

# 4章 永久磁石同期モータの高トルク化と低トルク脈動

## アウトライン

### 4.1 モータ高トルク密度化の方策

- ・高ギャップ磁束密度化
- ・ギャップ面積拡大
- ・巻線係数
- ・アンペアターン（巻線占積率）
- ・高突極比

### 4.2 トルク脈動低減策

- ・コギングトルクの低減策
- ・ギャップ磁束密度の高調波成分の低減
- ・高調波に対する巻線係数が低いモータトポロジー

## 4.1 モータ高トルク密度化の方策

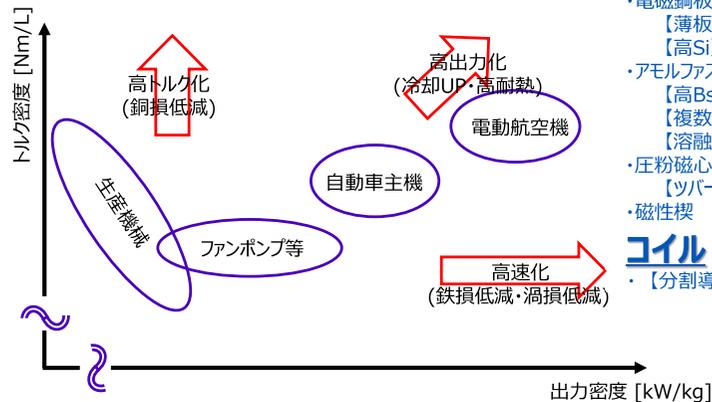
用途毎のモータに要求されるトルク・出力密度のイメージと高性能化に貢献するモータ材料

### 磁石

- ・Nd焼結【省レアース】
- ・サマリウム鉄系ボンド
- ・Sm-Fe-Nボンド

### コイル

- ・巻コイル【ノズルガイド巻】・【プレスコイル】
- ・接合コイル【カセットコイル】
- 【導体断面可変】



用途に応じてモータは高性能化されており、各種モータへの要求は異なり、例えば

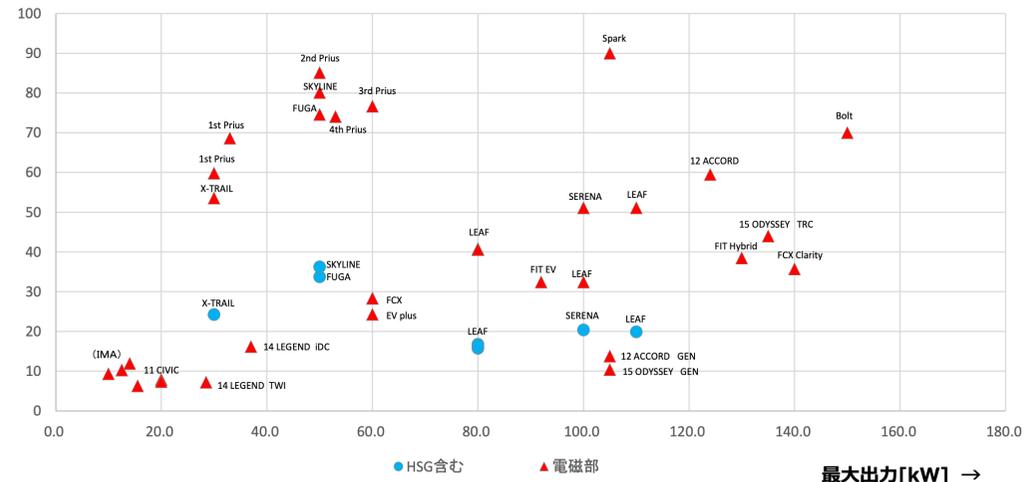
- ・移動体など自動車主機、電動航空機用途では高出力密度化に加え、軽量化、
- ・ファンポンプなど産業用モータでは高出力密度化、生産機械用途では高トルク密度化、

⇒ それぞれの要求に応じて、適したモータ構造と材料を選択して設計する必要がある

## 4.1 モータ高トルク密度化の方策

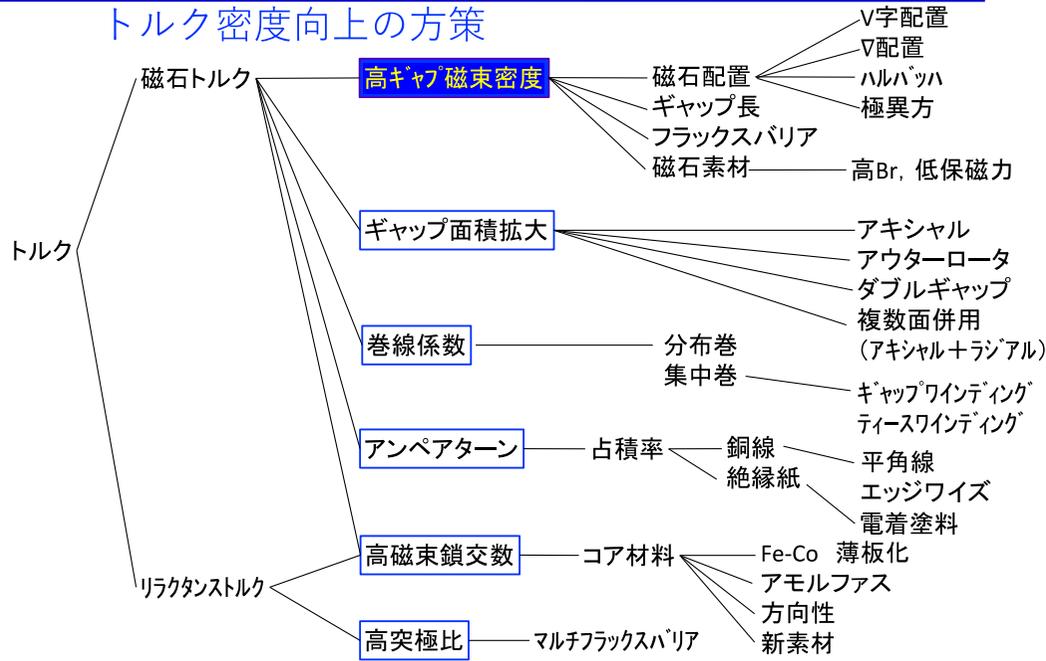
### 市販車搭載モータのベンチマーク

#### 最大トルク密度 [Nm/L]



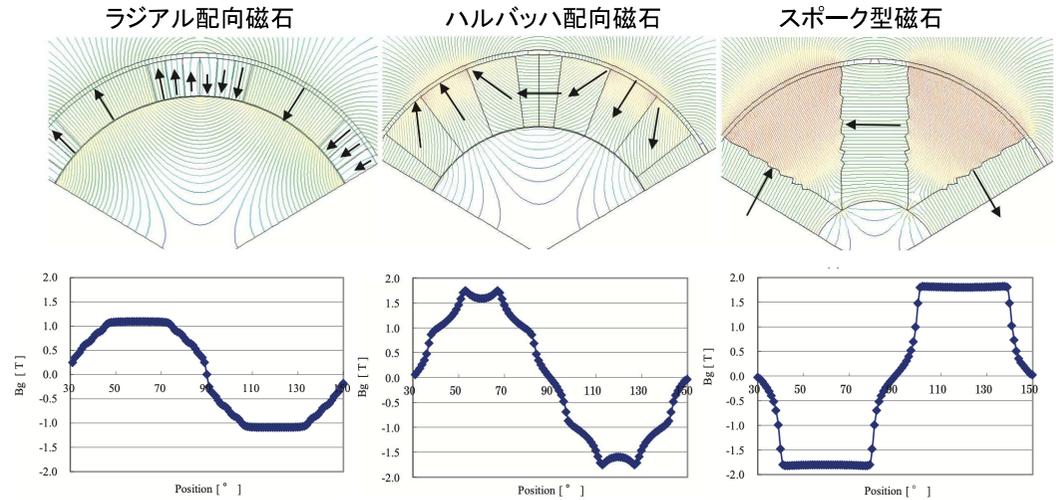
# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## トルク密度向上の方策



# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 高ギャップ磁束密度化



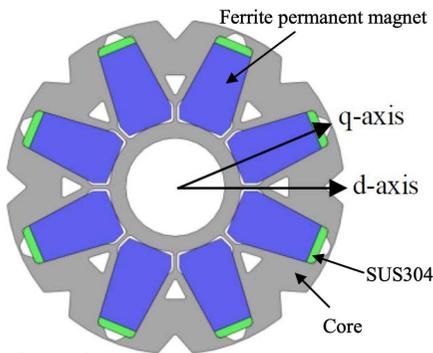
エアギャップ磁束密度の基本波振幅=発生トルク

ラジアル配向磁石 < ハルバツハ配向磁石 < スポーク型磁石

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 高ギャップ磁束密度化

対象用途：自動車駆動用モータ



諸元

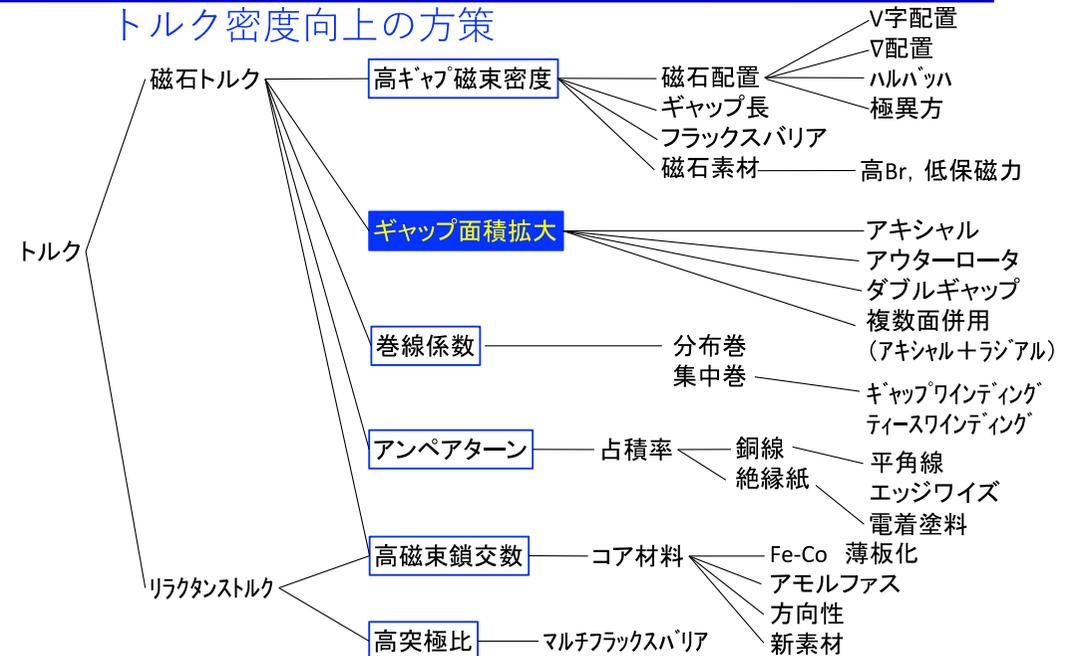
ステータ外径	269mm
コア積厚長	83.6mm
スロット数	48
極数	8
ロータ外径	160mm
エアギャップ長	0.75mm
磁石	NMF-12G

出典：柿原航・竹本真紹・小笠原悟司：「フェライト磁石を用いた自動車駆動用スポーク型IPMSMの回転子形状の検討」,平成24年電気学会産業応用部門大会講演論文集, 3-34, III-179-III-184 (2012)

- 磁石磁束向上
  - ・スポーク状配置⇒磁石の表面積拡大
  - ・回転子内径側ブリッジ幅を狭く設計⇒磁石の漏れ磁束低減
- リラクタンストルクの増大
  - ・三角形のフラックスバリアの採用⇒Ldの低減による突極比向上
- 不可逆減磁対策⇒回転子外径側にステンレス鋼を挿入

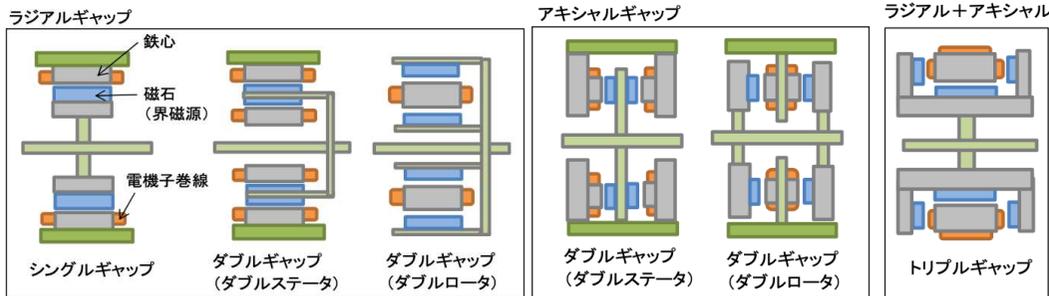
# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## トルク密度向上の方策



# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

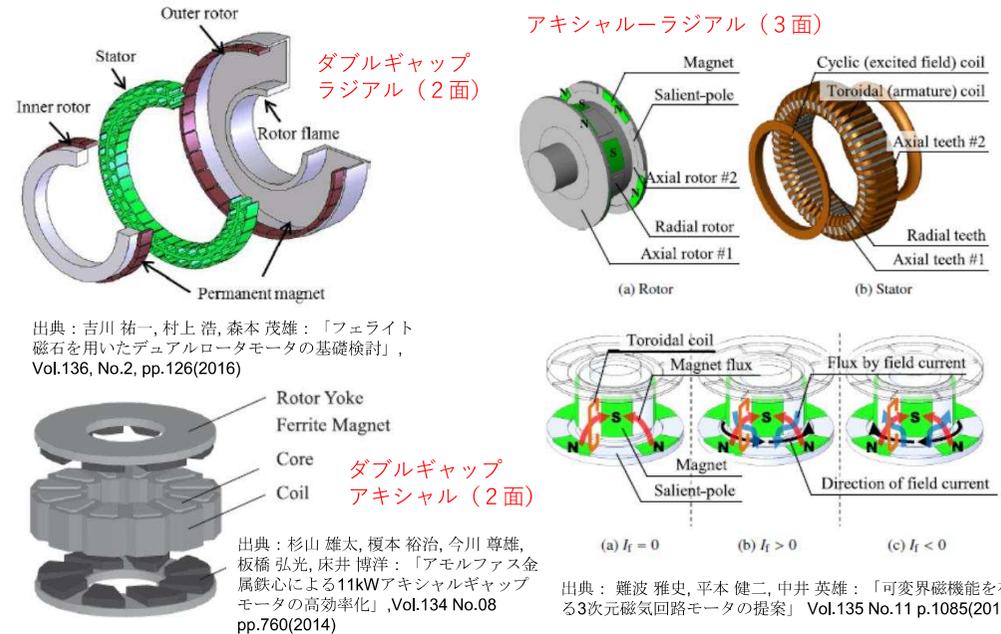
## ギャップ面積拡大



各モータトポロジーの特質比較

ギャップ構造による分類		トルク密度 (アクティブパーツ当たり)	高速回転	コスト (変動費・生産性)
ギャップ方向	ギャップ数			
ラジアルギャップ	シングルギャップ	○	○	○
ラジアルギャップ	ダブルギャップ	ダブルロータ	○	△
		ダブルステータ	○	△
アキシアルギャップ	ダブルギャップ	ダブルロータ	△	△
		ダブルステータ	△	△
ラジアル+アキシアル	トリプルギャップ	◎	△	△

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策



出典：吉川 祐一, 村上 浩, 森本 茂雄：「フェライト磁石を用いたデュアルロータモータの基礎検討」, Vol.136, No.2, pp.126(2016)

出典：杉山 雄太, 榎本 裕治, 今川 尊雄, 板橋 弘光, 床井 博洋：「アモルファス金属鉄心による11kWアキシアルギャップモータの高効率化」, Vol.134 No.08 pp.760(2014)

出典：難波 雅史, 平本 健二, 中井 英雄：「可変界磁機能を有する3次元磁気回路モータの提案」 Vol.135 No.11 p.1085(2015)

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## ギャップ面積拡大

	アキシアルモータ	市販品 (ラジアルモータ)
モータ概観 *外径φ98	20.5mm (▲49%) 35mm (▲58%)	40mm 83mm
重量 (コア/コイル/磁石)	0.95kg (▲44%)	1.7kg
重量 (筐体込)	1.6kg (▲50%)	3.2kg
材料コスト (ラジアルモータ対比)	85~96%	100%
トルク	0.65Nm	←
モータ効率	90.6%	90.9%

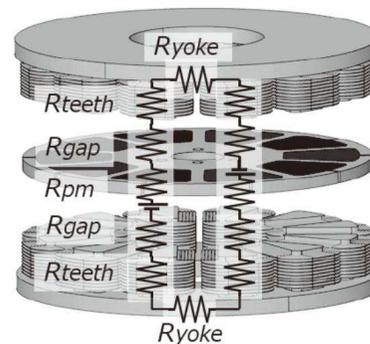
- ・ 同一性能で大幅な小型化
- ・ 材料使用量削減 → 材料コスト抑制にも貢献

出典：齋藤達哉・榎園勇太・東大地・伊志嶺朝之・上野友之・中村悠一・奥野麗子：「高性能なアキシアルギャップモータ実現に貢献する圧粉磁心の高機能化」, SEIテクニカルレビュー, 第198号, pp.41-46 (2021)

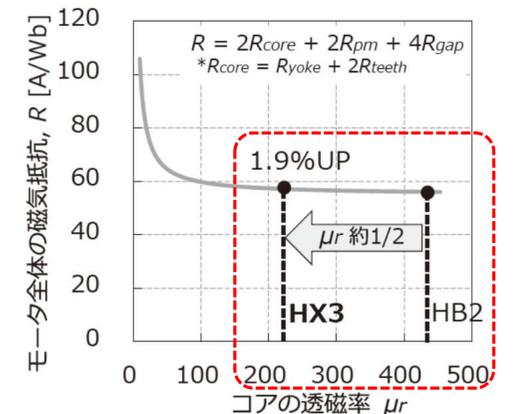
# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## ギャップ面積拡大

モータ構造と磁気抵抗  
アキシアルモータ(ダブルステータ)



透磁率に対するモータ磁気抵抗



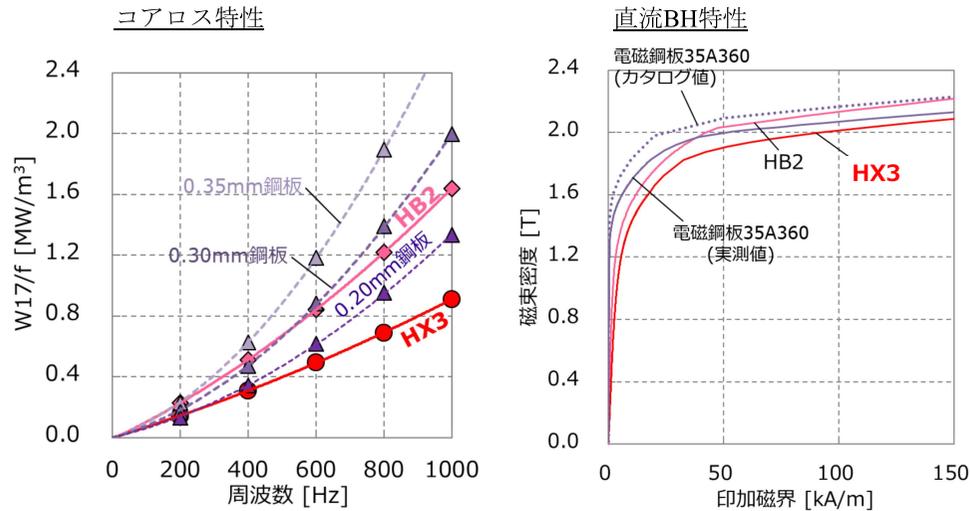
1. コアレスロータ
  2. 一般的なモータよりも広いエアギャップ
- これらの磁気抵抗の影響度が大きい

コア透磁率低下による  
モータ磁気抵抗増大が小さい

出典：齋藤達哉・榎園勇太・東大地・伊志嶺朝之・上野友之・中村悠一・奥野麗子：「高性能なアキシアルギャップモータ実現に貢献する圧粉磁心の高機能化」, SEIテクニカルレビュー, 第198号, pp.41-46 (2021)

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

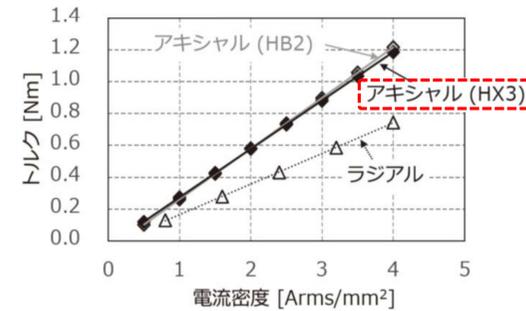
開発圧粉磁心の特性 0.2mm鋼板を下回る低コアロス  
その背反として低透磁率



出典：齋藤達哉・榎園勇太・東大地・伊志嶺朝之・上野友之・中村悠一・奥野麗子：「高性能なアキシアルギャップモータ実現に貢献する圧粉磁心の高機能化」, SEIテクニカルレビュー, 第198号, pp.41-46 (2021)

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

トルク特性



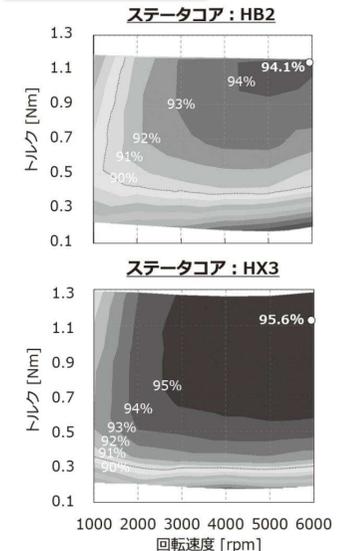
トルク低下なし  
 低ロス化により広範囲で高効率

材料開発の新たな選択肢

- ・透磁率を犠牲にした低ロス化
- ・敢えて透磁率を下げる(高速域の効率up)

圧粉磁心は透磁率の調整が可能な材料

効率マップ



出典：齋藤達哉・榎園勇太・東大地・伊志嶺朝之・上野友之・中村悠一・奥野麗子：「高性能なアキシアルギャップモータ実現に貢献する圧粉磁心の高機能化」, SEIテクニカルレビュー, 第198号, pp.41-46 (2021)

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

アキシアルギャップモータ

利点

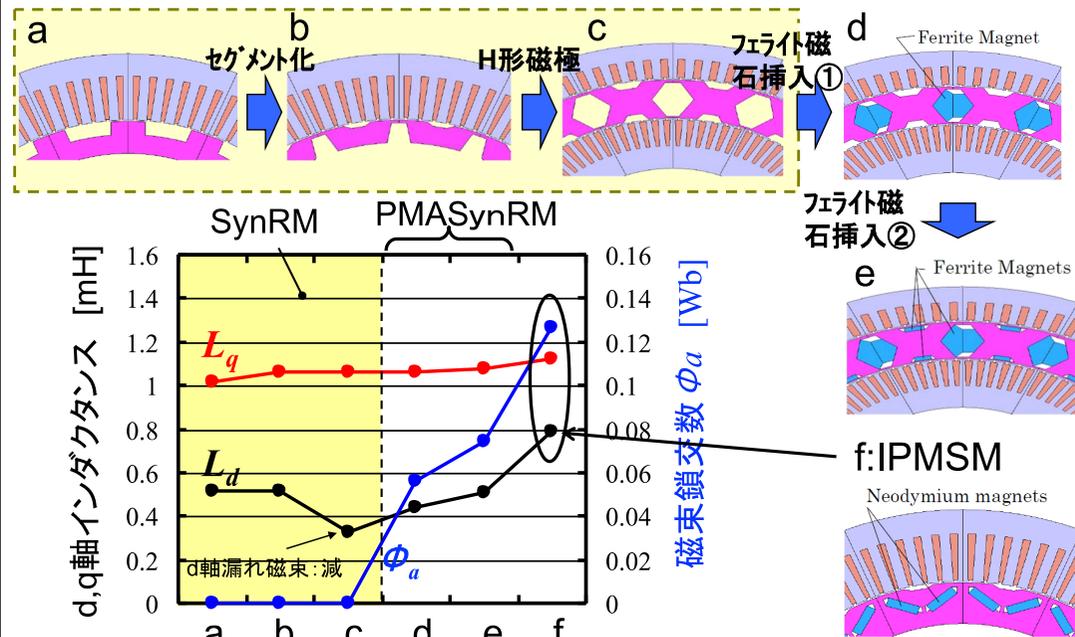
- ラジアルギャップモータとの比較
- ・トルクの大きさと比例関係にあるギャップ面積を上下2面で、確保
- ・薄型/大口徑モータほど、上記の差異が拡大

欠点

- ・ダブルロータ [上下2面ロータ] の場合、軸方向の安全設計が高難易度。
- ・扁平形状は、回転体バランス確保が困難。
- ・バランス不足でギャップ長変化が大きい場合 ⇒ トルク変化が大きい
- ・高速回転化が難しい
- ・ロータにおける磁石保持部品の渦電流が大
- ・金属磁石の渦電流が大きく、磁力が弱いポイント磁石のみ適用可能 ⇒ 高トルク化への弱点と想定

	出力 ∝ 磁束 × 電流	磁束 ∝ 磁石の強さ × ギャップ面積
構成	<p>ギャップ、ステータ、ロータ</p>	<p>ロータ、ステータ、磁束の向き、ギャップ</p>
概念	<p>ギャップ面積 = πdL</p> <p>体格増が必須</p>	<p>ギャップ面積 = (1/4)πD<sup>2</sup> × 2</p> <p>同一体格で面積拡大</p>

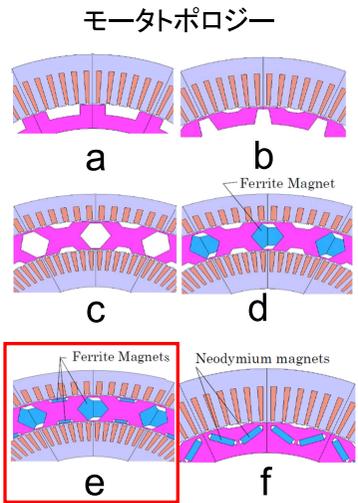
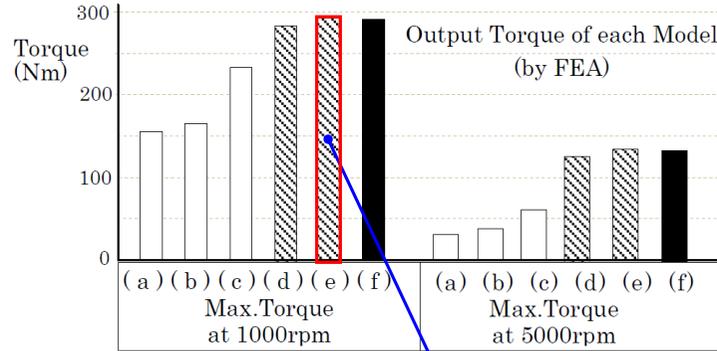
# 4.1 モータ高トルク密度化の方策 ギャップ面積拡大



# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## ギャップ面積拡大

比較条件:  
 ステータ外径265mm, 鉄心積厚50mm, 極数16  
 エアギャップ長0.6mm, 電流密度25A/mm<sup>2</sup>



希土類磁石IPMSMと同等トルク達成  
 -20°Cでの低温減磁: クリア

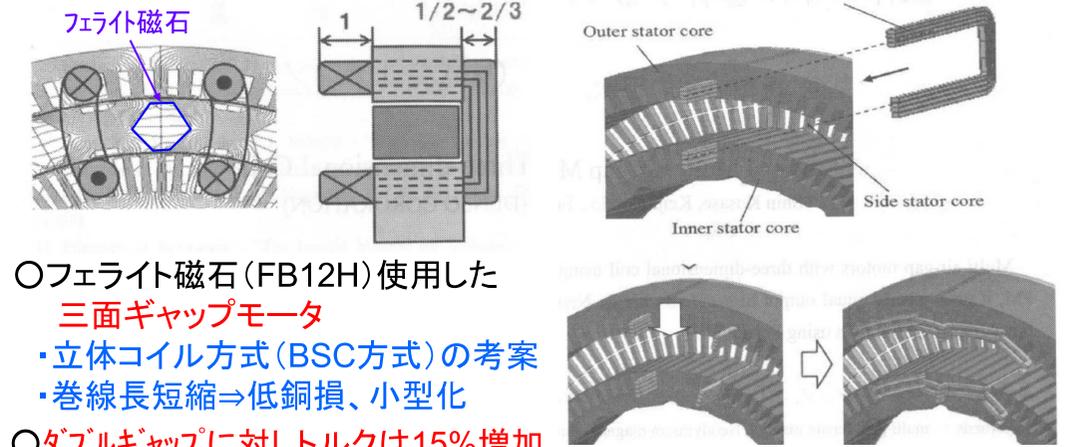
課題: 使用巻線量の増加

出典: 草瀬他:「レアアースフリーダブルギャップモータの検討」, 平成24年電気学会全国大会, No.5-031, Vol.V, pp.53-54 (2012)

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## ギャップ面積拡大 マルチギャップ構造(3面)PMASynRM

対象用途: EV/HEV直結型のHEV駆動 Bundled Segment Conductor方式

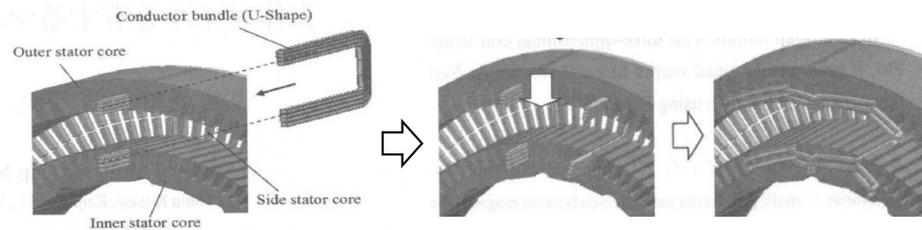
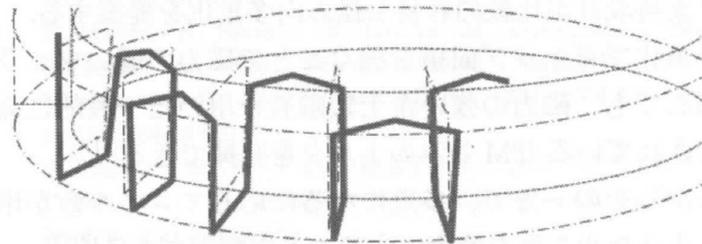


出典: 草瀬新・近藤啓次・前川武雄:「立体コイルを有するマルチギャップモータの検討」, 電気学会研究会資料 回転機研究会, RM-13-112, pp.31-34 (2013)

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## ギャップ面積拡大

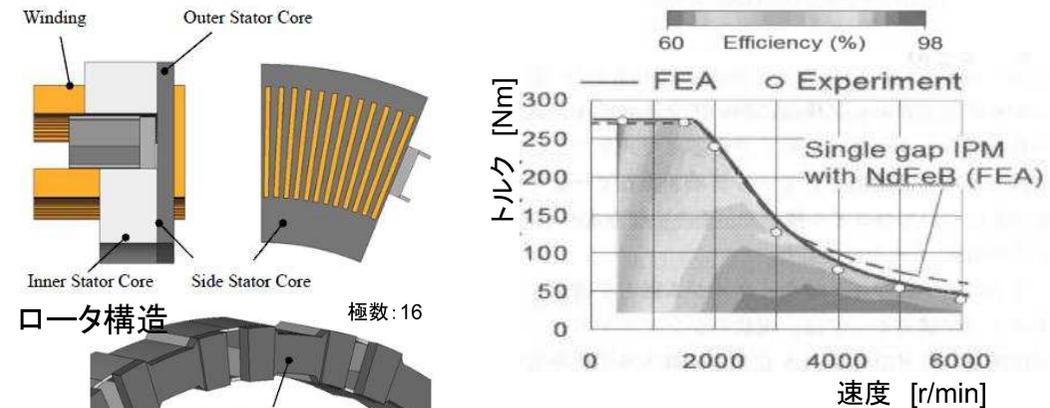
ワイヤー素線形状



# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## ギャップ面積拡大 マルチギャップ構造(3面)PMASynRM

ステータ構造 対象用途: EV/HEV直結型のHEV駆動 効率マップ(測定値)



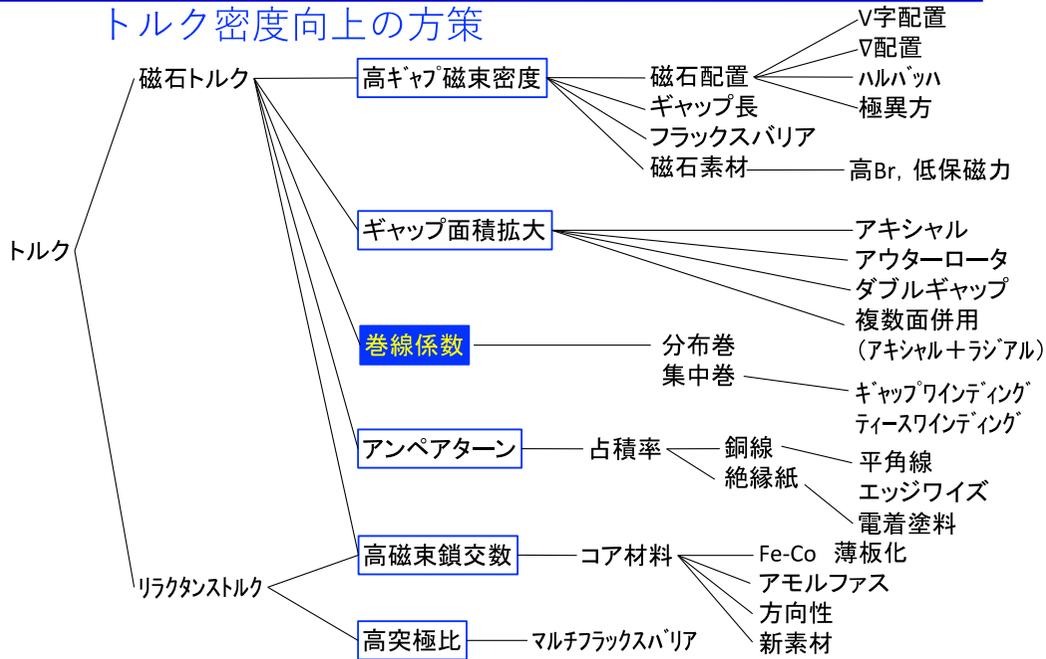
ステータ外径: 265mm  
 コイルエンドを含む総軸長: 90mm

- ・最大トルク: 275Nm@320Arms
- ・最大出力: 50kW, 最高効率: 94~96%
- ・中高速・軽負荷運転領域で高効率
- ・トルク特性: 同体格のNd磁石採用IPMSMと同程度

出典: 草瀬新・近藤啓次・前川武雄:「立体コイルを有するマルチギャップモータの検討」, 電気学会研究会資料 回転機研究会, RM-13-112, pp.31-34 (2013)

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

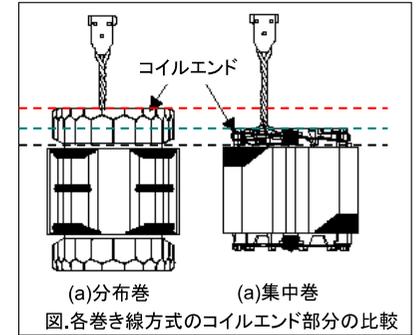
## トルク密度向上の方策



# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

巻き線方式 : 分布巻 or 集中巻

小型モータでは、コイルエンド空間を縮小できる集中巻巻線+磁石ロータの組み合わせが、高トルク化に有利



分布巻と比較した場合...

集中巻のメリット

- ・コイルエンド空間の低減

集中巻のデメリット

- ・巻線係数が低く、トルクが低下する。
- ・磁気飽和によるトルク飽和が起きやすい
- ・磁石の不可逆減磁を生じやすい

分数スロットモータ

解決策

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 分数スロットモータ

以下の式で毎極毎相のスロット数 $q$ が表される

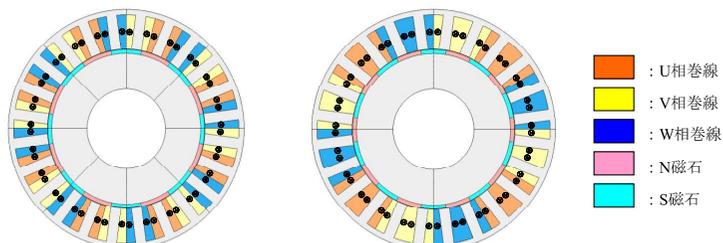
$$q = Z_1 / (2Z_2m) \quad Z_1: \text{スロット数}, Z_2: \text{ロータ磁石の極対数}, m: \text{相数}$$

○分数スロットモータの定義:

毎極毎相のスロット数 $q < 1/2$  (通常の2極3スロット系列:  $1/2$ )

○分数スロットモータの特徴:

同スロット数に対し極対数を大きく設定できる  
→ 大トルク化に適したモデル



(a)16極24スロット( $q=1/2$ ) (b)20極24スロット( $q=1/5$ )  
通常モータと分数スロットモータの例

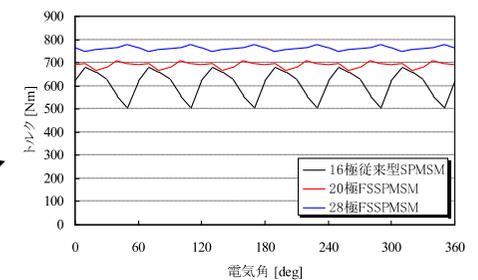
# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 分数スロットモータの利点と欠点

◎利点

極数とスロット数の組み合わせが自由

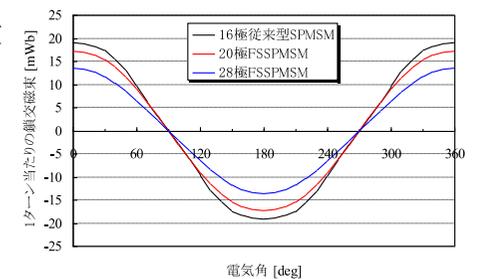
- ・トルク向上
- ・トルクリプル低減
- ・コギングトルク低減
- ・ステータの磁気飽和低減



コギングトルク:

極数とスロット数の最小公倍数が大きいほど、振幅が小さくなる

極数	最小公倍数	系
16	96	2p3s系
20	120	10p12s系
28	168	14p12s系



# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 巻線係数とは

分数スロットモータ：極数とスロット数の組み合わせが自由

しかし、極数とスロット数の組み合わせにより巻線起磁力の  
高調波成分含有率は異なる (分布巻or集中巻、全節巻or短節巻)

高調波含有 ⇒ 基本波起磁力の低減 = 有効巻線の減少

全節集中巻の巻線起磁力を基準とした場合の有効巻線係数 = 巻線係数

巻線係数  $k_{wv} =$  分布係数  $k_{dv}$  × 短節係数  $k_{pv}$

添字 v: 空間高調波次数

巻線係数  $K_{wv} = k_{dv} \times k_{pv}$

(導出方法は参考資料に記載)

詳細については、以下の参考文献を参照されたい。

[FRACTIONAL SLOT PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS FOR LOW SPEED](#)

ISBN 951-764-983-5 (IEで検索すれば、PDFをDLできる)

