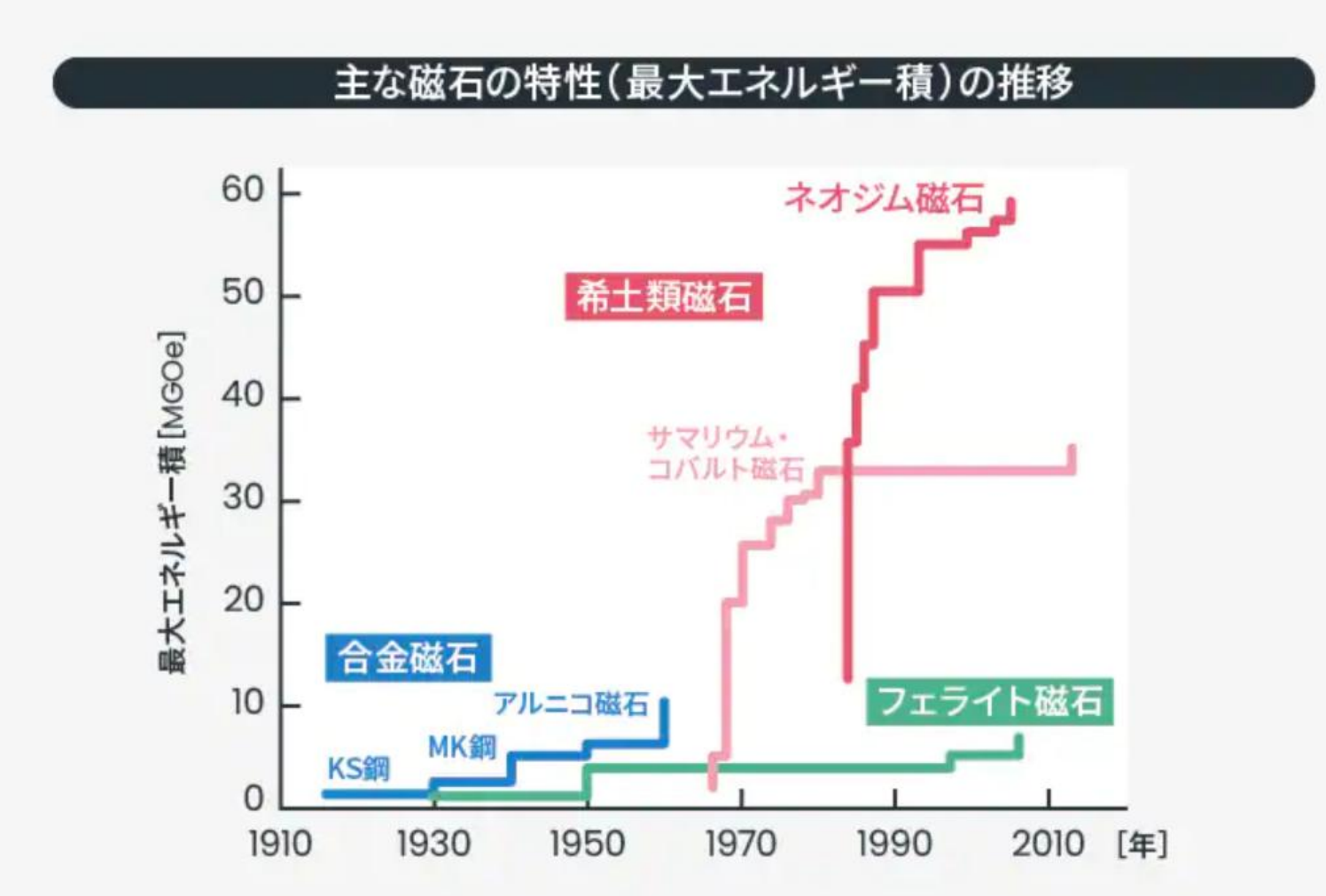
本日の講義の目標

磁石の種類を選べるようになる

永久磁石モータの種類を理解する

ベクトル図をみてもビビらないようになる

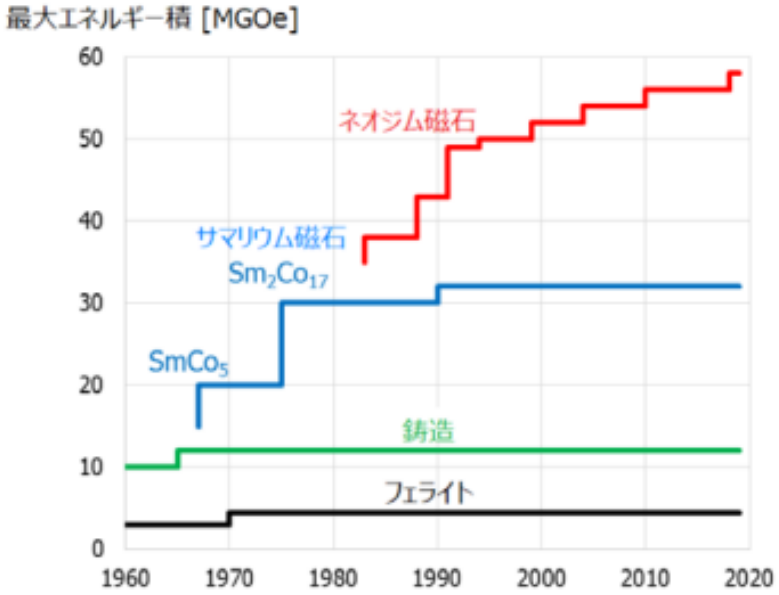
磁石モータの前に．．．磁石について．．．



https://www.tdk.com/ja/tech-mag/core-technologies/03

佐川真人さん　ネオジム磁石の発明者

https://scienceportal.jst.go.jp/explore/highlight/20120605_01/index.html より



前略）私がヒントを得た1978年には、ネオジム(Nd)-鉄(Fe)-ボロン(B)の組み合わせが磁石として有望であることを見つけていたのです。ところが「磁石の研究は終わりだ」と富士通研究所のトップから言われたのです。

新しいNd-Fe-B磁石を作る研究は、公式テーマとして取り上げられることなく、1980年までに修了してしまいましたが、決してあきらめていた訳ではありません。頭の中で研究を進め、時には余ったサンプルで溶かしてみたりしていました。そうしているうちに、上司との決定的な事件が起きてしまいました。ふだんからよく怒る上司で、その人にものすごい大声で怒鳴られたことを契機に私は辞表を出して、富士通研究所を退職しました。そして住友特殊金属に入社し、それからすぐの1982年5月に、住友特殊金属の実験室で、世界最強の磁気特性をもつ「ネオジム磁石(Nd-Fe-B磁石)」ができたのです。

ちなみに，磁石業界は厳しく，，，，住特金 → 日立金属 → プロテリアル となってます．．

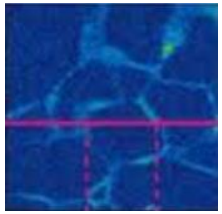
磁石の作り方

磁石の製造　下西技研工場 紹介Youtubeより

主な磁石の種類と用途

- ネオジ

  Nd-Fe－Bネオジム (Nd): 約 30%　鉄 (Fe): 約70% ホウ素 (B): 約 1% ～ 2%
  磁力は1.1から1.4T　EV，ハードディスク，エアコン，MRIなどで使われる最強磁石
  磁石で10～20円/g　軽希土のNd（ネオジム）は磁石は 1g　6 円～10円くらいで
  130度以上の高温で不可逆の熱減磁が始まるので重希土Dy（ディスプロシウム）
  Tb（テルビウム）などを3%～5%を粒界拡散させて使うと180度くらいまで耐熱があがる
  Dyは75円/g，Teは150円/ g で大半が中国依存となる
  主なメーカ，信越化学，プロテリアル，TDK



- サマコバ

  Sm-Co
  磁力で1.1～1.2T 耐熱，耐放射線，耐食にすぐれるため，一部特殊な用途で使われる
  人工衛星，原子炉用のモータなど，
  主なメーカ　信越化学

- フェライト

  Sr-Fe2-O4
  0.4～0.45T　安くて広く使われる．スータ，エアコン，その他多数
  磁石で1円～5円/g –30度くらいの低温で不可逆磁するので，スータ設計者は
  低温始動の設計で減磁しないよう磁石厚みを厚め（エアギャップの10倍程度）に
  設定する
  主なメーカ　プロテリアル，TDK

磁石の成形に関する分類

- 焼結　一般にこちらが多い，焼き物で脆い（割れる）
- ボンド　樹脂に磁石材料を混ぜて成型する，いろんな形状につくれるが磁力は弱い

- 異方性　成形時に磁場をかけて，配向きを揃える，磁力，耐減磁性能があがる
- 等方性　成形時に磁場をかけない，安い

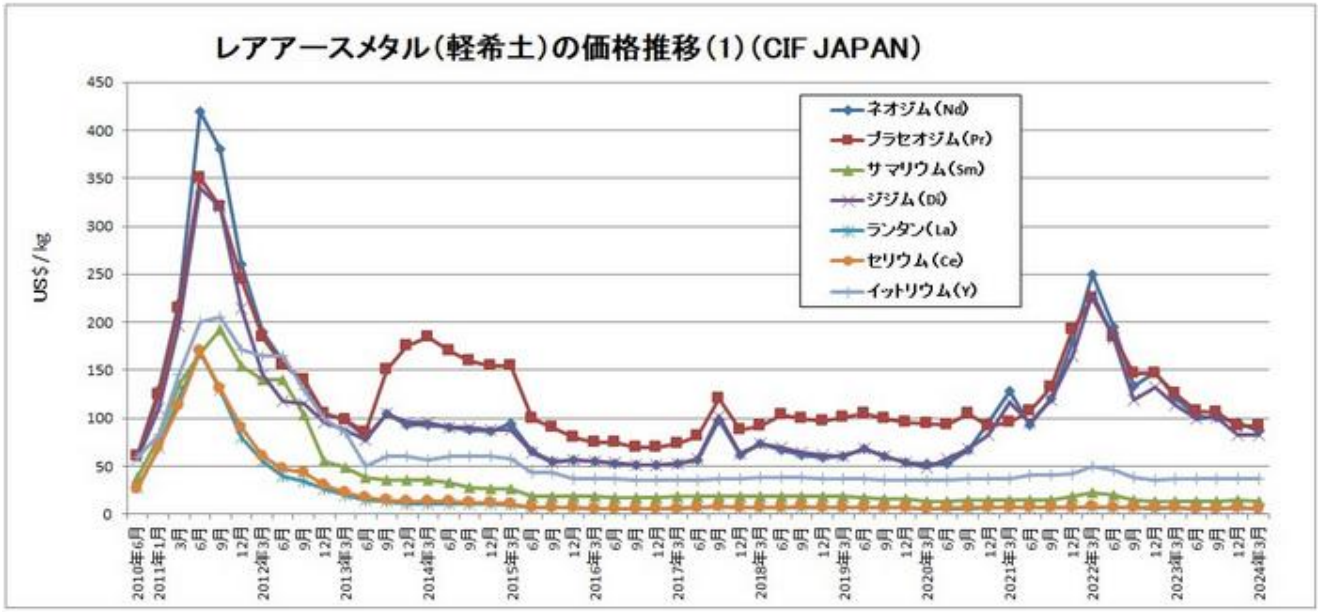
モータでよく使われるのは．．．

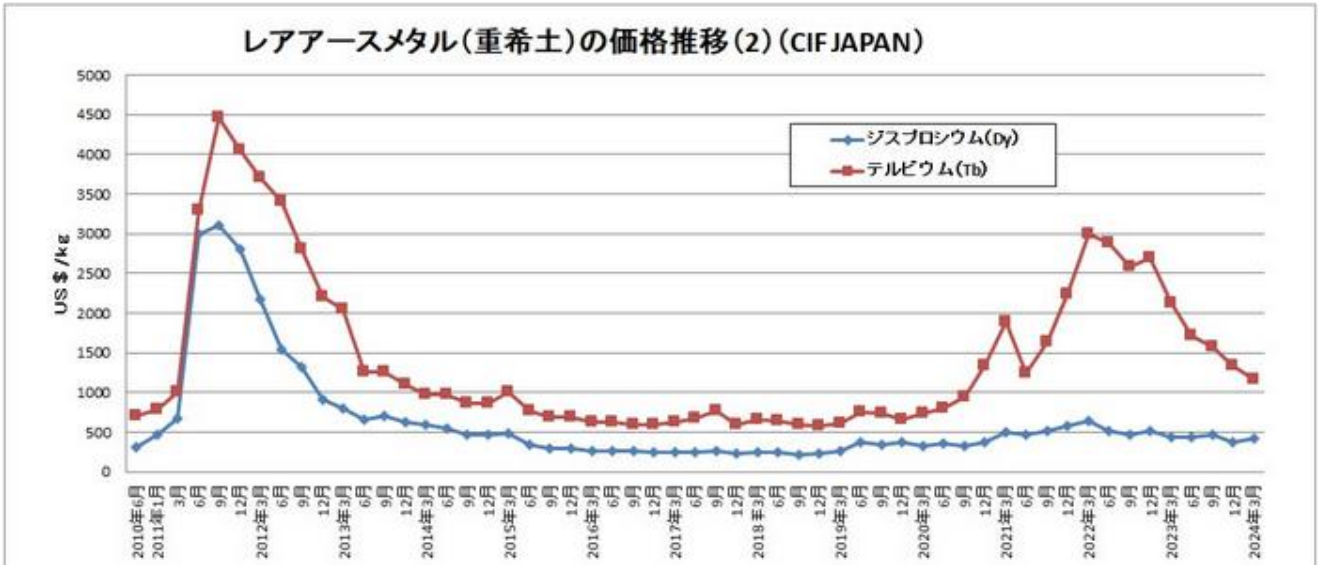
熱が加わるハイブリッドカー，EV ネオジの異方性焼結のDy拡散磁石

熱がかからないエアコン等 重希土レス のネオジの異方性焼結

小型モータで フェライトの異方性焼結

磁石の悩み（特定の国に資源を依存する，特に重希土）





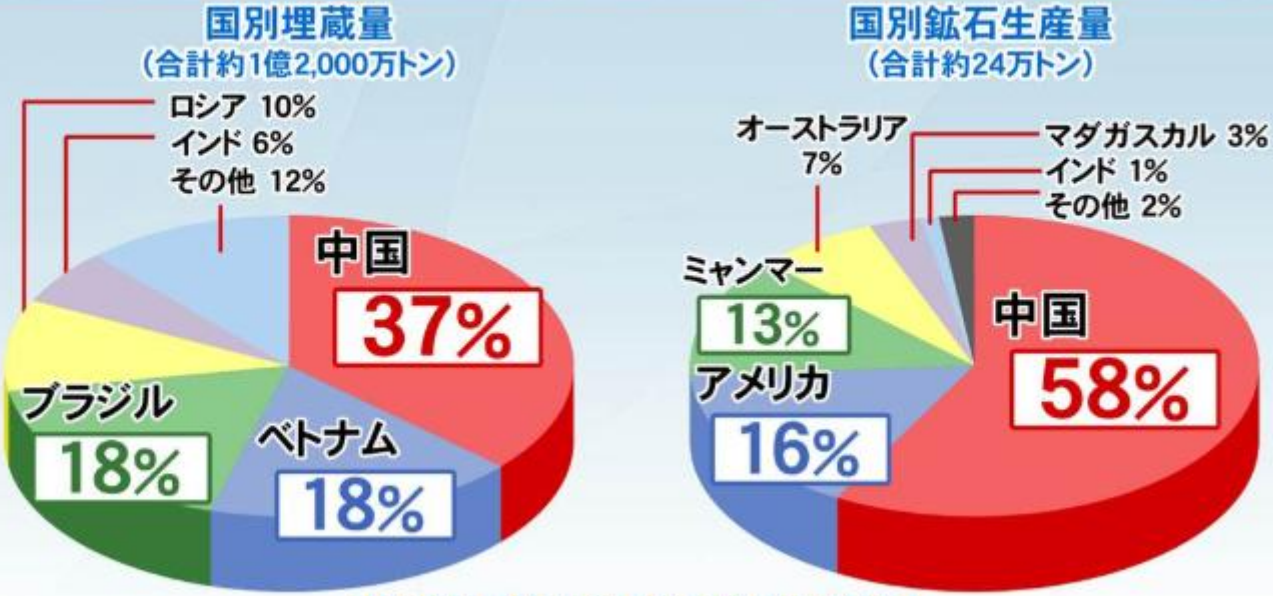
希土類は希少なのか？

- レアメタル：希少金属　埋蔵・供給が限られる ニッケル，コバルト，リチウムなど
- レアアース（希土類）：**精製分離処理は繰り返し抽出，　廃液処理も大変（酸性，放射性）**
  - 軽希土類 周期律表では 57～63　ランタン La，　ネオジム Nd　　（世界中にある）
  - 重希土類 周期律表では 63～71　ディスプロシウムDy，　テルビウムTb（中国南東部に偏在）
  - 重希土のある地層にはトリウムTh, ウラン U が共生鉱物として含まれる，
  - 中国南西部の古い地層はウラン，トリウムが流れ落ちている

周期律表では 57～71 バリウム56　と タングステン74 の間

元素	埋蔵量 (t)	年間生産量 (t)	可採年数 (年)
ネオジム	8 000 000	140 000	約 57 年
銅	890 000 000	28 000 000	約 32 年

レアアースの国別埋蔵量と鉱石生産量（構成比）



2020年世界計 出典：USGS（米国地質調査）

*エネルギー・金属鉱物資源機構「鉱物資源マテリアルフロー2021 レアアース（REE）」2022/8をもとに作成

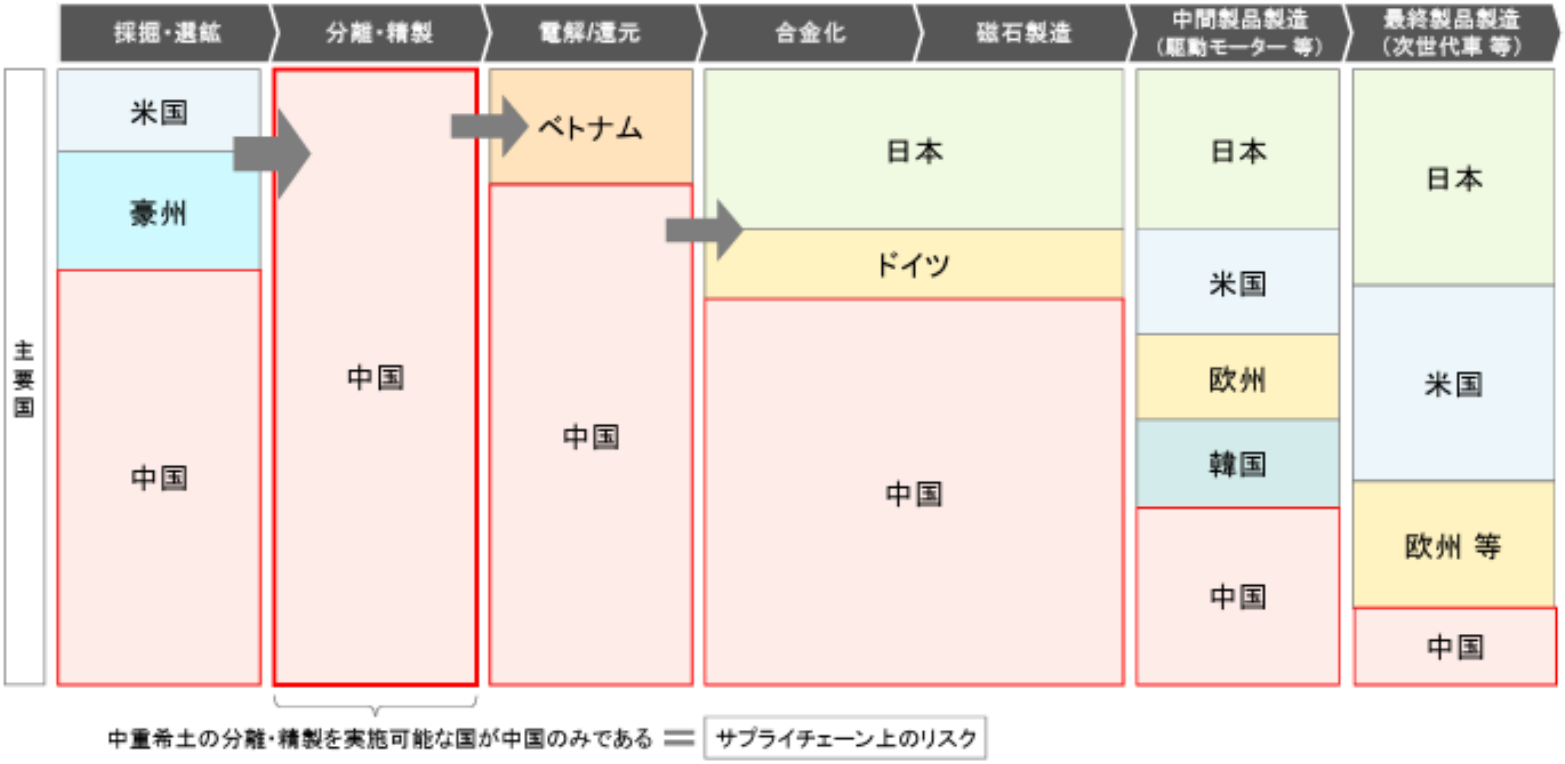
磁石の課題

エグゼクティブサマリー

中国のみが中重希土の分離・精製施設を持つことから分離・精製工程を中心に供給経路を多角化できていないことが課題である

中重希土は米国や豪州でも産出されるが、分離・精製を実施可能な国は中国のみである。このため分離・精製プロセスを中心に供給経路を多角化できておらず、サプライチェーン上のリスクとなっている。

