# 非線形軟磁性材が切り拓く革新的な高効率IPMモータ

信州大学　工学部
特任教授　水野 勉

2025年8月5日

# 1. 従来技術とその問題点

(1)IPMモータの問題・課題

高速回転させるため　→　弱め界磁制御

（巻線電流によって界磁を弱めるために効率の低下が課題）

下記の問題・課題の解決方法が提案されているが、
さらなる問題を抱えている

(2)高速回転領域における効率を改善するために可変磁束モータが提案（表１）

①受動形　：中・高速回転領域において効率が改善

（漏れ磁束形）　：最大トルクが減少

②能動形　：中・高速回転領域において効率が改善

：追加の電源や機械的装置が必要であり、モータシステムが大形化・複雑化

# 1. 従来技術とその問題点

表１　可変磁束モータの分類 １/２

| 分類 | | 動作原理 | 利点 | 課題・問題 |
|---|---|---|---|---|
| 受動形（漏れ磁束形） | 回転子<br>漏れ磁束形 | ・フラックスバリアにおいて永久磁石の磁束を漏らす<br>・ギャップ磁束密度 の高調波成分減少<br>→　鉄損低減 | ・中～高速運転領域におけるモータ効率がアップ | ・最大トルクが減少 |
| | 固定子<br>漏れ磁束形 | ・ブリッジを用いて永久磁石の磁束を漏らす<br>・ギャップ磁束密度 の高調波成分減少<br>→　鉄損低減 | ・中～高速運転領域におけるモータ効率がアップ | ・最大トルクが減少<br>・巻線の占積率低下<br>→　モータの大形化 |
| | | ・補助磁極を用いて永久磁石の磁束を漏らす<br>・「磁性くさび」の効果によってギャップ磁束密度の高調波成分減少<br>→　鉄損低減 | ・中～高速運転領域におけるモータ効率がアップ | ・最大トルクが減少<br>・巻線の占積率低下<br>→ モータの大形化 |

# 1. 従来技術とその問題点

表１　可変磁束モータの分類 ２/２

| 分類 | | 動作原理 | 利点 | 課題・問題 |
|---|---|---|---|---|
| 能動形 | 巻線付加形 | ・外部電源からゼロ相巻線に電流を流して、軟磁性体の動作点を可変 | ・中～高速運転領域におけるモータ効率が向上 | ・ゼロ相電流を流すための外部電源が必要<br>・ゼロ相巻線の銅損による効率の低下<br>・モータの大形化 |
| | 磁石位置可変形 | ・機械的に回転子（永久磁石）の位置を変化 | ・広範囲な運転領域においてモータ効率が向上 | ・回転子の位置を可変させるための機械機構の耐久性<br>・大形化 |
| | 巻線界磁形 | ・巻線界磁電流による界磁強さのコントロール | ・広範囲な運転領域においてモータ効率が向上 | ・界磁電流を流すための外部電源が必要<br>・界磁巻線の銅損による効率の低下<br>・スリップリングの耐久性（最大回転数1万rpm）<br>・高速回転困難<br>→ モータの小形・軽量化は困難 |

