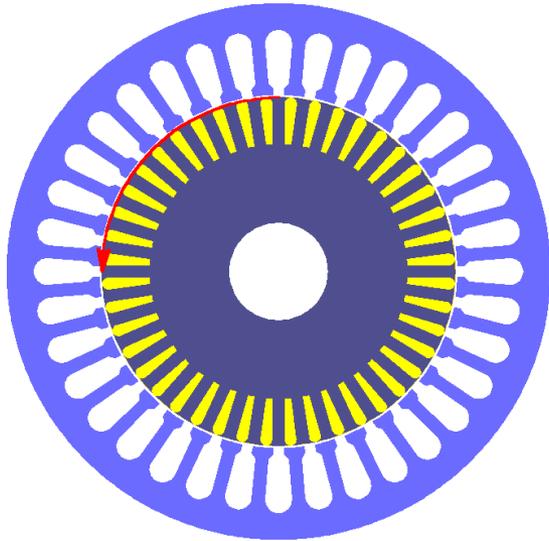
FAN

冷却ファンは、冷却性能と機械的ロスのバランスを考え、形状を最適化。

FRAME

フレームは、磁束を通しやすく高効率設計に適した銅板製。





- 3相の電力配線からつなげば、そのまま使える！
ファン、ポンプ、コンプレッサなどで活躍
- 直流機のようなブラシがなく摩耗が無い(メンテ不要)
- 回転子をダイカストで作れるので作りやすい
- 磁石がないので安い
- 磁石がないので組立てやすい(回転子の吸引力が無い)
- 磁石が無いので高温減磁も気にしなくて良い
- コイルが回転しないので堅牢で高速化もしやすい
- インバータをつないで 電圧、周波数を制御すれば、
回転数、トルクも思い通りに制御できる
V/f制御、ベクトル制御
- 回転数は演算で推定できるのでセンサレスでも制御できる



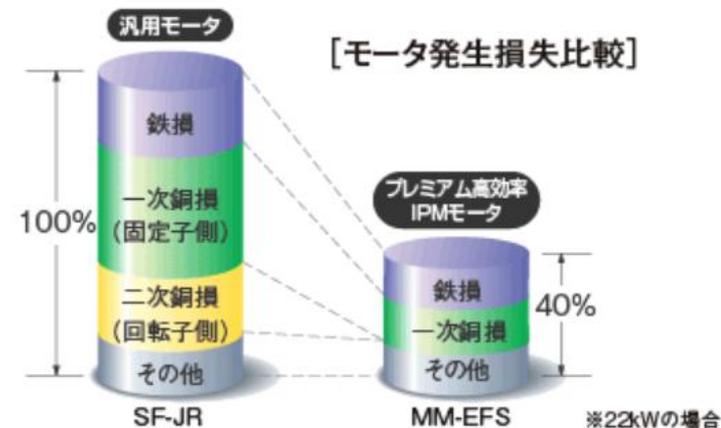
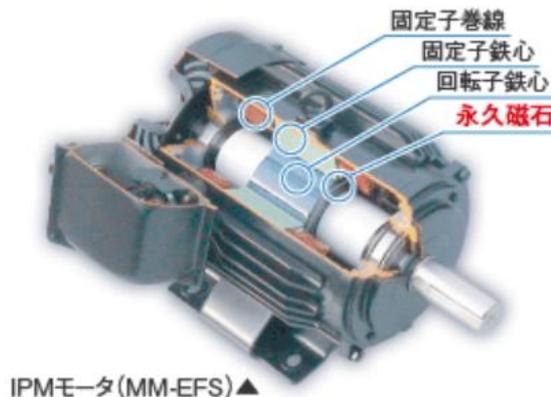
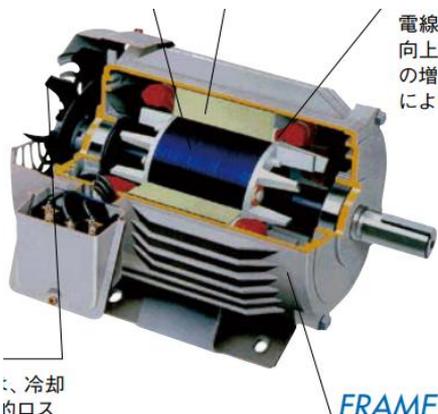
磁束作るのに励磁電流が必要
 トルクを流すのに2次銅損が必要
 (回転子にながれる損失。回転子がアルミ製でもなぜか銅損)

