

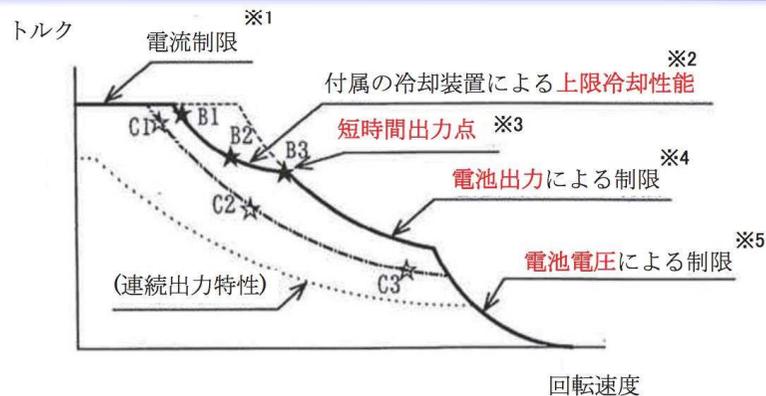
5章 自動車駆動用モータの開発動向

アウトライン

5章 自動車駆動用モータの開発動向 (プリウス駆動用モータを例に)

- 5.1 自動車主機用モータの要求特性
- 5.2 高速化による小型・軽量化
- 5.3 損失低減技術
- 5.4 冷却技術
- 5.5 巻線技術

5.1 自動車駆動用モータの要求特性



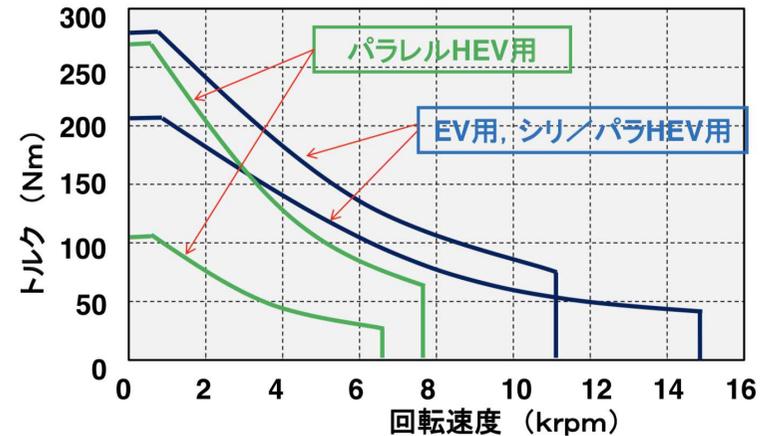
出展:「電気自動車用電動機・制御装置組合せ出力試験方法」JEVS,E701
 車載上でのモータ出力はいろいろな制約を受けている

➡ モータのパフォーマンスを高めるためには、
 モータの電磁気的な設計技術開発だけでなく、
 前提条件や制約等(※1~5)を革新する研究開発が必要

出典: 水谷良治・松本博幸・渋川祐一・山本恵一:「自動車用モータの要素技術」, 平成24年電気学会産業応用部門大会, Vol.4, pp.71-76 (2012)

5.1 自動車駆動用モータの要求特性

(公表された仕様から出力特性曲線を概算推定)



EV用やシリーズ/パラレルHEV用モータは高速小型化の傾向
 パラレルHEV用モータはエンジンの回転速度範囲内で出力

出典: 水谷良治・松本博幸・渋川祐一・山本恵一:「自動車用モータの要素技術」, 平成24年電気学会産業応用部門大会, Vol.4, pp.71-76 (2012)

5.1 自動車駆動用モータの要求特性

－性能の高さで商品力の優劣が決まる－

車両技術課題	自動車の駆動方式	
	EV(FCV・シリ/パラHEV)	パラレルHEV
車両搭載性	小型化(小径化)	扁平化
動力性能	高速・大トルク化	大トルク化
燃費(電費)	①低負荷域低損失 ②大トルク域高効率	①大トルク域で高効率 ②低負荷域低損失
騒音振動	低トルクリプル性能, コア振動低減, 輻射ノイズ	
信頼性	耐振動性, 絶縁性, 広い使用温度範囲で長寿命	
生産性	量産性の良い部品構成, 自動化し易い構造, 製品バラツキの少ない部品	
コスト	調達安定性, 低コスト	

出典：水谷良治・松本博幸・渋川祐一・山本恵一：「自動車用モータの要素技術」, 平成24年電気学会産業応用部門大会, Vol.4, pp.71-76 (2012)

5

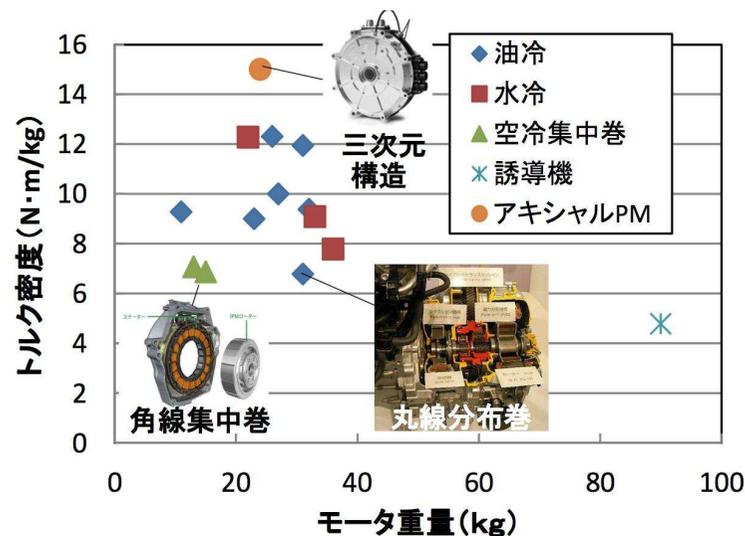
【各社のモータ比較】

車両	トヨタ プリウス	ホンダ インサイト	日産 フーガ	GM シボレーボルト	三菱 i-MiEV
HEVの方式	シリーズパラレル	パラレル	パラレル	シリーズ	EV
モータ					
モータ種類 (IPM)	駆動： 分布巻	駆動+発電： 集中巻	駆動+発電： 集中巻	駆動： 分布巻	駆動+発電： 分布巻
	発電： 集中巻	---	---	発電： 集中巻	---
定格電圧 (V)	650	100	240~408	300~400	330
最高出力 (kW)	60	10	50	111	47
最大トルク (Nm)	207	78	270	370	180

出典：松延ほか：「自動車用モータの現状分析」, 平成24年電気学会産業応用部門大会, 4-S8-3 (2012)