# 2. 新技術の特徴・従来技術との比較

## *d* 軸フラックスバリアを装備した可変磁気抵抗形可変磁束モータ

従来のIPMモータと比較して

(1)最大トルクを維持

(2)中・高速回転域におけるトルクの大幅な増加

(3)回転数範囲の拡大

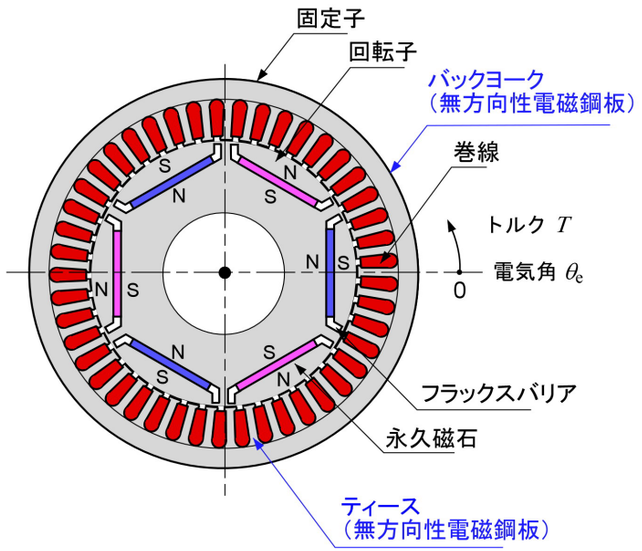
(4)高効率領域の拡大

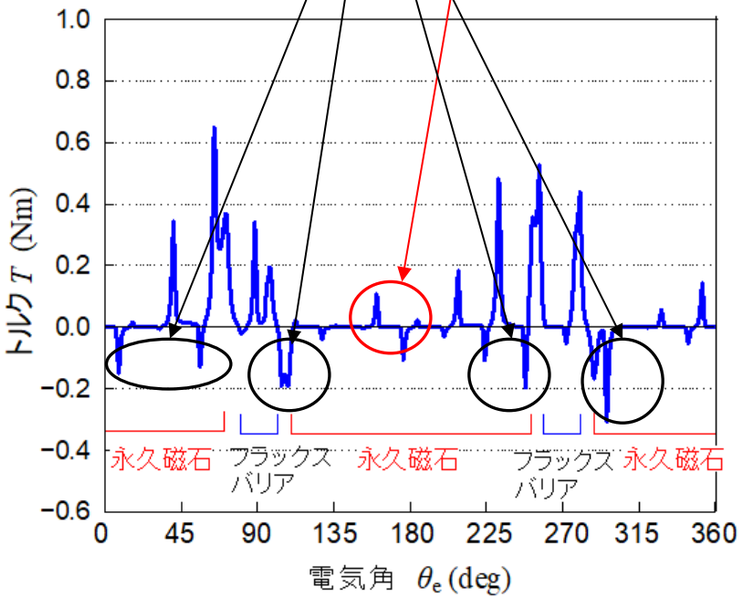
※追加の装置、巻線、追加の電源などが不要

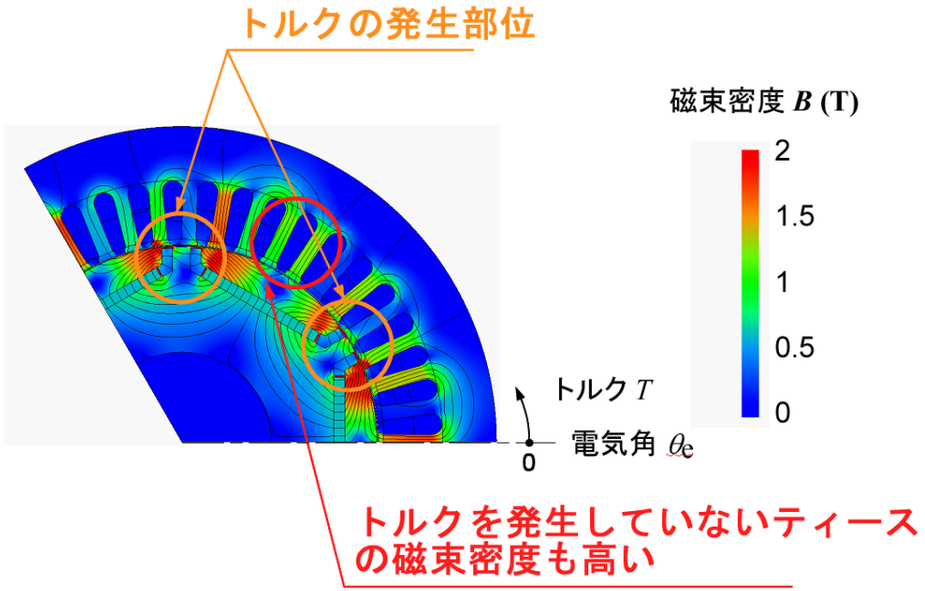
# 2. 新技術の特徴・従来技術との比較

負方向のトルクが発生（高次成分：大、トルクリプル：大）

・永久磁石の磁束がティースに流れる
　→　弱め界磁によって、永久磁石の磁束を打ち消す（銅損：大）
・有効なトルクを発生していない




**(a)基本構造**
**(6 極，45 スロット，三相分布巻)**

**(b) 回転子表面に発生するトルク分布**

**(c)磁束密度分布**

**図１　従来のＩＰＭモータの基本構造とその動作原理**

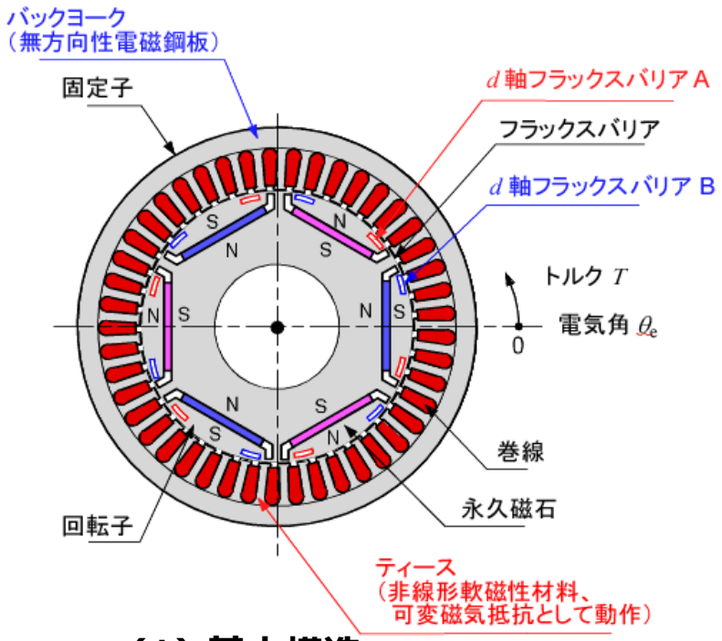
# 2. 新技術の特徴･従来技術との比較

## 問題・課題の解決方法

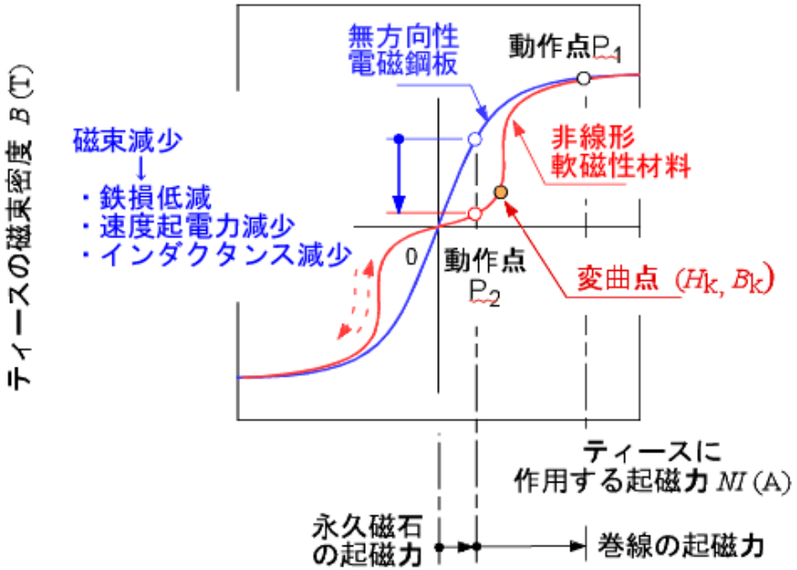
・解決方法 1
*d* 軸フラックスバリアの装備
→ 正方向トルク増加，負方向トルク減少
→ トルク増大、トルクリプル低減

