

次世代自動車地域産学官フォーラム
技術開発セミナー&ラボツアー(3)

レアアースレスモータの可能性

小坂 卓

(名古屋工業大学大学院 工学研究科 情報工学専攻)

平成23年11月14日(月)

レアアースレスモータの位置付け

自動車駆動用モータとしての性能・特徴比較(21世紀初頭)

項目	レアアースレスモータ			
	直流モータ	PMSM	誘導電動機	SRモータ※
最大効率[%]	89~91	95~97	94~95	~90
負荷時効率[%]	80~87	90~92	79~85	78~86
最大回転数[kr/min]	4~6	4~15	9~15	~15
コスト比	1	1.0~1.5	0.8~1.2	0.6~1.0
制御装置コスト比	1	2.5	3.5	4.5
寿命	△	◎	◎	◎
保守性	△	◎	◎	◎
体格・重量	△	◎	○	◎
耐振動性	△	○	◎	◎

※SR=Switched Reluctance

堀 洋一・寺谷 達夫・正木 良三:「自動車用モータ技術」, p. 126, 日刊新聞工業社(2003)

リアアースレスモータの位置付け

最近の自動車駆動用モータとしての性能・特徴比較

項目		リアアースレスモータ		
		IPMSM	誘導電動機	SRモータ
最大効率[%]		95~97	94~95	~95
負荷時効率[%]		91~93	▼4※1	▼2
最大回転数[kr/min]		4~15	9~15	~20
モータコスト比		1.0	< 1.0	< 1.0
制御装置コスト比		1	1.3~1.5※2	1.5~2.0※3
体格・重量		1	1.0~1.2	1.2~1.4

※1：負荷に応じた最小磁束制御による高効率制御採用時

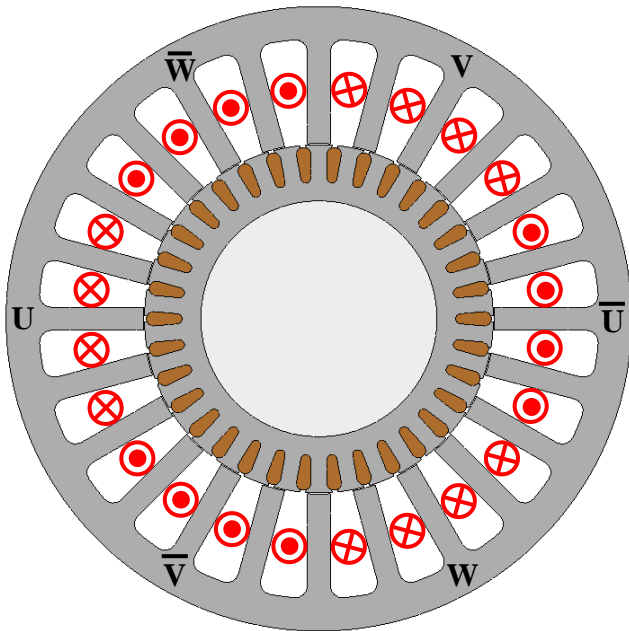
※2：同一トルクを得るためのインバータ電流容量増（インバータのKVA増）

※3：専用電力変換器使用（従来の三相モジュールままでは使えない）

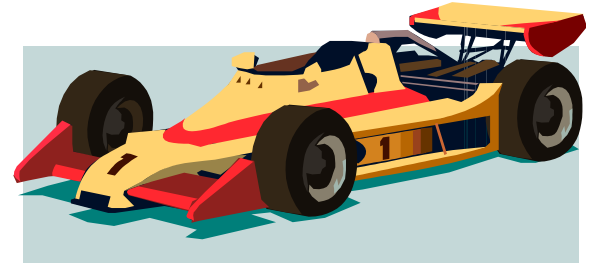
誘導電動機でええがな(米国)

織田信長「鳴かぬなら殺してしまえホトギス」

誘導電動機 (IM)



テスラ
「ロードスター」



GM
「ボルト」



- ・ 軽負荷側効率が低い
- ・ 誰でも作れる=差別化が困難
(モータ=エンジン?)

車両あるいは
システムとして差別化



わてらはこれでいきました！（欧州）

豊臣秀吉「鳴かぬなら鳴かせてみせようホトギス」

IEEE VPPC2010 (Vehicle Power and Propulsion Conference)

<http://vppc2010.univ-lille1.fr/index.php?page=keynotes>

- [K2.2](#): *Electric vehicle program of the RENAULT-NISSAN alliance*
Dr. Jérôme PERRIN, Renault (France).

To download the presentation of this Keynote, [click here](#)

わてらはこれでいきました！(欧州)

