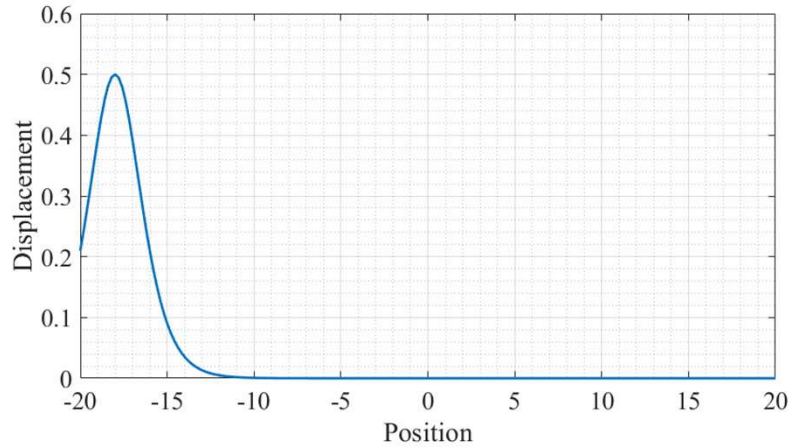


指数関数的インダクタンス特性を有する 永久磁石バイアス型インダクタの最適化

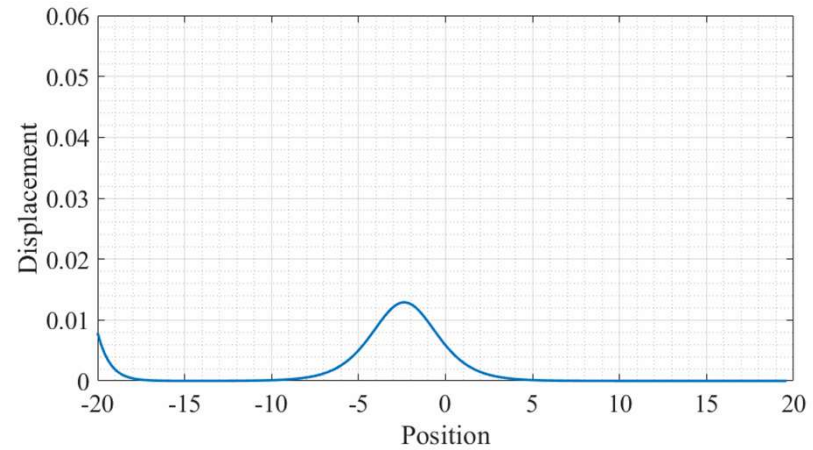
Optimization of Permanent Magnet Flux Biased Inductors
with Exponential Inductance Characteristics

○尾田 行史, 加藤 雅之 (茨城大学)

