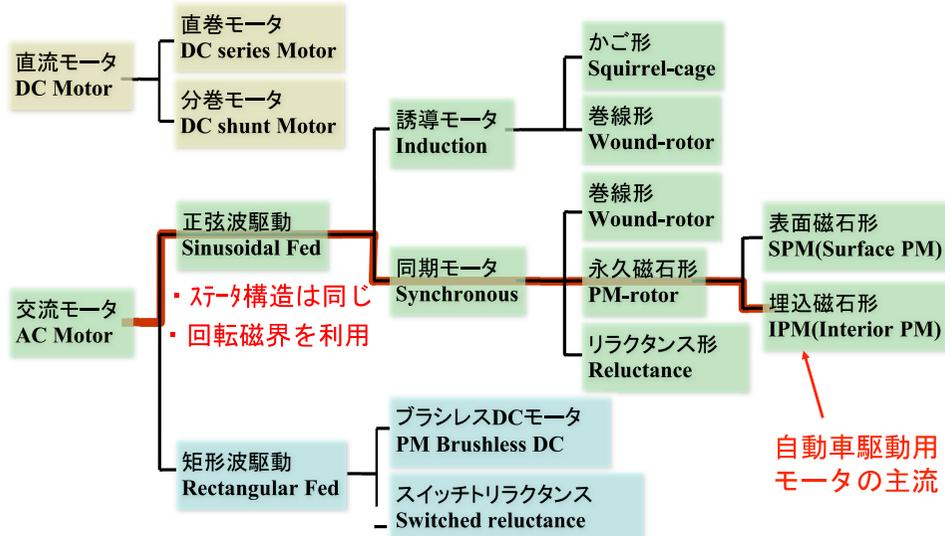


3章 永久磁石同期モータ

アウトライン 3章 永久磁石同期モータ

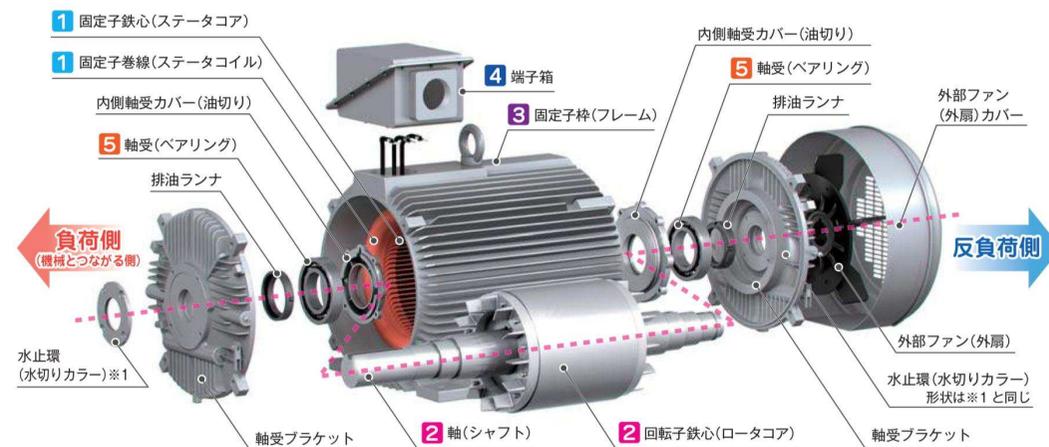
- 3.1 モータの種類と構造
- 3.2 自動車駆動用モータとしての性能・特徴比較
- 3.3 電機子巻線と回転磁界
- 3.4 PMモータのトルク発生原理
- 3.5 ロータ構造（表面磁石型，埋込磁石型）
- 3.6 集中巻PMモータ

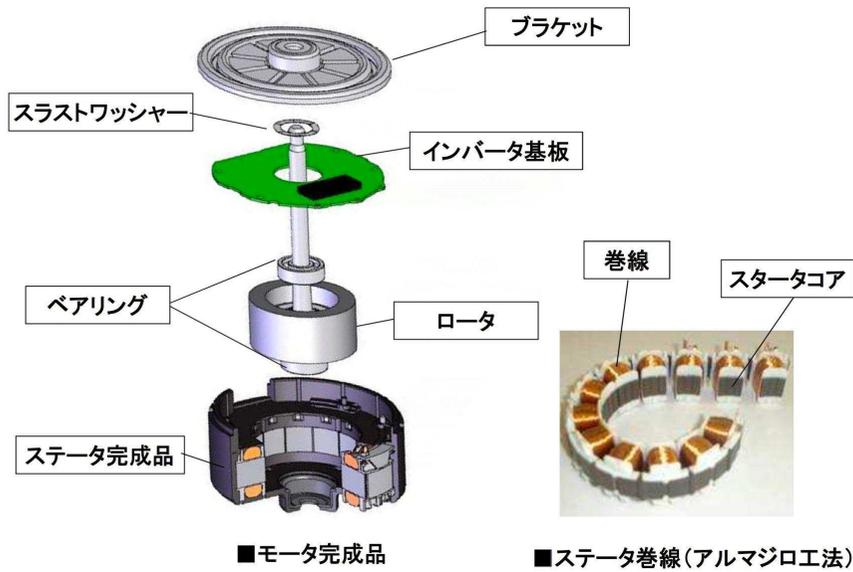
3.1 モータの種類と構造



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に制御できるようなモデル化を行い、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

モータの外観





スイッチとリラクタンスモータ (SRM)



- 低イナーシャ 堅牢 - 回転子は、突極形状で巻線 磁石レス
- 安価 - いまや銅は高いし、磁石は使用量少で意外と安い
- メンテナンスフリー - いまやブラシレスモータは当たり前
- トルク脈動大 - 間欠的に励磁相を切り替える (スイッチト)
- 運転音大 - 磁気吸引力の急峻なリリースに伴う大きな電磁加振力
- 高精度な制御が難しい - いまやPMモータだって磁気的非線形性強

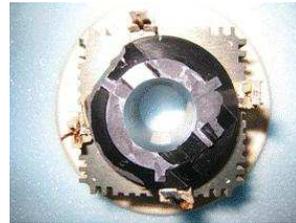
スイッチとリラクタンスマータ (SRM)

ダイソン-DC12(掃除機)



