

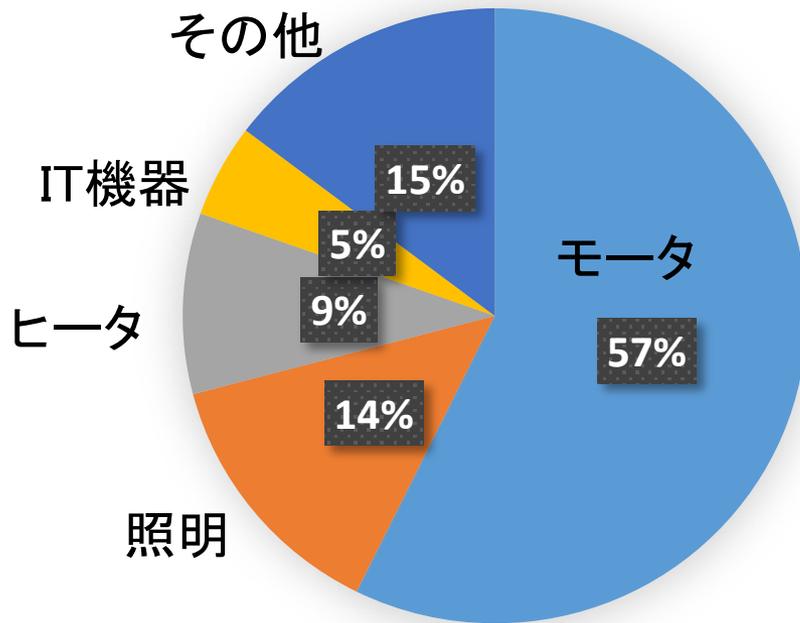
# 最近のモータ技術

1. 永久磁石 (PM) モータ
2. スイッチトリラクタンス (SR) モータ
3. 横磁束 (TF) モータ

東北大学大学院工学研究科  
電気エネルギーシステム専攻  
一ノ倉 理

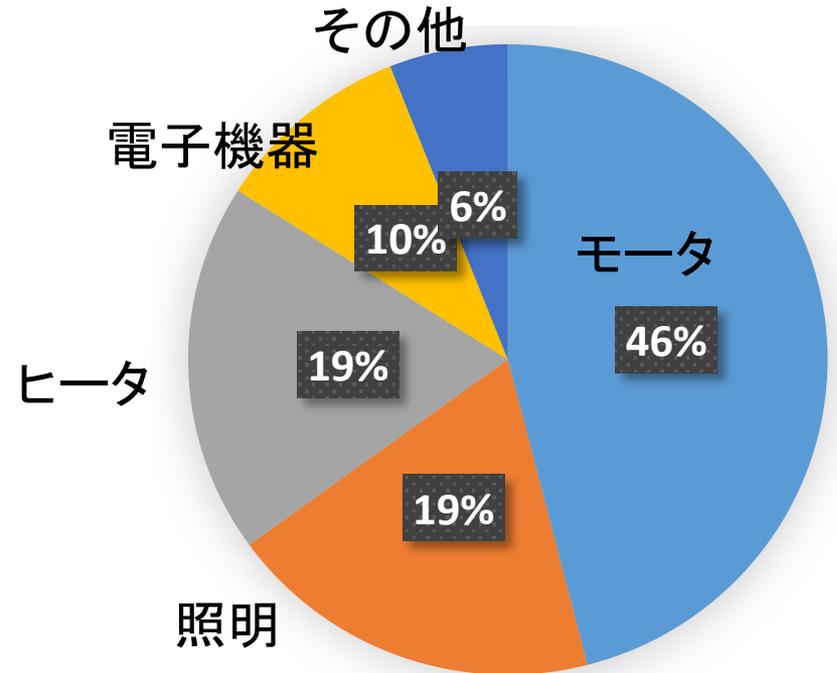
# 消費電力の内訳

## 日本



(2005富士経済)

## 世界



(2011 Motor Summit@Zurich)

全電力の約半分が動力に利用されている

# 1. PMモータ

## 日本：省エネ法

1979年 省エネ法制定  
1999年 トップランナー方式を採用  
2015年 トップランナー規制開始

\*トップランナー方式：現在商品化されているなかでエネルギー消費効率が最も優れているものを基準とする

## 海外：国際規格効率

クラス	効率(%)
IE1(標準効率)	88~90
IE2(高効率)	90~92
IE3(プレミアム効率)	92~94
IE4(スーパープレミアム)	94~

(15kWモータの場合)

- 発電電力の約半分を消費しているモータの高効率化は世界的な流れ.
- 現状の誘導モータでは効率に限界があるため、永久磁石(PM)モータへの転換が加速.

# モータの高効率化のポイント

## PMモータの損失

永久磁石(フェライト,  
Nd-Fe-B, SmCo)

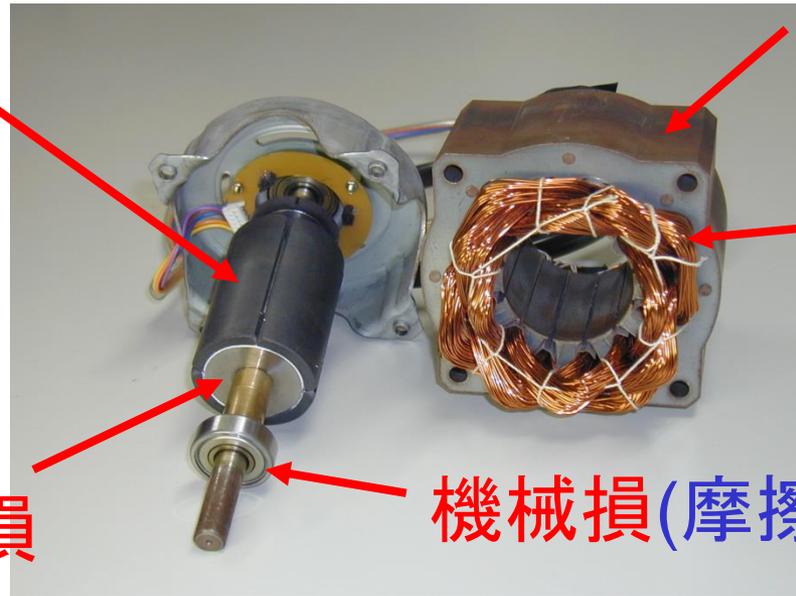
空隙磁束に高調波  
が存在する場合は  
磁石にうず電流損  
が生じる

固定子鉄損(鉄  
心材料の損失)