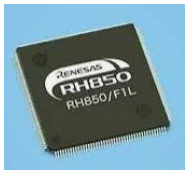
中重希土のサプライチェーンにおけるリスク



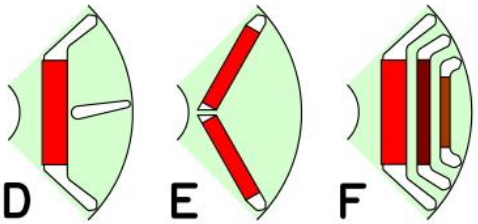
出典：https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2020/05/ree_supply_northamerica20200228.pdf

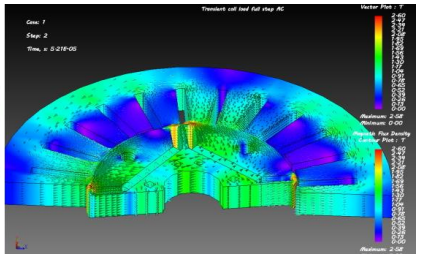
磁石モータが普及するようになった背景

- 特許も切れ,中国内競争もあり磁石が安くなった　20円g →半額以下に！
- 重希土類添加による耐熱性向上した（粒界拡散で重希土削減）
- 磁界解析技術進化によるロータ形状最適化
- マイコン進化による高周波駆動対応
- パワー半導体進化による高周波駆動対応
- 安価なセンサとノイズ処理技術
- 電磁鋼板の素材改良・薄板化による鉄損低減
- 薄板化した電磁鋼板に対応した積層・プレス技術の進化

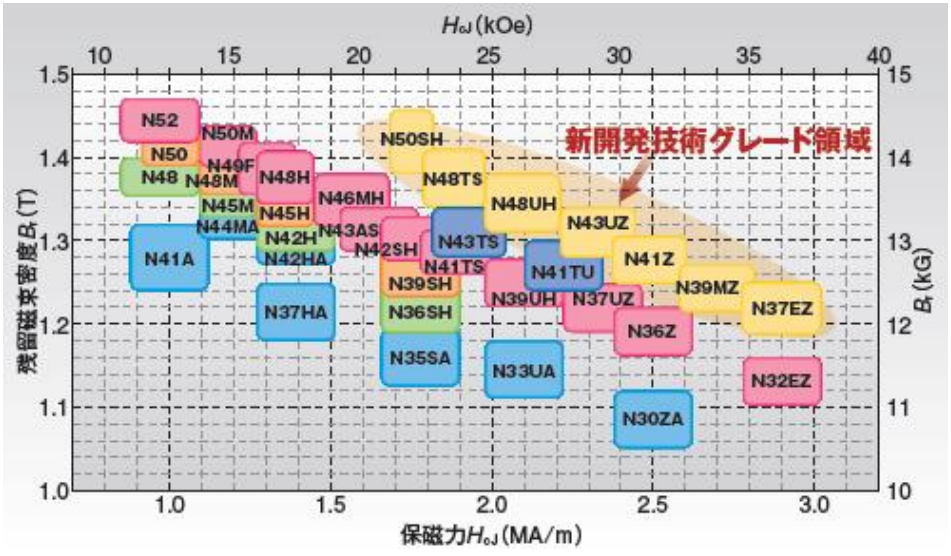


https://www.tamagawa-seiki.co.jp/

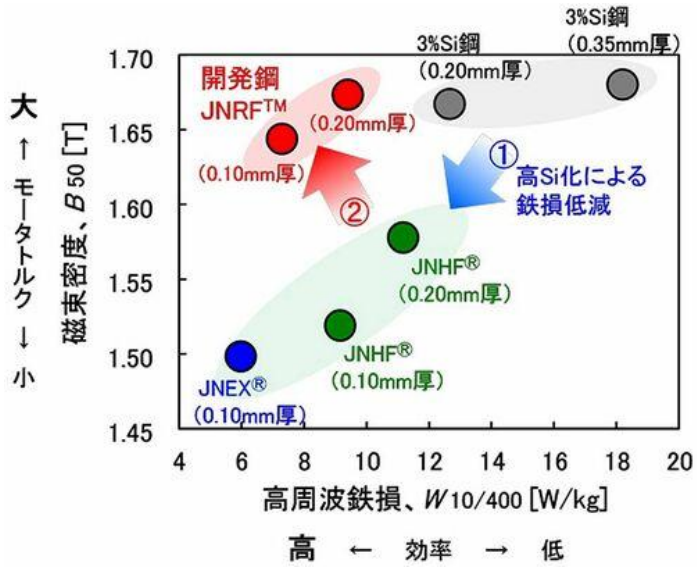




https://www.jmag-international.com/jp/engineers_diary/012/



信越磁石カタログより

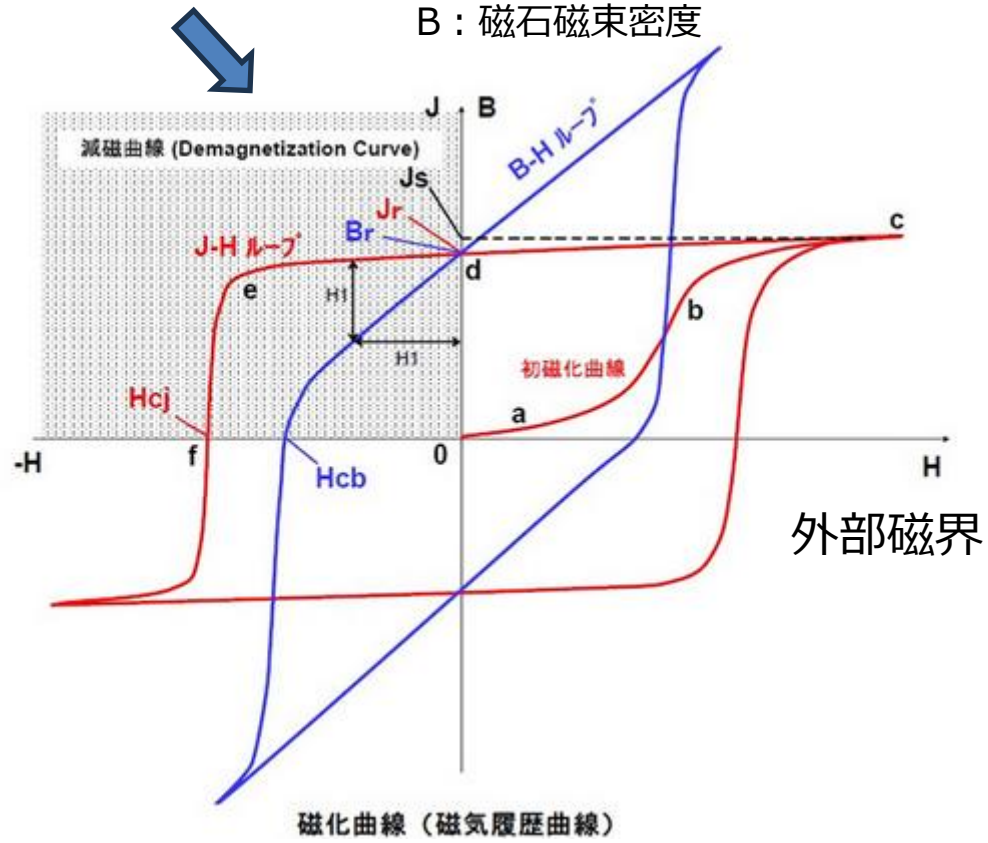


JFEカタログより

着磁していくときの挙動ってどうなってる

磁石カタログはここを書いてます

Ｊ：磁石等価磁化電流
Ｂ：磁石磁束密度

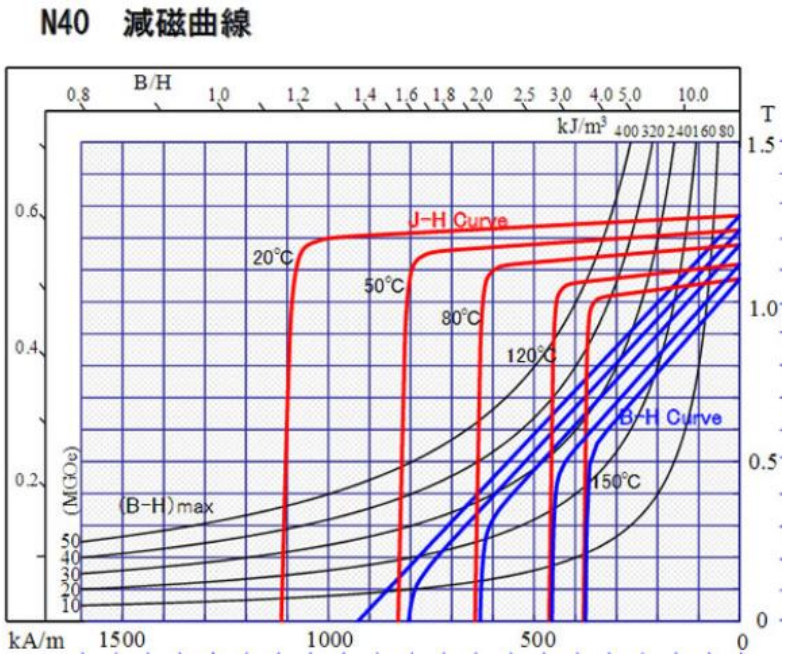


磁化曲線（磁気履歴曲線）

外部磁界

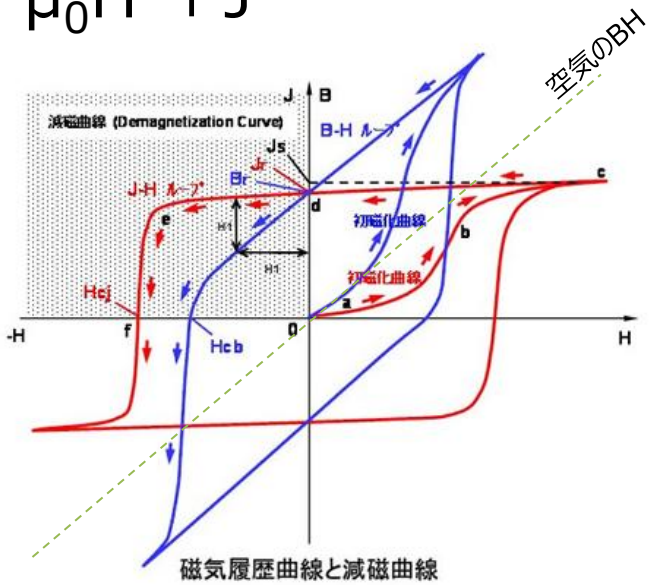
着磁装置の例
瞬間で２～3kV印加し，大電流で着磁
引用 OP電子
https://www.opei.co.jp/magnetize/

磁石の着磁は大変



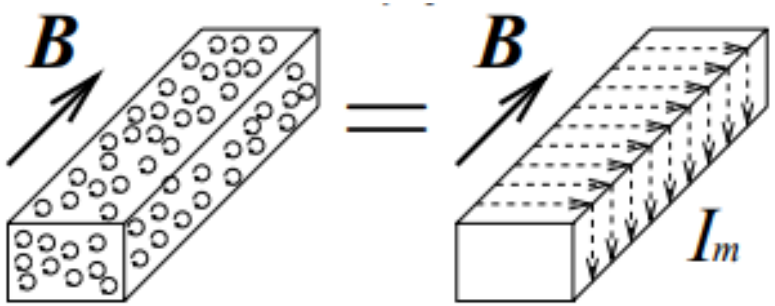
https://www.neomag.jp/mag_navi/mames/mame_bhcurves_top.html

$$B=\mu_0\ (H+M)$$
$$=\ \mu_0 H\ +J$$

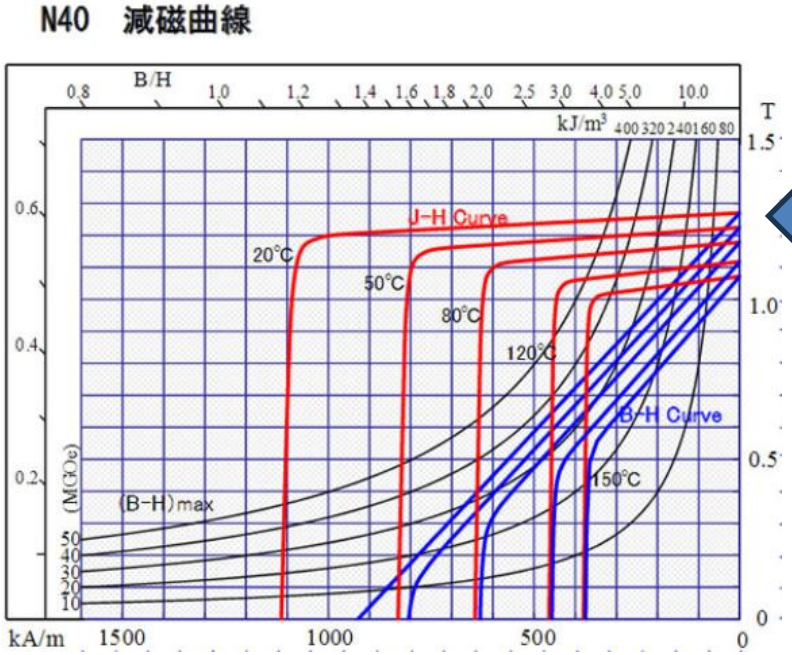


磁気履歴曲線と減磁曲線

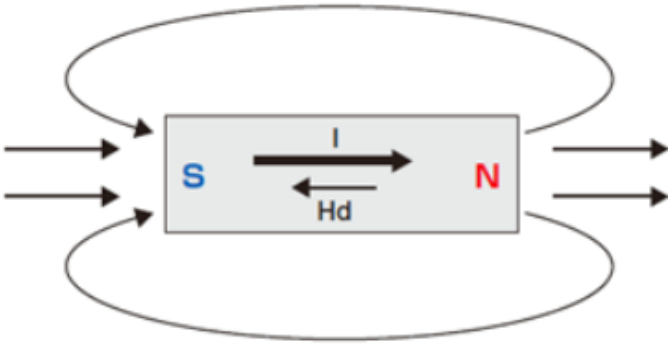
着磁装置の例
瞬間で２～3kV印加し，大電流で着磁
引用 OP電子https://www.opei.co.jp/magnetize/