従来のユニバーサルモータに対し
 ・超高速運転100,000r/min
 ・モータ体積・重量を半分

二相4/2極SRモータ



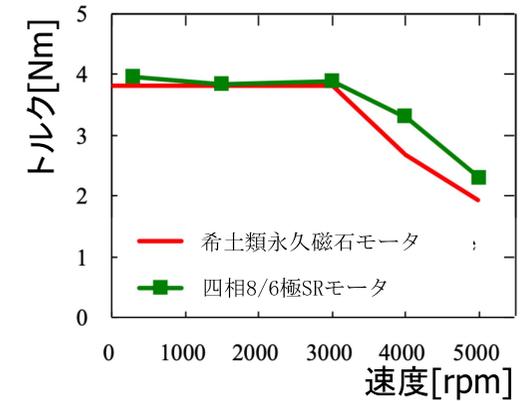
・薄板電磁鋼板 S 0.2t / R 0.15t
 ・短ギャップ長 0.15mm (実測)

- ・高速回転に好適
 - ブラシレス & 堅牢な構造
- ・比較的高い出力密度(高速化含)
- ・比較的高い効率
- ・二相機で変換器コスト抑制

400W試作機(0.1mmgap)概観写真



最大N-T特性の実機評価結果



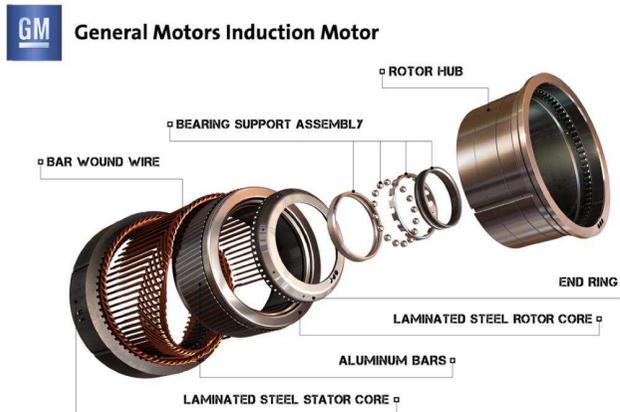
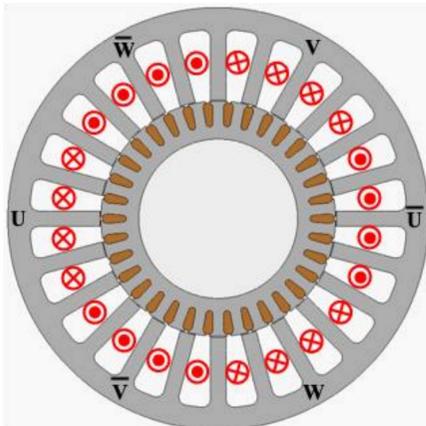
PMモータと同一体格

同一電圧電流定格での実機比較

実験値で85%超のモータ効率

出典：T.Kosaka, A.Kume, Y.Kano, H.Wakayama and N.Matsui, "Development of High Torque Density and Efficiency Reluctance Motor with 0.1mm airgap", Proc. of 12th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2007), No.834, Sep. 2007 (CD-ROM:ISBN-9789075815108)

誘導電動機 (IM)



出典元：http://gm-volt.com/2011/10/28/gm-shows-off-electric-motors-for-spark-cv-and-more/

アウトライン

3章 永久磁石同期モータ

3.1 モータの種類と構造

3.2 自動車駆動用モータとしての性能・特徴比較

3.3 電機子巻線と回転磁界

3.4 PMモータのトルク発生原理

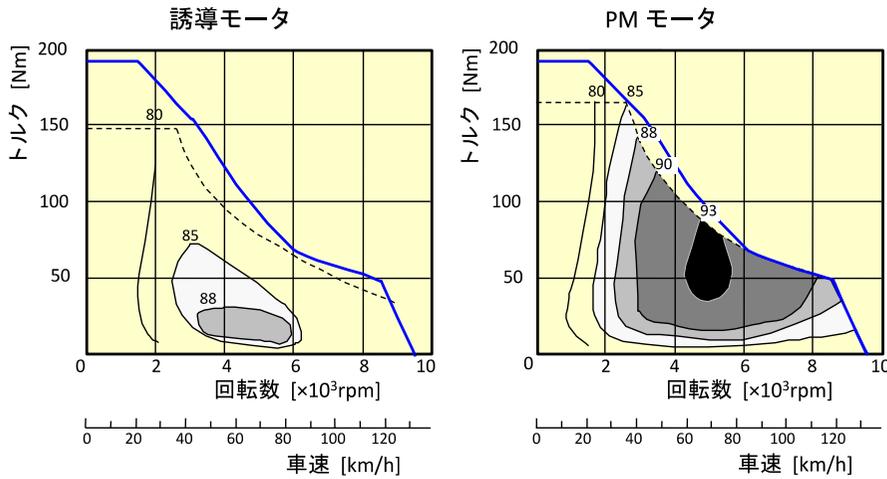
3.5 ロータ構造 (表面磁石型, 埋込磁石型)

3.6 集中巻PMモータ

3.2 自動車駆動用モータとしての性能・特徴比較

17

90年代に於ける比較評価では最高効率で約5%の差



出典；電気自動車ハンドブック 電気自動車ハンドブック編集委員会（編集）丸善株式会社（2001/03）

3.2 自動車駆動用モータとしての性能・特徴比較

18

項目	ブラシレスモータ				
	直流モータ	誘導モータ(IM)	スイッチドリラクランスモータ(SRM)	永久磁石型モータ(IPM)	表面磁石型モータ(SPM)
形状					
最大効率(%)	89~91	94~95	~90	95~97	95~97
最大回転数(kr/min)	~6	~20	~20	~15	~10
コスト	◎	○	◎	△	×(磁石多い)
制御装置コスト	◎	△	×	○	○
体格・重量	×	△	△	○	○
振動・騒音	×	◎	×→△ (形状最適化)	△→○ (形状最適化)	○
特徴	低コスト、効率劣、保守性(ブラシ有)劣	低コスト・低鉄損小型化に不向き	低コスト、制御装置と振動・騒音に課題	定トルク・定出力領域を広く取れる。小型化に最適	定回転に適、高速回転困難
自動車への用途	補機用モータ	テスラ「ロードスター」が採用	日本電産量産計画中	殆どのEV/HEV用駆動モータ	(EPS等大型の)補機用モータ