豊臣秀吉「鳴かぬなら鳴かせてみせようホトギス」

P.17

Electric Motors : Three Alliance Technologies

✓ Permanent Magnet Synchronous : NISSAN → 80kW

80kWクラス(大型車種)は、永久磁石同期形モータ

✓ Wound Rotor Synchronous : RENAULT → 63kWmax

63kWクラス(中型車種)は、巻線界磁同期形モータ

✓ Switched Reluctance : RENAULT(R&D) → 30kW

30kWクラス(小型車種)は、SRモータ？

レアアースレスモータ

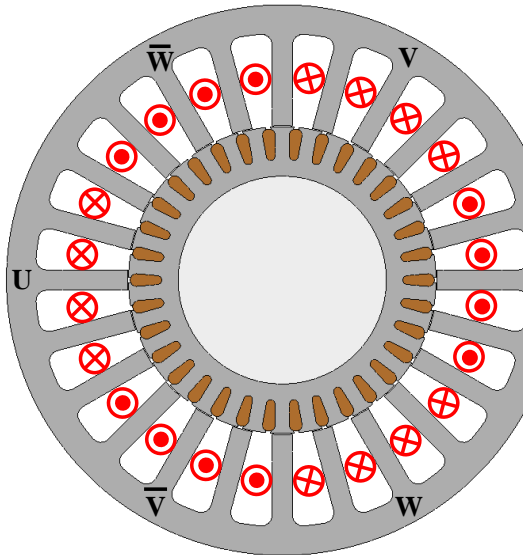
なんかええもんありまへんか？(日本)

徳川家康「鳴かぬなら鳴くまで待とうホトトギス」

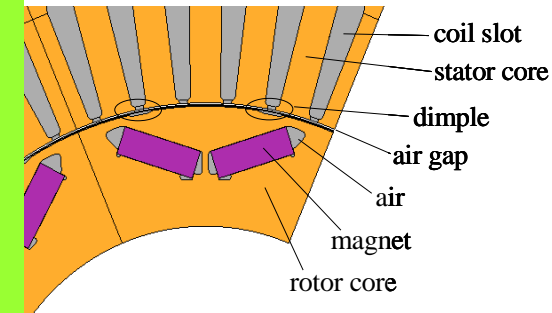
誘導電動機 (IM)

Looking for something better...

IPMSM



- ・ フェライト磁石同期モータ
- ・ SRモータ
- ・ SynRモータ
- ・ 巻線界磁形同期モータ
- ・ その他。。。



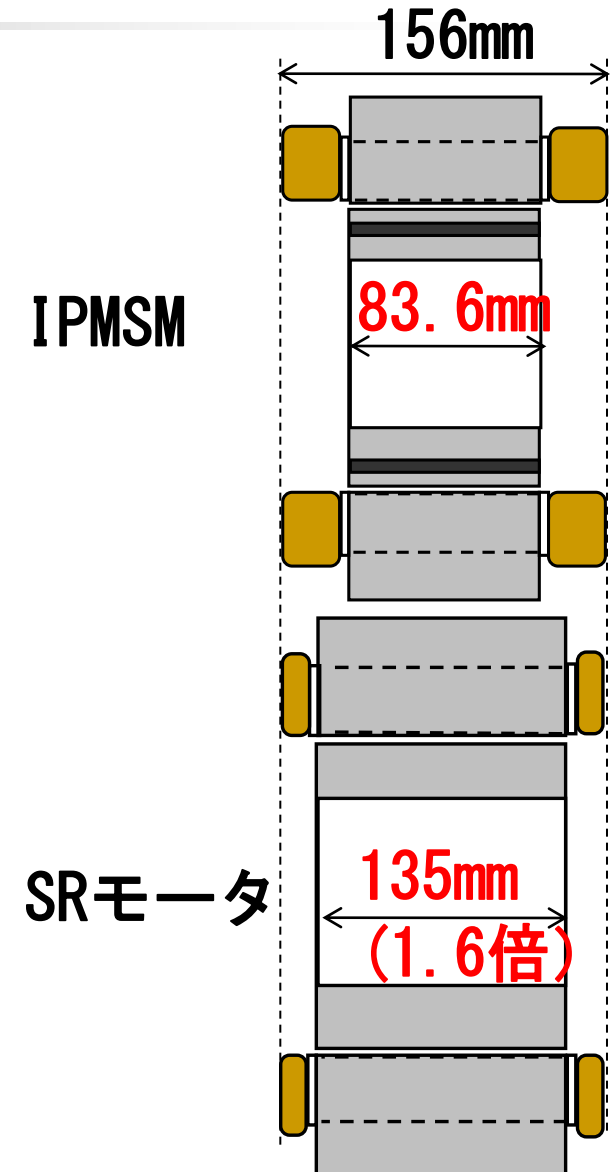
- ・ 軽負荷側効率がより高く,
- ・ 差別化可能
- ・ 小さく、軽く、静かで、安く。。。

さて、SRモータの現状実力は？

東工大 千葉他:「HEV用スイッチドリラクタンスモータの研究開発」, 2010モータ技術シンポジウム

項目	IPMSM (Prius '03)	SRモータ (設計値)
ステータ外径[mm]	269	
コイルエンド長含む総軸長[mm]	156	
鉄心積厚[mm]	83.6	135
エアギャップ長[mm]	0.5 (0.8?)	0.5
巻線方式	分布巻	集中巻
インバータ直流電圧[V]	500	500
最大出力[kW]@1200r/min	50	50
最大トルク[Nm]@1200r/min	400	403
最大出力時効率[%]	83	86*
最大トルク時電流[Arms]	180~200	209
電流密度[Arms/mm ²]	20~22	22
トルク密度[Nm/L]	45	45

※低鉄損電磁鋼板使用 (10JNEX900)



さて、SRモータの現状実力は？

下記参照文献内
図5 効率マップ

高効率型 (10JNEX900)

- ・ 軽負荷側効率 : 92%超
- ・ 最大効率 : 95.4%
- ・ 最大トルク 403Nm⇒340Nm

下記参照文献内
図6 効率マップ

高出力型 (35JN300)

