

令和6年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会

2024/11/30(土)

@日立シビックセンター

IBK-24-033

# 圧縮センシングによる モータ静特性解析高速化 の基礎検討

○加藤 雅之, 伊東 和紀(茨城大学)

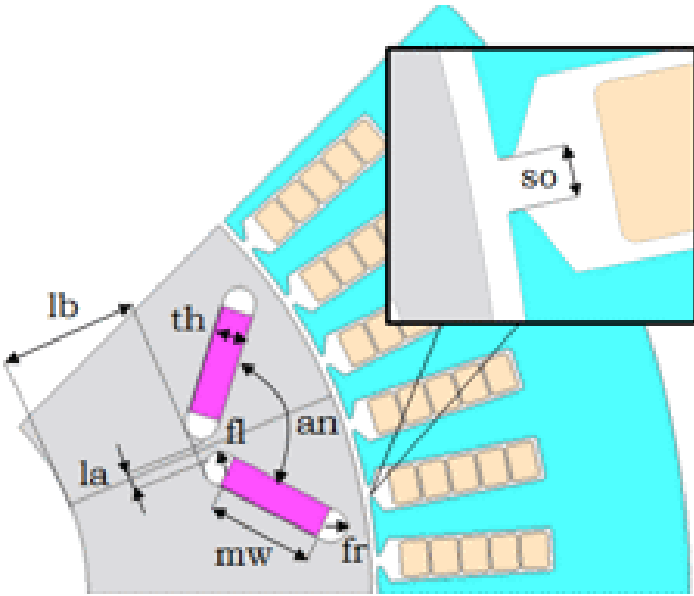


# 目次

---

- 研究背景および目的
  - 電気機器における有限要素解析の高速化
  - サンプリング定理による解析ステップ数の制約
- 圧縮センシングによる高速化手法の提案
  - 圧縮センシングとは
  - 高速化手順
- 高速化の計算結果例
- まとめ, 今後の展望

