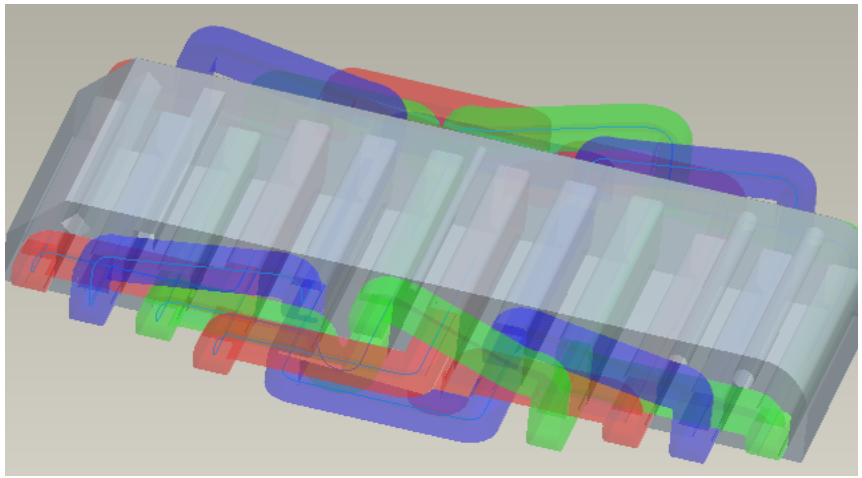


誘導リニアモータと
ベクトル制御回路の試作

熊　谷　正　朗
kumagai@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

東北学院大学
TOHOKU GAKUIN UNIVERSITY
RDE Lab.

東北学院大学工学部
ロボット開発工学研究室

開発の背景

○ 新型アクチュエータ開発の布石

○ アクチュエータの開発，制御技術の獲得

・これまで，必要性を感じてロボット用に
センサ開発(製作)はしてきた.

・アクチュエータ開発の必要性が生じた

↓

基礎モデルとしてリニア誘導モータの試作

開発の背景

○ 誘導リニアモータ

○ リニアモータ

- 直線的な移動，推力を発生するモータ

  c.f. 回転モータ（通常のモータ）

- 交流同期(磁石使用)，ステッピング(有/無)
  誘導，ボイスコイル型　など

開発の背景

○ 誘導リニアモータ

○ 誘導モータ

- 回転磁界，直線進行磁界と，その中に置かれた導体に生じる誘導電流の相互作用によってトルク・推力が生じる，交流モータ．

  c.f. 交流同期，交流整流子モータ

  ※ACサーボは一般に永久磁石同期型

- 磁界は三相交流で作ることができる．

開発の背景

○ 誘導リニアモータを前提とした理由

○ リニアモータ

＋ 変形，組み合わせによって多自由度が描ける.

－ 端面の効果があり，リップルがでたり，
解析結果と現実の一致に不安

○ 誘導モータ

＋ 構造が簡単：磁界をつくる電磁石群(一次)と，
銅鉄複合材料(二次).

－ 効率が永久磁石型に比べて悪い.

開発の背景

○ 誘導リニアモータを前提とした理由

○ 感覚

- 素人が作っても，それなりには動くものができそう.

開発の背景

○ 誘導リニアモータの動作

○ すべりによるトルク・推力発生

・移動する磁界と同じ速度で2次側が移動
していると推力はゼロ.

・2次側が遅れると，すべり率に比例して推力.

・すべり率＝１－(2次速度/磁界速度)
※すべり率は一般に数%程度

○ ほぼ励磁周波数に比例した速度　→周波数制御

※すべり率が大きくないので

開発の背景

○ 誘導リニアモータの制御

○ (一般的な)インバータ

- 周波数と電圧を変化させて回転速度を変える.
- モータの状態検出はしない.

○ ベクトル制御インバータ

- 回転磁界に対して，回転座標変換を適用し，状態量を分離，DCモータ的にモデル化する.
- 状態計測，推定を行う.

発表内容

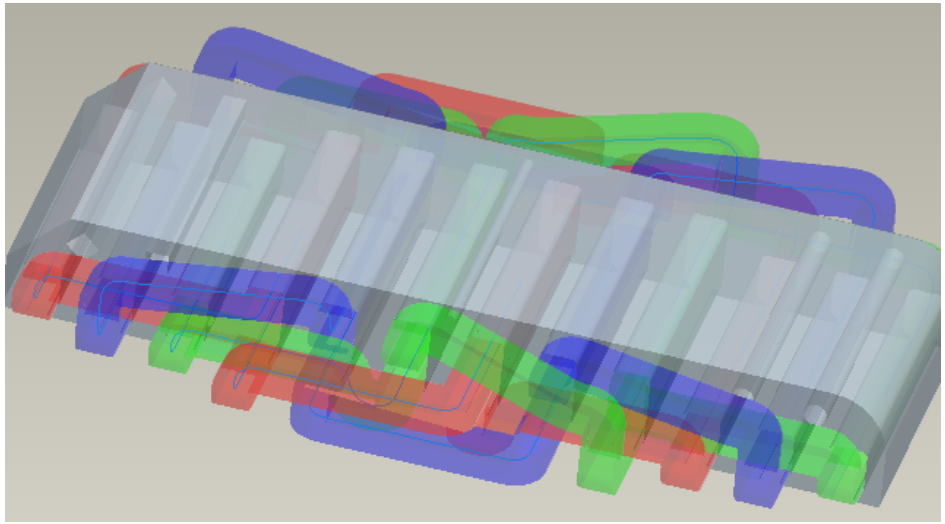
- ○ 背景
- ○ リニアモータ
  - ・リニアモータの概略
  - ・電磁場シミュレーション
  - ・リニアモータの実装
- ○ ベクトル制御インバータの実装
- ○ リニアモータの位置制御

リニアモータ

○ 概　略

○ 一次側＝電磁石

くし状のコアに3相のコイルを巻く.