・解決方法 2
非線形軟磁性材料の採用

・効果




(1) 基本構造



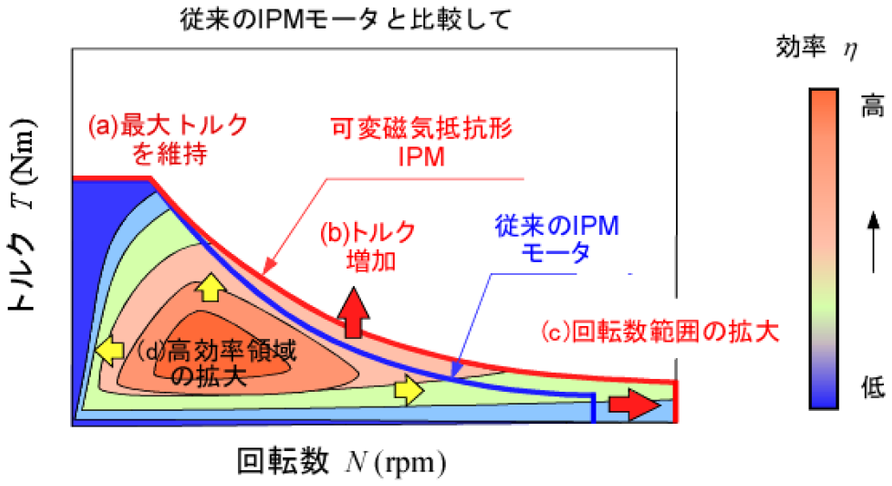




**図２　*d* 軸フラックスバリアを装備した可変磁気抵抗形ＩＰＭモータの基本構造とその動作原理**

# 2. 新技術の特徴・従来技術との比較

・解析条件

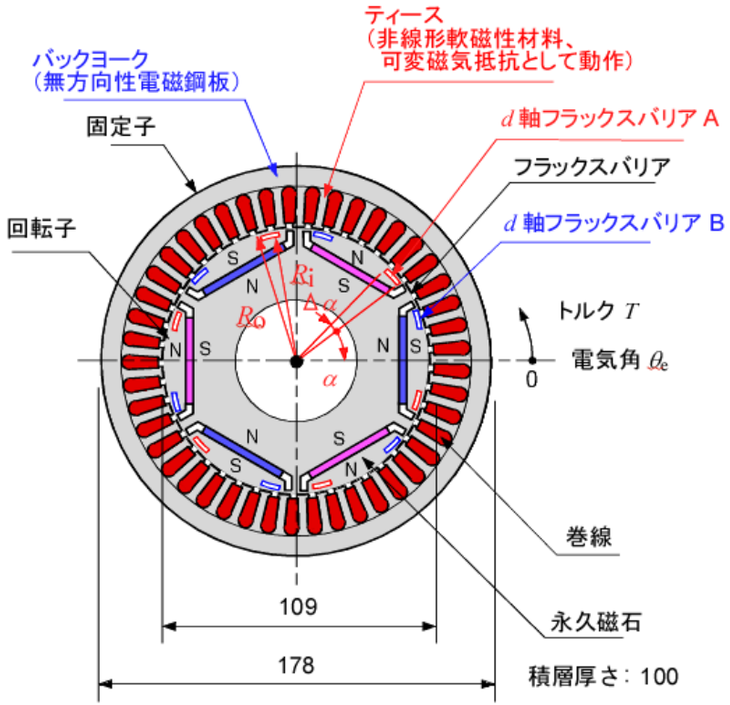



