

永久磁石フリーなリラクタンス モータをより高効率にする技術

富山大学 大学院理工学研究部（工学）
電気電子システム工学科

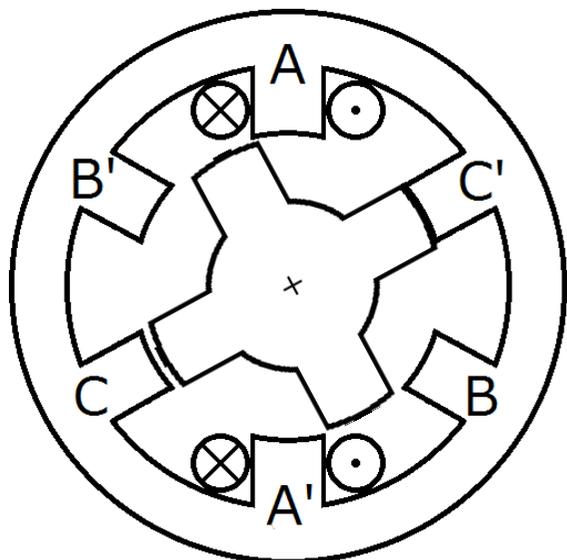
助教 清田 恭平

2019年10月8日

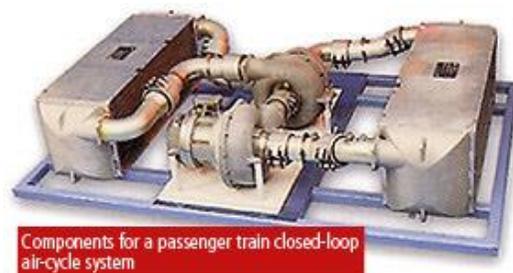
研究背景

自動車駆動用モータやエアコン等家電用モータに
使用されている希土類（レアアース）永久磁石の使用量削減

永久磁石を全く使用しない
リラクタン্সモータ(特にSRM*)に注目



リラクタン্সモータ概形



Components for a passenger train closed-loop air-cycle system

鉄道用エアコン(1)



リラクタン্সモータ
搭載電気自動車(1)

メリット

- 鉄心と巻線のみで構成
↳ 簡単かつ頑丈・大量生産可
- レアアース不使用
↳ 高温環境下で動作可能
低コスト
- 設計次第で永久磁石モータ並みのトルク・出力達成
(SRMの場合、近年の事例)

*SRM：スイッチトリラクタン্সモータ

(1) <http://www.srdrives.com/>

リラクタン্সモータ その1

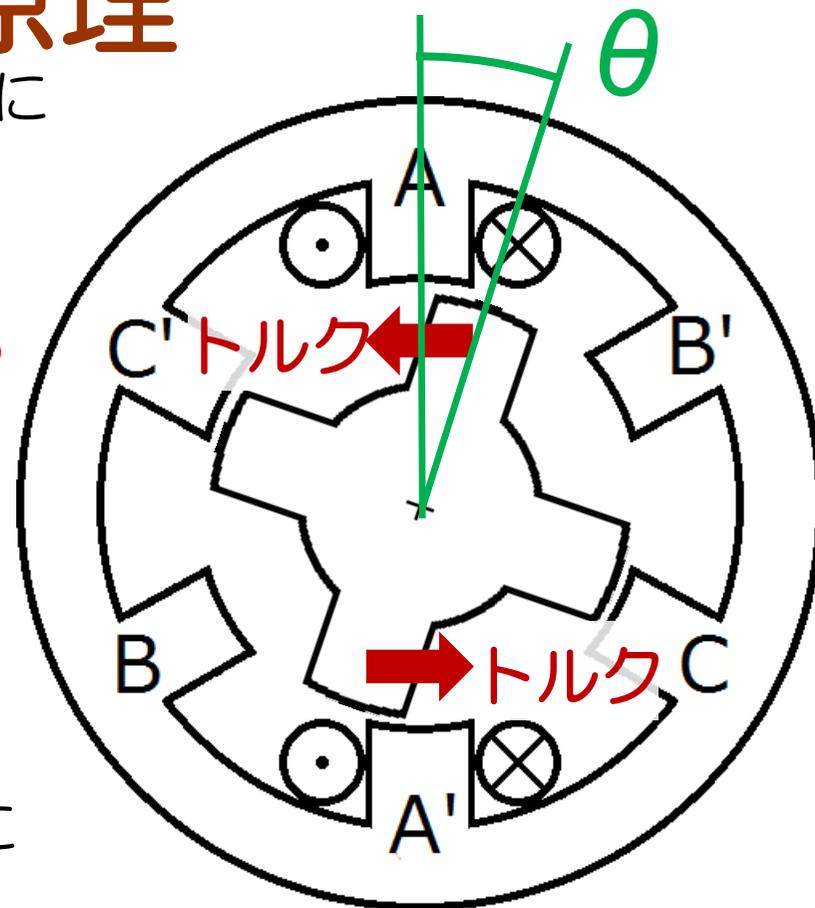
SRMの駆動原理

回転子突極が近づきつつある歯（A相）に
励磁電流を流す

回転子突極がA相に引き寄せられる
（＝トルク発生）

回転子突極が完全にA相に
近づく前に電流を切る

次に回転子突極が近づいた歯（B相）に
励磁電流を流す



励磁相を
変えながら
繰り返す

巻線に電流を与えたときの発生トルク T （≡電磁石の吸引力）

理論的には…
$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial \theta}$$
 (L :インダクタンス、 θ :回転子の回転角)