6

自動車駆動用モータのベンチマーク



出典：松延ほか：「自動車用モータの現状分析」, 平成24年電気学会産業応用部門大会, 4-S8-3 (2012)

7

アウトライン

5章 自動車駆動用モータの開発動向 (プリウス駆動用モータを例に)

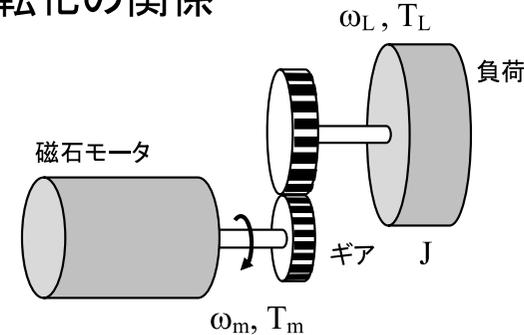
- 5.1 自動車主機用モータの要求特性
- 5.2 高速化による小型・軽量化
- 5.3 損失低減技術
- 5.4 冷却技術
- 5.5 巻線技術

8

	1st. 1997	2nd. 2003	3rd. 2009	4th. 2015
0-タ構造				
最高回転数	6,000rpm 1	6,700rpm 1.1	13,500rpm 2.3	17,000rpm 2.8
電圧	280V 1	500V [昇圧] 1.8	650V [昇圧] 2.3	600V [昇圧] 2.1
Coil占積率	1	1	1	1.3
出力重量密度	30 / 37.9 = 0.9kW/kg 1	50 / 35.9 = 1.39kW/kg 1.5	60 / 22.7 = 2.64kW/kg 2.9	?
出力体積密度 [体積=Core]	30 / 5.0 = 6.0kW/L 1	50 / 4.6 = 11.0kW/L 1.8	60 / 2.7 = 22.2kW/L 3.7	53 / 2.1 = 25.2kW/L 4.2
電磁鋼板厚	0.35	0.33	0.305	0.27
最大トルク	305Nm	400Nm	207Nm	163Nm
最大出力	30kW	50kW	60kW	53kW
磁石	初代 Δ磁石 88.3×33.0×6.5	初代 Δ磁石 83.1×18.9×6.5	初代 Δ磁石 [50.0/B _r =1.3T] 49.3×17.88×7.16	初代 Δ磁石 [60.0/B _r =1.35T] 59.2×14.3×3.5
磁石量	1,140g 1	1,232g 1.1	768g 0.7	535g 0.47

2 高速化による小型・軽量化

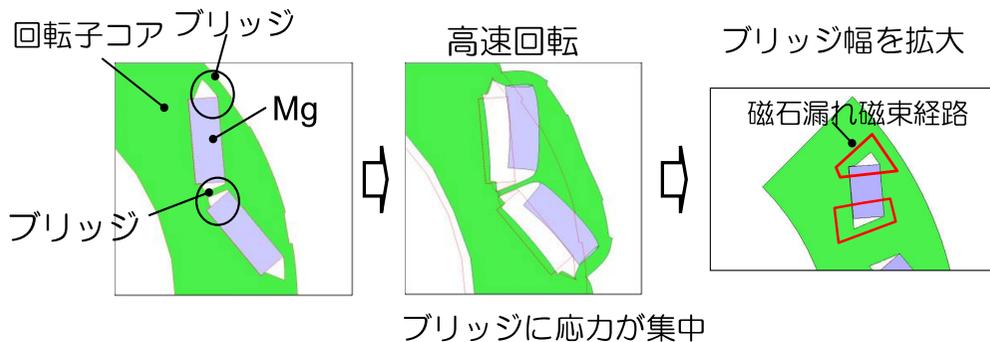
小型化と高回転化の関係



モータ出力 $P = \omega T$

ギア比 : 2 倍、回転速度 : 2 倍
 ⇒ トルク : 1 / 2 倍 & 回転子径 1 / √2 倍

しかし... **高速化は**

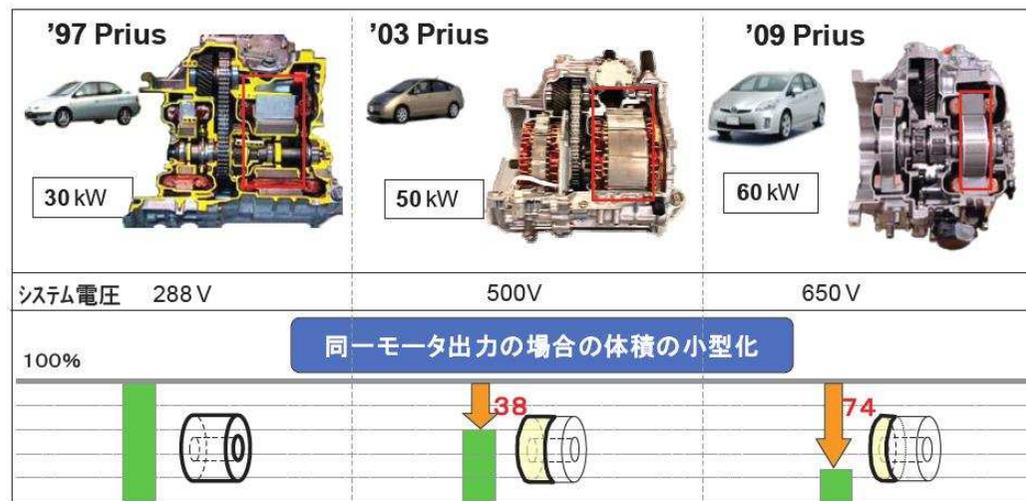


[問題点]

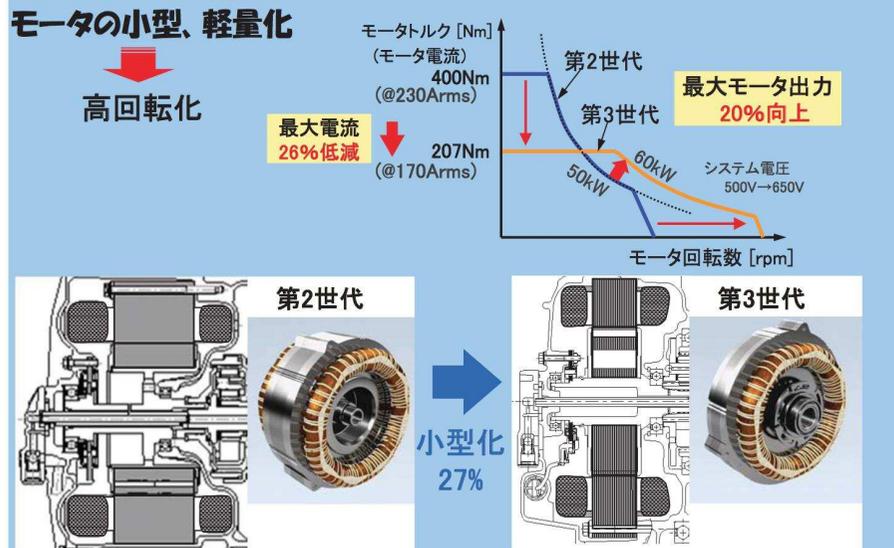
- ◇ 高速化 ⇒ 遠心力増加
- ◇ ブリッジ厚増加 ⇒ 磁石磁束漏れ増加 ⇒ 磁石トルク低減
- ◇ 磁石トルクの補完 ⇒ **磁石量増加**

電磁構造 (IPMモータ) の変遷 - トヨタプリウスを例に -

1/4化 達成!!