- ▶ 研究背景・目的
- ▶ PMFBインダクタの動作原理
- ▶ PMFBインダクタの最適化
- ▶ まとめ・今後の展望



1つのソリトンの移動

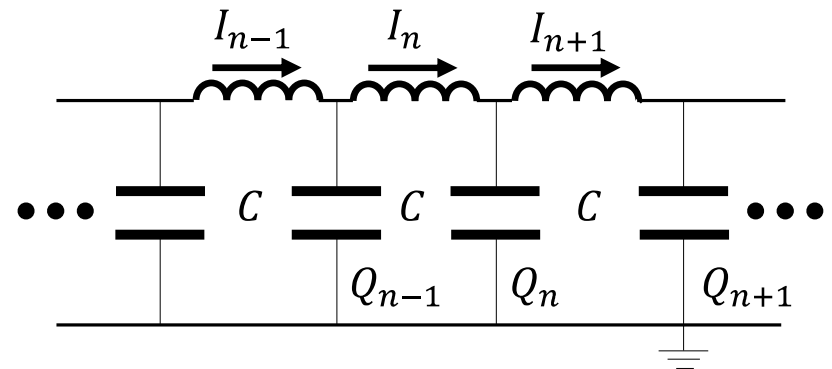


2つのソリトンの衝突

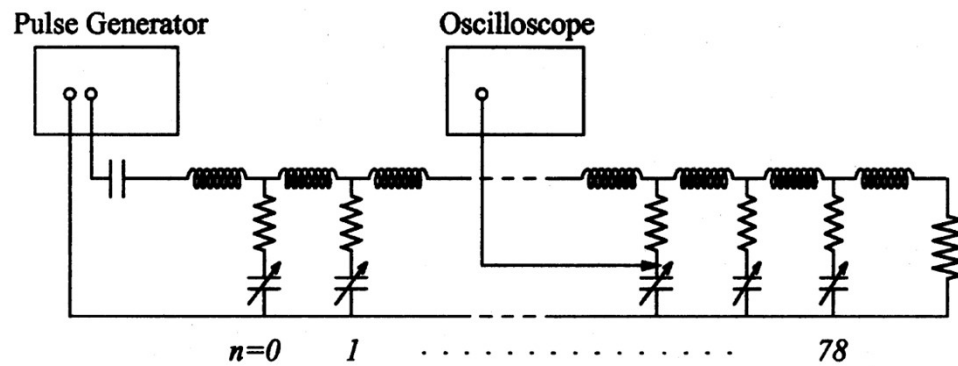
性質1 空間的に局在した波が速さ・形などを変えずに伝播

性質2 衝突に対して安定で個別性を保持

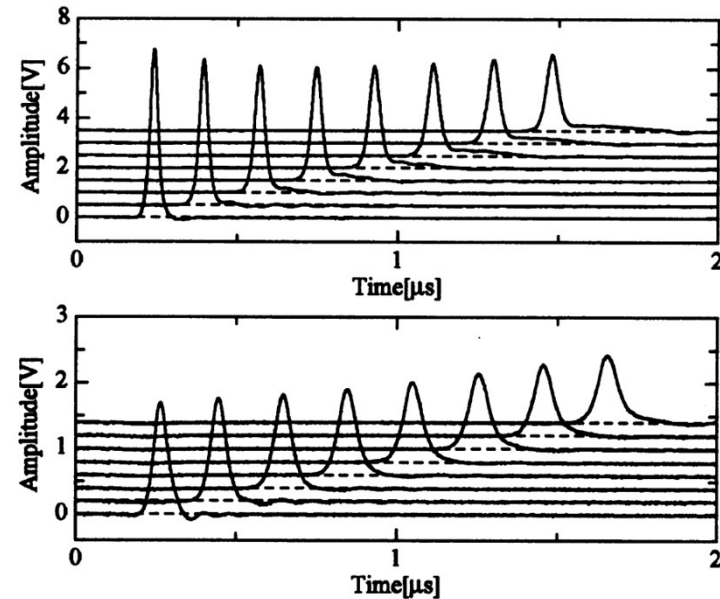
- 光ファイバー
- 生物学
- 磁気学
- **電気回路**



粒子性を持つ安定したパルス状の波動



実験構成図



先行研究

非線形キャパシタとして
逆バイアスの可変容量ダイオードを利用

オシロスコープで観測された
ソリトン伝播の様子

本研究

非線形インダクタとして鉄心の磁気飽和を利用

振幅は減少しているが形は保ったまま伝播

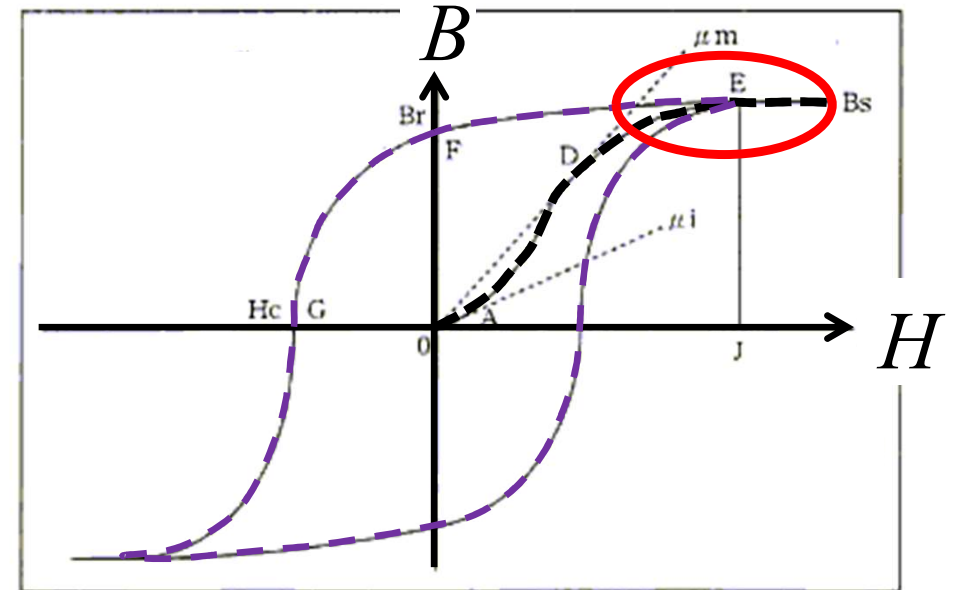
(1)西田, 渡辺, “電気回路による K-dV-Burgers”, 数理解析研究所講究録, Vol. 1209, pp.134-141, 2001.