図３　*d* 軸フラックスバリアA、Ｂを装備した可変磁気抵抗形ＩＰＭモータの構造（単位：mm）

・駆動条件
(1)相電圧 ： 600V以下
(2) 相電流： 300 A（振幅）以下

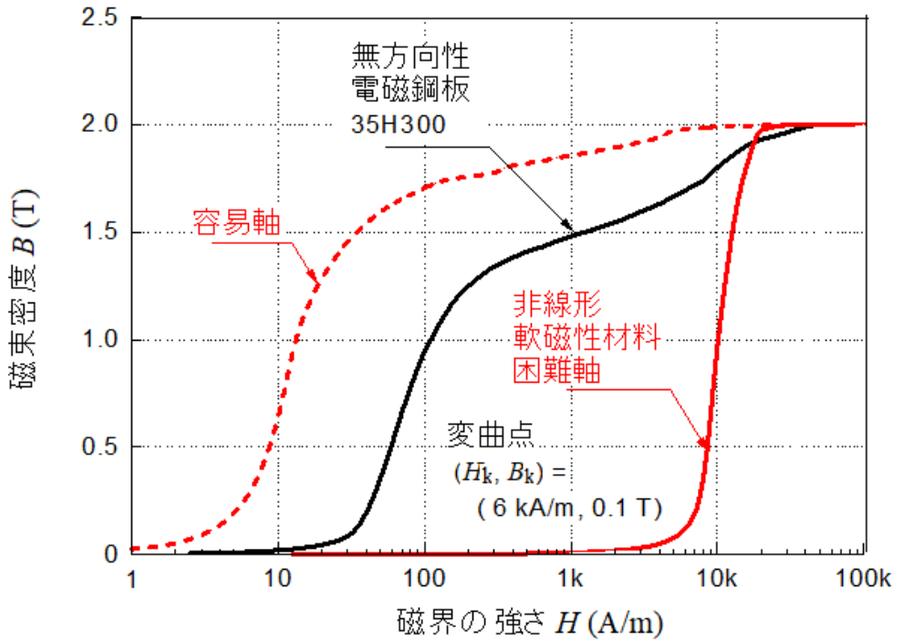
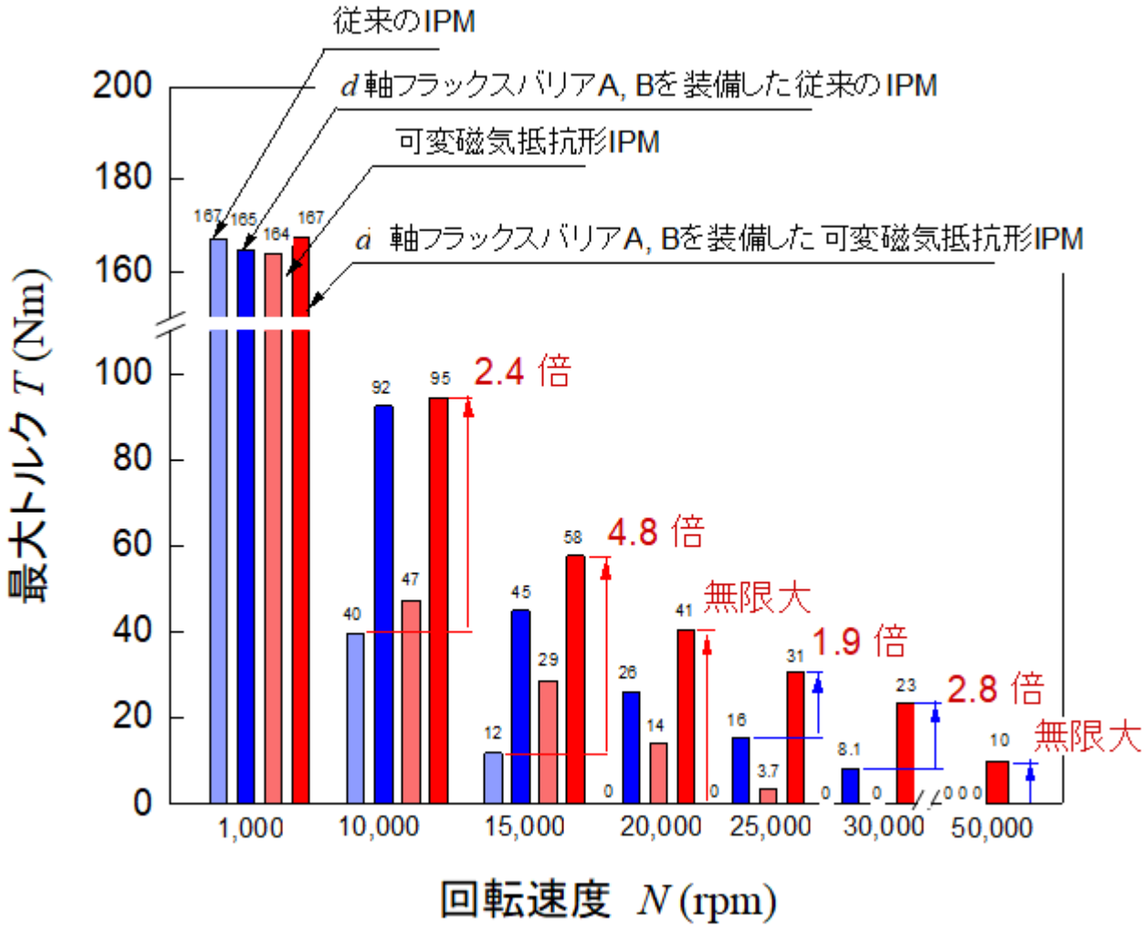



