

2019-10-4

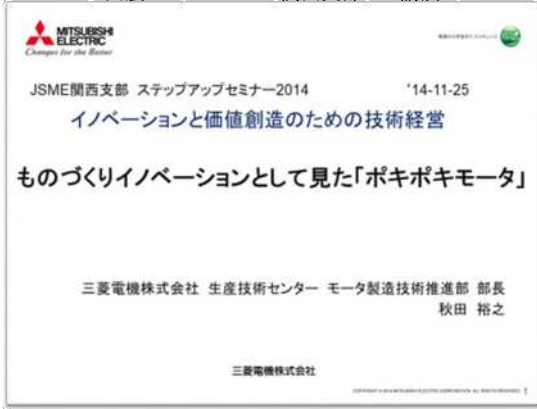
日本機械学会 状態監視振動診断技術者コミュニティ 第11回ミーティング

## 生産設計と設備開発による性能と生産性の両立事例

※ プレゼンの出展: 2014/11 JSME関西支部での講演

# ポキポキモータ

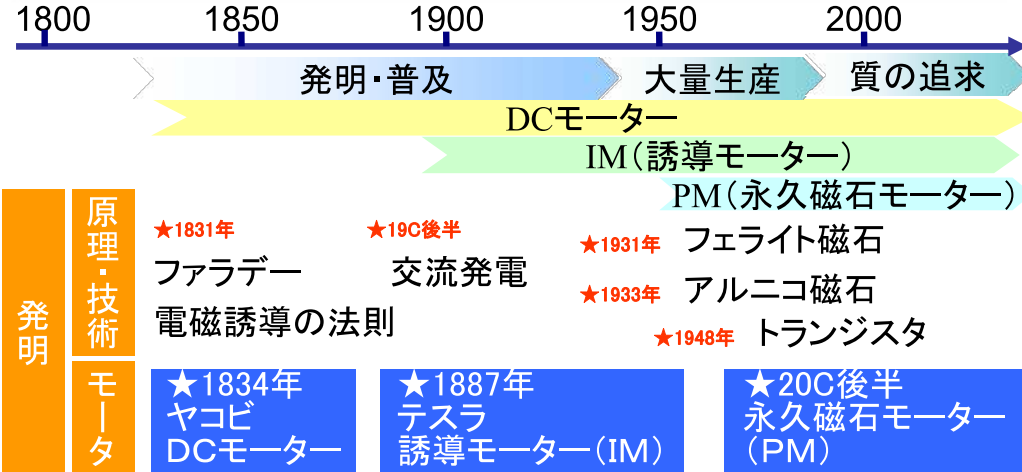
三菱電機株式会社 名古屋製作所  
新城工場長  
秋田 裕之



三菱電機株式会社

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

## モータの歴史



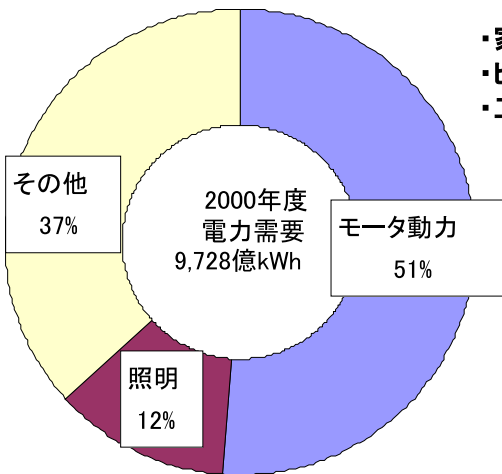
◆1829 ヘンリー  
絹絶縁によりコイル密度を増加し、強力な電磁石を製作

「高密度巻線と高生産性の両立」は、モータづくりにおける普遍的な価値である

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

## モータ高効率化の背景

### モータの電力消費量



- ・家電 (エアコン、冷蔵庫、換気扇、ファンヒータ・・・)
- ・ビル (エレベータ、エスカレータ、空調・・・)
- ・工場 (生産設備、空調、搬送機・・・)

ex. モータ効率 3%向上  
↓  
9728億kWh × 51% × 3% = 149億kWh  
(360万戸の家庭電力に相当)

電力の用途別消費率

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

## モータ高効率化の背景

### ブラシレスDCモータの高効率化

$$\text{モータ効率} = \frac{\text{出力 (機械エネルギー)}}{\text{入力 (出力+損失)}} = \frac{550\text{W}}{550\text{W}+43\text{W}} = 92.7\%$$