# モータ最適化における有限要素解析

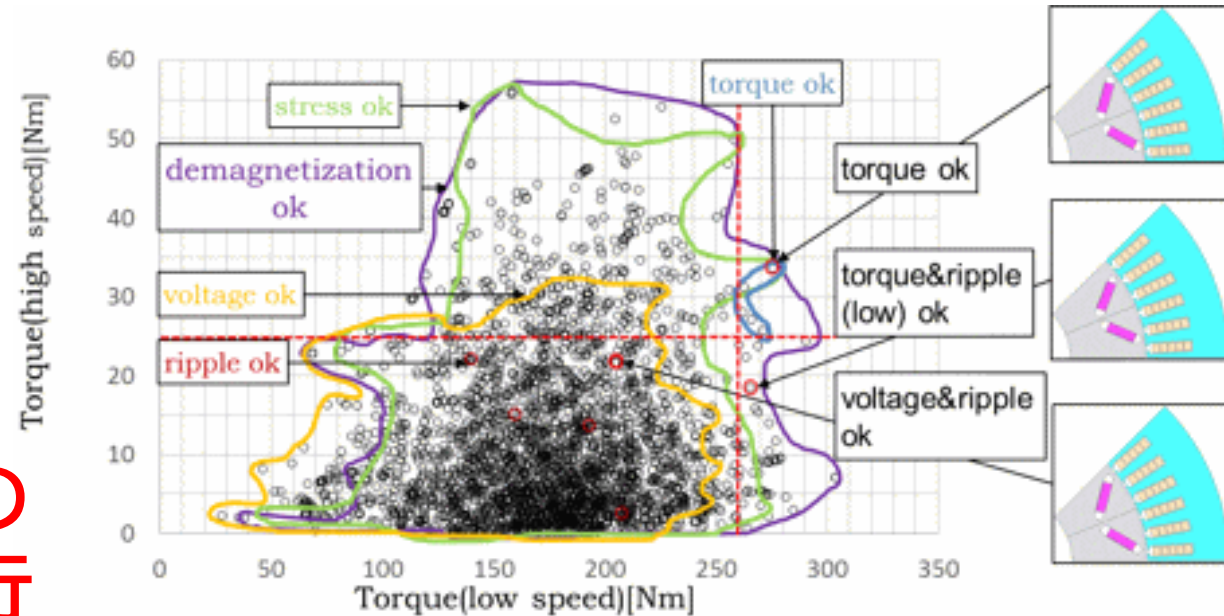


モータ磁界解析モデル

- ✓ 多数の形状変数
- ✓ 複数の制約条件



膨大なケース数の  
電磁界解析を実行  
→ 計算時間長大化



多目的最適化計算結果

総計算  
時間

=

①

解析サイズ  
( $\div$  要素数)

×

②

解析ステップ  
数/1ケース

×

③

計算ケース数

本発表では、**解析ステップ数の削減**による計算時間短縮を検討

# サンプリング定理による解析点数の制約

モータ最適化計算の一例

目的関数:  $N$  次のトルク脈動 → 最小化

総計算  
時間

=

①  
解析モデル  
( $\equiv$ 要素数)

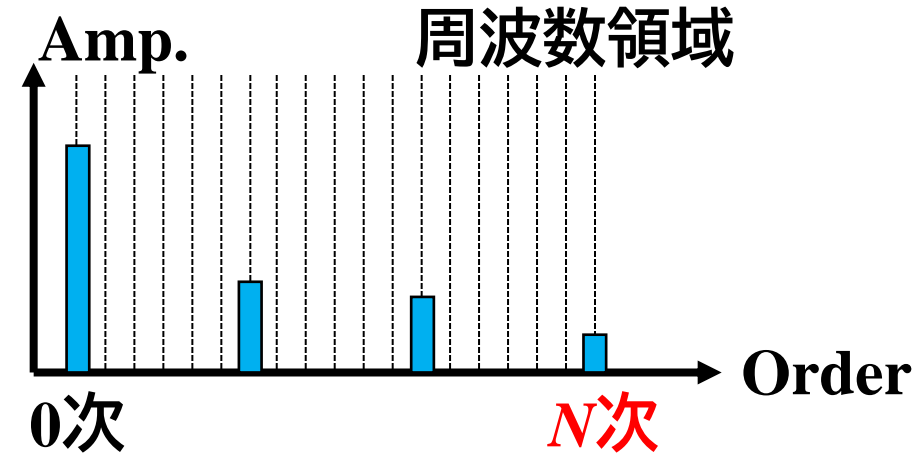
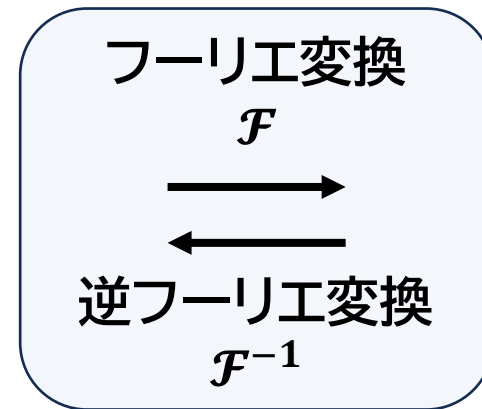
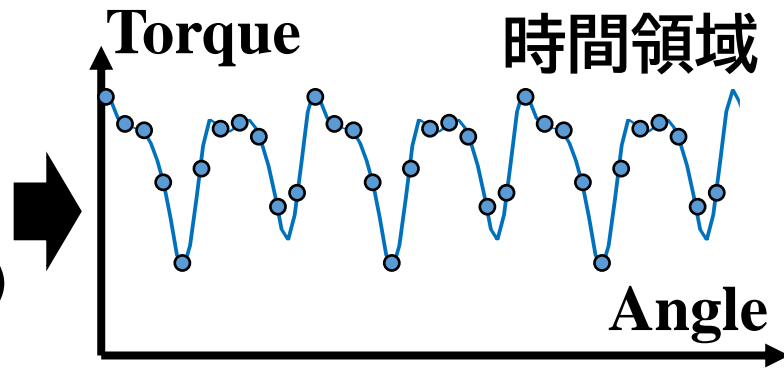
×