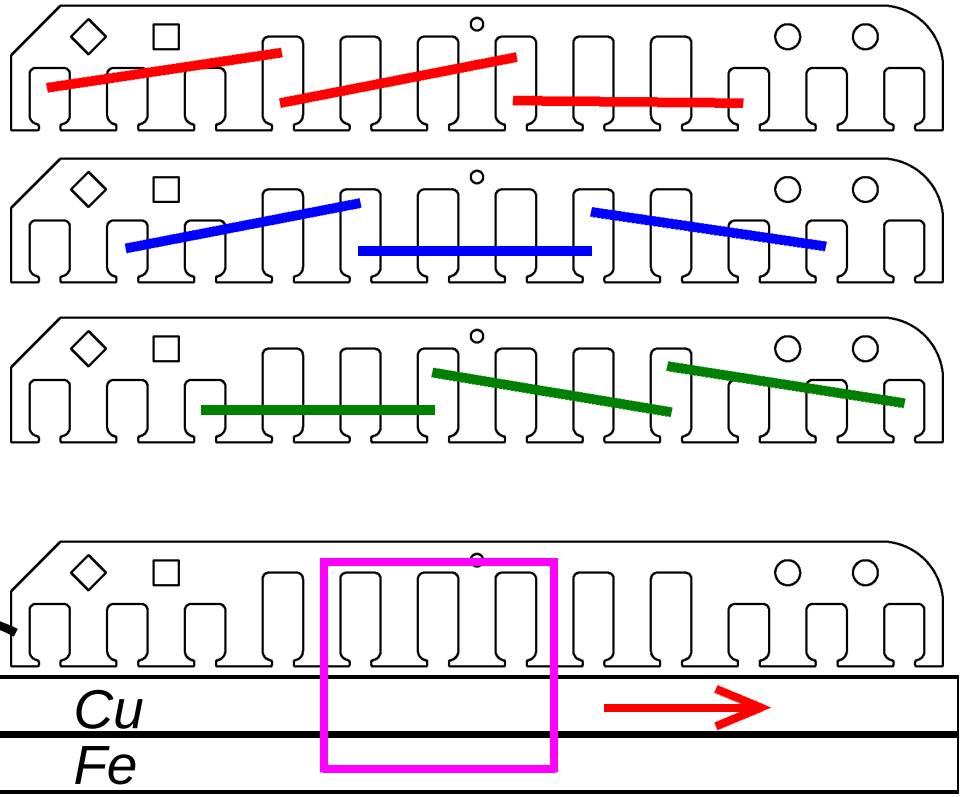


○ 2次側＝銅＋鉄

銅板：誘導電流用

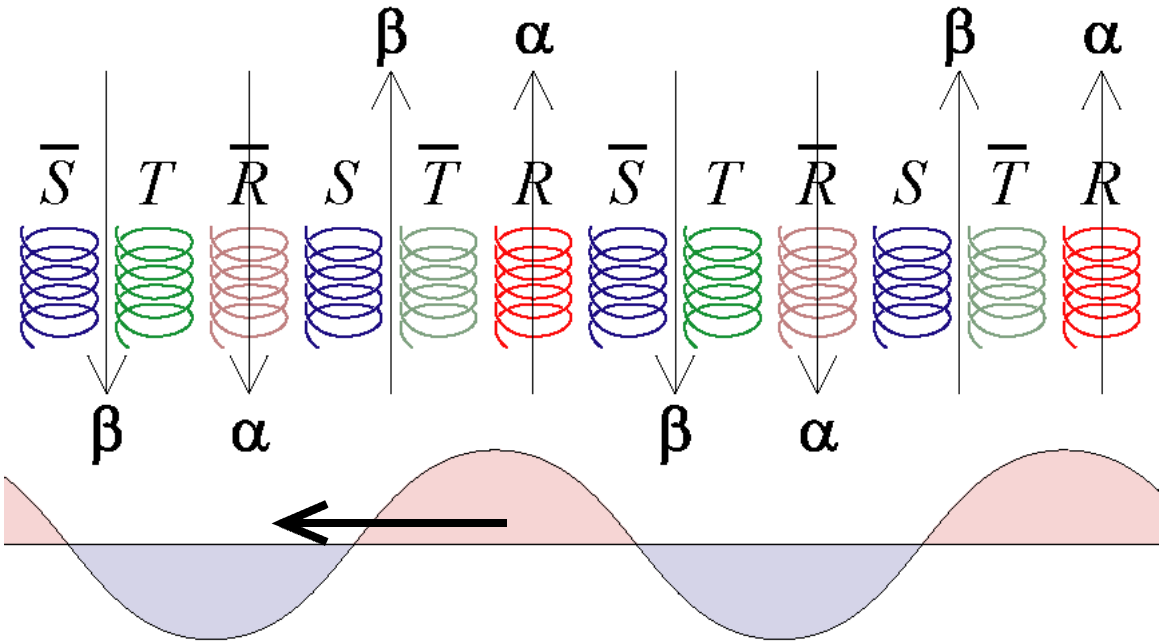
鉄板：磁気回路用

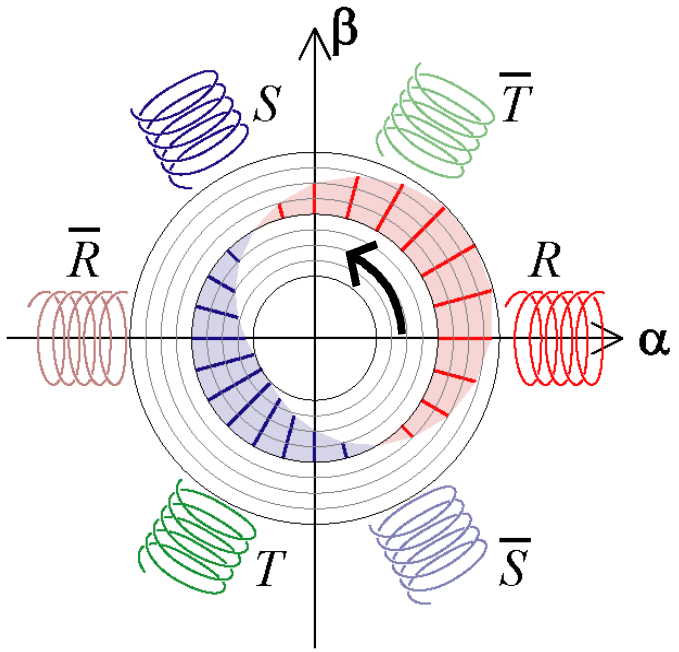
※リアクションプレート



リニアモータ

○ 概　略





3相交流電流を3系統の電磁石に流すと

- 磁界の分布ができる
- 時間とともに移動する