・冷房定格運転 出力550Wの場合



損失 (43W)  
銅損 (I<sup>2</sup>R) (26W)

低抵抗化 →  
低電流化・・・磁力の向上  
(トルク定数向上)

集中巻き化  
永久磁石搭載  
占積率向上

鉄損 (ヒステリシス損と渦電流損) (17W)

→ スロットコンビネーション最適化

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

## モータ性能と生産性のトレードオフ

| コア構造<br>と<br>巻線方法 |     |         | A 一体コア   | B 分割コア    |
|-------------------|-----|---------|----------|-----------|
|                   |     |         | コア構造     |           |
| コイル               | S/F | ノズルスペース | デッドスペース大 | デッドスペース小  |
|                   |     | 整列性     | 乱れやすい    | 良好        |
|                   |     | 巻線性     | 巻線速度遅い   | 高速巻線      |
| コア                |     | 真円度     | 良好       | 誤差が累積しやすい |
|                   |     | 組立性     | 部品数少ない   | 部品数多い     |

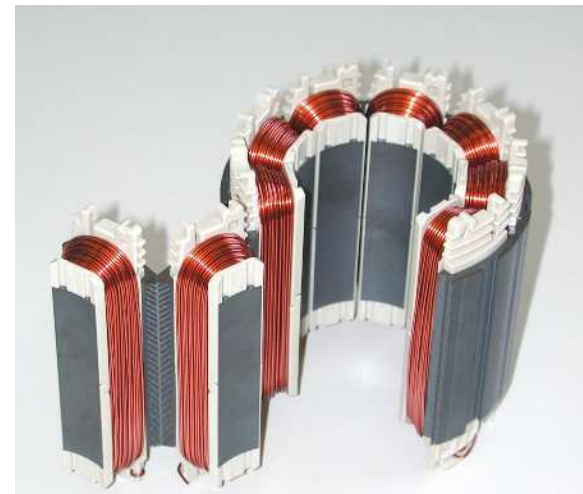
コアの性能・生産性○

コイルの性能・生産性○

両者の長所をあわせ持つような、コア構造の工夫が課題

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

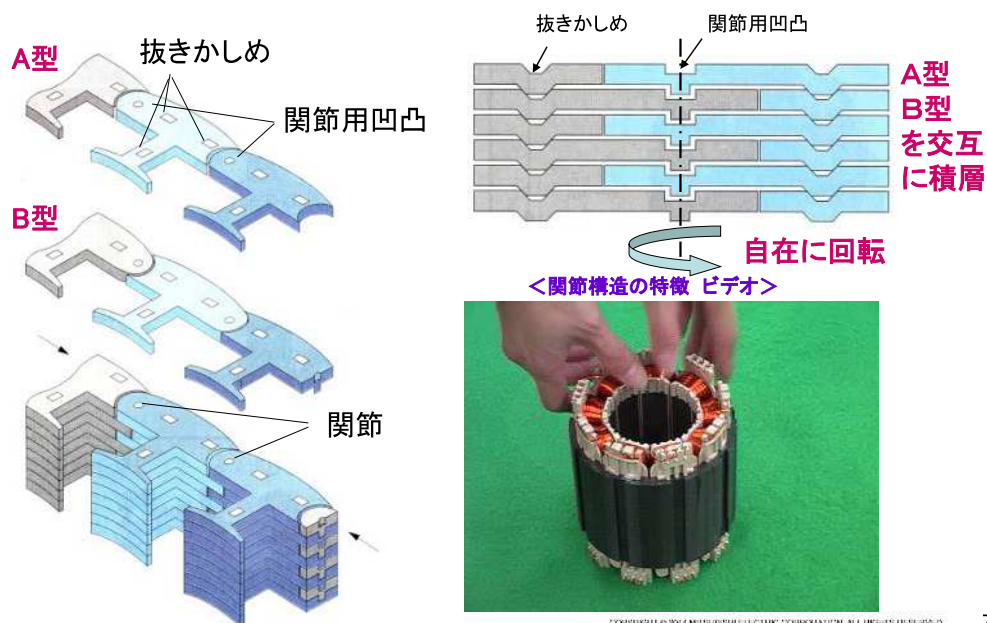
大きな逆反り姿勢を可能とする回転連結ステータの実現  
(2012年市村産業賞受賞)