②  
解析ステップ  
数/1ケース

×

③  
計算ケース数

磁界解析  
実行  
(1ケース)



$N$  次のトルク脈動を正確に捉えるには, 解析ステップ数  $K \geq 2N + 1$  が制約  
( $\because$  サンプリング定理)

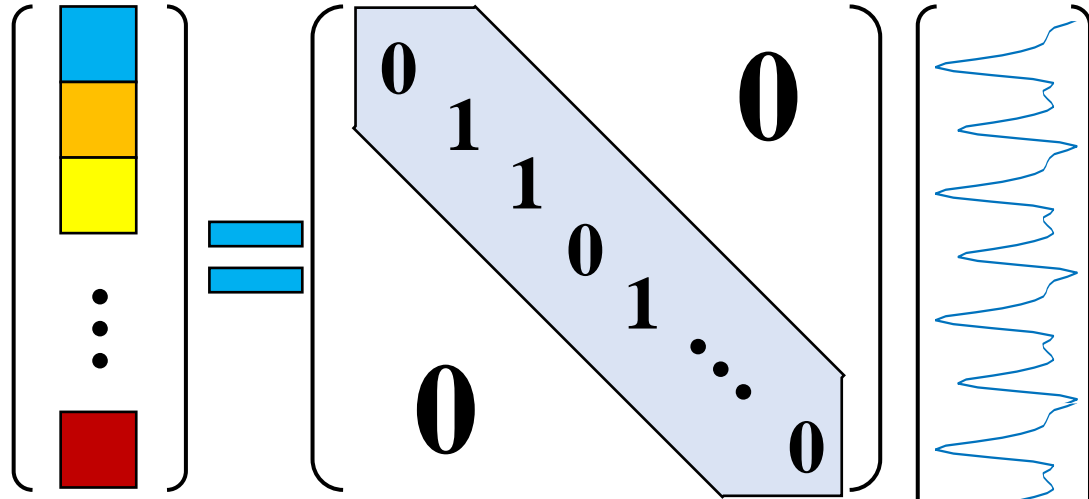
→ これ以上のステップ数削減は **本来なら不可能**

周波数領域で見ると意味のある脈動成分の“個数”はごく少数(スパース性)