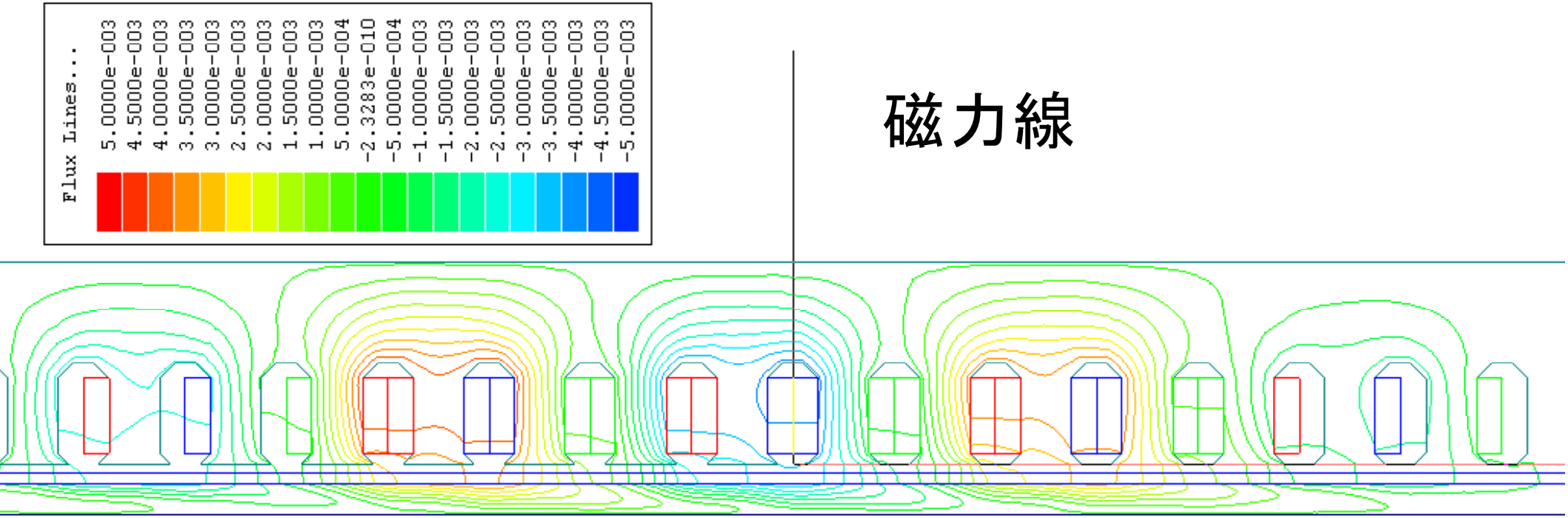
リニアモータ

○ 電磁場シミュレーション

○ 解析ソフトによる設計指標の検討

・Maxwell 2D SV（無償）の渦電流解析

→ 交流電流による電磁場と力の解析



磁力線

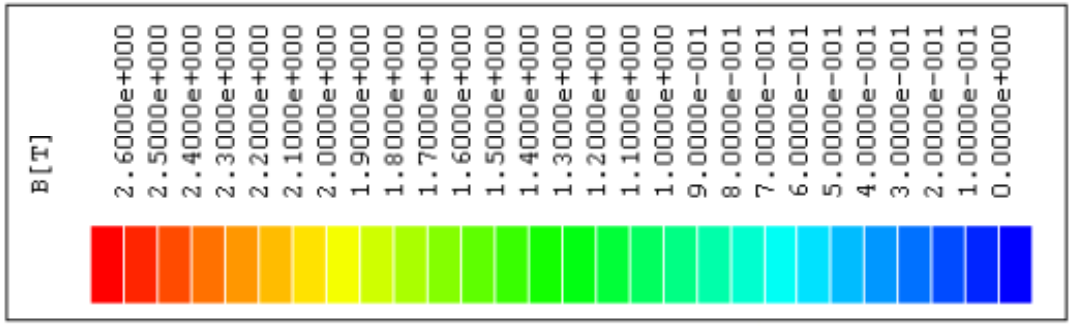
リニアモータ

○ 電磁場シミュレーション

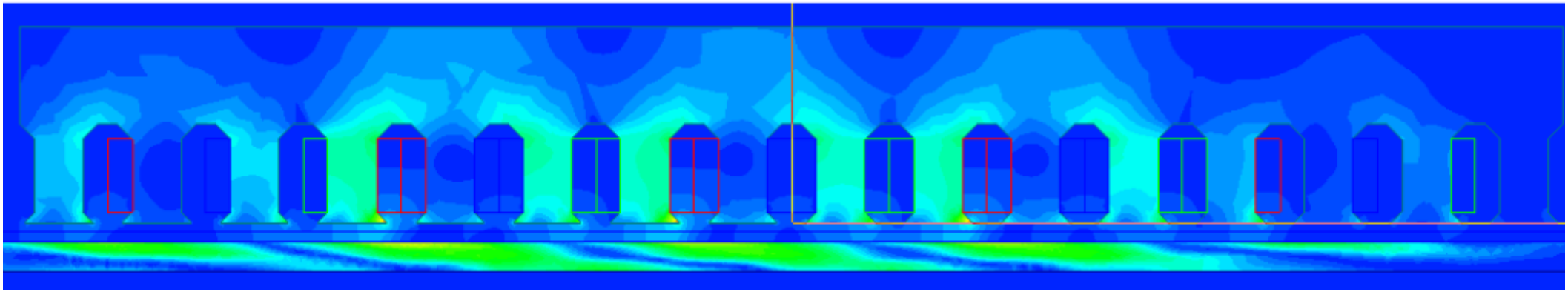
○ 解析ソフトによる設計指標の検討