第二世代 ポキポキモータ「ジョイントラップコア」

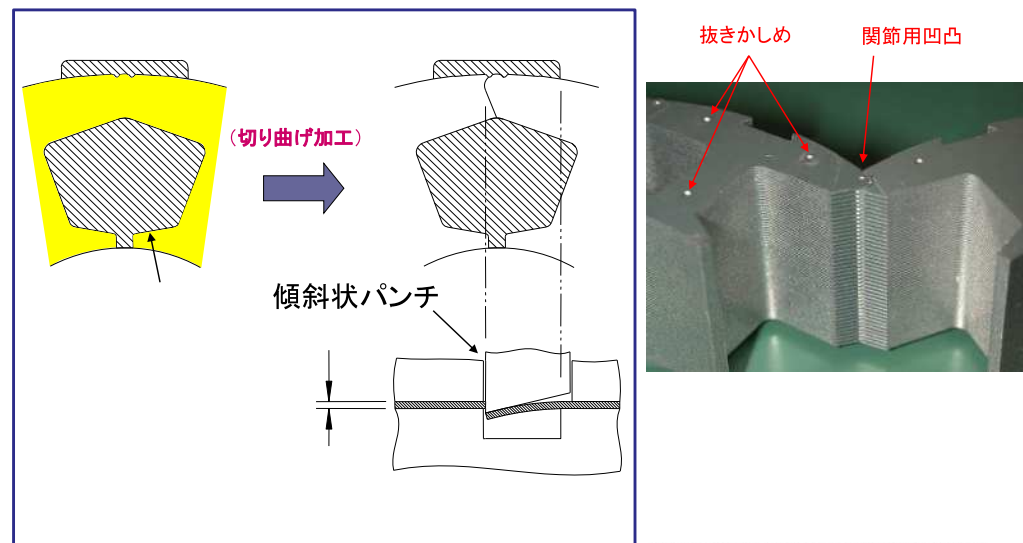
COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

## 回転連結ステータ鉄心の構造



COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

切り曲げ加工による合わせ精度の向上  
<効果> ・接合面の合わせ精度向上  
・材料ロス削減

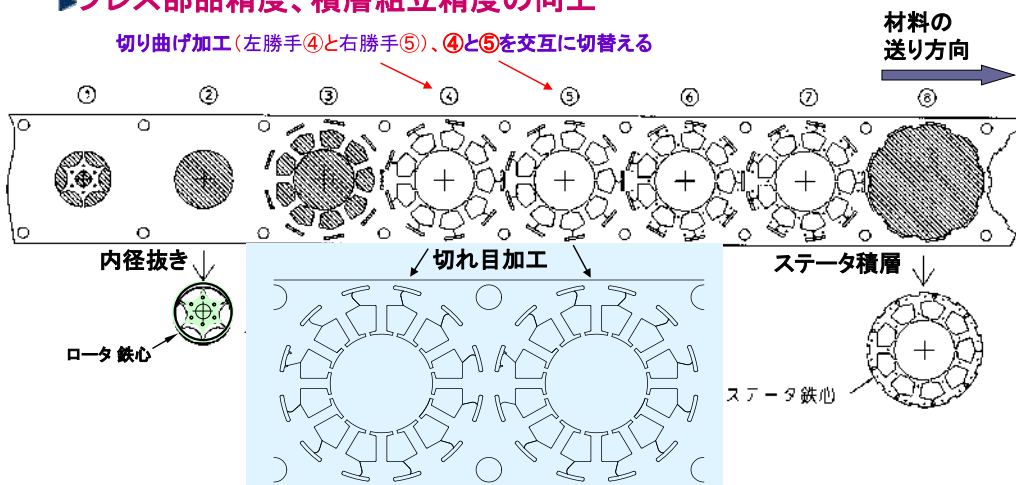


COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

## 高精度金型技術を用いた順送プレス工程

▶ プレス部品精度、積層組立精度の向上

切り曲げ加工(左勝手④と右勝手⑤)、④と⑤を交互に切替える



### 加工技術のポイント

- (1) 高真円度の内径パンチ加工(②)
- (2) すきまのない切れ目加工(④、⑤)
- (3) 抜き鉄心相互にずれのない積層位置の確保(プレス内で上下にA、Bを交互に接続)