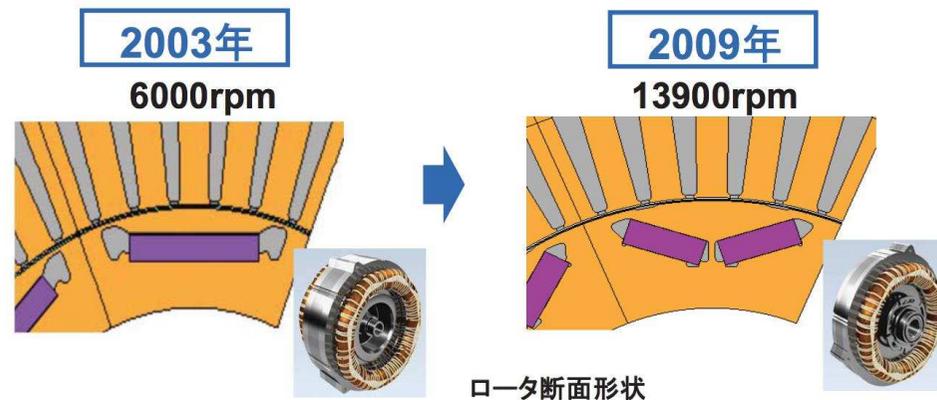


出典：水谷良治：「プリウスに見る駆動モータの小型・高効率化の変遷」，平成26年電気学会産業応用部門大会，Vol.4，pp. 33-36 (2014)

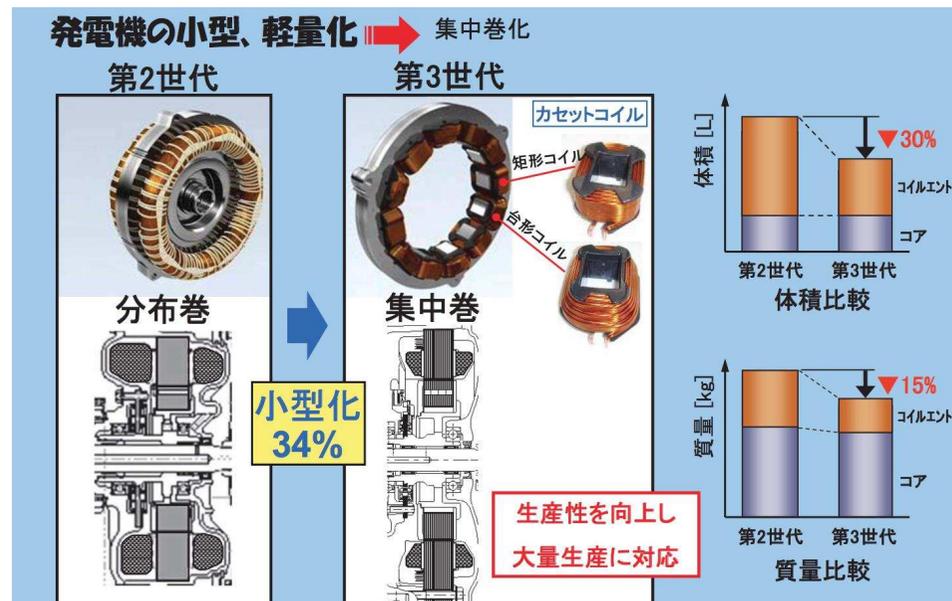
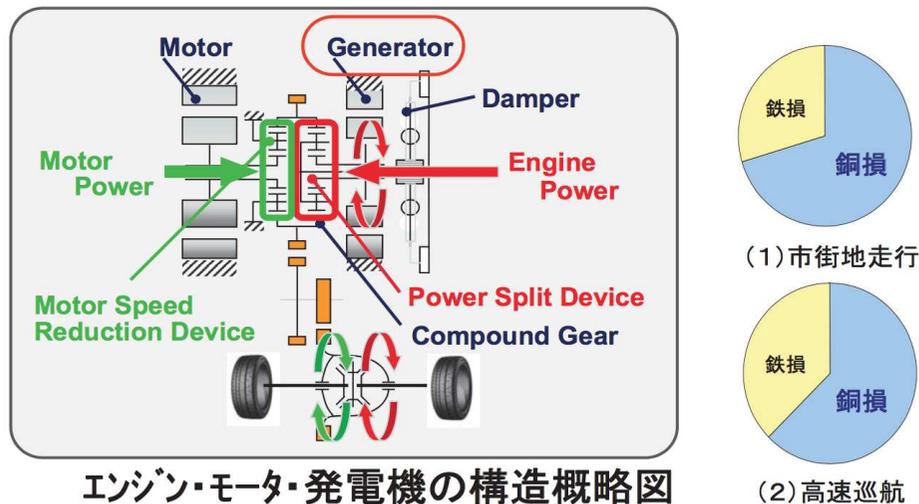


出典：水谷良治・松本博幸・渋川祐一・山本恵一：「自動車用モータの要素技術」, 平成24年電気学会産業応用部門大会, Vol.4, pp.71-76 (2012)

