

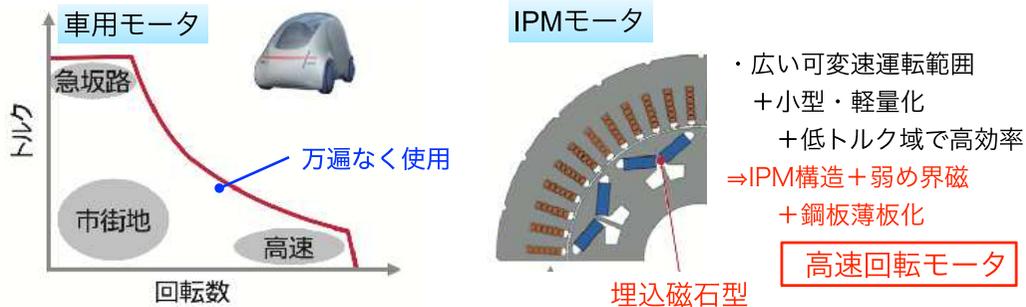
6章

自動車駆動用モータの 高効率化・省資源化に向けた最新動向

目次

0. 自動車駆動用モータの小型・軽量・高出力密度化
1. カーメーカーにおける取り組み
 - 1.1 トヨタ自動車
 - 1.2 本田技研工業
 - 1.3 日産自動車
 - 1.4 Tesla
2. 電機メーカーにおける取り組み
 - 2.1 三菱電機
 - 2.2 日立製作所
 - 2.3 明電舎
3. まとめ

0. 自動車駆動用モータの小型・軽量・高出力密度化

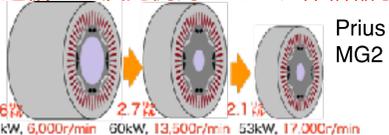


高出力密度化の方策 (体格小型化優先)

$$\text{出力} = \text{トルク} \times \text{回転数} \omega$$

(体格はトルクに比例)

高速機ほど反比例的にモータ体格縮小



技術課題

1. モータ設計・製造技術
 - モータトポロジー, 鉄損/銅渦電流損低減設計, 冷却技術 (直接/間接), 機械強度の確保, 低損失軸受技術, 角型銅線
2. 磁性材料
 - 飽和磁束密度の高い軟磁性材料, 低損失軟磁性材料, Dyフリー磁石, 高強度材etc.

目次

0. 自動車駆動用モータの小型・軽量・高出力密度化
1. カーメーカーにおける取り組み
 - 1.1 トヨタ自動車
 - 1.2 本田技研工業
 - 1.3 日産自動車
 - 1.4 Tesla
2. 電機メーカーにおける取り組み
 - 2.1 三菱電機
 - 2.2 日立製作所
 - 2.3 明電舎
3. まとめ

1.1 トヨタ自動車 高速化による小型・軽量化：プリウスを例に

モータトランスアクスルの各世代における主要織り込み技術

	1997	2000	2005	2010	2015
	1st HVの認知		2nd HVの拡販		3rd HVの本格普及
T/A	●チェーン付き構造		●リダクション機構		●複軸化
小型軽量化	●オイルポンプ小型化				
低損失化	●モータ室油室化		●モータ油冷採用		
	●キャッチタンク構造		●オイルレベル最適化		
モータ	●高電圧化 昇圧システム採用(288→500V)		●高回転化 5,600 rpm → 6,000 rpm		●高回転化 13,500 rpm → 17,000 rpm
小型軽量化	●高回転化 5,600 rpm		●高電圧化 昇圧システム採用(288→500V)		●高回転化 13,500 rpm → 17,000 rpm
低損失化	●電磁鋼板：t0.35 mm		●電磁鋼板：t0.3 mm		●電磁鋼板：t0.25 mm
低コスト化	●リラクタンストルク向上		●リラクタンストルク向上		●粒界拡散磁石採用

- ・ロータの高速回転化で出力確保⇒高出力密度化 (小型化=低トルク化)
- ・リダクションギヤ (1段or2段) で、必要車両駆動トルクを実現
- ・モータ供給電圧を高電圧化

出典：三浦徹也：「HEV用モータトランスアクスルの小型軽量化・低損失化・低騒音化技術」, 自動車技術, Vol.77, No.6, pp.40-47 (2023)

1.1 トヨタ自動車 高速化による小型・軽量化：プリウスを例に

	第1世代	第2世代	第3世代	第4世代
写真				
ギヤトランス	チェーン式 同軸配置		リダクション式 複軸配置	
構造				
モータ	最高出力 コア仕様 ステータ /ロータ コイル：丸線	30kW 5.1 5,600rpm	50kW 4.7 6,000rpm	60kW 2.7 13,500rpm
モータ			モーター減速機構によりモータを高回転化、小型化 減速比：2.636	53kW 2.2 17,000rpm
ロータ断面	磁石と鉄心の 磁極断面形状			