図４　非線形軟磁性材料の直流磁化特性

※非線形軟磁性材料の鉄損特性は、35H300と同等と仮定

# 2. 新技術の特徴・従来技術との比較

## ・最大トルクの増加




**(a)最大トルクの維持**
**低速回転域におけるトルクを維持**

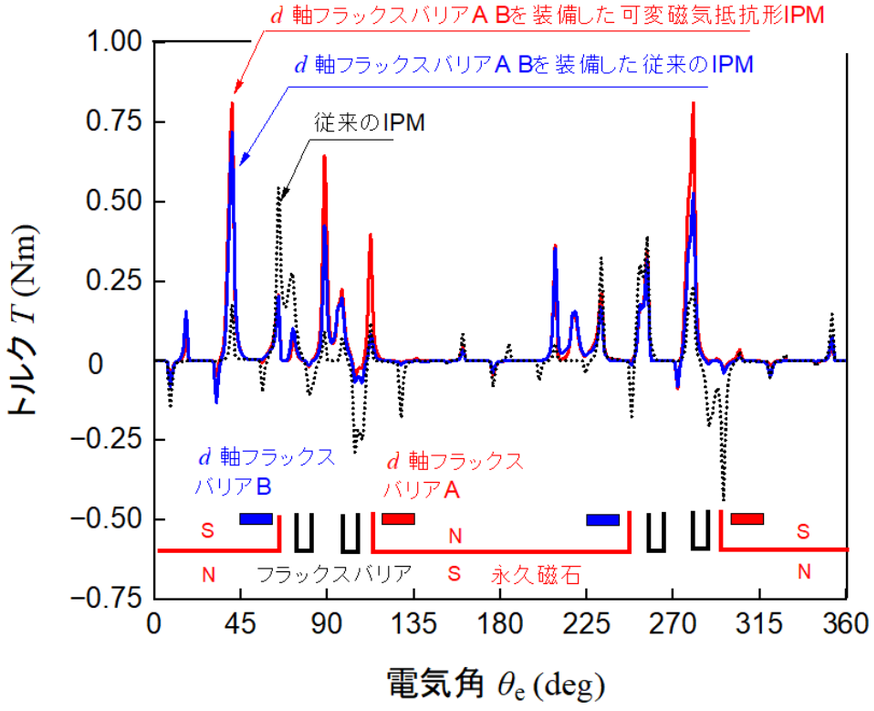
**(b)中・高速回転域におけるトルクの大幅な増加**
**10,000 rpm～20,000 rpm の回転速度範囲では,**
**トルクが最大4.8 倍以上に増加**

**(c)回転数範囲の拡大**
**回転数の上限は従来の15,000 rpm から**
**50,000 rpm （超高速回転）へと3.3 倍以上拡大**

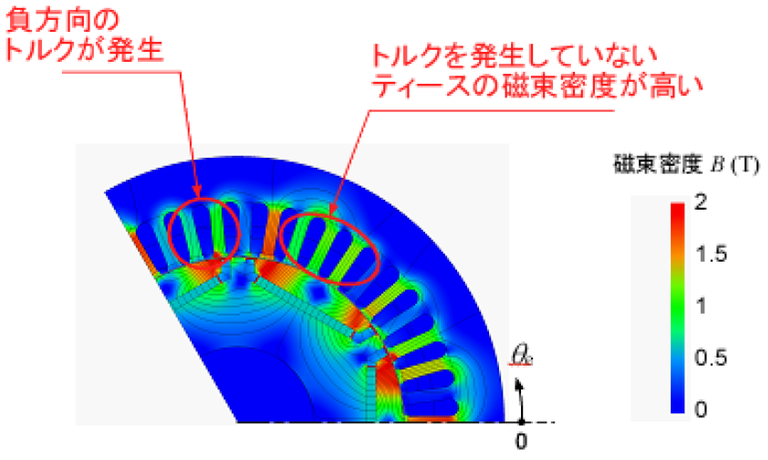
**図５　相電圧600V以下・相電流300A以下の条件下で,**
**モータ4機種が発生可能な最大トルク**