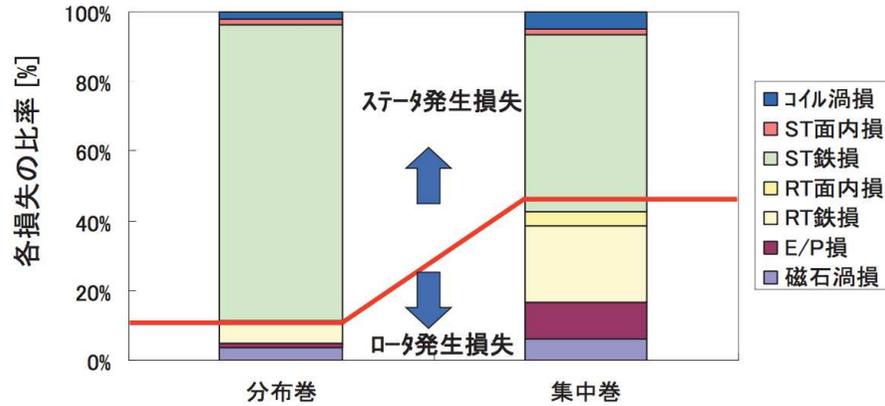
■高速時の鉄損と低速時のトルク性能のバランスを確保



■銅損低減が重要な発電機



■集中巻モータではロータ発生損失の低減が必要



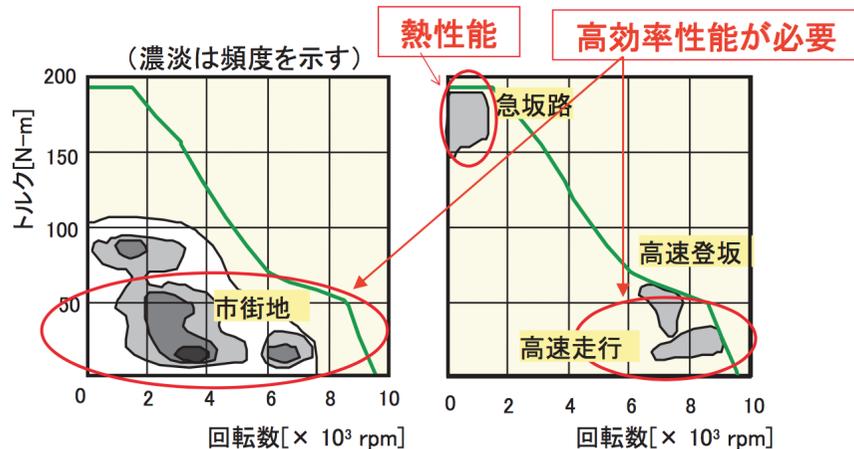
アウトライン

5章 自動車主機用モータの開発動向 (プリウス駆動用モータを例に)

- 5.1 自動車主機用モータの要求特性
- 5.2 高速化による小型・軽量化
- 5.3 損失低減技術
- 5.4 冷却技術
- 5.5 巻線技術

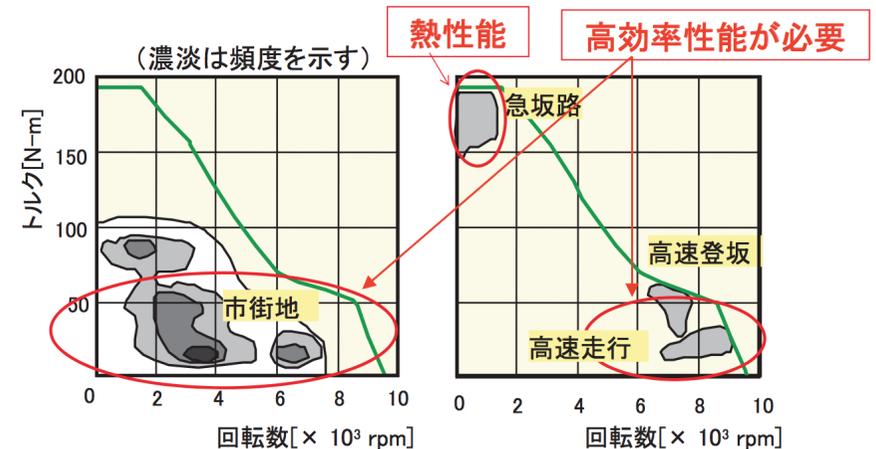
5.3 損失低減技術 損失低減の狙い

- 乗用車用途では軽負荷域の使用頻度大(燃費性能)
- 大トルク負荷域の使用頻度少でも登坂必要(熱成立性確保)

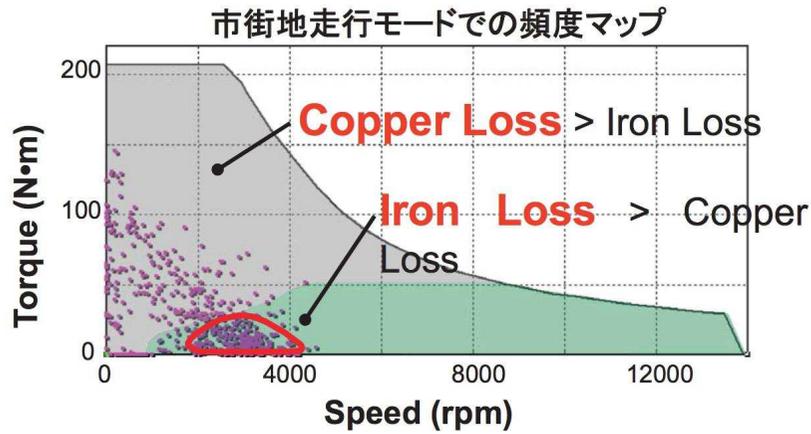


5.3 損失低減技術 損失低減の狙い

- 乗用車用途では軽負荷域の使用頻度大(燃費性能)
- 大トルク負荷域の使用頻度少でも登坂必要(熱成立性確保)