高い真円度

## 生産技術と設計技術の相互作用による構造革新

● 鉄心の回転連結構造による巻線加工スペースの飛躍的拡大と鉄心精度の向上

- ▶ 発想の転換による制約条件の排除
- ▶ モータ高性能と高生産性を両立

## 生産技術側面

● 鉄心の逆反り姿勢変形を伴う高速巻線技術、整列巻線技術

- ▶ 太線による巻線占積率の向上

● 回転連結した鉄心の金型プレス技術

- ▶ 鉄心真円度の向上

## 設計技術側面

● 高密度巻線、重ね組立鉄心構造による最適電磁設計

- ▶ モータ効率、トルクの向上

● スロットオープニングの最適化設計、段差精度管理

- ▶ トルク脈動の低減

| 鉄心構造と製造方法 |       | A<br>一体鉄心  | B<br>分割鉄心 | C<br>薄肉連結鉄心 | D<br>回転連結鉄心 |
|-----------|-------|------------|-----------|-------------|-------------|
| 鉄心構造      |       | スロット(巻線空間) |           |             |             |
| 製造方法      |       | 磁極ティース     |           |             |             |
|           |       | 巻線ノズル      | 巻線ノズル     | 巻線ノズル       | 巻線ノズル       |
| 巻線        | ノズル軌道 | × デッドスペース  | ○ 隙間小     | ○ 隙間小       | ○ 隙間小       |
|           | 整列性   | × 非整列      | ○ 整列      | △ 非整列(太線)   | ○ 整列        |
| 鉄心        | 鉄心精度  | ○ 良好       | × 誤差が累積   | × 誤差が累積     | ○ 良好        |
|           | 部品数   | ○ 少        | × 多       | ○ 少         | ○ 少         |

A: コアの性能・生産性○

B: コイルの性能・生産性○

## ものづくりのアイデアで製品構造を変える



回転連結鉄心 (特許3279279号)

巻線しやすい鉄心



逆反り巻線機 (特許3681631号)

高精度な巻線機

セットで開発

整列で高密度化



整列コイル (特許3625185号)

● 高性能と高生産性を両立

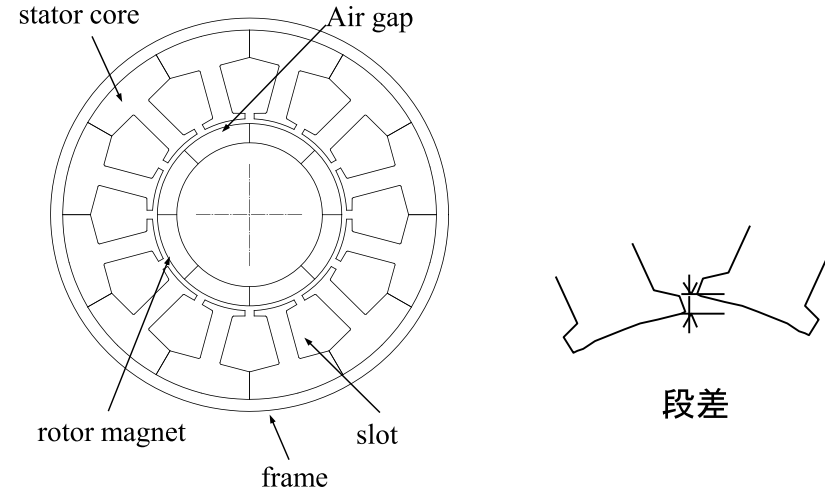
● 開発品の量産化がスムーズ

※ ホキホキモータの振動関連テーマ

## 分割鉄心を用いたモータのトルク脈動低減

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

## 分割型鉄心の課題

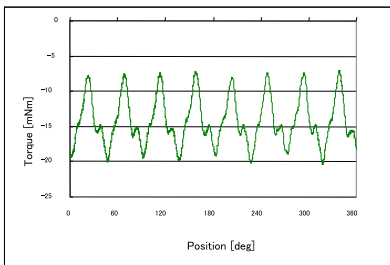
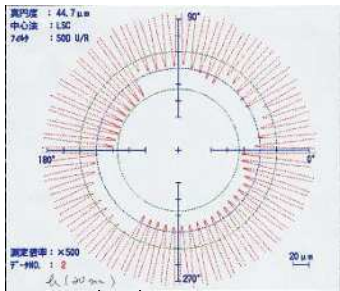