⇒ L 増加時に方形波状電流を流すとトルク発生

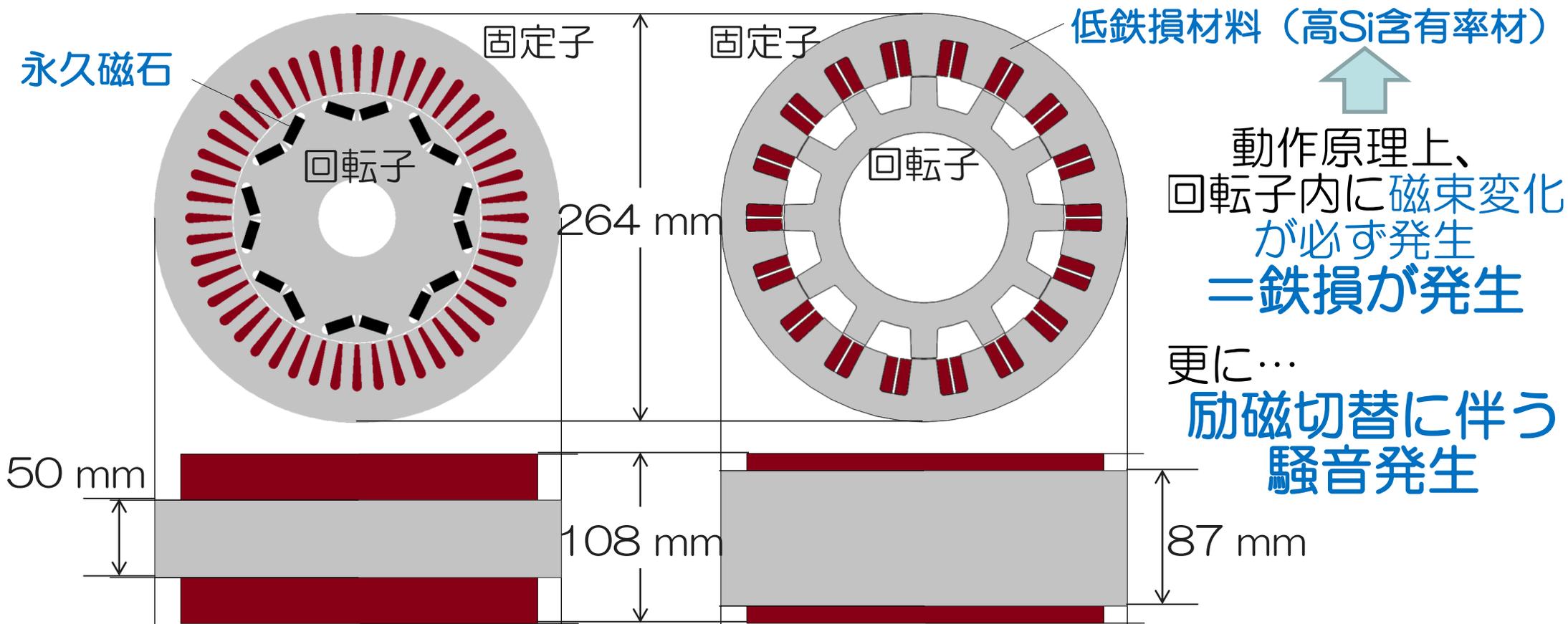
SRMの先行研究

2009年発売HEV用永久磁石モータと同一体格で同等以上のトルク・出力
およびほぼ同等の最高効率を達成⁽²⁾

ただし、高効率化・騒音に課題アリ（特殊な材料・制御が必須）

永久磁石モータ

SRM



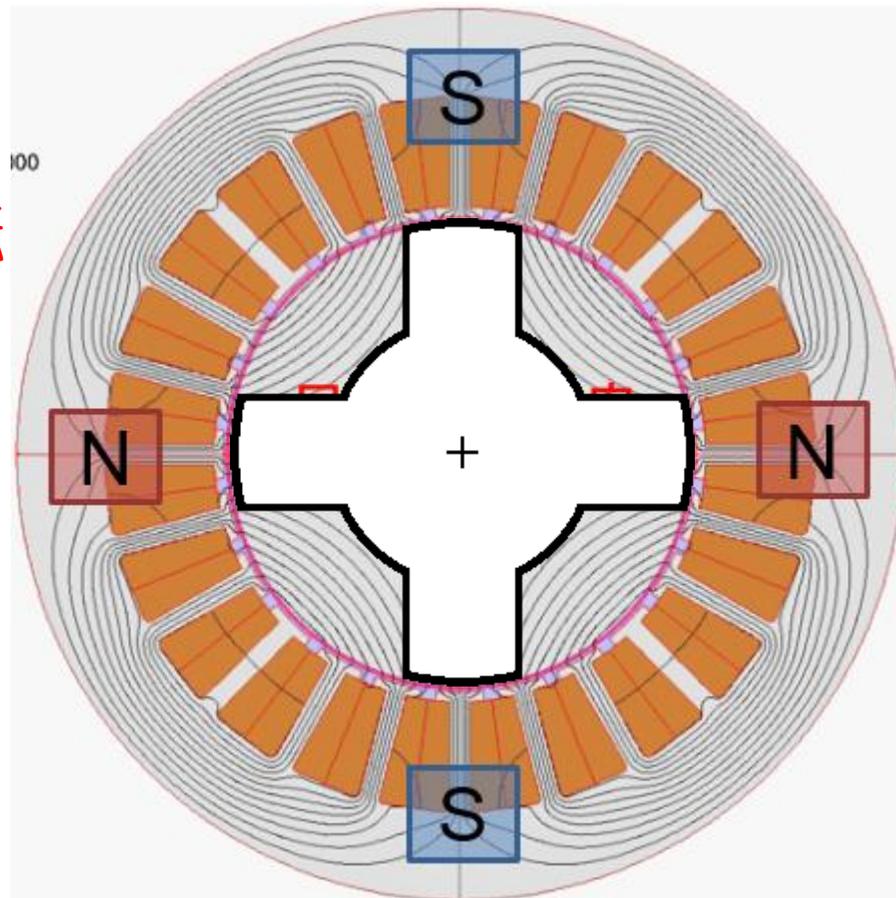
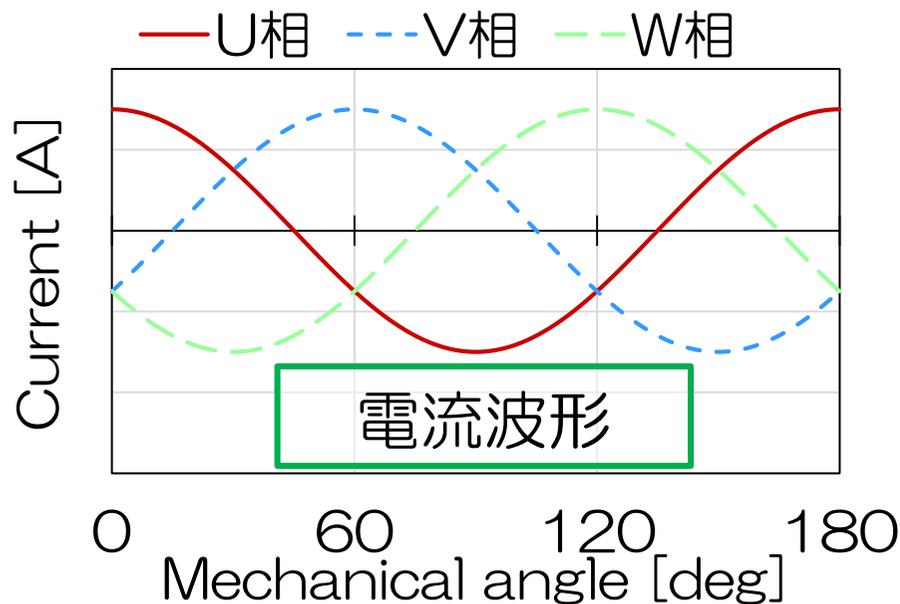
(2) K. Kiyota and A. Chiba, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 48, no. 6, pp. 2303-2309, Nov.-Dec. 2012. 4

リラクタンスモータ その2 SynRM*の駆動原理

三相交流電流により回転磁束を生成



回転磁束に引きずられて回転子突極が回転



△中トルク密度
(SRMより低)

○高効率
(回転子内の鉄損低)

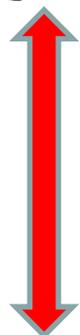
*SynRM：シンクロナスリラクタンスモータ(同期リラクタンスモータ)

モータ高効率化手法：特性切替

モータ特性を切り替えらることによる、2つのメリット

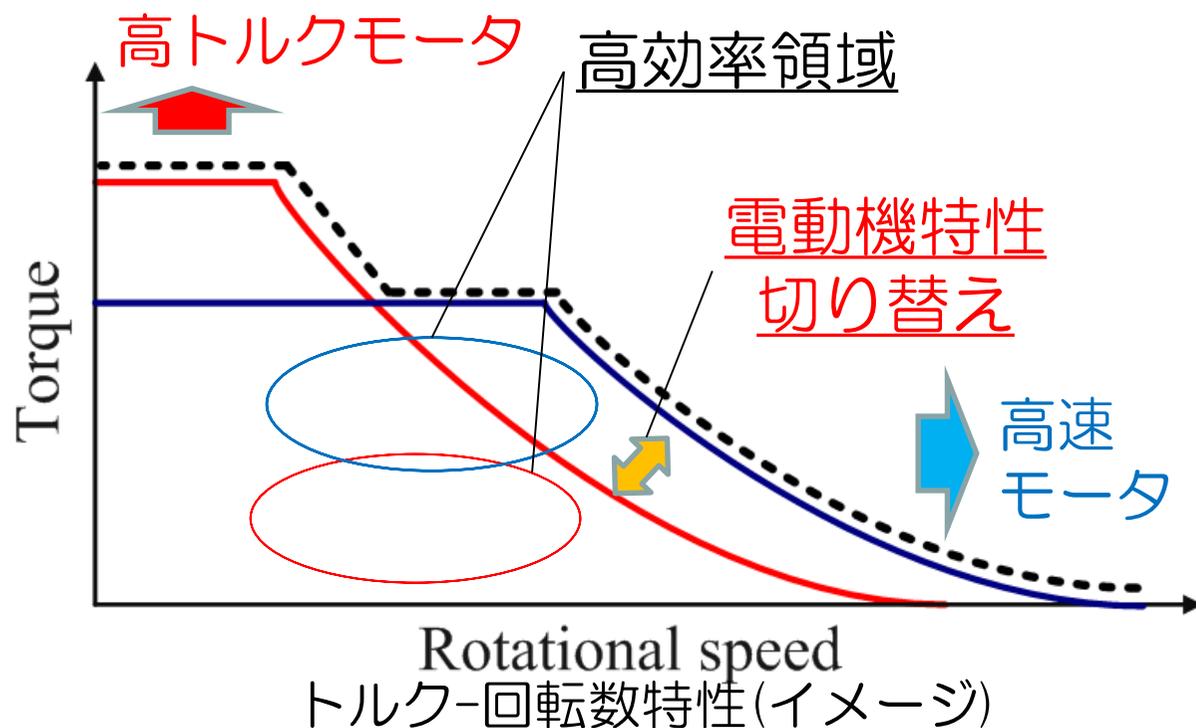
1. 動作領域の拡大

高トルク特性 (赤)



用途に応じ特性切替
→ 動作領域の拡大

高回転数特性 (青)