銅損(巻線  
抵抗損失)

回転子鉄損

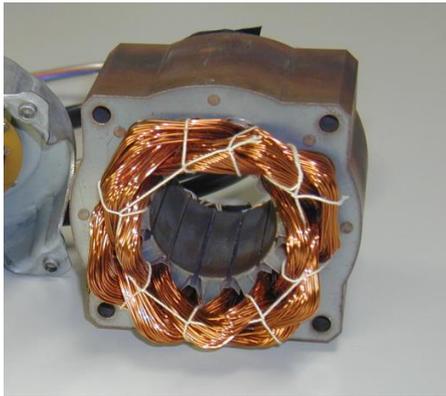
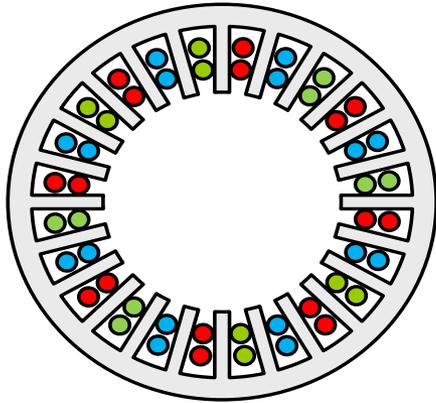
機械損(摩擦, 空気抵抗)



銅損と鉄損を減らす

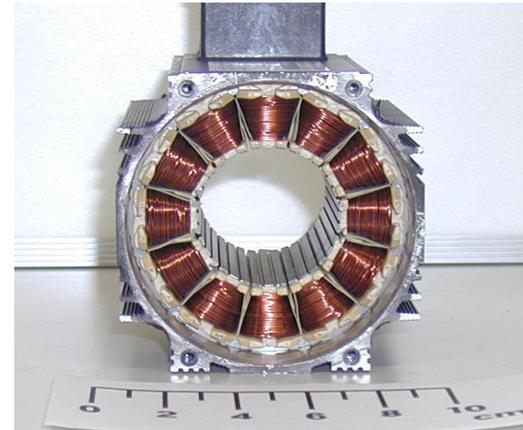
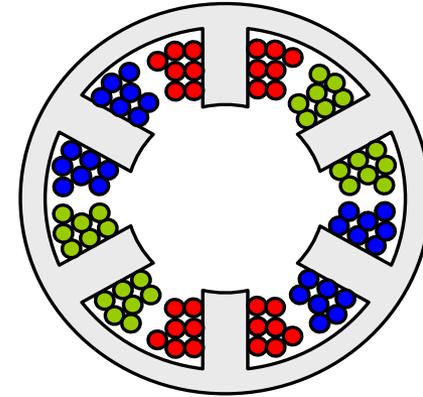
# 巻線密度の向上による銅損の低減

## 分布巻



巻線占積率が低く、コイルエンドによる巻線抵抗の増加

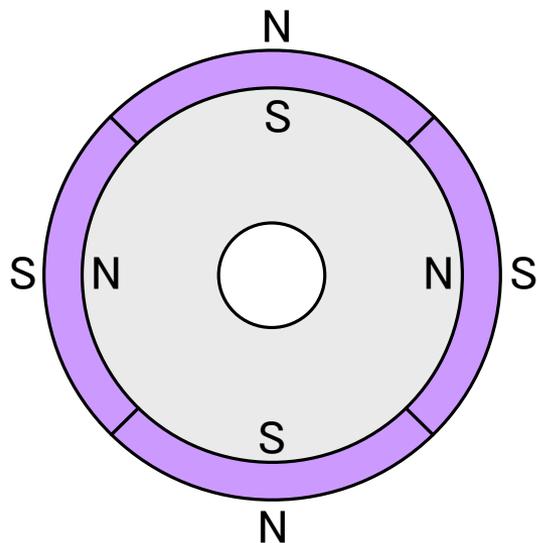
## 集中巻



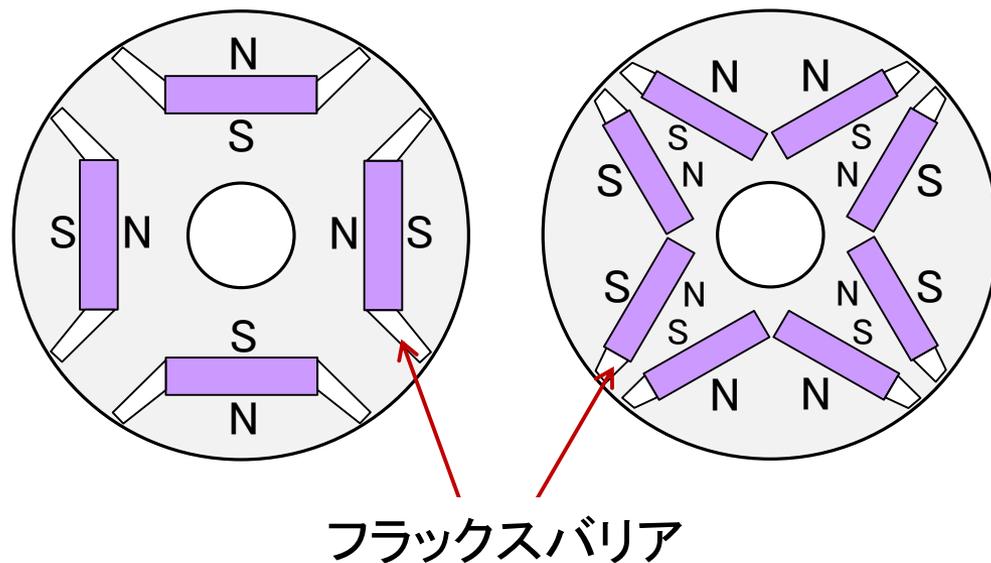
巻線占積率向上とコイルエンド低減による効率改善 <sup>5</sup>

# 埋込み構造による磁石渦電流損低減

表面磁石型 (SPM)



埋め込み磁石型 (IPM)