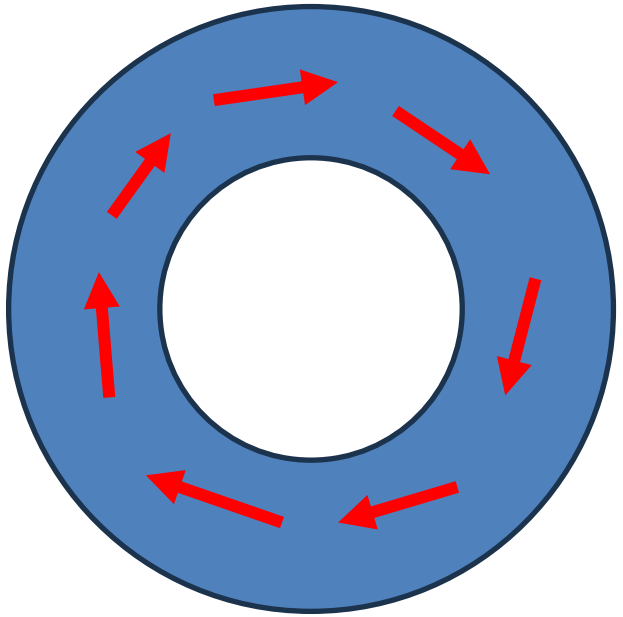
エアギャップがあると負の外部磁界があるように見える



Br（カタログは20℃，
外部磁界ないときにのB

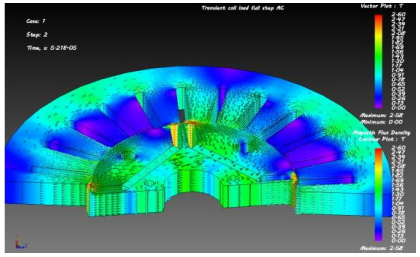


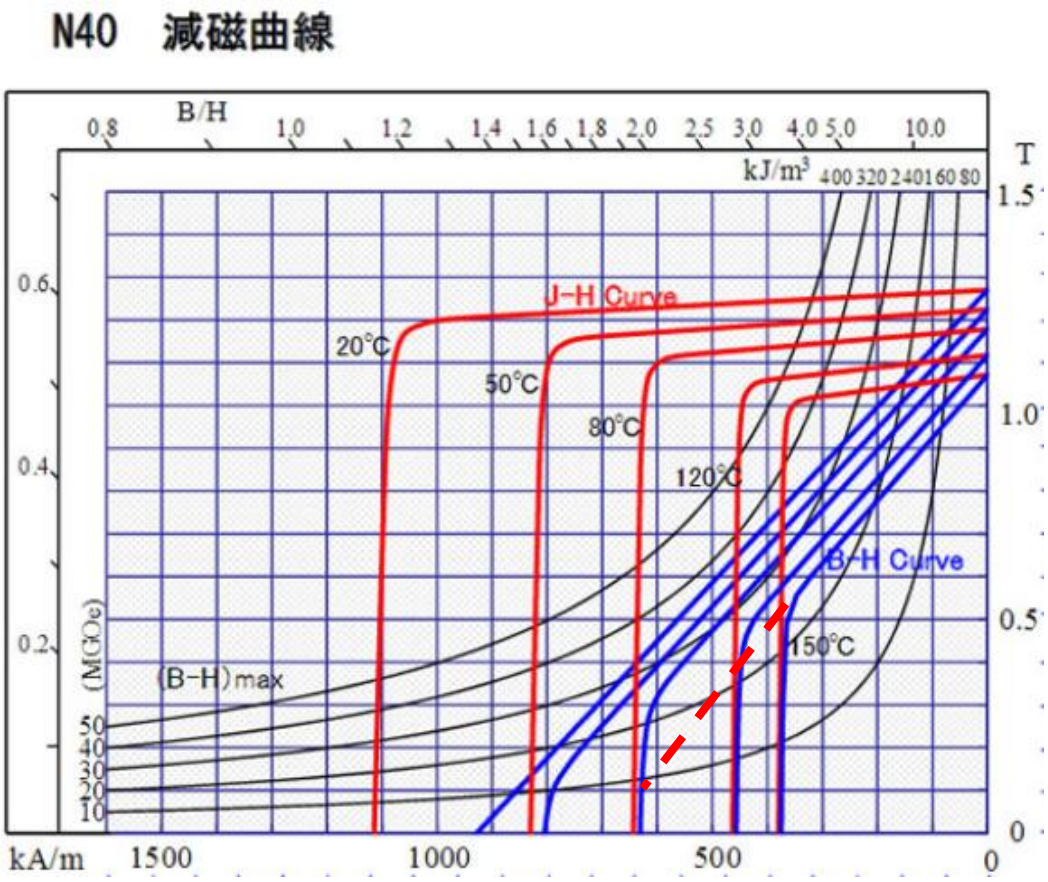
エアギャップがあると内部で逆
磁界ができる



逆磁界＝０，Brとは
こんなイメージ

熱減磁設計





熱減磁が懸念される場合
磁石厚，Ｄｙ量増検討

逆磁界H≒ コイル起磁力 /（空隙＋磁石厚）

磁石厚アップ＝磁石体積がふえてコストアップ
Dy増　　＝重希土増えてコストアップ

コスト増を嫌って
最近は，磁石を冷やすことに力をいれてます

モータの場合は固定子の電流は
磁石にとって逆磁界にみえる

通常の磁界解析で
は減磁モデルがない

磁化電流

Br　は外部磁界０の時の磁束密度

$Br = \mu_0 \mu_r H$

磁石は $H = Br / \mu_0 \mu_{rec}$ の磁界（単位体積あたり）

μ_{rec} は磁石の比透磁率で1.05程度

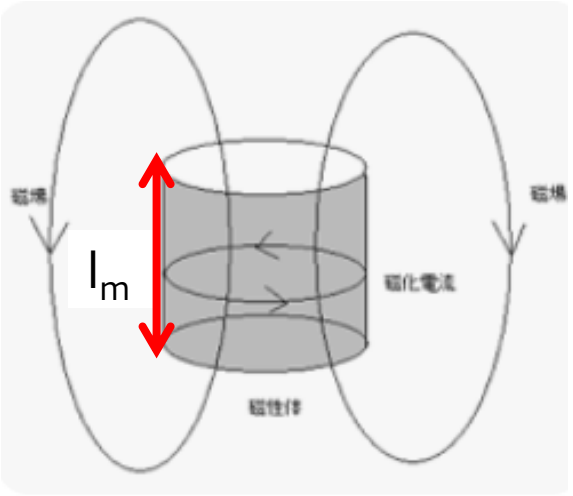
磁石厚みがl_mだとすると

$H_m l_m = Br / \mu_0 \mu_{rec} \times l_m$ の電磁石と等価

例 Br＝1.3T　で 1㎝の厚みのネオジ磁石は

$1.3 / (4\pi \times 10^{-7} \times 1.05) \times 0.01 = 9857$ AT

≒10000ATの電磁石としてモデル化される



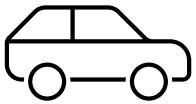
10000ATって大変なの？

10000ATって大変なの？　小型モータほど磁石を使うありがたみが大きい！
モータのサイズで変ります　大型モータは 電磁石や誘導モータなどでも、同等レベル磁束は作れる

BEVイメージ　コイルが10㎜×40㎜ だと 400㎜^{2}

25A/mm^2　液冷でも厳しい,瞬時なら使える.

25A/mm^2　で 3.8℃/秒の温度上昇

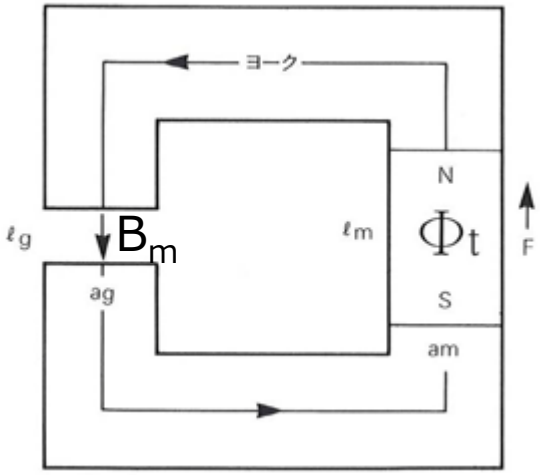


電車イメージ　スロットが20㎜×50㎜ ×４スロットだと 4000㎜^{2}

だと2.5A/mm^2　　コイルでも磁石みたいな性能だせる

磁石動作点の簡易式（磁石断面積＝ギャップ断面積の場合）

$$B_m = \frac{Br}{1+\mu_{rec}\frac{lg}{lm}}$$



μ_{rec} は磁石の比透磁率で1.05程度

例 Br ＝　1.3T　で 1㎝の厚みの磁石、エアギャップ1㎜なら

$$B_m = \frac{1.3}{1+1.05\cdot\frac{1}{10}} = 1.17\ T$$

ざっくりとモータでは

エアギャップの５～10倍の磁石厚みを持たせて，Brの 1割減くらいで設計する

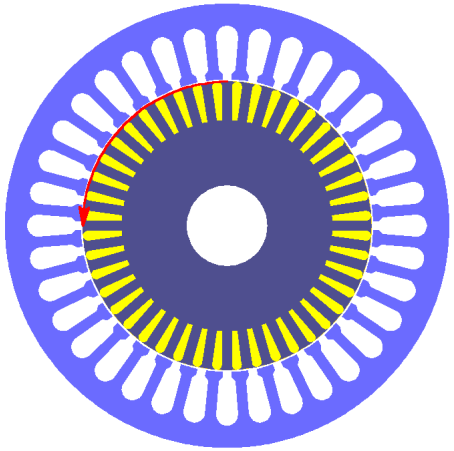
磁石を必要以上に分厚くしても無駄・・磁力はBrに近づくだけです．そして値段は高い．．．

課題

- エアギャップ5㎜で1トンの鉄の塊を引き上げるために必要な磁石のサイズを考えてみてください

  ヒント： １Tは＊＊ｋPaに相当

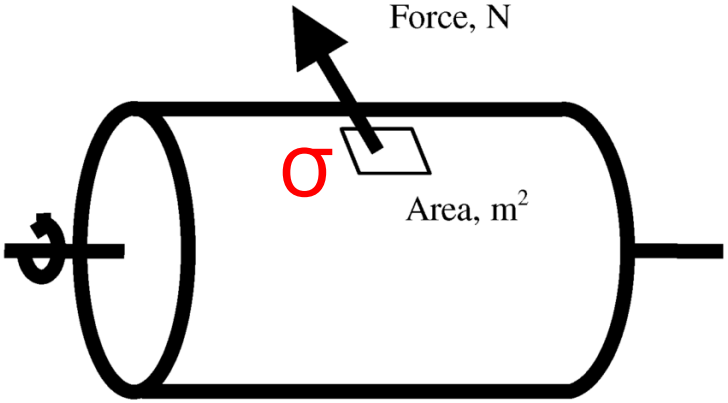
磁石モータのすごさを知る前に，少し事前知識



σ ： せん断力

σ ＝ J×B

J ：電気装荷
単位長,円弧長1㎜あたりのAT/㎜^{2}
モータが大きいほど，冷却が良いほど
大きくなる
(スロット面積は直径の2乗比例)



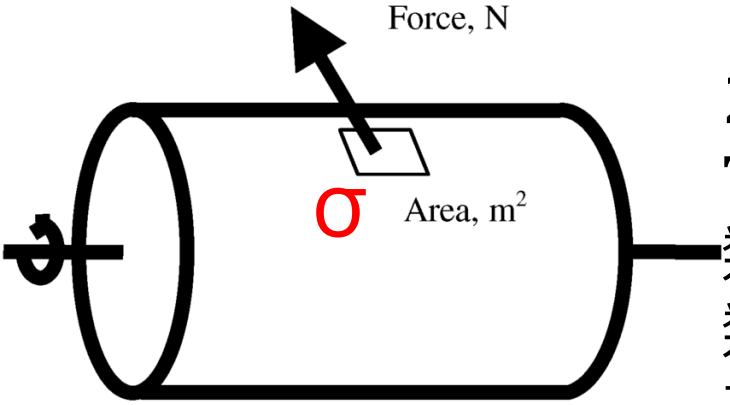
B：磁気装荷
平均磁束密度　(T)
磁気飽和で制約を受ける
平均値は2/ π×Bg
Bgpeak ＝　～ 1.2T (ネオジ磁石の場合)
B　　＝　～0.76

TRV: Torqure per unit Rotor Volume

$$T = \pi D_r L \times \sigma \times D_r/2$$
$$= \pi/4\, Dr^2\, L \times 2\sigma$$

$$T = 2\sigma V_r$$

（モータトルクはロータ体積と磁気せん断力σに比例する）



$2\sigma = T/Vr$ Torqure per unit Rotor Volume

$TRV = 2\sigma$

類似サイズ，類似冷却であれば
類似の値になるので，
初期設計のよりどころとなる

永久磁石でモータを小型化！！

https://en.wikipedia.org/wiki/Ford_Ranger_EV

4極IMTRV=88

4極IM：TRV=78

https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03304650/document

多極設計でロータを大きくできる ＝小型高トルク
（TRV:Torque per Rotor Volume）

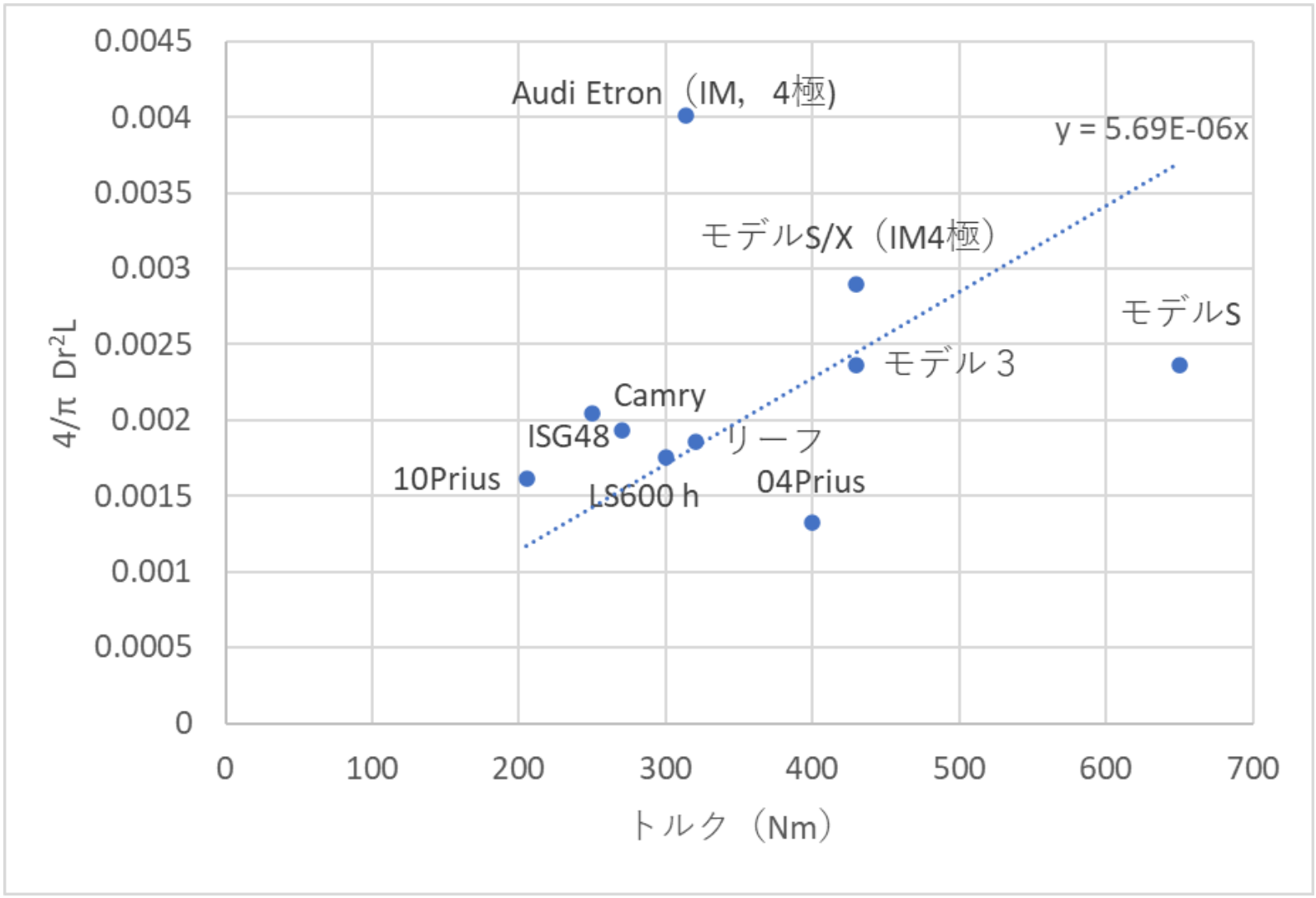
https://www.marklines.com/ja/report_all/rep1830_201903

8極：TRV=182

https://www.marklines.com/ja/report_all/rep1779_201811

8極：TRV=172

TRV: Torqe per Rotor Volume

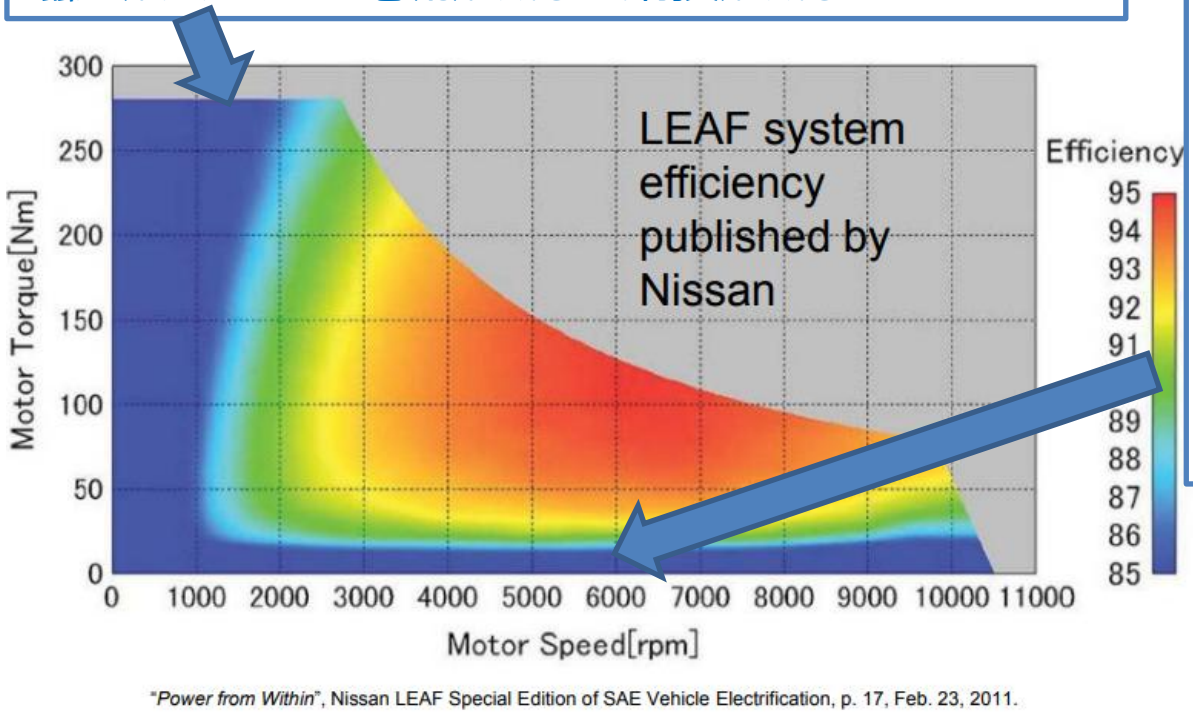


永久磁石式モータの弱点は高速低負荷の効率悪化

$$\text{モータ効率} = \frac{\omega I K_t}{I^2 R + NL_{loss} + \omega I K_t}$$

ω	機械角速度
NL_{loss}	無負荷損（メカ損,鉄損）
Kt	トルク定数

トルクはほぼ電流×磁力、銅損I^2Rは電流の2乗に比例
磁力が大きいほど電流が減る＝銅損が減る



"*Power from Within*", Nissan LEAF Special Edition of SAE Vehicle Electrification, p. 17, Feb. 23, 2011.

高速は鉄損が損失の主要因
磁力が大きいほど鉄損が大きい

80ｋｍ/ｈで巡航しているとき6000rpm,10Nm程度
80kW出せるモータの
1/10程度も使ってない

“Efficiency Maps of Electrical Machines”, AMahmoudi, Wen L. Soong . et Al
https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7310051

最大効率は銅損＝鉄損の原則

$$\text{モータ効率} = \frac{\text{出力}}{\text{損失＋出力}}$$

$$\text{モータ効率} = \frac{\omega I K_t}{I^2R + NL_{loss} + \omega I K_t}$$

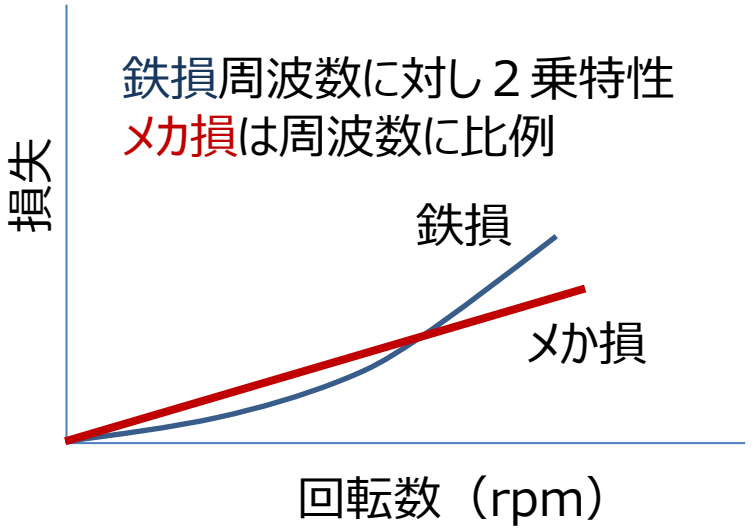
$$\text{モータ効率} = \frac{\omega K_t}{IR + NL_{loss}/I + \omega K_t}$$

Iに関して分母が 最小となる点が最大効率
分母をIに対して微分して　$R - NL_{loss}/I^2 = 0$
$I^2R = NL_{loss}$

ω　機械角速度
NL_{loss}　無負荷損（メカ損,鉄損）
Kt　トルク定数

銅損＝I^2R

出力＝ωT　（ω角速度、Tトルク）
≒$\omega I \cdot K_t$　（Ktはトルク定数）



無負荷損 NL_{loss} ＝銅損 I^2R でモータは最大効率
高速では最大出力の数%の鉄損が発生する，鉄損があると低負荷の効率を高められない、

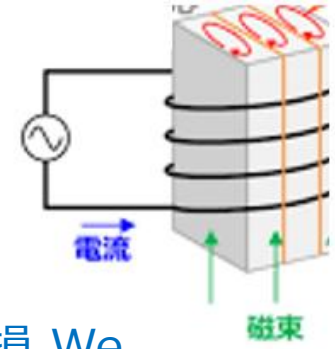
例：100kWのモータで　2kWの鉄損がでると，銅損が2kWの時に最大効率となるので
その時の最大効率は ４kWの損失があるので
最大効率 ＝ 100/（100＋４） ＝96%