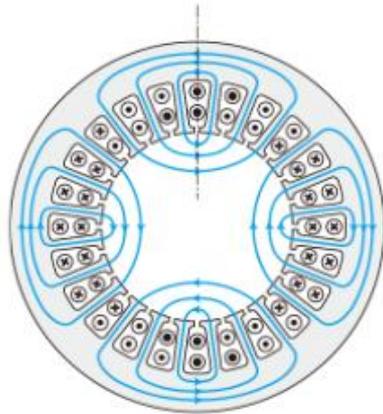
低速大トルクが苦手な誘導モータ

誘導モータ : 電磁石 しかし V/fで磁束を変えることができるという利点がある
 永久磁石モータ : 永久磁石

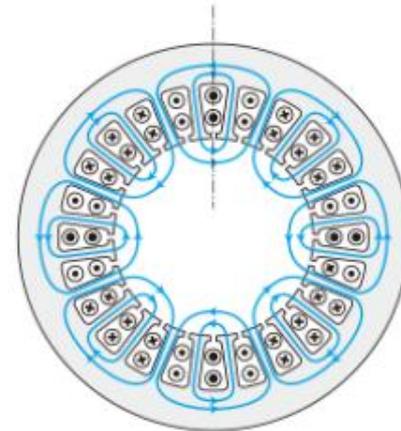
しかし高速低トルク域では 優劣逆転

誘導モータ : 電磁石 V/fで磁束を弱めて、鉄損を抑制
 永久磁石モータ : 永久磁石 磁石の誘起電圧 $d\Phi/dt$ を打ち消す電流必要、鉄損大

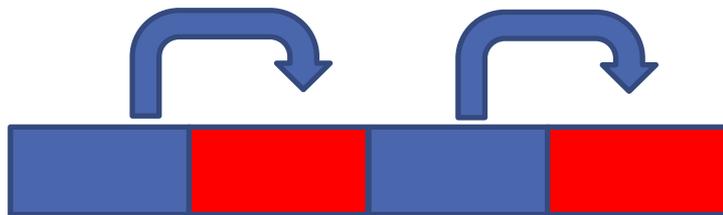




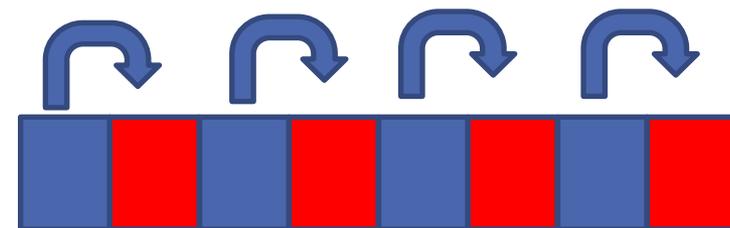
(a) 4極巻線



(b) 8極巻線



極数が少ないと波長が長いので、
1極の磁束が多い＝磁気回路幅が太くなる

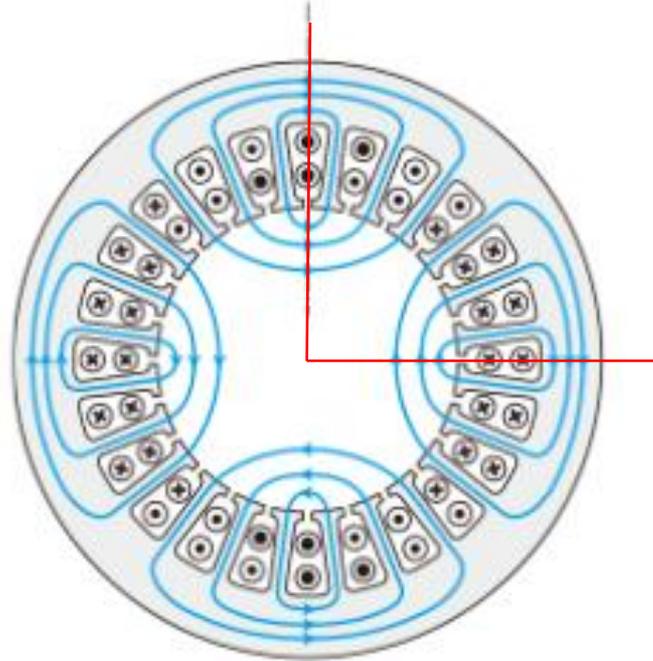
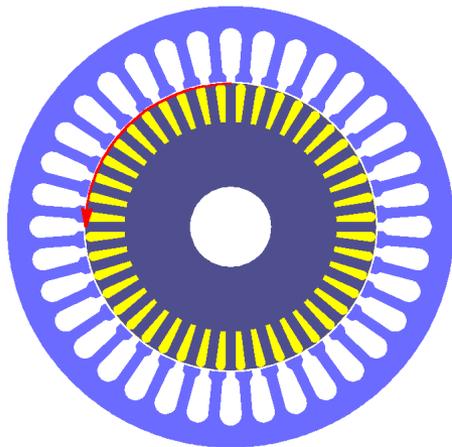