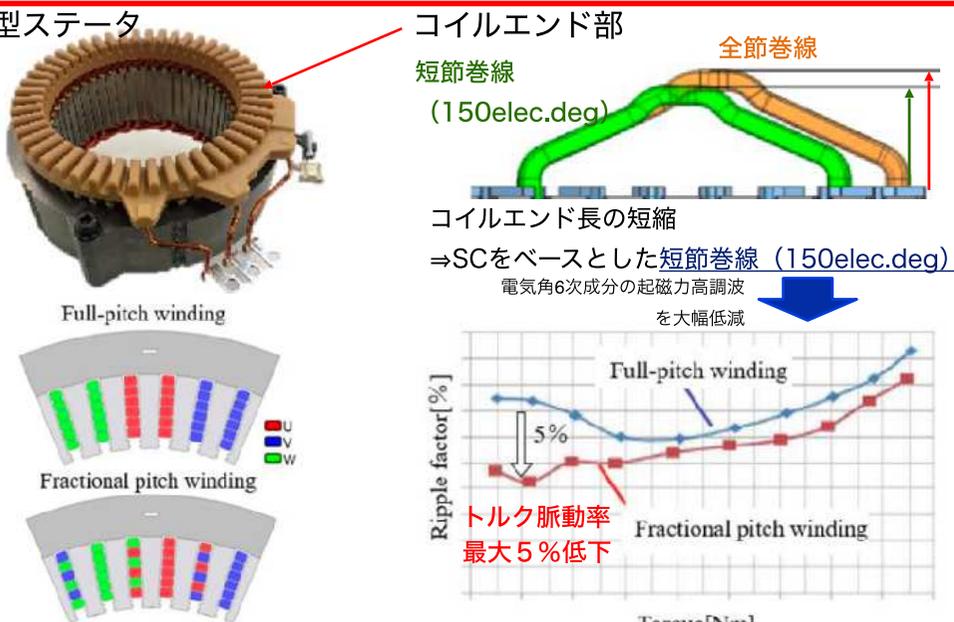
- ユニット全体の最適化で出力密度 ⇒約4.2倍
- モータ高回転化
- 電磁鋼板の薄板化
- コア焼鈍
- ギヤ潤滑油によるコイル直油冷
- ギヤ潤滑油によるロータ軸心油冷

- 磁石量低減
- リラクタンストルクの有効利用
- 平板1層⇒V字配置⇒V配置

出典：水谷：「ハイブリッド自動車用モータの技術変遷」, 電学誌, 138巻, 5号, pp.288-291, (2018)

1.1 トヨタ自動車 第5世代搭載技術

新型ステータ



出典：柴田僚介・土屋侑生・則本知哉・竹原明秀：「新型駆動用モータの開発」, 自動車技術学会学術講演会予稿集 (春), 20225049 (2022)

1.1 トヨタ自動車 第5世代搭載技術

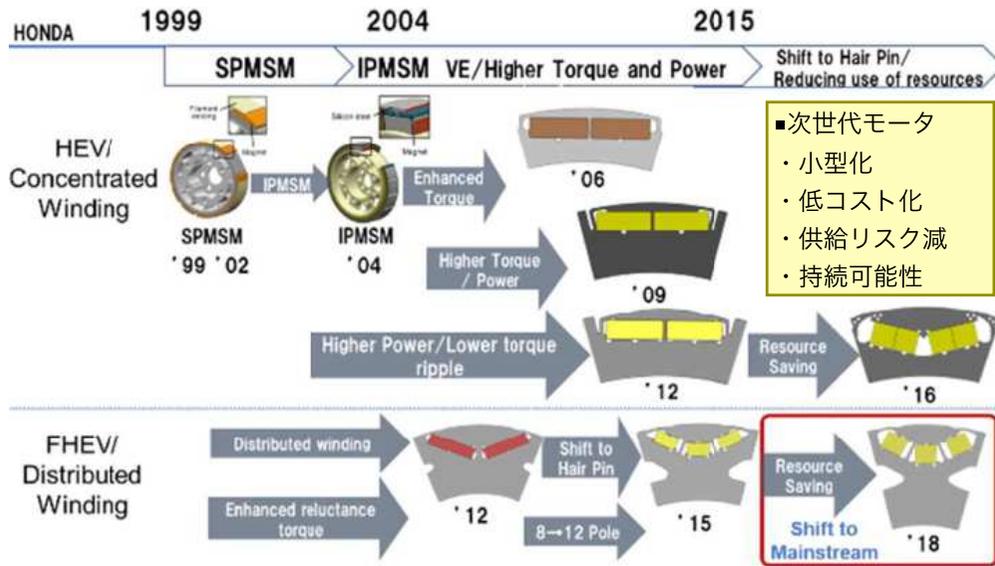


- コイルとコアの固定をワニスから発泡接着剤付絶縁紙へ変更 ⇒樹脂カフサの廃止。
- 新開発の樹脂材料でコイルエンド全体を覆うことで、コイル線溶接の際の剥離部の短縮、背反となる隣接コイルとの絶縁確保の実現

- 磁石配置
▽配置 ⇒ 2層多角配置
ロータコア内の磁気飽和の緩和、リラクタンストルクの向上
- 高強度電磁鋼板の採用
ブリッジ幅の狭小化 ⇒永久磁石磁束の漏れ磁束低減
- ロータの強度向上
電磁鋼板の微粒化
- 鉄損低減
ステータコアの焼鈍

出典：柴田僚介・土屋侑生・則本知哉・竹原明秀：「新型駆動用モータの開発」, 自動車技術学会学術講演会予稿集 (春), 20225049 (2022)

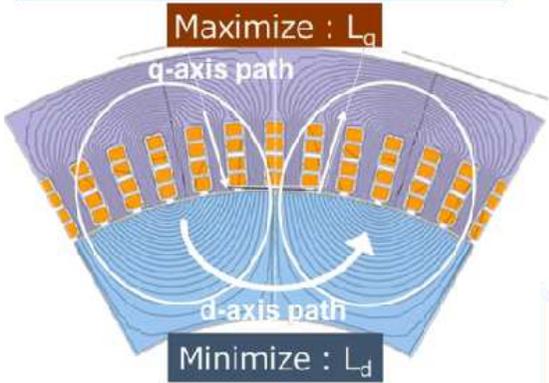
1.2 本田技研工業 Dyフリーモータの開発



出典：Shingo Soma, Yoshihisa Kubota, and Tatsuya Ohzu : "Magnetic Form applying a C-Shaped Magnet for Hybrid Electric Vehicles", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.11, No.3, pp.467-474 (2022)