2. 高効率領域の拡大

それぞれの特性の高効率領域で動作するように切り替え

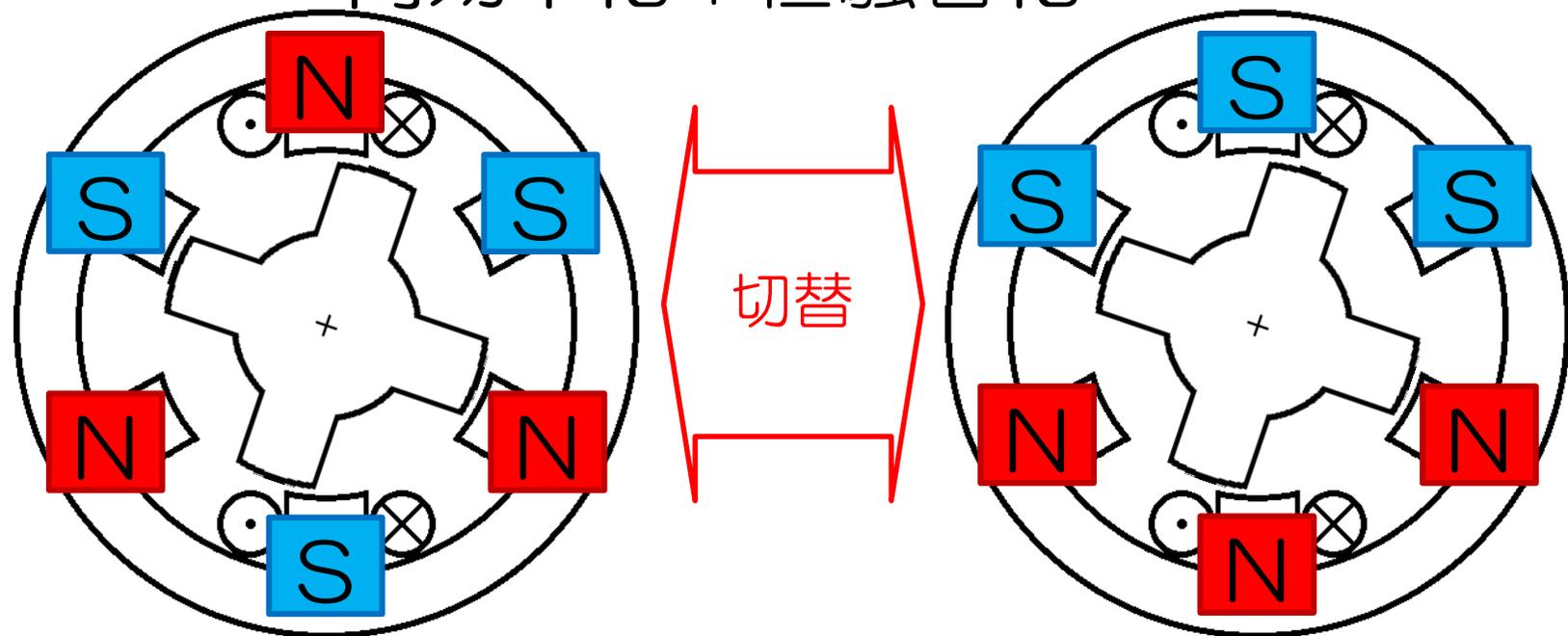
→ 結果的に高効率領域の拡大

しかし、リラクタン্সモータの例はごく少数

∵回転子の突極構造によりモータ極数等の定数の大半が決定

リラクタン্সモータでの特性切替例

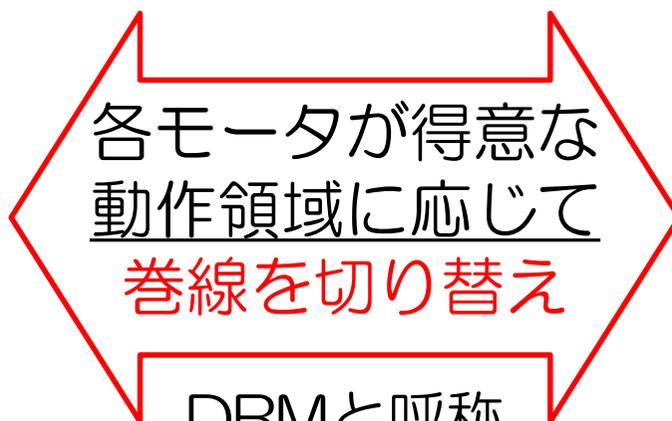
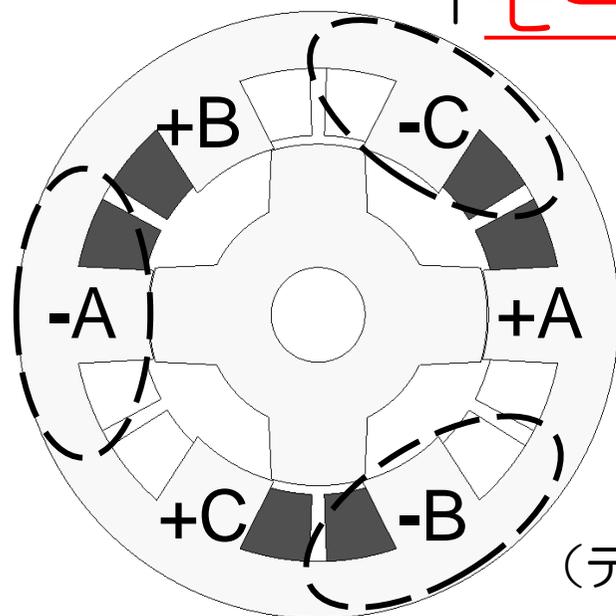
SRMで、一部の相の極性を入れ替えることにより
高効率化+低騒音化⁽³⁾



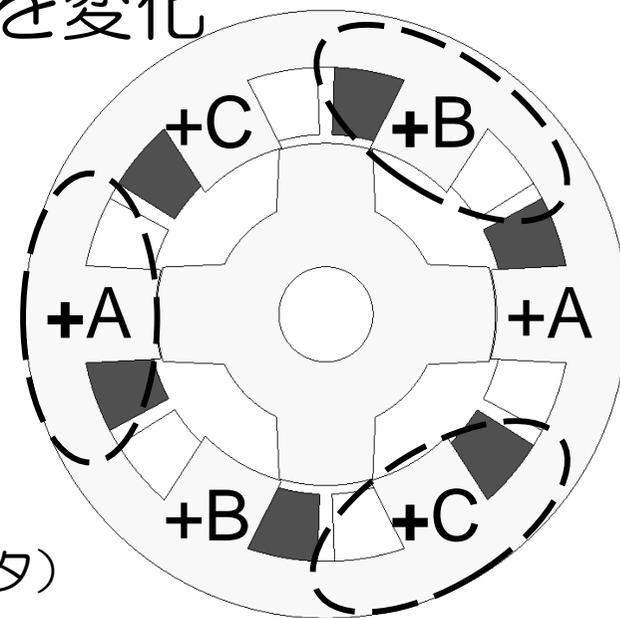
- 一相のみ極性を切り替え
- モータの種別はそのまま
⇒効果は限定的

モータ種別変化の概念 <本技術>

モータの鉄心構造を変えることなく、
固定子の巻線を切り替えることのみにより
「モータの種類そのもの」を変化



(デュアルモードリラクタンスモータ)



SRM mode (元々)

- 方形波状電流、電流連続制御
⇒ 高出力に有利
- 回転子内で高周波磁束変化
⇒ 低出力時の効率が悪化

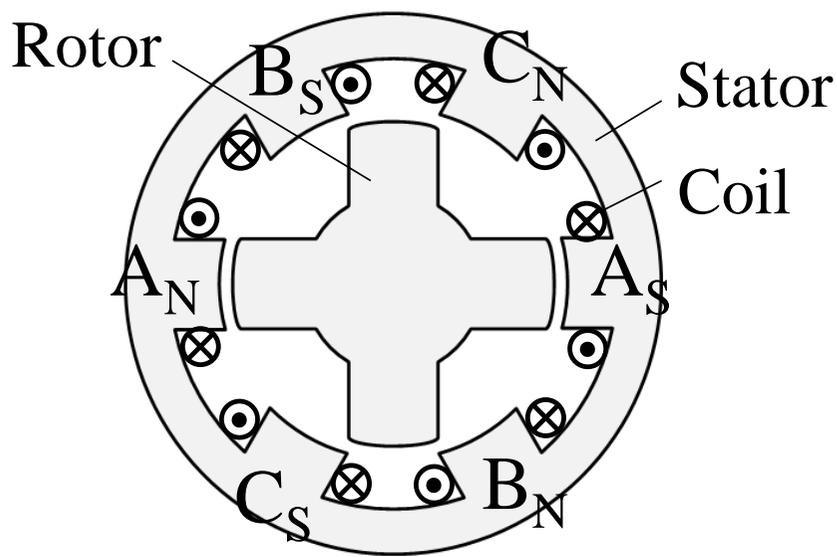
SynRM mode (追加)

- 回転子突極に同期した回転磁界
⇒ 低出力時の高効率化・低騒音化
- 弱め界磁制御が困難
⇒ 最高出力の減少 (特に高速時)

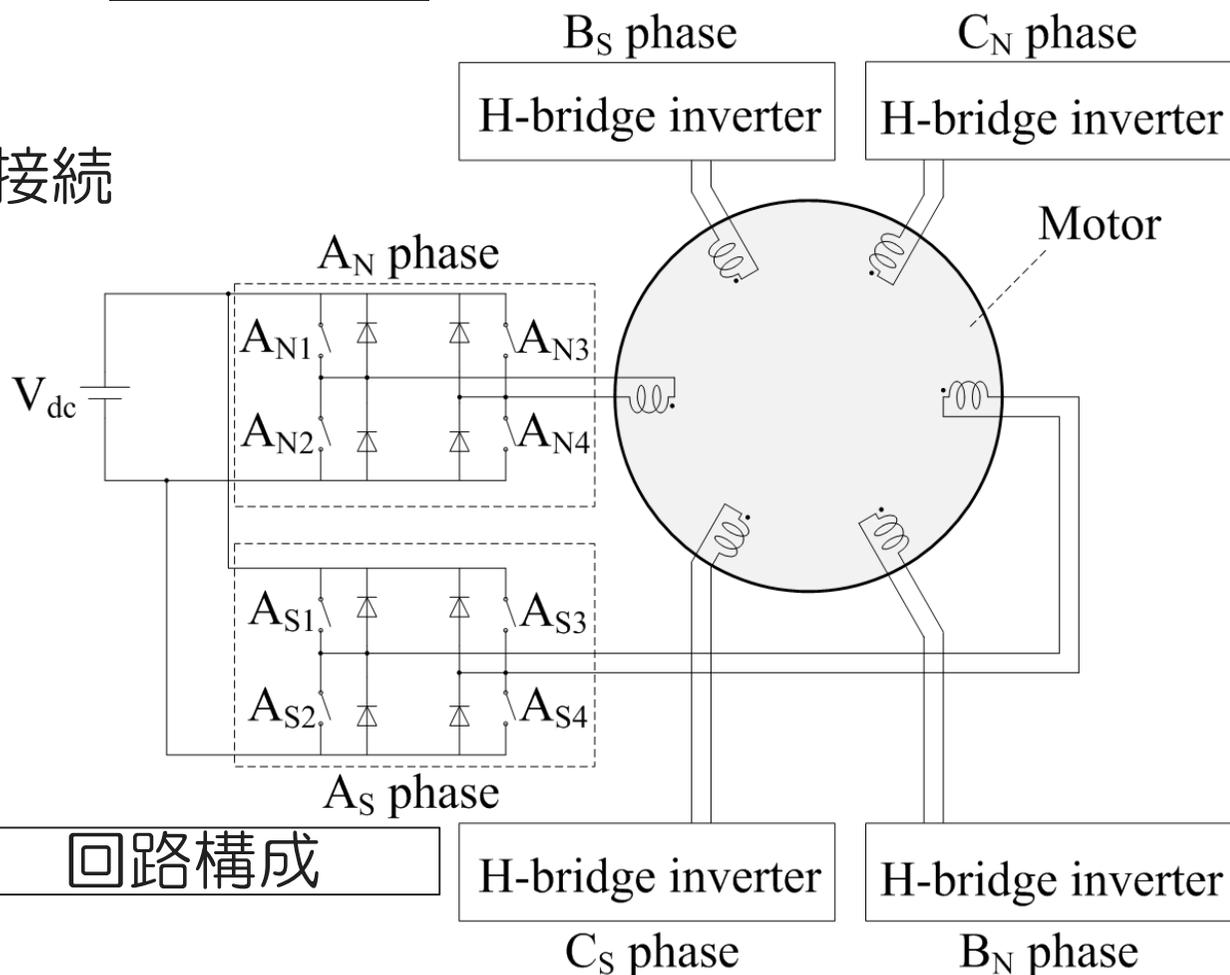
DRMの基本構造・回路構成

モータ構造はほぼSRMと同等。以下は変更点

- 各巻線の極性をすべて同じ方向に設定
- 各相の巻線を2種類に分割し、六相モータのように、各巻線を配置
- 6相の巻線に個別にHブリッジ型インバータを接続



モータの基本構造
(6/4極 DRM)