・Maxwell 2D SV（無償）の渦電流解析

→ 交流電流による電磁場と力の解析



磁束密度



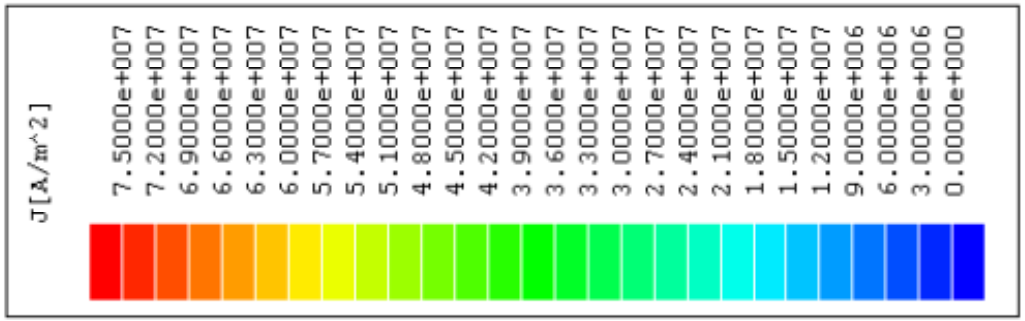
リニアモータ

○ 電磁場シミュレーション

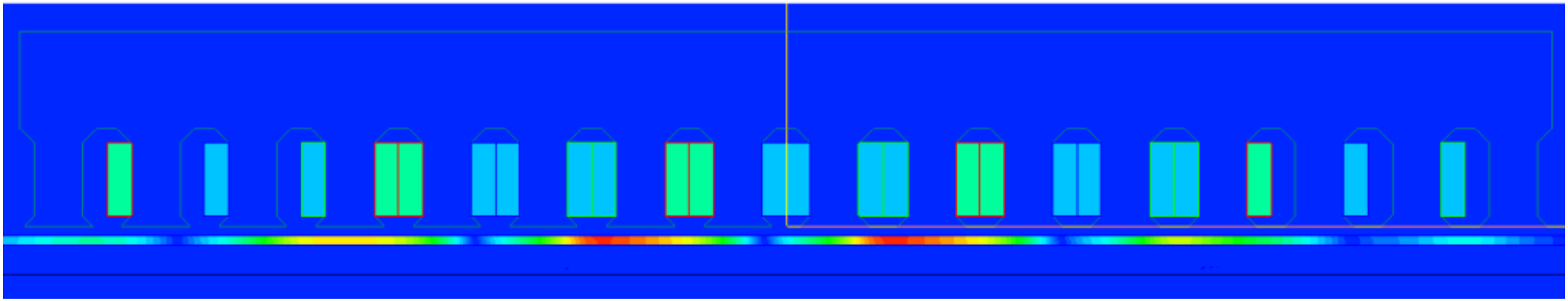
○ 解析ソフトによる設計指標の検討

・Maxwell 2D SV（無償）の渦電流解析

→ 交流電流による電磁場と力の解析