極数が多いと波長が短いので、
極の磁束が少ない＝磁気回路幅が細い
その分ロータ径を大きくできる
＝トルクが増やせる

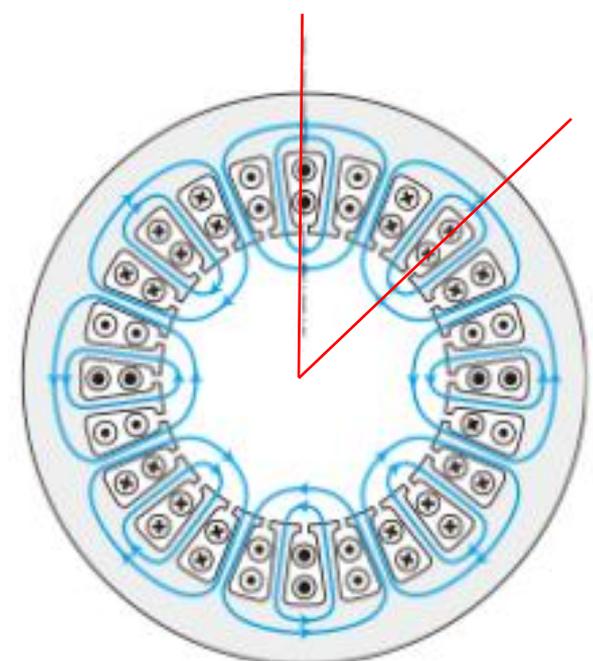
1mmのギャップで1Tをつくるには800ATは必要(モータサイズによらず空隙で決まる)

励磁極数が増えると、少ないコイル数で800ATを作ることになる

小型モータでは1極あたりのコイル面積が足りなくて、熱限界から多極化できない
磁束を作るために極数分だけ励磁電流を流すので多極にすると力率が低下する



(a) 4 極巻線

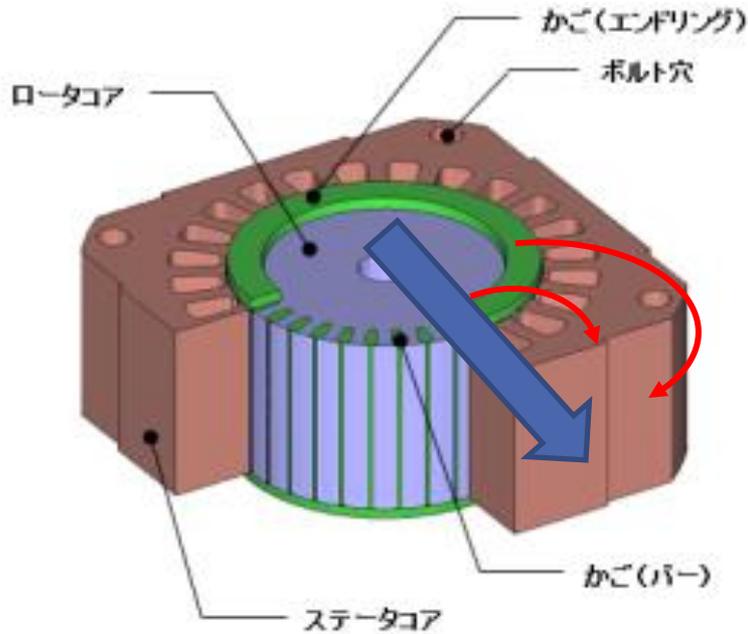


(b) 8 極巻線



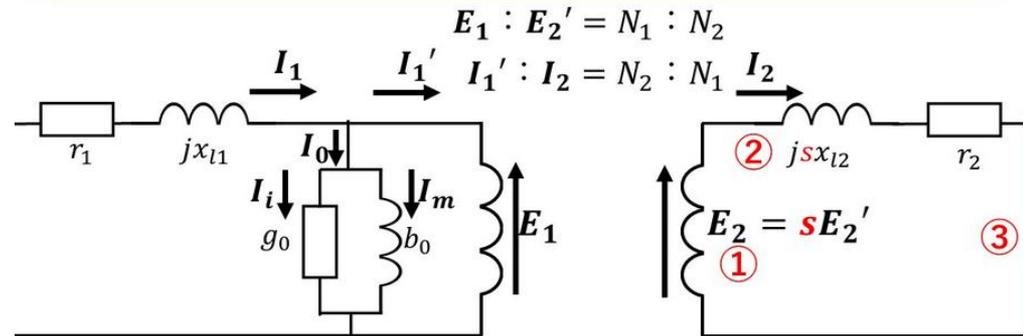
IMは多極にするとトルクは増えるが、力率は悪化する
 2極： 水ポンプ 回転数あげて小型化
 4極： ファン
 6極： ファン・コンプレッサ 高トルク狙いで多極