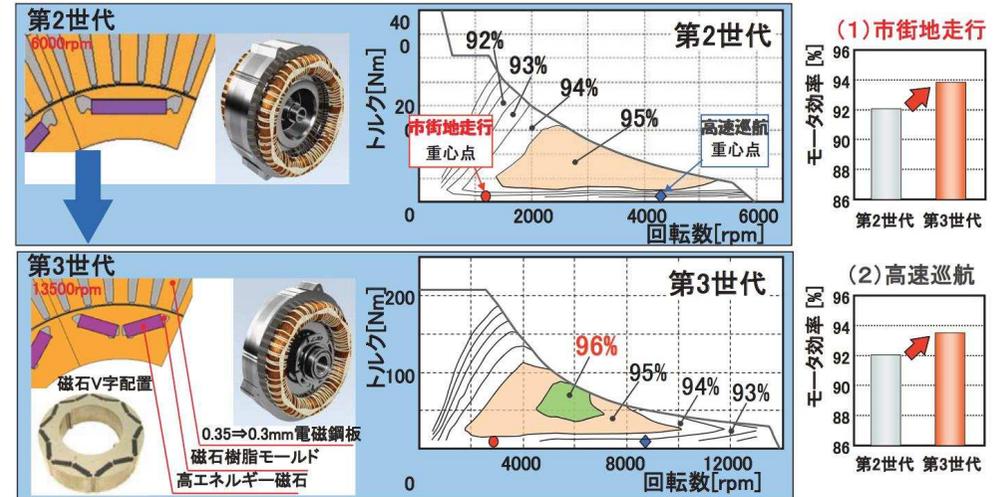


■燃費の改善には鉄損低減の影響が大きい

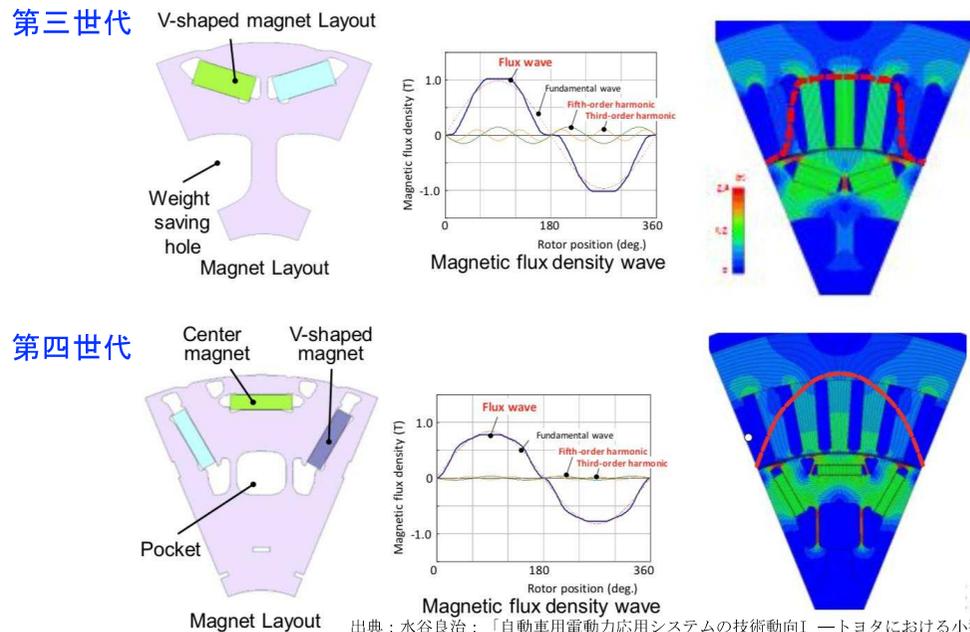


出典：水谷良治：「プリウスに見る駆動モータの小型・高効率化の変遷」, 平成26年電気学会産業応用部門大会, Vol.4, pp. 33-36 (2014)

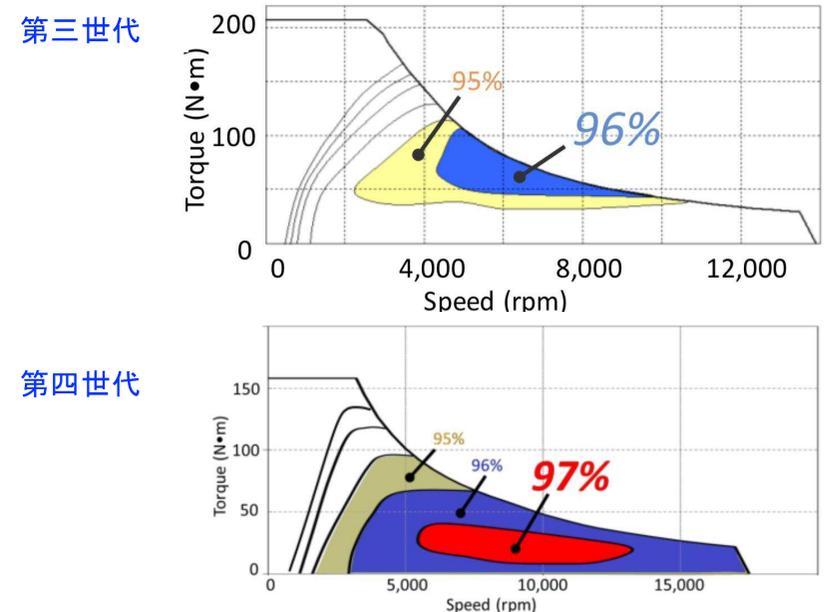
- 材料改善 ⇒ 電磁鋼板の薄板化による低鉄損化, 永久磁石の高性能化等
- 設計改善 ⇒ 鉄損低減できるコア形状(磁石V字配置⇒リラクタンストルク比率UP)



出典：水谷良治：「プリウスに見る駆動モータの小型・高効率化の変遷」, 平成26年電気学会産業応用部門大会, Vol.4, pp. 33-36 (2014)



出典：水谷良治：「自動車用電動応用システムの技術動向】一トヨタにおける小型ハイブリッド自動車用モータの開発」, 平成29年電気学会産業応用部門大会, (2017)



出典：水谷良治：「自動車用電動応用システムの技術動向】一トヨタにおける小型ハイブリッド自動車用モータの開発」, 平成29年電気学会産業応用部門大会, (2017)

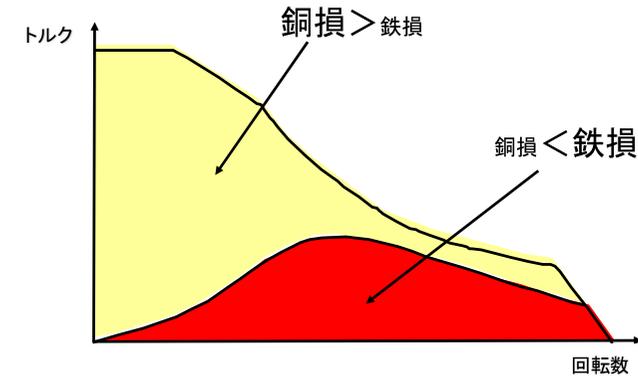
アウトライン

5章 自動車駆動用モータの開発動向 (プリウス駆動用モータを例に)

- 5.1 自動車主機用モータの要求特性
- 5.2 高速化による小型・軽量化
- 5.3 損失低減技術
- 5.4 冷却技術
- 5.5 巻線技術

5.4 冷却技術 駆動用PMモータの損失の特徴

燃費の改善には鉄損低減の影響が大きい



高速域で鉄心冷却、低速域でコイル冷却が必要

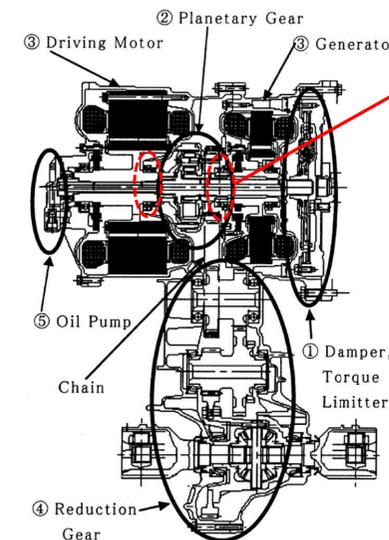
5.4 冷却技術 モータ冷却技術の推移

	構造の相違点	熱伝導経路	冷却法
97年第1世代	モータとギヤ室の隔離	コイル-鉄心-ケース	ケース水冷
03年第2世代	モータ室に油の進入許容	上記 + 鉄心-油-ケース	ケース水冷
09年第3世代	コイルエンドと鉄心に油散布	上記 + コイル-油-ケース	ケース空冷