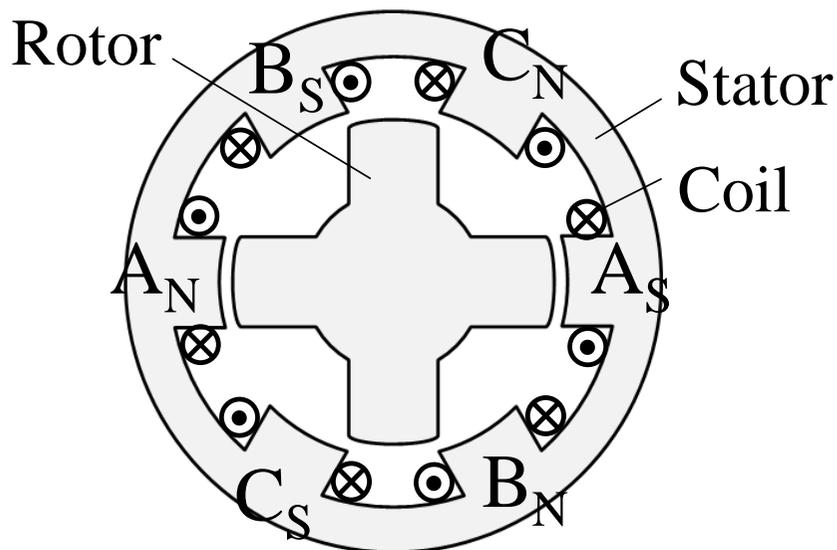


回路構成

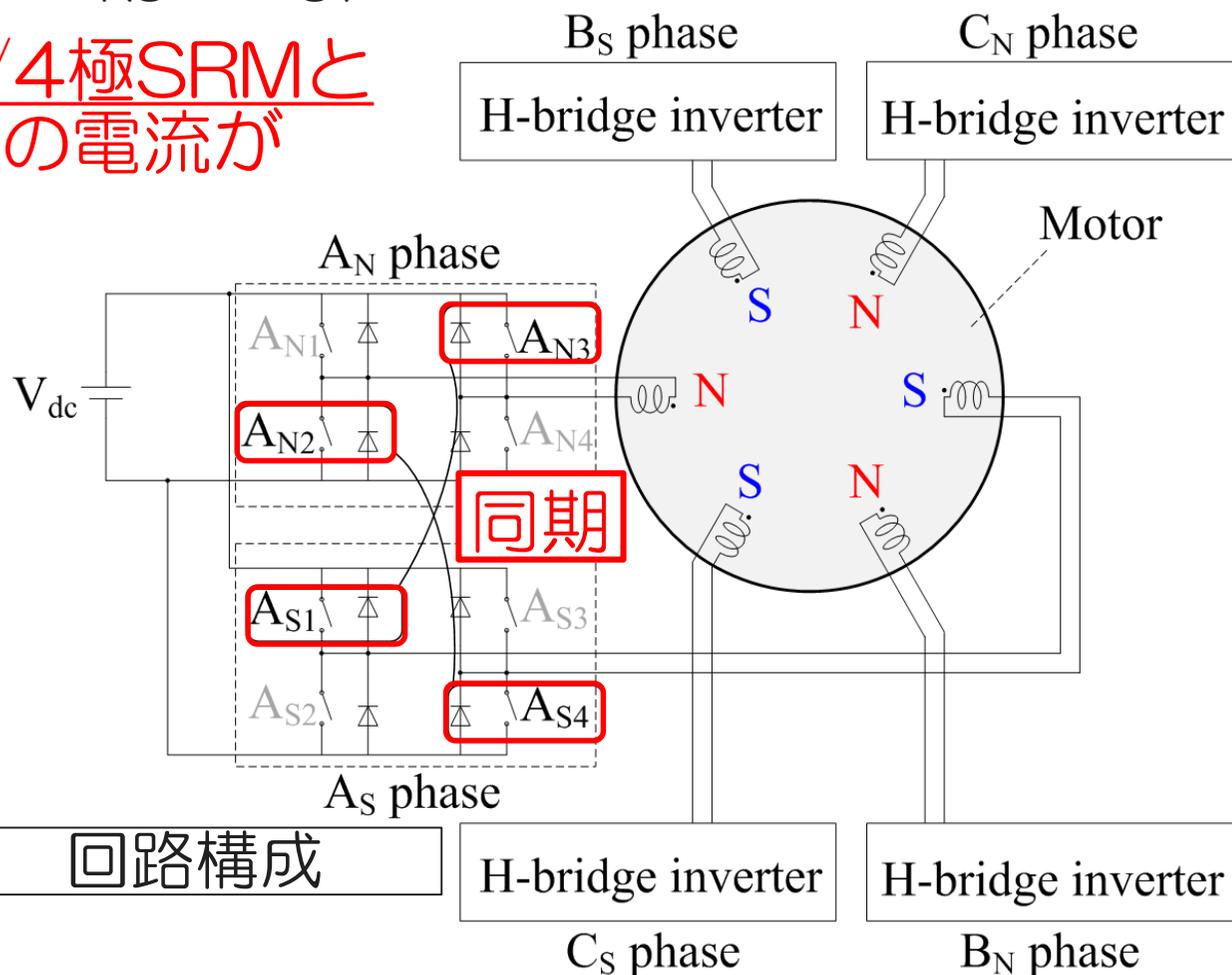
SRMモード時の駆動原理

- A_N 相のスイッチ $A_{N1} \cdot A_{N4}$ と, A_S 相のスイッチ $A_{S2} \cdot A_{S3}$ は 常時オフ. (各相のダイオード部のみ使用.)
- スイッチ $A_{N2} \cdot A_{S4}$, スイッチ $A_{N3} \cdot A_{S1}$ は同期してスイッチング実施.

➔ A_S 相には、一般的な6/4極SRMと同様に A_N 相と逆の極性の電流が流れる



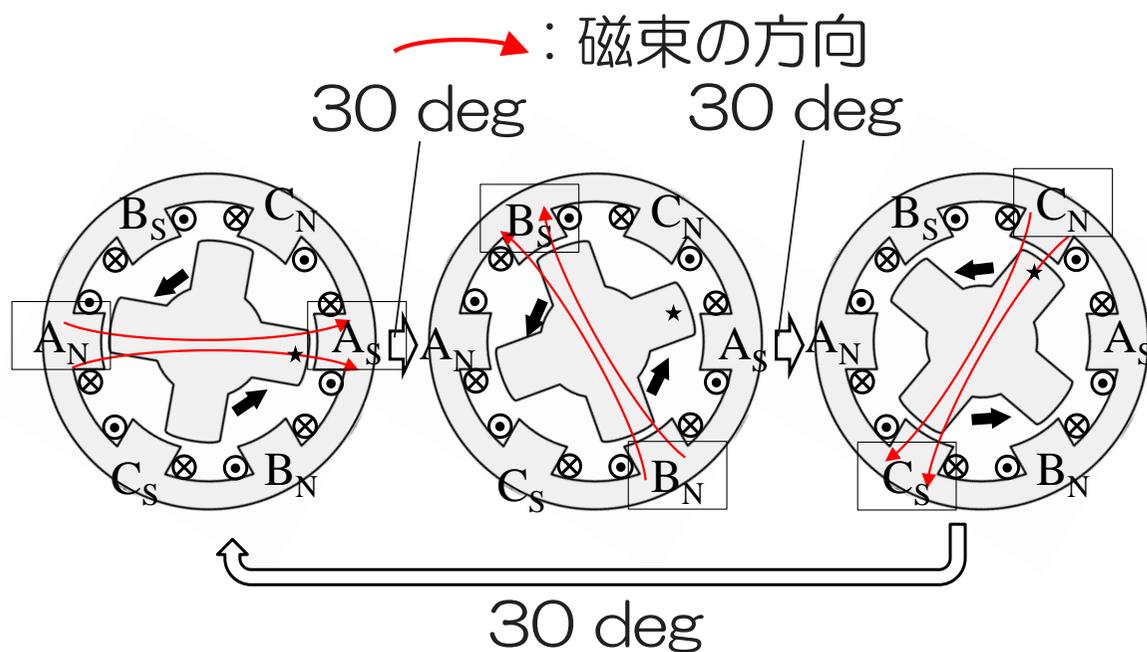
モータの基本構造
(6/4極 DRM)



回路構成

SRMモード時の駆動原理

SRMモード時の磁束変化



電流の方向	一方向
回転子磁束	大幅に変化

回転子突極が近づいた相の巻線に方形波電流を流して励磁 (SRMと同様)