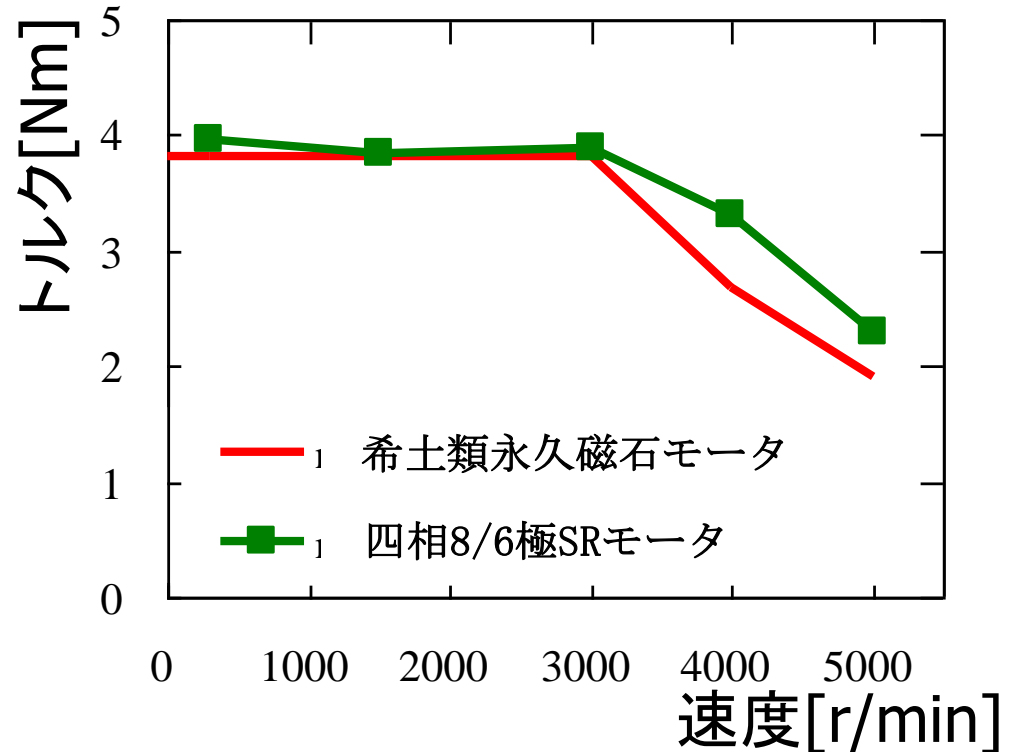
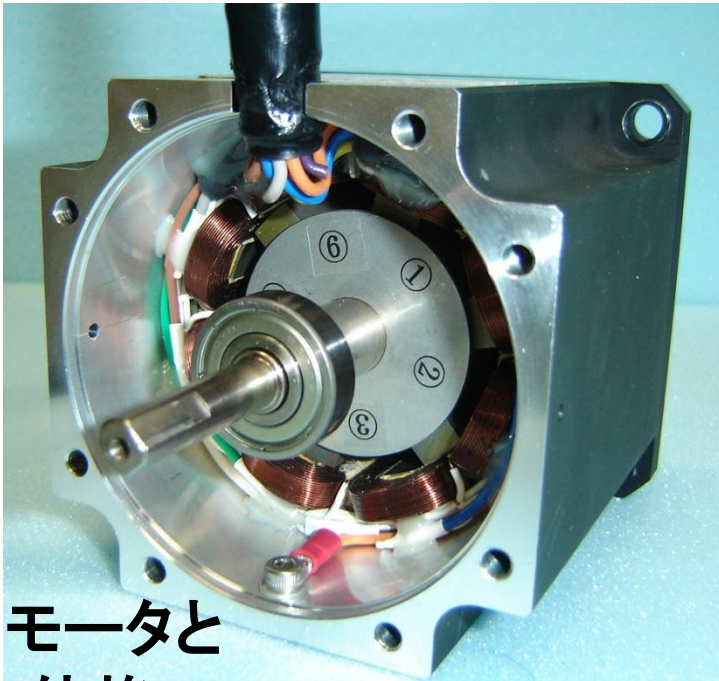
- ・ 軽負荷側効率 : 87~91%
- ・ 最大効率 : 92.2%
- ・ 最大トルク 403Nm⇒370Nm

(参 照)