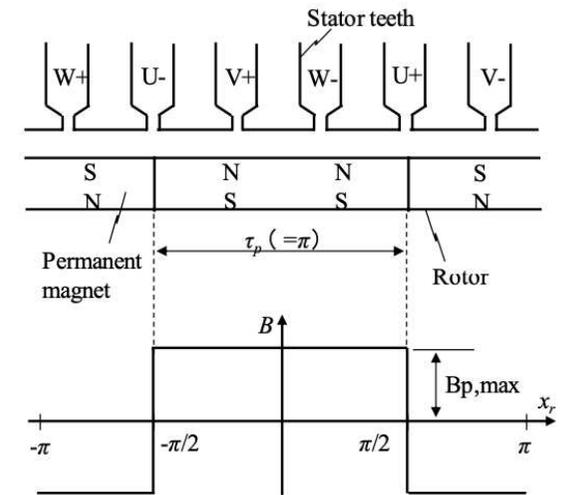
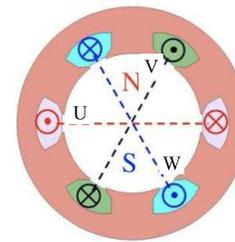
次スライドで

$$= \frac{\sin\left(\frac{v\pi}{2m}\right)}{nq \sin\left(\frac{v\pi}{2dmq}\right)} \times \sin\left(\frac{v\pi}{2mq}\right)$$

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

分布巻・全節巻の巻線起磁力を基準とした場合の有効巻線係数 = 巻線係数

2極6スロット全節集中巻



每極毎相のスロット数  $q = 1$

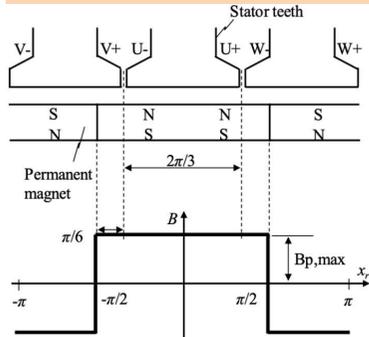
分布係数  $k_{dv} = 1$   
短節係数  $k_{pv} = 1$   
巻線係数  $k_{wv} = 1$

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

分布巻・全節巻の巻線起磁力を基準とした場合の有効巻線係数 = 巻線係数

8極12スロット集中巻

每極毎相のスロット数  $q = 1/2$



分布係数  $k_{dl} = 1$

(相の4つのコイルが同位相)

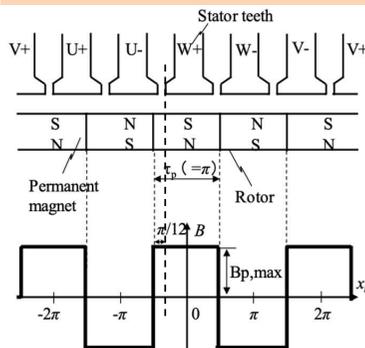
短節係数  $k_{pl} = 0.866$

(1コイルに対する磁石の対向比率  $120^\circ$ )

巻線係数  $k_{wl} = 0.866$

10極12スロット集中巻

每極毎相のスロット数  $q = 2/5$



分布係数  $k_{dl} = 0.966$

(相の4つのコイルが  $\pm 15^\circ$ )

短節係数  $k_{pl} = 0.966$

(1コイルに対する磁石の対向比率  $150^\circ$ )

巻線係数  $k_{wl} = 0.933$

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 巻線係数の比較例

[モータ仕様入力部]		8	8	10	8	6
極数	$N_p$	8	8	10	8	6
スロット数	$N_s$	48	9	12	12	9
相数	$m$	3	3	3	3	3
ポールアーク(極弧率)	$\tau$	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
スロットピッチ	$p_s$	5	1	1	1	1
着磁スキュー角	[ deg ]	0	0	0	0	0
a	$q = N_s / (m \cdot N_p) = a + c/b$ (c/b は既約分数)	2	0	0	0	0
b		1	8	5	2	2
c		0	3	2	1	1
[巻線係数計算]						
每極毎相のスロット数	$q = N_s / N_p / m$	2.000	0.375	0.400	0.500	0.500
	$q = a \cdot b + c$ : 分布巻係数計算用	2.000	3.000	2.000	1.000	1.000
短節率	$\beta = p_s \cdot N_p / N_s$	0.833	0.889	0.833	0.667	0.667
分布巻係数	$k_d = \sin(\pi/2m) / (q \sin(\pi/2m/q))$	0.966	0.960	0.966	1.000	1.000
短節巻係数	$k_p = \sin(\beta\pi/2)$	0.966	0.985	0.966	0.866	0.866
スキュー係数	$k_{sk} = \sin(\theta_e/2) / (\theta_e/2)$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
巻線係数	$k_w = k_d \cdot k_p \cdot k_{sk}$	0.933	0.945	0.933	0.866	0.866
実効値変換係数	$k_f = 4/\pi \cdot \cos((1-\tau)/2 \cdot \pi)$	1.116	1.116	1.116	1.116	1.116

10極12スロットは8極48スロット分布巻に相当する巻線係数と短節係数を持つ (6次のトルク脈動が原理的に小さい組み合わせ)

EPS用途: 10極12スロット (SWIFT, MAZDA3, INSIGHT等)

8極12スロット + ロータ段スキュー (LEAF, LEVORG, ODYSSEY等)

ドローン用モータ: 14極12スロット アウターロータタイプ

## 分数スロットモータの巻線係数

Table 2.4. Fundamental winding factors  $k_{s1}$  for concentrated two-layer windings ( $q \leq 0.5$ )

$Q_s$	Poles											
		4	6	8	10	12	14	16	20	22	24	26
6	$k_{s1}$	0.866	**	0.866	0.5	**	0.5	0.866	0.866	0.5	**	0.5
	$q$	0.5		0.25	0.2		0.143	0.125	0.1	0.091		0.077
9	$k_{s1}$	0.866	0.945*	0.945*	0.866	0.617	0.328	0.328	0.617	0.866	0.945	
	$q$	0.5	0.375	0.3	0.25	0.214	0.188	0.15	0.136	0.125	0.115	
12	$k_{s1}$		0.866	0.933	**	0.933	0.866	0.5	0.25	**	0.25	
	$q$		0.5	0.4		0.286	0.25	0.2	0.182		0.154	
15	$k_{s1}$			0.866	**	0.951*	0.951*	0.866	0.711	**	0.39	
	$q$			0.5		0.357	0.313	0.25	0.227		0.192	
18	$k_{s1}$				0.866	0.902	0.945	0.945	0.902	0.866	0.74	
	$q$				0.5	0.429	0.375	0.3	0.273	0.25	0.231	
21	$k_{s1}$					0.866	0.89	0.953*	0.953*	**	0.89	
	$q$					0.5	0.438	0.35	0.318		0.269	
24	$k_{s1}$						0.866	0.933	0.949	**	0.949	
	$q$						0.5	0.4	0.364		0.308	

\* not recommended because of the unbalanced magnetic pull

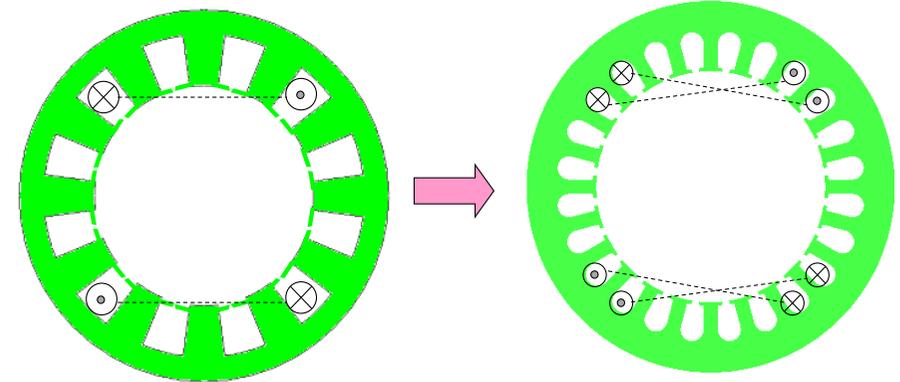
\*\* not recommended because denominator  $n$  ( $q = z/n$ ) is a multiple of the number of phases  $m$ .

## 参考 巻線係数

### ①分布係数 $k_{dv}$

毎極毎相のスロット数  $q=1$  の集中巻一全節巻モデルを比較基準に、 $q$  を増加させて分布巻一全節巻とした場合の巻線起磁力分布に含まれる空間調波の各次数成分の変化比率を示す係数

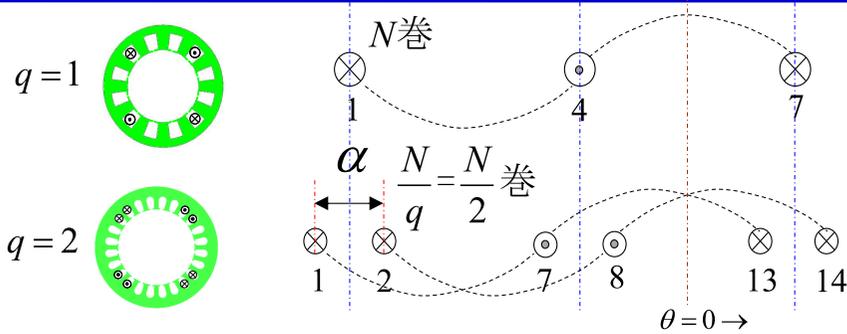
4極(回転磁界)の場合



集中巻一全節巻  $q = \frac{12}{3 \times 4} = 1$

分布巻一全節巻  $q = \frac{24}{3 \times 4} = 2$

## 参考 巻線係数



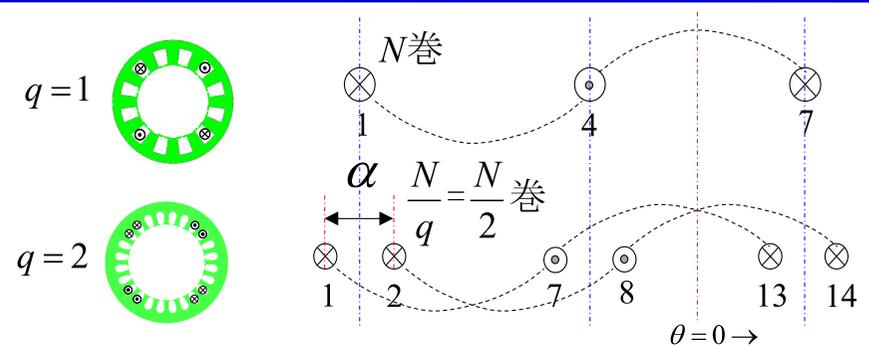
直流電流  $I$  通電時の巻線起磁力の空間基本波

$$(q=1) F(\theta) = -\frac{4NI}{\pi} \frac{1}{2} \cos \theta$$

$$(q=2) F'(\theta) = -\frac{4(N/q) \cdot I}{\pi} \left\{ \cos\left(\theta + \frac{\alpha}{2}\right) + \cos\left(\theta - \frac{\alpha}{2}\right) \right\} = -\frac{4}{\pi} (N/q) I \cos \frac{\alpha}{2} \cos \theta$$

$$\text{分布係数 } k_{d1} = \frac{F'(\theta)}{F(\theta)} = \frac{2 \cos \frac{\alpha}{2}}{q} = \frac{\sin(2 \frac{\alpha}{2})}{q \sin(\alpha/2)} \quad q=2$$

## 参考 巻線係数



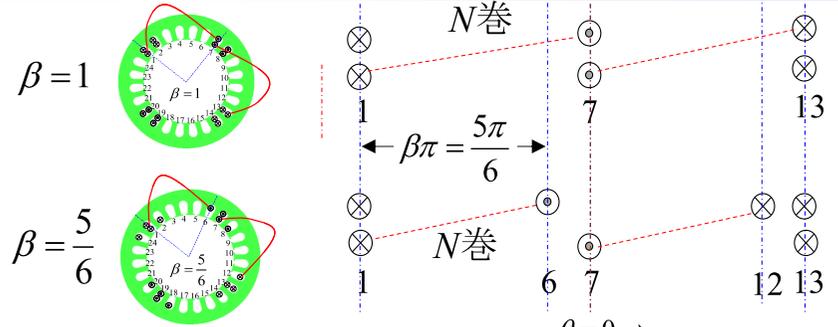
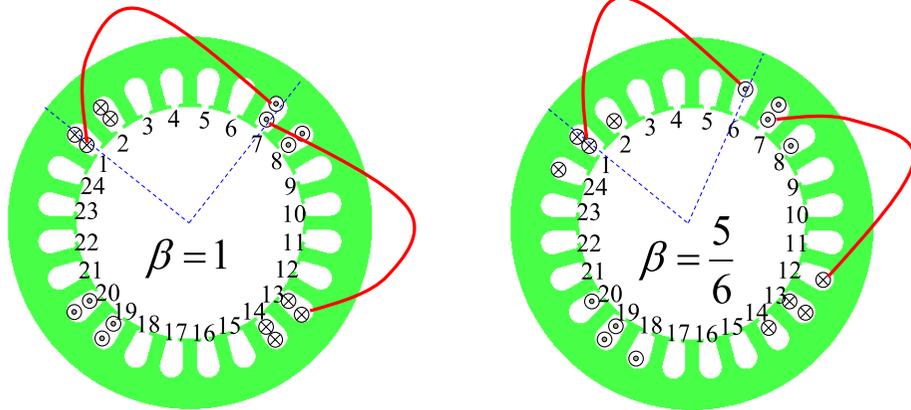
任意の  $q$  に対する空間基本波 ( $v=1$ ) の分布係数:  $k_{d1} = \frac{\sin(q \frac{\alpha}{2})}{q \sin(\alpha/2)}$

任意の空間基本波次数の分布係数:  $k_{dv} = \frac{\sin(vq \frac{\alpha}{2})}{q \sin(v\alpha/2)}$

②短節係数 $k_{pv}$

同一每極每相の槽数かつスロット層数の分布巻一全節巻モデルを比較基準に、コイルピッチ $\beta\pi$ の $\beta$ を $\beta < 1$ とした短節巻を採用した場合の巻線起磁力分布に含まれる空間調波の各次数成分の変化比率を示す係数