巻線の電流が一方向である為、固定子内の磁束は片方向となり
回転子内の磁束の方向が変化

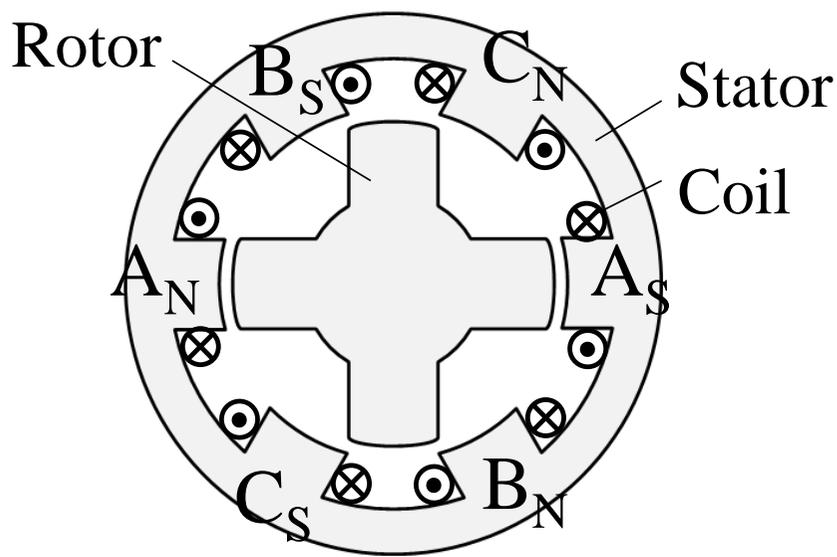


回転子内の磁束密度分布が
回転磁界の1.5倍の速さで変化
＝鉄損が発生

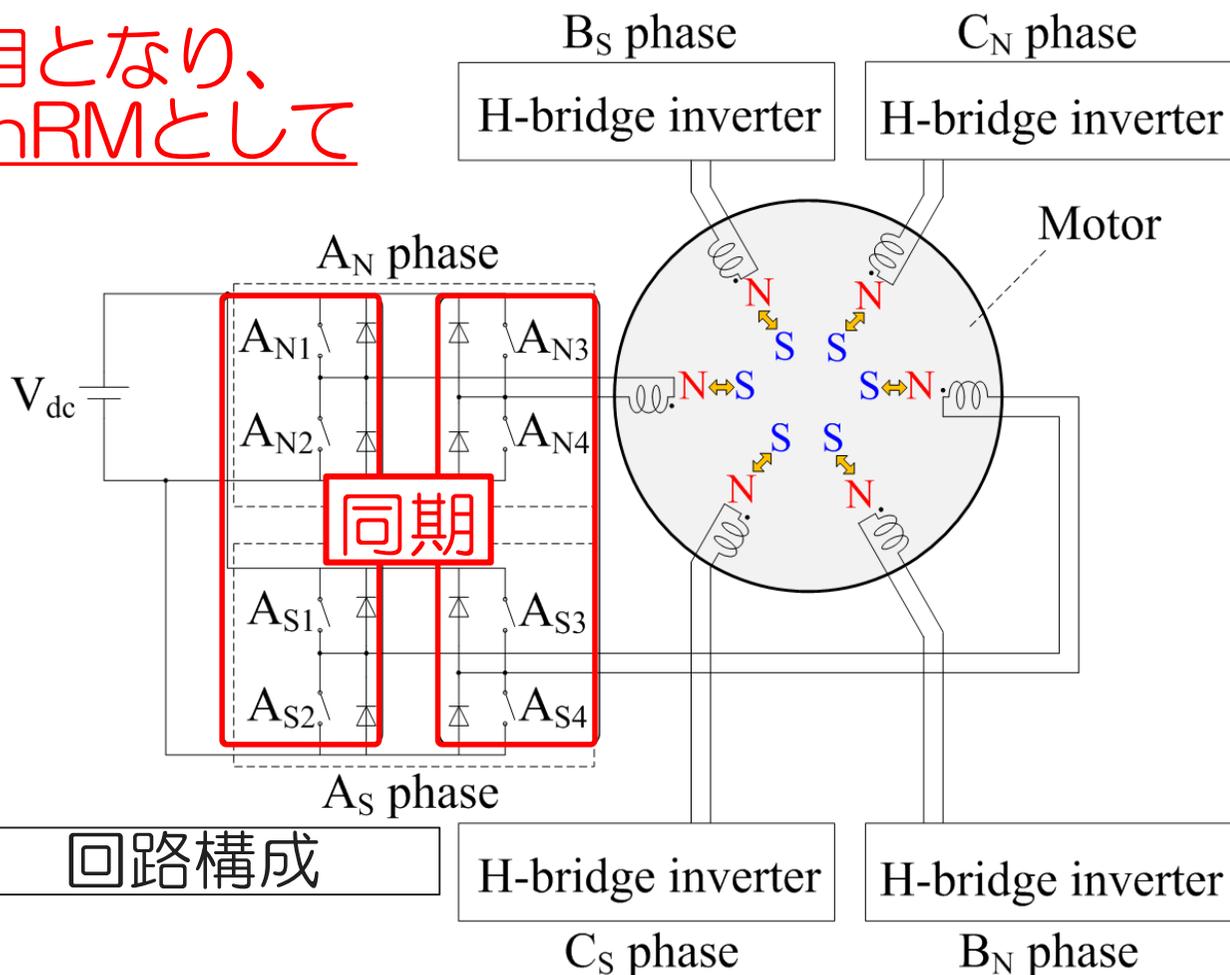
SynRMモード時の駆動原理

- レグ A_{N12} (スイッチ $A_{N1} \cdot A_{N2}$) とレグ A_{S12} (スイッチ $A_{S1} \cdot A_{S2}$)、及びレグ A_{N34} (スイッチ $A_{N3} \cdot A_{N4}$) とレグ A_{S34} (スイッチ $A_{S3} \cdot A_{S4}$)がそれぞれ同期してスイッチングを実施

➔ A_S 相と A_N 相が同一の相となり、オープン結線型4極SynRMとして駆動



モータの基本構造
(6/4極 DRM)

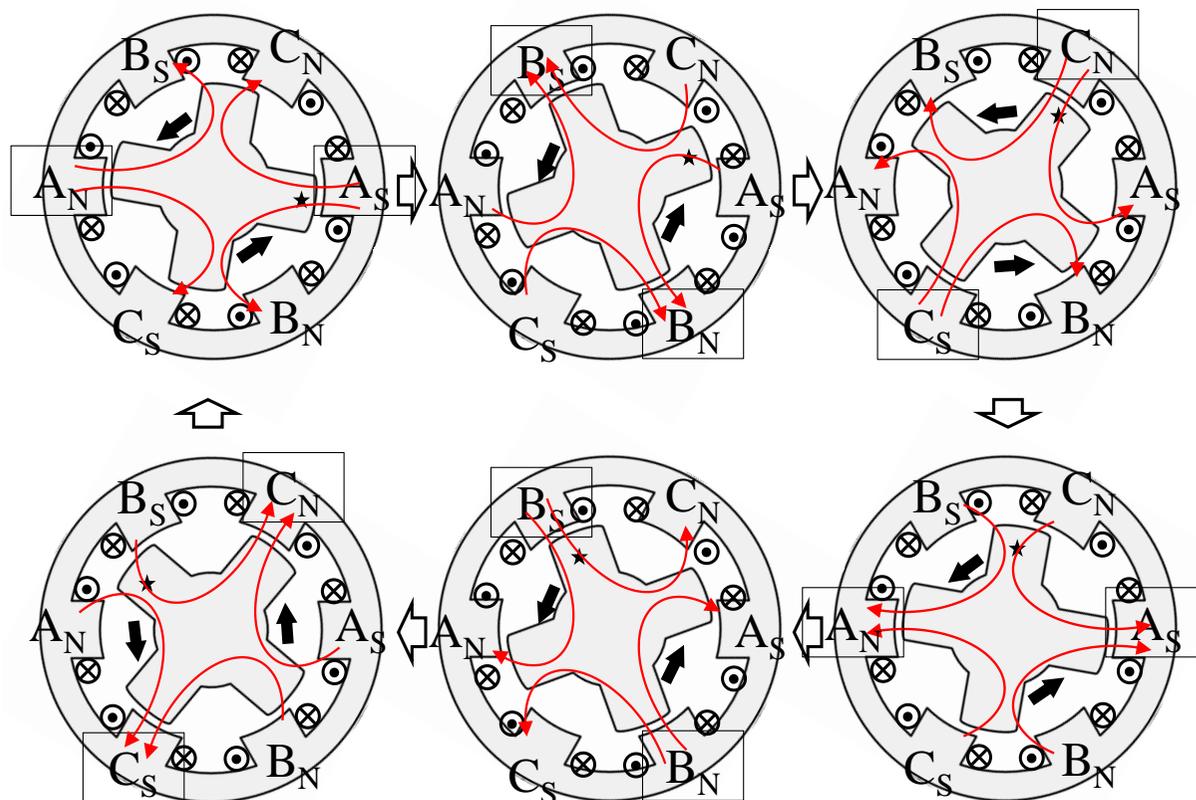


回路構成

SynRMモード時の駆動原理

SynRMモード時の磁束変化

→ : 磁束の方向



4極の回転磁界が発生するようにそれぞれの巻線に交流電流を励磁。



回転子突極に同期して、
回転磁界が生成、回転



回転子内の磁束密度分布は
回転子位置に寄らず、
ほぼ一定に維持
(各種高調波を無視すれば)