1.2 本田技研工業 Dyフリーモータの開発

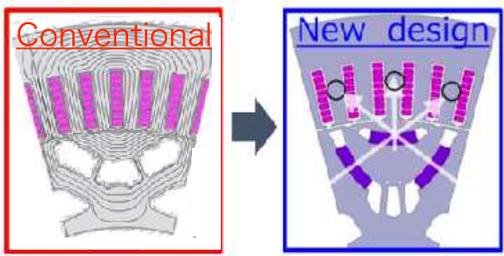
$L_q - L_d \propto \text{Maximize reluctance torque}$



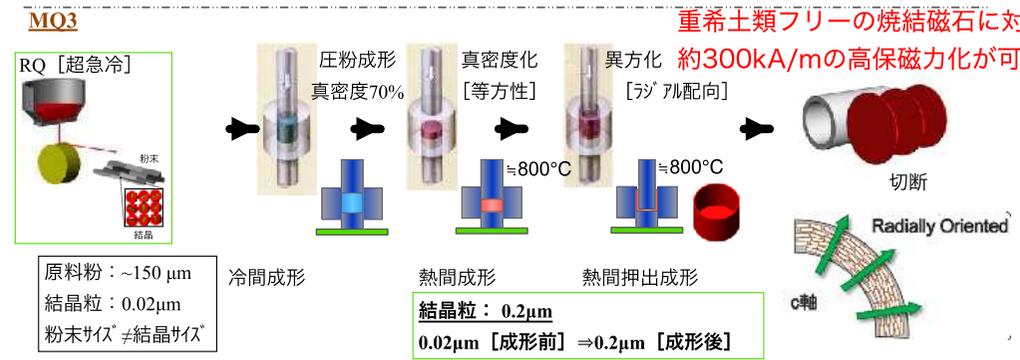
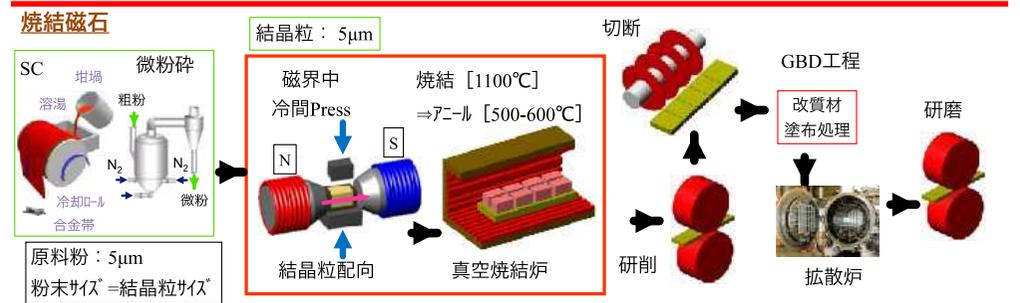
磁束の流れ
 [q軸電流のみ通電]

リラクタンストルクを最大化し、磁石量を低減する磁石配置

- ・ q 軸磁束の流れを妨げないフラックスバリアを配置
- ・ 同フラックスバリアに磁石を配置 (C型磁石が適している)



1.2 Dyフリー熱間加工磁石



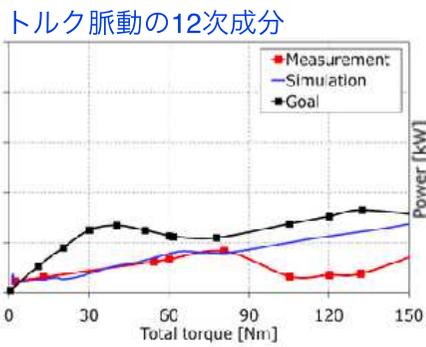
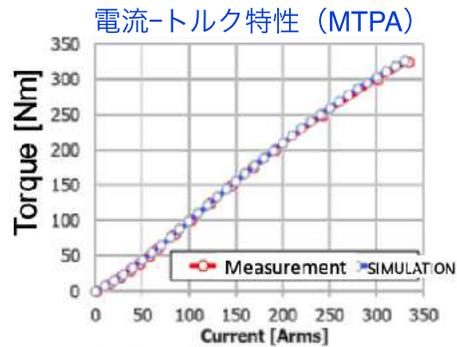
1.2 本田技研工業 Dyフリーモータの開発

Configuration	Developed	Conventional		
Torque	Max Torque [Nm]	343.5	333.5	✓ Increase the Torque 3% UP
	Magnet Torque [Nm]	147.3	153.0	
	Reluctance Torque [Nm]	196.2	180.5	
Motor Parameters	Φ_m [mWb]	63.1	67.3	✓ Reduce the Φ_m 6.3%
	L_q [mH]	0.167	0.164	
	L_d [mH]	0.354	0.341	✓ Increase the L_d 4% UP
	M-point	401	420.5	
Max Current [Arms]		335	335	
Magnet Volume [g]		1060	1205	✓ Reduce the magnet usage 14% down

リラクタンストルクの向上
 ⇒ q 軸磁束の流れを極力妨げないフラックスバリア形状
 少ない磁石量 (14%減) で目標トルク達成 (最大トルク3%向上)

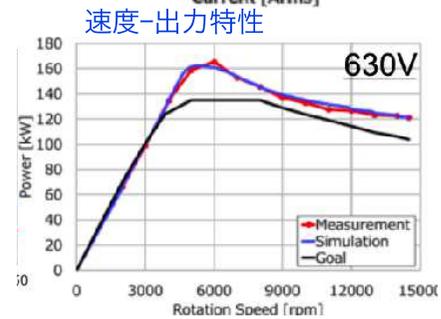
出典：Shingo Soma, Yoshihisa Kubota, and Tatsuya Ohzu : "Magnetic Form applying a C-Shaped Magnet for Hybrid Electric Vehicles", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.11, No.3, pp.467-474 (2022)