主機モータは、定トルク、定出力範囲を広く取れるIPMが適する

3.2 自動車駆動用モータとしての性能・特徴比較

19

国内の自動車主機モータ：埋込磁石同期モータ

Prius



モータ種類 永久磁石式同期モータ
最高出力 53kW
最大トルク 163N・m

<https://toyota.jp/prius/>

LEAF



モータ種類 永久磁石式同期モータ
最高出力 110kW
最大トルク 340N・m

<https://www3.nissan.co.jp/vehicles/new/leaf.html>

ACCORD



モータ種類 永久磁石式同期モータ
最高出力 135kW
最大トルク 315N・m

<https://www.honda.co.jp/ACCORD/>

アウトライン

3章 永久磁石同期モータ

3.1 モータの種類と構造

3.2 自動車駆動用モータとしての性能・特徴比較

3.3 電機子巻線と回転磁界

3.4 PMモータのトルク発生原理

3.5 ロータ構造（表面磁石型，埋込磁石型）

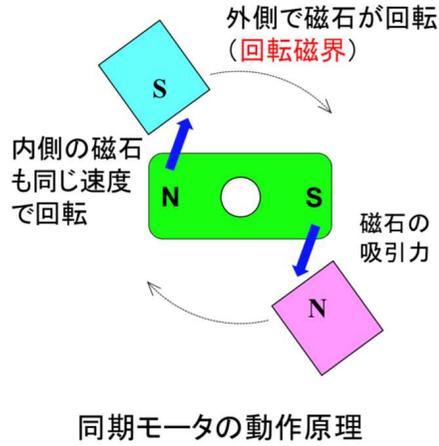
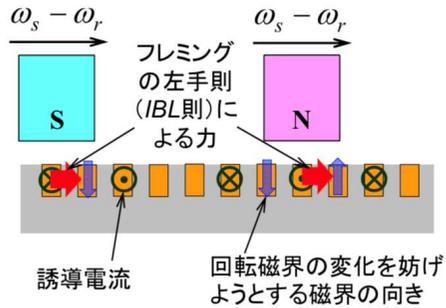
3.6 集中巻PMモータ

20

3.3 電機子巻線と回転磁界

回転磁界

☆誘導モータや同期モータを回転させるためには**回転磁界**が必要

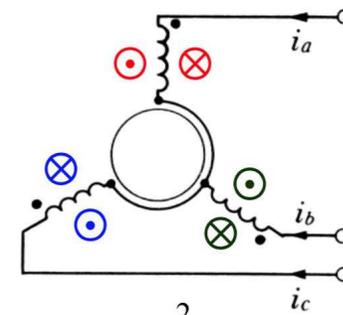


3.3 電機子巻線と回転磁界

○回転磁界の発生

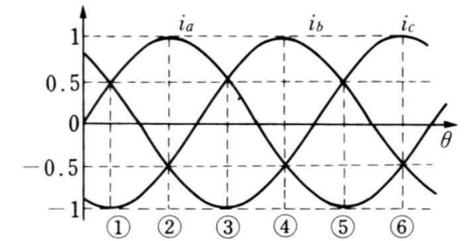
固定された巻線でどのようにして磁界を回転させるのか？

6スロット2極三相巻線



空間的に $\frac{2}{3}\pi$ の位相差

三相对称交流電流



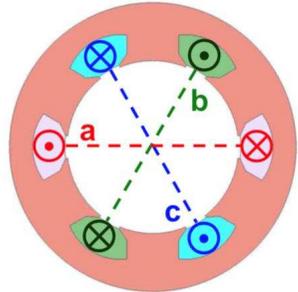
時間的に $\frac{2}{3}\pi$ の位相差

3.3 電機子巻線と回転磁界

○回転磁界の発生

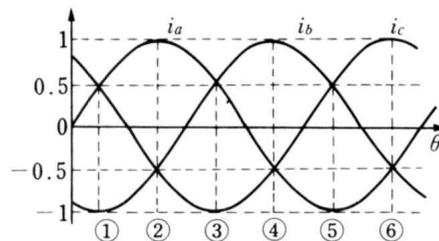
固定された巻線でどのようにして磁界を回転させるのか？

6スロット2極三相巻線



空間的に $\frac{2}{3}\pi$ の位相差

三相对称交流電流

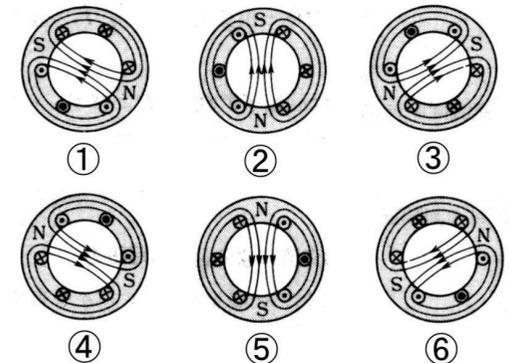
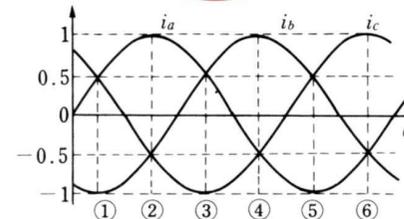
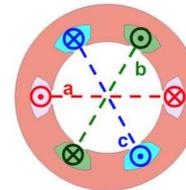


時間的に $\frac{2}{3}\pi$ の位相差

3.3 電機子巻線と回転磁界

○回転磁界の発生

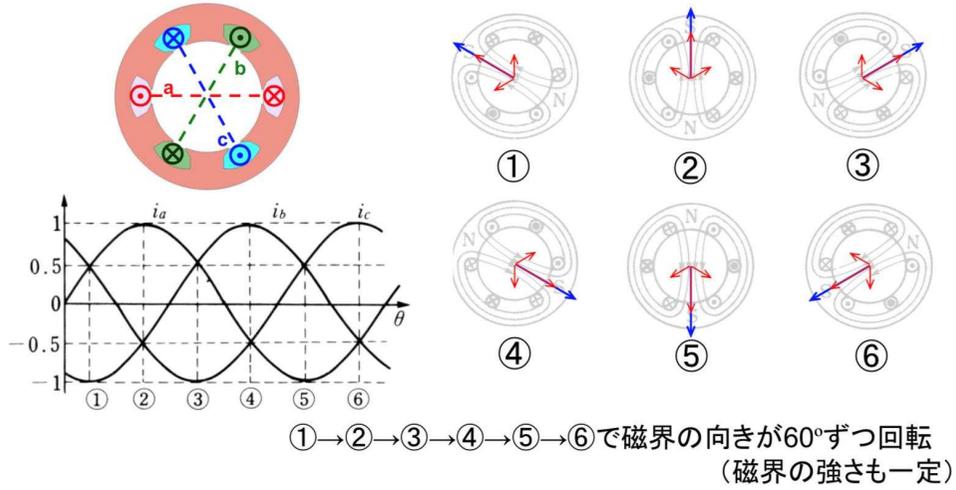
固定された巻線でどのようにして磁界を回転させるのか？



①→②→③→④→⑤→⑥で磁界の向きが60°ずつ回転
(磁界の強さも一定)