→ サンプリング定理を超越できる, “**圧縮センシング**”に着目

# 圧縮センシングとは

①観測モデル  $p = \Phi s$

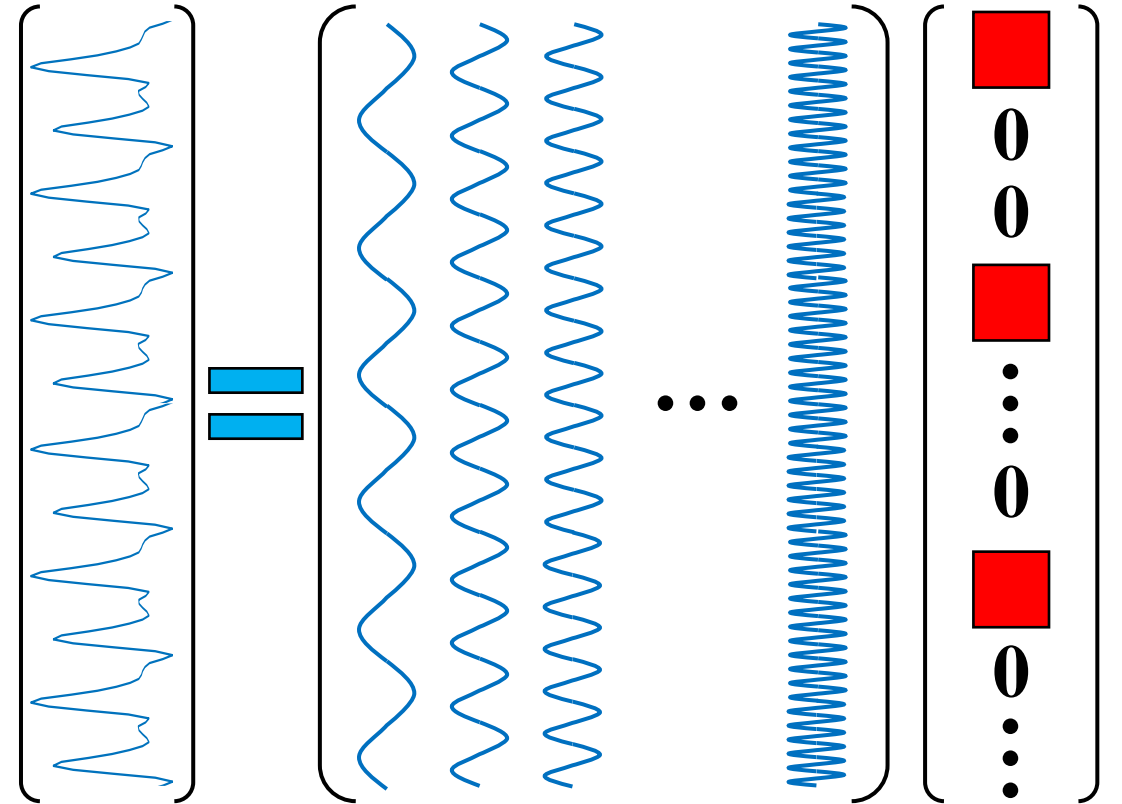


少数  
の観測点

観測行列  
(ランダム  
サンプリング)

元波形

②信号モデル  $s = \Psi q$



元波形

基底行列

係数

$$p = \Phi \Psi q = A q$$

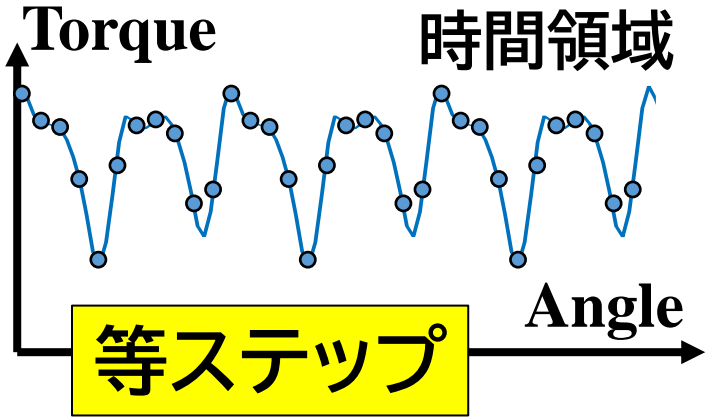
の制約下で  $\hat{q}_{L_1} = \arg \min_q \|q\|_1$

(各係数の絶対値の和  
を最小化)