1.2 実測結果：Dyフリーモータ



- ・設計通り，最大トルク・出力特性を実測で確認
- ・トルク脈動の12次成分の大幅低減を確認（目標満足）

出典：Shingo Soma, Yoshihisa Kubota, and Tatsuya Ohzu: "Magnetic Form applying a C-Shaped Magnet for Hybrid Electric Vehicles", IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.11, No.3, pp.467-474 (2022)



1.3 日産自動車 駆動モータの省資源化

e-Power



IPMSM

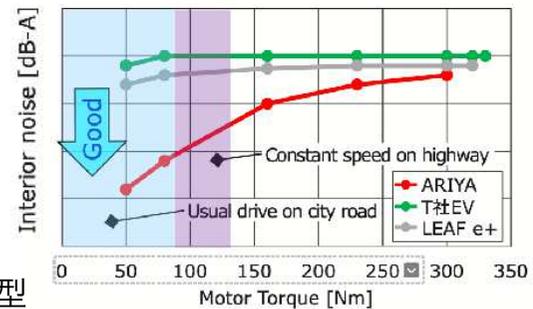
ARIYA



巻線界磁型同期モータ



室内音の比較

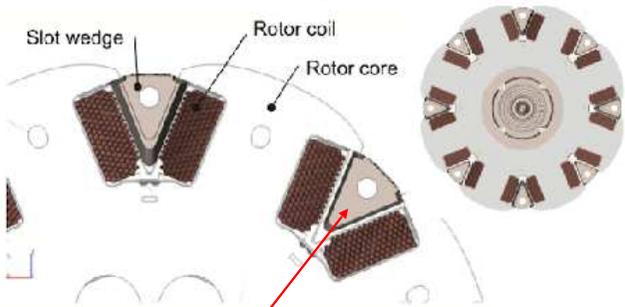


車体：ロードノイズ・風切り音を低減する工夫
 モータ：巻線界磁型とすることで，低トルク域の電磁加振力を低減し，静粛性を実現

出典：大久保孝仁・和田裕紀：「ARIYAの性能を実現する新開発モータ」，日産技報，No.88, pp.69-72 (2022)

1.3 日産自動車 駆動モータの省資源化

ARIYA搭載 8極界磁巻線型ロータ



ルノーZoe搭載 4極界磁巻線型ロータ



極間にくさび型のスロットウェッジを挿入
 ⇒遠心力による巻線の変形を抑える構造

Zoe ⇒ ARIYA 高出力化

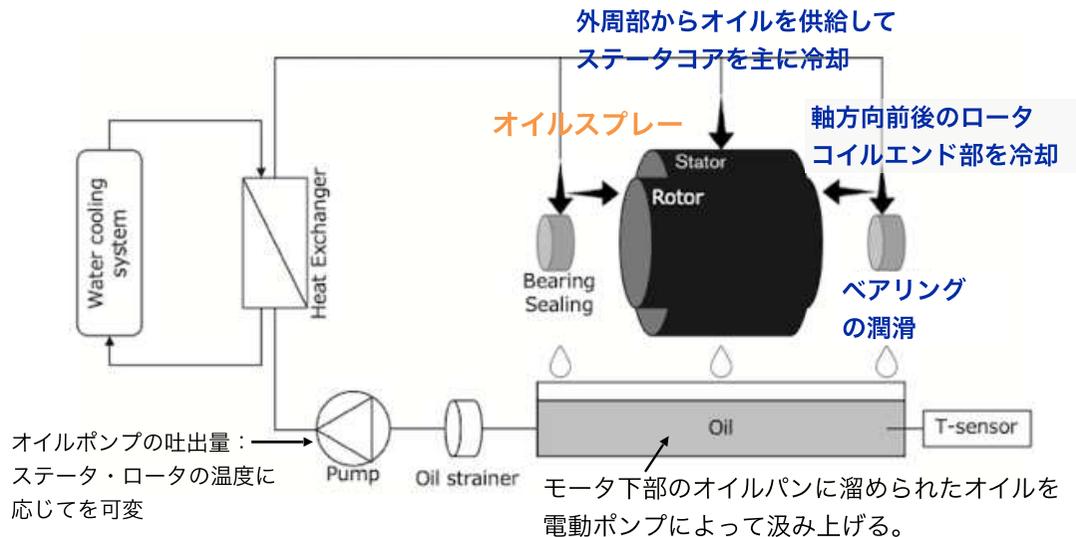
⇒ロータ体積の増大+8極化で必要トルク確保

⇒高回転化による高出力化を実現するため機械強度の確保

巻線の巻き上がり形状の安定性が重要：全自動巻き線機を導入し、一度に8本のロータを巻き上げられる生産能力を確保しながら、各ロータ間で巻き上がり形状の均一化、安定化を実現

出典：大久保孝仁・和田裕紀：「ARIYAの性能を実現する新開発モータ」，日産技報，No.88, pp.69-72 (2022)

1.3 日産自動車 駆動モータの省資源化



オイルポンプの吐出量：ステータ・ロータの温度に応じて可変

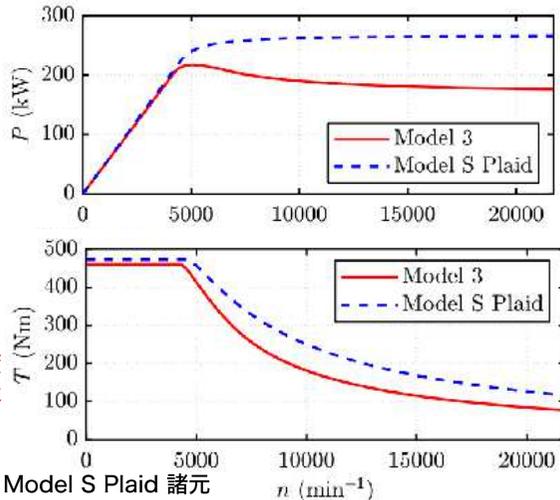
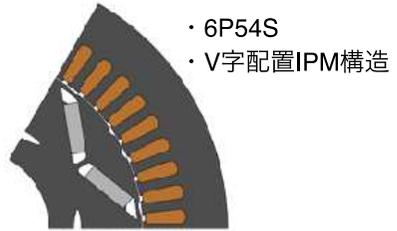
巻線界磁型同期モータ⇒ロータ発熱：大