## IPMモータのメリット

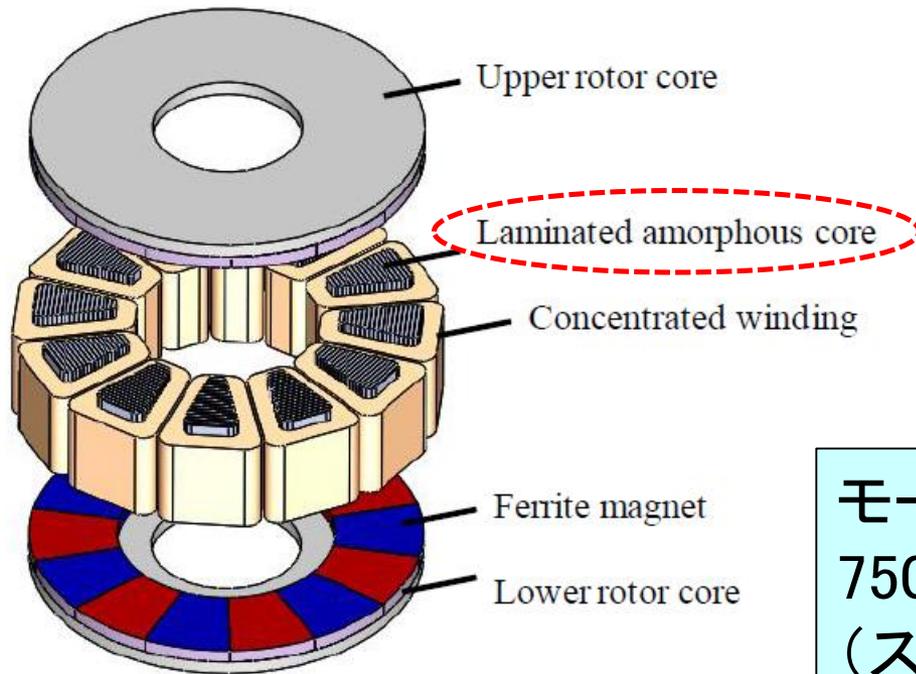
- 高調波磁束による磁石うず電流損を低減
- マグネットトルク + リラクタンストルクを利用  
(磁石量の削減, 小型高出力化にも有効)

# 新磁性材料による鉄損低減

一般のモータ鉄心には無方向性ケイ素鋼板が使用されているが、最近注目されている材料として以下の3種類が挙げられる

Fe基アモルファス	結晶構造を持たないため、 <b>磁化しやすく(高透磁率)低鉄損</b> . 加工性が悪いため従来は巻鉄心のみだったが、層間絶縁したものを積層して打ち抜く技術が開発された. 巻鉄心のまま利用できる形状のモータも提案されている.
ナノ結晶軟磁性材料	アモルファス合金に熱処理を加えて10nmレベルの結晶を生成. <b>高飽和磁束密度(<math>B_s=1.84T</math>)と低鉄損特性</b> を実現. 東北大金研とNECTーキンで開発(商品名NANOMET). 小型モータへの適用例も報告されている.
Fe圧粉磁心	表面を絶縁処理した鉄粉を圧縮成型して鉄心を製作. <b>うず電流損が小さく高周波特性に優れていることと, 三次元的に等方性</b> であることが特長. 飽和磁束密度と透磁率がやや低いが、近年特性の改善が進みモータへの適用例の報告も増えている.

# 適用例1 アモルファスをを用いた アキシシャルギャップモータ



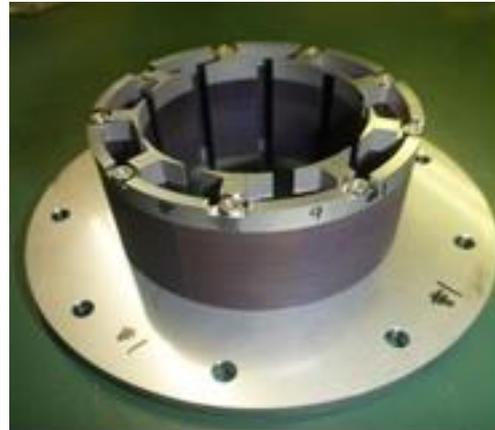
短冊状に切断したアモル  
ファス薄帯を積層して作製

モータ直径160mm, 軸長120mm,  
750rpm-2N・mで効率94%を達成  
(スーパープレミアムIE4クラス)

出典: Zhuonan Wang, Doctoral Thesis of Tohoku University,  
"Analytical Model and Optimal Design of Axial Flux PM Motor with  
Amorphous Core", 2015年3月

# 適用例2 NANOMETモータ

直径70mm, 積み厚50mmの集中巻PMモータの固定子鉄心にナノ結晶合金を適用



組込  
→



(左) 新ナノ結晶合金 NANOMET®  
を積層したステータコア

(右) 特性評価用モータ

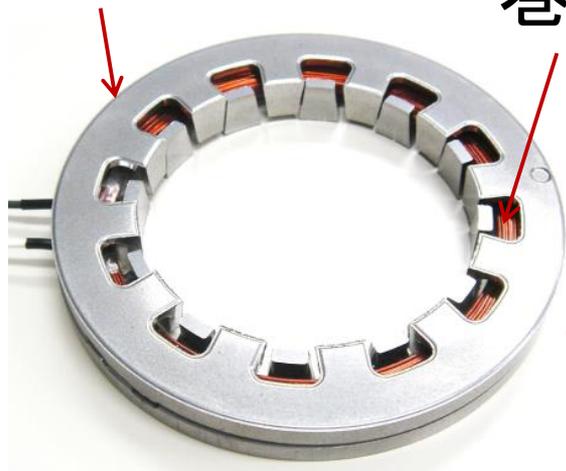
	試作モータでの実績	
	0.35mm電磁鋼板	NANOMET
鉄損	1.4W	0.4W
モータ効率	85%	91%

プレスリリース <http://news.panasonic.com/press/news/data/2014/12/jn141217-1/jn141217-1.html> (2014年12月17日) より引用

# 適用例 3 圧粉磁心モータ

ステータコア  
(圧粉磁心)