コイルと鉄心からケースまでの伝熱がポイント

5.4 冷却技術 第一世代における冷却技術

モータとT/Aは別室 初代プリウス(1997)



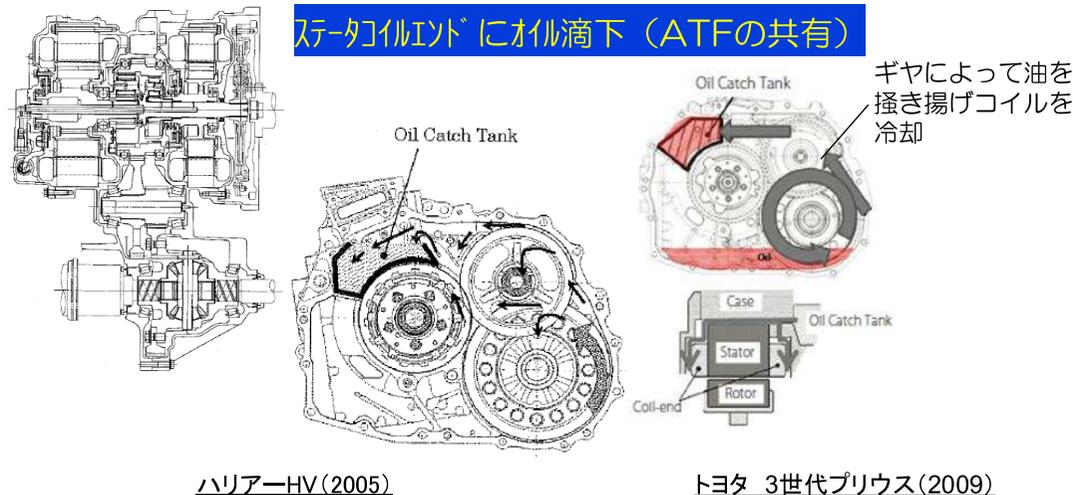
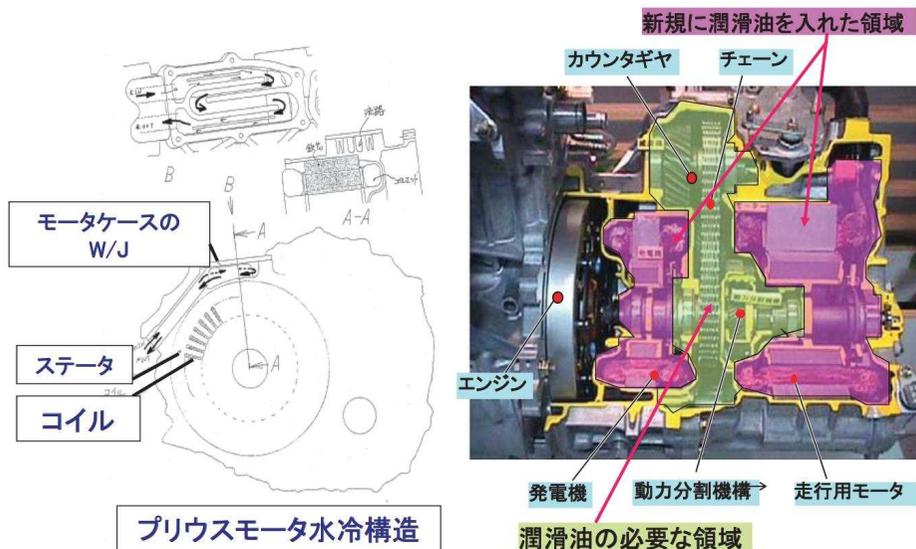
モータ室内は空気

- モータベアリング横にオイルシール
- T/AのATFがモータ室に侵入しない

<2000年マイナーチェンジ>

ステータ下方コイルエンドとコアが浸漬

- オイルシール排除
- コイルからオイルへの熱流れとコア→ケース間の熱抵抗低減



ハリアーHV(2005)

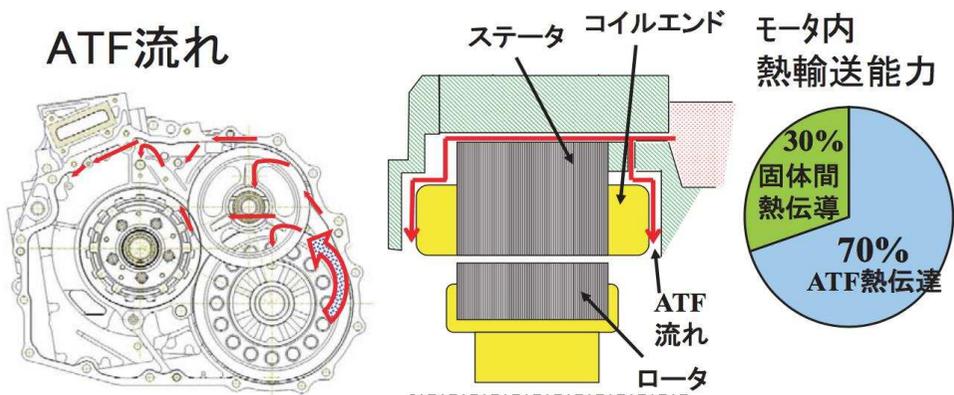
トヨタ 3世代プリウス(2009)

出典：Hiroshi Hata et al: Development of a New Hybrid Transmission for FWD Sports Utility Vehicle, SAE2005-01-0272(2005)