⇒直接油冷方式の採用

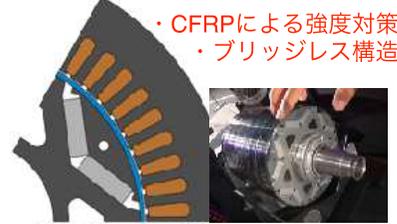
出典：大久保孝仁・和田裕紀：「ARIYAの性能を実現する新開発モータ」，日産技報，No.88, pp.69-72 (2022)

1.4 Tesla Model S Plaid搭載 CFRPによる強度対策

Model 3



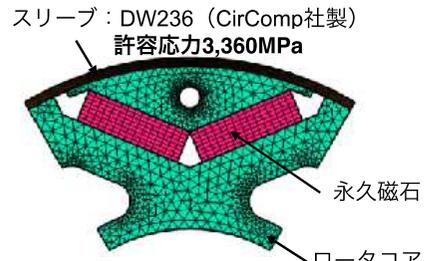
Model S Plaid Carbon-wrapped IPM (WIPM) motor



Model S Plaid 諸元 n (min⁻¹)
 最大電流: 1404A_{peak}, 最大電流密度: 36A_{pk}/mm², 直流電圧: V_{dc}=231V, モータ直径: 225mm, ロータ直径: 130mm, コア軸長: 134mm, 機械的ギャップ長0.7mm, スリーブ厚: 2mm

出典: <https://www.addcomposites.com/post/how-tesla-s-carbon-wrapped-motor-with-afp-could-revolutionize-electrification-in-automotive>
 出典: Binder Josef, Silvagni Mario, Ferrari Simone, Deusinger Björn, Tonoli Andrea, Pellegrino Gianmario, "High-speed IPM Motors with Rotor Sleeve: Structural Design and Performance Evaluation", 2023 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), pp. 1-6 (2023)

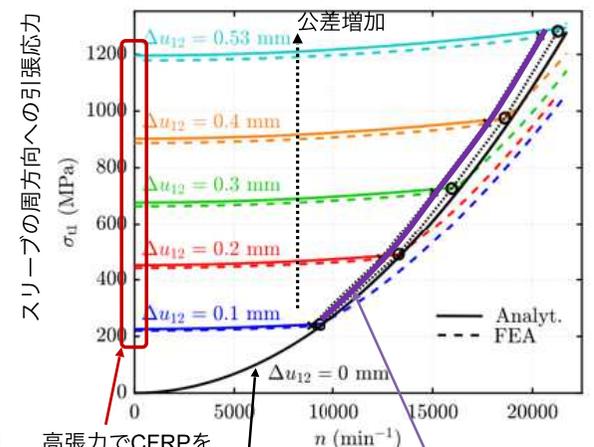
1.4 Tesla Model S Plaid搭載 CFRPによる強度対策



スリーブ: 自動積層技術AFP (Automated Fiber Placement)

スリーブが持つ能力を最大限に活用し、目標最高回転数に対して、最小厚さのスリーブを設計

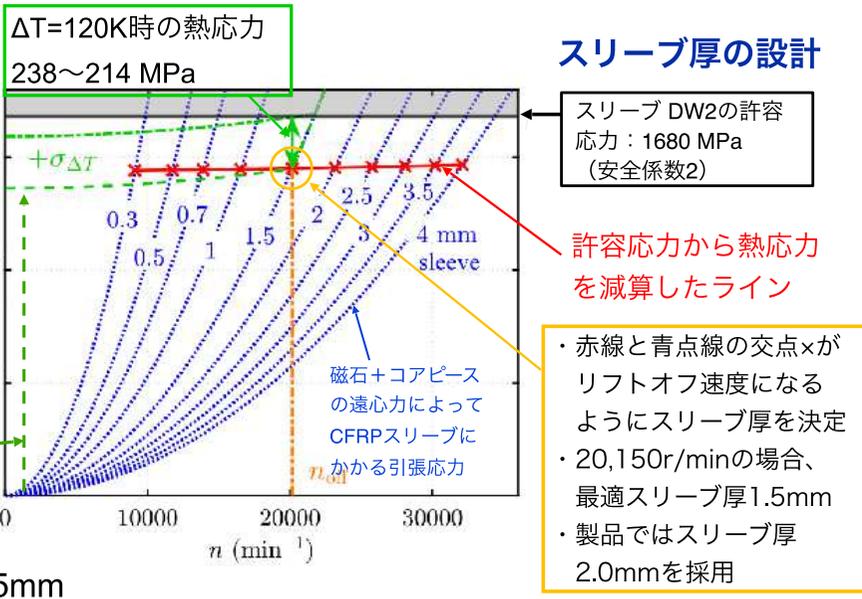
Sleeve DW236 (CirComp GmbH)	PMs BMN-32UH	Electric steel M270-354	2 nd layer ring segment
E 175 GPa	175 GPa	200 GPa	170.4 GPa
ν 0.28	0.24	0.3	0.261
ρ 1550 kg/m ³	7550 kg/m ³	7650 kg/m ³	7511 kg/m ³



高張力でCFRPを巻き付けた場合の組み立て公差 Δu に対する引張応力
 磁石がロータコアからリフトオフする速度

出典: Binder Josef, Silvagni Mario, Ferrari Simone, Deusinger Björn, Tonoli Andrea, Pellegrino Gianmario, "High-speed IPM Motors with Rotor Sleeve: Structural Design and Performance Evaluation", 2023 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), pp. 1-6 (2023)
 磁石+コアピースの遠心力によってCFRPスリーブかかる引張応力 (公差ゼロ⇒磁石がロータコアからリフト)