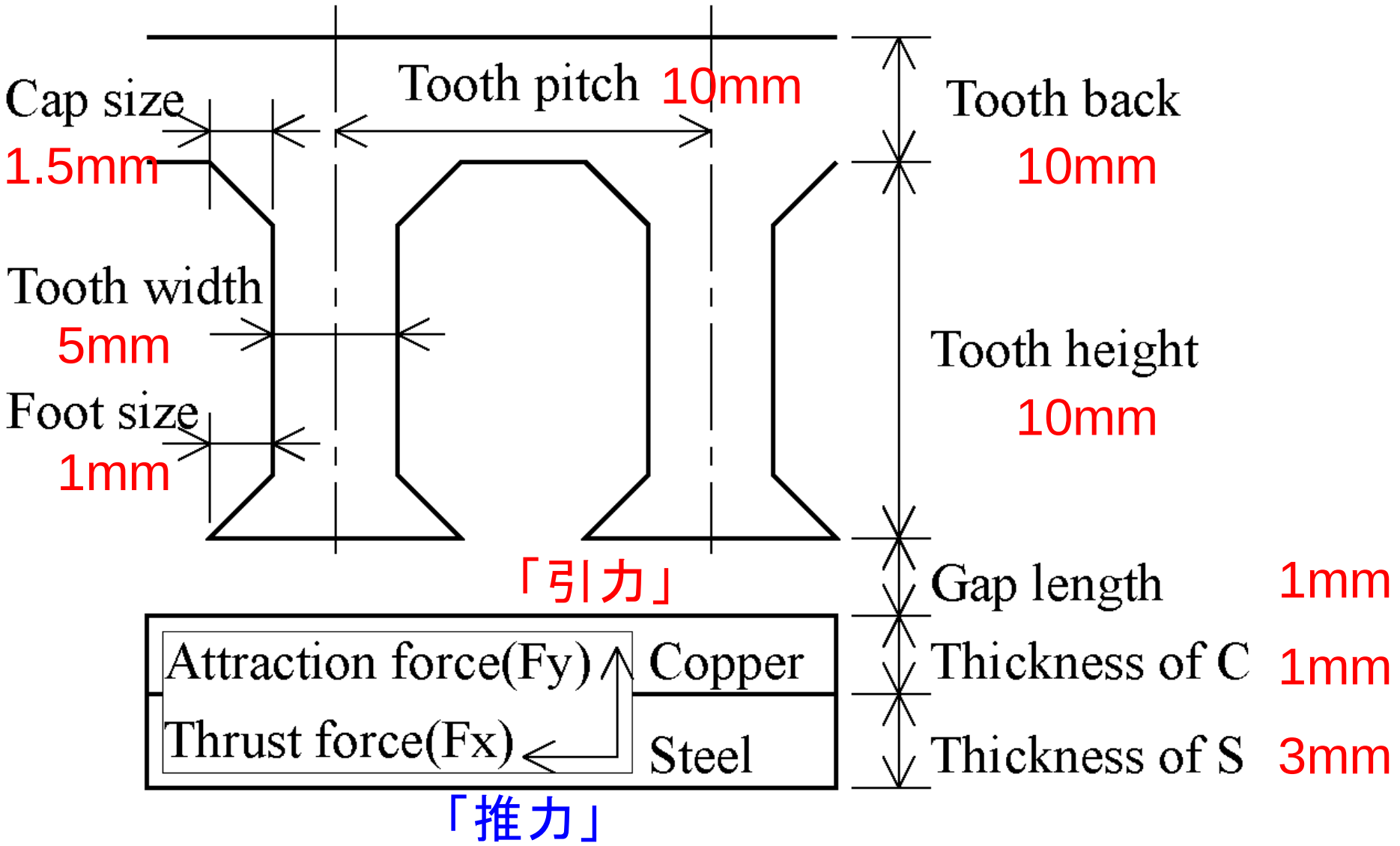


コイル電流・渦電流密度



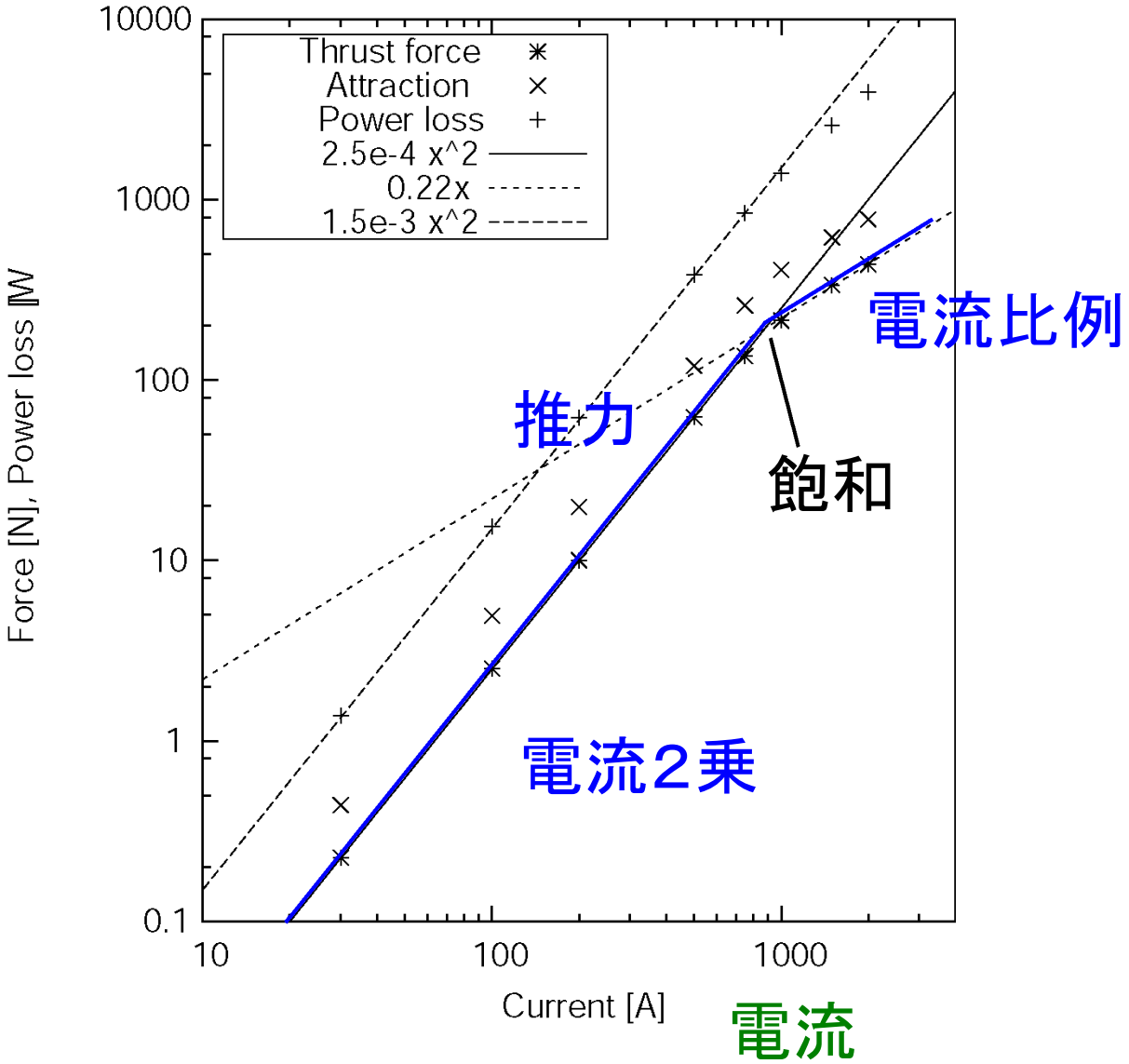
リニアモータ

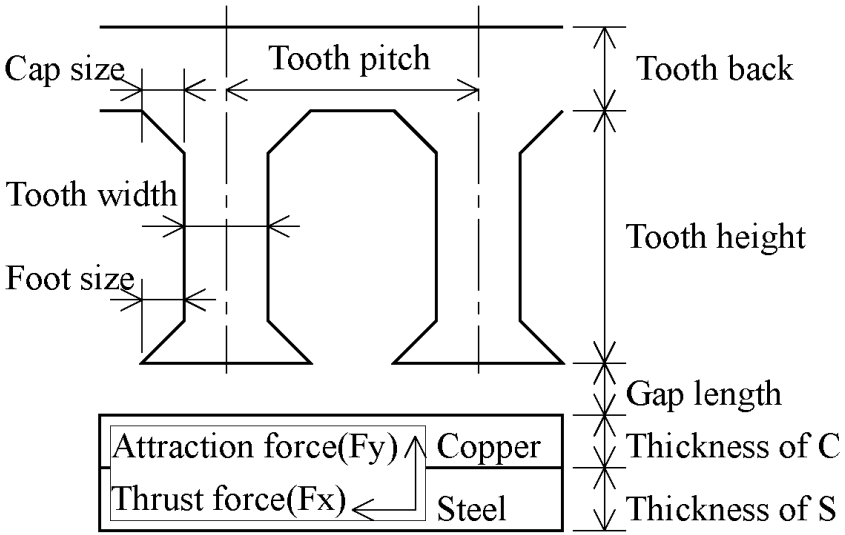
○ 電磁場シミュレーション：モデル （基準値）



リニアモータ

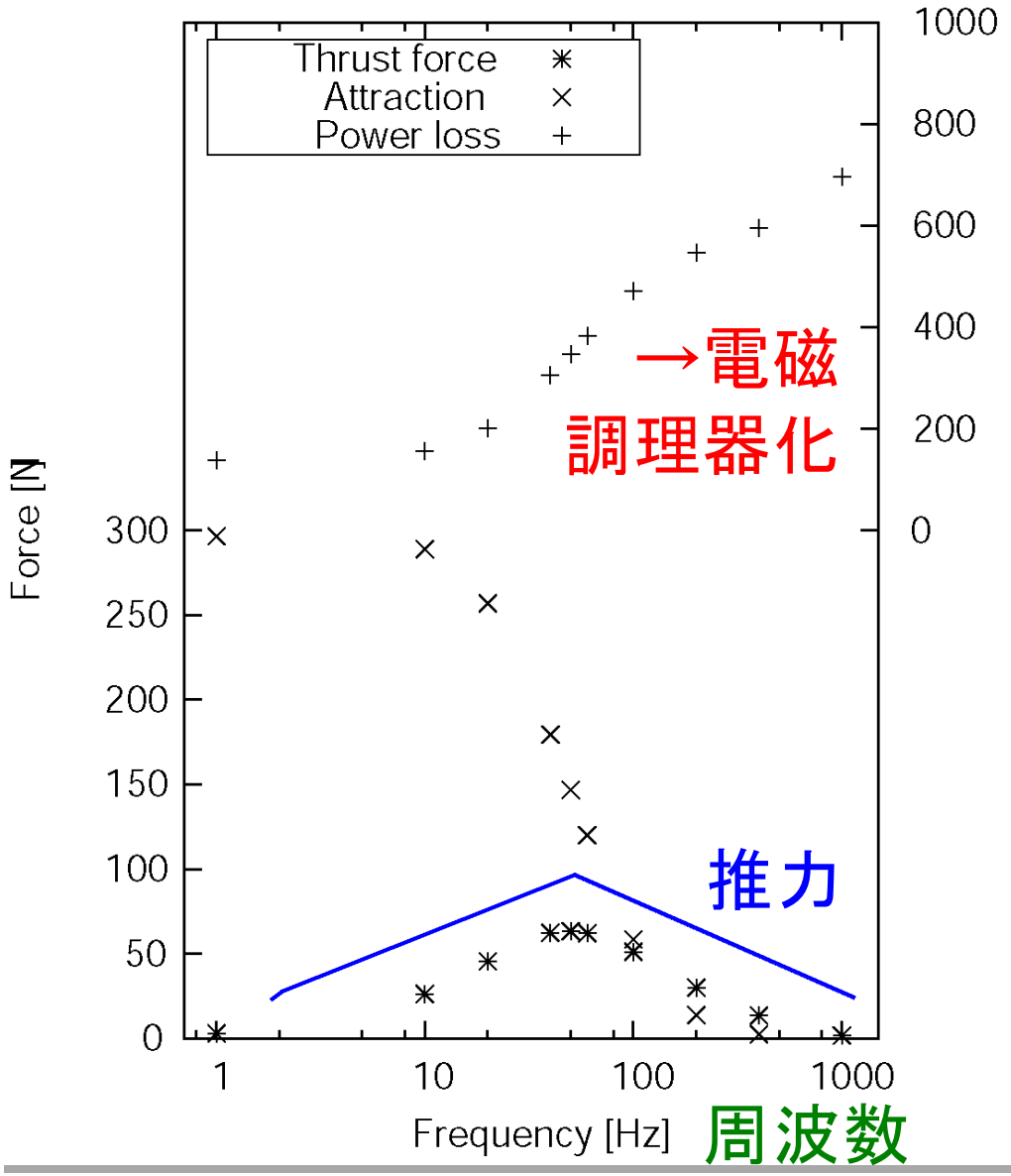
○ 電磁場シミュレーション：電流変化