軟質磁性材料（鉄、パーマロイ、・・・）
モータコアなどに使われる

- 磁気飽和
- ヒステリシスループ



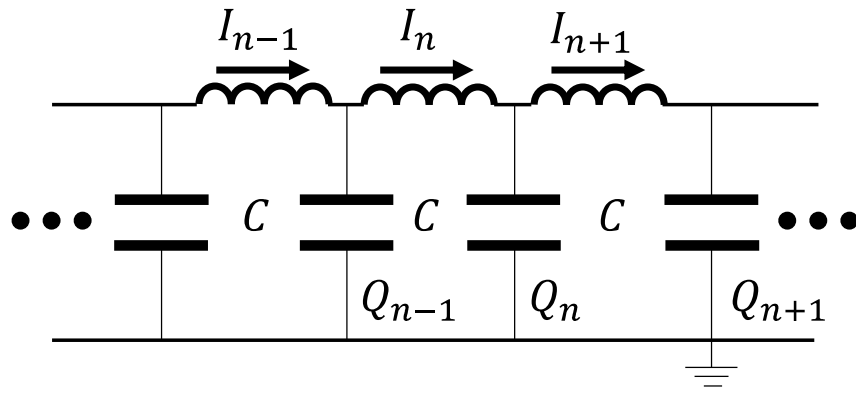
モータコアの例



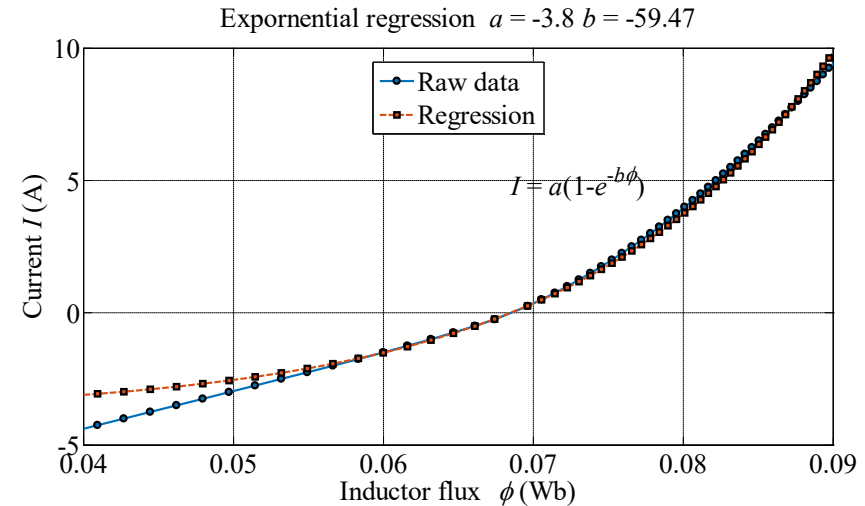
強磁性体の磁化特性

磁気飽和によってモータのパラメータが変化し
効率の低下などを招くため非線形性は嫌われる

→逆にこの非線形性をソリトンの生成に利用できる可能性に着目



$$I_n = a(1 - e^{-b\Phi_n})$$



PMFBインダクタのインダクタンス

指数関数で近似

戸田格子方程式
(ソリトンが存在する系)

$$\frac{d^2 r_n}{dt^2} = \frac{a}{m} (2e^{-br_n} - e^{-br_{n+1}} - e^{-br_{n-1}})$$

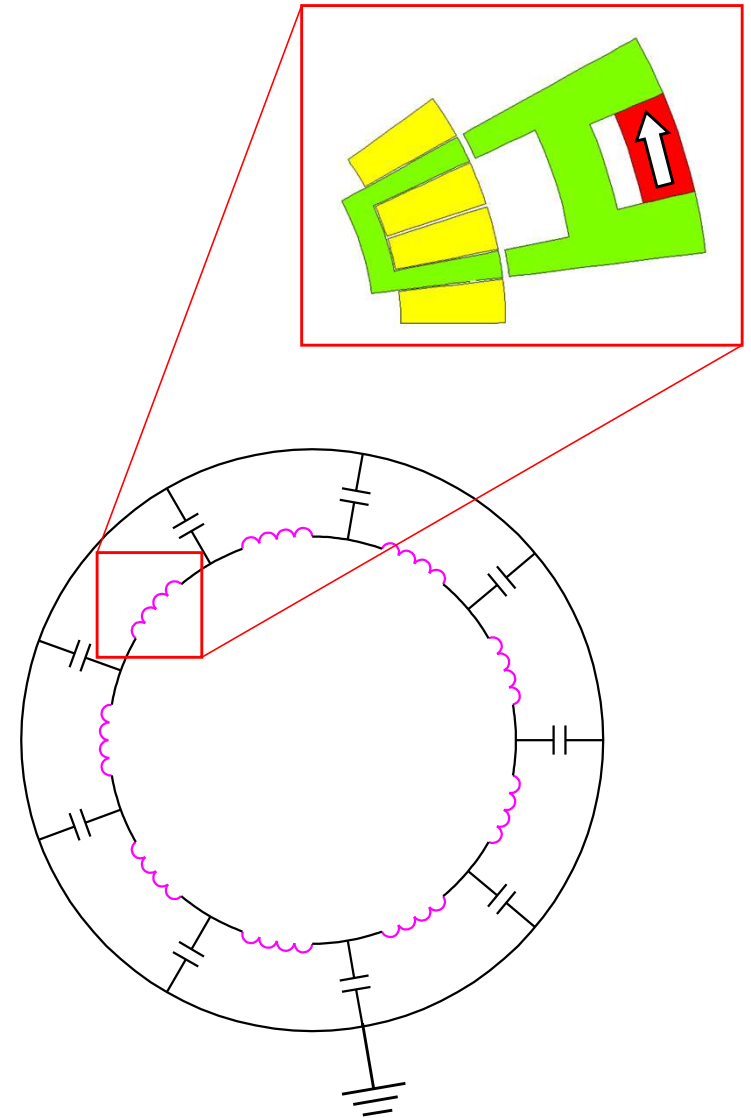
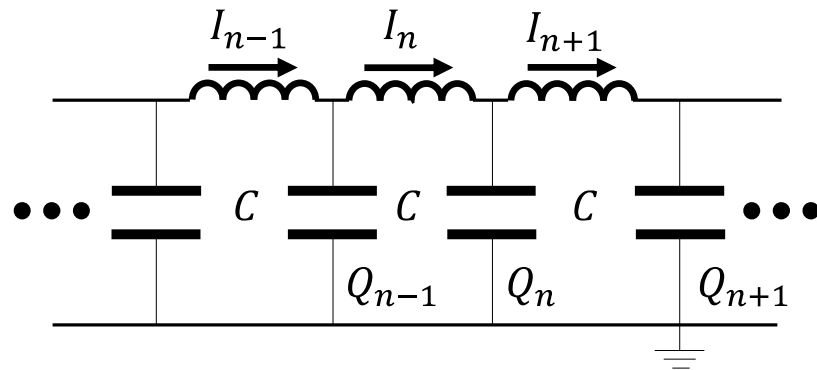
キルヒホッフの電圧則

$$\frac{d^2 \Phi_n}{dt^2} = \frac{a}{C} (2e^{-b\Phi_n} - e^{-b\Phi_{n+1}} - e^{-b\Phi_{n-1}})$$