1.4 Tesla Model S Plaid搭載 CFRPによる強度対策



出典: Binder Josef, Silvagni Mario, Ferrari Simone, Deusinger Björn, Tonoli Andrea, Pellegrino Gianmario, "High-speed IPM Motors with Rotor Sleeve: Structural Design and Performance Evaluation", 2023 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), pp. 1-6 (2023)

目次

0. 自動車駆動用モータの小型・軽量・高出力密度化
1. カーメーカーにおける取り組み
 - 1.1 トヨタ自動車
 - 1.2 本田技研工業
 - 1.3 日産自動車
 - 1.4 Tesla
2. 電機メーカーにおける取り組み
 - 2.1 三菱電機
 - 2.2 日立製作所
 - 2.3 明電舎
3. まとめ

2.1 三菱電機 集中巻モータの高性能化技術

21

集中巻



分布巻



集中巻の利点	集中巻の弱点
<ul style="list-style-type: none"> ■ コイルエンドが小さい <ul style="list-style-type: none"> ・ コイルエンド高さが低い ・ コイルエンドでの銅損が小さい ■ 巻線を自動化しやすい <ul style="list-style-type: none"> ・ 巻線自動機がコンパクト ・ 多品種生産に対応しやすい 	<ul style="list-style-type: none"> ■ リラクタンストルクを得にくい <ul style="list-style-type: none"> ・ コア長が長くなりやすい ・ 磁石量が多くなりやすい ■ 高調波が多くなりやすい <ul style="list-style-type: none"> ・ 鉄損が大きくなりやすい ・ 磁石損が大きくなりやすい

集中巻・巻線が自動化しやすく、自動機や多品種対応がし易い

- ・ リラクタンストルクを得にくい
- ・ HEVモータではコア長が長くなることや磁石量が多くなるデメリットが

⇒集中巻の利点を維持しつつ、上記弱点を克服することで高性能化

2.1 三菱電機 集中巻モータの高性能化技術

22

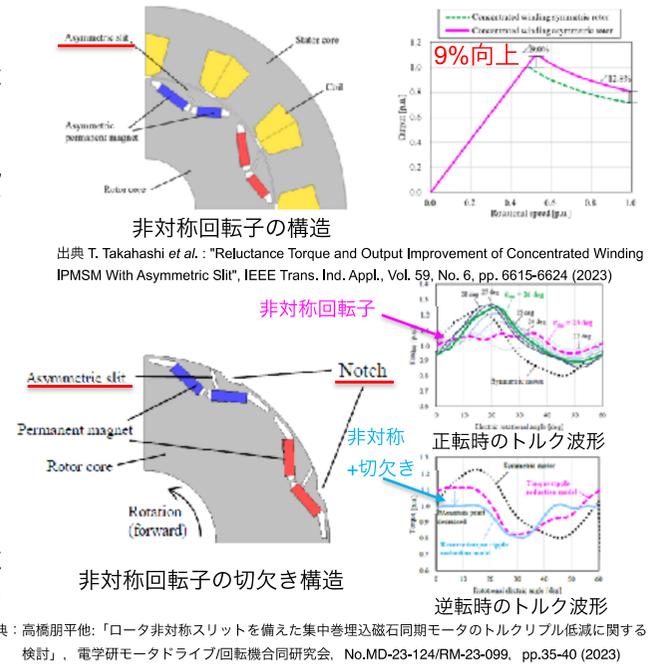
ロータコア内の磁石とギャップの間に、回転方向に傾斜した非対称形状の空隙スリットを配置

⇨ ローター・ステータ間の磁気吸引力の平衡状態を解消し、マグネットトルクを維持してリラクタンストルクの向上を実現

⇒出力9%向上。

⇨さらに、トルクリプルを低減するべく、非対称形状の空隙スリットの角度の最適化と、ロータコア表面の切欠きを配置

対称モータに比べて、正転時と逆転時のトルク脈動率をそれぞれ約1/3、1/2に抑制



2.1 三菱電機 集中巻モータの高性能化技術

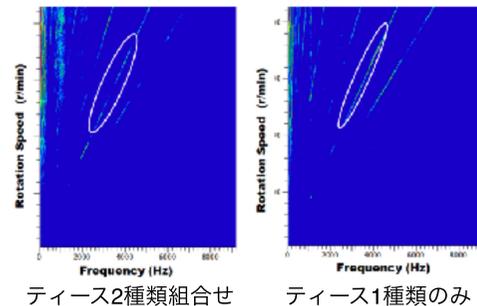
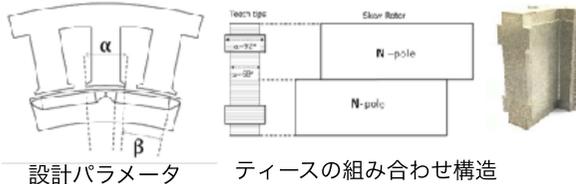
23

- ・ ISG (Integrated Starter Generator) エンジンと変速機の上に搭載
- ⇒薄型・扁平構造が必要で、コイルエンド長が短い集中巻モータが優位
- ・ 振動騒音低減と高出力化の両立が課題