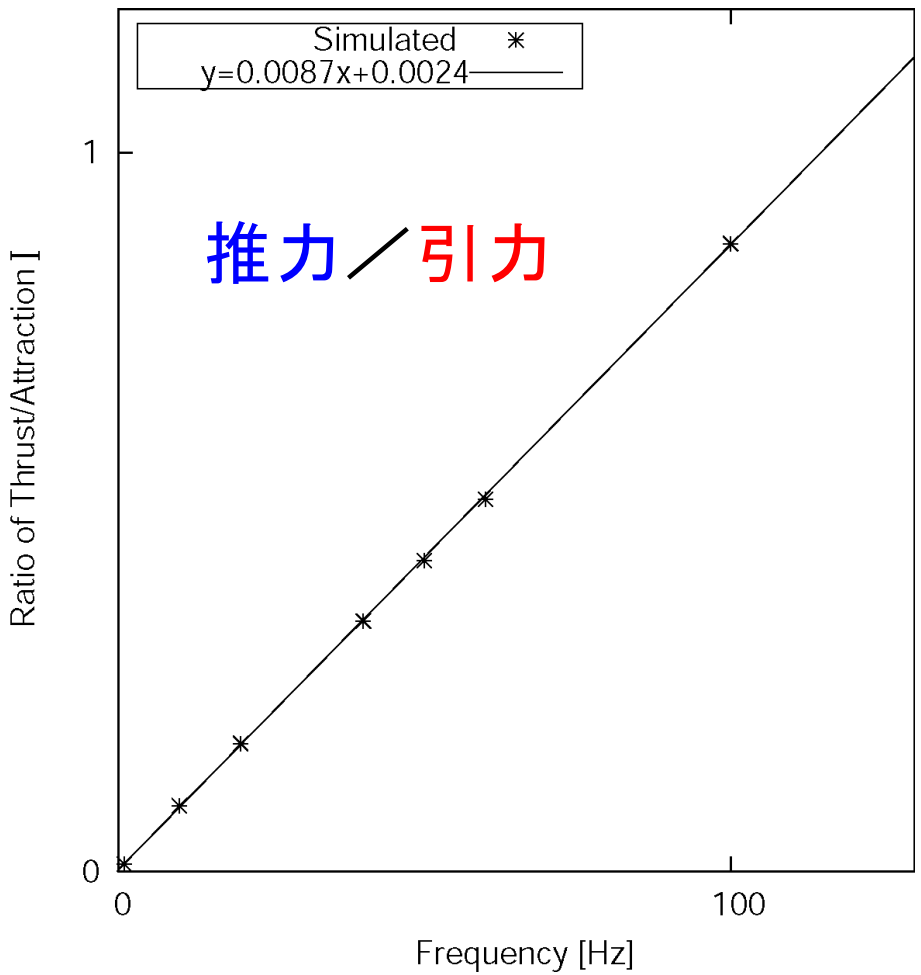




リニアモータ

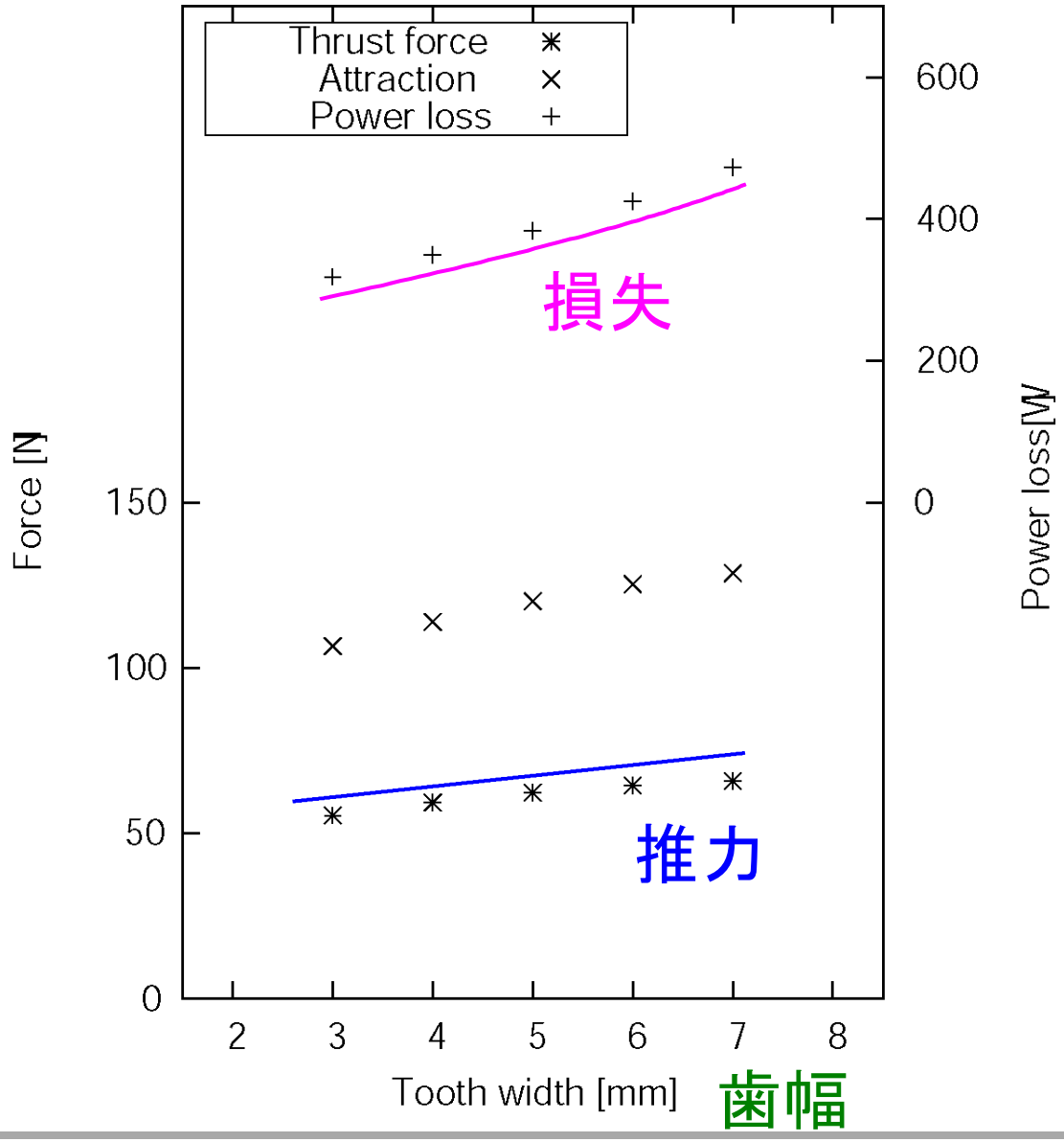
○ 電磁場シミュレーション：周波数変化

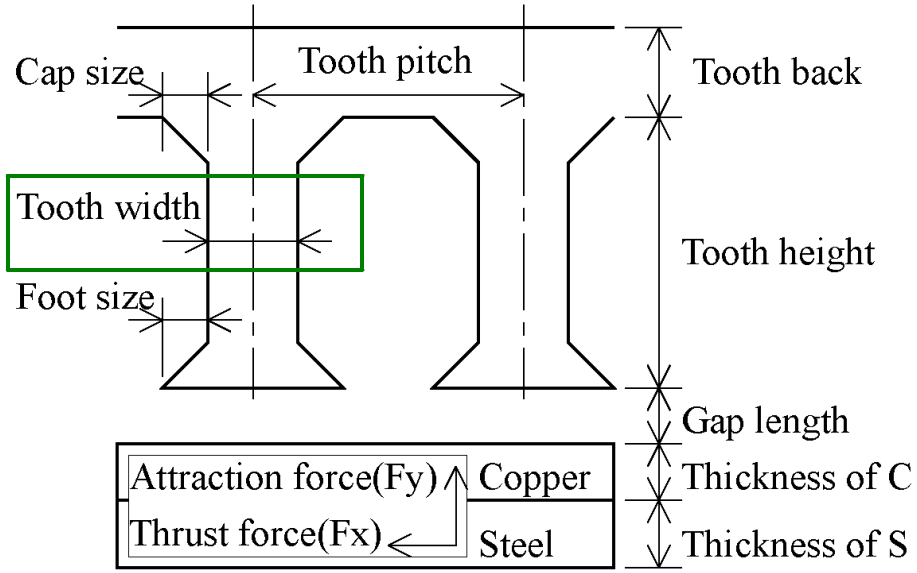




リニアモータ

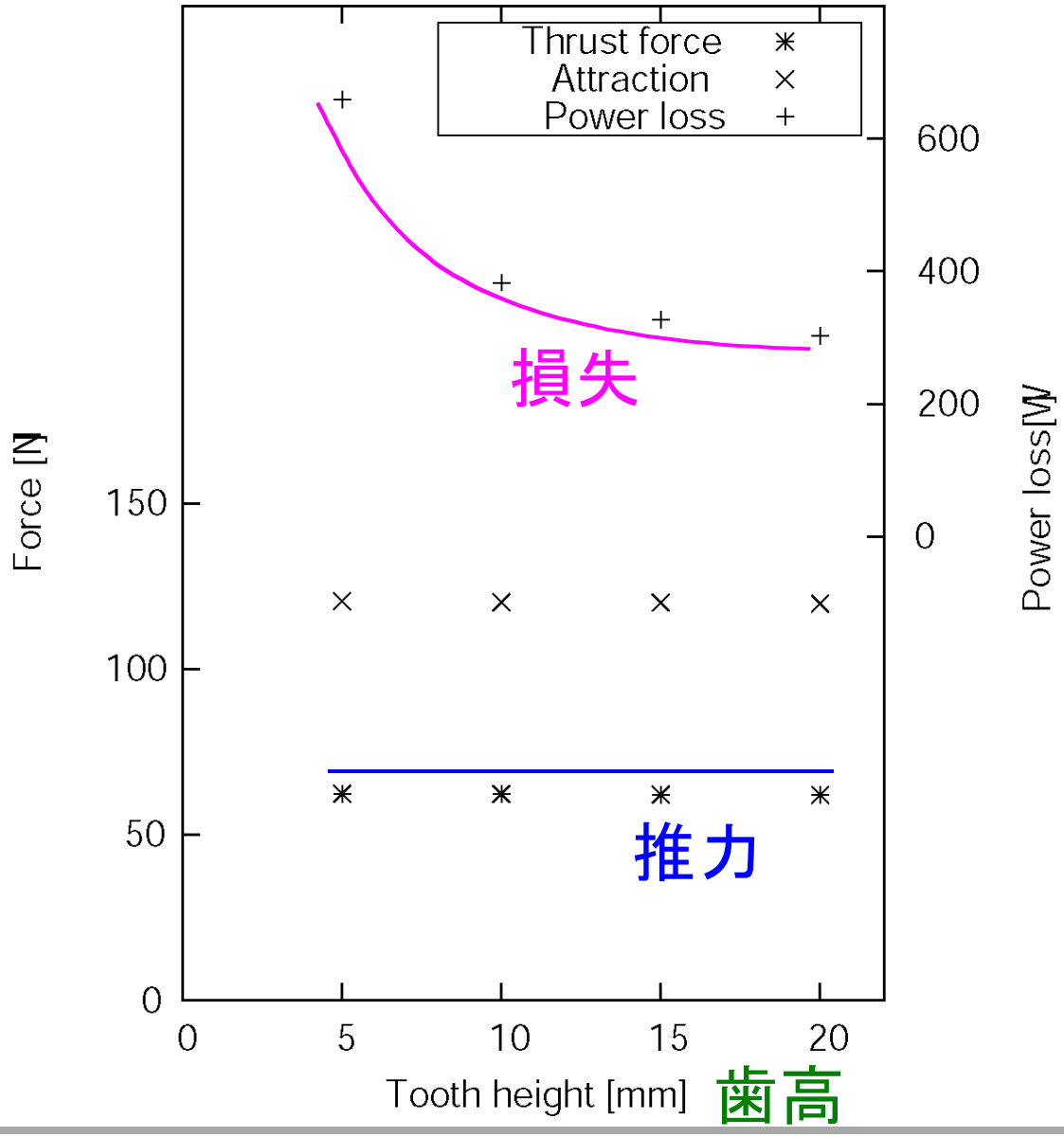
○ 電磁場シミュレーション：歯幅変化