○回転磁界の発生

固定された巻線でどのようにして磁界を回転させるのか？

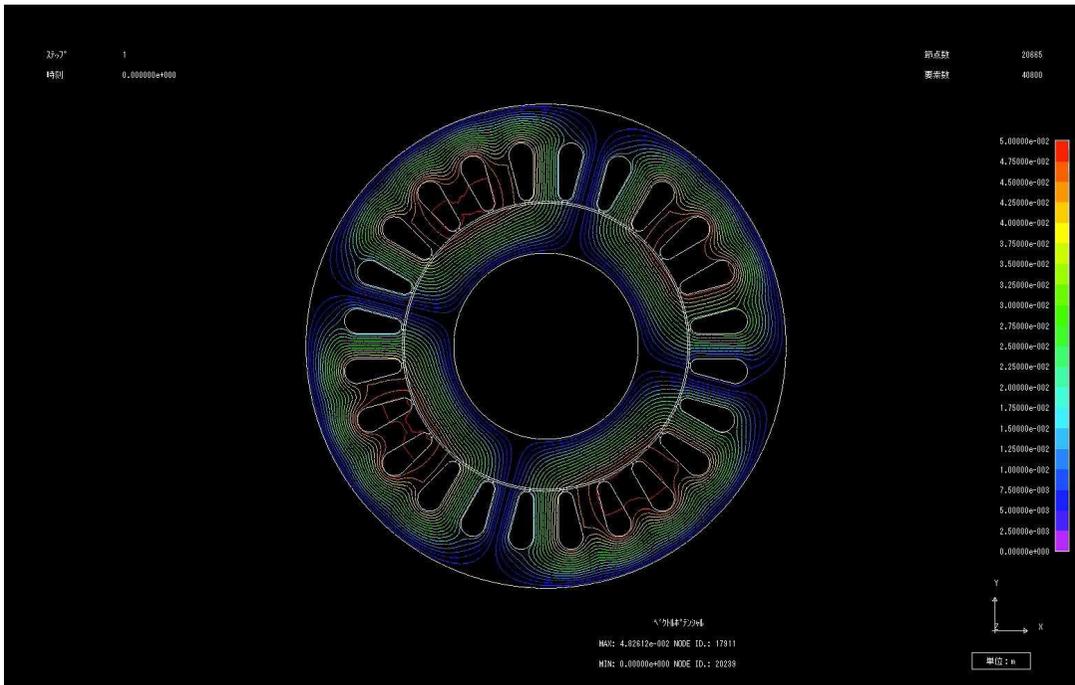
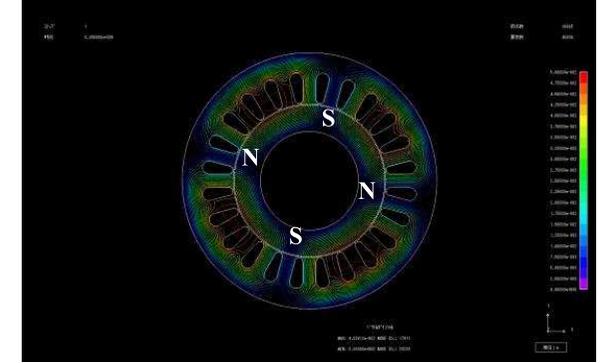