戸田格子方程式と同じ形となる
→非線形LC梯子回路でもソリトンが生成可能

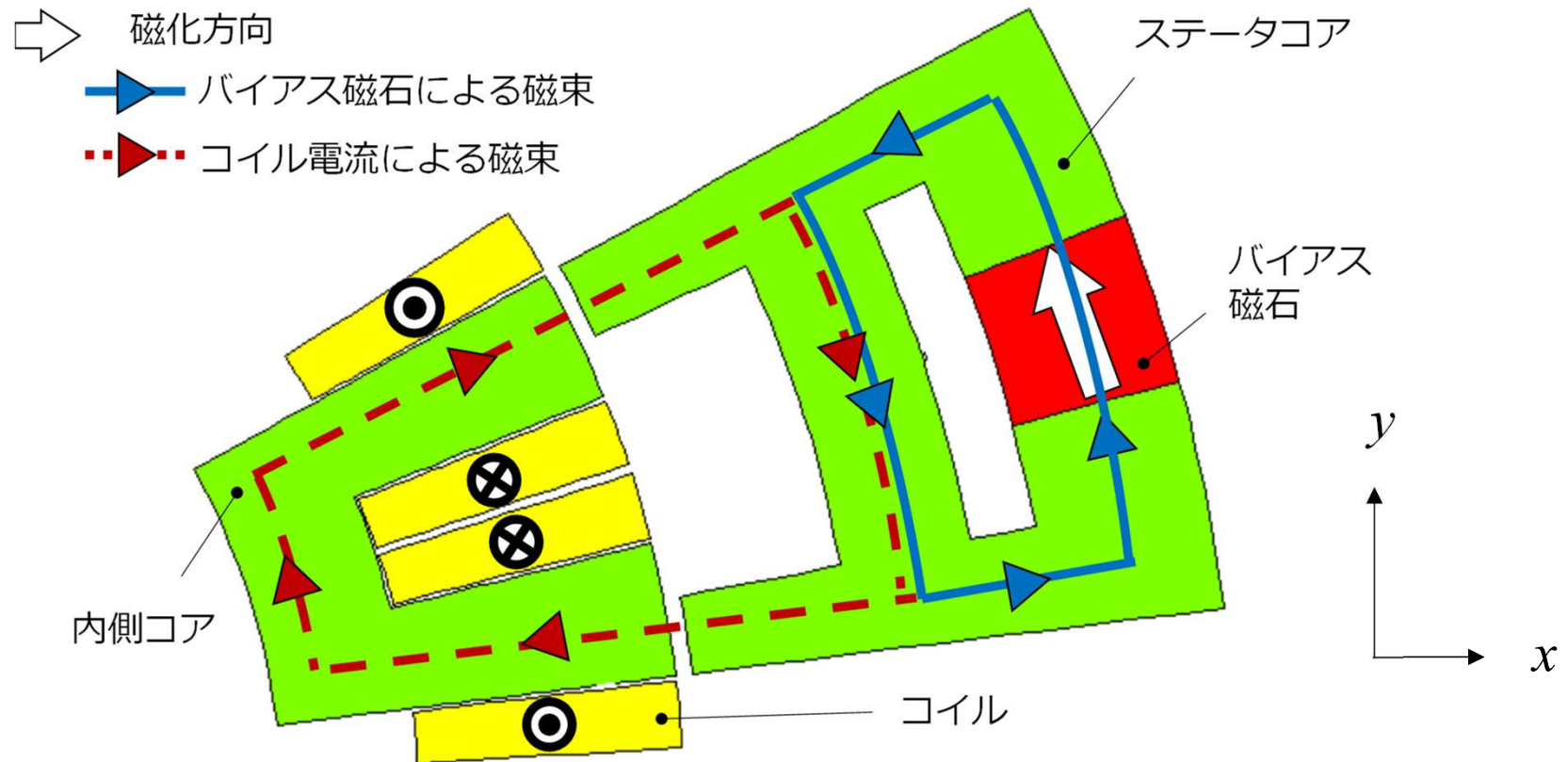
目的 非線形波動現象（ソリトン）を電気系で実現象に応用すること

- 方針
- ①PMFBインダクタの最適化
 - ②磁気ソリトン励起の実験検証
 - ③モータ化に向けた形状の検討



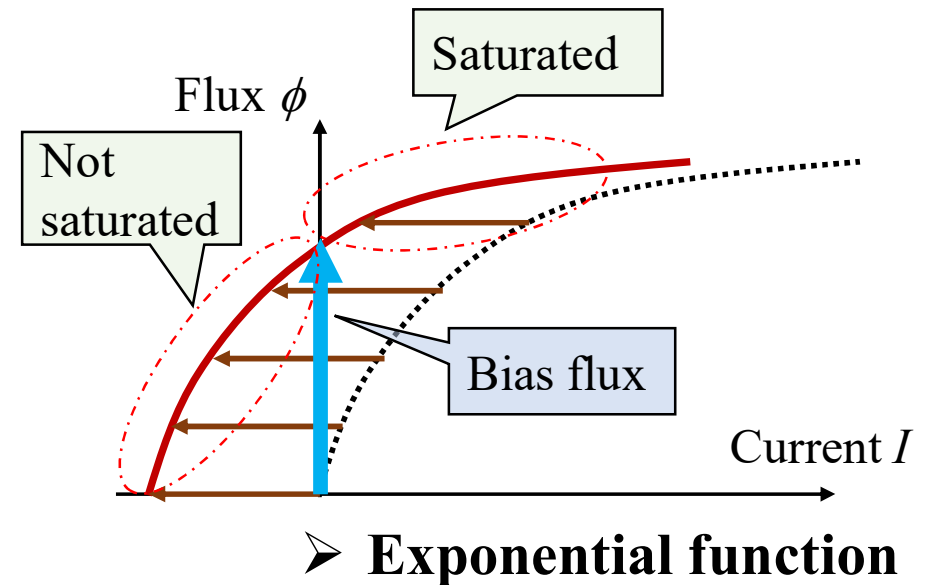