4極(回転磁界)の場合



直流電流  $I$  通電時の巻線起磁力の空間基本波の振幅

$$F(\theta) = \begin{cases} -NI & (-\pi \leq \theta \leq (\beta-1)\pi) \\ 0 & ((\beta-1)\pi \leq \theta \leq 0) \\ NI & (0 \leq \theta \leq \beta\pi) \\ 0 & (\beta\pi \leq \theta \leq \pi) \end{cases} \quad \begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(\theta) \cos \theta d\theta = \frac{2NI}{\pi} \sin \beta\pi \\ B_1 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} F(\theta) \sin \theta d\theta = \frac{2NI}{\pi} (1 - \cos \beta\pi) \end{aligned}$$

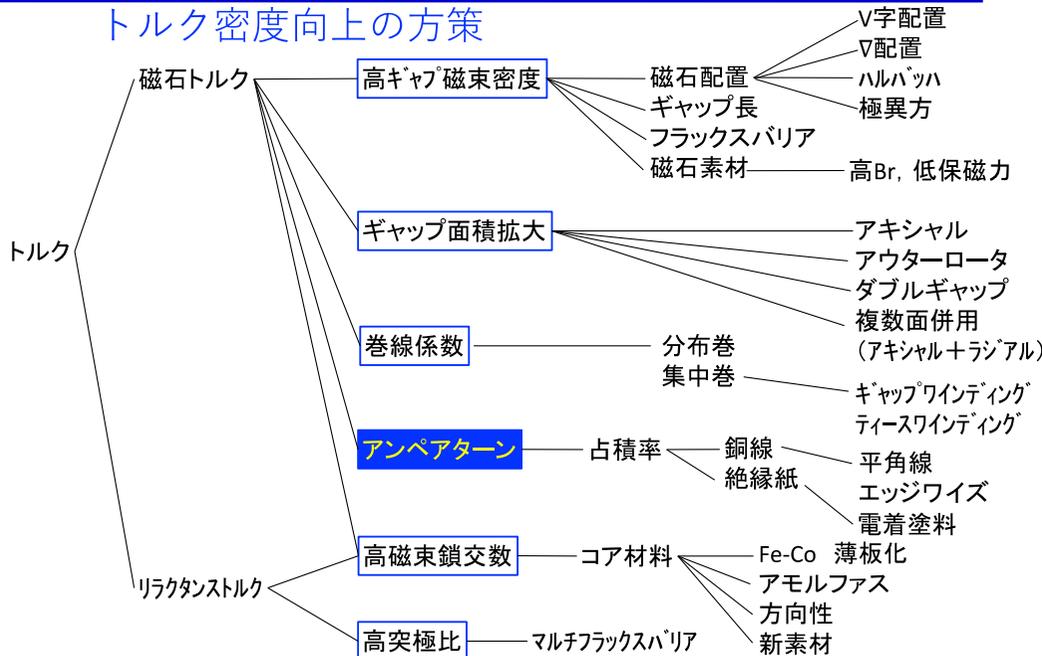
$$F_1(\beta) = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} = \frac{4NI}{\pi} \sin \frac{\beta\pi}{2} \quad \text{よって短節係数は,}$$

$$k_{p1} = \frac{F_1(\beta)}{F_1(1)} = \sin \frac{\beta\pi}{2}$$

$$k_{pv} = \sin \frac{v\beta\pi}{2}$$

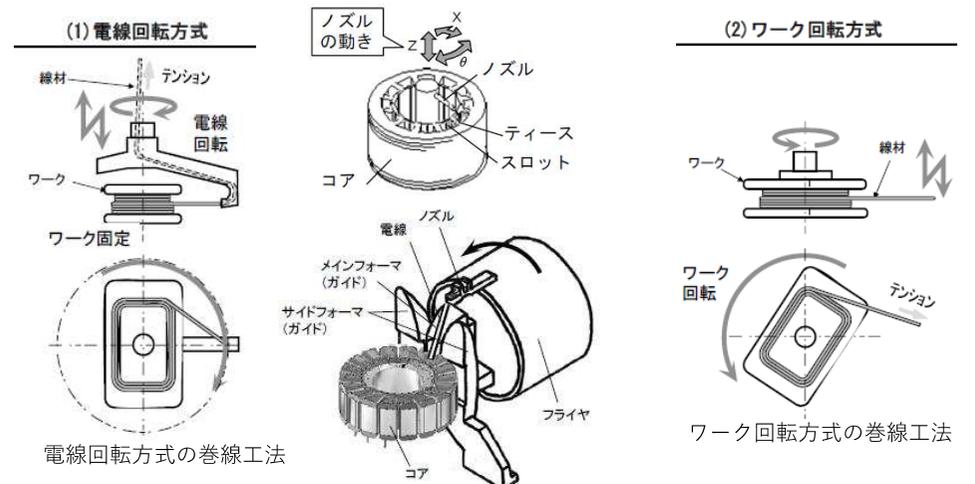
4.1 モータ高トルク密度化の方策

トルク密度向上の方策



4.1 モータ高トルク密度化の方策

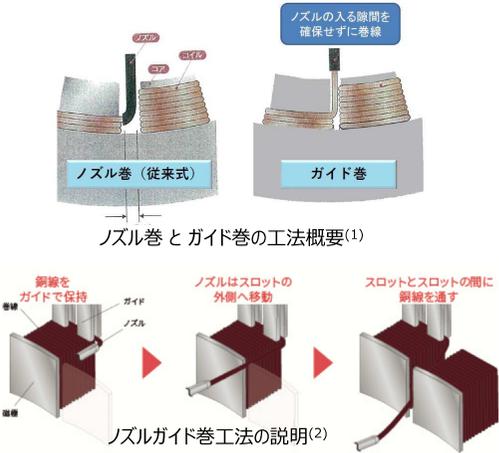
アンペアターン：コイル占積率



・主な巻線工法は、電線を巻き付ける「ノズル巻、フライヤー巻」やワークを回転させる「スピンドル巻」等  
 ・各工法は、巻線時間短縮と素線配置の高精度化を目指した開発が継続されている

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## ノズルガイド巻工法



工法毎の導体比率とスロットオープン

工法	イメージ	導体占積率 <sup>※1</sup> (導体量)	スロットオープン
ノズルガイド巻 (一体コア)		40.3% (1.2倍)	1 mm
ノズル巻 (一体コア)		33.6% (1.0倍)	3.5 mm
分割巻 (分割コア)		58.8% (1.75倍)	0 mm

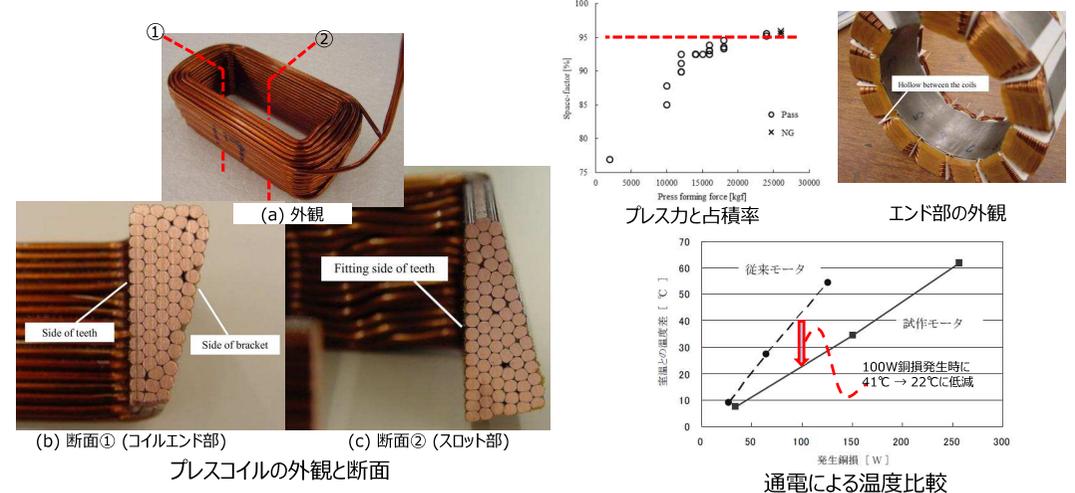
(※1) 絶縁を除く導体 / 鉄心スロット面積

- ・一体コアの巻線で従来ノズル巻より高占積率(抵抗値を約17%低減)
- ・スロットオープンを狭小化(3.5mmから1mmに低減, 1種AIW φ0.85を使用)
- 高占積率化と空間高調波低減で, 銅損と鉄損を低減できモータの高効率化に貢献

**出典)**  
 (1) 加藤亮:「高性能と高生産性を両立する巻線の最新動向」, モータ技術シンポジウム2018, B5 高性能を支えるモータ巻線技術(2018)  
 (2) NITTOKUホームページ「ノズルガイドインナー巻線機 GWM-01□」, URL「https://nittoku.co.jp/product/nozzle\_guide/」, (2024.7.12 閲覧),

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 加圧成型 (プレスコイル)



- ・加圧成型で巻線可能エリアに対する**占積率を90%超**まで高め, **抵抗値を約20%低減**
- ・フラットに成形したエンド部をモータケースに密着させることで**コイル温度上昇を4割以上低減**

**出典)**  
 野中 剛 他:「モータの高放熱構造に関する研究」, 平成24年電学D大会, 3-13, III-103 (2012)  
 野中 剛, 「博士論文 永久磁石可変界磁モータの研究」, 鹿児島大学大学院理工学研究科 学位論文 博士(工学) 理工論第 77 号 (2018年3月)

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 接合コイル - 工法 -



概U字形状に成形した導体を接続してコイルを形成する

- ・SC巻コイル : 導体の端部を溶接
- ・溶接レスコイル : 導体の端部を凸凹形状に加工しコア積中央付近で嵌合
- ・断面形状可変コイル : 断面形状が異なる導体をなだらかに結合

**出典)**  
 石上孝:「博士論文 電線整列機構搭載型ワーク回転方式によるモータ用コイルの高密度巻線に関する研究」, 横浜国立大学大学院 工学府 (2011年3月)  
 澤島公則, 堀雅寛, 永田稔, 根本裕治:「溶接レス平角線を用いた高占積率モータの検討」, 電気学会マグネティクス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会資料, MAG-20-084/MD-20-160/LD-20-103, pp.25-30 (2020)  
 杉元純也:「高スロット巻線占積率のアルミニウム巻線を用いた永久磁石モータの開発」, 第45回モータ技術シンポジウム, B7 モータ巻線技術の最新動向 (2024)

# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 接合コイル - カセットコイル -



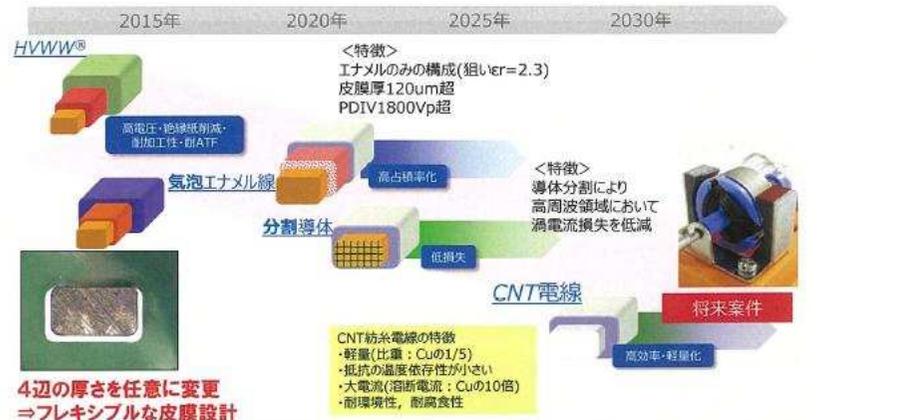
- ・コイルの溶接箇所を 1/5 に削減(従来U字セグメント 480ヶ所, 新方式 96ヶ所)し, 溶接部を径方向に出すことで, エンド高さを43%低減
- ・5ターンの六角形状コイルを成形し, 96個のコイルを円形に整列後に内側から挿入し, TIG溶接する

**出典)**「クルマの電動化を切り拓くものづくり力 〜ダントツを迫るアインの生産技術」, (株)アインホームページ AI Think <https://www.aisin.com/jp/aitthink/innovation/blog/005721.html> (閲覧日2024年5月14)

## 線材の動向

## 巻線の将来方向性

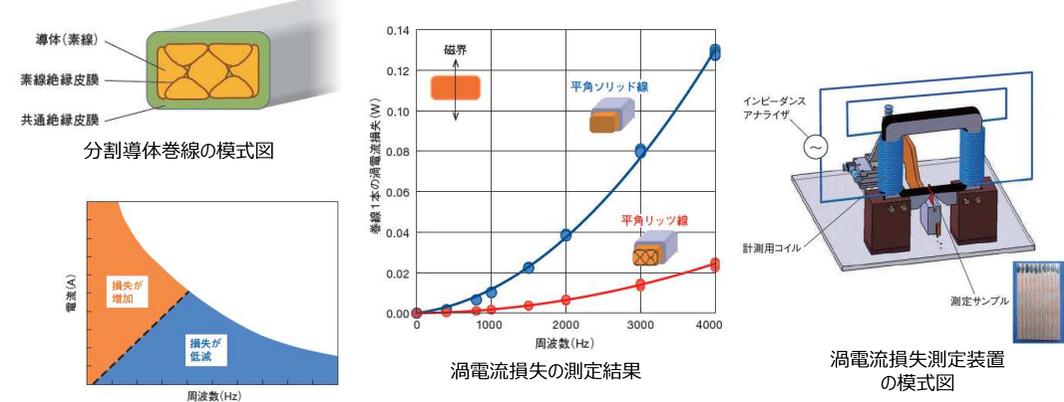
『ESSEX-FURUKAWAマグネットワイヤ社の講演資料から転載』



・モータの小型高出力化、生産性向上、低コスト化を目的に、絶縁強化・高耐傷性・高耐熱融着線などが開発されている。次世代の「CNT紡糸電線」や「超電導線」の前に、導体の渦電流損の低減のため「分割導体」が使われる予想。