巻線



← 90mm →



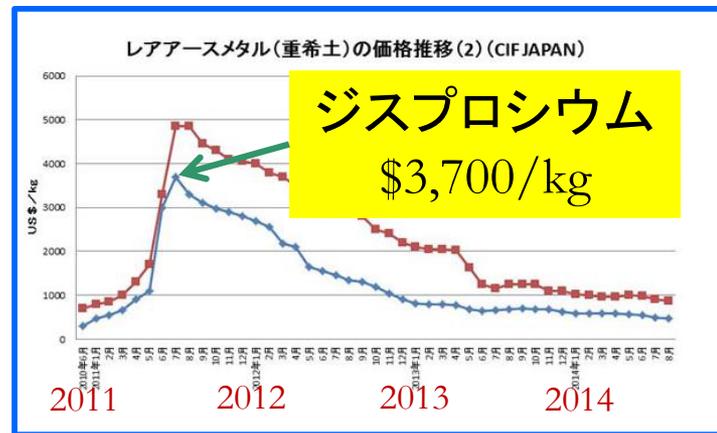
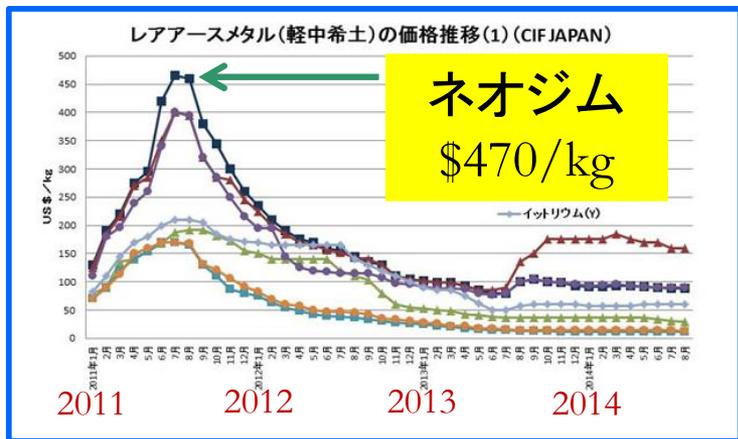
↑  
95mm  
↓

3000rpm-2.4Nm-750Wで効率90%を達成，サイズが通常のPMモータの1/2程度に小型化(クローティースモータという名称で日立が商品化)

出典: 床井博洋「軟磁性材料を活用した高効率薄型モータに関する研究」,  
東北大学博士学位論文, 2014年3月

# 2. SRモータ

2011~2012のレアアース・ショックを契機に省・脱希土類磁石モータの研究が活発化



(NeoMag: [http://www.neomag.jp/statistics/rare\\_earth\\_newprice2.php](http://www.neomag.jp/statistics/rare_earth_newprice2.php)より)

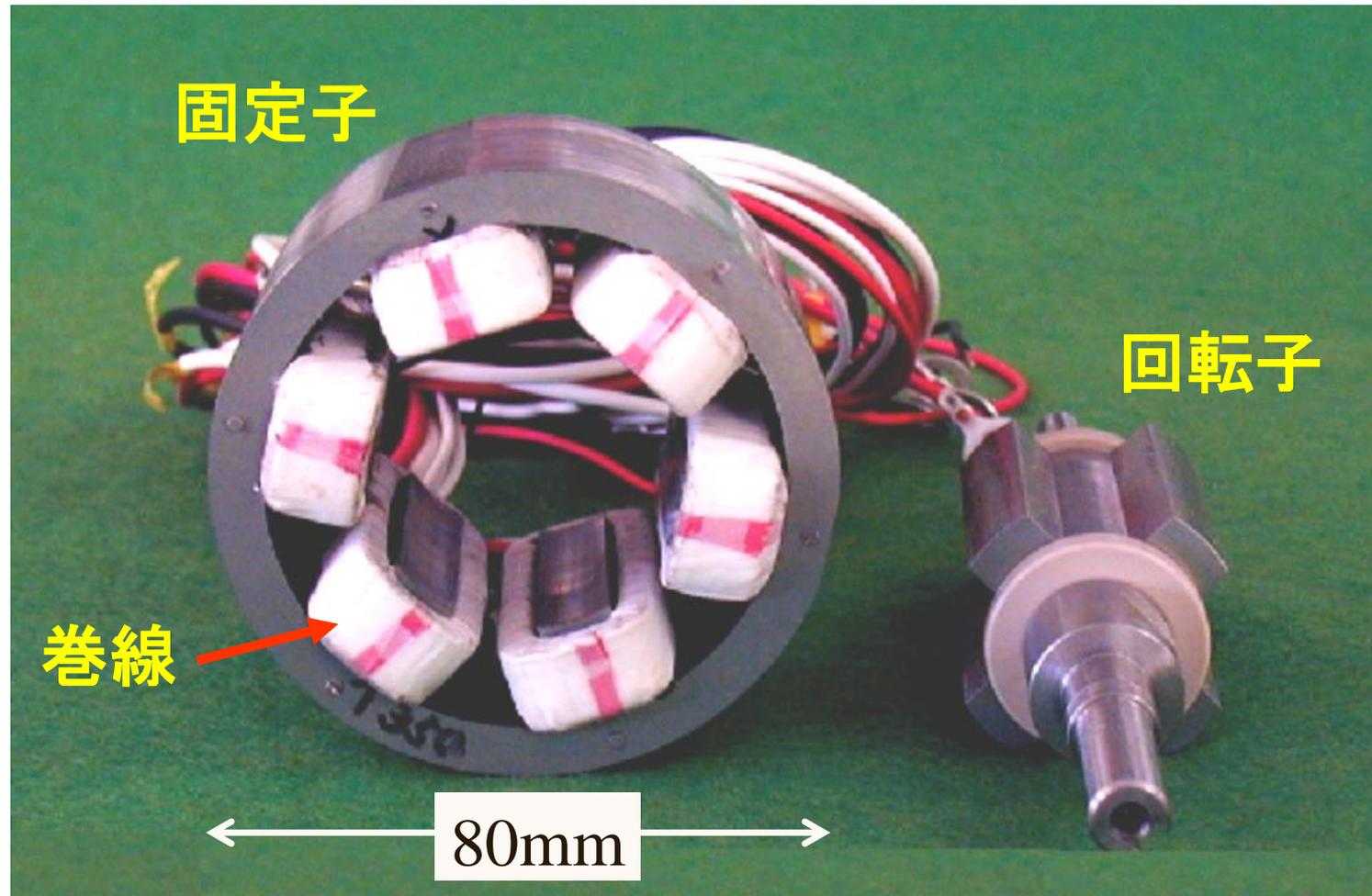
現在レアメタルの供給は安定しているが、

- ・世界的に自動車の電動化が加速
- ・モータの大容量化(電車, 作業機械)
- ・風力など大型のPM発電機の需要も増
- ・飛行機の電動化など新たな用途も登場