# 2. 新技術の特徴・従来技術との比較

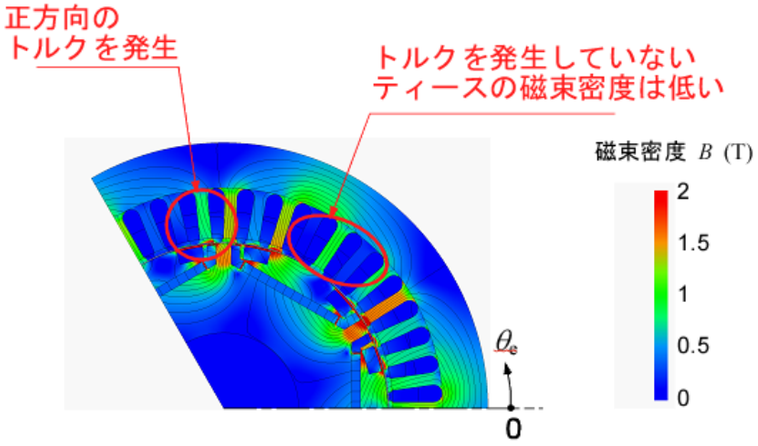
## ・トルク分布の改善




(a)回転子表面に発生する
トルク分布の比較




(b)従来のIPMモータ
の磁束密度分布

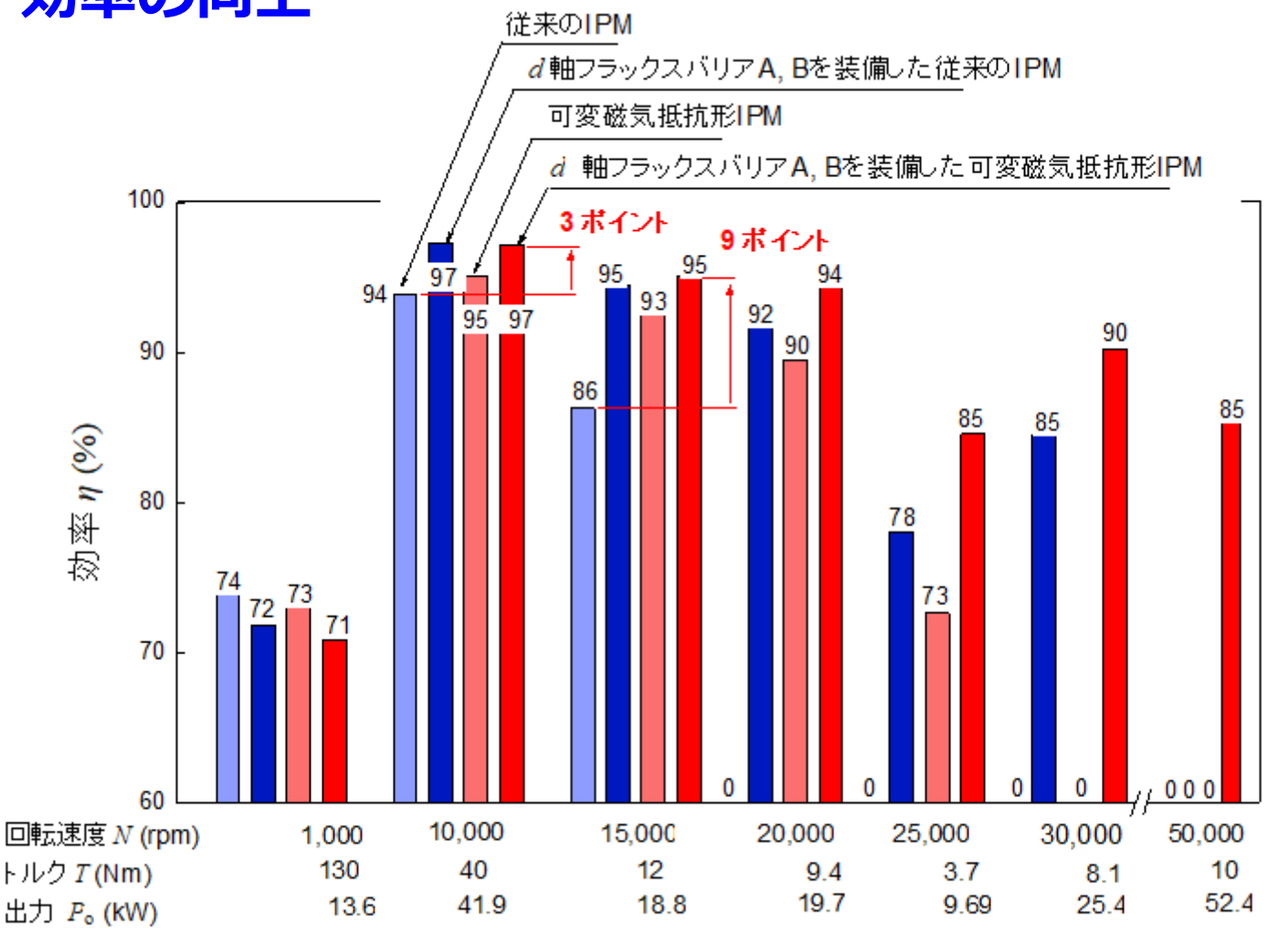



(c)フラックバリアA Bを装備した
可変磁気抵抗形IPMモータ

図６　相電圧600V以下・相電流300A以下の条件下において回転速度15,000rpmにおける従来のIPMモータとフラックバリアA, Bを装備した可変磁気抵抗形IPMモータのトルク分布と磁束密度分布の比較

# 2. 新技術の特徴・従来技術との比較

・効率の向上




(1)15,000rpmでは9ポイント向上

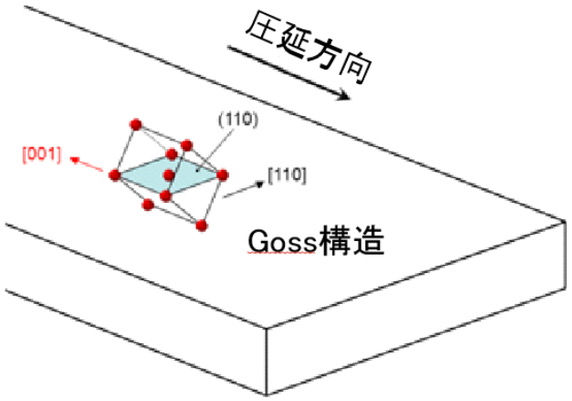
(2)50,000rpmでも85%と高効率

図７　相電圧600V以下・相電流300A以下の条件下における，回転速度・トルクをパラメータとするモータ4機種の効率特性の比較

# 3. 非線形軟磁性材料の可能性

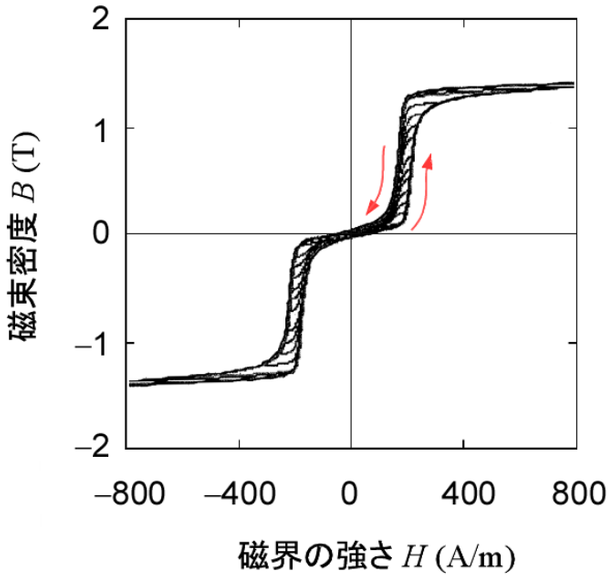
**ポイント**
①Goss構造の発現
②結晶磁気異方性定数$K_1$，$K_2$の増加
③回転磁化によるヒステリシス損、鉄損の低減