永久磁石式モータの弱点

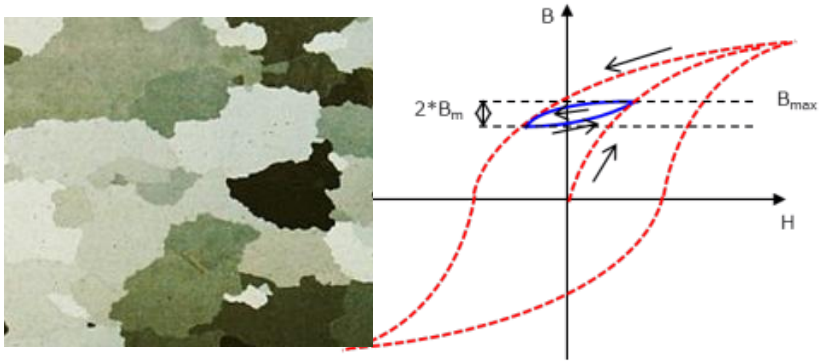
ロータの磁石磁束が一定

① 高回転では誘起電圧を発生し、制御失効時（トラブル）に備えた保護回路・制御が必要

② 磁石磁束で無負荷でも、鉄損（渦電流損＋ヒステリシス損）が発生し低負荷効率が悪い



＋



渦電流損 We

（周波数の2乗，　1 /板厚^2）

$$\frac{\pi^2 d^2 B_m{}^2 f^2}{6\rho}$$

d：板厚 ρ 導電率 Bm磁束密度　f 周波数

$$W = W_h + W_e = af + bf^2$$

周波数が増える＝鉄損が増える

ヒステリシス損 Wh

（周波数，磁束密度の1.6～2に乗比例）

電磁鋼板は結晶内の電流偏りから渦電流損が増える異常渦損Wexeも発生

$$W = W_h + W_{ce} + W_{exc}$$

$$= W_h + \frac{\pi d^2 B_m{}^2 f^2}{6\rho} + A \cdot B_m{}^{1.5} f^{1.5}$$

永久磁石式モータの弱点

Tesla Model 3

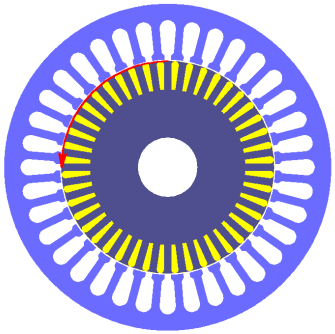
211kW (280ps)のPMモータ電池は54kWh
これでも既に過剰の大型モータで ＝鉄損が大きいが、、、

Tesla Model S Plaid

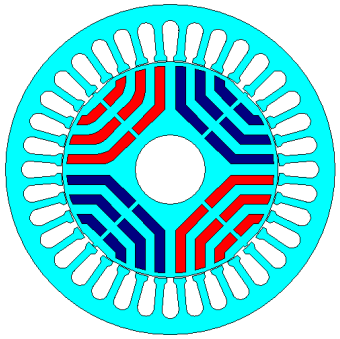
前輪１、後輪２の3モータで 1020ps（約750kW）
モータがたくさんあって，鉄損も数KWレベルと非常に大きく 燃費も悪いので
100kWh のおおきなバッテリを積んでいる （早いですが，，，）

鉄損低減へのアプローチ＝可変磁束

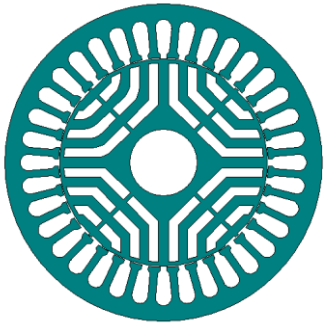
誘導モータ



磁石＋リラクタンス併用

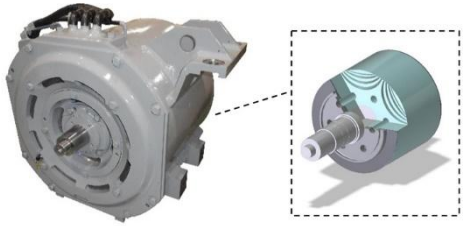


リラクタンスモータ



巻き線界磁
（電磁石）モータ

Audi E Tron GT Motor & Drivetrain Animation Youtube

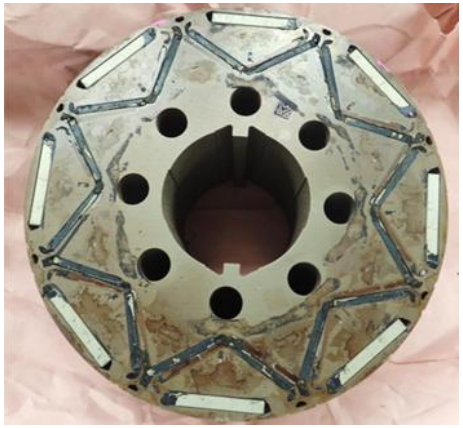


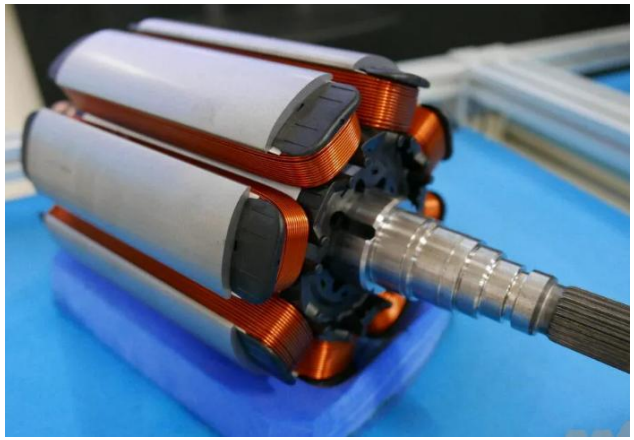
東京メトロ実証試験

GM Volt

巻線で頑張るメーカもあります

巻き線界磁モータ
ＥＥＳＭ（Electrically Excited Synchronous Motor）

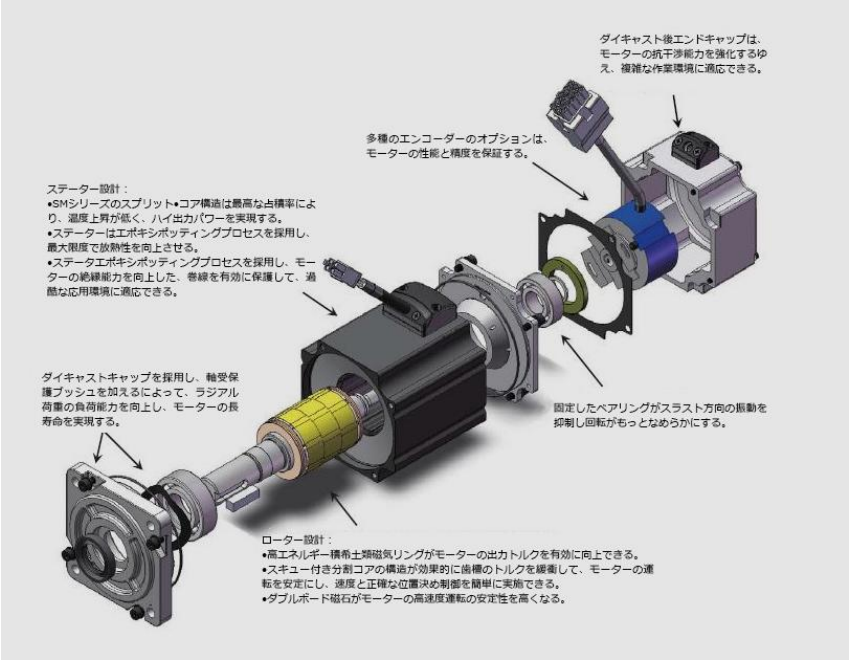




モータを動かすときの電流制御

PMモータを動かすには

モータ　　位置センサ



インバータ（サーボアンプ）

https://www.moonsindustries.com/jp/series/m2dc-series-servo-motors-jp030101

ベクトル制御，DQ変換の必要性

モータの中身

- PMモータは回転子位置に変化対応して電流位相を変えないといけない
- 回転子位置は回転センサ（光学式エンコーダ，磁気式レゾルバなど）で把握できている

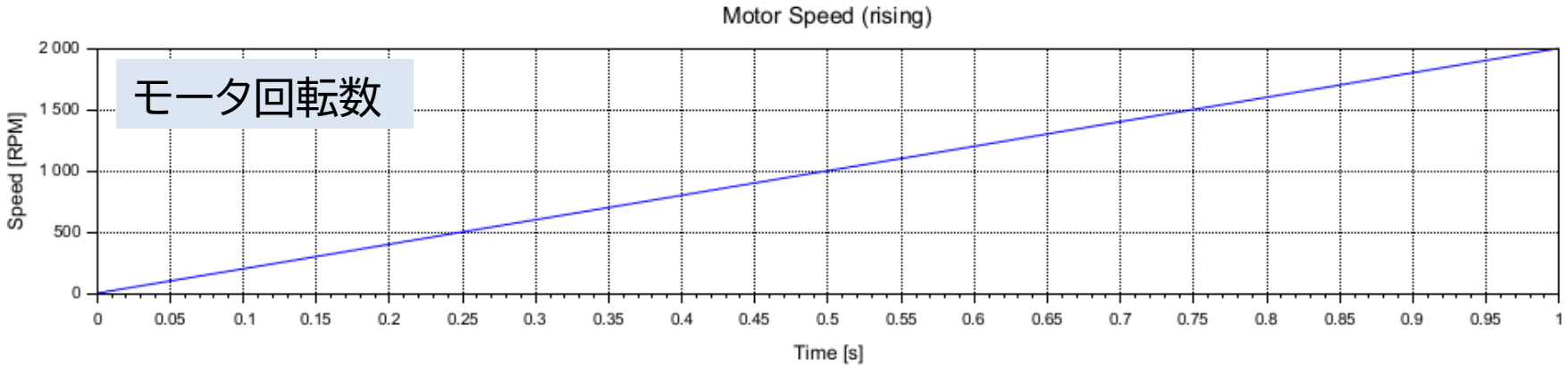
なので

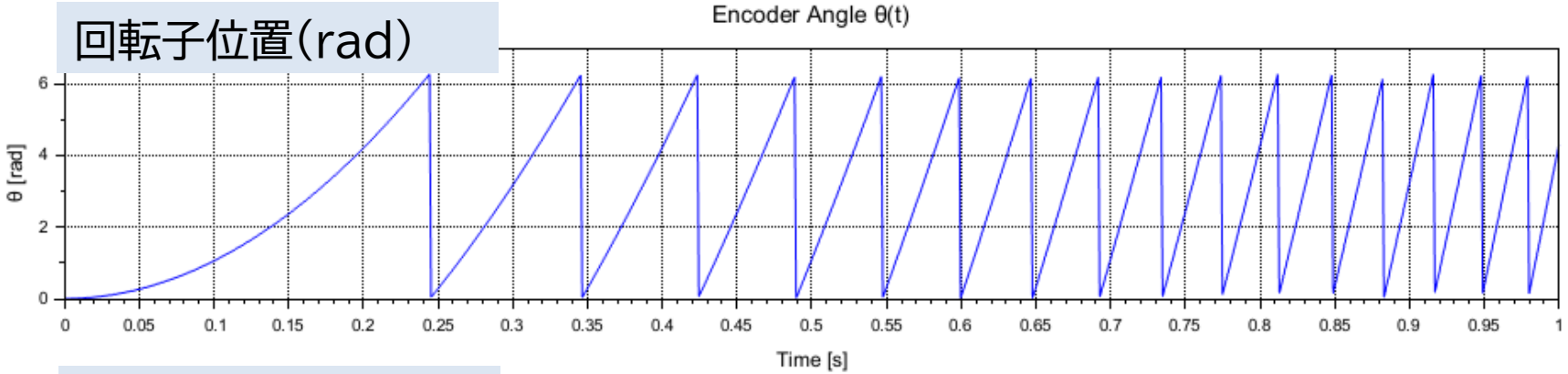
- 回転子位置に応じて3相電流の位相を変える
- トルク指令に応じて，3相電流の振幅を変える

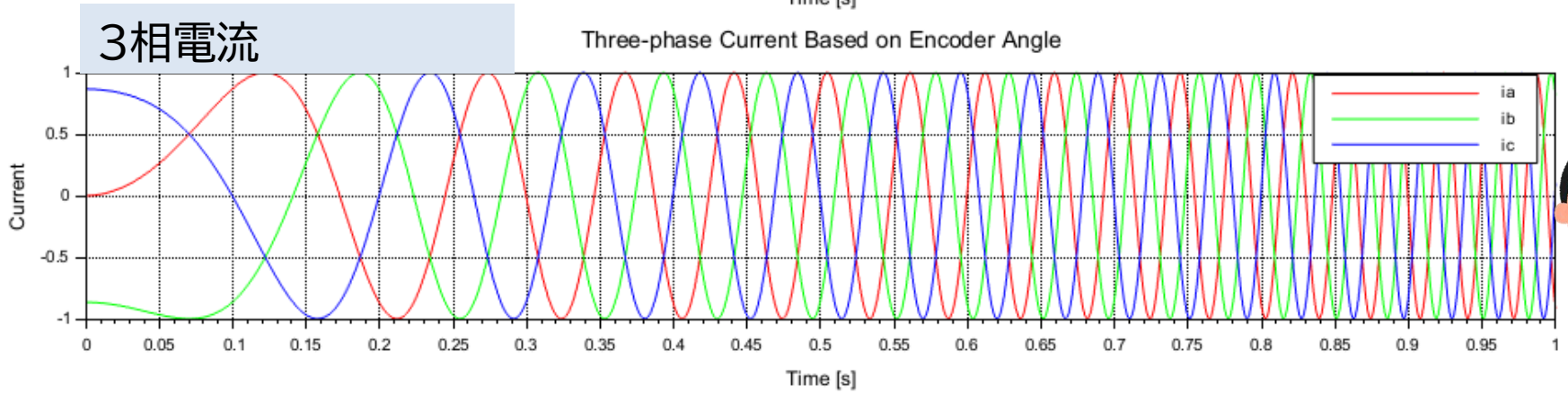
でも

トルク指令でモータを制御したい．＝3相電流の位相や振幅を直接制御したくない
回転数が変わってもトルク一定なら，指令も一定でありたい．

トルク一定で加速するときの電流波形



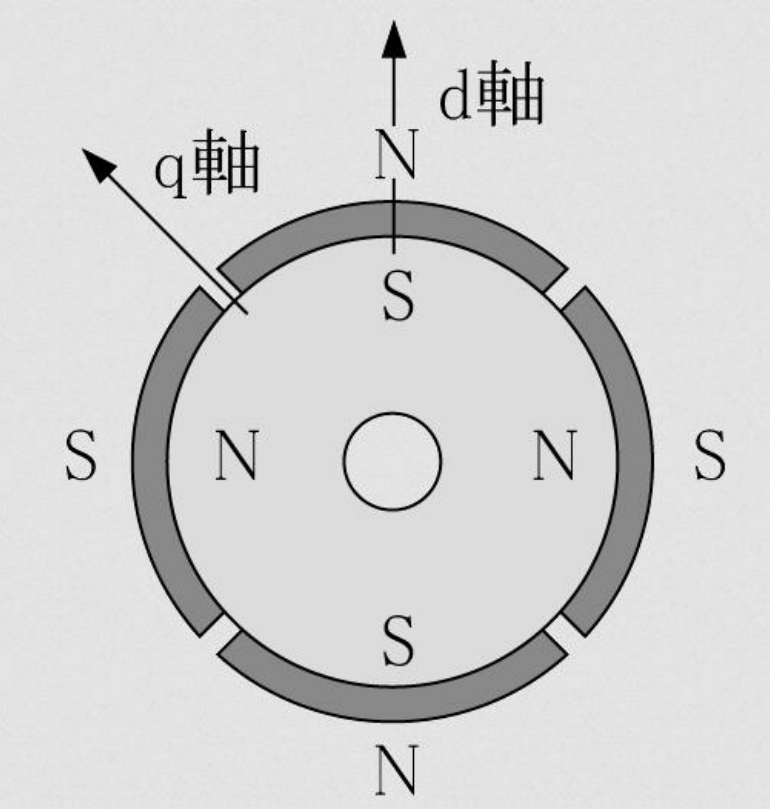


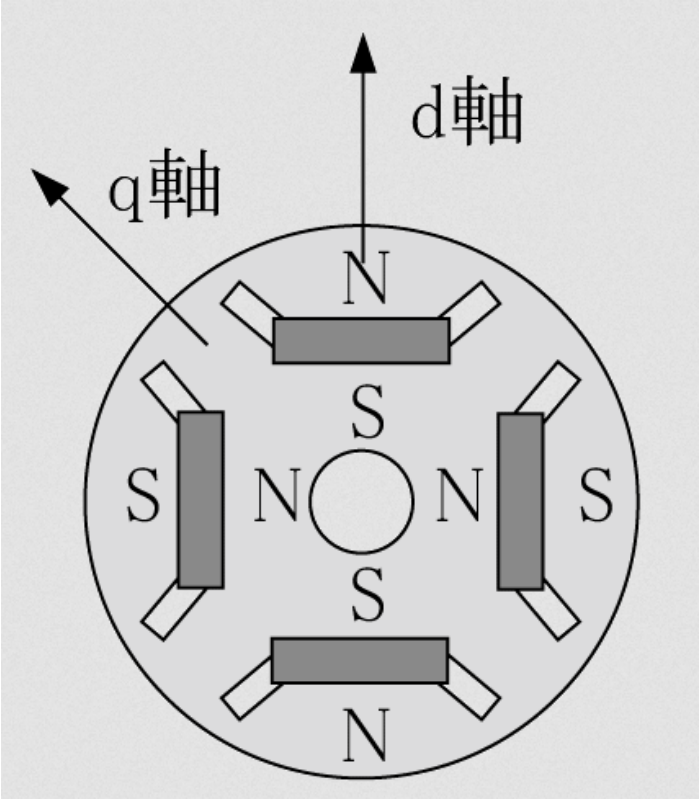


ＤＱ軸を定義します

D軸 直軸
Direct
主磁束のある軸

Q軸 横軸
Quadrature
主磁束と電気角で直交する軸
90度ずれた位置





dq変換（交流を直流のように扱う技です）

3相の回転するベクトル＝3相電流を
回転と同期する2軸に射影する＝ｄｑ変換
Vd,VqとVa,Vb,Vcは同じことを表しています（3相平衡である限りは．．）

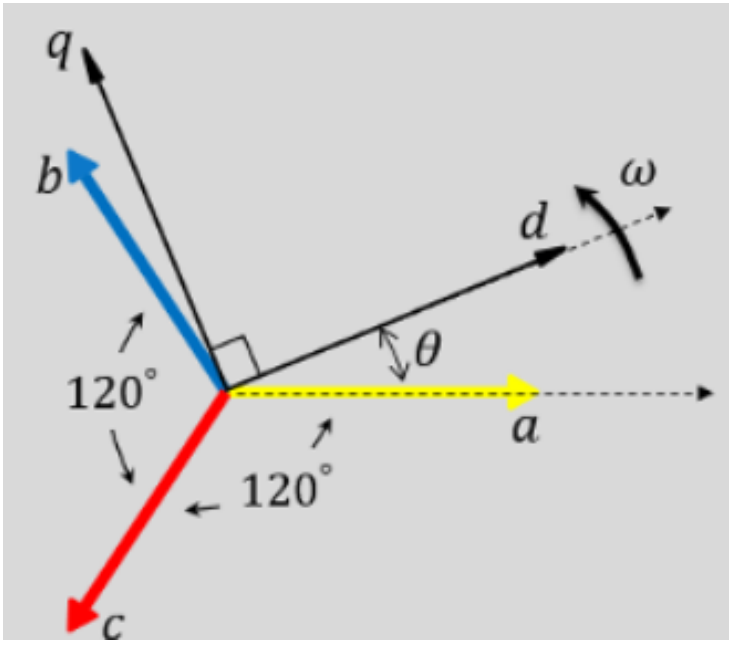
$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix}$$