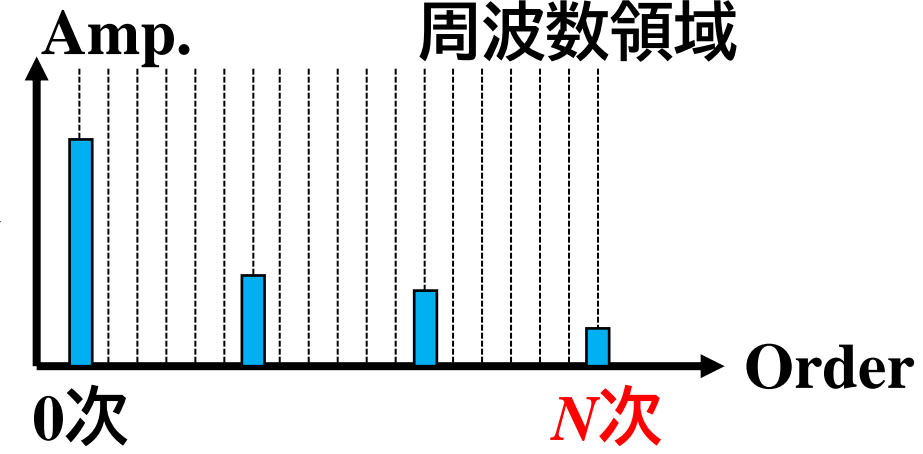
# モータ有限要素解析への圧縮センシング適用

## 従来法

磁界解析  
実行  
(1ケース)

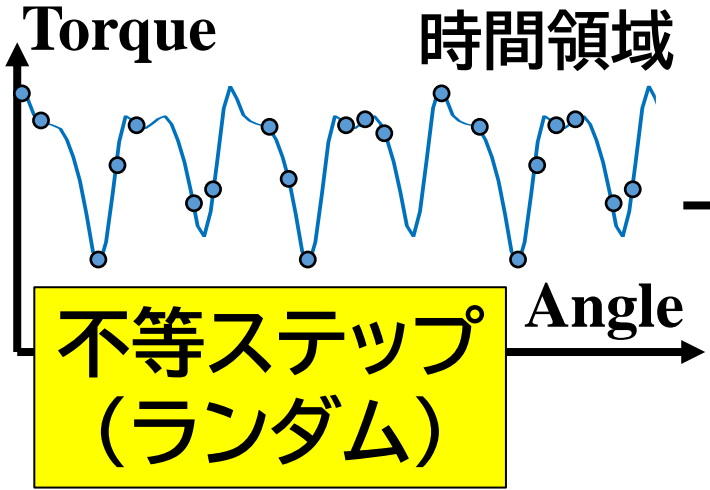


フーリエ  
変換  
 $\mathcal{F}$



## 提案法

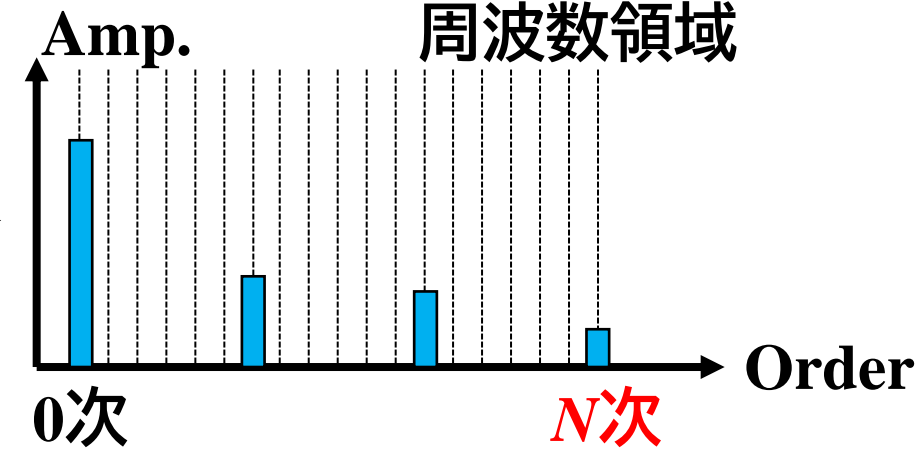
磁界解析  
実行  
(1ケース)