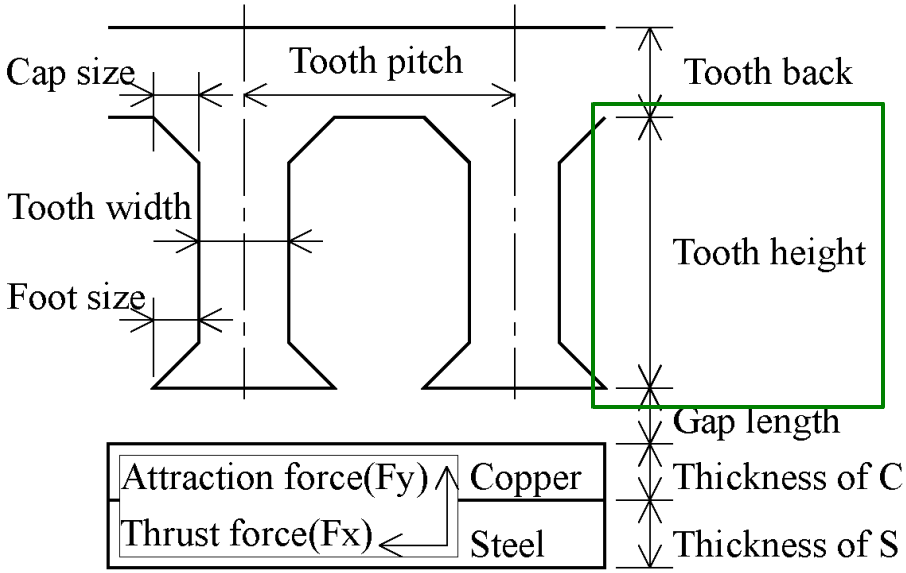




リニアモータ

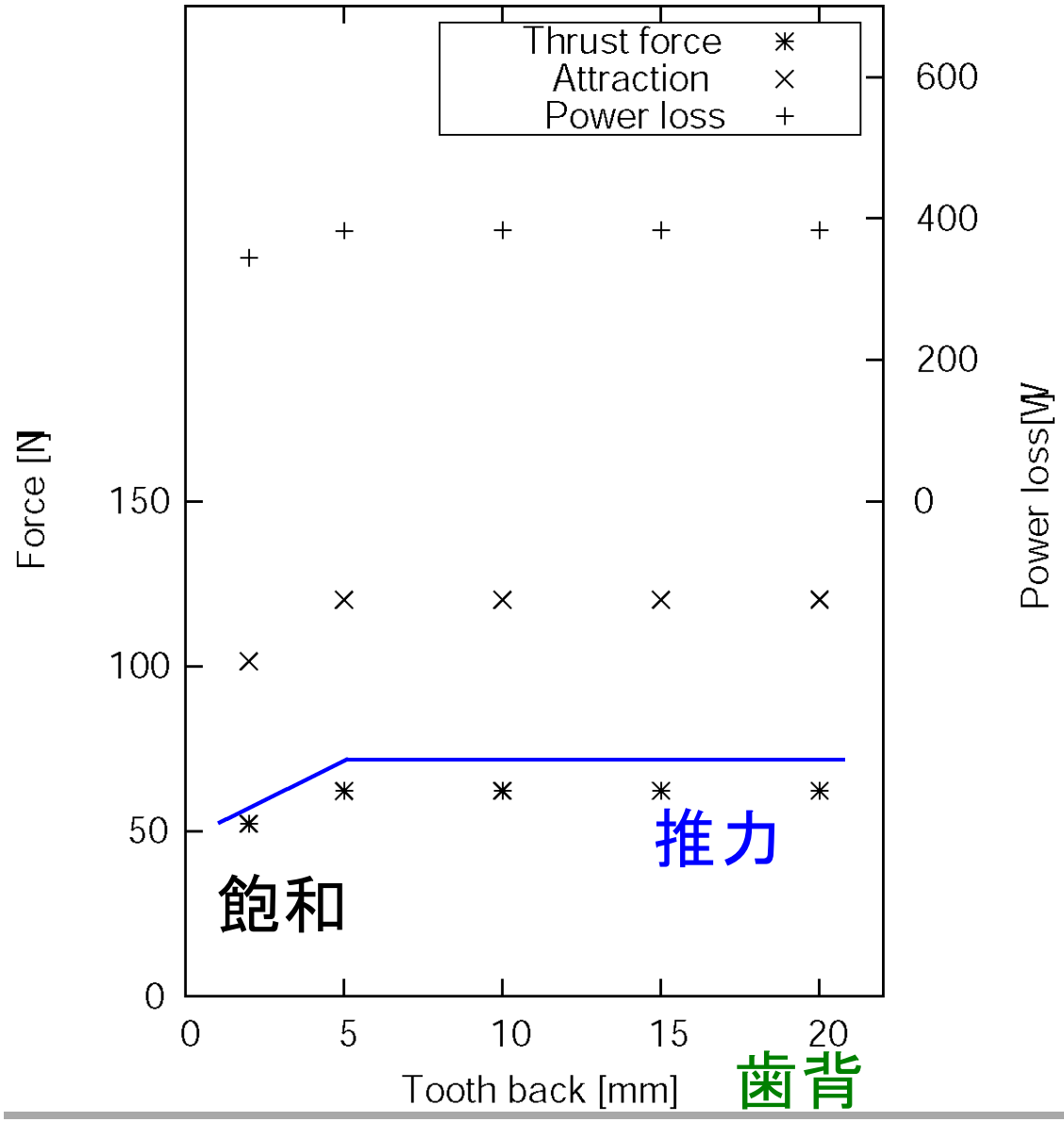
○ 電磁場シミュレーション：歯高変化

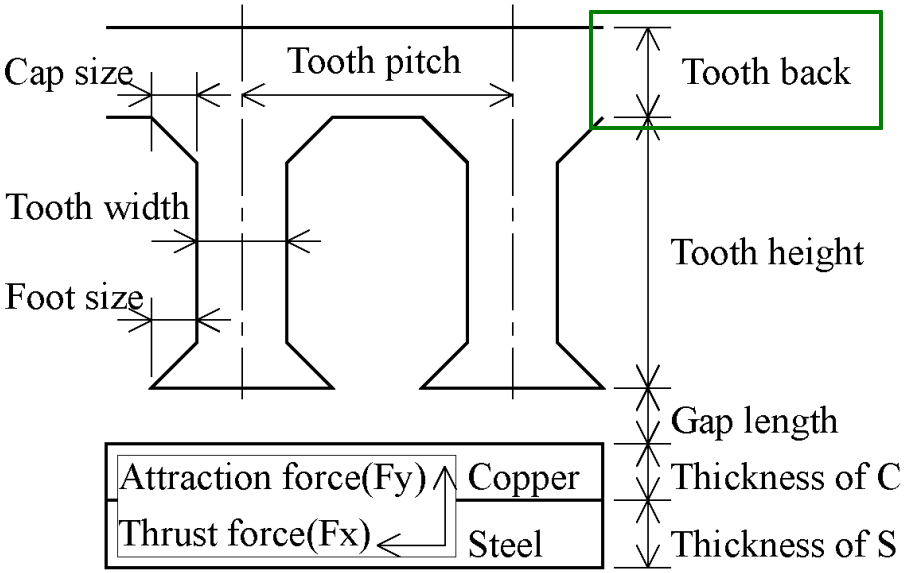




リニアモータ

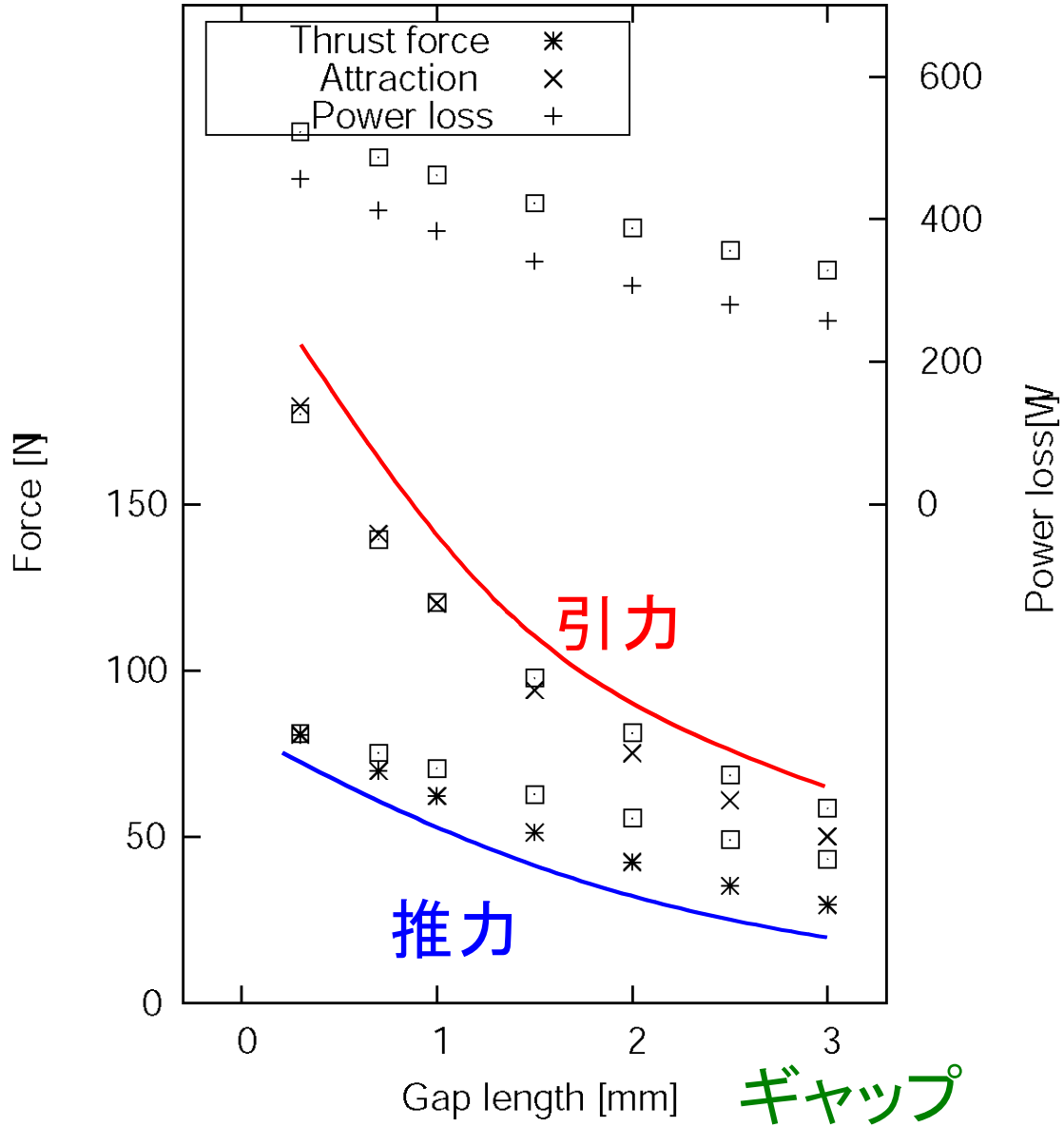
○ 電磁場シミュレーション：歯背変化

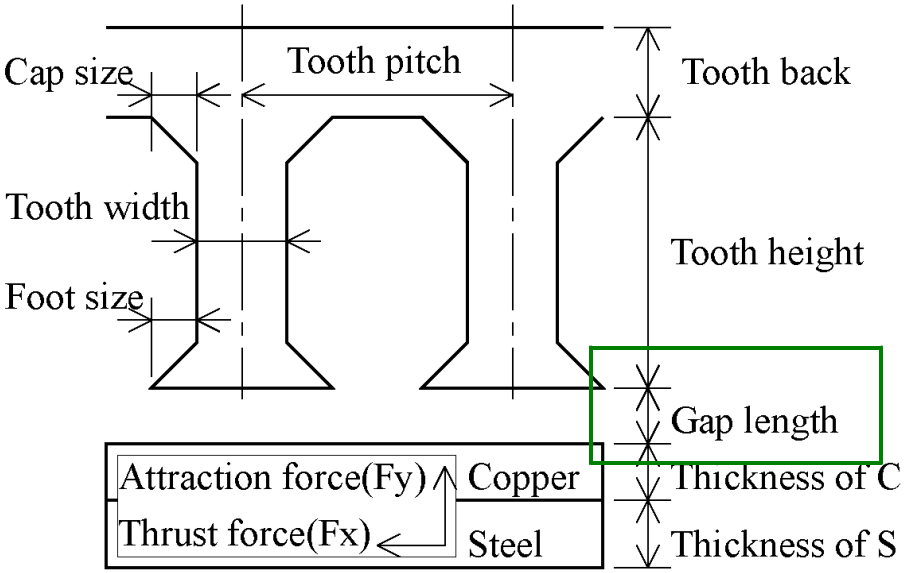