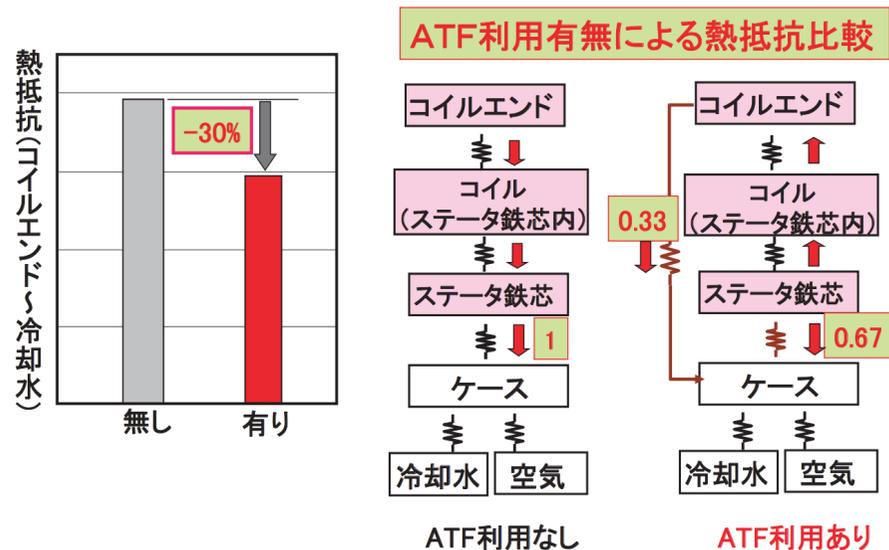
出展：水谷：「ハイブリッド自動車用モータの技術変遷」, 電学誌, 138巻, 5号, pp.288-291, (2018)

コイル銅損による発熱の冷却

ATFによるモータ熱輸送
(ATF:Automatic Transmission Fluid)

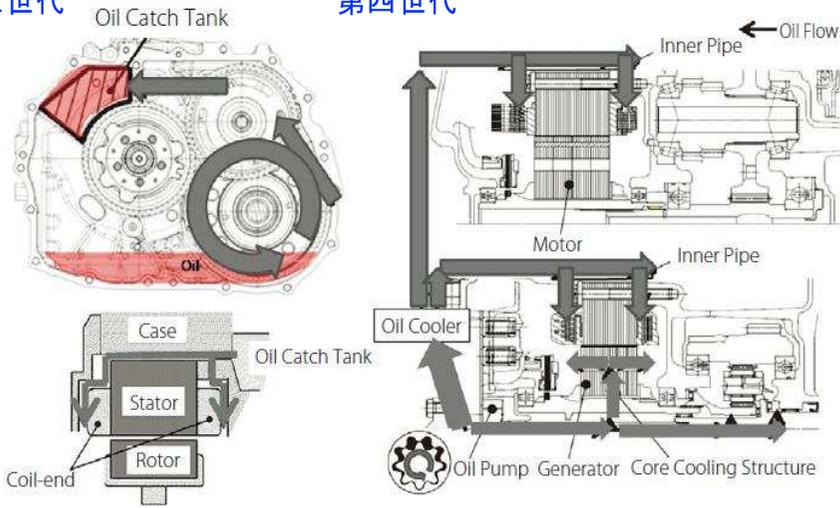


コイル銅損による発熱の冷却



出典：水谷良治：「プリウスに見る駆動モータの小型・高効率化の変遷」, 平成26年電気学会産業応用部門大会, Vol.4, pp. 33-36 (2014)

第三世代 第四世代



- > 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

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)

アウトライン

5章 自動車駆動用モータの開発動向
(プリウス駆動用モータを例に)

- 5.1 自動車主機用モータの要求特性
- 5.2 高速化による小型・軽量化
- 5.3 損失低減技術
- 5.4 冷却技術
- 5.5 巻線技術

5.5 巻線技術 分布巻の巻線技術の変遷

①同心巻	②重ね巻	③波巻
<p>コイルエンド 相毎に径方向、軸方向に重なる</p> <p>コイル 相毎に径方向に挿入</p> <p>コア</p>	<p>コイルエンド 隣接コイルエンドの干渉小</p> <p>段差 コイル 外 内</p> <p>1コイルの各挿入片をスロットの内外に配置</p> <p>コア</p>	<p>コイルエンド 隣接コイルエンドが非干渉or干渉小</p> <p>コイル 波形状</p> <p>コア</p>
コイルエンド大 自動組立可	コイルエンド小 組立は手作業	コイルエンド小 自動組立可

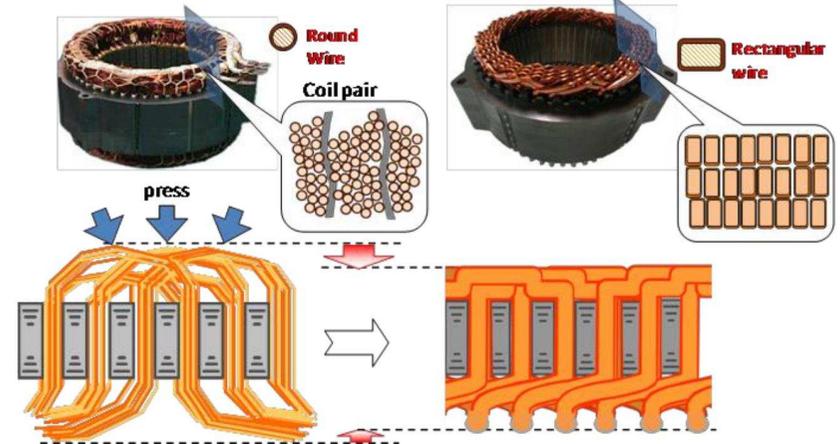
- ①同心巻：3種類の中で最もコイルエンドが大きい。
- ②重ね巻：コイルエンドの電線経路に段差を付けることでコイル同士の干渉を低減。同心巻よりもコイルエンドを短縮できる。
- ③波巻：3種類の中で最もコイルエンドが小さいが、製造方法が複雑。近年、インサータ方式やセグメント導体方式、コア変形方式、分割コア方式等、波巻ステータの製造方法が発展。

出典：川口仁：「高性能化を推進する高密度巻線技術」，平成18年電学産業応用部門大会講演論文集，No.3，pp.47-50 (2006)

5.5 巻線技術 第四世代プリウス巻線

第三世代(丸線)

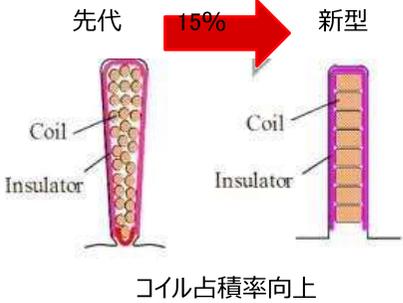
第四世代(平角線)



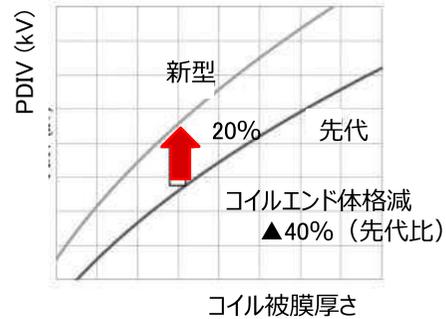
- 銅占積率の向上
- コイルエンド長の短縮 → 小型化

出典：水谷良治：「自動車用電動応用システムの技術動向」トヨタにおける小型ハイブリッド自動車用モータの開発一，平成29年電気学会産業応用部門大会，(2017)