回転磁界の動画

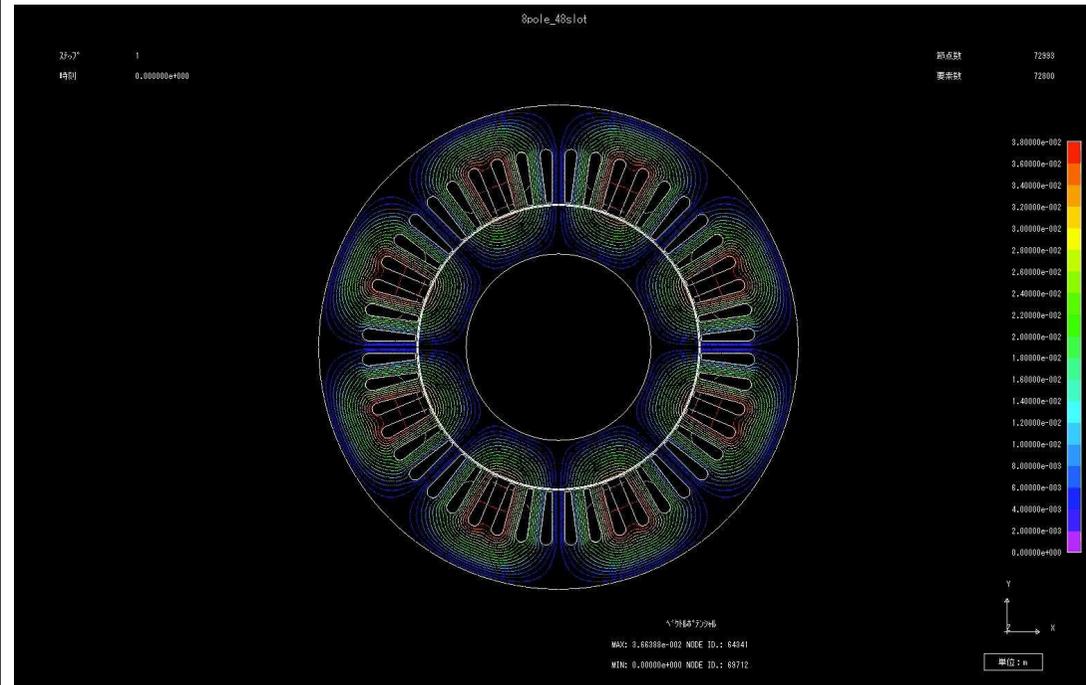
回転磁界とは？

多相巻線に多相交流電源により給電することで発生
インバータ駆動の場合、三相巻線／三相交流電源

4極の回転磁界の場合



24スロット4極分布巻線による回転磁界の場合



48スロット8極分布巻線による回転磁界の場合

回転磁界の解析式

各巻線u, v, wに

$$i_u = I \sin \omega_0 t$$

$$i_v = I \sin(\omega_0 t - 2\pi / 3)$$

$$i_w = I \sin(\omega_0 t - 4\pi / 3)$$

なる三相交流を流す。このとき、基準の軸から角度 θ の位置に各巻線が作る磁束密度は、**正弦波磁束密度分布を前提に**

$$B_u = B_{u,max} \cos\theta = K i_u \cos\theta$$

$$B_v = B_{v,max} \cos(\theta - 2\pi / 3) = K i_v \cos(\theta - 2\pi / 3)$$

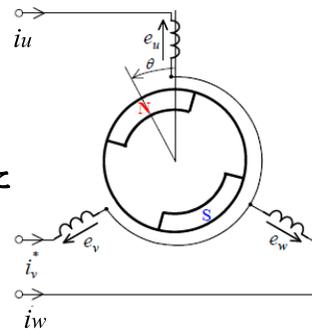
$$B_w = B_{w,max} \cos(\theta - 4\pi / 3) = K i_w \cos(\theta - 4\pi / 3)$$

と記せる。ここで B_u, B_v, B_w は各巻線がそれぞれ単独で角度 θ の位置に作る磁束密度である。そこで合成磁束密度 B_g は総和として次式で与えられる。

$$B_g = B_u + B_v + B_w$$

$$= \frac{3}{2} B_{max} \sin(\omega_0 t - \theta)$$

回転磁界の合成磁束密度振幅は各相磁束密度振幅の1.5倍となる。



U軸巻線に角度 θ をなす点に於ける合成磁束密度 B_g

$$B_g = B_u + B_v + B_w$$

$$= \frac{3}{2} B_{max} \sin(\omega_0 t - \theta)$$

上式で与えられる B_g の空間分布でその振幅が最大となる位置を考えると、以下の関係を得る。

$$\omega_0 t - \theta = \pi / 2$$

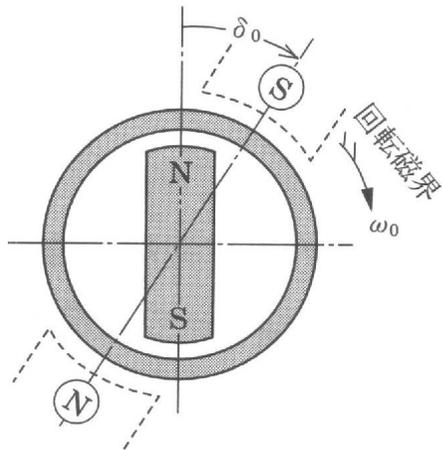
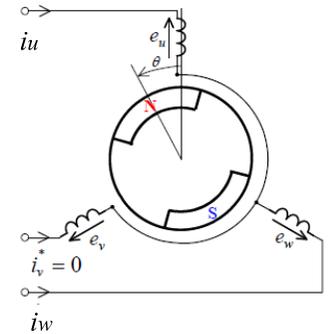
上記の関係から下記の関係を得る；

$$d\theta / dt = \omega_0$$

三相巻線に対称三相交流電流を流すとき、それらによってモータのエアギャップに作られる磁束密度 B_g の空間分布に於いて、その振幅最大となる空間位置が、

- ①電源の角周波数 ω_0 で回転し (**同期速度**)
- ②その回転方向は巻線U-V-Wの配置方向 (相順方向) に回転することを意味している。

空間的に正弦波状分布の磁束密度分布が ω_0 なる角速度で相順方向に回転する。
(正確には、電源一周期でモータ1極対分だけ回転する)



同期モータの原理図

同期モータの回転速度 $N_0 = 60 f / p$

N_0 : 同期速度

f : 電源周波数

p : 極対数 (極数の1/2)

アウトライン

3章 永久磁石同期モータ

3.1 モータの種類と構造

3.2 自動車駆動用モータとしての性能・特徴比較

3.3 電機子巻線と回転磁界

3.4 PMモータのトルク発生原理

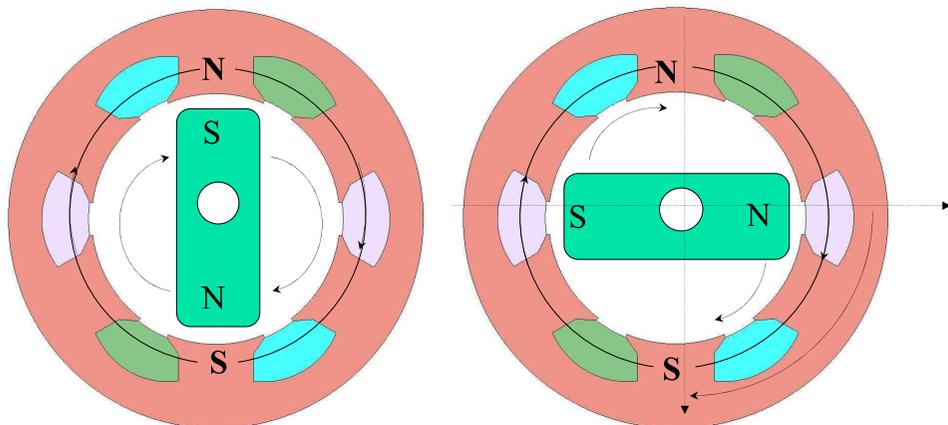
3.5 ロータ構造 (表面磁石型, 埋込磁石型)