東工大 千葉他:「HEV用50kWの高出力型と高効率型の実験的特性比較」,
H23電学産業応用部門大会, No.3-88, pp.Ⅲ-407-412

さて、SRモータの現状実力は？（名工大）

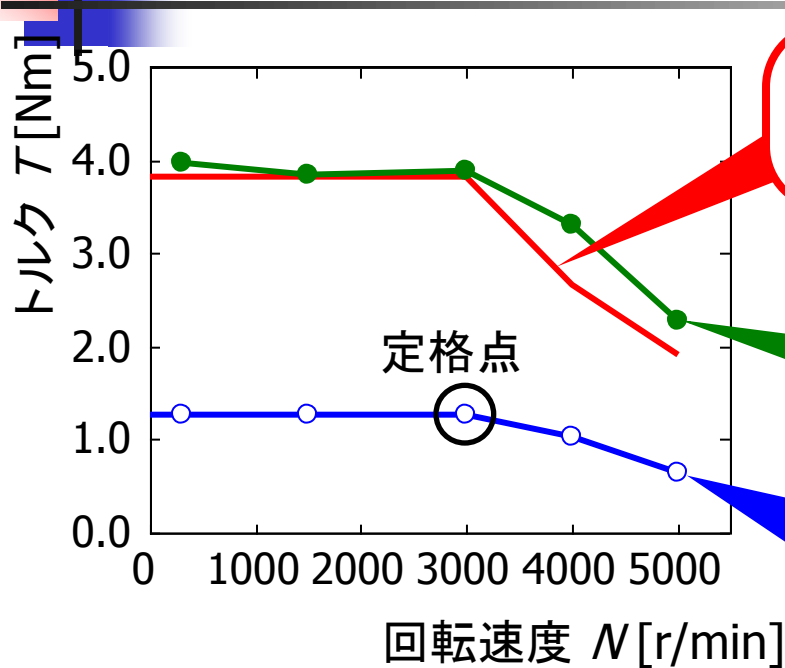
◎400W試作機(0.1mmギャップ) ◎最大速度トルク特性の実機評価結果



PMモータと
同一体格
同一電圧電流定格での実機比較

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)

さて、SRモータの現状実力は？（名工大）



400Wクラス永久磁石サーボモータと同等の最大N-T特性

設計試作四相8/6極SRモータ

代表動作点での効率最大化

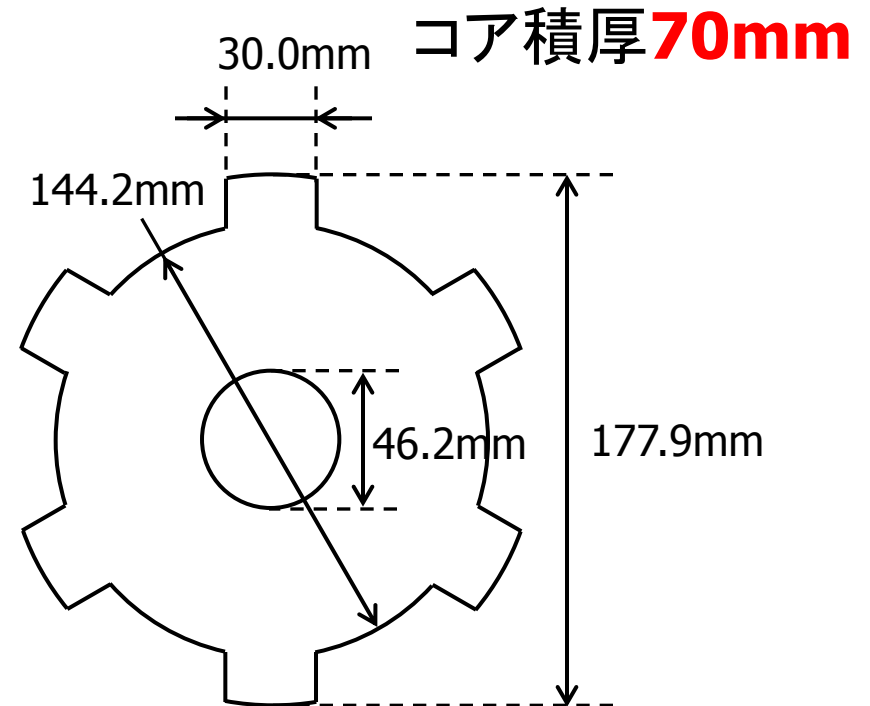
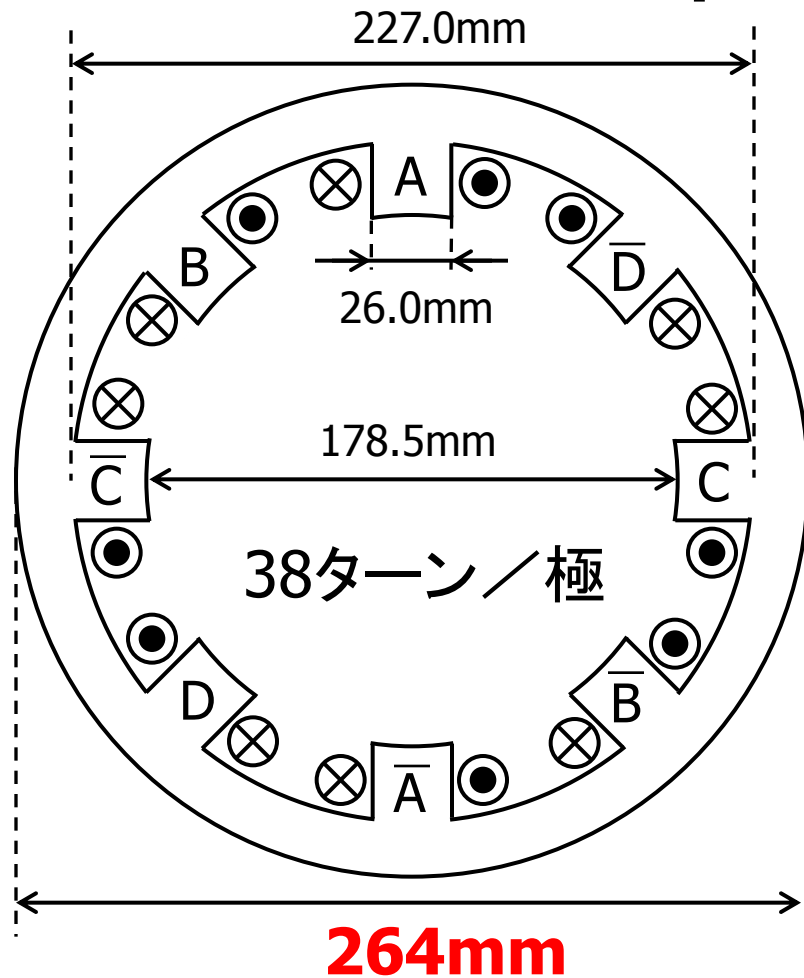
定格動作点で
効率85%以上の
高効率運転を実現