⇨ ティース先端幅 α と磁石幅 β の組合せで電磁加振力の振幅と位相を設計可能

- ・ 加振力の位相が反転するティース先端幅2種類を組み合わせ、加振力の振幅に反比例して積厚を配分し加振力をキャンセル。

・ 1つのティース先端形状のみ用いる場合に比べて、出力を同等に保ったまま加振力が42%に低減



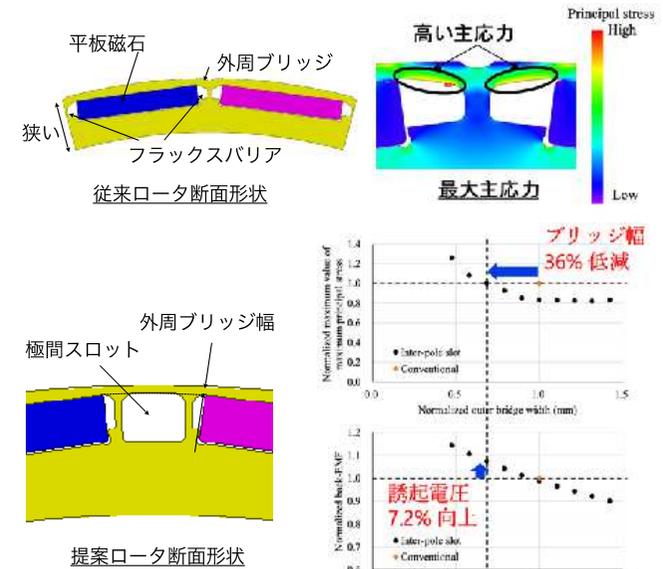
出典：M. Inoue et al. "Development of a 48V Integrated Starter Generator for Mild Hybrid Vehicles", IEEE Journal of Industry Applications, Vol. 11, No. 3, pp. 388-395 (2022)

2.1 三菱電機 集中巻モータの高性能化技術

24

ブリッジ厚を縮小したいが、フープカと曲げ応力が重畳し、外周ブリッジに高い応力が発生

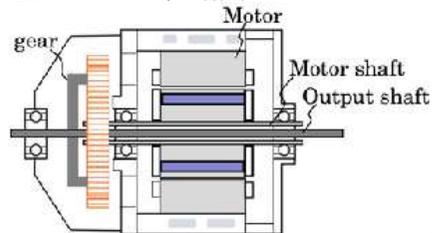
⇨ 極間スロットを設けることで、d軸とq軸の剛性の差を抑えてブリッジにかかる曲げ応力を低減、応力同等でブリッジ幅を36%低減し、誘起電圧を7.2%向上、同トルクで14.9%出力向上



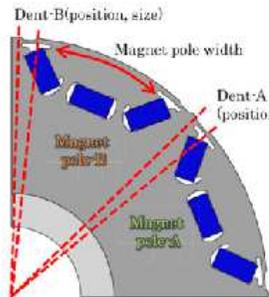
2.2 日立製作所 高回転モータの技術開発

25

電動システム概略図



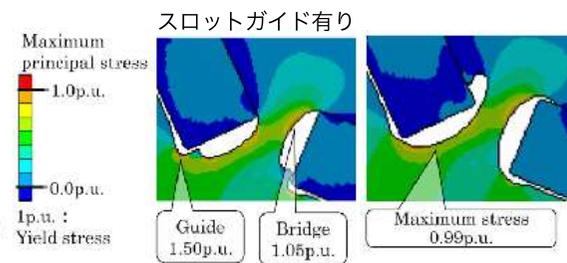
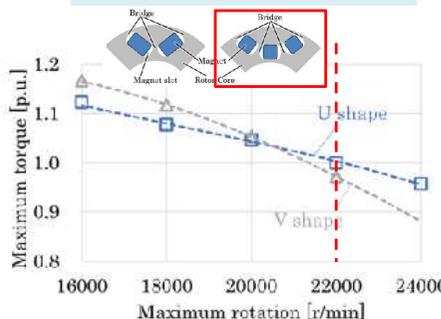
8 P 4 S, 最高回転数22000r/min
Br=1.41T, トルク脈動<5Nm



- 磁石の固定
 - ・接着剤や樹脂モールド

- 位置決め
 - ・スロットガイド
 - ⇒ブリッジの曲率半径を大きくできない
 - ⇒応力集中

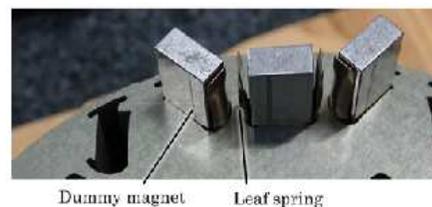
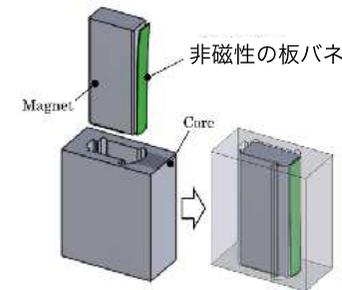
磁石保持機構の開発
(スロットガイドなし)
+ブリッジの詳細設計



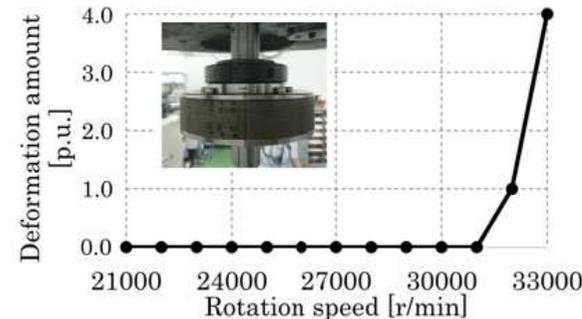
2.2 日立製作所 高回転モータの技術開発

26

■スロットガイドを用いない 磁石保持機構の開発



■スピンのテストの結果

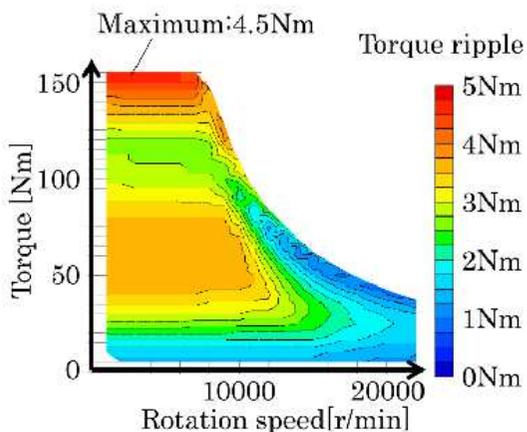


- ・所望の回転速度で所定の時間回転させ停止後にロータ直径を計測
- ・変形量が0mmより大きい場合 = ロータ破壊
- ・32000r/minでロータ破壊。
- ・強度性能成立