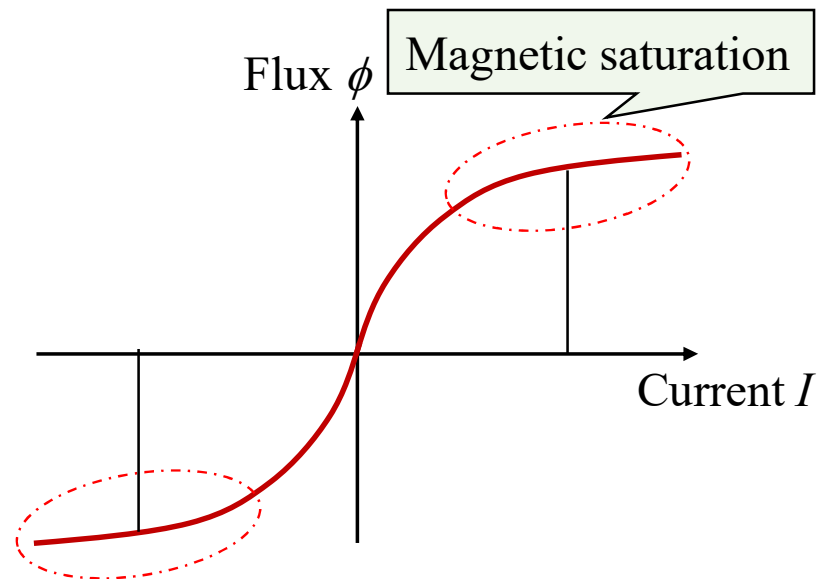
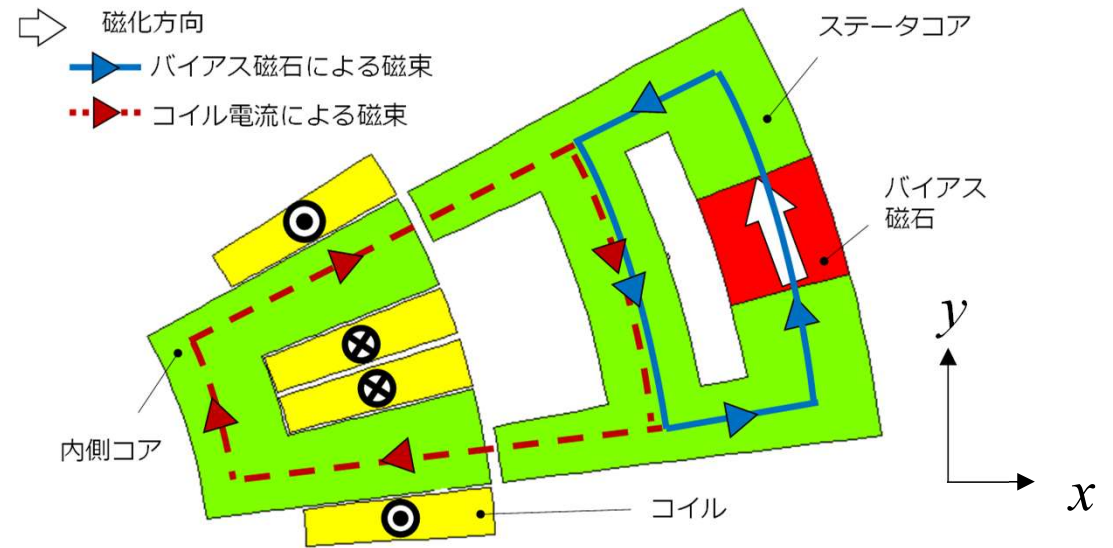
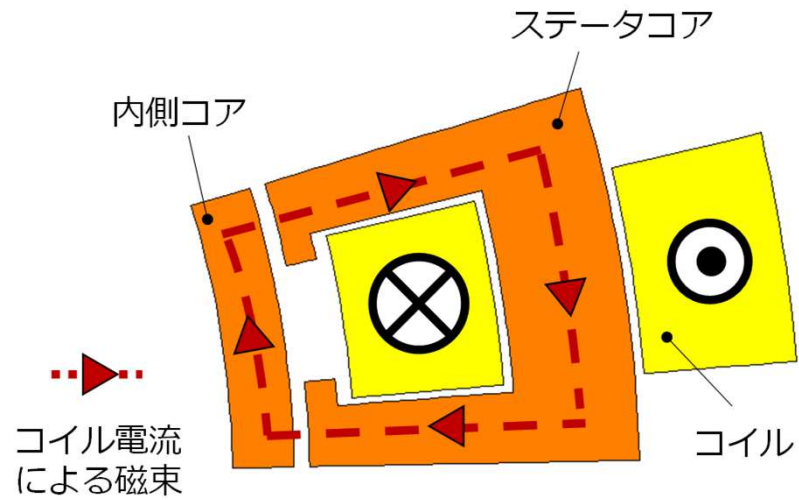
- ▶ 研究背景・目的
- ▶ PMFBインダクタの動作原理
- ▶ PMFBインダクタの最適化
- ▶ まとめ・今後の展望