この係数には2通りの流派があります

絶対変換 $\sqrt{\frac{2}{3}}$

相対変換 $\frac{2}{3}$

どちらでもよいですがごっちゃにしない



https://jp.mathworks.com/discovery/clarke-and-park-transforms.html

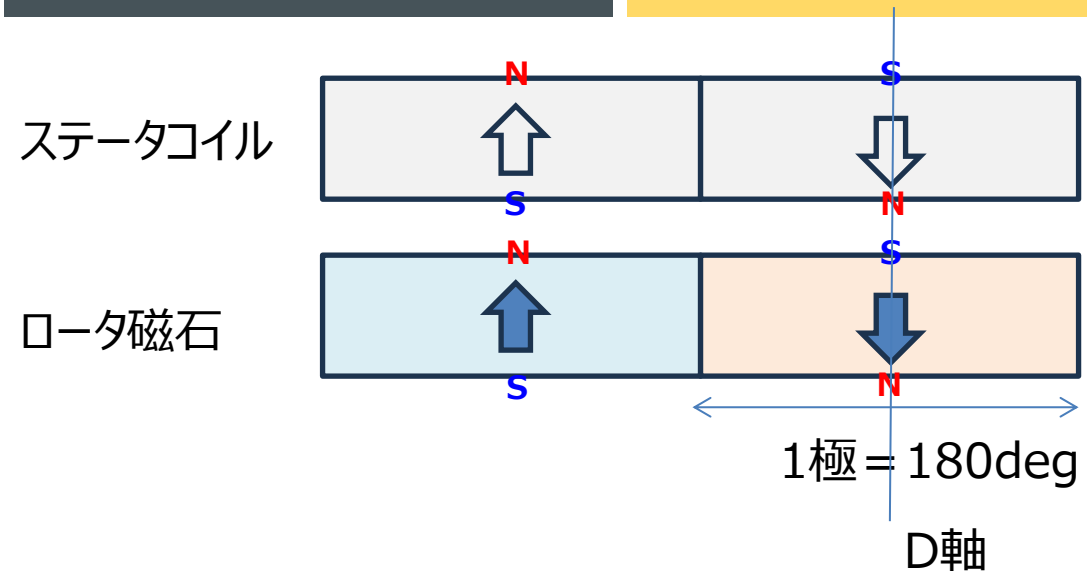
3相2相変換の係数について

項目	絶対変換(国内で主流)	相対変換（欧州で主流）	備考
uvw-αβ変換行列$[C_2]$ $[C_2] \equiv A\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$	$A = \sqrt{\frac{2}{3}}, \quad [C_2]^T[C_2] = E$	$A = \frac{2}{3}, \quad [C_2]^T[C_2] = \frac{3}{2}E$	E：単位行列
dq軸電圧方程式, Ld,Lq	$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix}$		絶対変換と相対変換で不変
磁石による鎖交磁束 一相あたりの永久磁石による鎖交磁束の最大値Ψ_fとしたときのΨ_a	$\Psi_a = \sqrt{\frac{3}{2}}\Psi_f$	$\Psi_a = \Psi_f$	
電力 $P = [V_{xx}]^T[I_{xx}]$	$P = P_{uvw} = P_{dq}$	$P = P_{uvw} = \frac{3}{2}P_{dq}$	ココが絶対変換の出発点 (uvwとdqで不変にする)
トルク $T = -P_n[I_{xx}] \times [\Psi^0_{xx}]$	$\mathrm{T} \equiv T_{uvw} = T_{dq}$ $\mathrm{T} = P_n\{\Psi_a I_q + (L_d - L_q) I_d I_q\}$	$\mathrm{T} \equiv T_{uvw} = \frac{3}{2}T_{dq}$ $\mathrm{T} = \frac{3}{2}P_n\{\Psi_a I_q + (L_d - L_q) I_d I_q\}$	同上
電流 相電流ピークをIとしたときの dq軸電流ベクトルの長さ$\sqrt{{i_d}^2 + {i_q}^2}$	$\sqrt{\frac{3}{2}}I$	I	ココが相対変換の出発点 (uvwとdqで不変にする)
電圧 相電圧ピークを$V_{相}$としたときの dq軸電圧ベクトルの長さ$\sqrt{{v_d}^2 + {v_q}^2}$	$\sqrt{\frac{3}{2}}V_{相} = \frac{1}{\sqrt{2}}V_{線間} = V_{線間実効値}$	$V_{相} = \frac{1}{\sqrt{3}}V_{線間}$	同上

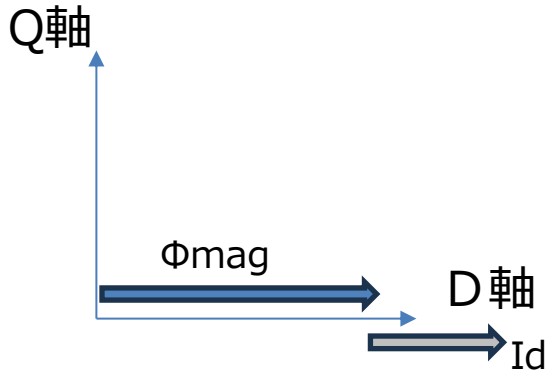
トルク，出力が
dq軸値と同じ大きさ

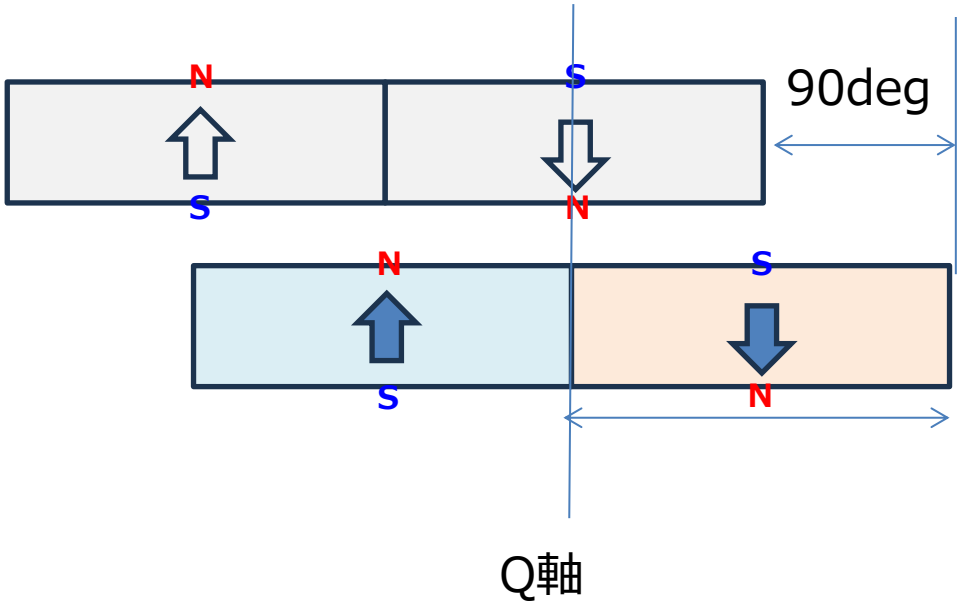
相電流，相電圧が
dq軸値と同じ大きさ

D Q軸

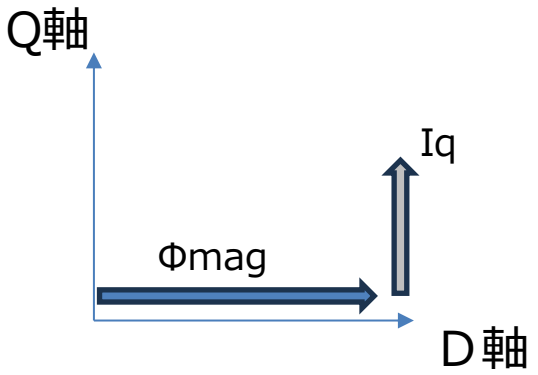


0度は主磁束＝
磁石磁束と同じ方向で定義
トルク出ない



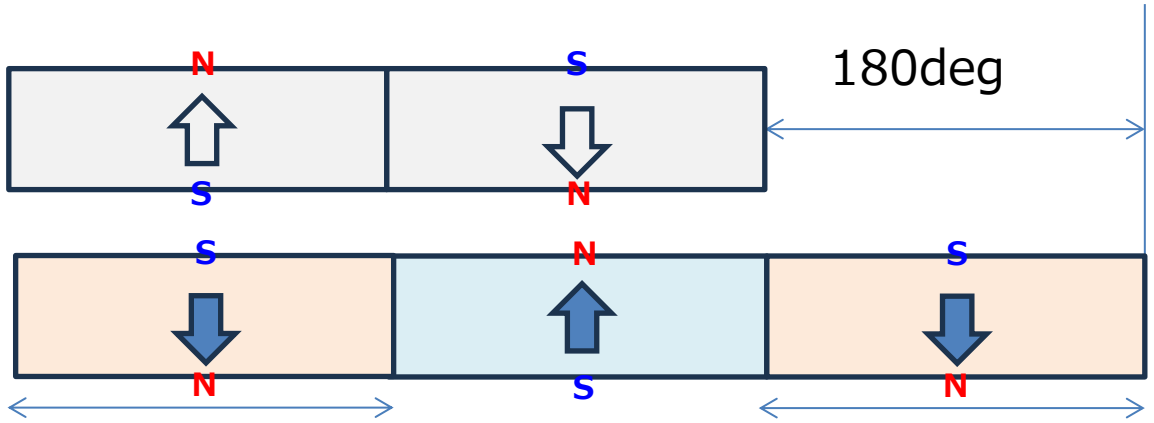


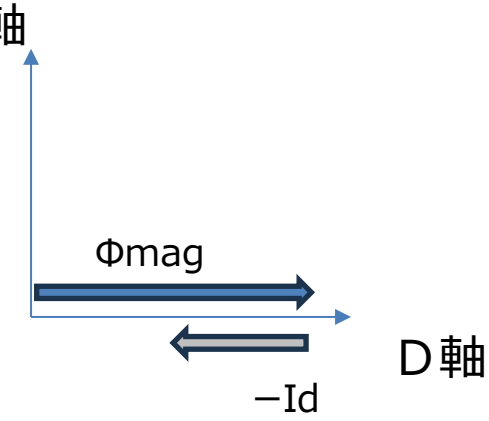
90度は主磁束から90度進んだところ，q軸にいると一番トルクがでるのがSPM（突極無しの場合）

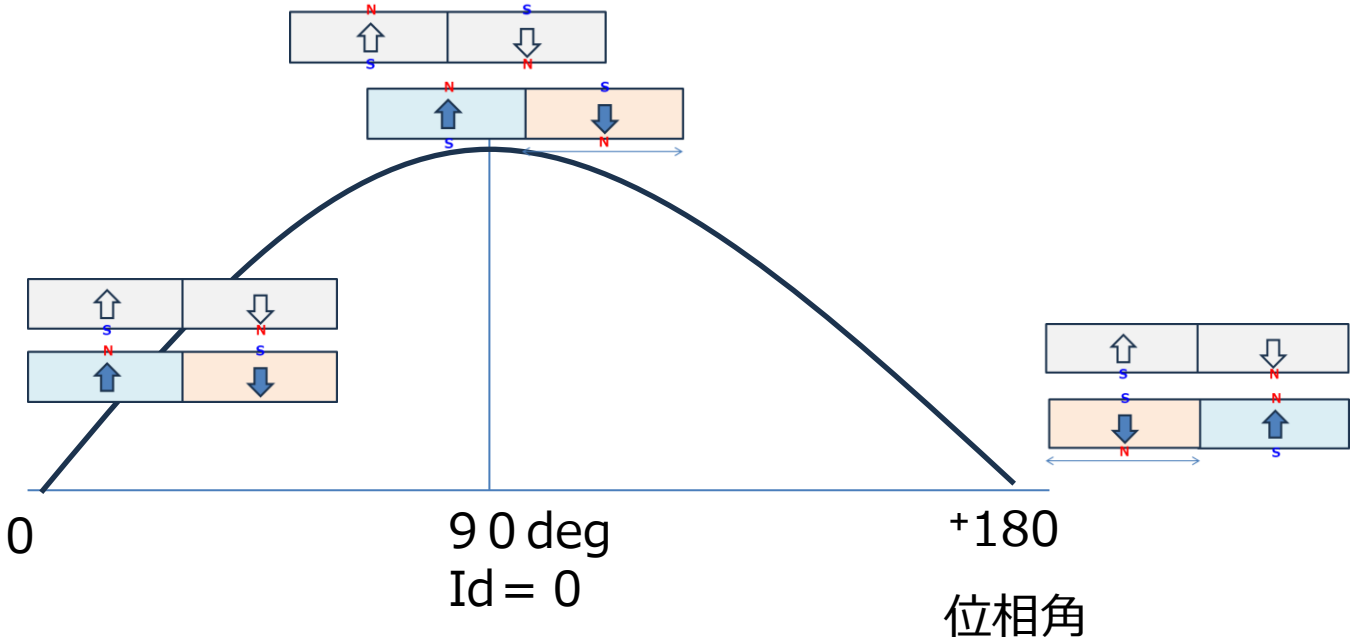


DQ軸

主磁束から180度進んだところ，
-q軸にいると磁束を打ち消す
これを弱め界磁という

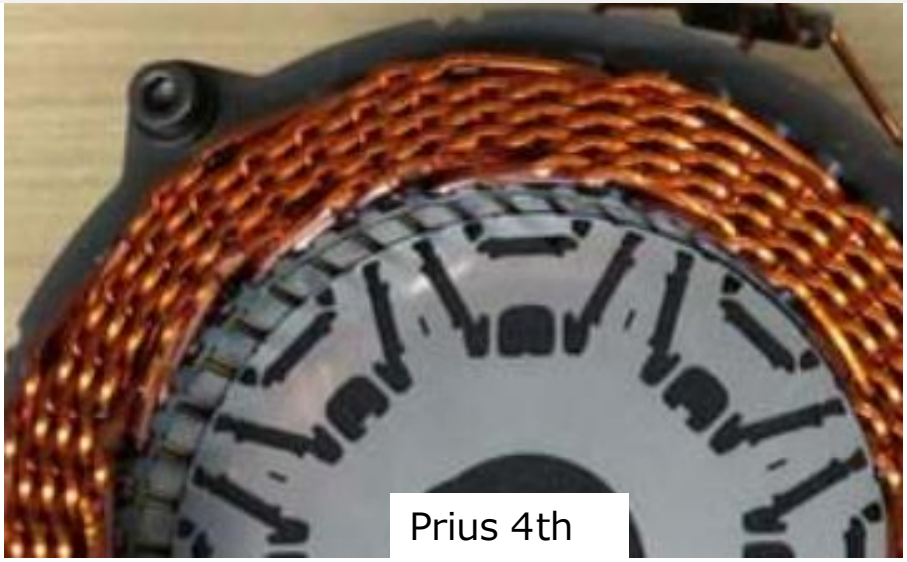






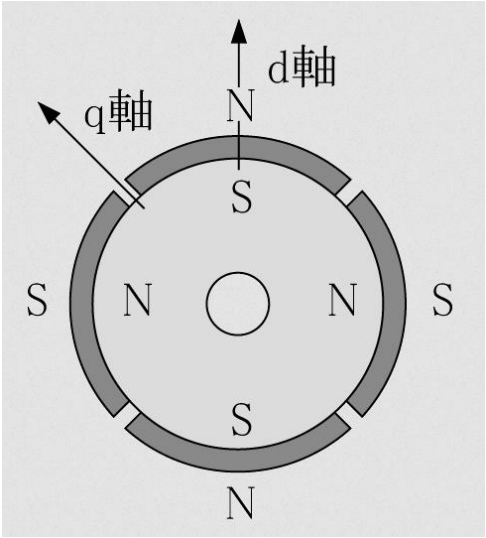
永久磁石式モータの構造

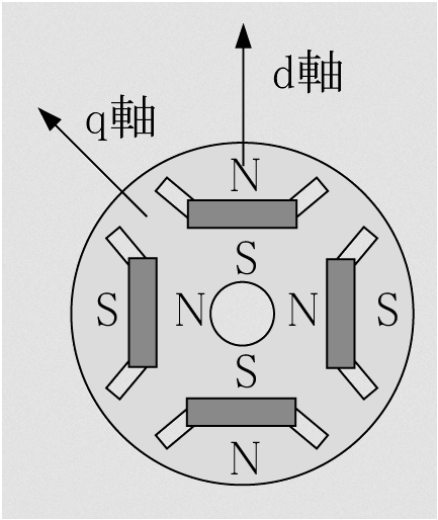
なんで こんな形なんだろう？



９７年プリウス　　００プリウス　　０５年プリウス

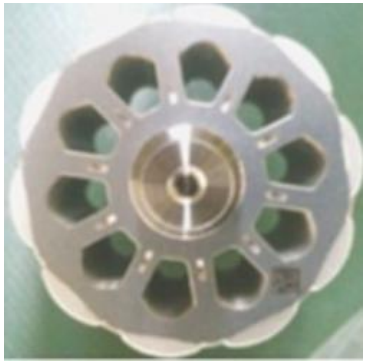
永久磁石式モータの構造(磁石位置で２つ)

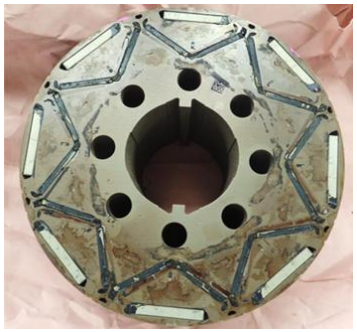




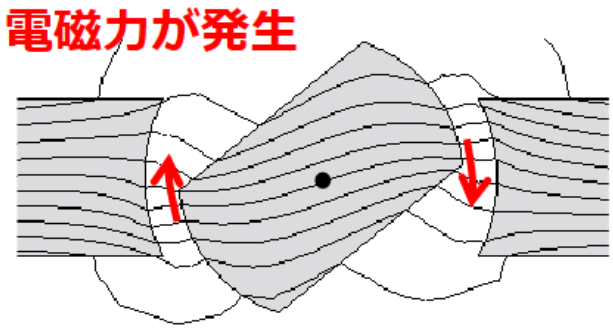
表面磁石型
SPM:
Surface **P**ermanent magnet mounted **M**otor

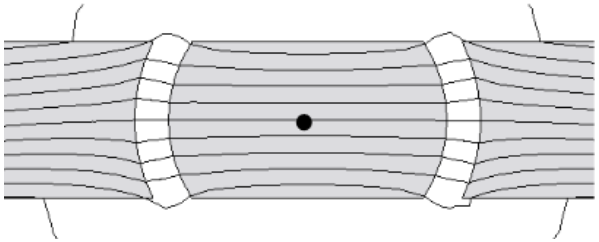
磁石埋込み型
IPM:
Interior **P**ermanent magnet **M**otor