電流の方向	両方向
回転子磁束	ほぼ一定

※出力トルクはSRMモードより不利
∵磁束のルート上に大きな空気領域
⇨磁力が低下

実施例：HEV用SRMへの適用

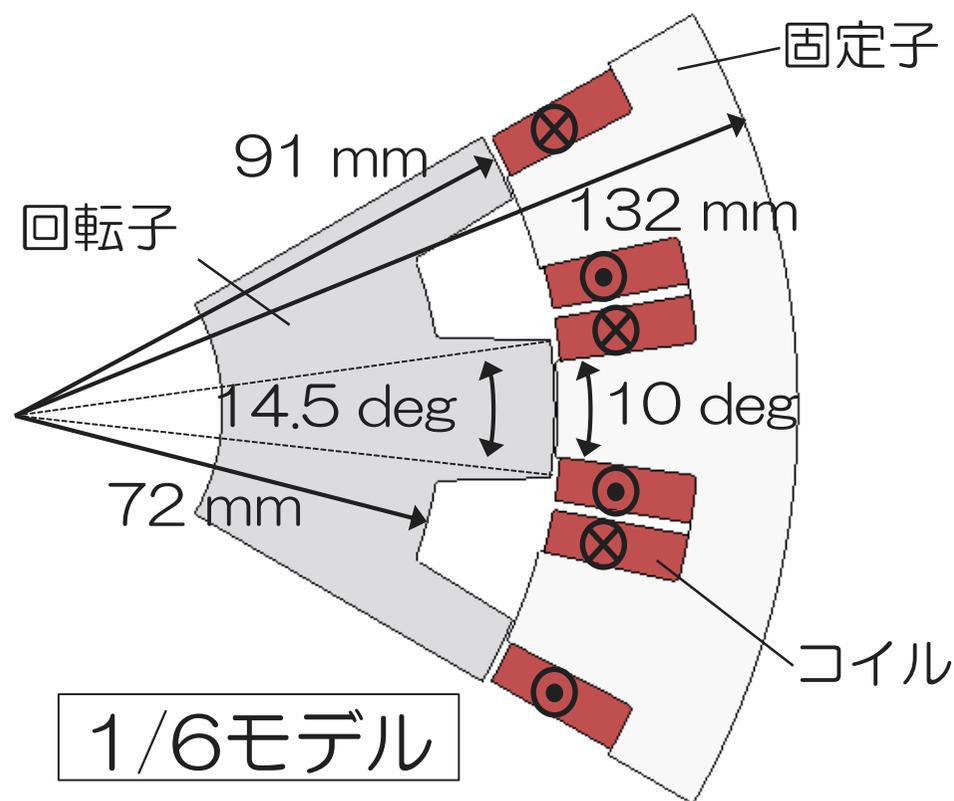
HEV用永久磁石モータ同等SRMに適用して、効果を確認。

変更点

✓鉄心を従来型の電磁鋼板に変更。

✓Increasing the rotor pole width.

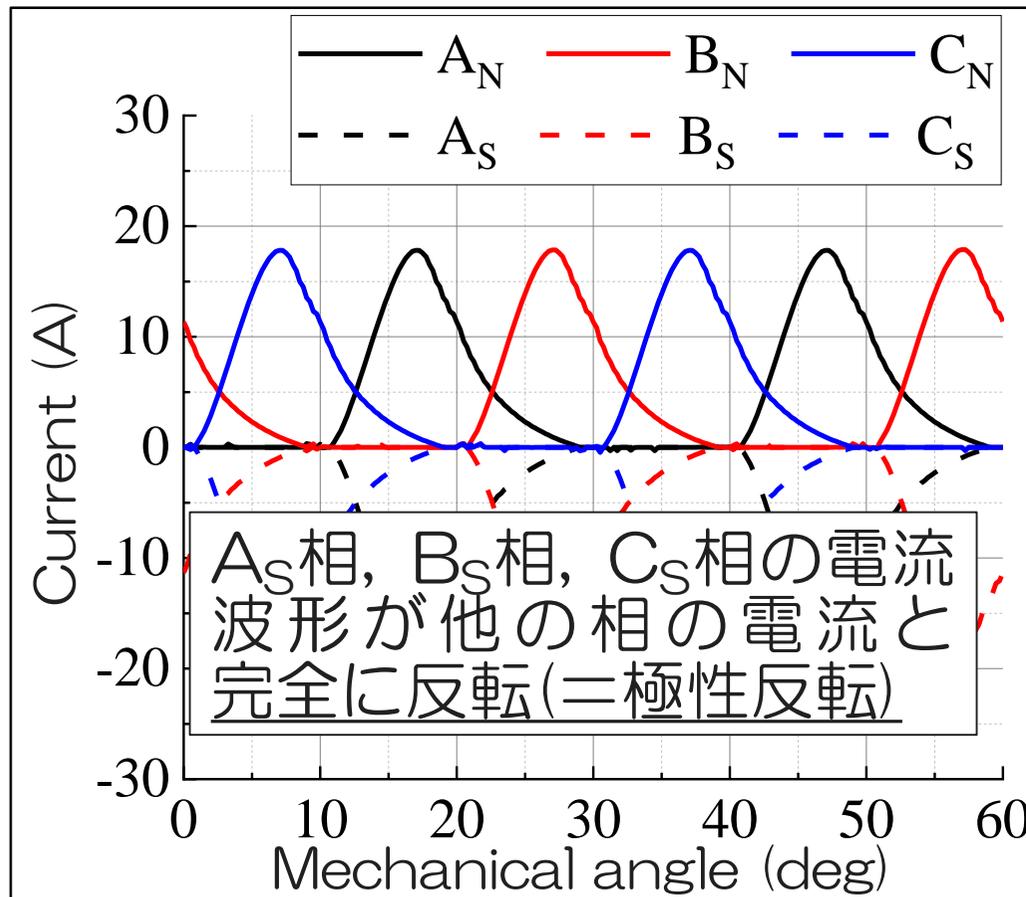
固定子外径	264 mm
エアギャップ長	0.5 mm
鉄心長	87 mm
鉄心材厚さ*	0.35 mm
直流電圧	650 V
最大電流密度	24.1 A/mm ²
最高回転数	13.9 kr/min
目標最大トルク	207 Nm
目標最大出力	60 kW



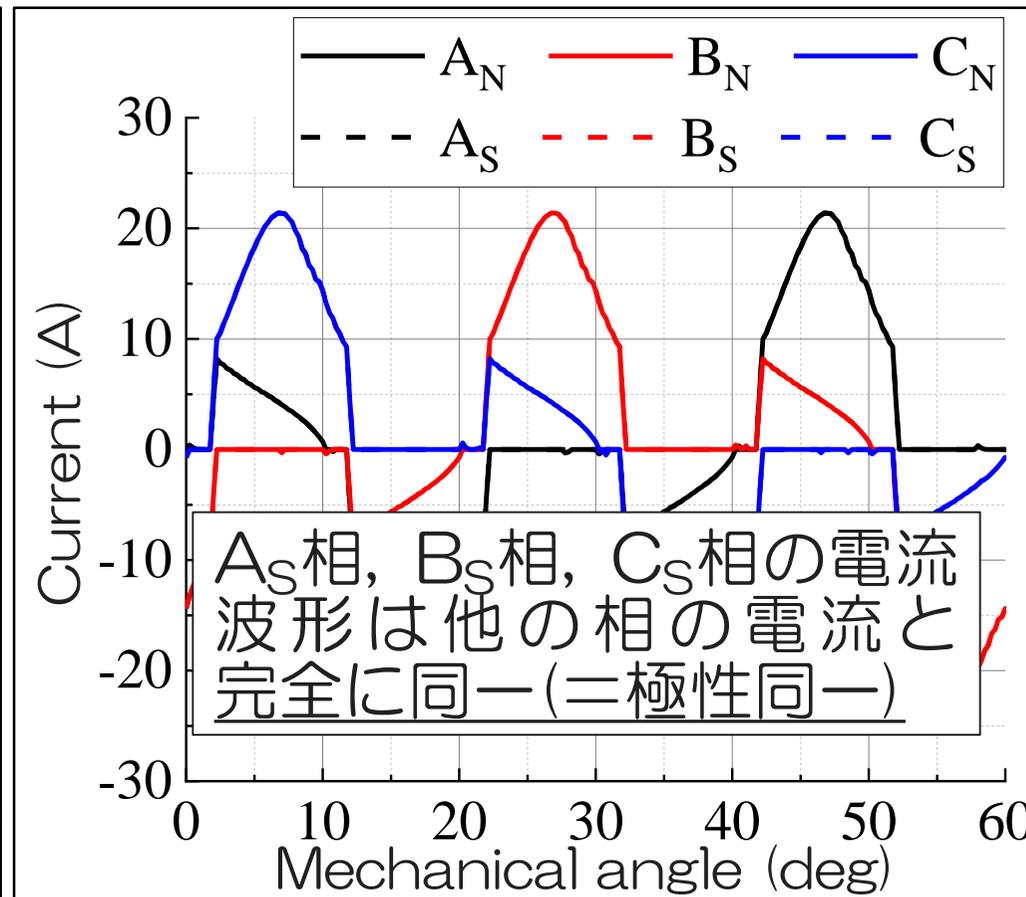
*従来型の電磁鋼板の特性を使用

巻線切り替えによる電流の変化(例)