動作点	銅損 [W]	鉄損 [W]	効率 [%]
300rpm-1.27Nm	42.9	4.5	45.6
1500rpm-1.27Nm	39.5	12.2	78.6
3000rpm-1.27Nm	43.7	19.2	85.1
4000rpm-0.95Nm	31.6	16.6	87.1
5000rpm-0.76Nm	29.5	23.1	85.6

さて、SRモータの現状実力は？(名工大)

0.1mmギャップ 400W SRモータを相似形で大型化

相似比: 3.3 (ステータ外径φ80 ⇒ φ264, ハリアーHVと同一サイズ)



エアギャップ長: 0.33mm
ハリアーHV: 0.8mm

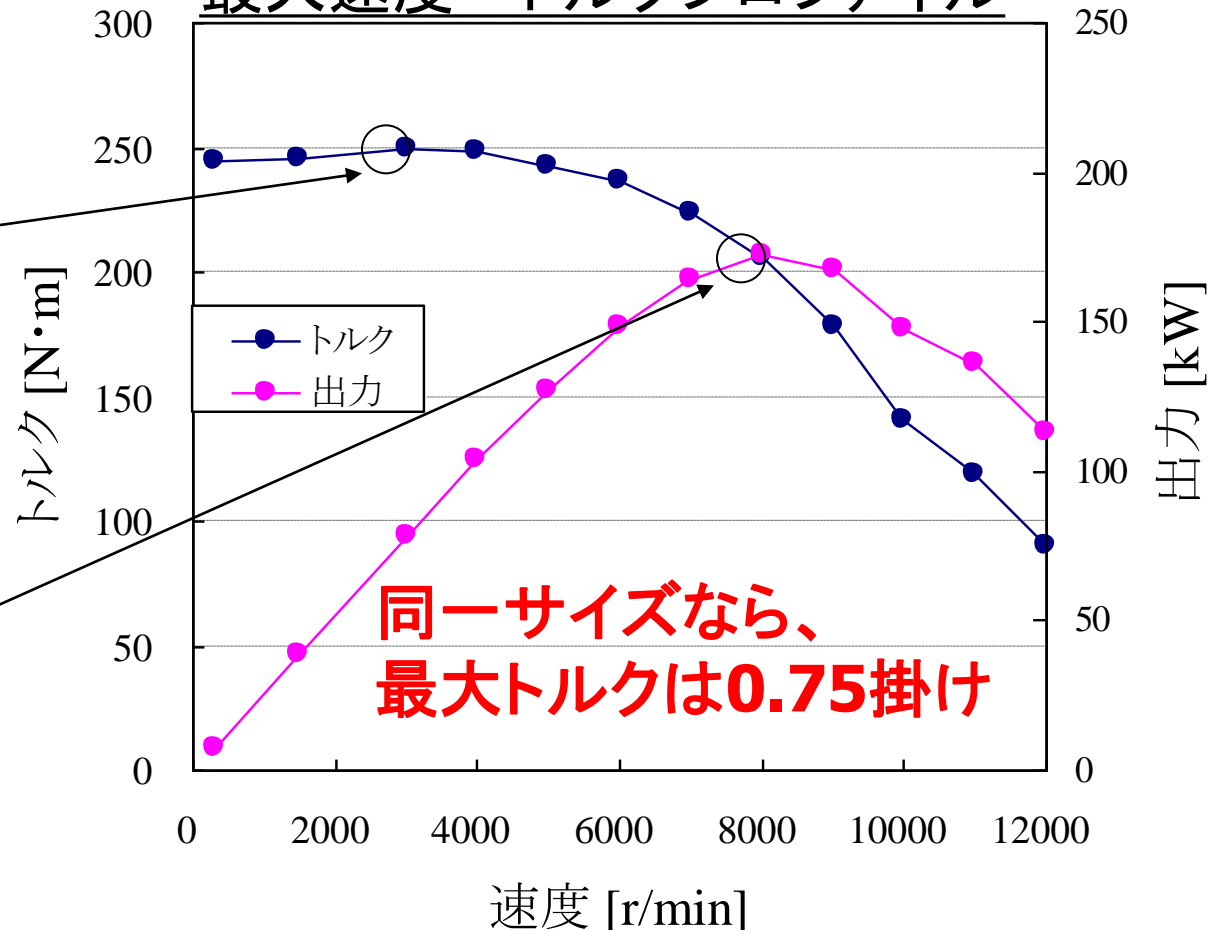
さて、SRモータの現状実力は？(名工大)

変換器直流電圧: DC650[V], 変換器瞬時最大電流: 500[A_{peak}]
 瞬時最大電流密度: 30[A_{peak}/mm²] (占積率0.6)

最大トルク 250N·m
 電流実効値 300 [Arms]
 電流密度 18 [Arms/mm²]