希土類磁石に依存しないモータの開発も継続的な課題

# 6極-4極SRモータの例



鉄心は無方向性ケイ素鋼板を打ち抜いたものを積層して作製. 巻線も集中巻なので構造が極めて単純. <sup>12</sup>

# リラクタンスマータの特徴

## 長所

- 資源リスクがなく, 堅牢で安価
- 高温環境下での使用が可能
- 高速回転に適する
- コギングトルクが無い
- 空走時は誘導起電力がゼロ
- 回転子銅損が無い

インホイール  
方式EVに適

## 課題

- トルクリップルと振動・騒音が大きい  
⇒モータ電流の制御で低減可能
- PMモータと比較して出力と効率が劣る  
⇒アキシアルギャップ構造の提案

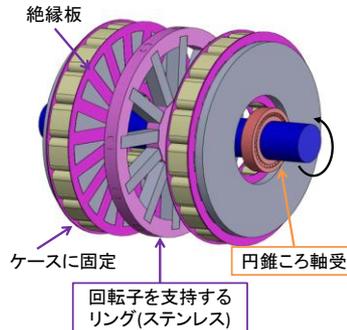
# 小型EV用アキシシャルギャップSRモータ

1人乗り小型自動車(トヨタコムス)



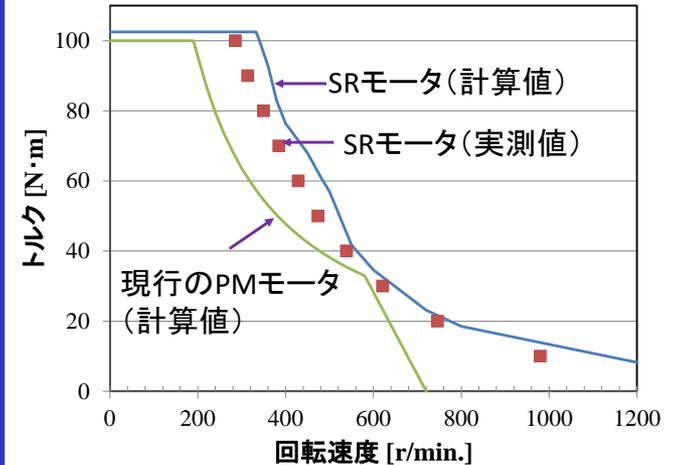
インホイールモータ

試作したダブルステータタイプアキシシャルギャップSRモータ



現行のPMモータによる駆動をアキシシャルギャップSRモータで置き換える

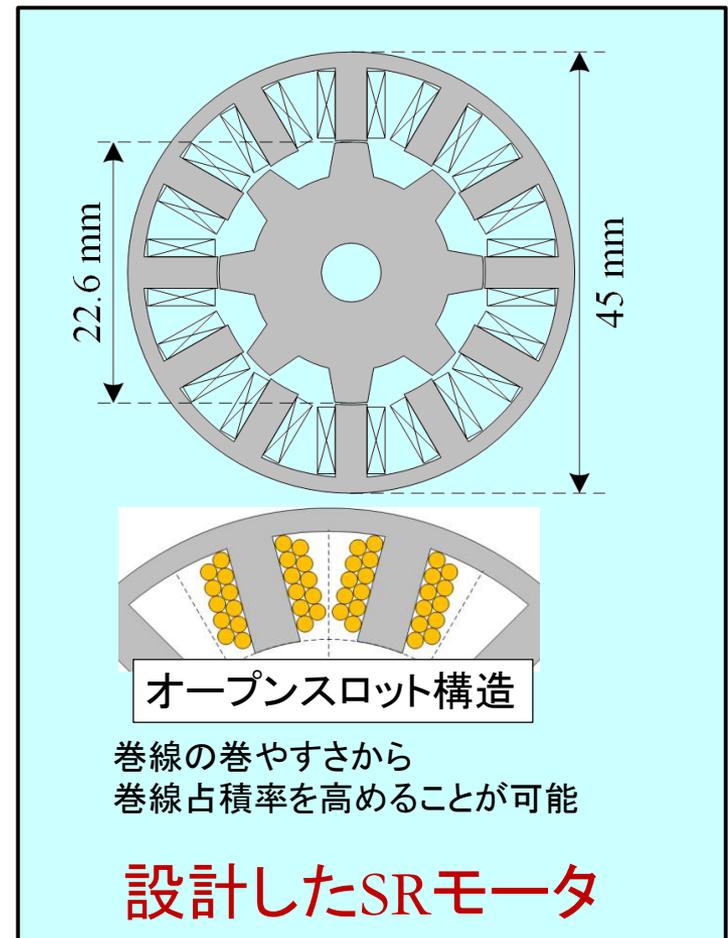
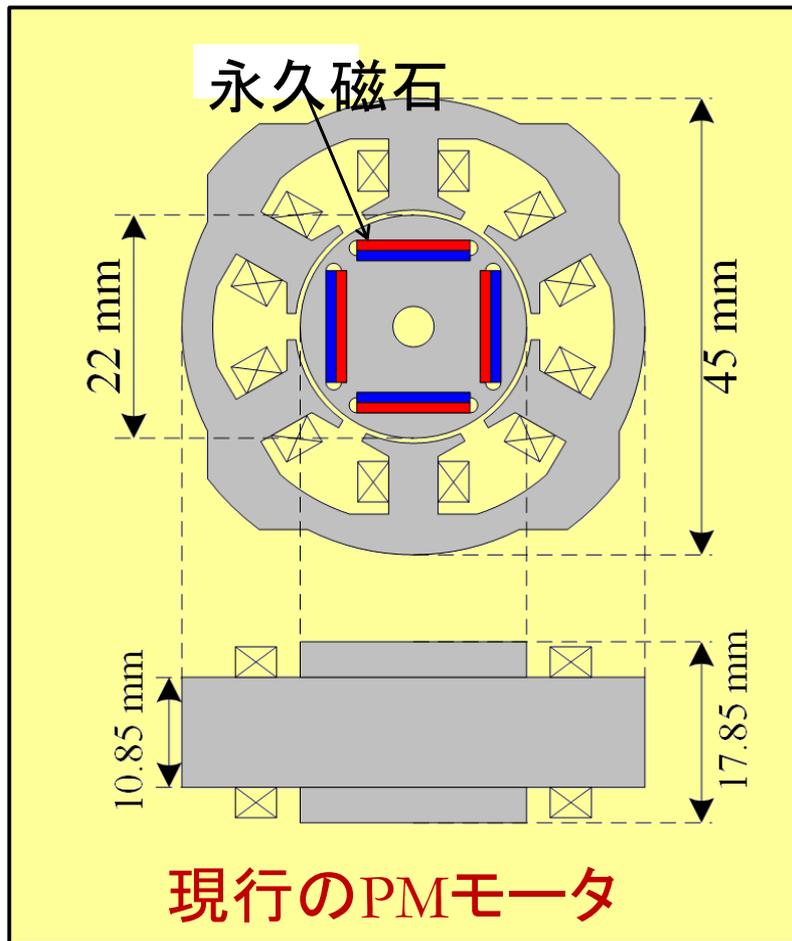
速度-トルク特性