3.6 集中巻PMモータ

同期モータの発生トルク

$$T = T_{max} \cdot \sin\theta$$

固定子側の回転磁界に同期して、回転子側の永久磁石が回転する。固定子磁軸と回転子磁軸の相差角 θ によってトルク発生。

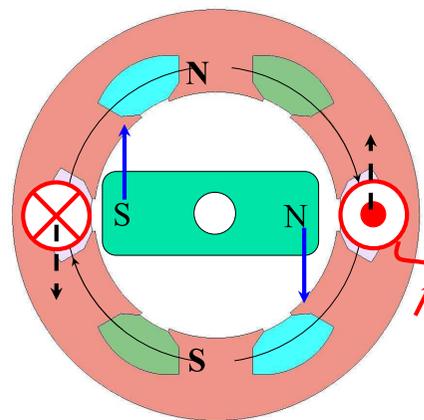


トルク=0 (ゼロ、無負荷)

トルク=最大

同期モータの最大トルク/電流比条件(磁石トルクのみ)

①回転磁界の発生源を定電流励磁の仮想コイルに見立てると、下図のモデル。ここで、奥行きを l 、励磁電流を I' 、コイルに鎖交する磁束密度を B_{mag} とする。



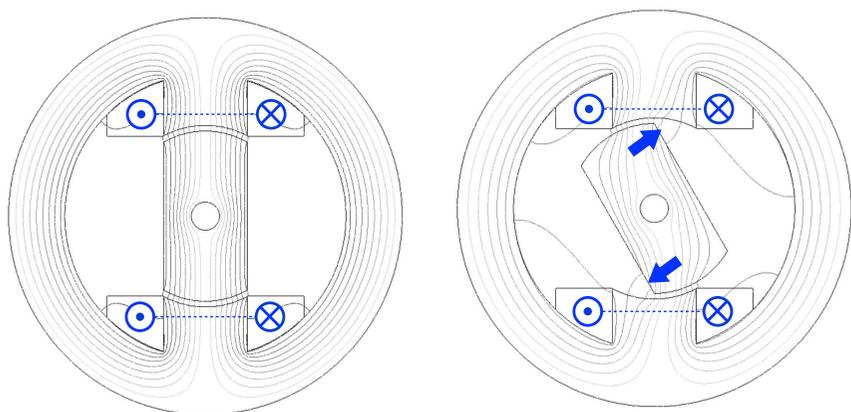
②フレミングの左手則を適用すると仮想コイルに \rightarrow の力が作用。

③作用・反作用の考えから静止仮想コイルに働く力は、回転子磁石に対して \rightarrow として作用。

$$T = aI' B_{mag} l \sin \frac{\pi}{2} = aI' B_{mag} l$$

④トルク/コイル電流比最大を実現するには回転子磁軸に対して固定子磁軸位置が回転方向に直交することが必要。
→回転子位置検出の必要性

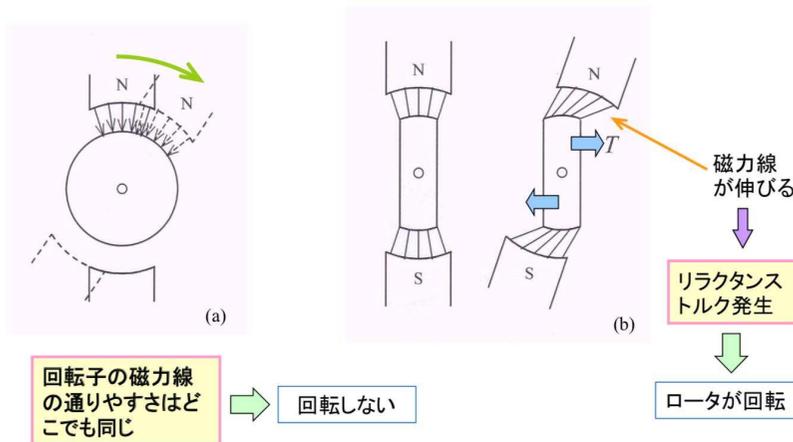
リラクタンストルクとは



左図に対し、右図はギャップ部分で磁力線が伸びている。この伸ばされた磁力線がゴムのよう伸び縮する性質を持っており、棒状鉄心を左図の位置に戻そうとする力が働く。これをリラクタンストルクと呼ぶ。

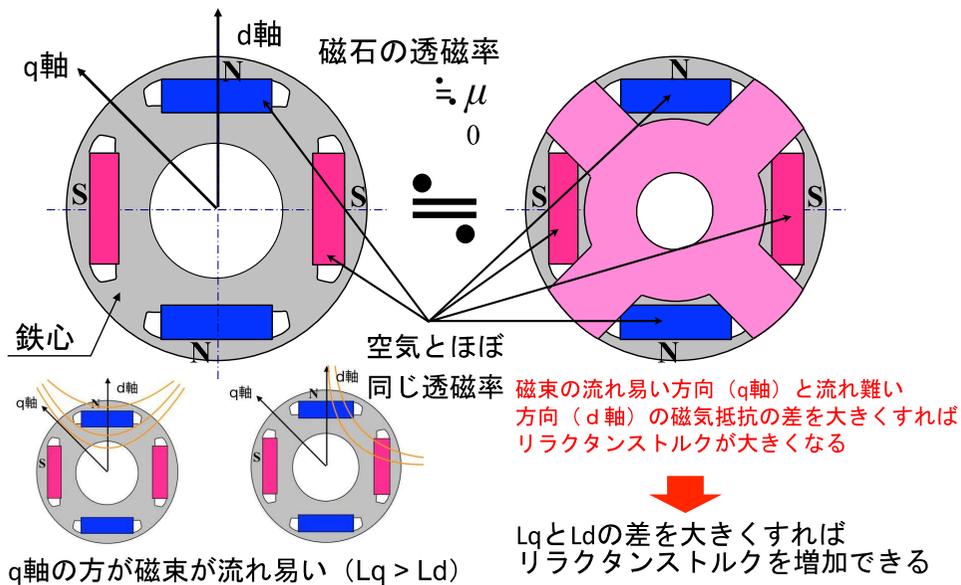
リラクタンストルクの導出

○基本構造と動作原理



ロータの凹凸の差を大きくするとトルクが大きくなりそう!?
(凹部の磁気抵抗と凸部の磁気抵抗の差を大きくする)