- ✓ 両モード共、方形波駆動による解析を実施 (@最高回転数)
 ← 高速領域であるため、正弦波駆動を行うための電圧が不足するため



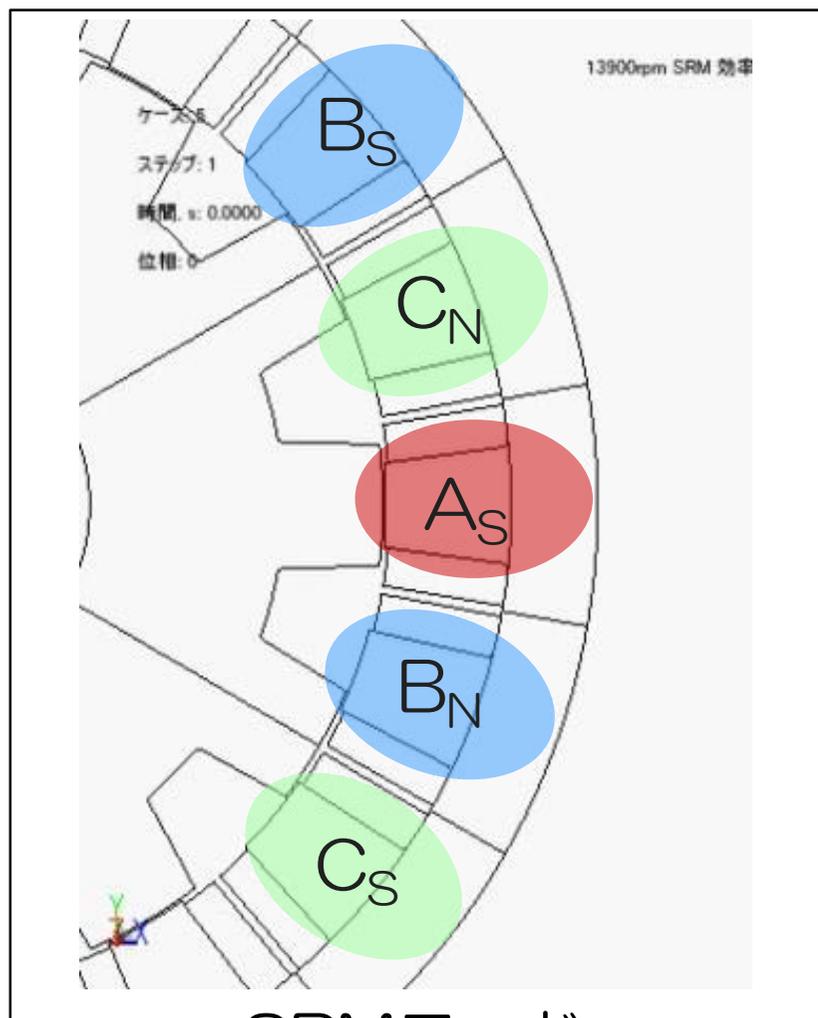
SRMモード



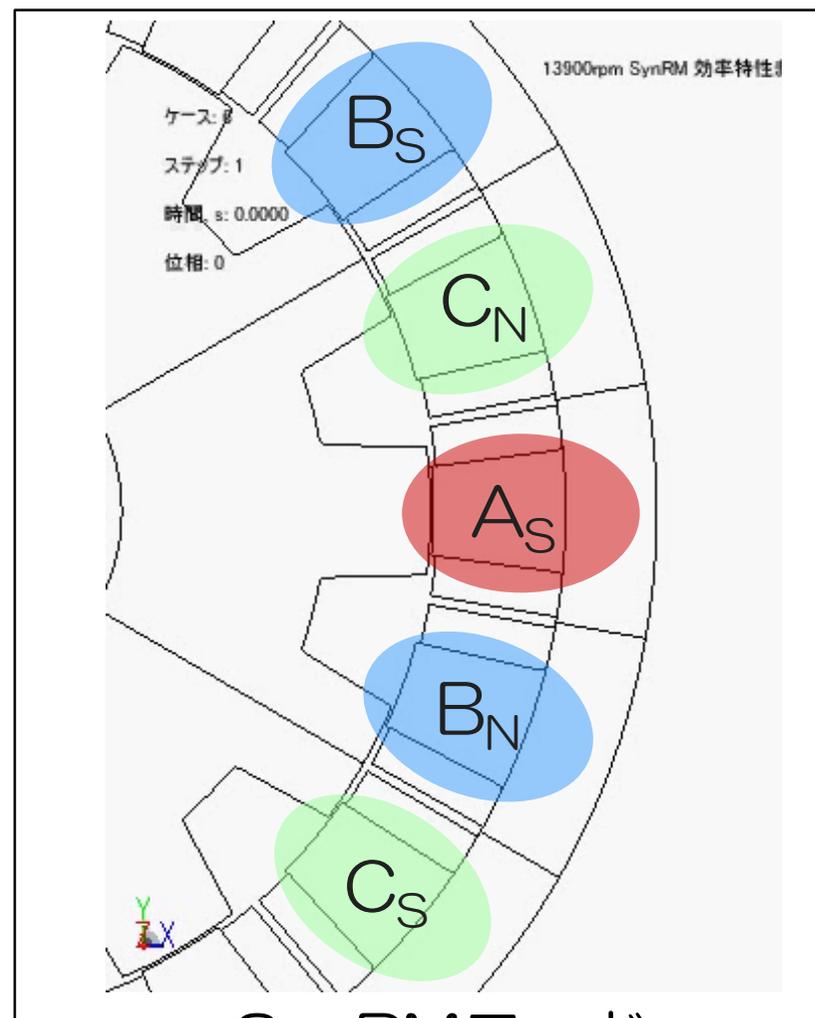
SynRMモード

巻線切り替えによる磁束の変化(例)

巻線を切り替えることにより回転子の磁束が変化



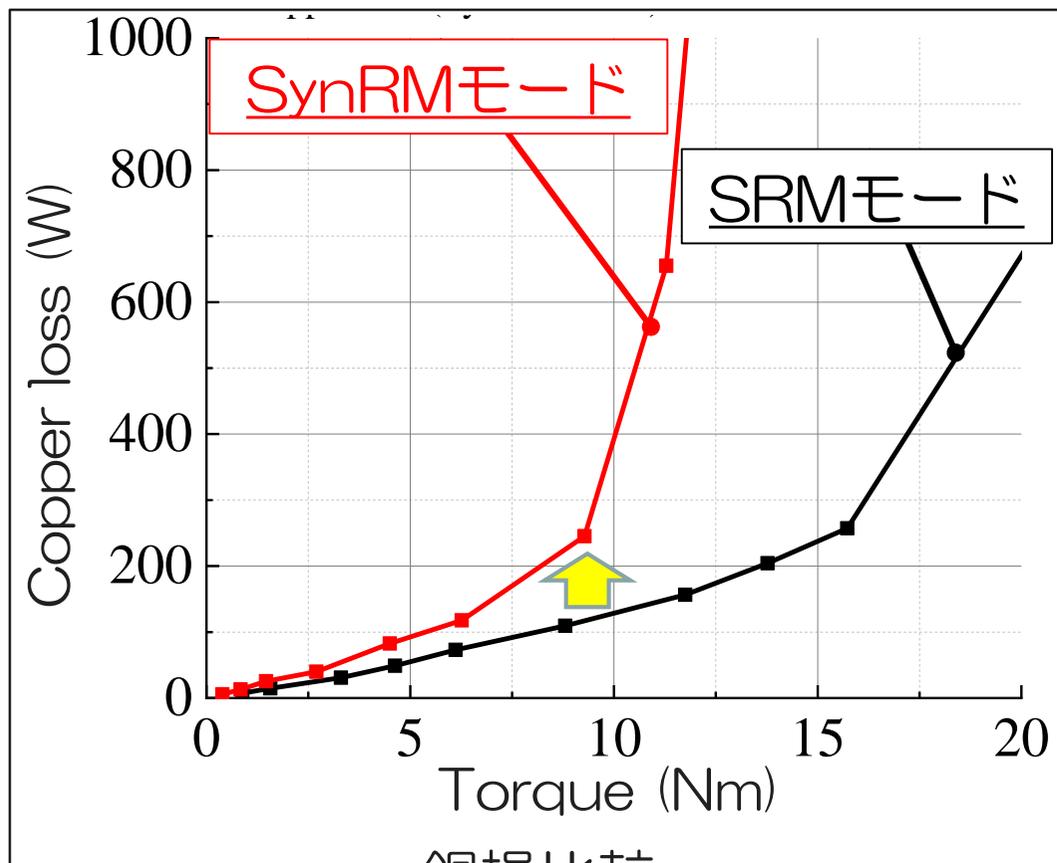
SRMモード



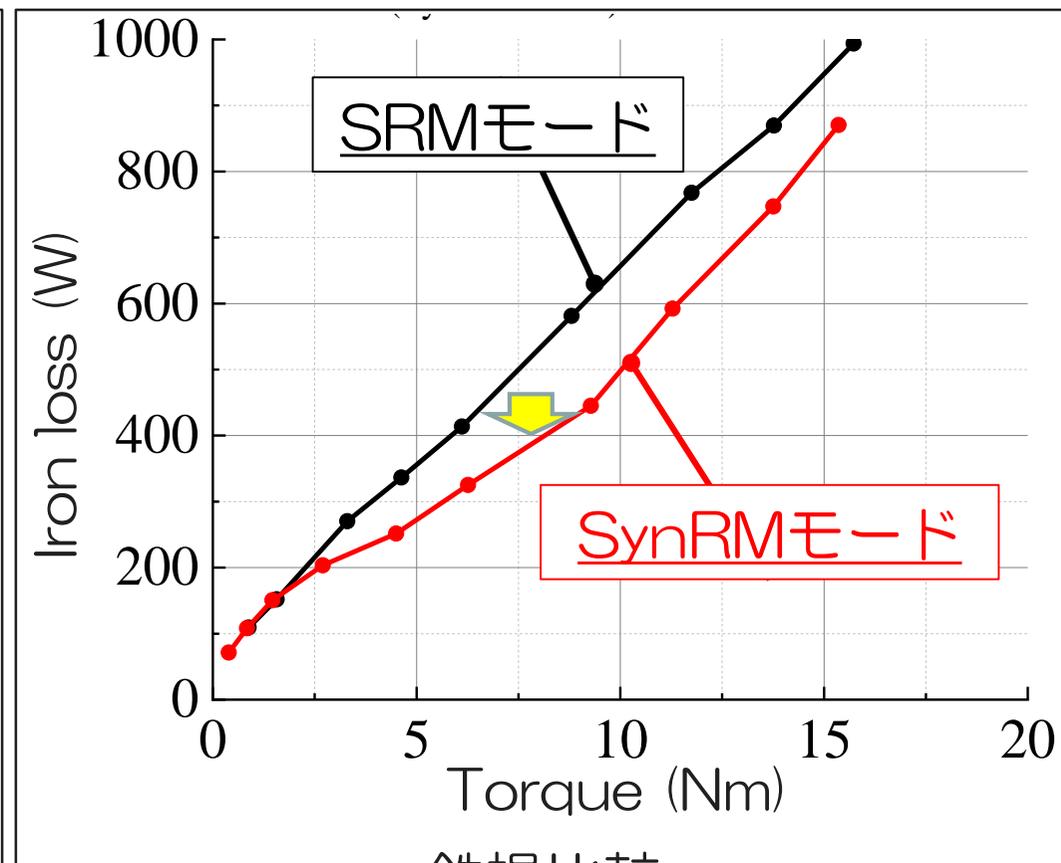
SynRMモード

巻線切り替えによる損失の変化(例)