現行のPMモータと同等以上のトルク-速度特性が得られることを確認

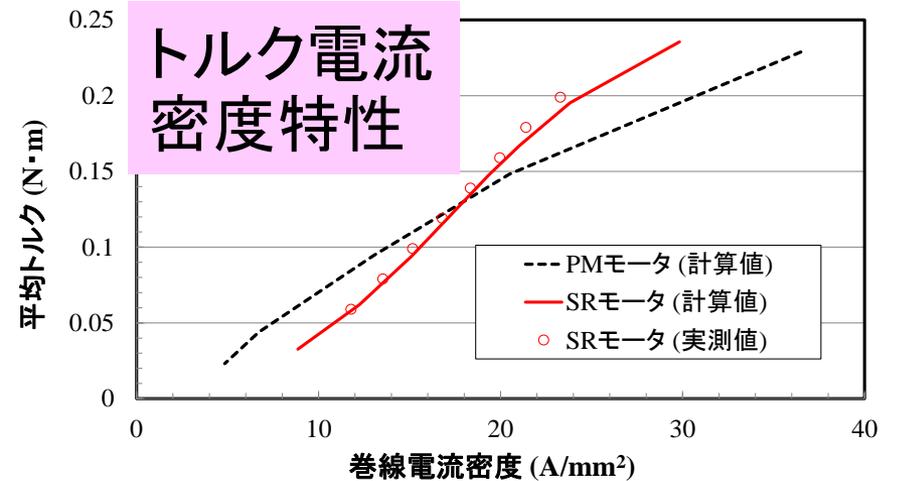
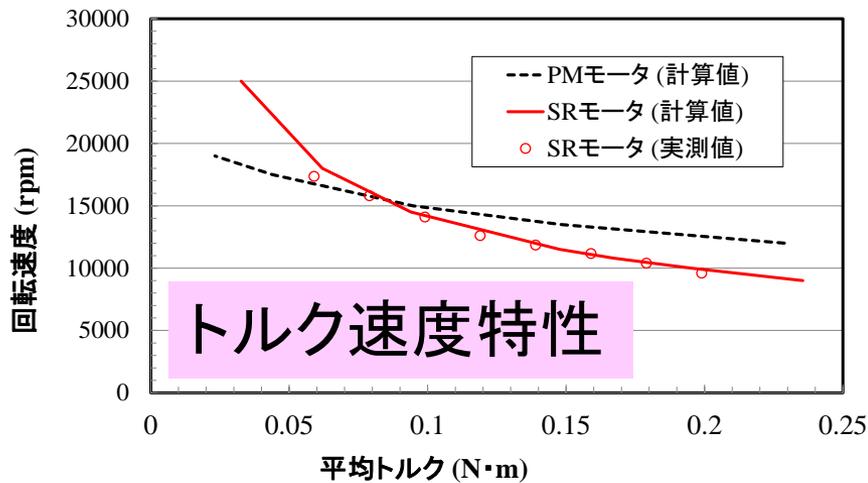
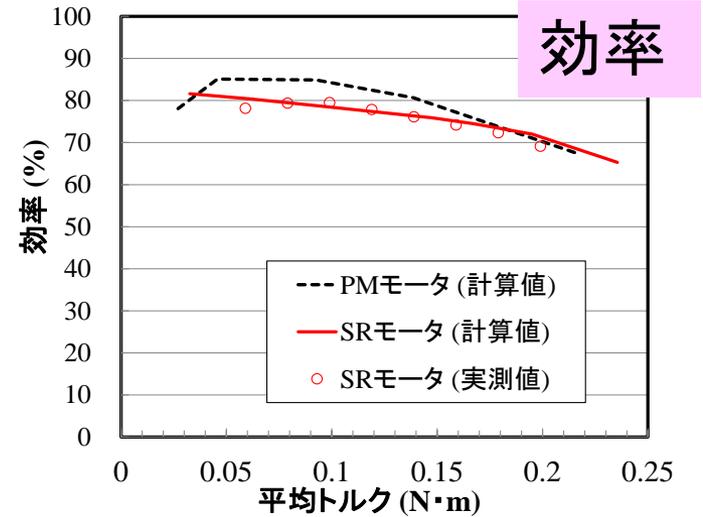
# 電動工具用SRモータ