極数 [P]	出力 [kW]	わく番号	電圧 [V]	周波数 [Hz]	負荷特性									定格電流 [A]	定格回転速度 [min ⁻¹]	定格トルク (N·m)	最大トルク [%]	始動トルク [%]	始動電流 [A]	効率クラス [IEコード]
					50%負荷			75%負荷			100%負荷									
					電流 [A]	効率 [%]	力率 [%]	電流 [A]	効率 [%]	力率 [%]	電流 [A]	エネルギー消費効率 [%]	力率 [%]							
2極	0.75	80M	200	50	2.12	80.8	63.3	2.57	82.9	76.3	3.12	82.8	83.8	3.2	2855	2.5	348	378	23.7	IE3
			200	60	1.89	81.4	70.5	2.39	83.3	81.6	2.99	82.9	87.3	3.1	3430	2.1	327	312	20.8	
			220	60	1.92	80.4	63.7	2.33	83.3	76.1	2.82	83.8	83.2	2.9	3465	2.1	390	382	22.9	
			230	60	1.96	79.8	60.2	2.33	83.1	73.0	2.77	84.1	80.9	2.9	3470	2.1	423	419	24.0	
4極	0.75	80M	200	50	2.66	82.2	49.4	3.04	84.0	63.5	3.55	83.8	72.8	3.6	1420	5.0	303	390	24.6	IE3
			200	60	2.15	86.2	58.3	2.62	86.9	71.4	3.19	86.0	78.8	3.3	1710	4.2	274	315	21.4	
			220	60	2.31	84.7	50.3	2.67	86.5	63.8	3.12	86.6	72.8	3.2	1730	4.1	330	386	23.9	
			230	60	2.43	83.6	46.3	2.74	86.1	59.8	3.14	86.6	69.2	3.2	1735	4.1	358	424	25.2	
6極	0.75	90L	200	50	2.78	82.2	47.3	3.20	84.1	60.4	3.74	83.8	69.0	3.8	960	7.5	239	203	21.0	IE3
			200	60	2.33	84.8	54.8	2.83	85.7	67.1	3.45	84.8	74.0	3.5	1150	6.2	211	152	17.3	
			220	60	2.47	83.4	47.8	2.86	85.3	60.6	3.35	85.3	68.9	3.4	1160	6.2	254	186	19.5	
			230	60	2.57	82.5	44.4	2.91	85.0	57.1	3.35	85.3	66.0	3.4	1165	6.1	277	204	20.7	



誘導機と変圧器の等価回路の違い

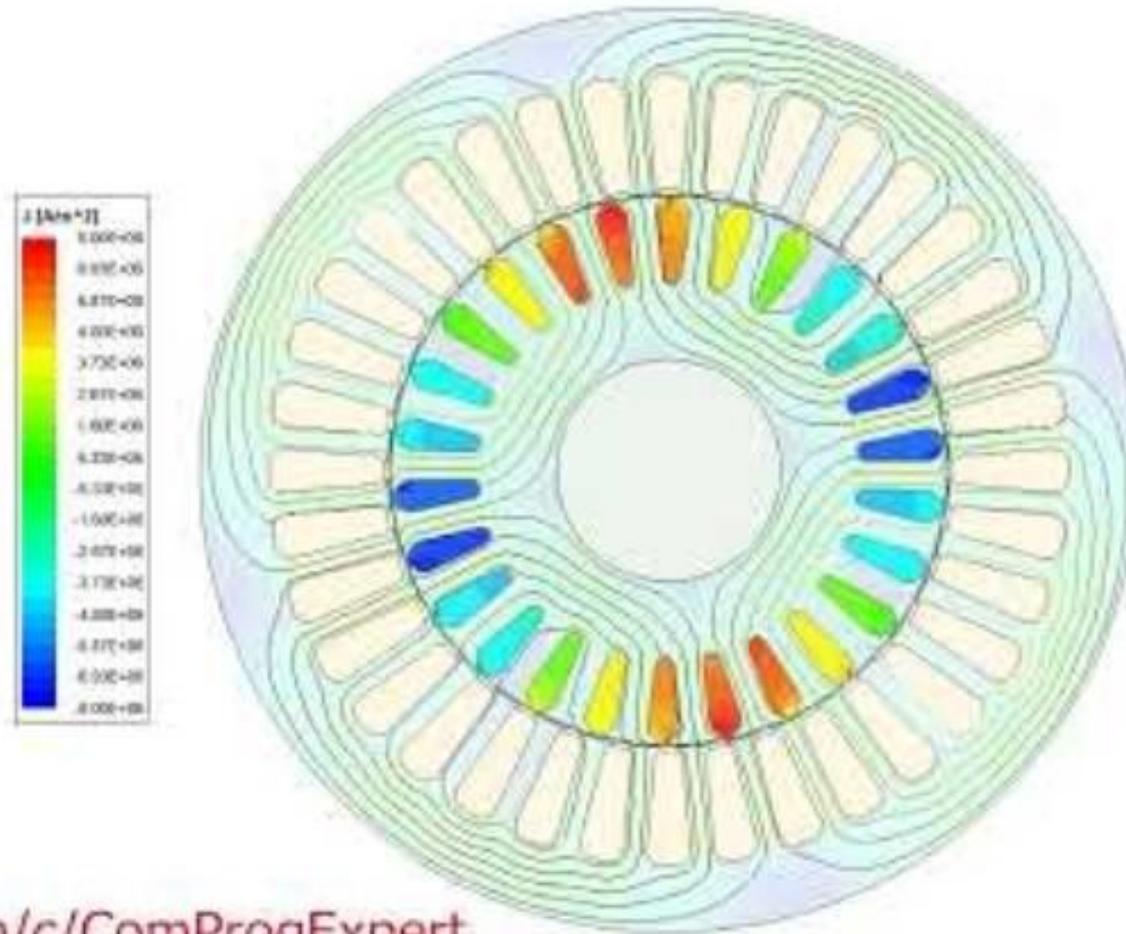
- ① 回転子の電圧 E_2 は、巻数比で決まる電圧 E_2' にすべり s をかけた大きさになる
- ② 回転子の漏れリアクタンスにはすべり s がかかる
- ③ 通常、誘導機は回転子が短絡されている