SynRMモードでは SRMモードより、より低鉄損・高銅損の特性に変化
 =低出力領域ではSynRMモードの方が有利



銅損比較



鉄損比較

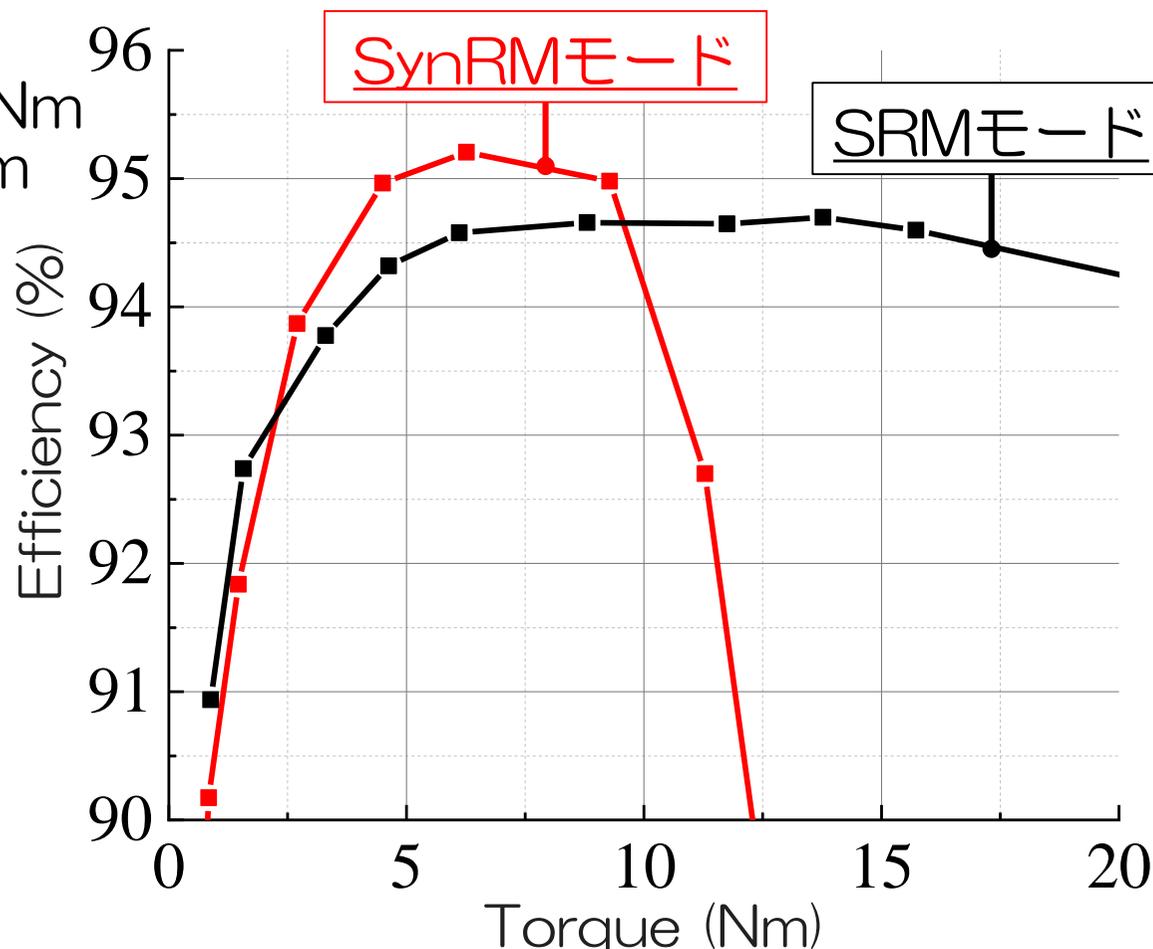
巻線切り替えによる効率の変化(例)

SynRMモードにより、SRMモードのみの場合より、
低出力領域においてより高い効率を実現

最高効率点比較・・・

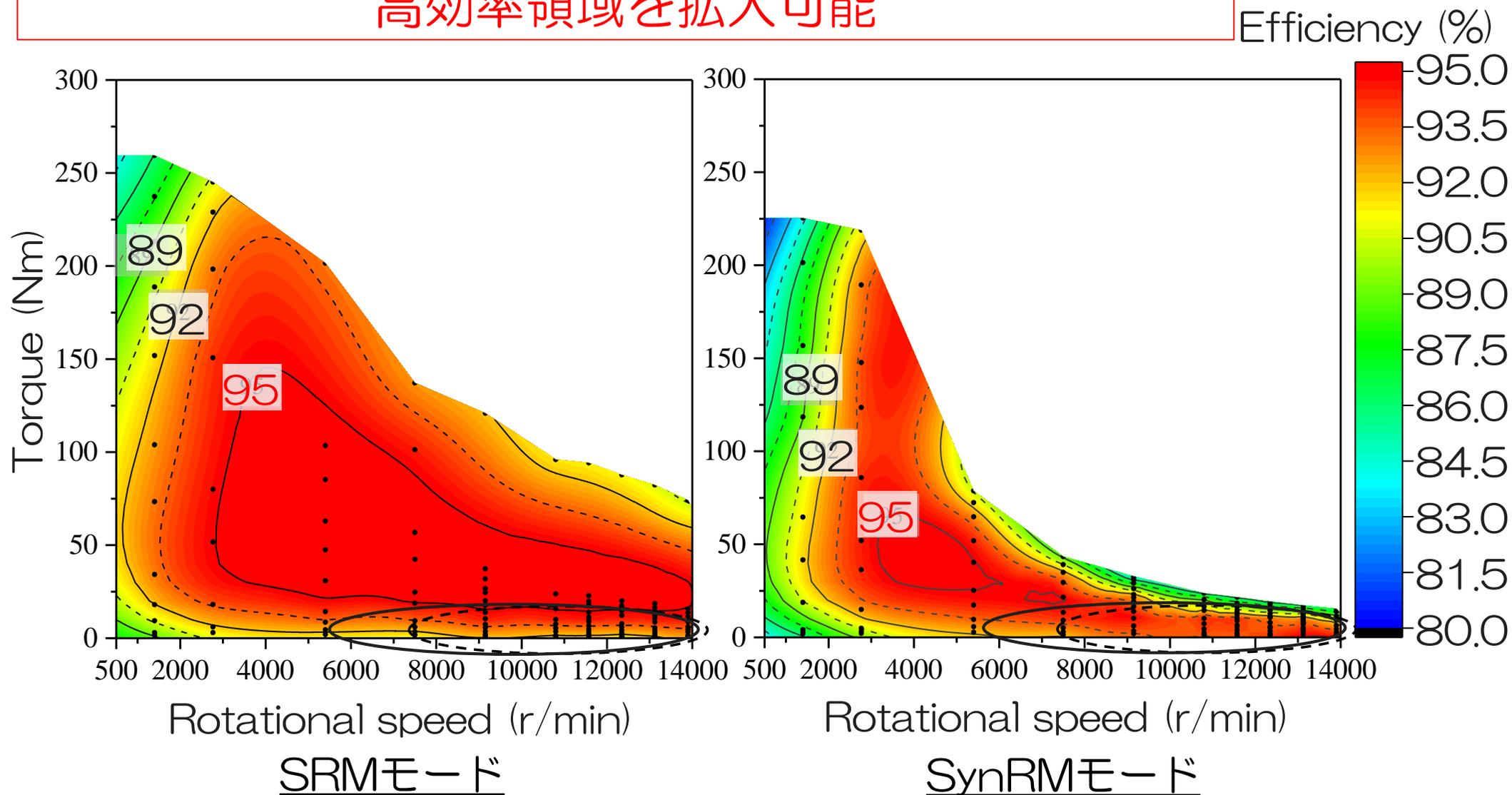
- ✓ SRMモード: 94.7% @ 13.8 Nm
- ✓ SynRMモード: 95.2% @ 6.3 Nm

SynRMモードは9 Nm以下の領域で、SRMモードより高効率。



巻線切り替えによる効率マップの変化(例)

SynRMモードにより、高速・低出力領域に
高効率領域を拡大可能



想定される他の用途

特性切替可能なリラクタンスマータにより、
低出力領域に高効率領域を拡大可能



- **大幅な可変速が要求される用途に最適**
 - 実施例の様な、自動車主機用モータ
 - 洗濯機等、両極端な動作領域を求められる家電
 - 動作モードと待機モードが存在する様な、ポンプ類

実用化に向けた課題

- 現在、解析にて基礎特性を同定
⇒実機試験による検証が必要
(特に、鉄損に関しては解析誤差が大)
- SynRMモードにおける効率向上幅がまだ小さい
⇒回転子形状のより最適化が必要 (実施中)
- 巻線を切り替えるためのスイッチング素子数増加
⇒より少ないスイッチング素子での特性切替

企業への期待

- 現在のモータ設計では、高効率化のために用途に合わせたモータ設計が不可欠となっている。
- また、実機による検証が未だに必要な分野である。
- もし、〇〇のような特性のモータが必要である、といったことが決まっておりましたら、ぜひとも我々の方にご相談ください。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 三相リラクタンスモータの制御方法
及び三相リラクタンスモータ制御装置
- 出願番号 : 特願2019-130193
- 出願人 : 富山大学
- 発明者 : 清田恭平

お問い合わせ先

富山大学

産学官連携コーディネーター 山本 肇

TEL 076-445-6391

FAX 076-445-6939

e-mail yamaha@ctg.u-toyama.ac.jp