騒音・振動があまり問題にならない電動ドリルに着目



体格は同じとする

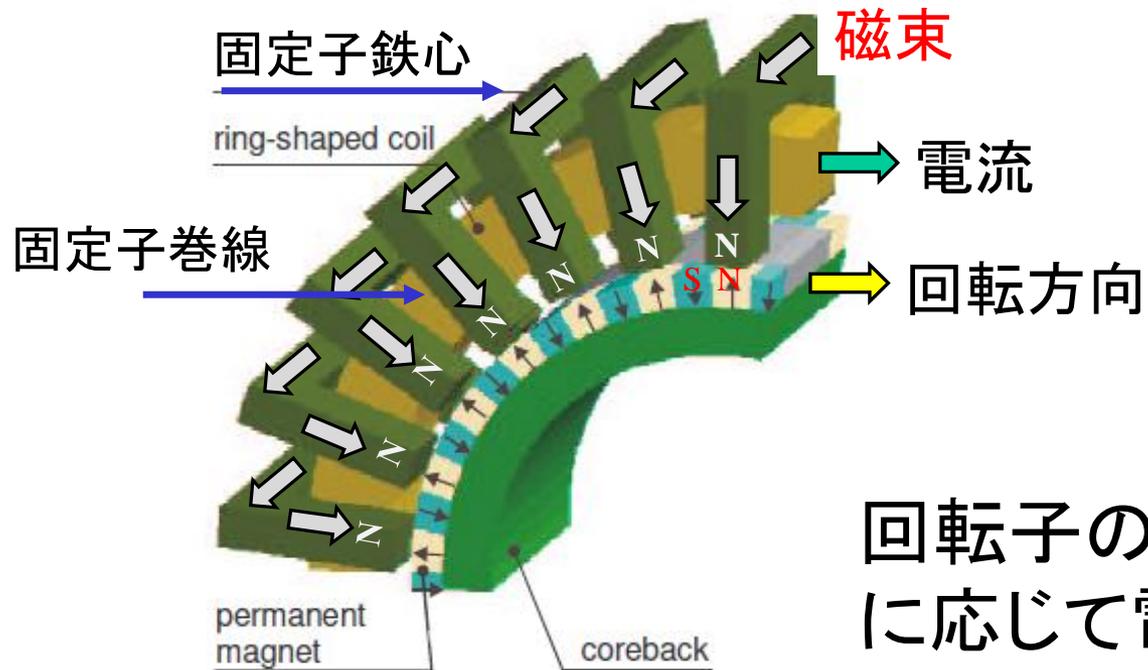
# 試作SRモータの特性



効率が若干劣るが、PMモータに匹敵する特性が得られた

# 3. 横磁束モータ

## Transverse Flux Machine: TFM



回転方向に対して  
磁路が垂直に形  
成されている

回転子の磁石の位置  
に応じて電流を制御

出典: G. Kastinger, "Design of a novel transverse flux machine",  
Proceedings of ICEM(2002)

## 横磁束モータの特長

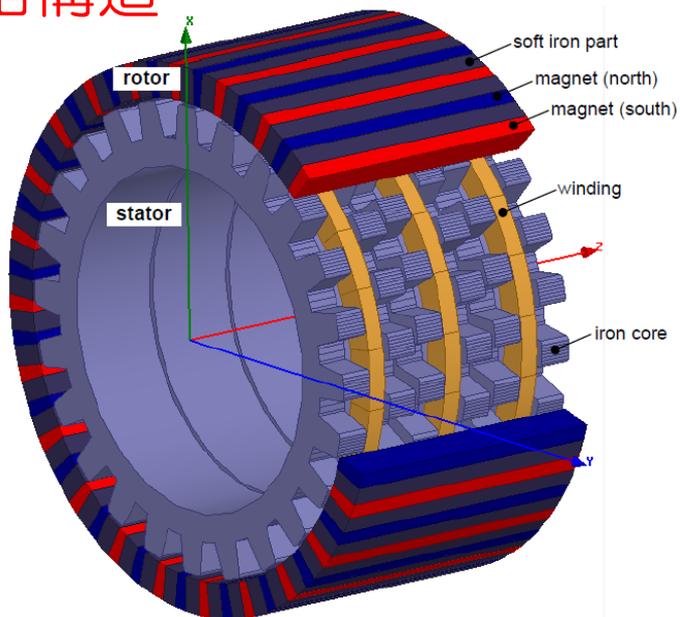
- 固定子の極ピッチが短くできるため、**高いトルク密度**が得られる
- トロイダル巻線が適用できるため、巻線占積率が高い⇒**銅損が小さい**

## 横磁束モータの課題

- トルクリップルが大きい
- PM回転子ではコギングトルクも大きい
- 構造が複雑で製作が難しい(分割されたコアや回転子の固定方法)

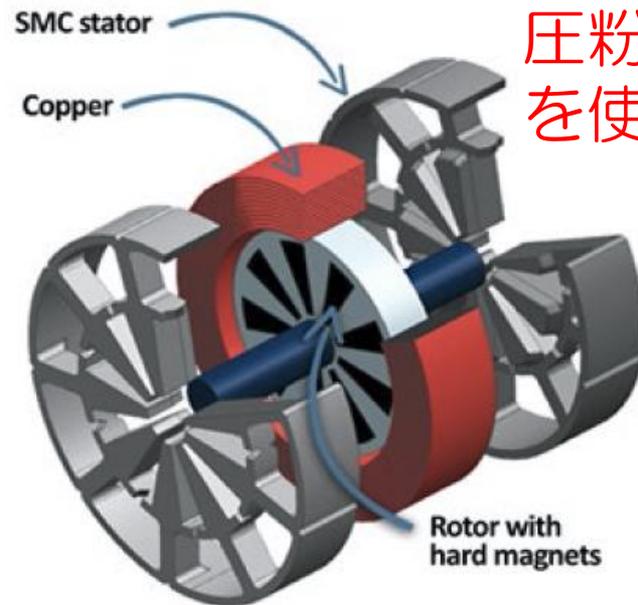
# 文献に見るTFMのアイデア

## 3相構造



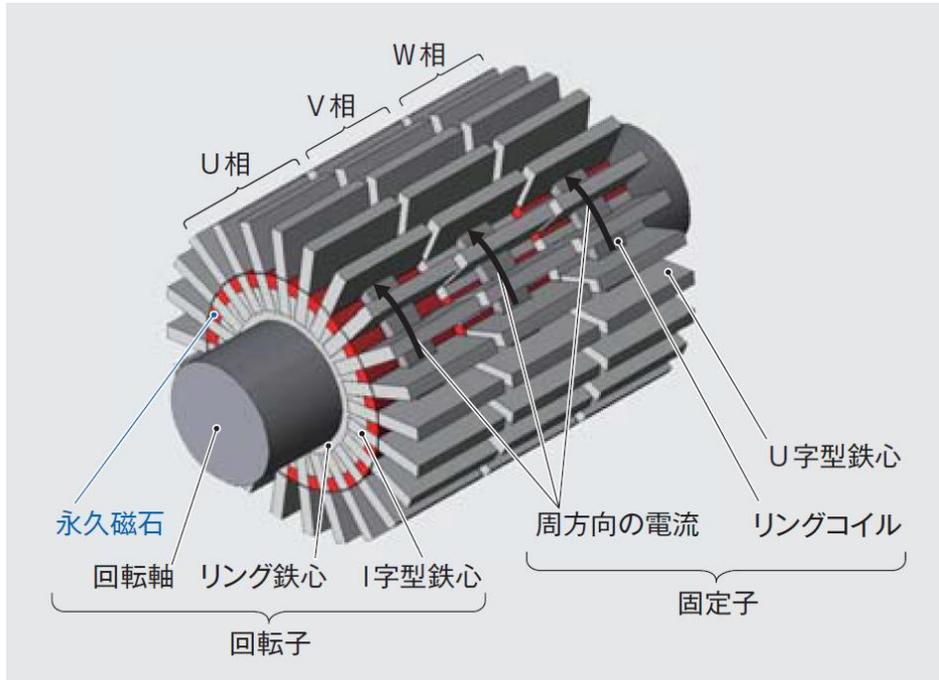
出典: J. Jung, S. Ulbrich, W. Hofmann, “Design Process of a High Torque Density Direct Drive Involving a Transverse Flux Machine”, Proceedings of ICEM, pp. 1096-1102(2014)