IPMSMのリラクタンストルク



アウトライン

3章 永久磁石同期モータ

3.1 モータの種類と構造

3.2 自動車駆動用モータとしての性能・特徴比較

3.3 電機子巻線と回転磁界

3.4 PMモータのトルク発生原理

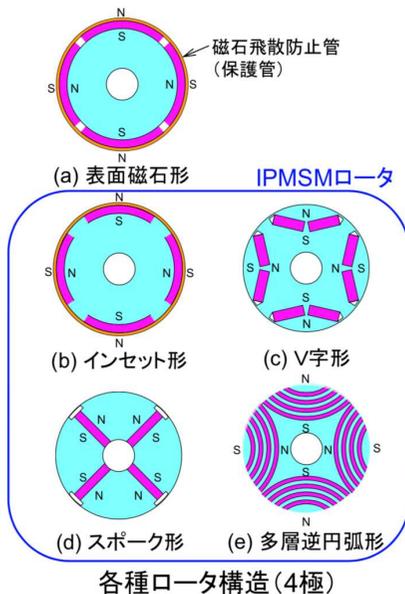
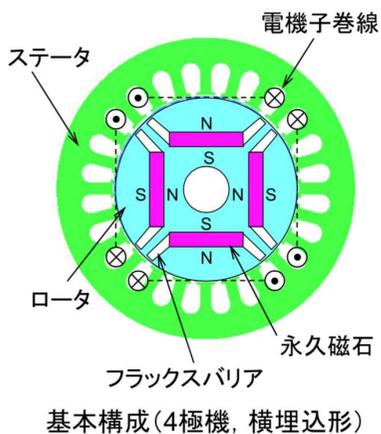
3.5 ロータ構造 (表面磁石型, 埋込磁石型)

3.6 集中巻PMモータ

3.5 ロータ構造 (表面磁石型, 埋込磁石型)

○基本構造と動作原理

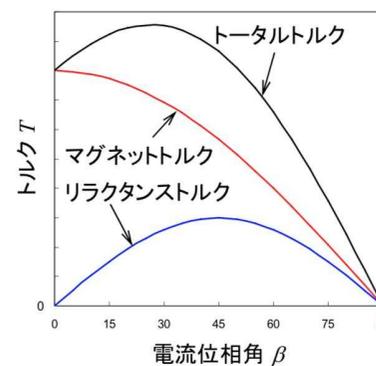
IPMSMのトルク：
マグネットトルク + リラクタンストルク



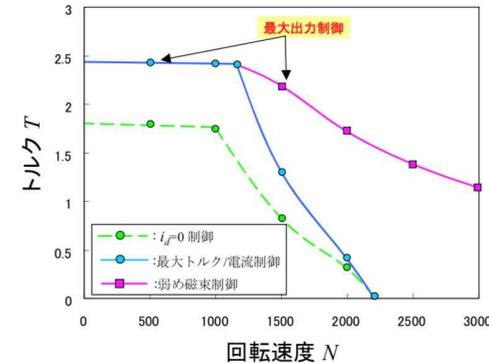
3.5 ロータ構造 (表面磁石型, 埋込磁石型)

○基本特性

定電流条件下の β -T特性



電圧・電流制限下の N-T特性

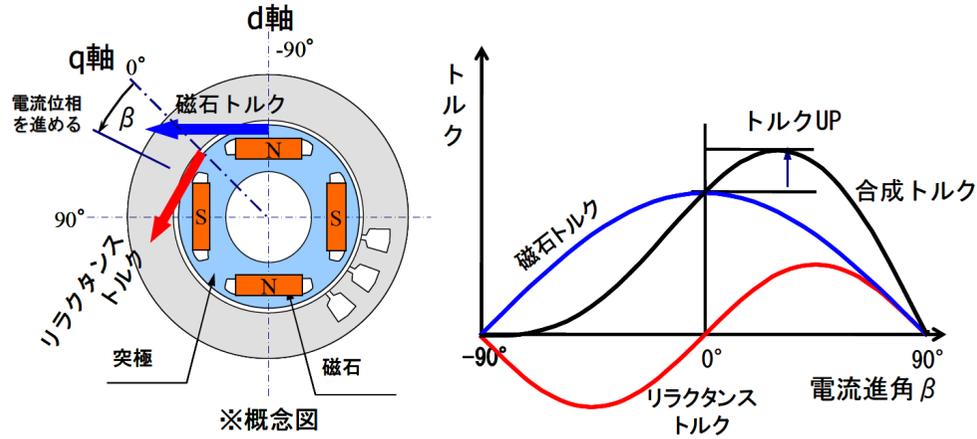


☆マグネットトルクとリラクタンストルクの両方を利用できるのでトルクを大きくできる。

☆高効率・高出力・広運転範囲など優れた特性が得られる。

3.5 ロータ構造（表面磁石型，埋込磁石型）

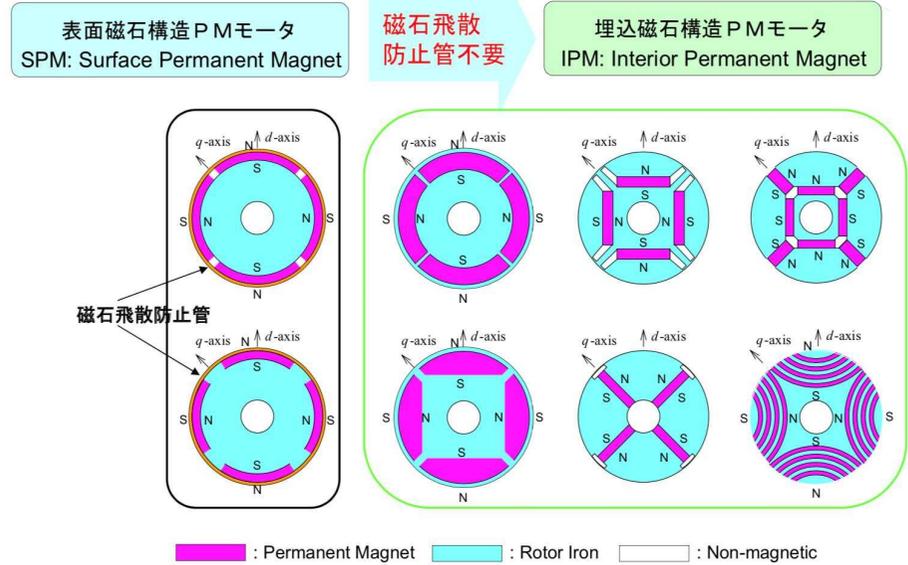
電流位相に対するトルク



○トルク式
$$\tau = \frac{P_n \Phi_a I_a \cos \beta}{\text{極対数}} + \frac{P_n (L_d - L_q) I_a^2 \sin 2\beta}{\text{マグネットトルク}} \quad \text{リラクタンストルク}$$