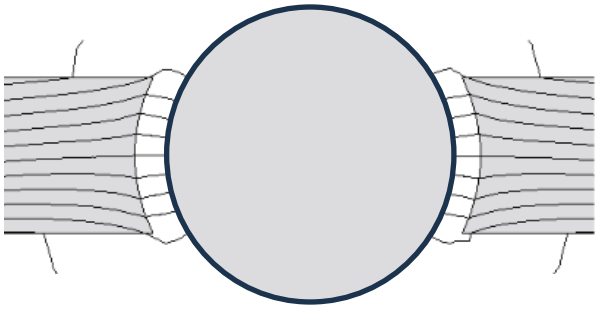




リラクタンストルクって？







回転子位置が変化しても磁束量は変化しない
トルク出ない

回転子位置が変化すると磁束量が変化する

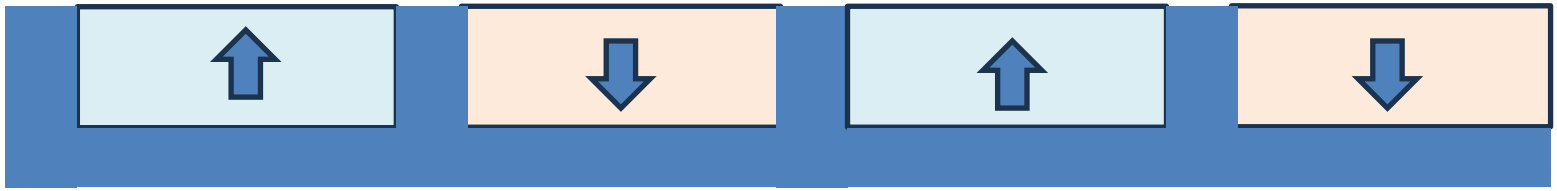
磁束が増える方向に移動する＝トルクが出る

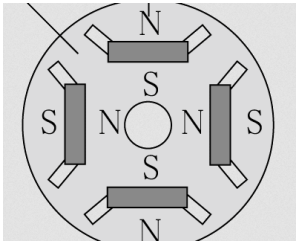
DQ軸リラクタンストルク

ステータコイル

……

ロータ磁石





磁石の極間＝q軸に鉄がいるとどうなるかしら．．
左図を簡単化してかいたのが上図

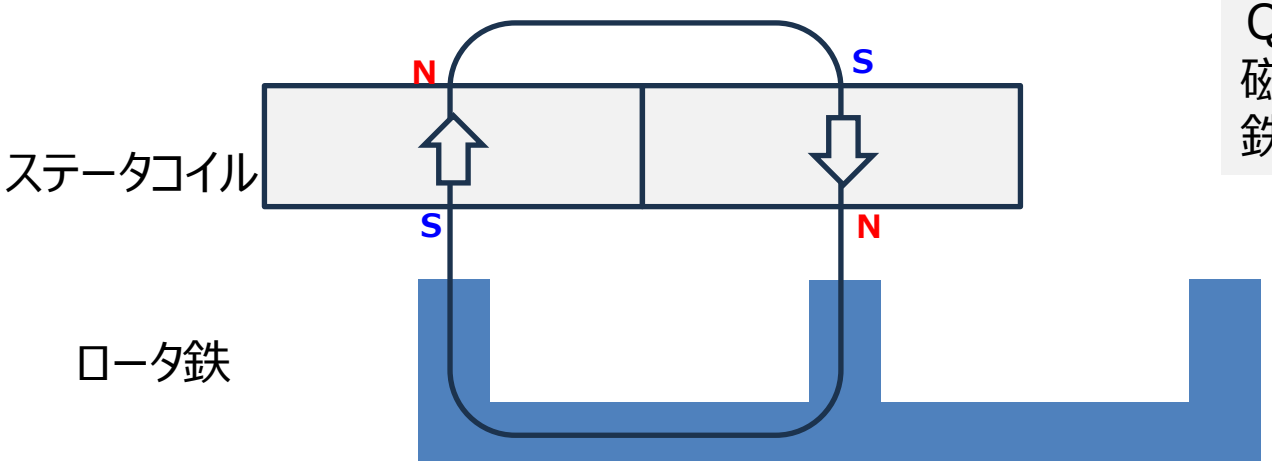
ステータコイル

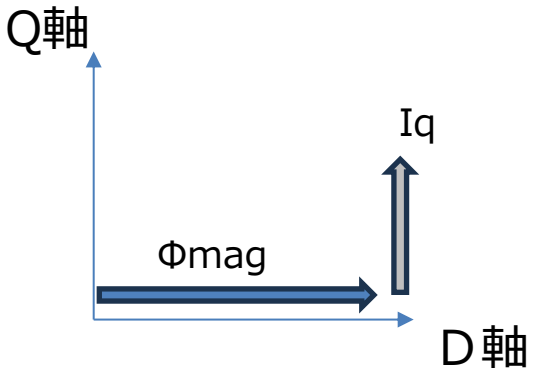
ロータ鉄

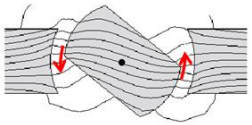
ｄ軸位置だとこんな状態
両端の鉄を引っぱって
トルクが出ない

DQ軸リラクタンストルク

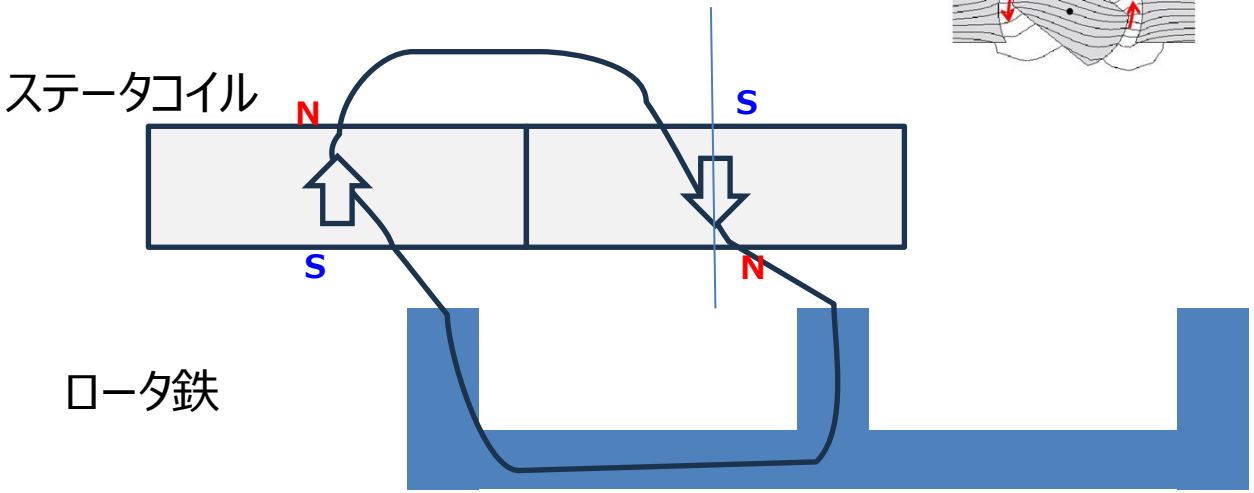
Q軸位置だとこんな状態
磁石トルク最大だが
鉄を吸付けてるだけ（トルク０）

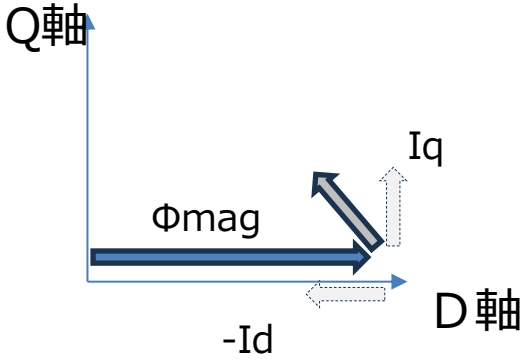






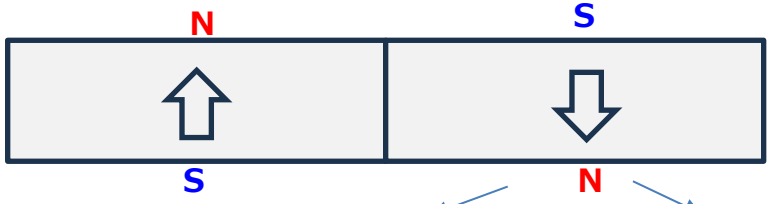
Q軸ら45度進めると
鉄トルクが最大になる
−Id＝Iq＝I/√2





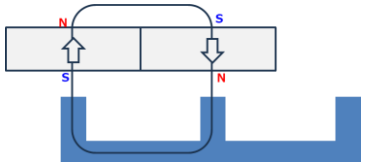
DQ軸リラクタンストルクク

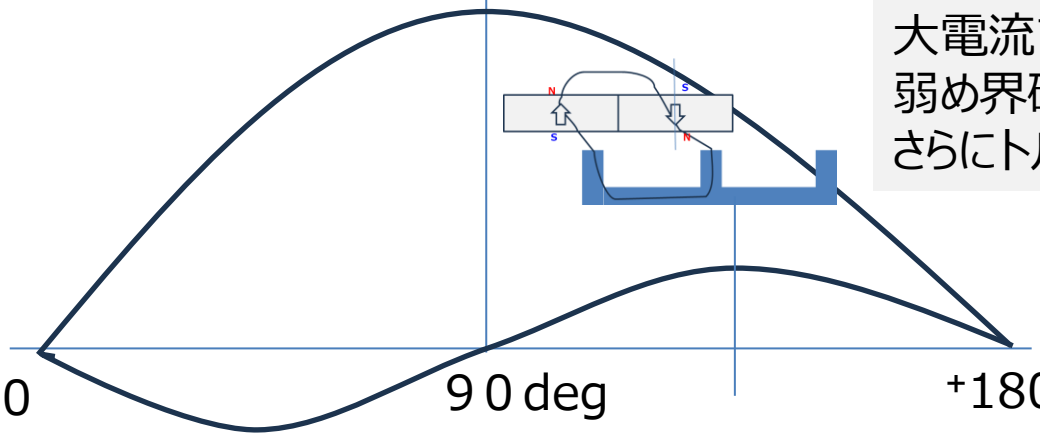
ステータコイル

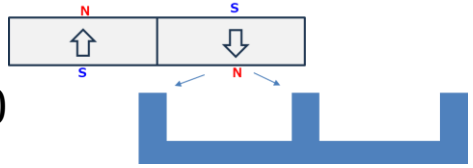


ロータ鉄

さら進めて180度まで来ると
鉄トルクはゼロに戻る
トルク変化の周期は磁石の１/２
鉄の吸引には極性がないので．．

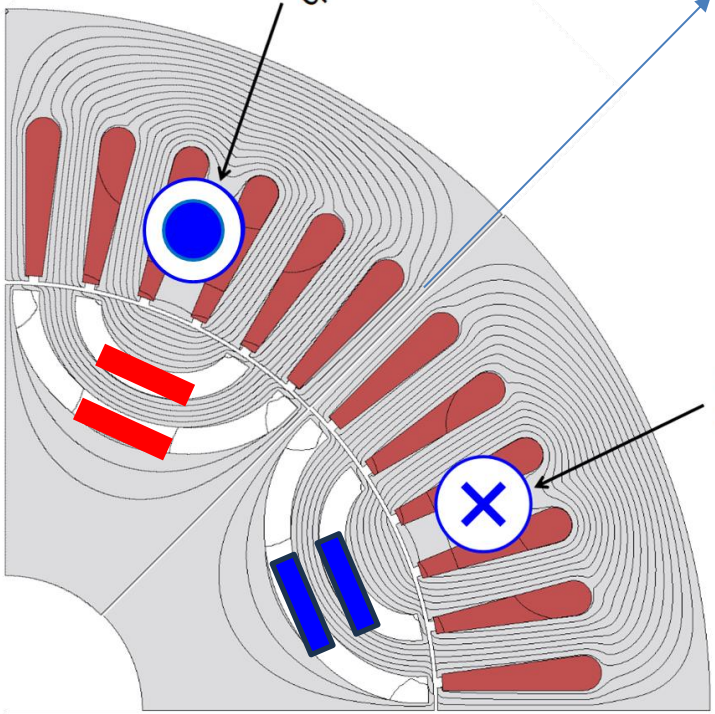






理論上は90＋45＝135度で
リラクタンストルクピークだが
大電流ではさらに進角して150度付近にすると，
弱め界磁効果で磁気飽和が緩和されため，
さらにトルクが増えることが多い

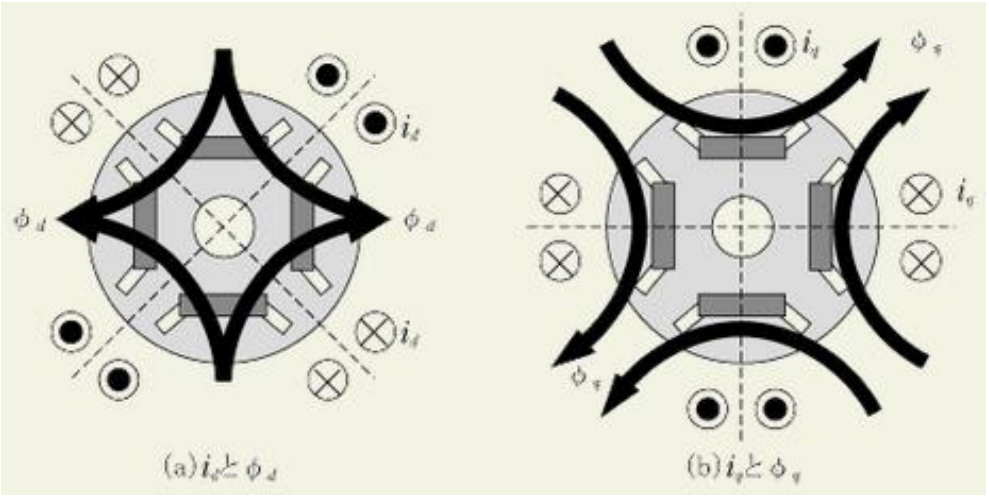
リラクタンストルクを大きく変化する構造は



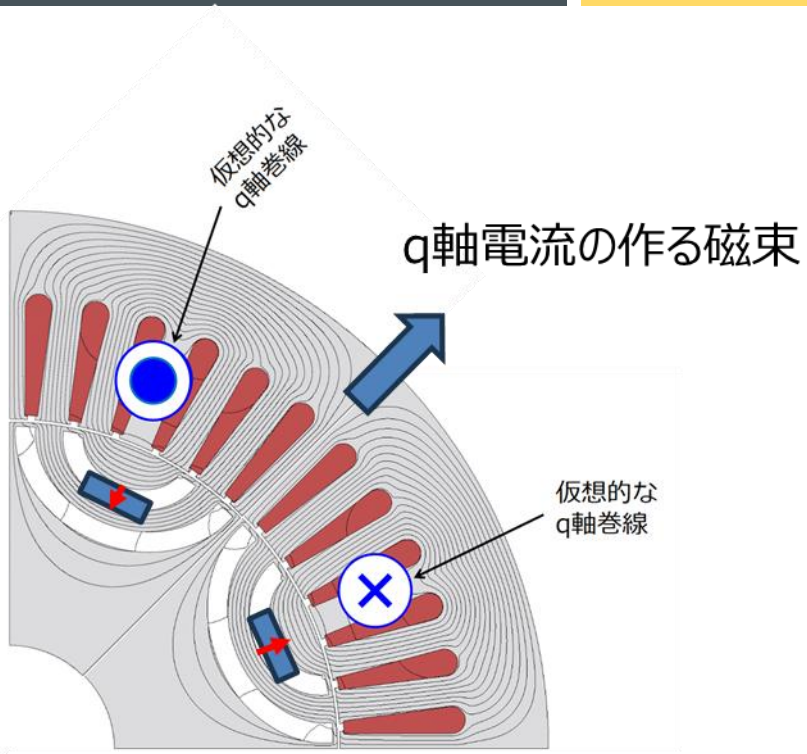
Q軸 横軸
Quadrature
磁石のモータでは磁石中心をd軸と呼ぶ

D軸 直軸
Direct

仮想的な
q軸巻線

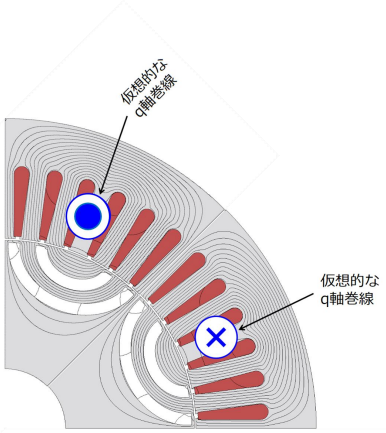


弱め界磁制御って何がいいの？

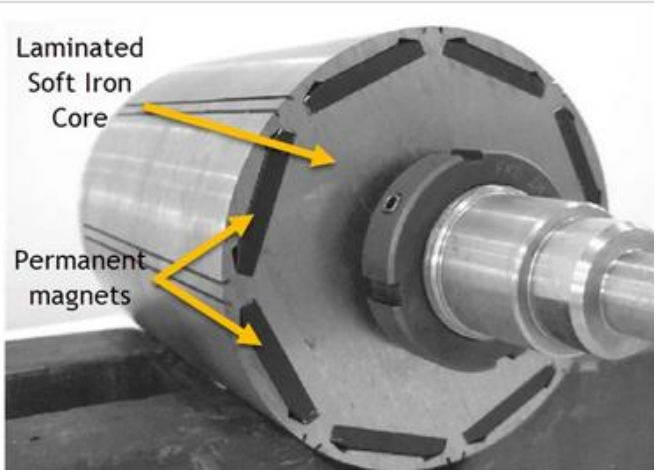


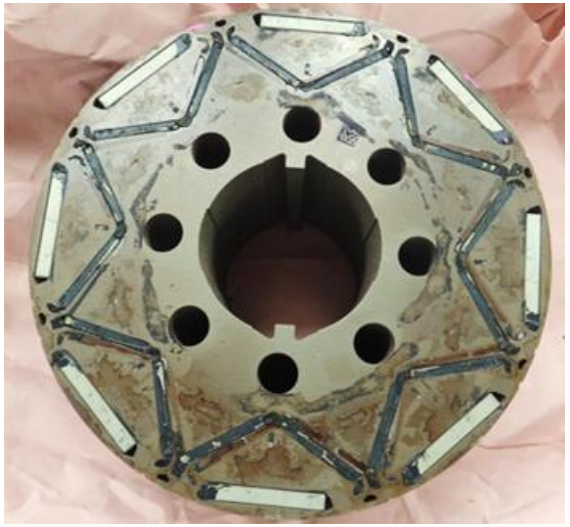
マグネットトルクはｑ軸位置で
通電するのがトルク最大

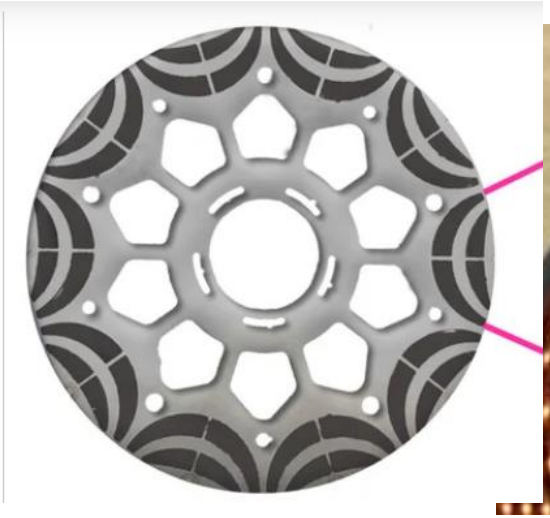
進角すると，ｄ軸成分がはいり
磁石を弱める＝電圧がさがる
加えて，鉄を引っ張り込むので
リラクタンストルクも発生
電圧はさがり，トルクは増える！