PMFB: Permanent Magnet Flux Biased

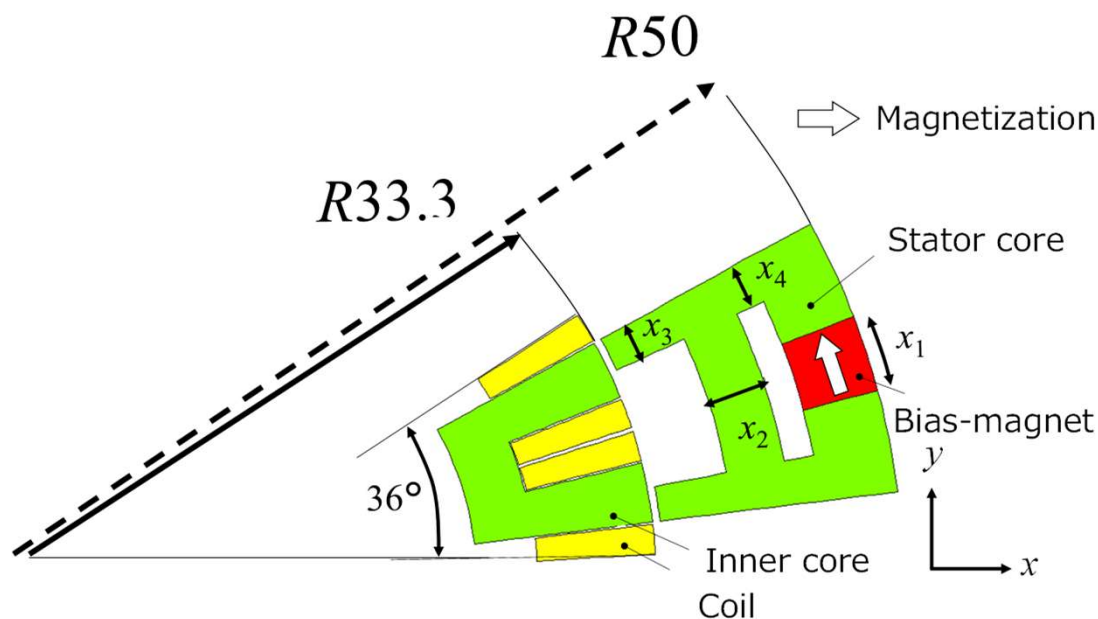


永久磁石によるバイアス磁束は主にステータコアを流れる

指数関数的インダクタンス特性を得るために必要



- ▶ 研究背景・目的
- ▶ PMFBインダクタの動作原理
- ▶ PMFBインダクタの最適化
- ▶ まとめ・今後の展望



Design valuable	Level		
	-1	0	+1
x_1 : Thickness of PM(deg)	2	6	10
x_2 : Bypass core(mm)	1	4	7
x_3 : Width of teeth(mm)	1	4	7
x_4 : Width of stator core(mm)	1	4	7

コイル : $\phi = 0.4$ [mm]

鉄心 : 50JN400

永久磁石 : Nd-Fe-B 残留磁束密度 $B_r = 1.4$ [T]

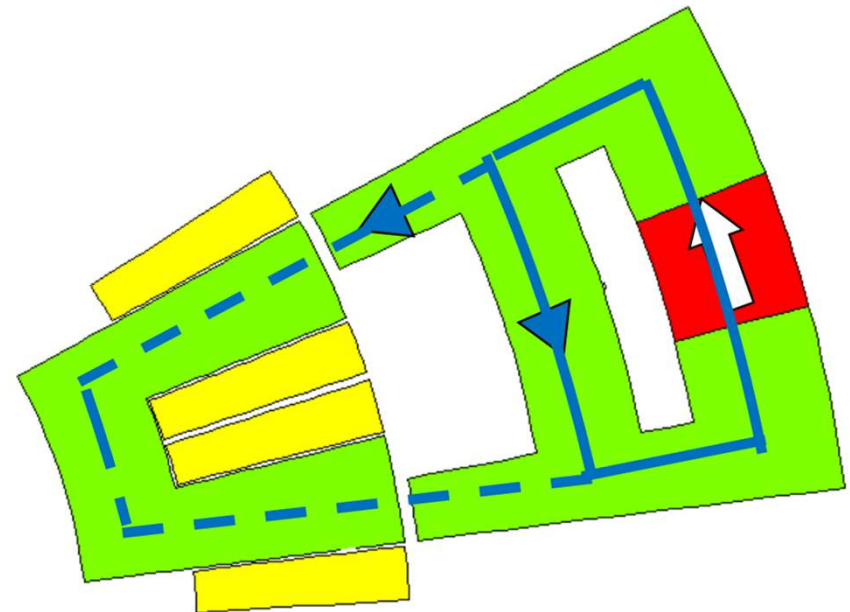
鉄心と磁石の寸法を設計変数とした

最適化の流れ

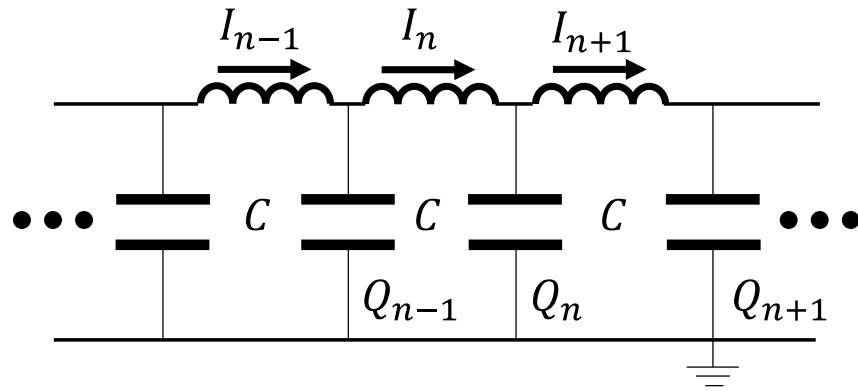
- ① 目的関数・設計変数の決定
- ② 感度解析（目的関数の最小化or最大化に寄与する設計変数を探す）
- ③ 応答曲面法（感度解析によって得たデータを連続的な曲面に近似）
- ④ 最適解の探索（今回は遺伝的アルゴリズムを使用）