(1) 富澤恵一：「自動車駆動モータ用巻線のための次世代技術開発」, モータ技術シンポジウム2021, B12 プレス(巻線), p.B12-1-17 (2021)  
 (2) 菅原潤, 佐伯孝之, 小林直弘, 木村康三：「巻線開発の歴史と今後の展望」, 住友電工技報, SEITEKニカルレビュー 第190号 (2017年1月)

## 線材の動向 - 分割導体 -

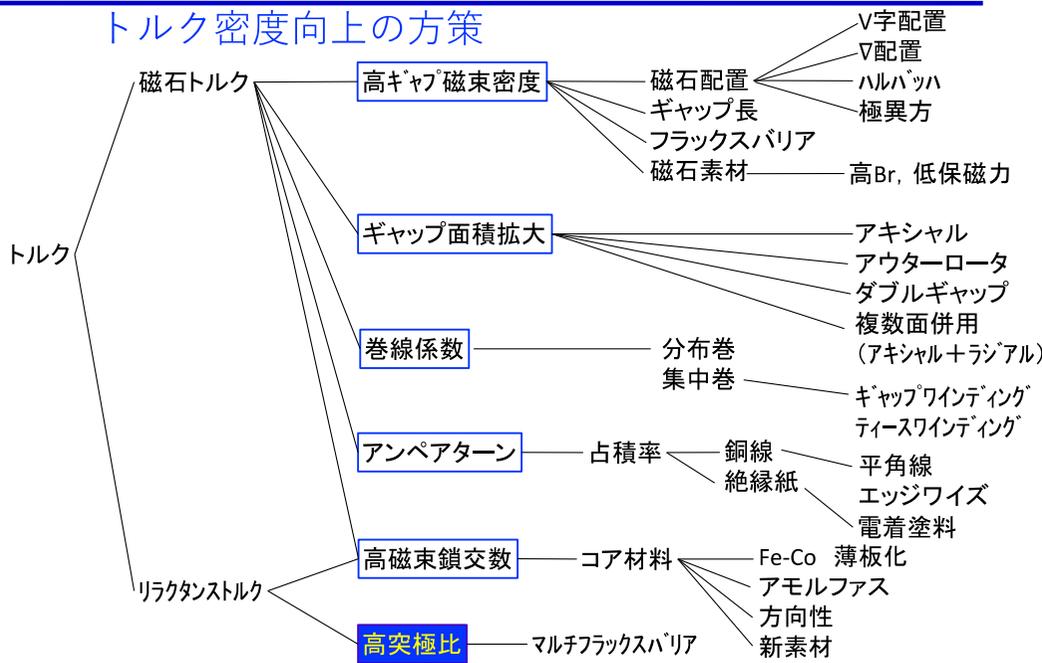


分割導体による銅損低減効果の模式図

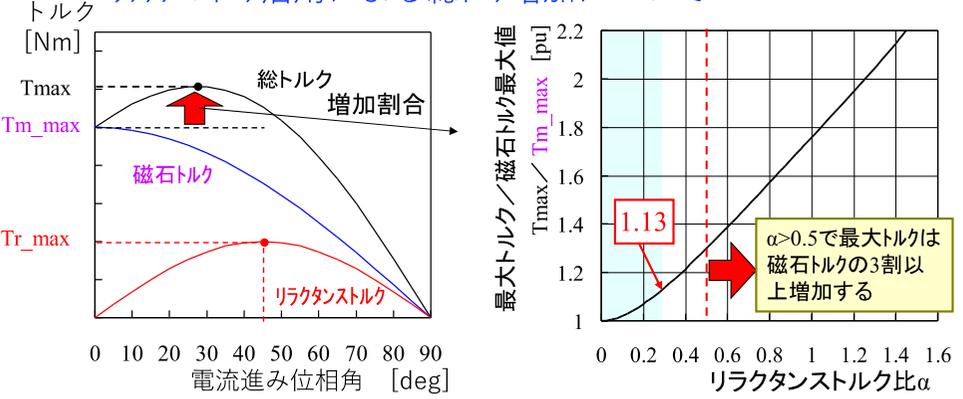
- ・リッツ線(撚り線)構造をモータコイルに応用し、平角断面形状に成形。
- ・各素線には絶縁皮膜、外周には共通の絶縁皮膜を形成。
- ・同じ導体断面寸法では渦電流損失が約1/5となる。

(1) 富澤恵一：「自動車駆動モータ用巻線のための次世代技術開発」, モータ技術シンポジウム2021, B12 プレス(巻線), p.B12-1-17 (2021)  
 (2) 菅原潤, 佐伯孝之, 小林直弘, 木村康三：「巻線開発の歴史と今後の展望」, 住友電工技報, SEITEKニカルレビュー 第190号 (2017年1月)

## トルク密度向上の方策



## リアクタンストルク活用による総トルク増加について



$\alpha$ : リアクタンストルク比

$$\alpha = \frac{M_{r,max}}{M_{p,max}} = \frac{L_q - L_d}{\phi_m} \cdot \frac{I}{2}$$

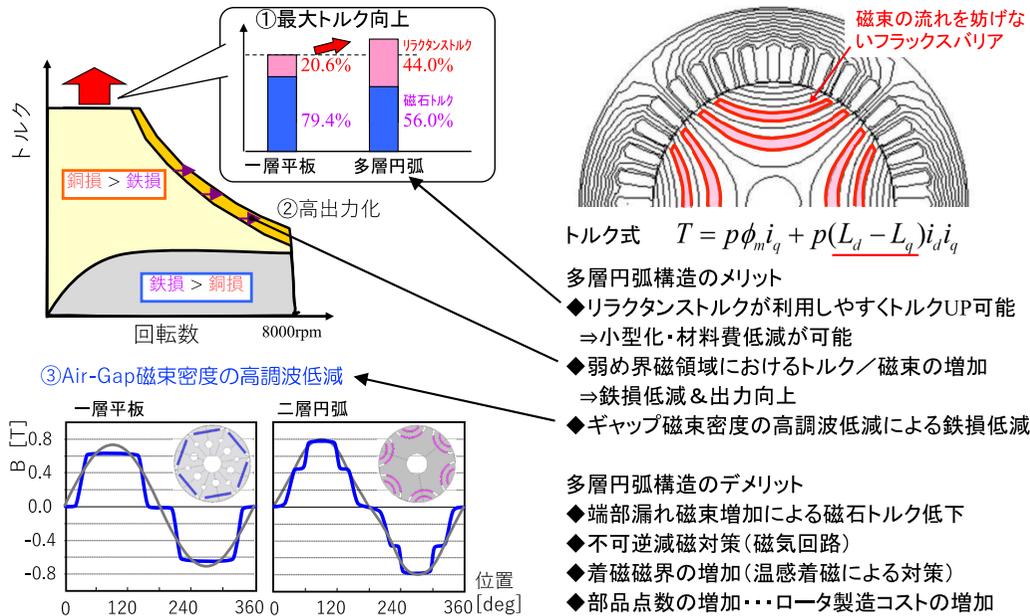
トルク式  $T = p\phi_m i_q + p(L_d - L_q)i_d i_q$

◆  $\alpha < 0.3$  の領域  
 ⇒ トルク改善効果: 小

◆  $\alpha > 0.5$   
 ⇒ 最大トルクの増加効果: 大

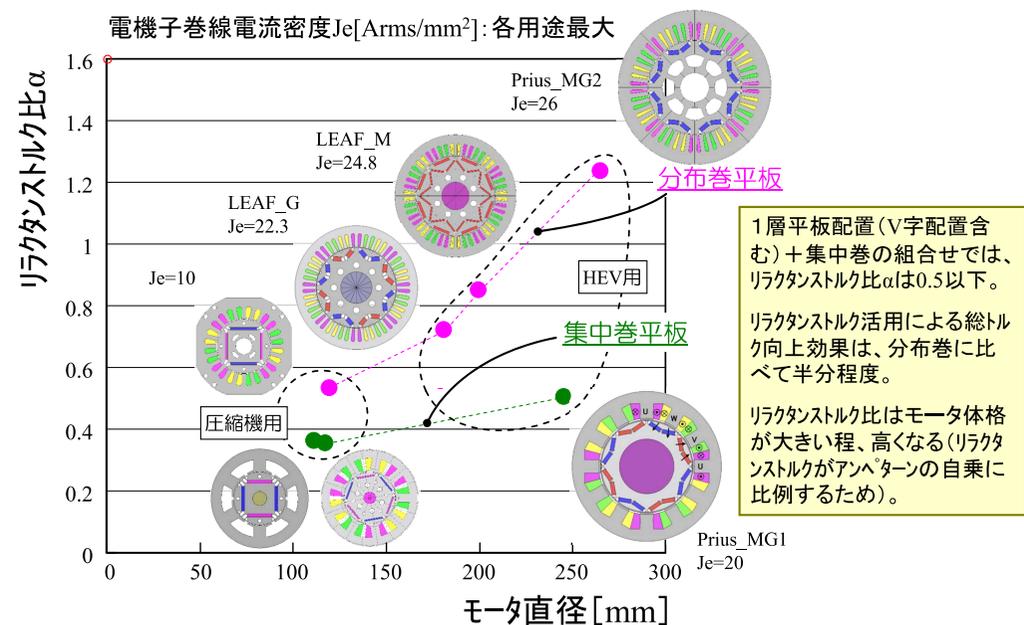
# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 多層円弧構造のメリット・デメリット



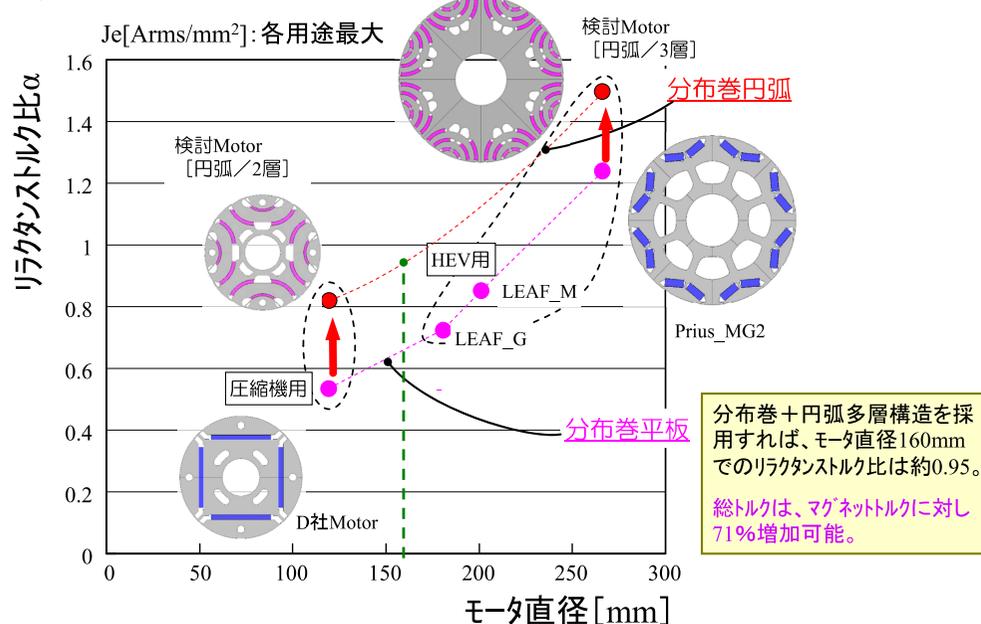
# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 市販IPMSMにおけるリクタンストルク比の評価結果



# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

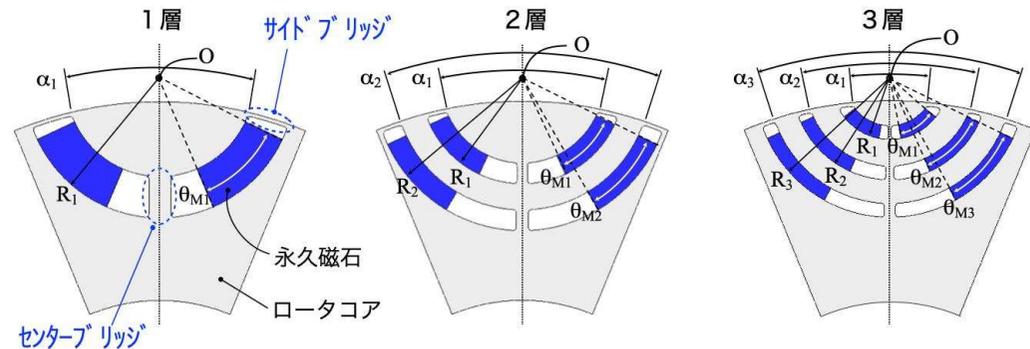
## 多層円弧構造の効果



# 4.1 モータ高トルク密度化の方策

## 多層円弧構造によるリクタンストルク向上

### 円弧磁石を用いた多層IPMSMの電磁設計



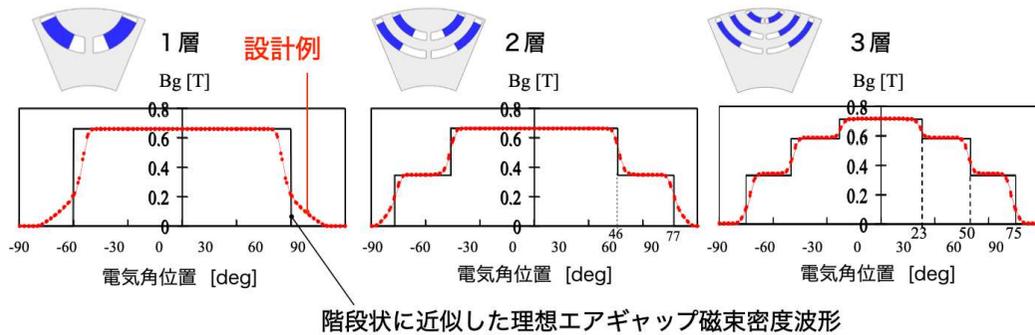
ロータ外径	166.3 mm	磁石厚 (1枚当り)	1層	9.0mm
エアギャップ長	0.8 mm		2層	4.5mm
コア積厚	50 mm		3層	3.0mm
巻数	10 Turn/Slot	サイドブリッジ幅	0.6mm	
残留磁束密度	1.2T@100°C	センターブリッジ幅の合計	4.8 mm [合計]	
ロータ中心から磁化配向焦点Oの距離 $R_0$	85~95mm			

## 4.1 モータ高トルク密度化の方策

49

### 多層円弧構造によるリラクタンストルク向上

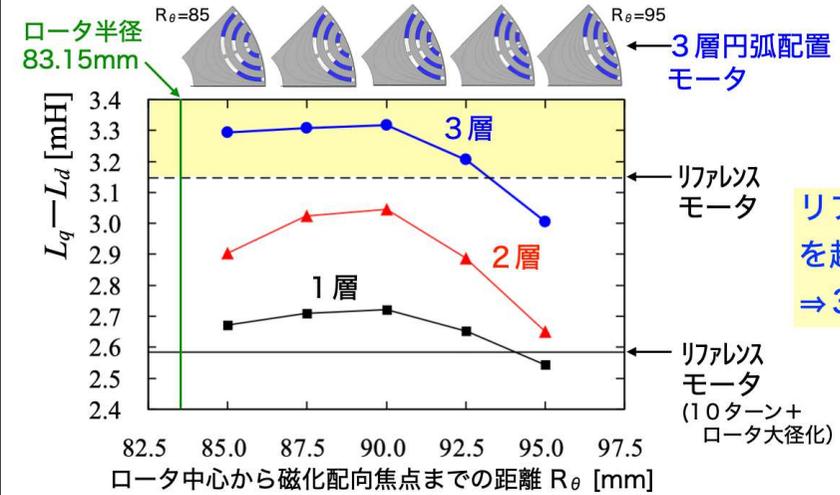
エアギャップ磁束密度波形Bgの設計例



## 4.1 モータ高トルク密度化の方策

50

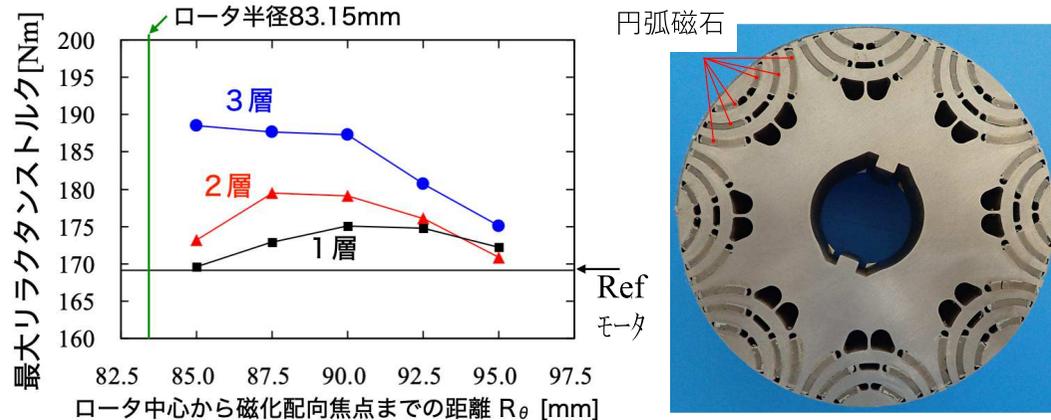
### 多層円弧構造によるリラクタンストルク向上



## 4.1 モータ高トルク密度化の方策

51

### 多層円弧構造によるリラクタンストルク向上

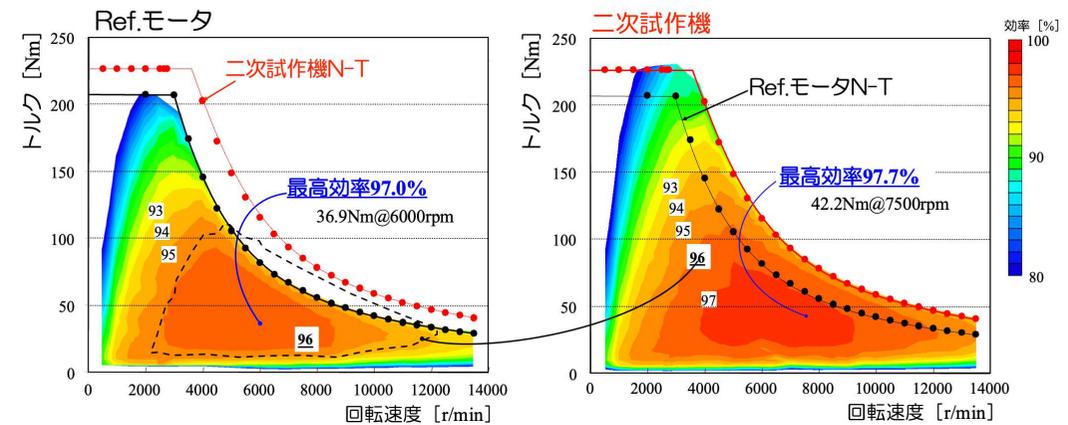


- 層数増加でリラクタンストルク増加 ← リファレンスモータより向上
- 3層円弧配置が最大 [現状設計手法]

## 4.1 モータ高トルク密度化の方策

52

磁石温度80°C管理,  $V_{dc}=650V$ , 最大電流170Arms  
HEV実駆動制御適用時の特性(正弦波PWM~1パルス制御)

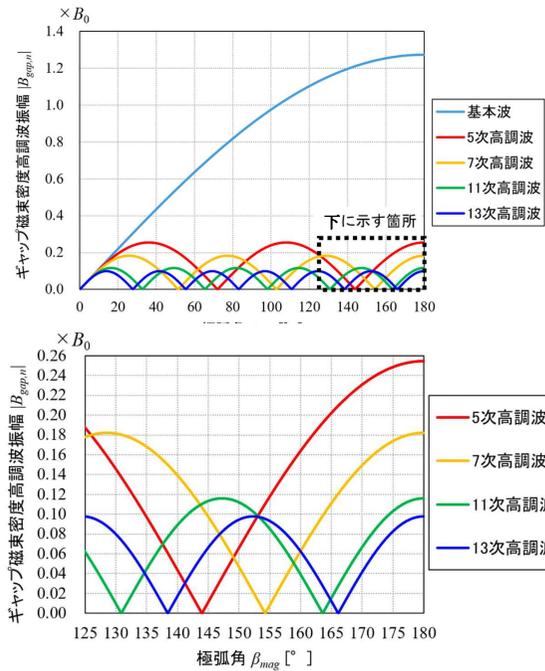


- 動力性能の向上
  - 低速時最大トルク: +8.9% (208.0 → 226.5Nm)
  - 最大出力: 84.9kW (+30.4%)
  - 最高速時出力: 57.3kW (+40.1%)
- モータ高効率化
  - Ref.モータ: 最大97.0%
  - 二次試作機: 最大97.7% (高効率範囲大幅拡大)



## 4.2 トルク脈動低減策

57

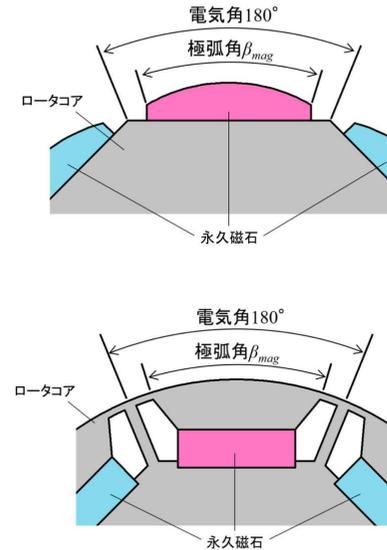


## 4.2 トルク脈動低減策

58

### ギャップ磁束密度の高調波成分の低減

#### (2) 磁石や鉄心などの回転子形状の最適設計

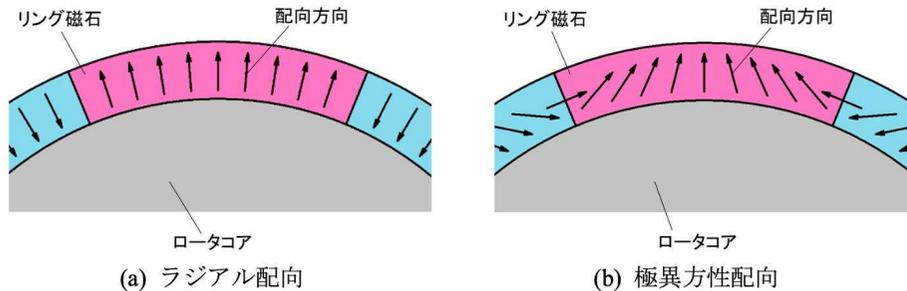


## 4.2 トルク脈動低減策

59

### ギャップ磁束密度の高調波成分の低減

#### (3) 磁石配向の最適設計



- 磁石や鉄心の形状に手を加えずとも磁石の配向や着磁状態を適切に設計することでロータ起磁力及びギャップ磁束密度の高調波を低減することができる。一例として上図にリング磁石にてラジアル配向とした場合と極異方性配向とした場合の磁石配向を示す。
- 極異方性配向とすることでロータ起磁力の高調波が低減され、コギングトルクやトルクリプルを低減することができる。

## 4.2 トルク脈動低減策

60

### 高調波に対する巻線係数が低減可能なモータトポロジー（分布巻）

		①	②	③	④
		4極 12 スロット 全節巻	4極 24 スロット 全節巻	4極 24 スロット 短節巻	4極 36 スロット
極数		4	4	4	4
スロット数		12	24	24	18
毎極枚数スロット数		1 (整数スロット)	2 (整数スロット)	2 (整数スロット)	1.5 (分数スロット)
コイルスロー		#1-#4 (全節巻)	#1-#7 (全節巻)	#1-#6 (短節巻)	#1-#5 (短節巻)
短節巻係数 $k_{p,n}$	n = 1	1.000	1.000	0.966	0.985
	n = 5	1.000	1.000	0.259	0.643
	n = 7	1.000	1.000	0.259	0.342
	n = 11	1.000	1.000	0.966	0.342
分布巻係数 $k_{d,n}$	n = 13	1.000	1.000	0.966	0.643
	n = 1	1.000	0.966	0.966	0.960
	n = 5	1.000	0.259	0.259	0.218
	n = 7	1.000	0.259	0.259	0.177
巻線係数 $k_{w,n} = k_{p,n}k_{d,n}$	n = 11	1.000	0.966	0.966	0.177
	n = 13	1.000	0.966	0.966	0.218
	n = 1	1.000	0.966	0.933	0.945
	n = 5	1.000	0.259	0.067	0.140
コギングトルク山数	n = 7	1.000	0.259	0.067	0.061
	n = 11	1.000	0.966	0.933	0.061
	n = 13	1.000	0.966	0.933	0.140

毎極毎相のスロット数を2とすれば5, 7次の分布巻係数が0.259と小さくできる。⇒電機子鎖交磁束の5, 7次高調波は小さくなり、6次のトルク脈動を低減可能。

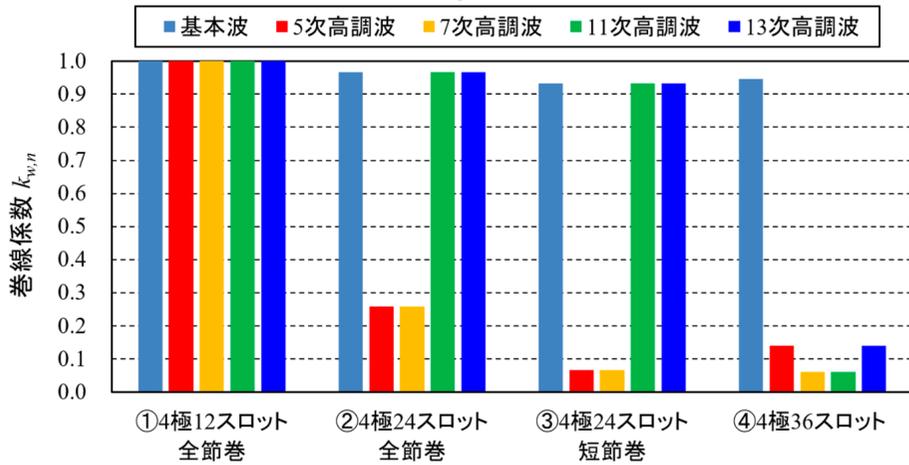
短節巻とすることでさらに5, 7次の短節巻係数を0.259と小さくでき、巻線係数を0.067まで小さくできる。