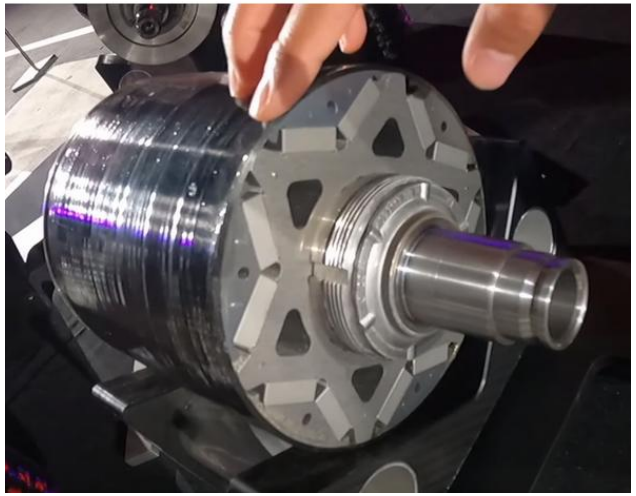


リラクタンストルクの確保と遠心力の対応が相反

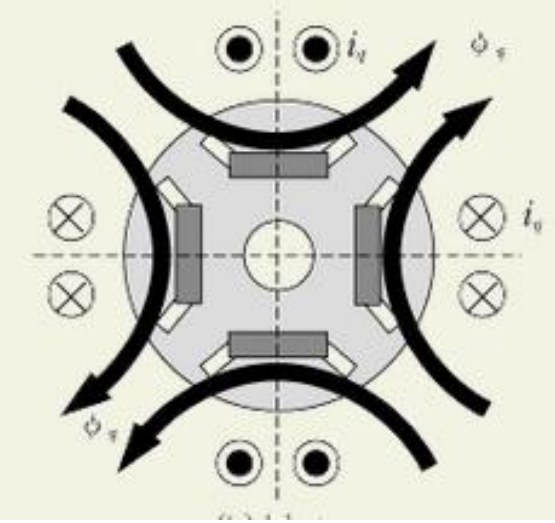


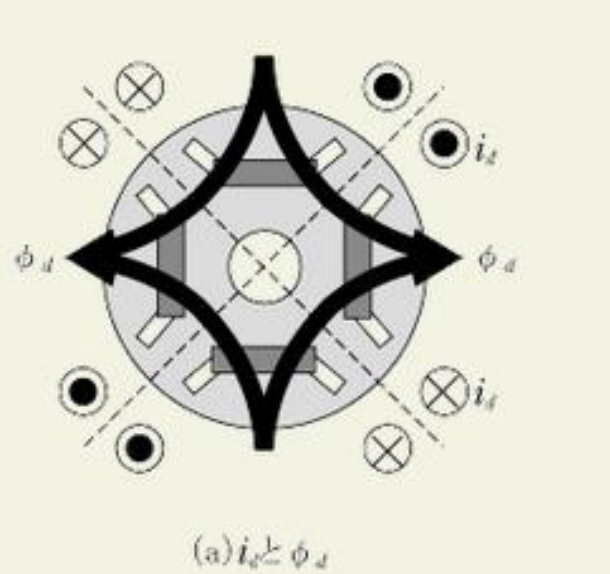






ベクトル図を理解してください





Iqを流したときの磁束量をΦｑ
Φｑ　＝Ｌｑ・Ｉｑ
q軸インダクタンス

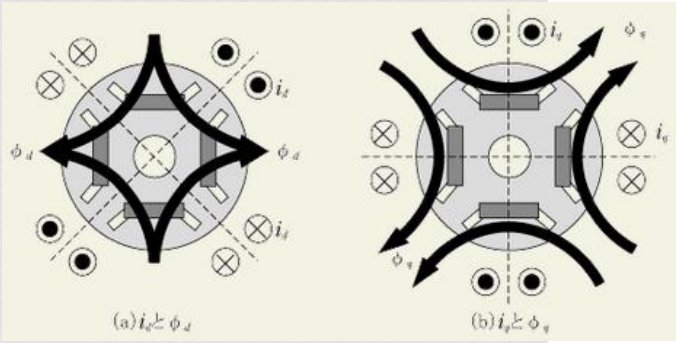
Φｄ＝Ld・Id
d軸インダクタンス

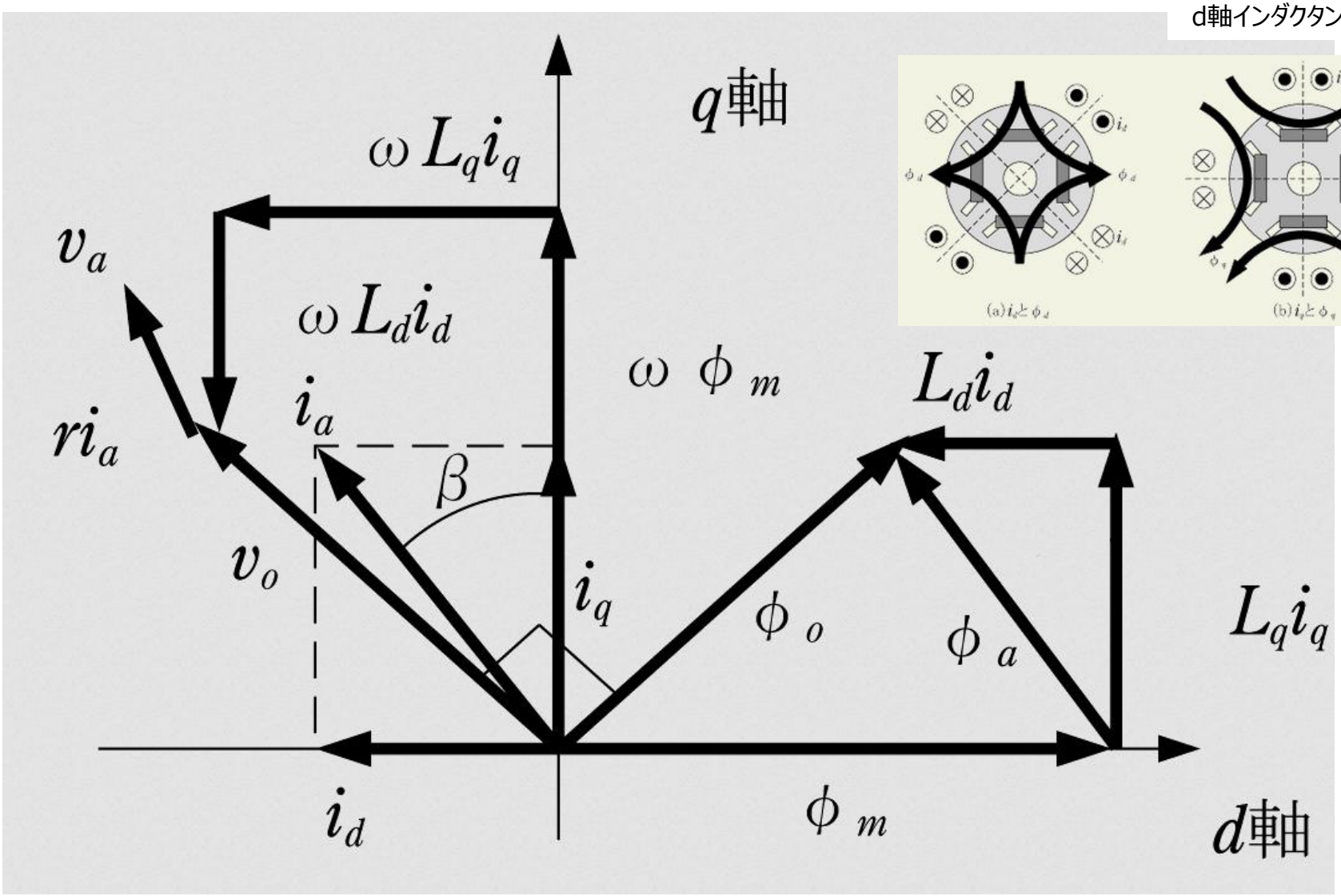
-Idを流したとき
Φｄ＝Φmag −Ld・Id

磁束なイメージでベクトル図を理解してください

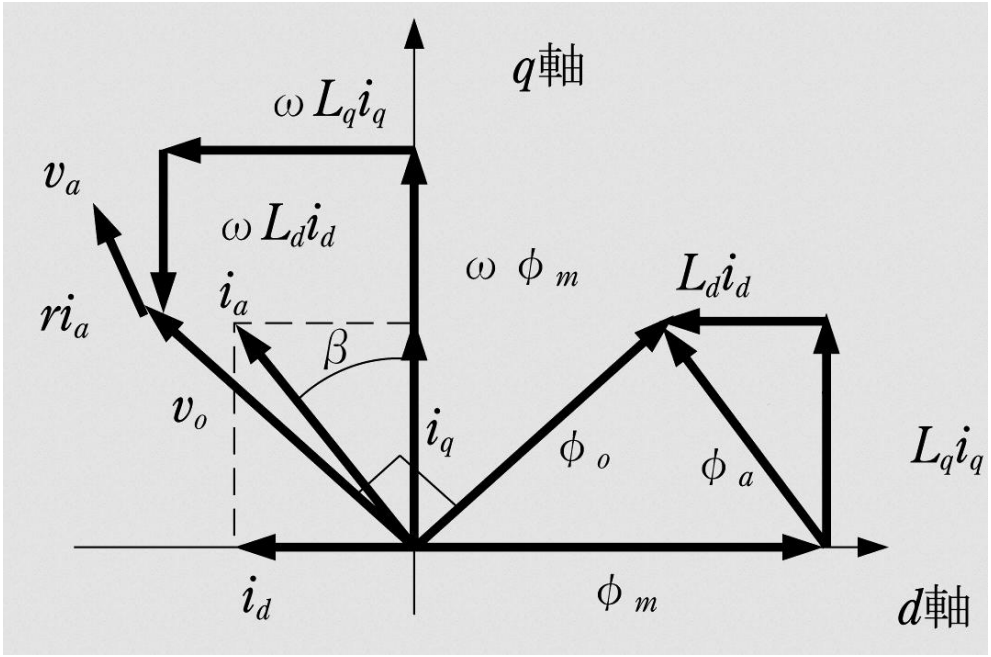
Iqを流したときの磁束量をΦｑ
Ｌｑ＝Φｑ/Ｉｑ q軸インダクタンス

−Idを流したとき
Φmag −LdIdがΦd
Ｌｄ＝Φｄ/Id
d軸インダクタンス





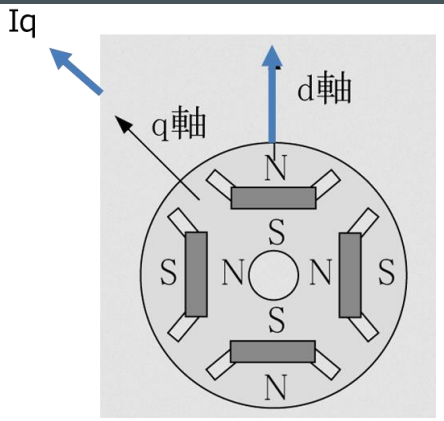
では数式にしてみます(定常状態)



Vd= r Id − ωLqIq
Vq= ωLdI d + r I q + ωΦm

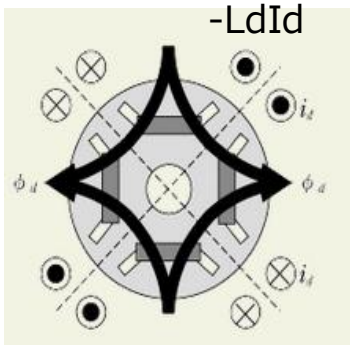
$$\begin{matrix} Vd \\ Vq \end{matrix} = \begin{vmatrix} r & -\omega Lq \\ \omega Ld & r \end{vmatrix} \begin{matrix} Id \\ Iq \end{matrix} + \begin{matrix} 0 \\ \omega\Phi mag \end{matrix}$$

トルクはどうなるの？



ΦmagとIqで出すマグネットトルク
Φmag･Iq

-Id 磁石磁束と反対で
弱めるので負



磁束と直交する電流がトルクを出す（絶対変換）
T= Pn(Φｑ・Ｉｄ ＋ Φｄ・Ｉｑ)　　Pnは極対数

Φｑ = LqIq
Φｄ = Φmag –LdId

T= LqIq･Id + Φmag Iq – LdId･Iq

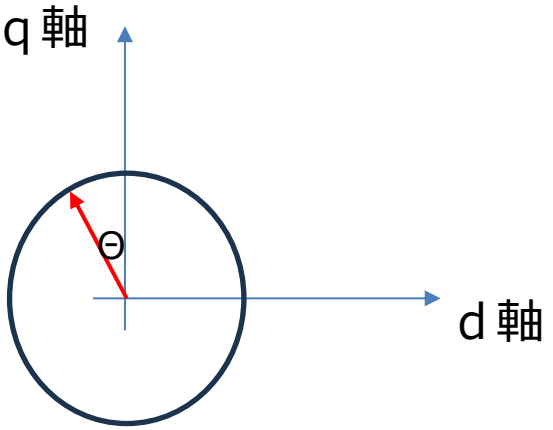
= (Ld-Lq)IdIq + Φmag Iq
リラクタンストルク　　マグネットトルク
Lq＞Ld
Idは負ならモータ

運転範囲の制約

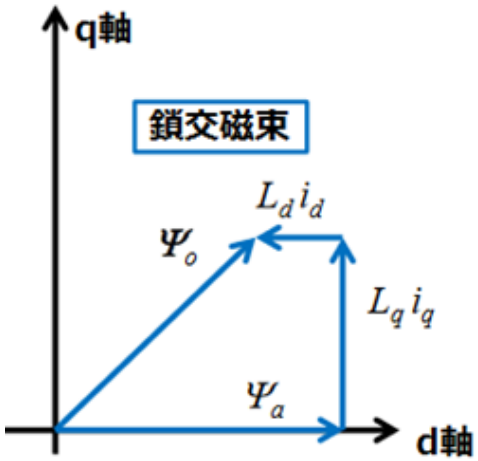
- 電流制限円 と 電圧制限楕円

$$\begin{matrix} Vd \\ Vq \end{matrix} = \begin{vmatrix} r & -\omega Lq \\ \omega Ld & r \end{vmatrix} \begin{matrix} Id \\ Iq \end{matrix} + \begin{matrix} 0 \\ \omega \Phi mag \end{matrix}$$

電流の最大値はIdとIq二乗和なので
制限円のなかでベクトルを選べる
Id＝I cosΘ
Iq＝I sinΘ
Θは相差角でId＝ 0 をΘ＝ 0 に定義



電圧制限（電流と磁束量の関係）



$$\psi = \sqrt{(\mathrm{Ldid} + \Phi_{mag})^2 + (LqIq)^2}$$

$$\omega\psi = V \Leftrightarrow \psi = V/\omega$$

回転数が上がるとψは小さくならないといけない

電流が流せるベクトルの範囲（まとめ）

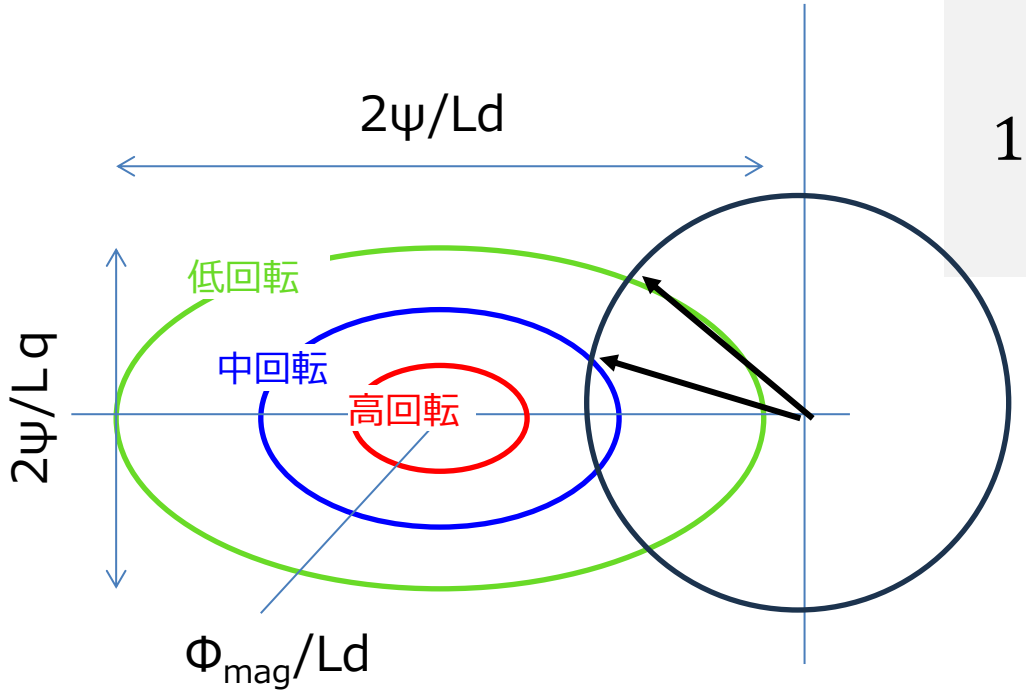
$$\psi = \sqrt{(\mathrm{Ldid} + \Phi_{mag})^2 + (LqIq)^2}$$

電圧からψの上限が決まるでは，Ψを決めた時に，Id,Iqのとれる範囲はどうやってきまる？

制約１：インバータの上限電流：$Id^2 + Iq^2 < I_{max}^2$ ---電流制限円

制約２：電圧できまる楕円内

$$\psi^2 = (\mathrm{Ldid} + \Phi_{mag})^2 + (LqIq)^2$$

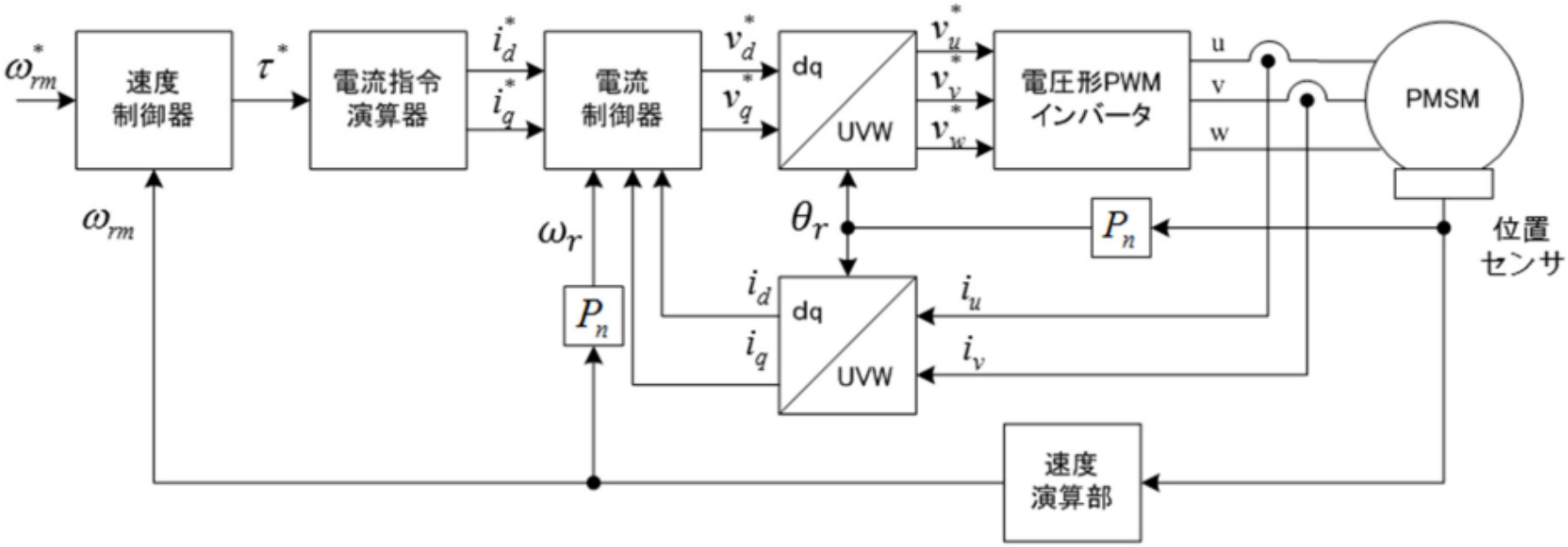


$$1 = \left(\frac{i_d + \frac{\Phi_{mag}}{L_d}}{\frac{\psi}{L_d}}\right)^2 + \left(\frac{i_q}{\frac{\psi}{L_q}}\right)^2$$