L1  
ノルム  
最小化

$$\hat{q}_{L1} = \arg \min_q \|q\|_1$$

$$p = \Phi \Psi q = Aq$$

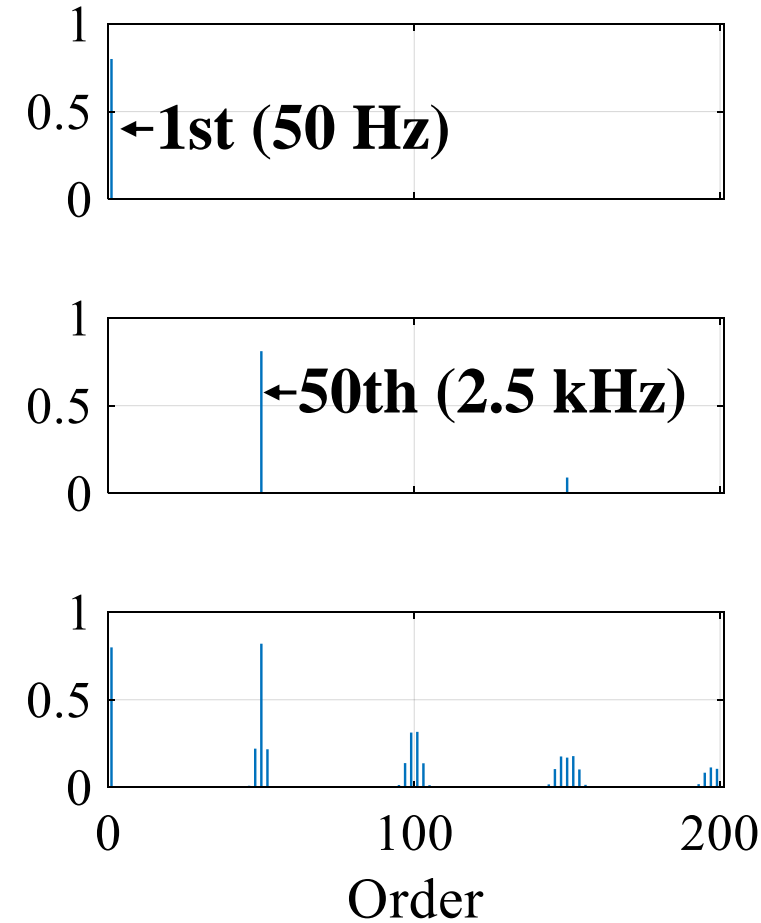
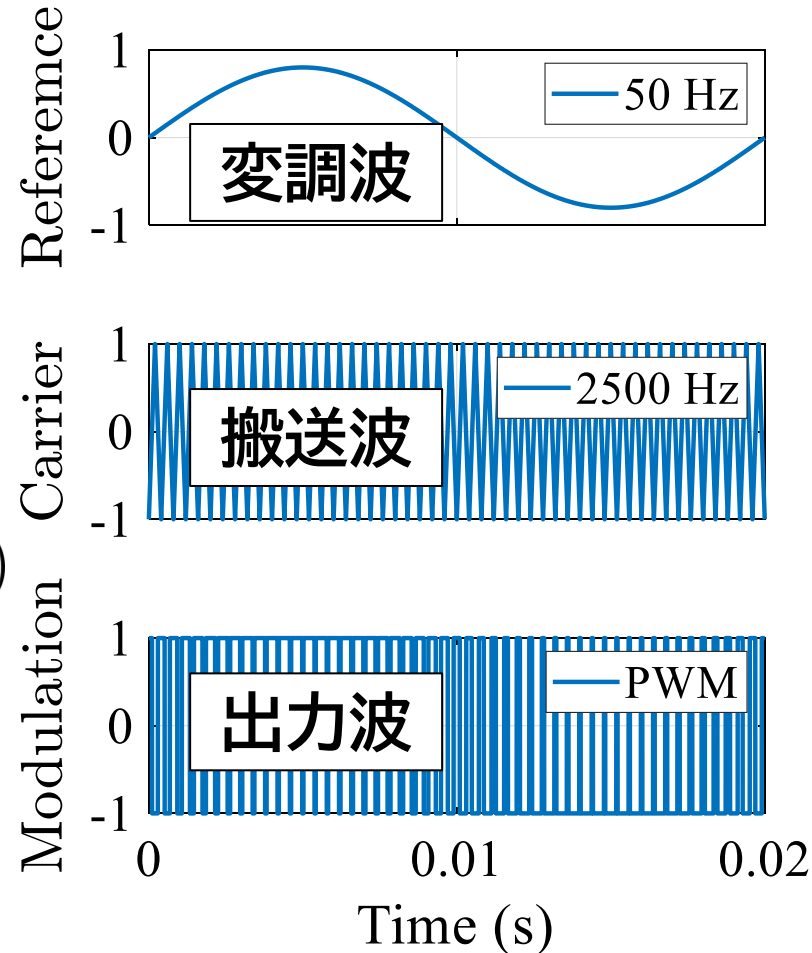
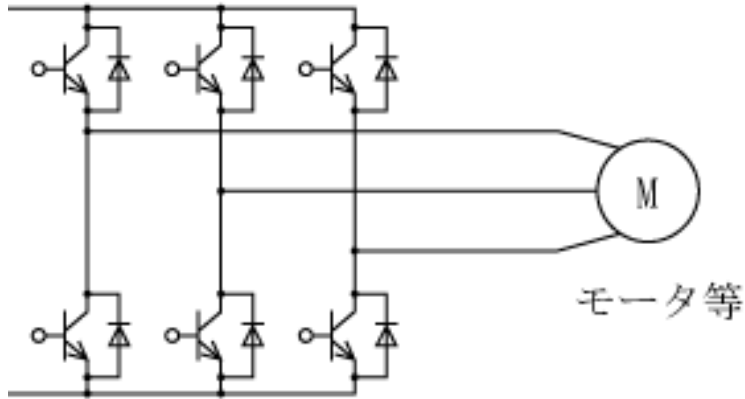