鉄心単品精度、組み立て誤差により内径形状精度が悪化

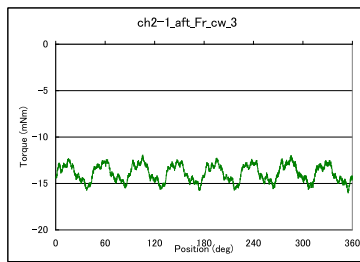
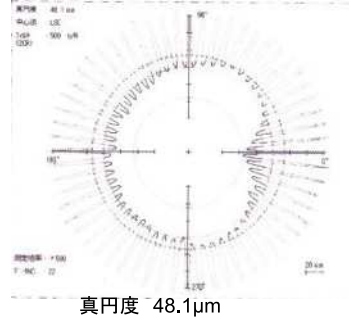
COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

## 内周形状とコギングトルク

CASE 1 段差形状モデル

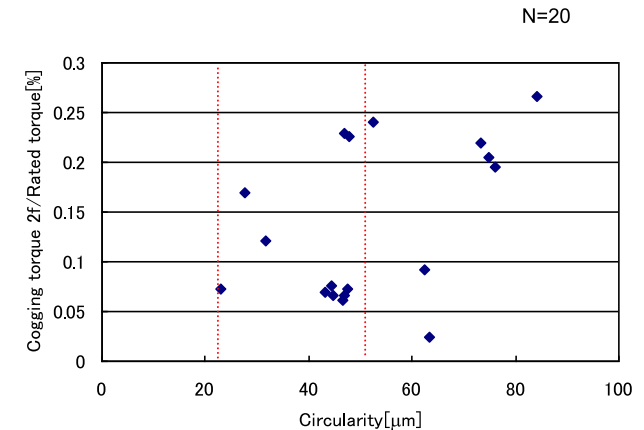


CASE 2 連続形状モデル



COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

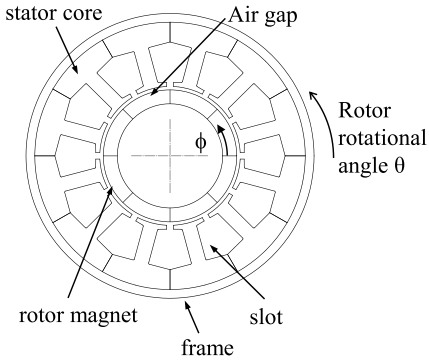
## 真円度とコギングトルク2f成分の関係



COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

# 内周形状とトルクの関係

(T:トルク, E:磁気エネルギー, F:起磁力, P:パーミアンス, g:エアギャップ, p:極数)



【φの位置dφに働くトルク】

$$dT(\phi, \theta) = \frac{\partial}{\partial \theta} \{dE(\phi, \theta)\}$$

【dφのエアギャップに生じるエネルギー】

$$dE(\phi, \theta) = \frac{k}{2\mu_0} \cdot \{F(\phi)\}^2 \{P(\phi, \theta)\}^2 d\phi$$

【一周分のトルク】

$$T(\theta) = \int_0^{2\pi} \frac{k}{2\mu_0} \cdot \{F(\phi)\}^2 \frac{\partial \{P(\phi, \theta)\}^2}{\partial \theta} d\phi$$

$$\left[ \begin{array}{l} P(\phi, \theta) = \mu_0 / g(\phi, \theta) \\ \{F(\phi)\}^2 = \{F e^{j p \phi / 2}\}^2 = F^2 e^{j p \phi} \end{array} \right]$$

【パーミアンスと起磁力を代入】

$$T(\theta) = \int_0^{2\pi} \frac{k \mu_0 F^2}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \frac{1}{g(\phi, \theta)} \right\}^2 e^{j p \phi} d\phi$$

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

# 評価指標の導入

$$T(\theta) = \int_0^{2\pi} \frac{k \mu_0 F^2}{2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left\{ \frac{1}{g(\phi, \theta)} \right\}^2 e^{j p \phi} d\phi$$

$$= \frac{k \mu_0 F^2}{2} \sum_{n=1}^p \left[ \int_{2\pi(n-1)/p}^{2\pi n/p} \frac{\partial}{\partial \theta} \{1/g_n(\phi, \theta)\}^2 e^{j p \phi} d\phi \right]$$

... 磁極角に分割

$$= \frac{k \mu_0 F^2}{2} \int_0^{2\pi/p} \left[ \sum_{n=1}^p \frac{\partial}{\partial \theta} \{1/g_n(\phi, \theta)\}^2 \right] e^{j p \phi} d\phi$$

... 積分順序を入替え

$$A_n(\phi, \theta) = \frac{\partial}{\partial \theta} \{1/g_n(\phi, \theta)\}^2$$