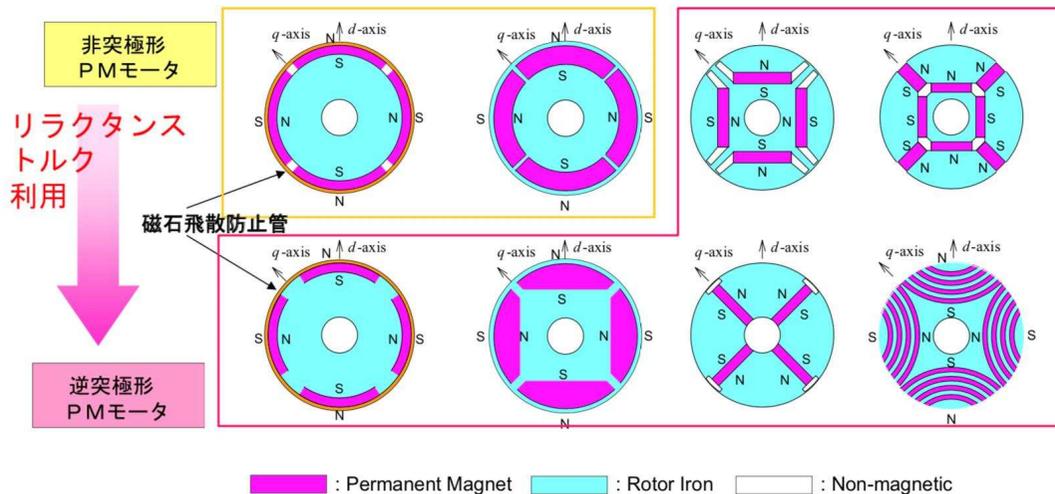
3.5 ロータ構造（表面磁石型，埋込磁石型）

ロータ構造から見たPMSMの分類



3.5 ロータ構造（表面磁石型，埋込磁石型）

ロータ突極性から見たPMSMの分類



アウトライン

3章 永久磁石同期モータ

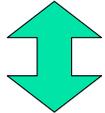
- 3.1 モータの種類と構造
- 3.2 自動車駆動用モータとしての性能・特徴比較
- 3.3 電機子巻線と回転磁界
- 3.4 PMモータのトルク発生原理
- 3.5 ロータ構造（表面磁石型，埋込磁石型）
- 3.6 集中巻PMモータ

3.6 集中巻PMモータ

永久磁石形同期モータ
(Permanent Magnet Synchronous Motor PMSM: PMモータ)

ブラシレスACモータ
(Brushless AC Motor)

正弦波電流駆動
120°通電駆動



ブラシレスDCモータ
(Brushless DC Motor)

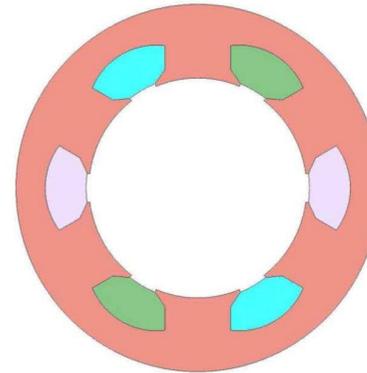
分布巻ステータ
・リラクタンストルク: 大
・磁石減磁: 優しい
・コイルエンド: 長

集中巻ステータ
・リラクタンストルク: 小
・磁石減磁: 厳しい
・コイルエンド: 短

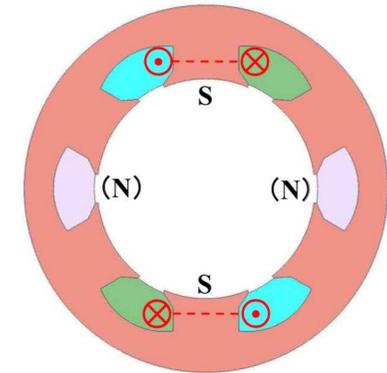


3.6 集中巻PMモータ

2極3スロット系列 - 2p3s系列 ($q = \frac{1}{2}$: 分数)



6スロット
(三相機の場合, 3の倍数)

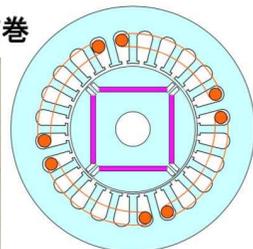


4極二層巻・短節巻・集中巻
(一相分のみ表示, 4極の磁界)

(N)極はS極と対をなすように生成(Consequent pole)

3.6 集中巻PMモータ

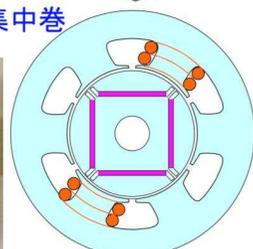
分布巻



分布巻 → (短節)集中巻

- コイルエンドの大幅な低減
占積率向上
- 軸方向寸法の短縮 → 小形化
- 使用材料の削減 → 省資源化
- 銅損の低減 → 高効率化
- ▼ 磁石磁束の有効利用率が低下
- ▼ リラクタンストルクも減少
- ▼ 磁束分布が不均一, 高調波磁束が増加
→ 鉄損は増加
- ▼ 騒音・振動大

短節集中巻

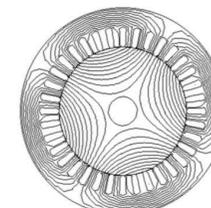


3.6 集中巻PMモータ

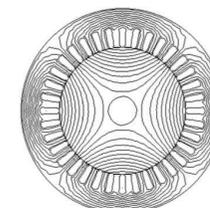
スムーズでない回転磁界

○ 回転磁界の違い

分布巻の発生磁界



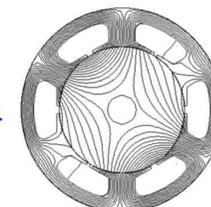
$\theta_e = 0$



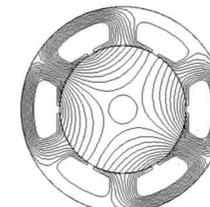
$\theta_e = \pi/6$

同じ分布形状で
15°回転

集中巻の発生磁界



$\theta_e = 0$



$\theta_e = \pi/6$

分布形状が変化
回転角度も不明瞭