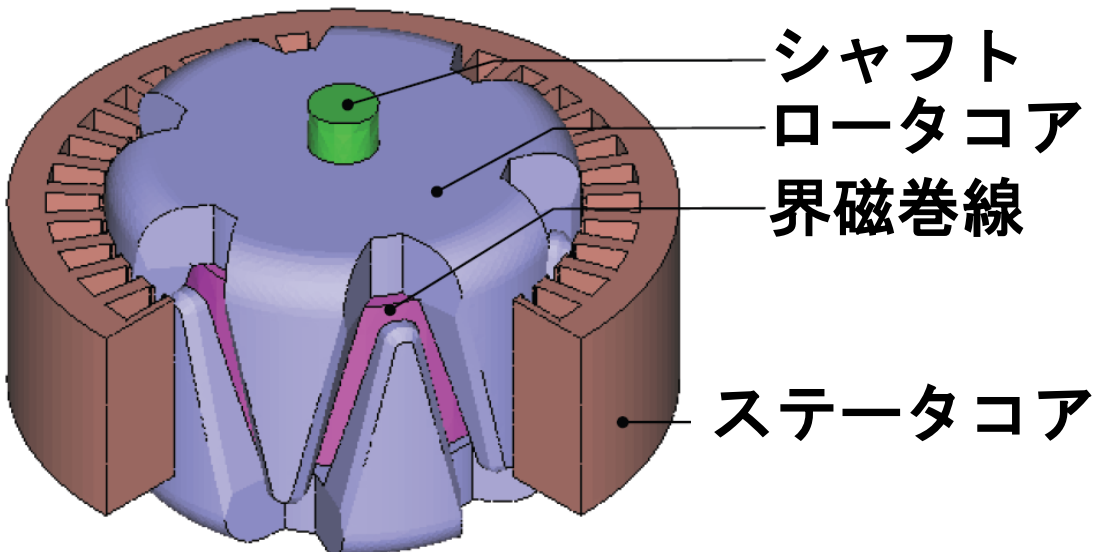
最大出力 170kW
 @8,000r/min
 シングルパルスモード

最大速度ートルクプロファイル



界磁巻線形同期モータの候補とその実力は？

Lundell Alternator
(自動車用発電機)



ロータコアが爪形状
クローポールモータ (CPM)
界磁巻線 : **ブラシ給電** ×
塊状鉄心ロータ : **損失大** ×

◎HEV駆動用扁平薄型CPM

仕様 : 10kW, 100Nmクラス
トルク密度 : 3Nm/kg
出力密度 : 0.6kW/kg

下記参照文献内
図8 試作機写真

(参 照)

井上 他 : 「脱レアアース②ーク
ローポールモータの可能性」, H22
電学産業応用部門大会,
No. 2-S8-3, pp. II-77~II-80

界磁巻線 : **ブラシレス給電**
積層鉄心ロータ : **損失小**

界磁巻線形同期モータの候補とその実力は？

◎実測効率

下記参照文献内

図10 実測速度ートルク， 効率特性

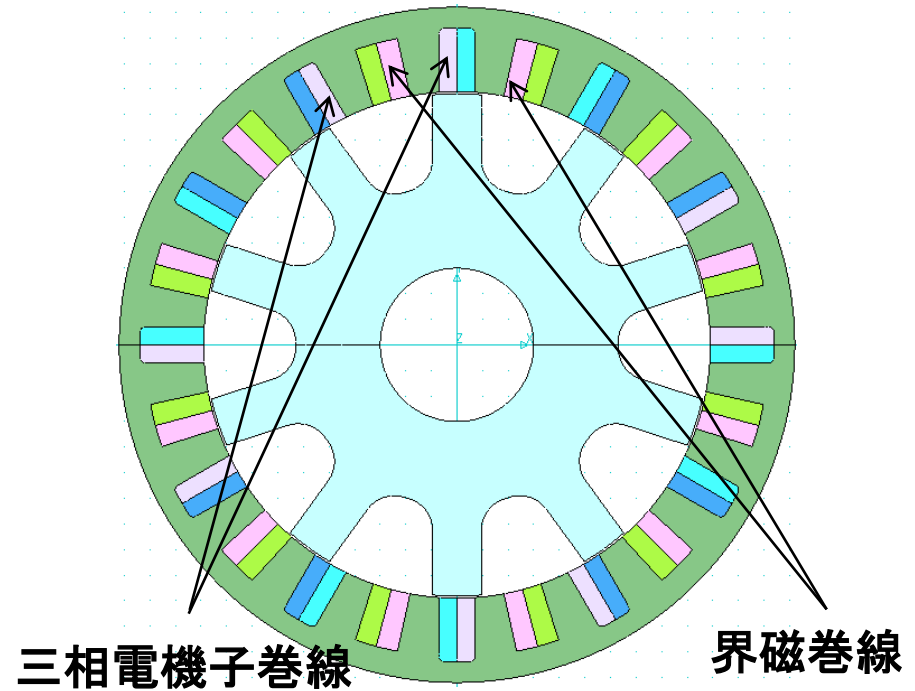
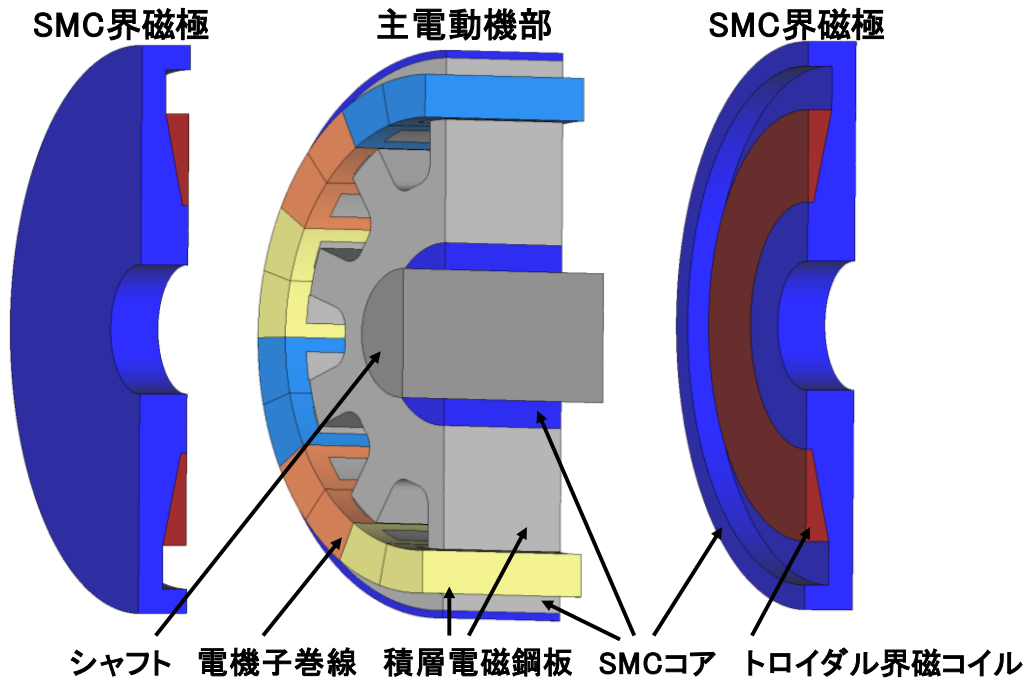
(参 照)