周波数 f で励磁

周波数 sf で
電磁誘導される

$$S(\text{すべり}) = \frac{\text{固定子の磁界速度} - \text{回転子の速度}}{\text{固定子の磁界速度}}$$



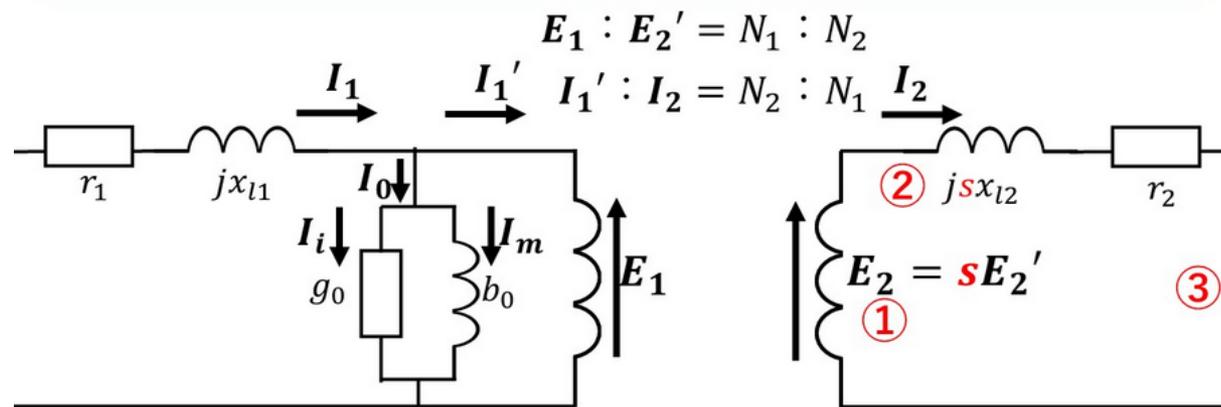
[YouTube.com/c/ComProgExpert](https://www.youtube.com/c/ComProgExpert)

$$N_S = \frac{120f}{p}$$
$$s = \frac{N_S - N}{N_S}$$

N_S : 同期速度[rpm] f : 周波数[Hz] p : 磁極数

- $s=0$: $N = N_S$ より、回転磁界が巻線を切らないためトルク $T=0$ となる。
- $0 < s < 1$: $N < N_S$ より、誘導起電力が生じてトルク T が発生する。⇒誘導電動機(運転中)
- $s=1$: $N = 0$ より、回転子が停止しているが、回転磁界との相対速度により起電力が生じてトルクが発生するため、徐々に回転速度を上げる。