... 内周形状の周方向変化

$$A_0(\phi, \theta) = \sum_{n=1}^p \frac{\partial}{\partial \theta} \{1/g_n(\phi, \theta)\}^2$$

... 磁極ピッチ毎のスカラー和

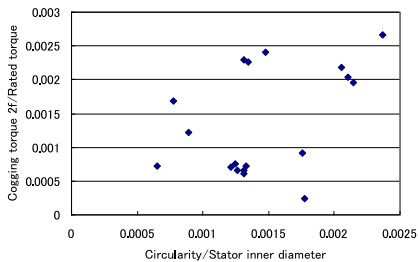
$$Y(\theta) = \int_0^{2\pi/p} \left[ \sum_{n=1}^p \frac{\partial}{\partial \theta} \{1/g_n(\phi, \theta)\}^2 \right] e^{j p \phi} d\phi$$

... 磁極角座標でのベクトル和

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

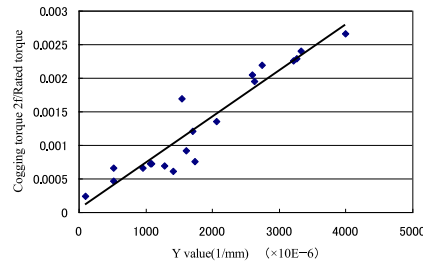
# Y値によるコギングトルク2f成分の評価

(1) 真円度とコギングトルク2f成分の関係



相関係数 0.48

(2) Y値とコギングトルク2f成分の関係



相関係数 0.96

Y値はコギングトルク2f成分の評価指標として適切である

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

# 内周形状誤差とコギングトルク2f成分の関係

【仮説1】

コギングトルク2f成分は、ステータ内周形状の周方向変化の関数である

【仮説2】

磁極角毎にステータ内周形状変化率が重ね合わされる

【仮説3】

磁極角座標においてステータ内周形状変化率がベクトル合成される

$$T(\theta) = \frac{k \mu_0 F^2}{2} \int_0^{2\pi/p} \left[ \sum_{n=1}^p \frac{\partial}{\partial \theta} \{1/g_n(\phi, \theta)\}^2 \right] e^{j p \phi} d\phi$$

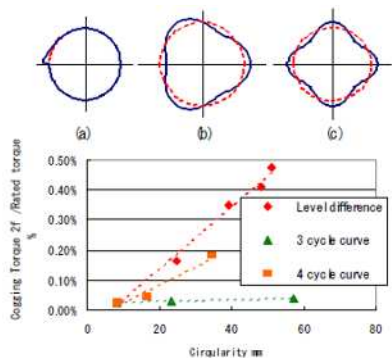
【仮説1】  
【仮説2】

【仮説3】

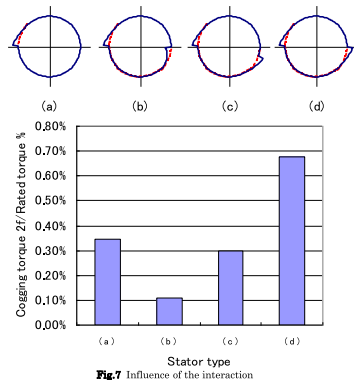
仮説1～3は、真円度では表現できない

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

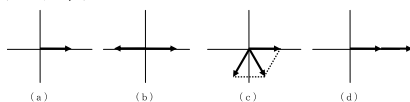
## (1) 形状モードの影響



## (2) 重ね合わせの影響



## <ベクトルYのモデル>



結果①急激な内周形状の変化(段差)がコギングを悪化させる  
 ②内周形状の影響は重ね合わせの効果がある  
 (磁極角毎のスカラー和/磁極角座標でのベクトル和)

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

## <方策1>

段差を修正する製造方法

## <方策2>

段差を小さくする製造方法

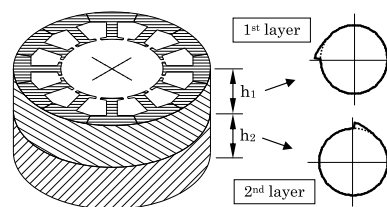
## <方策3>

段差の影響を重ね合わせて相殺する製造方法

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

## <方策3>

段差の影響を重ね合わせて相殺する製造方法

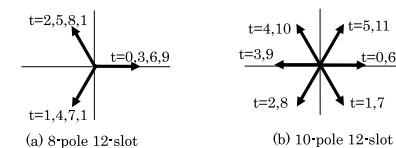


設定が可能な鉄心の回転角 $\alpha_t$ の条件

$$\alpha_t = \frac{2\pi}{s} t \quad (\text{機械角}) \quad (0 \leq t \leq s-1)$$

$$\alpha'_t = \frac{2\pi}{s} t p \quad (\text{磁極角})$$

<例>



ベクトルYを相殺する条件  
 (第i番目の回転角を $q_i (i=1 \sim n)$ とする)