井上 他：「脱レアアース②ークロー
ポールモータの可能性」，
H22電学産業応用部門大会， No. 2-S8-
3, pp. II-77~II-80

部 位	項 目	値
ステータ	鉄心外径[mm]	260
	軸長[mm]	40
	スロット数	36(集中巻)
ロータ	極数	24
	外径[mm]	185
	軸長[mm]	70

発進時のエンジンアシスト：
65Nm@1,500r/min-効率83%
定常走行からの加減速アシスト：
25Nm@3,000r/min-効率89%

界磁巻線形同期モータの候補(名工大)



- ・ SMC界磁極ーステータへ連結 (静止)
- ・ 界磁コイルー界磁極へ配置 (ブラシレス給電)
- ・ ロータ外周部は積層電磁鋼板 (高回転向き)

- ・ ステータ側に電機子巻線, 界磁巻線配置
- ・ ロータは, 積層電磁鋼板 (高回転向き)
- ・ 特殊材は一切不要

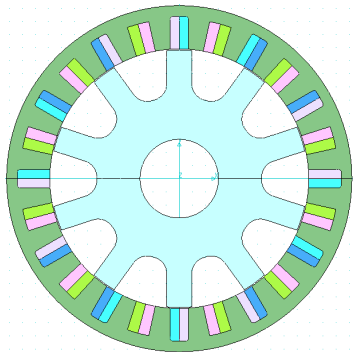
※SMC : 軟磁性粉成形体 (圧粉コア)

左図出典 : T. Kosaka, T. Hirose and N. Matsui, "Brushless Synchronous Machines with Wound-Field Excitation using SMC Core Designed for HEV Drives", Proc. of The 2010 International Power Electronics Conference, No.23G2-1, pp.1794-1800 (2010)

界磁巻線形同期モータの候補(名工大)