コイル線断面積



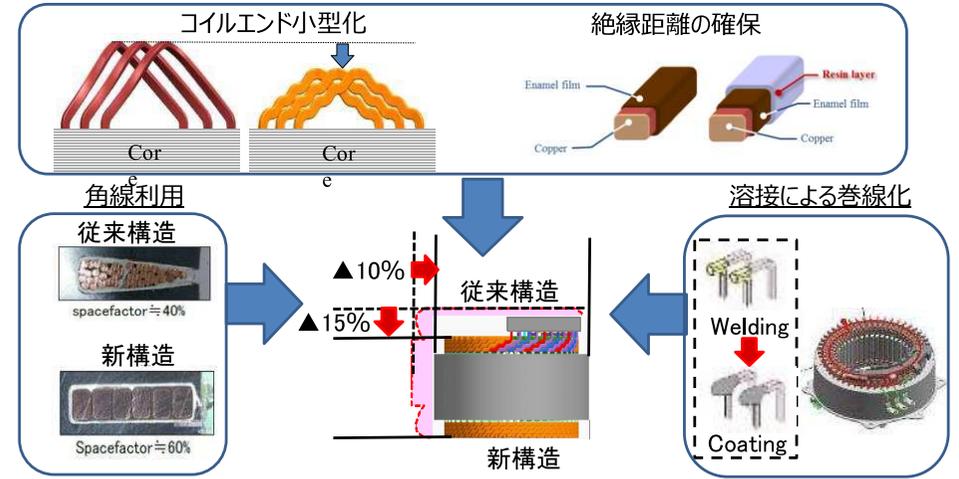
被膜材の改良



角線の進化（占積率向上と生産コスト減）
⇒ 被膜，生産方法（溶接方法，挿入方法など）

出典：Makoto Taniguchi : " Development of New Hybrid Transaxle for Compact-Class Vehicles" , SAE Paper 2016-01-1163 (2016)

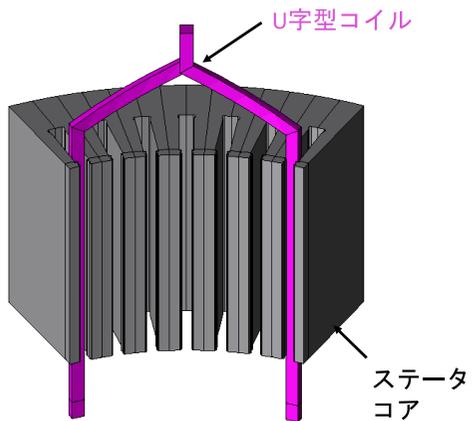
コイルエンド形状見直しと新被膜構造



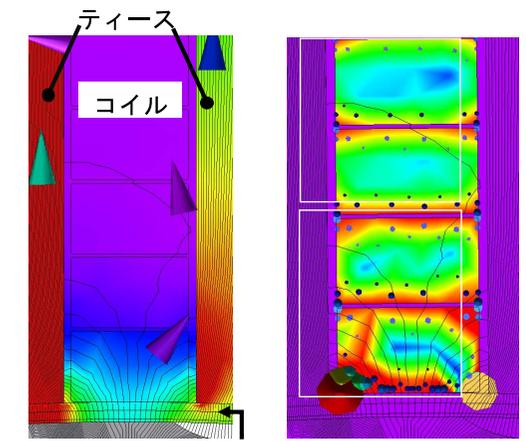
角線使用，コイルエンド形状見直し，溶接による巻線化 → 小型化

出典：高崎哲：「小型ハイブリッド車のモータステータの開発」，自動車技術会春季学術講演会前刷集，No.58-12

セグメントコンダクタ巻線



コイル挿入後、曲げて溶接
→生産効率の上昇



エアギャップ
コイル付近の磁束密度
ロータの回転に伴い、磁石磁束がコイルを横切る⇒渦電流が発生

渦電流損 $Pe \propto f^2(Bm)^2t^2$
 Pe : 渦電流損失 f : 磁束密度の周波数
 Bm : 磁束密度 t : 径方向コイル幅

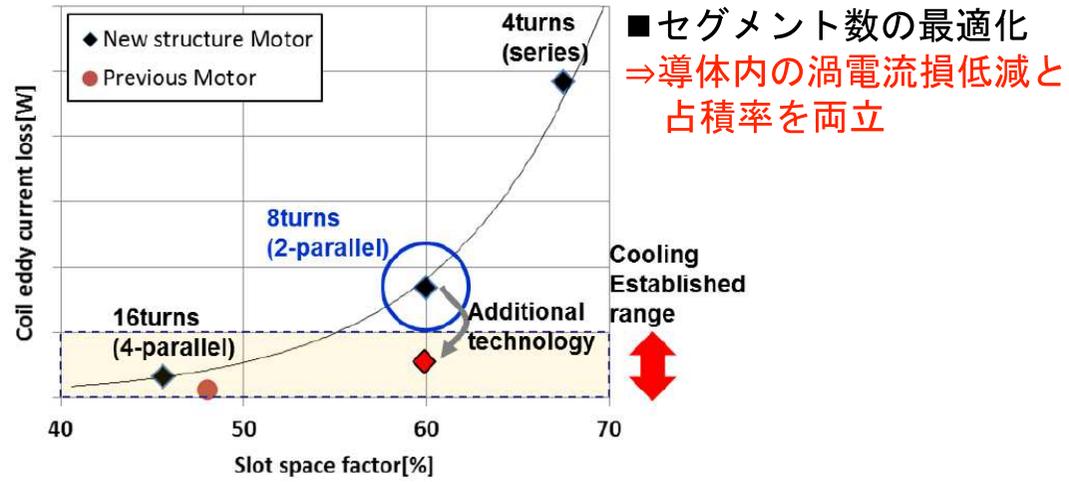
	Series	2-parallel	4-parallel
Model			
windings turns	4turns	8turns	16turns
Lamination factor [%]	67	60	45
Electric conductor number	144	288	576

セグメント数の最適化 ⇒ 導体内の渦電流損低減と占積率を両立

出展：山口、他：『i-MMD用新骨格モータの開発』，平成29年 電気学会産業応用部門大会，3-54，vol.3，pp.267-270

5.5 巻線技術 ホンダでの検討例

巻線占積率とコイル渦電流損の関係



出展：山口、他：『i-MMD用新骨格モータの開発』,平成29年 電気学会産業応用部門大会, 3-54, vol.3, pp.267-270