目的関数：永久磁石による磁束を打ち消すようにコイルに流れる電流

補償電流 I_c



補償電流の問題点



指数関数で近似

$$I = a(1 - e^{-b\phi})$$

$$I = a(1 - e^{-b(\phi - \phi_{PM})})$$

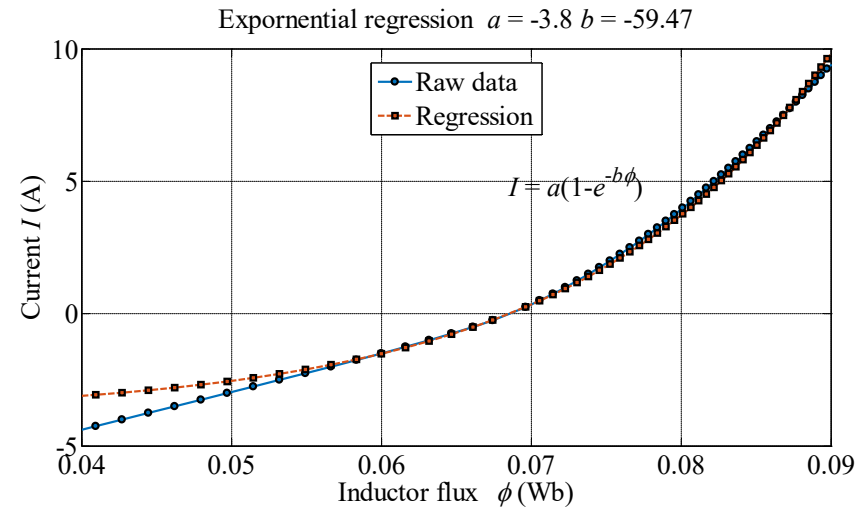
戸田格子方程式

(ソリトンが存在する系)

$$\frac{d^2 r_n}{dt^2} = \frac{a}{m} (2e^{-br_n} - e^{-br_{n+1}} - e^{-br_{n-1}})$$

キルヒホッフの電圧則

$$\frac{d^2 \Phi_n}{dt^2} = \frac{a}{C} e^{b\phi_{PM}} (2e^{-b\Phi_n} - e^{-b\Phi_{n+1}} - e^{-b\Phi_{n-1}})$$



PMFBインダクタのインダクタンス

ソリトンの励起には寄与せずインダクタ電流を増加させる

総当たり（81通り）
の実験点を計算

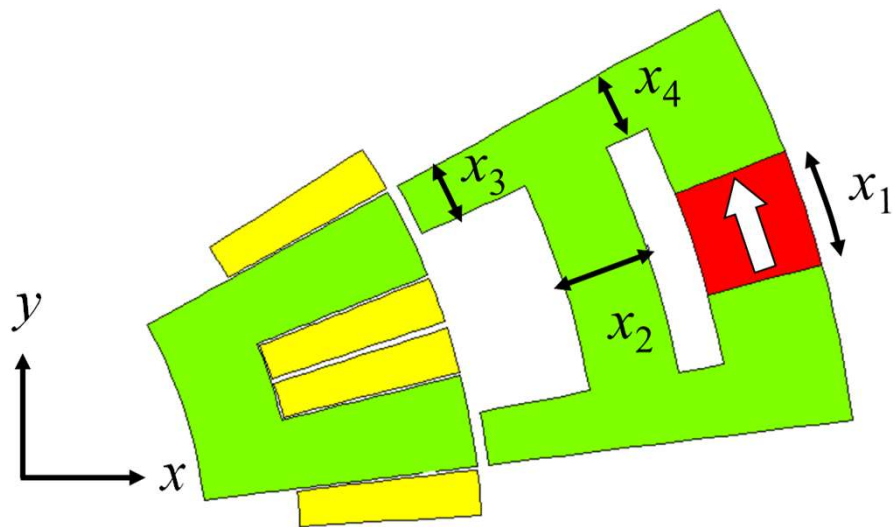
	Level		
	-1	0	+1
Design valuable	-1	0	+1
x_1 :Thickness of PM(deg)	2	6	10
x_2 :Bypass core(mm)	1	4	7
x_3 :Width of teeth(mm)	1	4	7
x_4 :Width of stator core(mm)	1	4	7