* $N > N_S$ の場合、誘導発電機になる。



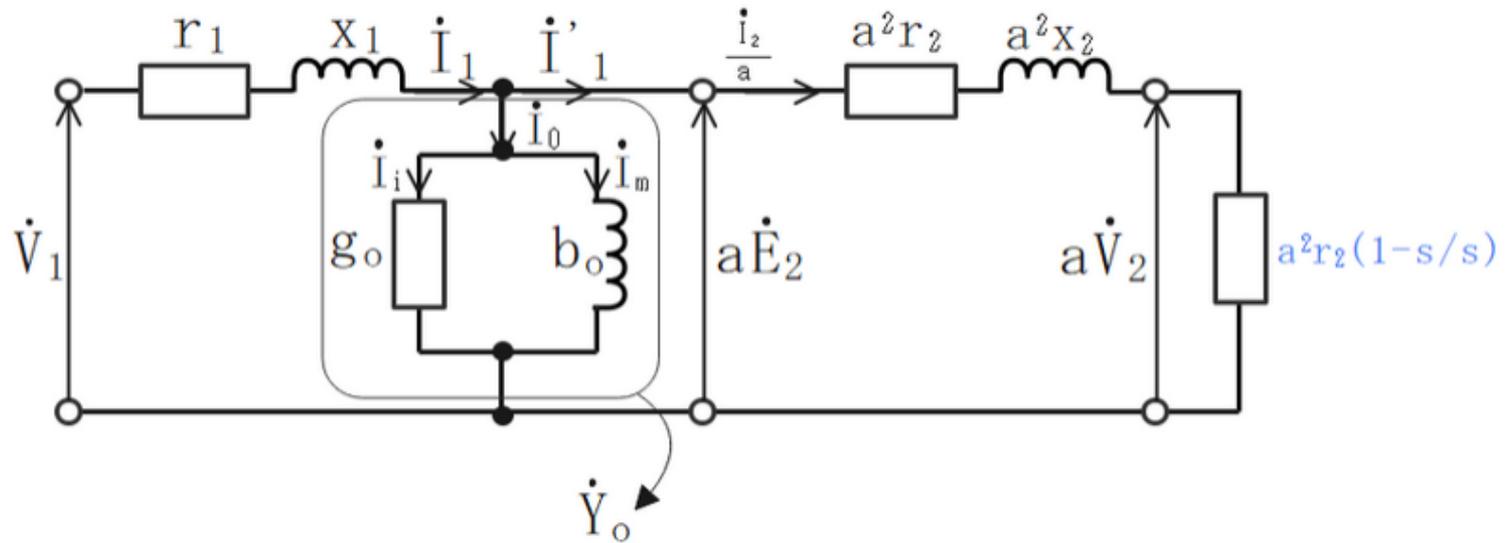
$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}$$

物理的な表現

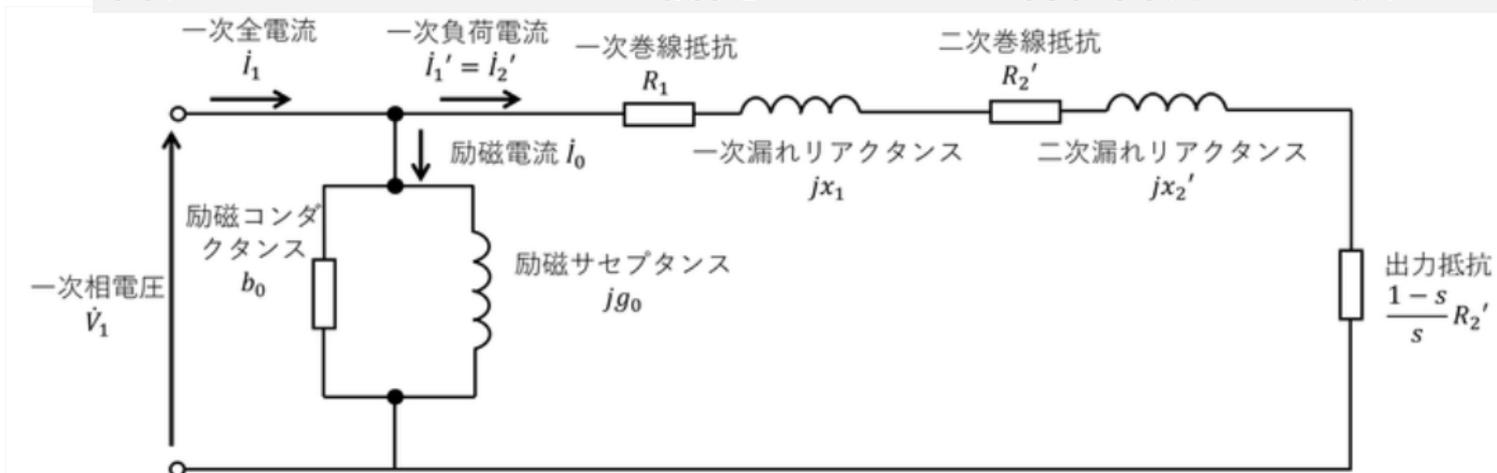
$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2/s)^2 + (x_2)^2}}$$