固定子に  
圧粉磁心  
を使用

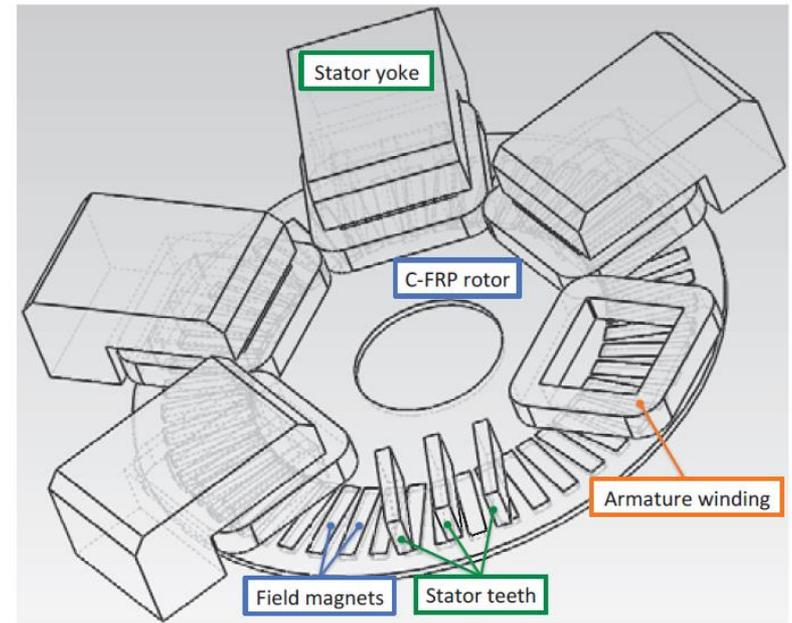


出典: Stefan Tailler, “Soft Magnetic Composites in the development of a new compact transversal flux electric motor”, Powder Metallurgy Review(2013)

# 文献に見るTFMのアイデア(その2)



出典: 上田靖人, “いっそうの小型化に有効な高トルク密度モータ”, 東芝レビュー, Vol. 68, No. 1(2013)

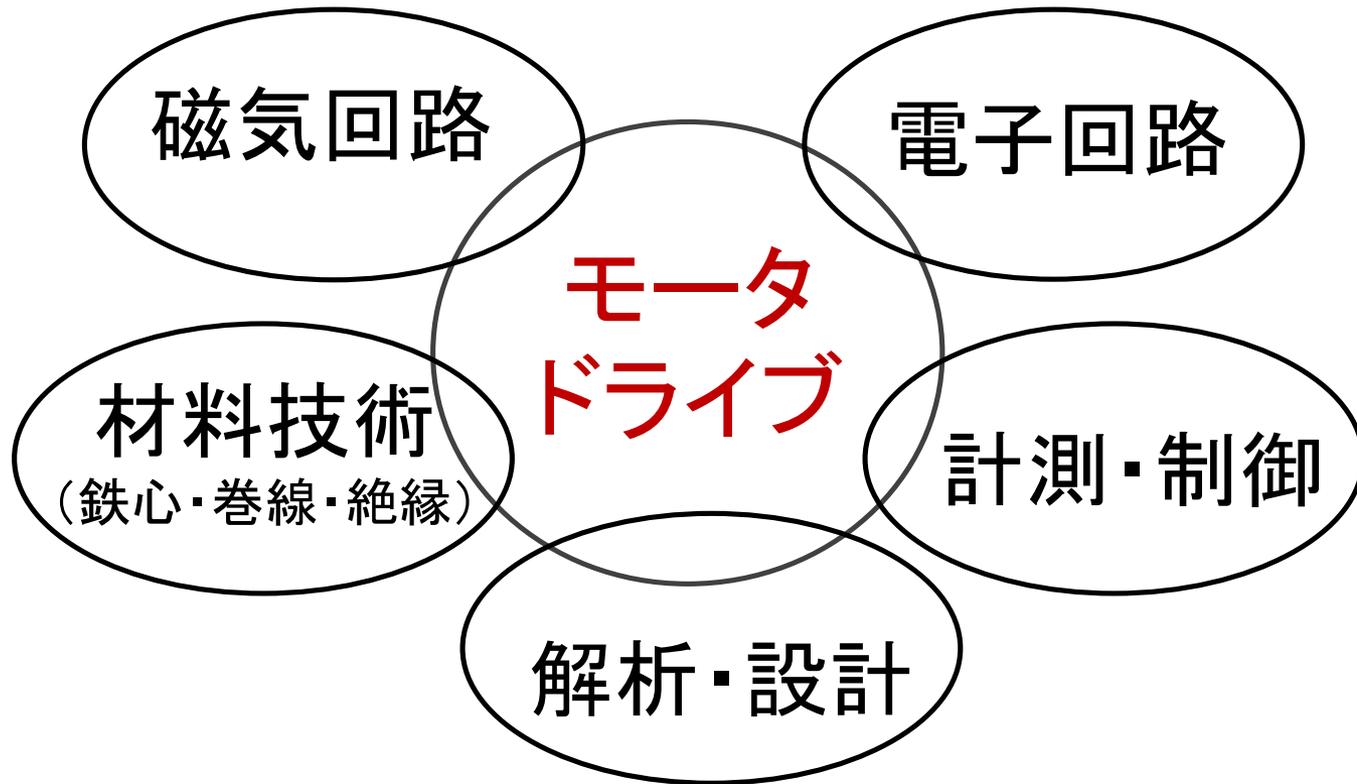


出典: 山本雄太, “稠密な電機子構造を有する横方向磁束型主電動機の高トルク密度／高力率設計” 東京大学修士学位論文(古関研究室)より

今後の展開(アイデア)に期待

# まとめ

---



モータの高性能化には優れた要素技術が必要

低損失磁性材料(アモルファス)	東北大金研
低損失、高磁束密度(ナノメット)	東北大金研 & NEC トーキン
高磁束密度(パーメンジュール)	東北特殊鋼
省希土類強力磁石の開発	東北大マテリアル
脱希土類強力磁石(Fe-N)の開発	東北大電子専攻
高品質巻線(真四角線コイルなど)	後藤電子



東北は高性能モータに直結する技術  
が豊富