応答曲面法で離散的な実験データを連続的な曲面に近似

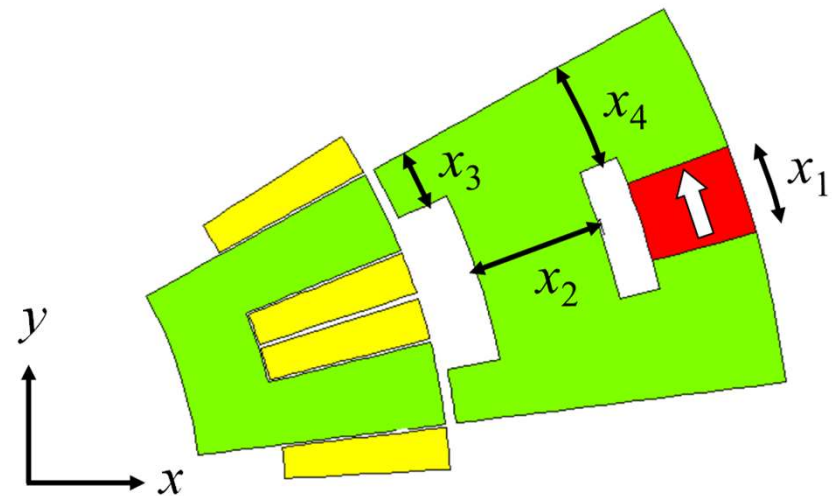
下式に基づいて応答曲面を作成（2次の項および相互作用項を考慮）

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i,j} \beta_{ij} x_i x_j$$

遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて、作成した応答曲面上で最適解を探索



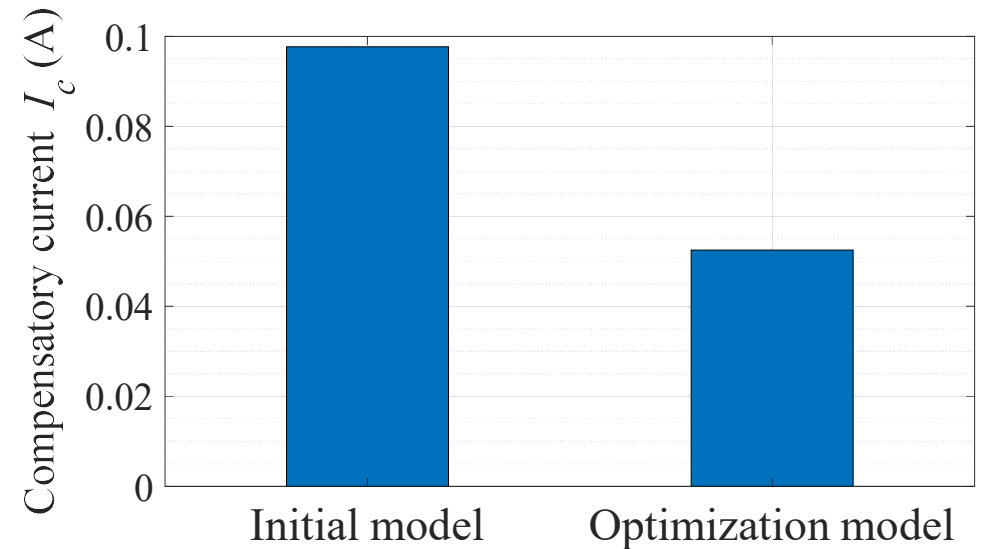
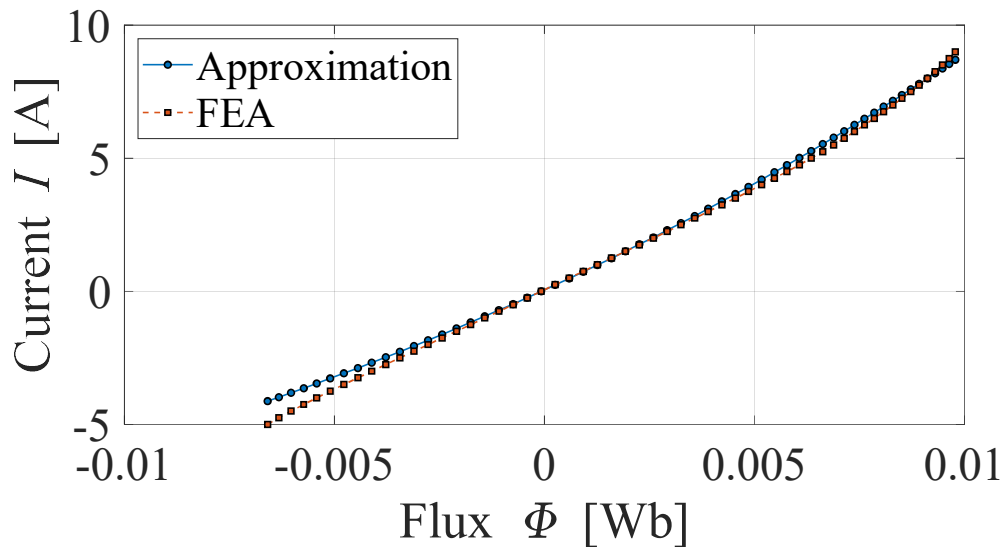
Initial model



Optimization model

Design valuable	Before optimization	After optimization
x_1 : Thickness of PM(deg)	6	5
x_2 : Bypass core(mm)	4	6.4
x_3 : Width of teeth(mm)	4	4.45
x_4 : Width of stator core(mm)	4	6.7

補償電流を最小化するような最適解を求めた



最適化前後での補償電流の比較

$$I = a(1 - e^{-b(\phi - \phi_{PM})})$$

磁界解析の結果から a, b を求めた

$$a = -13, b = -52$$

補償電流を初期モデルの約53%に低減

- ▶ 研究背景・目的
- ▶ PMFBインダクタの動作原理
- ▶ PMFBインダクタの最適化
- ▶ まとめ・今後の展望

まとめ

PMFBインダクタの補償電流を目的関数、鉄心および磁石の形状を設計変数として最適化した

得られた最適解を元に磁界解析を行い、補償電流を約50%減少させることができることを確認した

今後の方針

- ・多目的最適化

そのほかに考えられる目的関数（エアギャップの磁束密度など）

- ・磁気ソリトンの実験的励起確認

今回の検討モデルのような円弧型磁石は設計困難なため角型で代用予定