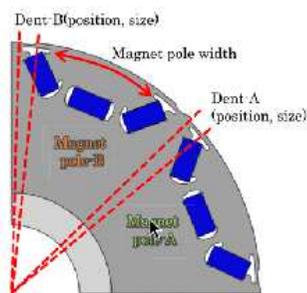
2.2 日立製作所 高回転モータの技術開発

27

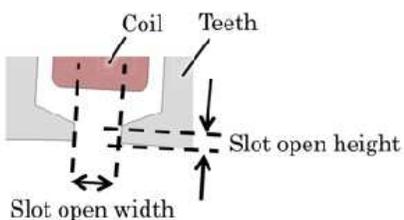
■トルク脈動マップ (解析)



■ロータ非対称ブリッジの採用



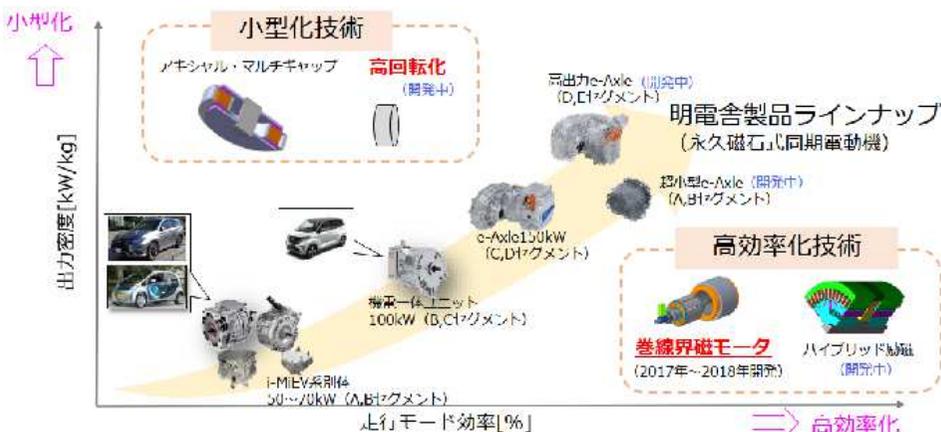
■ステータスロット開口部、高さの最適化



- ・振動エネルギーの大きくなる高速側でのトルク脈動2Nm以下
- ・トルク脈動の最大値4.5Nmで目標満足

2.3 明電舎 駆動モータの小型・高効率化

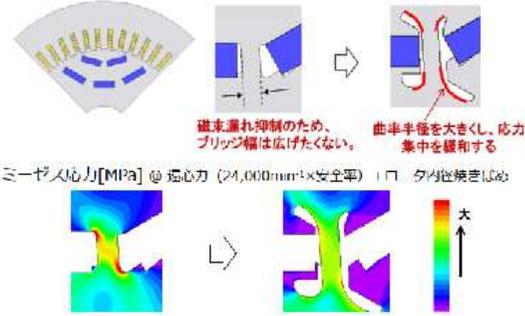
28



- ・1990年代より約30年にわたってEV, HEV駆動用のモータ・インバータを開発
- ・2009年より量産車両に搭載して以降、小型化・高効率化を目指した製品開発を実施

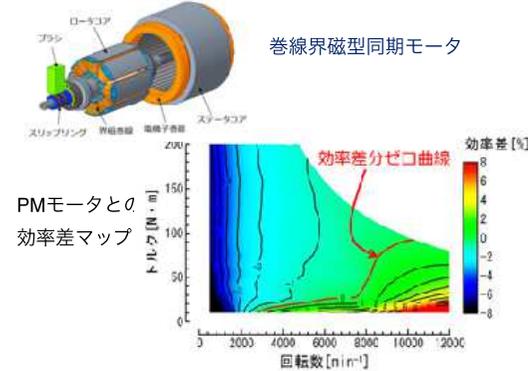
小型化技術

- ・モータの高回転化による小型化を促進
- ・高速回転応力への対策が必須技術となる
- ▶▶ 漏れ磁束の抑制と応力緩和を両立する
フラックスバリアの最適化を進めている



高効率化技術

- ・使用頻度が高い低トルク領域を高効率化
すべく、巻線界磁型同期モータを開発
- ▶▶ 最適な界磁磁束を供給することで、
特に中高速・低トルク領域の効率向上



出典： 桜井茂夫：「EV用モータの基礎と応用自動車駆動用モータの小型・高効率化技術」, 自動車技術会講習会, No.23-23 (2024)
出典： 桜井茂夫：「自動車駆動用途を想定した巻線界磁モータの特性計算」, JMAGユーザー会2022, No.2-05 (2022)

自動車主機用モータについて自動車メーカーおよび電機メーカーの視点から見た最近の技術動向を概観

- 車両搭載性を満足させるモータ小型化
 - ・セグメントコイル+短節巻+新しい樹脂材の開発
 - ・高速回転化, ロータ強度設計, CFRPの採用
- 燃費向上のためのモータ低損失化
 - ・ステータコアの焼鈍
 - ・巻線界磁ロータの採用
- 乗り心地を向上させるNV性能
 - ・ティース形状, ロータDimple,
 - ・巻線界磁型同期モータの採用
 - ・ロータ非対称構造 (集中巻)
- モータ冷却を成立させる効率的な冷却構造
 - ・直接油冷構造 (ステータコア, 巻線等)