◎目標性能仕様・設計制約&拘束条件

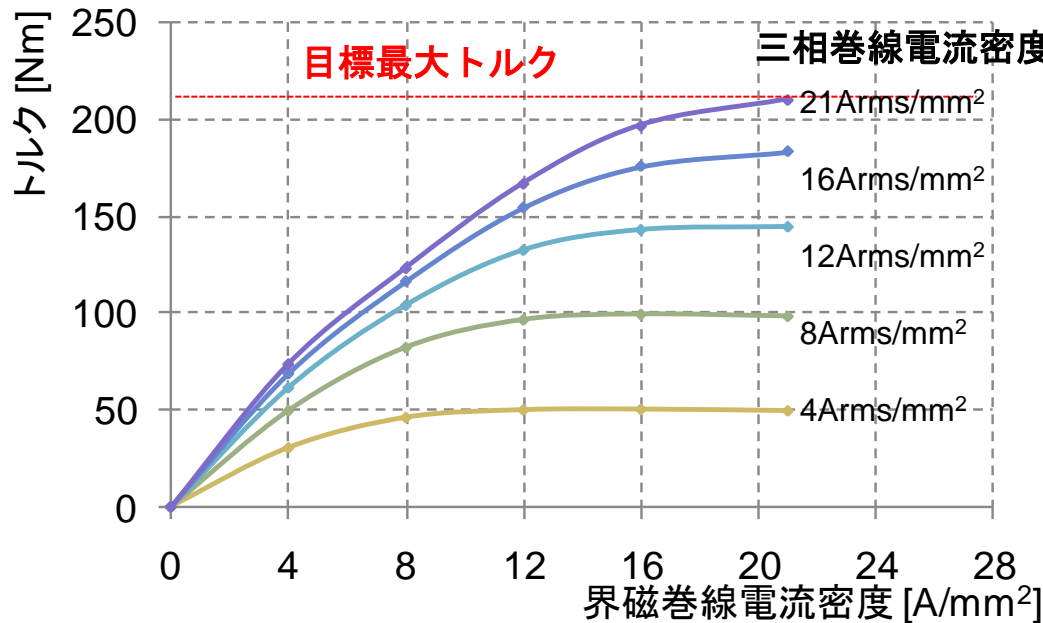
Items	IPMSM RX400h	FEFSSM
Max. DC-bus voltage inverter (V)	650	650
Max. inverter current (A_{rms})	Conf.	250
Max. current density in armature winding, J_a (A_{rms}/mm^2)	Conf.	21
Max. current density in excitation winding, J_e (A/mm^2)	NA	21
Stator outer diameter (mm)	264	264
Motor stack length (mm)	70	70
Shaft radius (mm)	30	30
Air gap length (mm)	0.8	0.8
Permanent magnet weight (kg)	1.1	0.0
Maximum speed (r/min)	12,400	20,000
Maximum torque (Nm)	333	> 210
Reduction gear ratio	2.478	4
Max. axle torque via reduction gear (Nm)	825	> 840
Max. power (kW)	123	> 123
Power density (kW/kg)	3.5	> 3.5



出典 : E. Sulaiman, T. Kosaka and N. Matsui, "A New Structure of 12Slot-10Pole Field Excitation Flux Switching Synchronous Machine for Hybrid Electric Vehicles", Proc. of 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2011), No.245, Sep. 2011 (CD-ROM:ISBN-9789075815153)

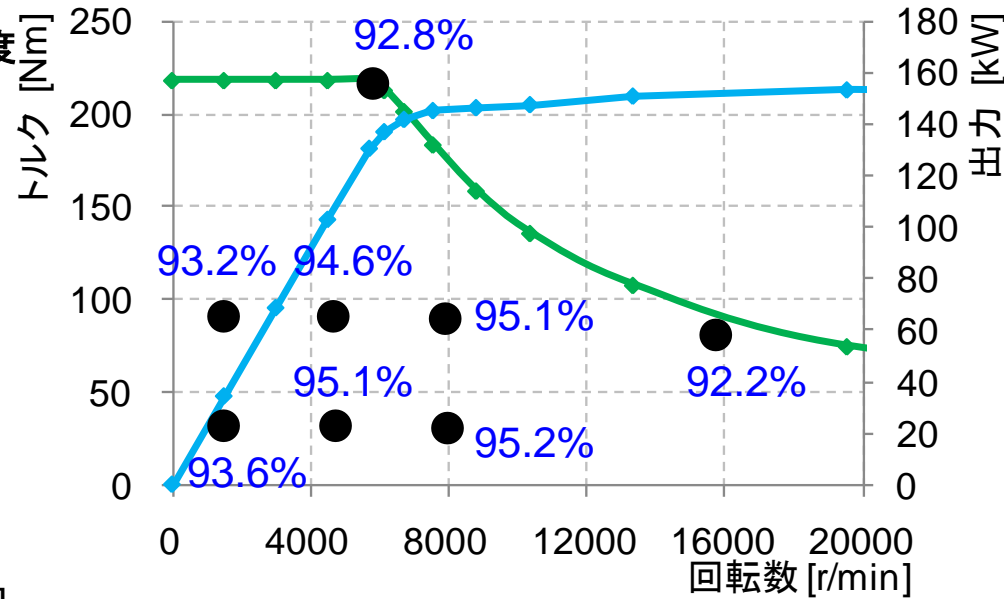
界磁巻線形同期モータの候補(名工大)

◎界磁巻線電流密度-トルク特性
(パラメータ: 三相巻線電流密度, 解析値)



最大トルク: 210Nm
トルク密度: 7.7Nm/kg

◎回転数vsトルク, 出力, 効率特性(解析値)



最大出力: 123kW@5,584r/min
出力密度: 4.8kW/kg

出典: E. Sulaiman, T. Kosaka and N. Matsui, "A New Structure of 12Slot-10Pole Field Excitation Flux Switching Synchronous Machine for Hybrid Electric Vehicles", Proc. of 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2011), No.245, Sep. 2011 (CD-ROM:ISBN-9789075815153)

個人的所感

— レアアースレスモータの可能性 —

- 誘導電動機
 - 軽負荷側効率にさえ目をつぶれば、最も現実解
 - 差別化が困難（誰でも使える）
 - 設計・制御による軽負荷側効率改善対策，変換器容量低減策で差別化？
有効手段が無い？（エアギャップ長短縮，アルミバー⇒銅バー化）
- SRモータ
 - 重量低減，軽負荷側の効率改善，運転音抑制，変換器コスト
⇒課題は満載。実用化へのハードルは高い。
- 巻線界磁形同期モータ
 - まだ検討初期だが、全ての点でポテンシャルが高いと推測。
- フェライト磁石同期モータ
 - 低温減磁，回転子の機械強度から逆に足を引っ張ると推測。
- SynRモータ
 - 分布巻く < SRモータ，低力率 < IM，どれを取っても2番手