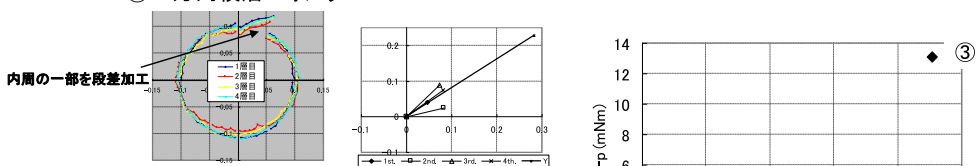
$$\sum_{i=1}^n e^{jp\theta_i} = 0 \quad (\text{均等分割の場合})$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{H_0} e^{jp\theta_i} = 0 \quad (\text{均等分割でない場合})$$

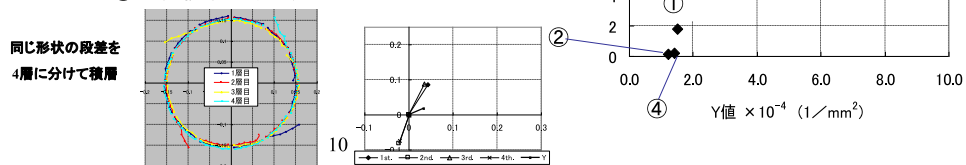
COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

## ③一方向積層コギング 2f: 13.13mNm



## ④回転積層コギング 2f: 0.12mNm

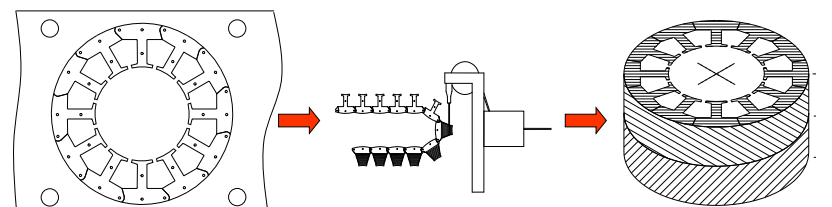


| コアNO. | 段差            | 圧延方向    | 真円度 (μm) | Y値 (× 10 <sup>4</sup> ) (1/mm <sup>2</sup> ) | 2f成分 (p-p) (mNm) |
|-------|---------------|---------|----------|--|------------------|
| ①     | なし            | 一方向     | 6.9      | 1.52   | 1.82             |
| ②     | なし            | 積層方向で回転 | 6.7      | 1.40   | 0.18             |
| ③     | 積層方向で同一箇所が存在  | 積層方向で回転 | 30.8     | 9.07   | 13.13            |
| ④     | 積層方向で90度ごとに存在 | 積層方向で回転 | 31.4     | 1.23   | 0.12             |

### 回転積層による効果

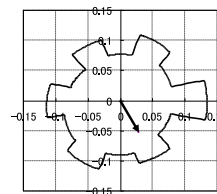
- ①磁気異方性: -1.6mNm
- ②Y値キャンセル: ほぼゼロ

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

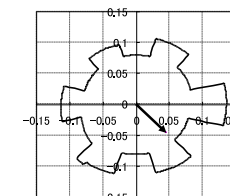
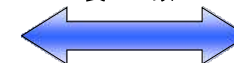