b.c.c.体心立方格子構造,
(110)[001]結晶粒が圧延方向
に配向

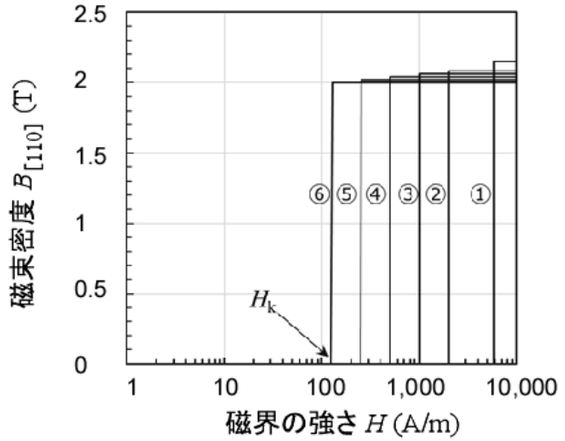



(a)方向性電磁鋼板における
結晶粒配向

磁壁移動のために
ヒステリシス損が大きい




(b)方向性電磁鋼板30P100材の
圧延直交方向$B$-$H$特性




① $K_1$=47200 J/m³、$K_2$=-750 J/m³ ; Pure iron
② $K_1$=16000 J/m³、$K_2$=-256 J/m³
③ $K_1$=8000 J/m³、$K_2$=-128 J/m³
④ $K_1$=4000 J/m³、$K_2$=-64 J/m³
⑤ $K_1$=2000 J/m³、$K_2$=-32 J/m³
⑥ $K_1$=1000 J/m³、$K_2$=-16 J/m³ ; 35JG135