数式上等価な表現

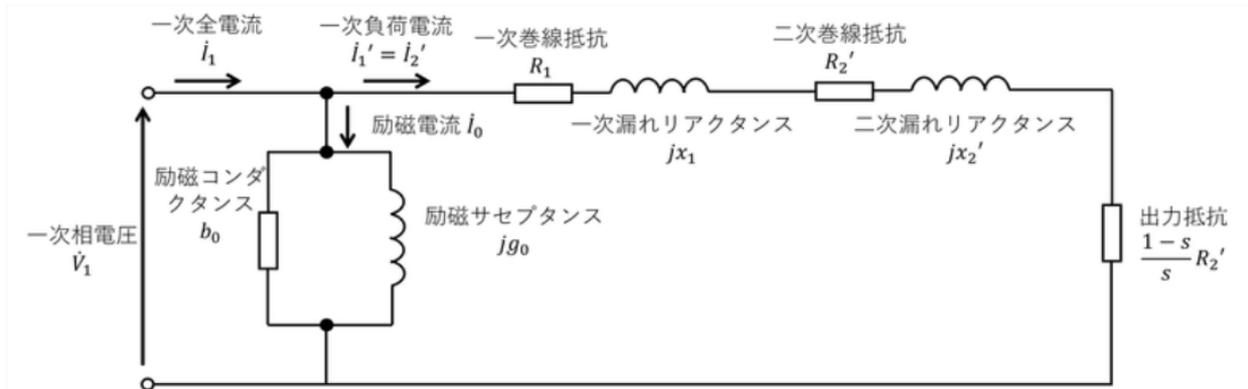
T型等価回路(実際に近い)



計算がしやすいのでL型を前提にしたトルク特性計算がよく使われる



L型等価回路から導かれる公式



$$\dot{I}_2' = \frac{V_1}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right) + j(x_1 + x_2')}$$

2次電流

$$R_2' + \frac{1-s}{s}R_2' = \frac{R_2'}{s} \quad \text{2次回路を便宜上分解}$$

$$I_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

$$P_{c2} = 3R_2' I_2'^2 \quad \text{2次銅損}$$

$$P_1 = 3 \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right) I_2'^2 \quad \text{有効入力}$$

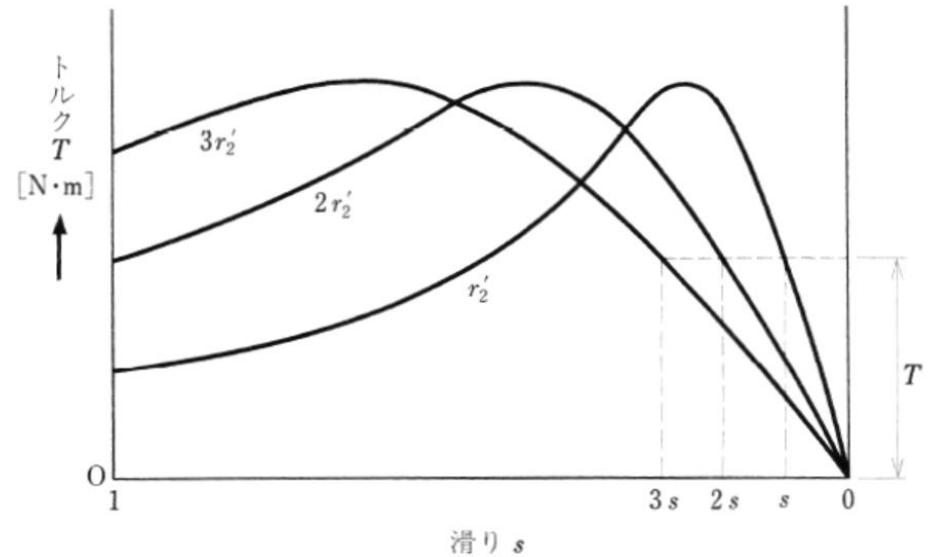
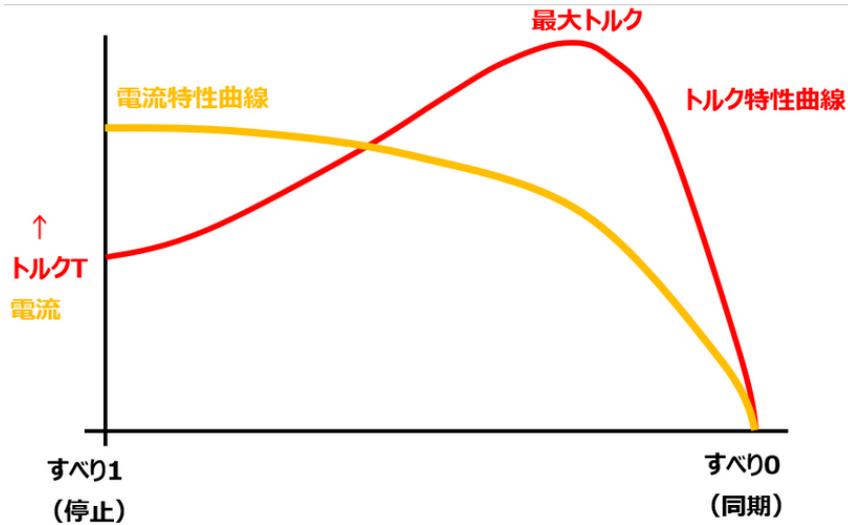
$$P_m = 3 \frac{1-s}{s} R_2' I_2'^2 \quad \text{仕事}$$