圧縮センシングによる, 計算点数の直接的な削減が可能

# 圧縮センシングの適用対象

最適化対象となるモータ特性の例: トルク脈動, 径方向電磁力, 誘起電圧, ...

➡本発表: パルス幅変調(PWM)インバータ駆動モータの出力電圧を対象



$$\omega_s : aE$$

$$n\omega_r \pm k\omega_s : (4E/n\pi) J_l(n\pi a/2)$$

$$n = 1, 3, 5, \dots \text{ and } k = 0, 2, 4, \dots$$

or

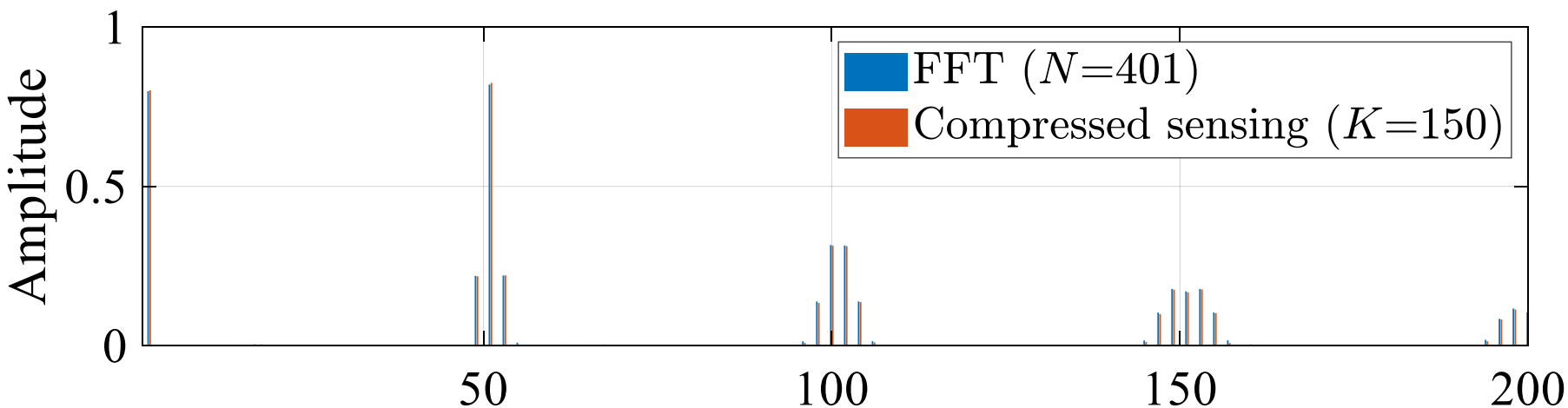
$$n = 2, 4, 6, \dots \text{ and } k = 1, 3, 5, \dots$$