Si増加

(c)単結晶鉄ならびにSi-Feの
磁気異方性定数と変曲点磁界の関係の計算値

図８　非線形軟磁性材料の可能性

# 4. 想定される用途

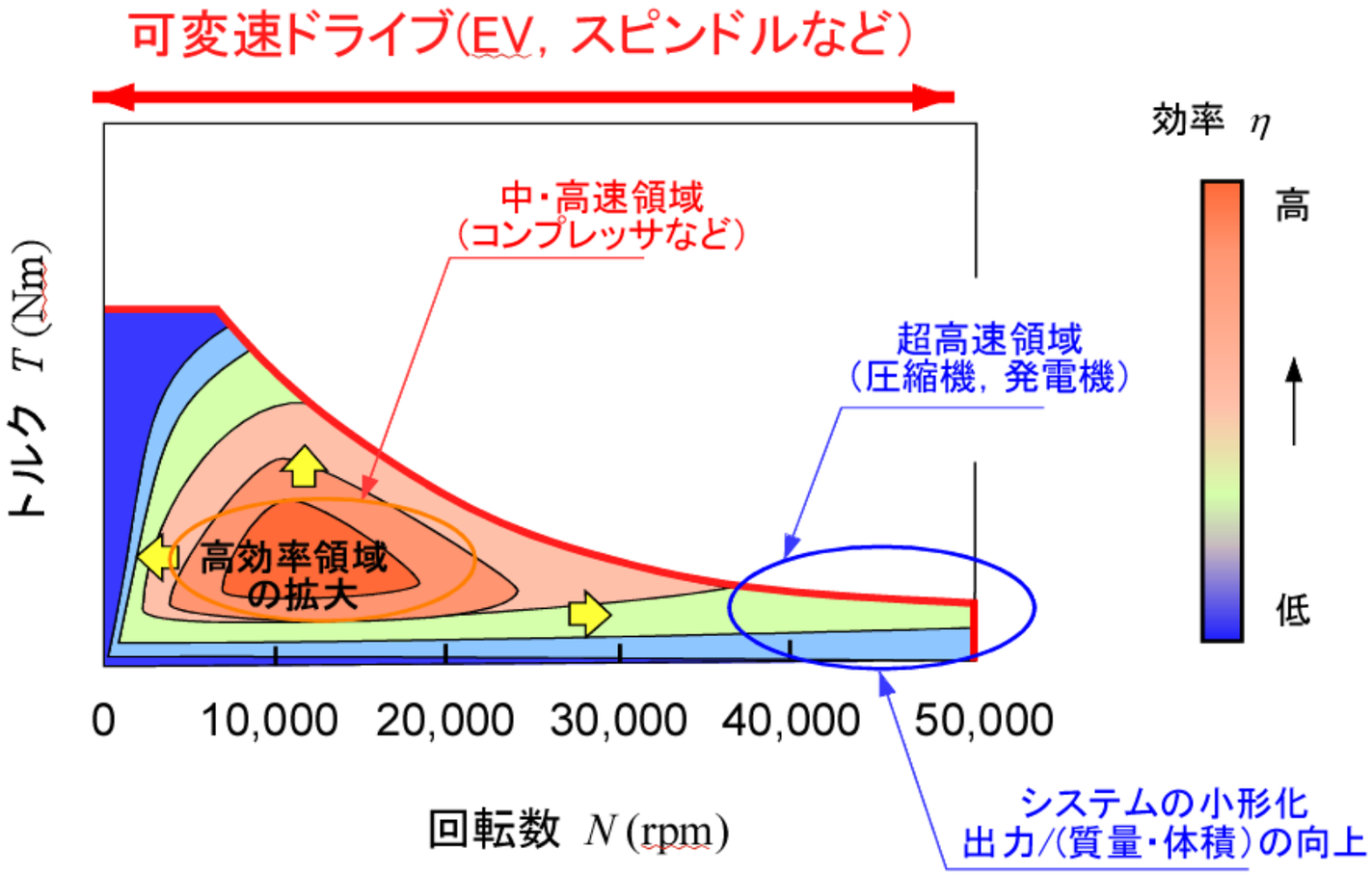



**図９　可変磁気抵抗形ＩＰＭモータの用途**

# 5. 実用化に向けた課題

- 電磁界解析を用いて、*d*軸フラックバリアを装備した可変磁気抵抗形ＩＰＭの優勢性に関して計算実証済み
- 今後、非線形軟磁性材料の磁気特性を実証する必要がある
- 実用化に向けて、非線形軟磁性材料を用いた固定子の製作方法（分割コアなど）を確立する必要もあり

# 6. 社会実装への道筋

## 表２　研究開発のマイルストーン

| 時期 | 取り組む課題や明らかにしたい原理等 | 社会実装へ取り組み |
|---|---|---|
| 基礎研究 | ・可変磁気抵抗形ＩＰＭの可能性検討 | |
| 現在 | ・電磁界解析を用いて、*d*軸フラックバリアを装備した可変磁気抵抗形ＩＰＭの優勢性を計算実証済み | ・JST、NEDO等の事業への研究応募 |
| ２年後 | ・方向性電磁鋼板の圧延直交方向磁気特性を定量化<br>・方向性電磁鋼板を用いた磁気抵抗形ＩＰＭの製作（0号機、分割コアなどの製作方法の検討） | |
| ３年後 | ・Goss構造多結晶鉄板の圧延／熱処理条件を明確化<br>・Goss構造多結晶新材料の探索 | |
| ５年後 | ・非線形磁性材料（変曲点（0.5T，6kA/m））の開発<br>・非線形磁性材料を用いた可変磁気抵抗形ＩＰＭの製作と機能実証 | ・非線形軟磁性材料のサンプル提供<br>・特定用途向け可変磁気抵抗形ＩＰＭの検討 |

# 7. 企業への期待

- 軟磁性材料の技術を持つ、企業との共同研究を希望
- モータの製造技術（分割コアなど）の技術を持つ、企業との共同研究を希望
- また、可変速ドライブ、超高速ドライブを開発中の企業には、本技術の導入が有効と思われる。

# 8. 企業への貢献、PRポイント

- 本技術は幅広く応用が可能なため、他機種のモータにも展開可能で、より企業に貢献できると考えている

- 信州大学の当該研究チームには、軟磁性材料、モータ、パワーエレクトロニクスなどの多くの研究実績があり、
（１０．産学連携の経歴　参照）スムーズに共同研究を推進できる

- 本格導入にあたっての技術指導等

# 9. 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称　：モータ
- 出願番号　：特願2024-211207
- 出願人　：国立大学法人信州大学、山洋電気株式会社
- 発明者　：水野勉、堀内学

# 10. 産学連携の経歴

## 表３　研究開発実績

**企業との共同研究多数**

| FY2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 | 2026 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **JST研究成果展開事業 京都スーパークラスタープログラム**<br>成果物；磁性コンポジット磁心、インダクタ/トランス、コンバータ | | | | | | | | | | | | | |
| **NEDO「次世代パワーエレクトロニクス応用システム開発の先導研究 SiC/GaNパワーデバイスMHz帯スイッチングDC-DCコンバータの先導研究**<br>成果物；Beyond MHz用コンポジット磁心、インダクタ／トランス、コンバータ | | | | | | | | | | | | | |
| **JAXA公募研究 小型・軽量化のためのMHz帯駆動DC-DCコンバータの先進要素開発**<br>成果物；Beyond MHzパワーインダクタ、高電力密度コンバータ | | | | | | | | | | | | | |
| **JST未来社会創造事業「探索研究」 100MHzスイッチング電源用磁心材料開発**<br>成果物；Beyond MHz低鉄損コンポジット磁心、Beyond MHzコンバータ | | | | | | | | | | | | | |
| **JST-OPERA 次世代ワイドギャップ半導体技術を基盤とするスマートエネルギーイノベーションの創出**<br>成果物；低鉄損圧粉磁心、コンバータ／インバータシステム | | | | | | | | | | | | | |
| **NEDO航空機用先進システム実用化プロジェクト 推進用電動機制御システム**<br>成果物；低ノイズ100kWモーターインバータ、高出力/質量比モータ、交流銅損低減技術 | | | | | | | | | | | | | |
| **文科省革新的パワエレ事業 磁気異方性軟磁性材料を用いた高周波・電力変換用トランス・インダクタの開発**<br>成果物；異方性薄帯（低損失軟磁性）材料、高効率トランス・インダクタ | | | | | | | | | | | | | |
| **成長型中小企業等研究開発支援事業（Go-Tech事業）**<br>磁性くさびを用いた高出力密度モータ及びトルクフィードバック制御システムの開発 | | | | | | | | | | | | | |

# 11. お問い合わせ先

株式会社信州TLO

ＴＥＬ　0268－25－5181

ＦＡＸ　0268－25－5188

e-mail　info@shinshu-tlo.co.jp