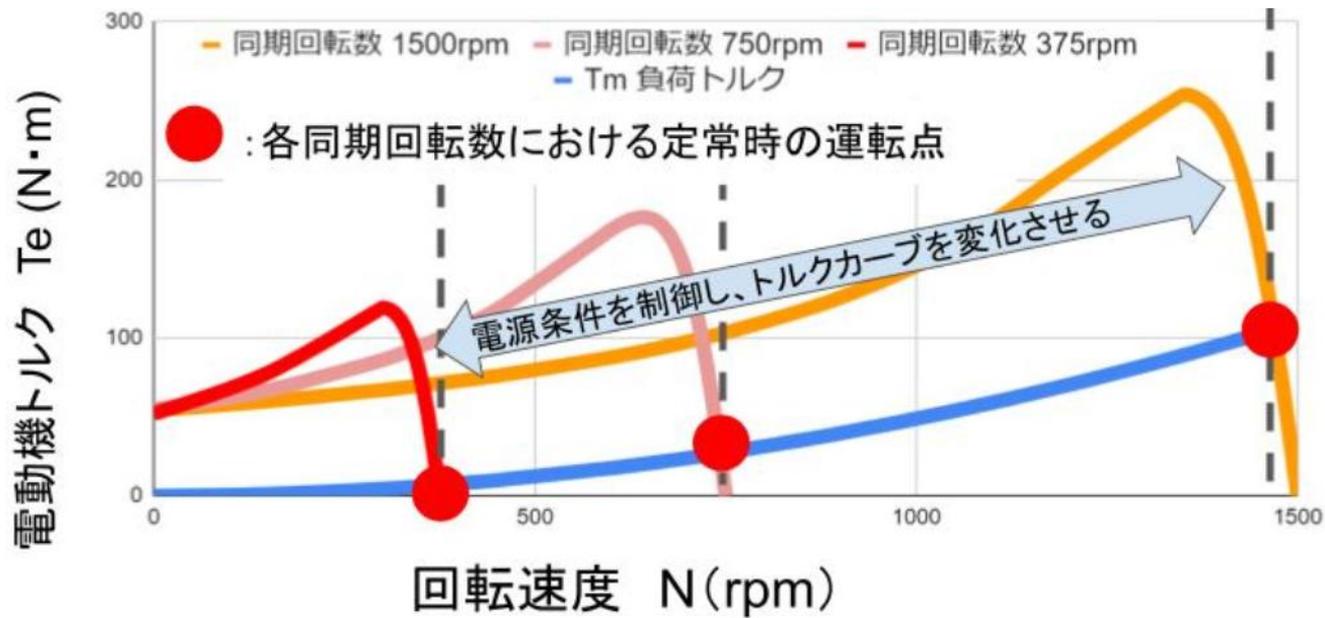
$$P_{c1} = 3R_1 I_2'^2 \quad \text{1次銅損}$$

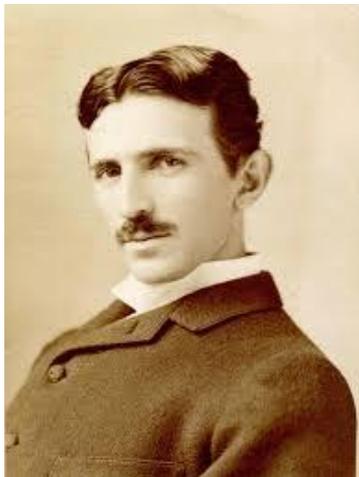
$$T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{3 \frac{1-s}{s} R_2' I_2'^2}{\omega} \quad \text{トルク}$$

理屈より実際に計算してみましょう
im_practice2.sci

$$T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{3 \frac{1-s}{s} R_2' I_2'^2}{\omega}$$







GEフランスで1882年、誘導モーター（交流電動機）を発明するも認められず
1884年にアメリカに渡りエジソン（直流）のもとで働くが、交流vs直流で
エジソンと反目し1年後に独立、
WH（ウエスチングハウス）の下で交流発電を実用化

ニコラ・テスラ

（セルビア：1856-1943）