高調波成分の最大次数が大きく, スパース性も高い(非零要素は11%)

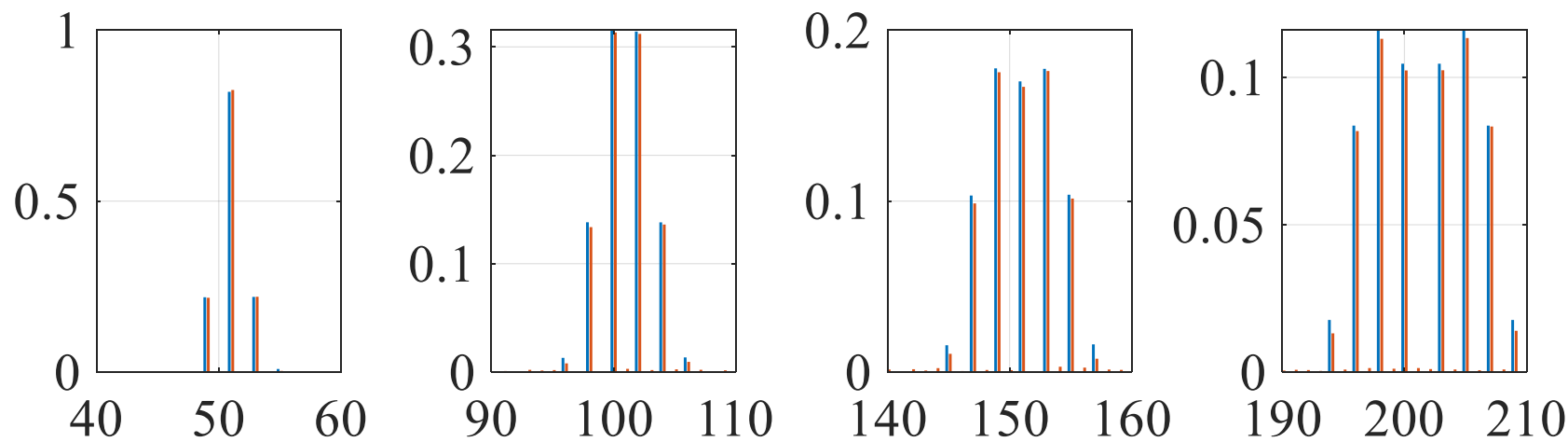
# 圧縮センシングによる計算点数削減結果

## 計算条件

- ◆ 考慮する最大次数: 200次高調波 → サンプルング定理より最低でも,  $200 \times 2 + 1 = 401$ 点必要
- ◆ 波形復元アルゴリズム(L1ノルム最小化問題): MATLABのライブラリ(L1-magic)を使用



401点の中から  
ランダムサンプリング  
された**150点**のみで  
元波形を良好に復元



本手法が  
モータ特性取得の  
**高速化**に活用できる  
可能性を示唆



# まとめ・今後の展望

---

## ◆圧縮センシングによるモータ特性取得の高速化の基礎検討

- サンプルング定理による制約で、計算点数の直接的な削減は困難であった
- モータ特性の“周波数領域”におけるスパース性(非零要素がごく少数)に着目
- **圧縮センシング**と呼ばれる信号復元技術を利用した高速化手法を提案
- PWMインバータ出力電圧波形を一例として、その提案法の有効性を確認(401点-> 150点)

➡ サンプルング定理を超越

---

## ◆各種モータ特性波形と圧縮センシングとの親和性検討

- スパース性の強さと波形復元成功率の関係
- モータ最適化計算プログラムへの実装および高速化の実証