$1=(id/a)^2+(iq/b)^2$
はa,bを短辺，長辺とする楕円
Lq ＞ Ldなので
ψ/Ldを長辺，ψ/Lqを短辺とした楕円
を$-\Phi_{mag}/Ld$シフトした形状

回転数があがると，電圧制限から
とりうるψは小さくなる

ベクトル制御の実際



$$\begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix}$$

実際にSCILABでやってみましょう

①DQ変換で3相交流を直流にしてみます

②モータ定数を与えて
電圧，トルクの変化を見てみましょう

PM_NT.sci

問題

- Ld=0.001 H ,Lq=0.003 H ,R=0.1 Ω ， Phi ０． １Wb
- 8極，電圧４００V,電流１００A ，
- 回転数4000rpm で出せる最大トルクは？

Id,Iqが変わると電圧はどうなる？

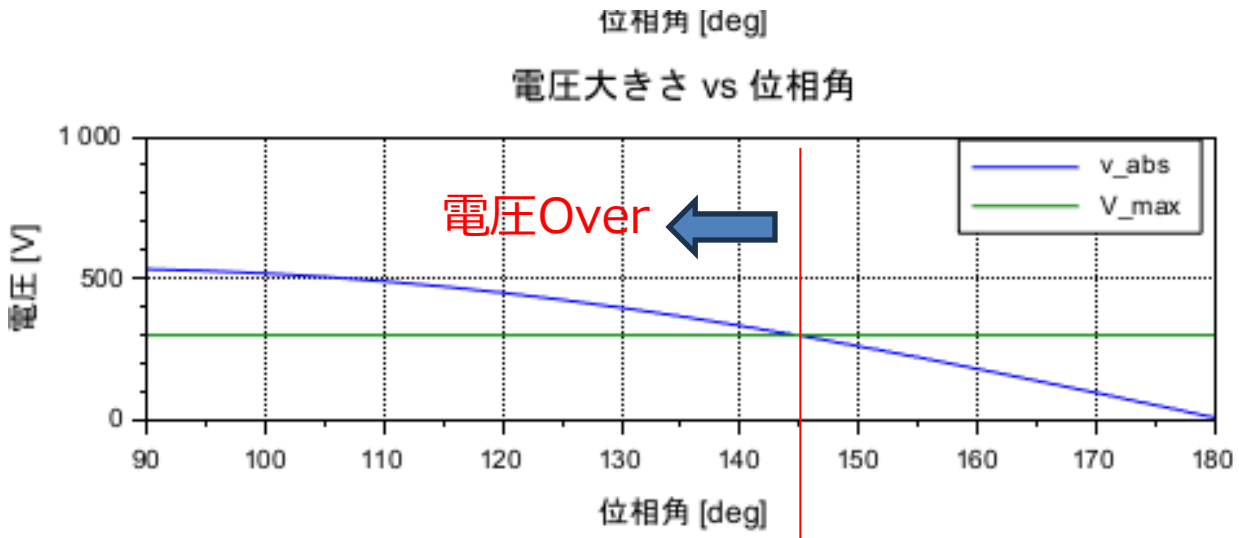
```
23 // 電圧方程式
24 v_d = Rs * i_d + omega_e .* (Lq .* i_q);
25 v_q = Rs * i_q + omega_e .* (Ld .* i_d + Phi);
26 v_abs= sqrt( v_d .* v_d + v_q .* v_q) ;
```

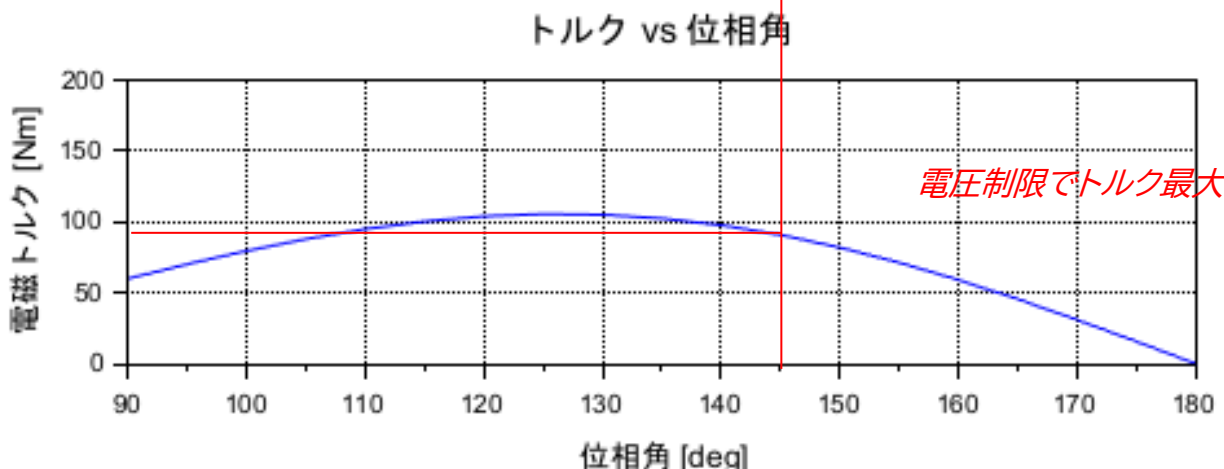
$$Vd = r\,Id - \omega Lq\,Iq$$
$$Vq = \omega Ld\,Id + r\,Iq + \omega\Phi m$$

Id，Ｉｑが変わるとトルクはどうなる？

T= Pn(Φｑ・Ｉｄ ＋ Φｄ・Ｉｑ)　　Pnは極対数

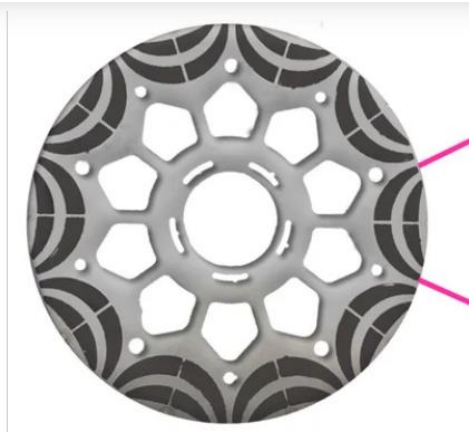
```
// --- 電磁トルク ---
T = 3/2 * Pn * (Phi * i_q + (Ld - Lq) .* i_d .* i_q);
```





電圧制限でトルク最大値が使えない！

ロータ形状の影響を模擬してみる



こんな工夫でLqが2倍になったと仮定してみる

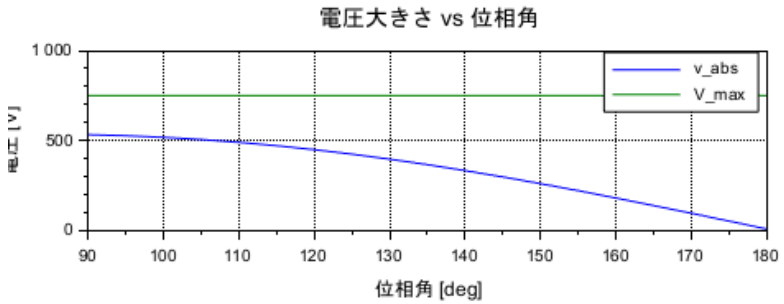
昇圧もしてみたとする V=400V→750V

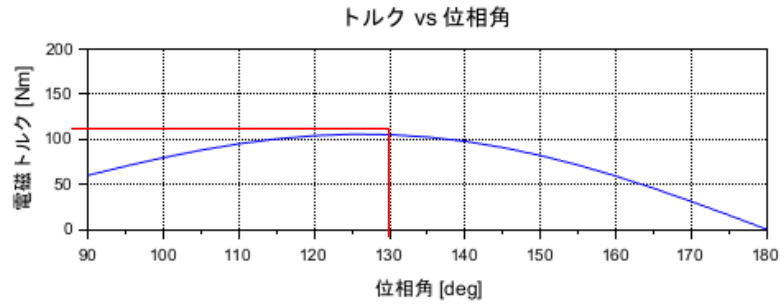
```
1  //---パラメータ設定---
2  Ld = 0.001; // H
3  Lq = 0.003; // H
4  Phi = 0.1; // Wb
5  Rs = 0.1; // Ohm
6  P = 8; // 極数
7  Pn = P / 2; // 極対数
8  V_max = 400; // V
9  I_max = 100; // A
10 rpm = 4000; // 回転数
```

ロータ形状の工夫の成果

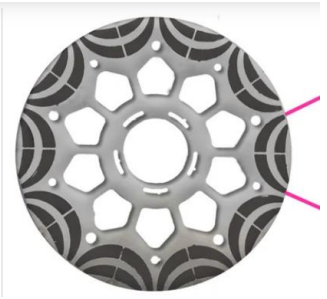
```
// ---- パラメータ設定 ----
Ld = 0.001; // H
Lq = 0.003; // H
Phi = 0.1; // Wb
Rs = 0.1; // Ohm
```

電圧制限とれて
トルク最大値が増えた！

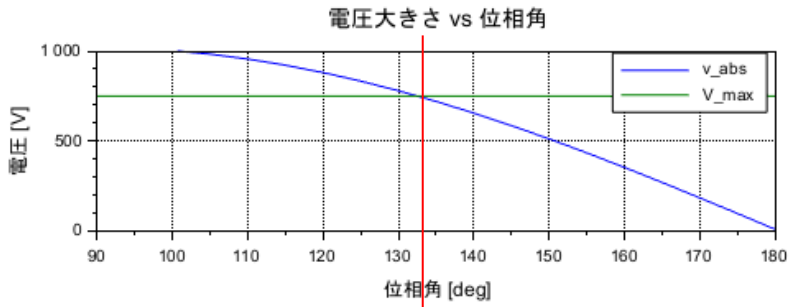


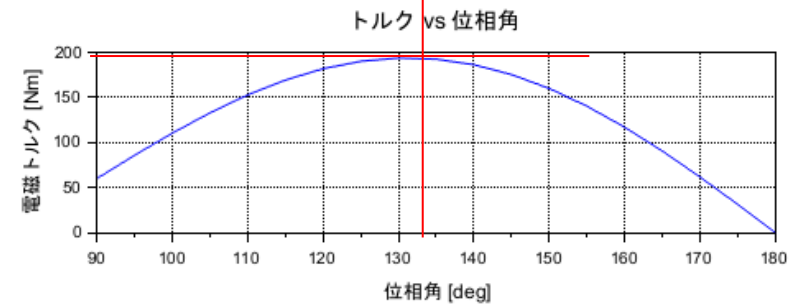



```
// ---- パラメータ設定 ----
Ld = 0.001; // H
Lq = 0.006; // H
Phi = 0.1; // Wb
Rs = 0.1; // Ohm
```



Lq増やす,
Φがそのまま(磁石は同じ量)
でもトルク最大値が増えた！





磁石を強くしたらどうなる？

```
1  // --- パラメータ設定 ---
2  Ld = 0.001; // H
3  Lq = 0.003; // H
4  Phi = 0.2;  // Wb
5  Rs = 0.1;   // Ohm
6  P = 8;      // 極数
7  Pn = P / 2; // 極対数
8  V_max = 750; // V
```

やってみよう

課題 その２
モータの改良のシナリオを考えて，それにそって パラメータを変えて，性能を上げてみてください

ヒント，
電源，抵抗，磁石，Ld，Ｌｑとあります

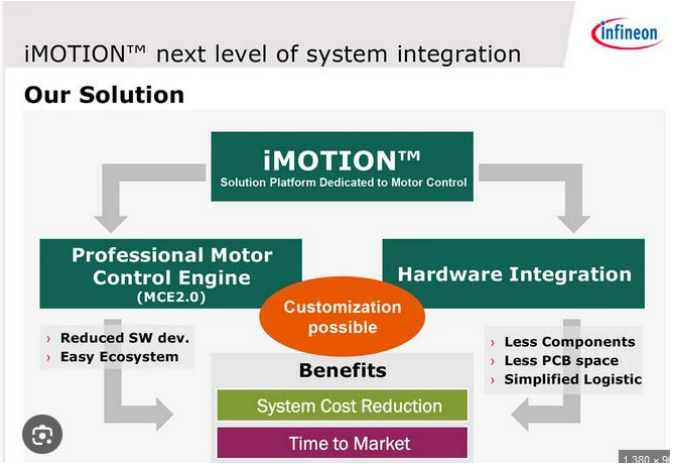
エアギャップを小さくするとＬｄ，Ｌｑが大きくなります
Ｄ軸位置のエアギャップだけ大きくするとＬｄが小さくなります

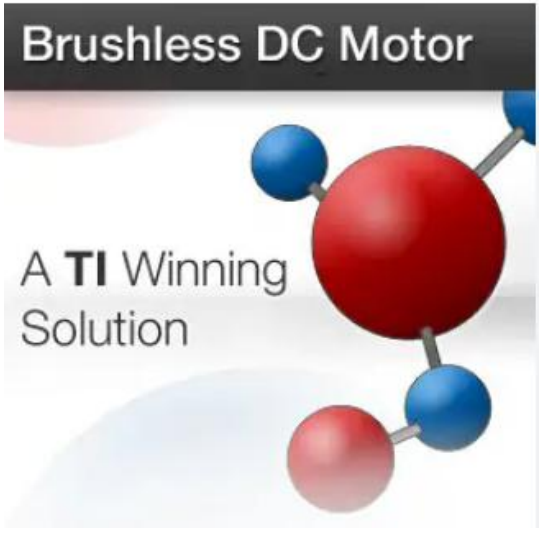
インバータを冷やすと電流は増えます

ターン数変化に対して，Ｌｄ，Ｌｑは2乗で比例，磁石Φは１乗で比例

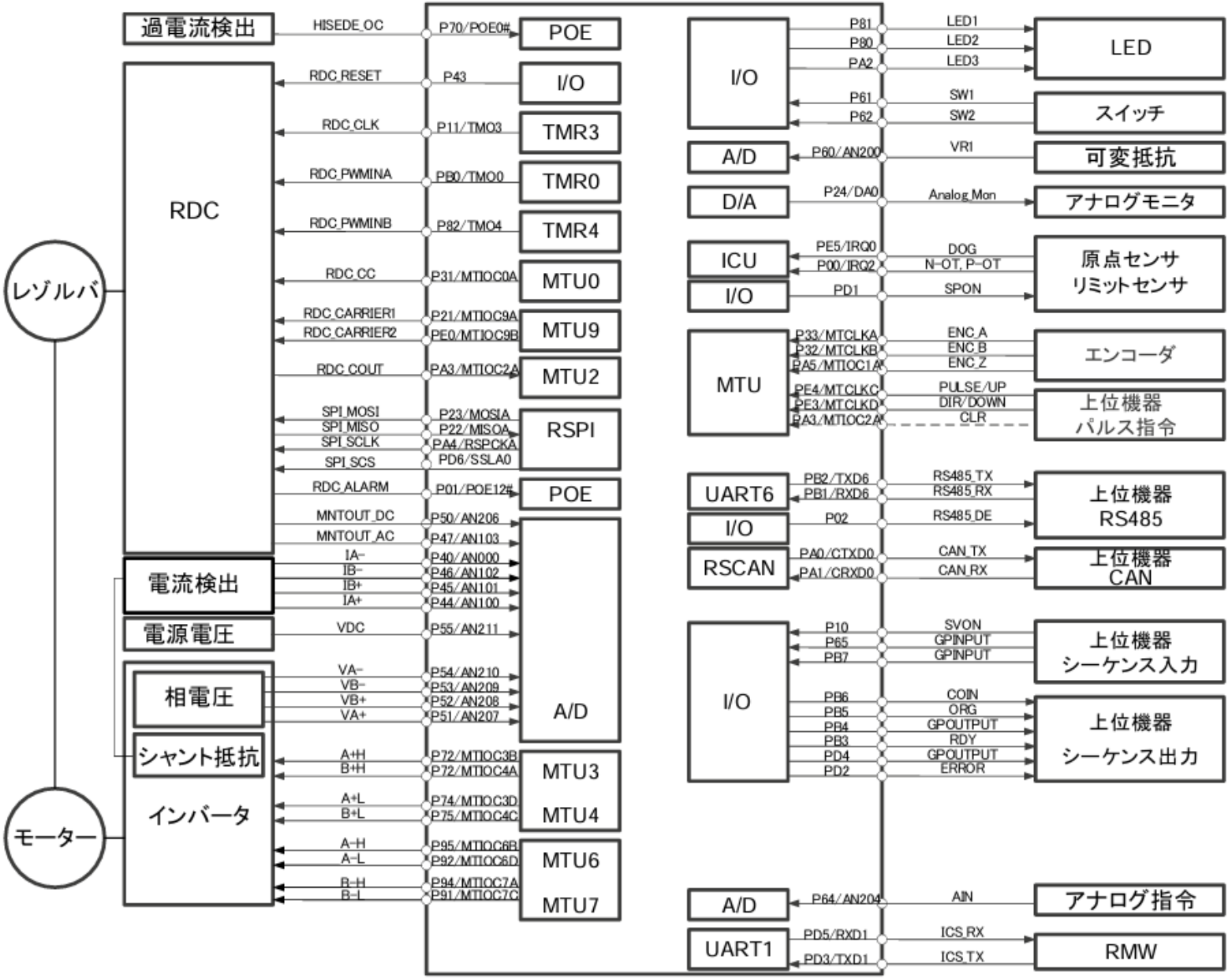
ベクトル制御の世界（マイコンが充実）

RENESUS（日本の自動車，家電の大半はこれ）
Infineronヨーロッパの自動車の大半はこれ），
TI や STM（ドローンや家電，電動工具など）





モータ制御用マイコンとは



https://www.renesas.com/ja/document/mat/evaluation-system-stepping-motor-resolver-users-manual?r=1168651

モータ制御用マイコンとは？

https://www.renesas.com/ja/document/bro/rx-family-brochure?r=1054486

動かしてみたい人は．．．

STマイコンで始めるブラシレス・モータ制御 (トライアルシリーズ) 単行本 – 2020/8/25

大黒 昭宜 (著)

3.7 ★★★☆☆ 23個の評価　すべての形式と版を表示

はじめての本の購入で10%ポイントプレゼント › エントリーはこちら

Arm Cortex-M4マイコン(72MHz)を用いて、ブラシレス・モータを制御します。 制御の種類は、矩形波駆動、正弦波駆動、ベクトル制御と多彩であり、 ビギナからベテランまで、技量にあった制御を学べます。

★ 目次

☆第1部 モータ&モータ駆動の基礎知識

●第1章 モータの種類
モータとは
直流モータ

30日間無料体験
この注文でお急ぎ便、お届け日時指定便を無料体験 Amazonプライム無料体験について

単行本
¥2,860 (172pt)
の¥2,860その他の中古品、新品、コレクター商品

配達　受取スポット

¥2,860 税込

ポイント: 172pt (6%) 詳細はこちら

無料配送 5月26日 日曜日にお届け
詳細を見る

または 最も早い配送 本日中にお届け (13

STマイコンで始めるブラシレス・モータ制御体験キット

MOTOR-BU01

- 価格6,050円(税込)
- 2020年8月26日発行
- 設計 大黒 昭宜 ／
- 【直接販売商品】
- 好評発売中！
- この商品を購入

関連商品

STマイコンで始めるブラシレス・モータ制御
定価2,860円(税込)　好評発売中！
(改定)STマイコンで始めるブラシレス・モータ制御体験キット2　価格2,420円(税込)　好評発売中！

https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/I/I000346.htm

life.augmented
汎用マイコンでゼロから作る
高性能モータ制御システム
STマイクロエレクトロニクス株式会社

11 : 13