逆反りに展開

A0カーブとYベクトル



良い一致



スケルトン

ステータASSY

スケルトンとASSYでの内周形状に良い一致  
→ 金型打ち抜きの段階で回転

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

サーボモータ

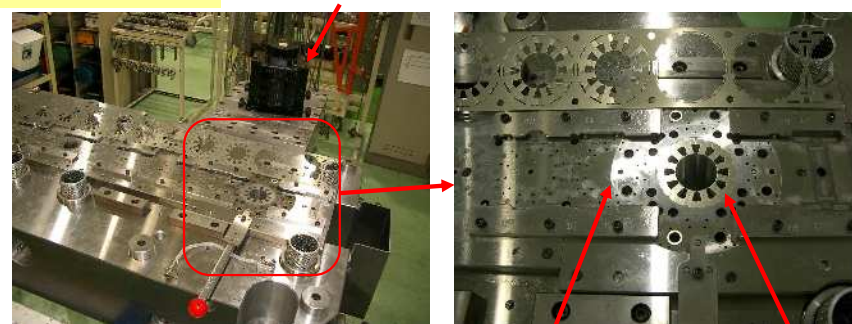


上型と下型

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

試作金型

モータによりダイスを回転



積層工程のダイスを回転

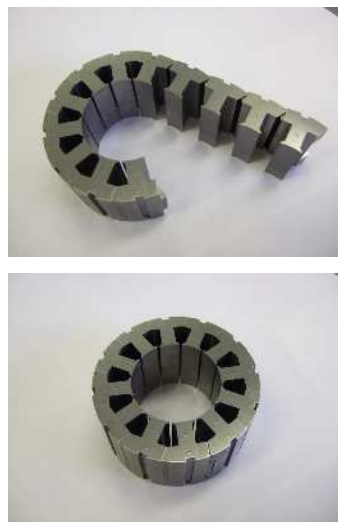
ダイス回転部分  
(積層の途中で回転)



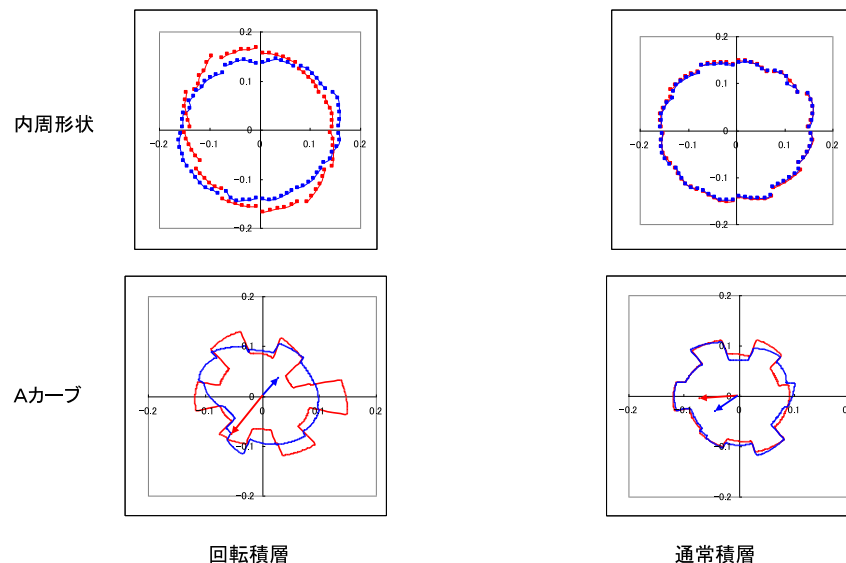
COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.



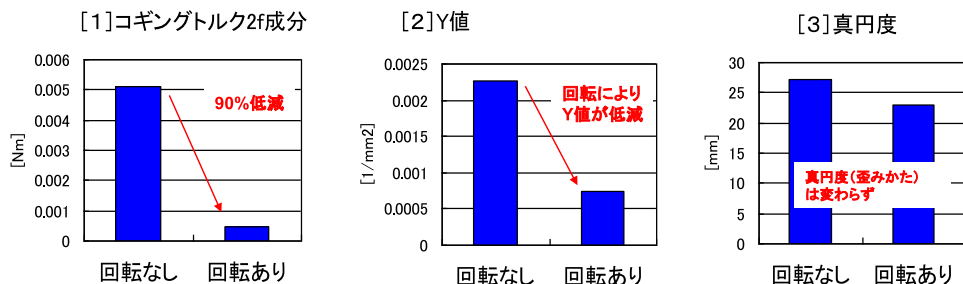
2層に等分し90度回転



COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.



COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.



COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.

同じ形状誤差をもつ鉄心を組み合わせるので、トルクベクトルの大きさと位相が未知であってもトルクベクトル同士を相殺することができる。

よって産業上において次の利点がある。

- 生産ラインでの内周形状計測、調整が不要
- 金型間の誤差に応じた調整が不要
- 金型磨耗や材料のロット違いなどによる内周形状誤差の経時的変化に応じた調整が不要
- 内周形状以外の因子によるコギングトルク2f成分とも相殺可能

COPYRIGHT © 2014 MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.