毎極毎相スロット数を1.5と分数スロットとすることで5次, 7次, 11次, 13次すべての巻線係数を低減可能

## 4.2 トルク脈動低減策

61

高調波に対する巻線係数が低減可能なモータトポロジー（分布巻）



## 4.2 トルク脈動低減策

62

高調波に対する巻線係数が低減可能なモータトポロジー（集中巻）

極数：スロット数	2:3	8:9	5:6	
極数/スロット数	2/3			
	4/3			
	4/6			
	6/9	8/9		
	8/6	10/9		
	8/12		10/12	
	10/15			
短節巻係数 $k_{p,n}$	n=1	0.866	0.985	0.966
	n=5	0.866	0.643	0.259
	n=7	0.866	0.342	0.259
	n=11	0.866	0.342	0.966
	n=13	0.866	0.643	0.966
分布巻係数 $k_{d,n}$	n=1	1.000	0.960	0.966
	n=5	1.000	0.218	0.259
	n=7	1.000	0.177	0.259
	n=11	1.000	0.177	0.966
	n=13	1.000	0.218	0.966
巻線係数 $k_{w,n} = k_{p,n}k_{d,n}$	n=1	0.866	0.945	0.933
	n=5	0.866	0.140	0.067
	n=7	0.866	0.061	0.067
	n=11	0.866	0.061	0.933
	n=13	0.866	0.140	0.933

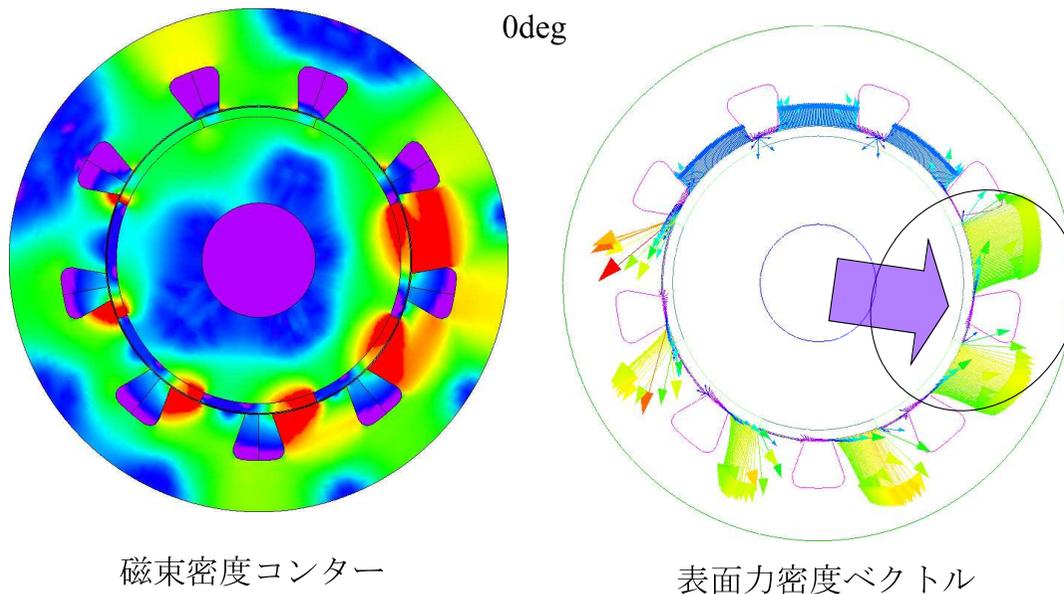
コイル数・簡易な巻線工程にてモータを構成可能な極数：スロット数 = 2:3 及び 4:3 のモータは高調波の巻線係数が 0.866 であり、トルク脈動低減には適さない。基本波の巻線係数も 0.866 と小さく、高トルク化には適さない。

トルク出力が大きくかつトルク脈動が小さい極スロットコンビネーションとしては 8極9スロット、10極9スロット、及び10極12スロットが挙げられる。

中でも8極9スロットと10極9スロットが巻線係数の面では最も優れている。ただし、これらは偏芯に対する振動・騒音の感度が高いため、採用には注意が必要である。

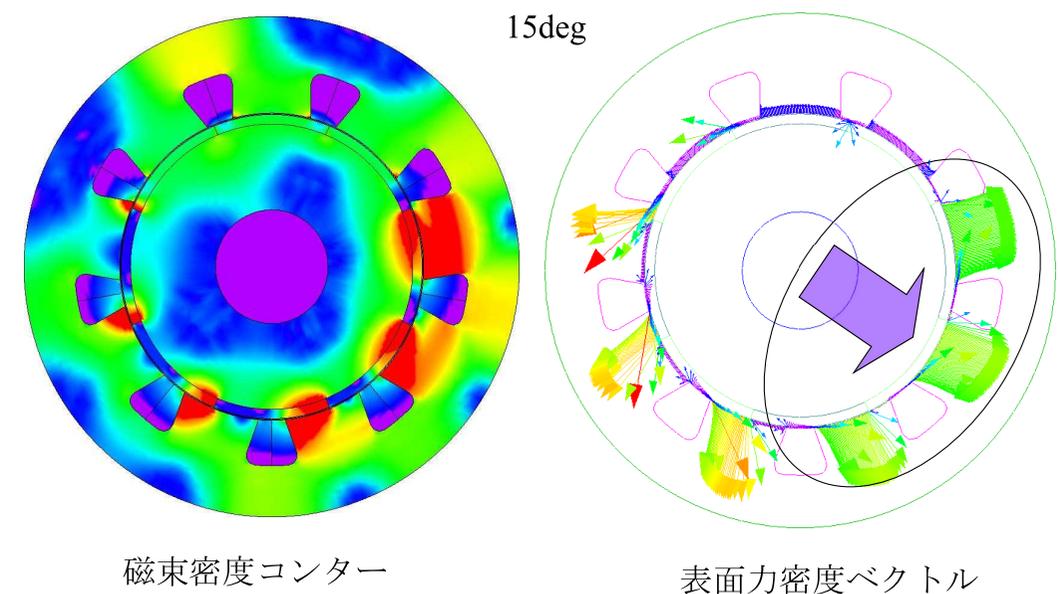
8極 9 スロット SPMモータの磁束密度コンターと表面力密度分布

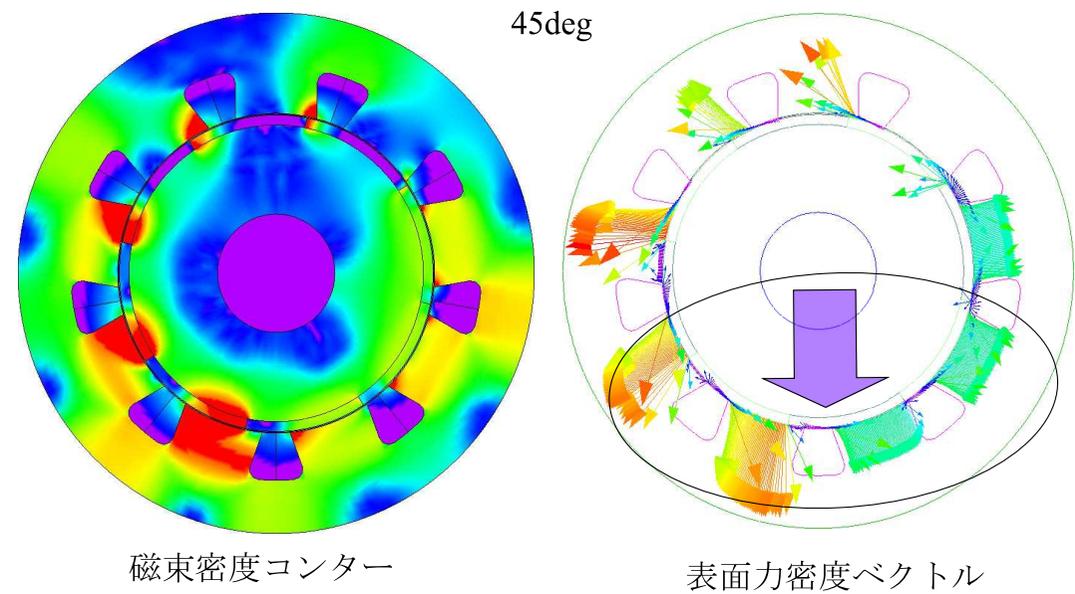
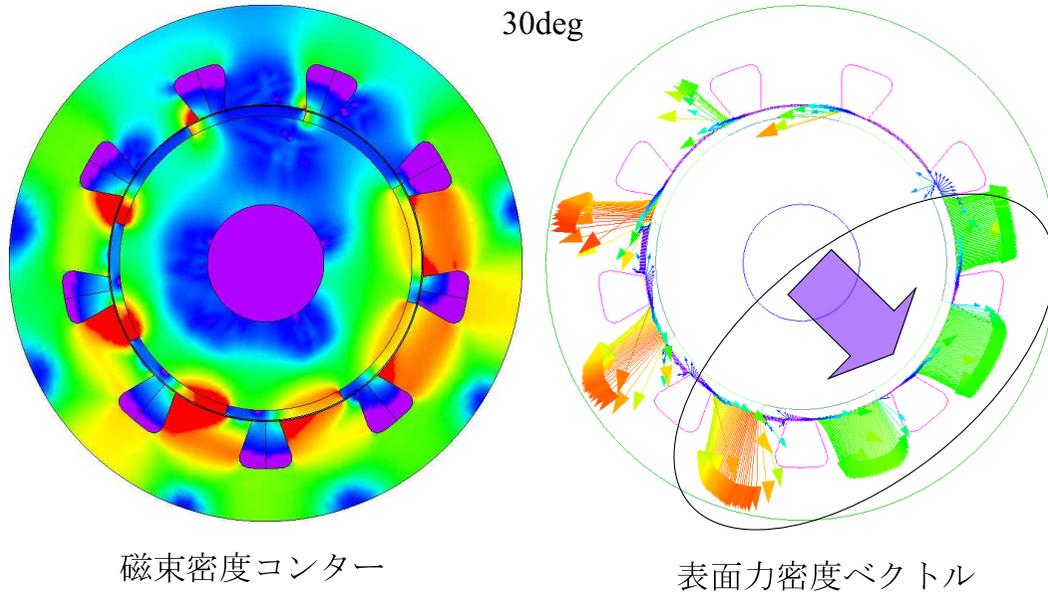
63



8極 9 スロット SPMモータの磁束密度コンターと表面力密度分布

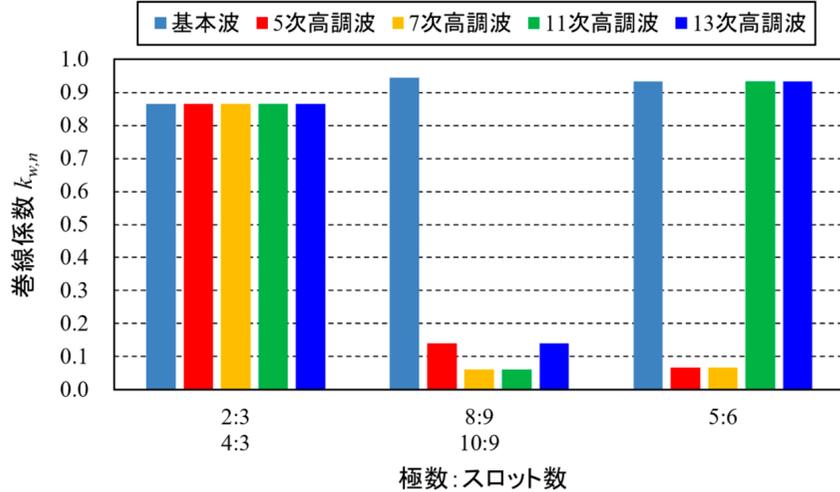
64





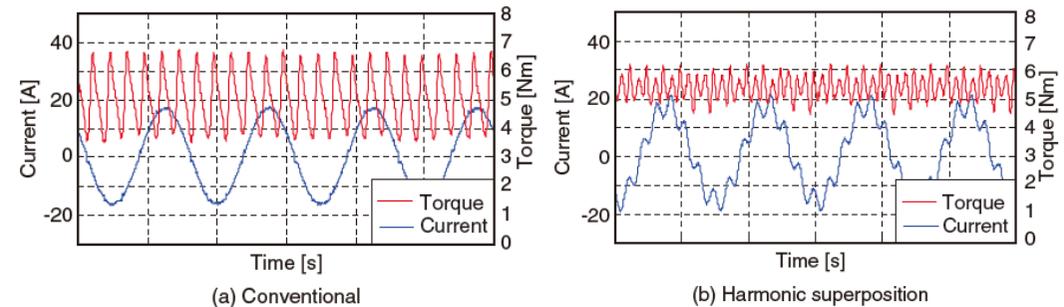
## 4.2 トルク脈動低減策

高調波に対する巻線係数が低減可能なモータトポロジー（集中巻）



## 4.2 トルク脈動低減策

トルク脈動を打ち消すように電流指令に高調波電流を加える



Concept of superposition of harmonics current

- 電気角  $6n \pm 1$  次成分の高調波を重畳  $\Rightarrow$  電気角  $6$  次数成分を低減
- 回転数に対するトルク-電流マップを用いて、動作条件に応じて重畳条件を最適化