リニアモータ

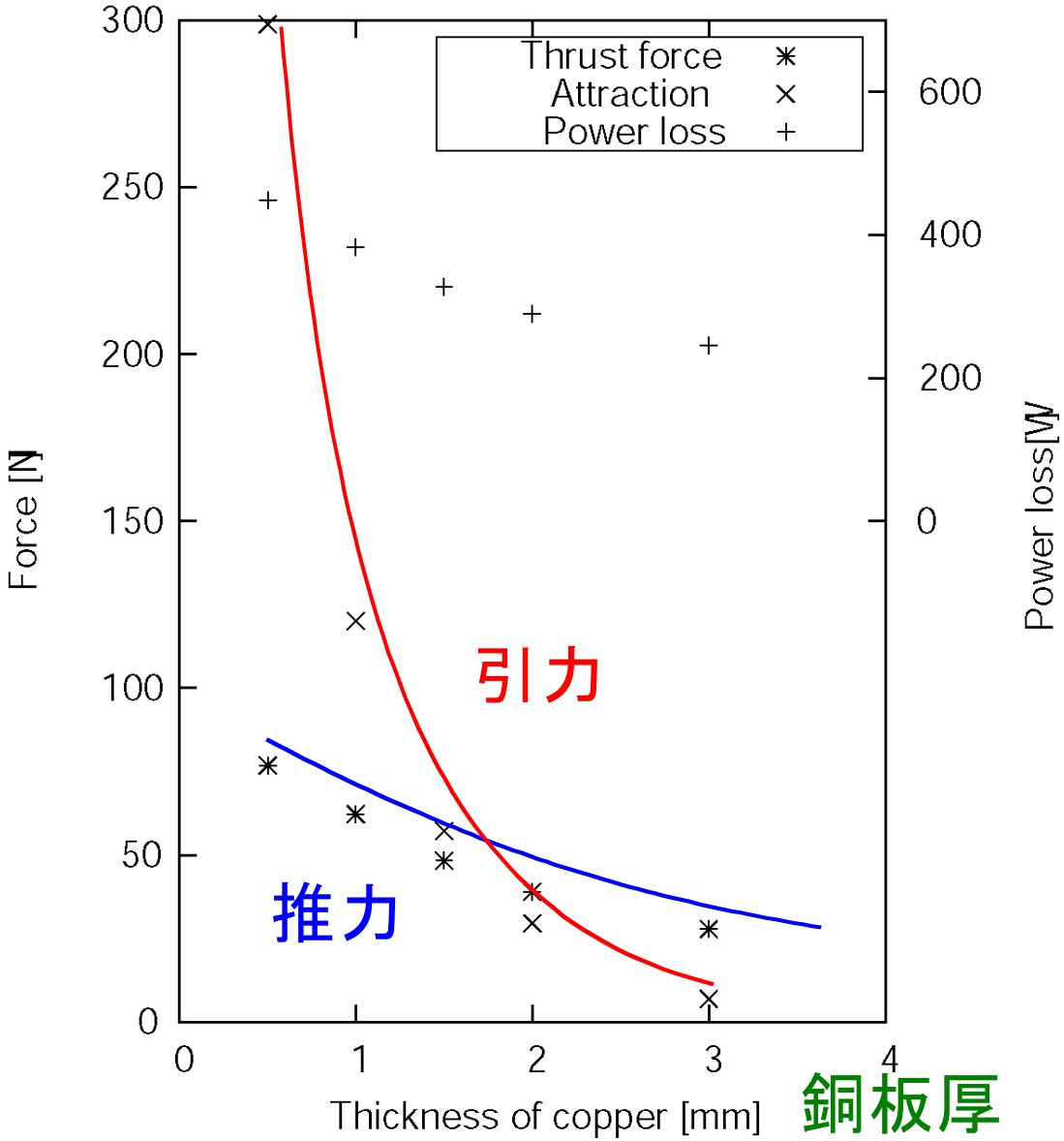
○ 電磁場シミュレーション：ギャップ

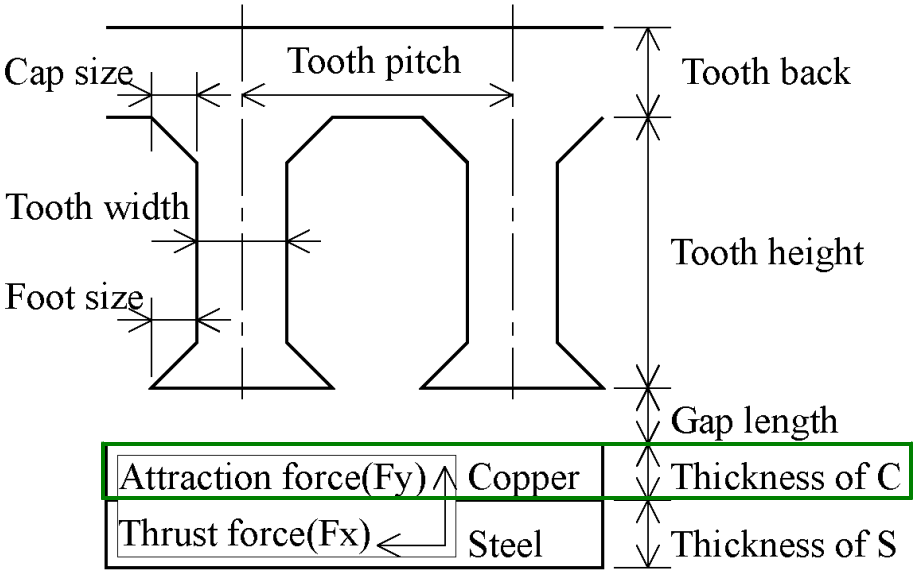




リニアモータ

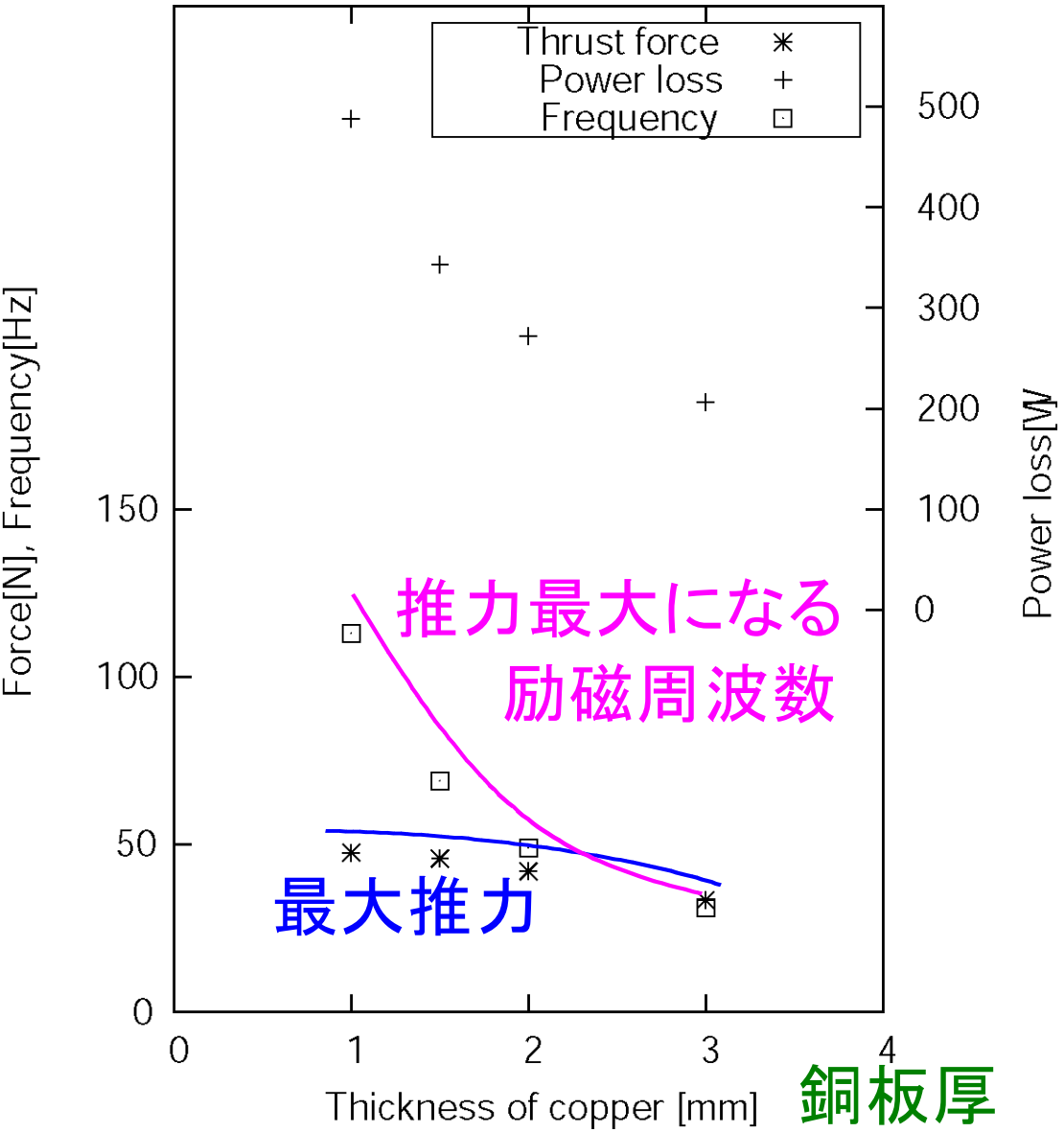
○ 電磁場シミュレーション：銅板厚

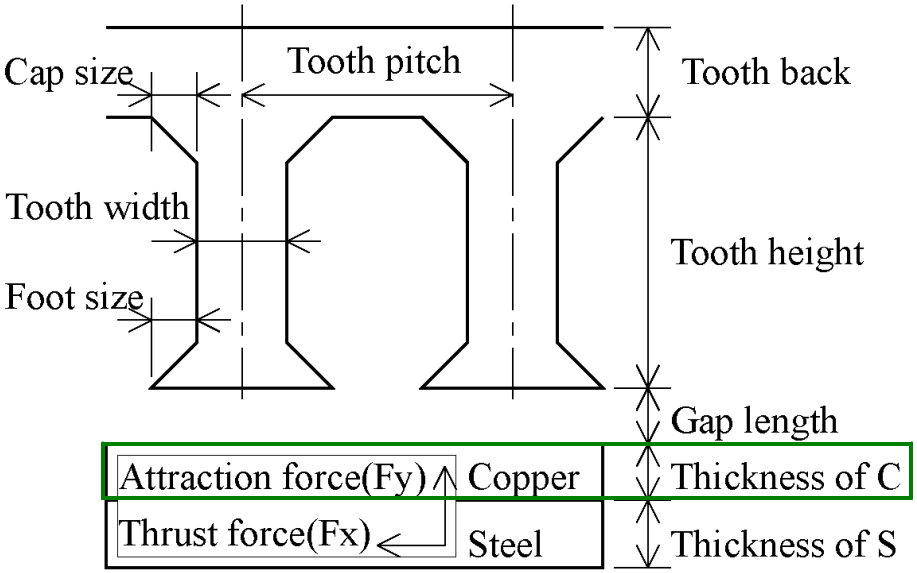




リニアモータ

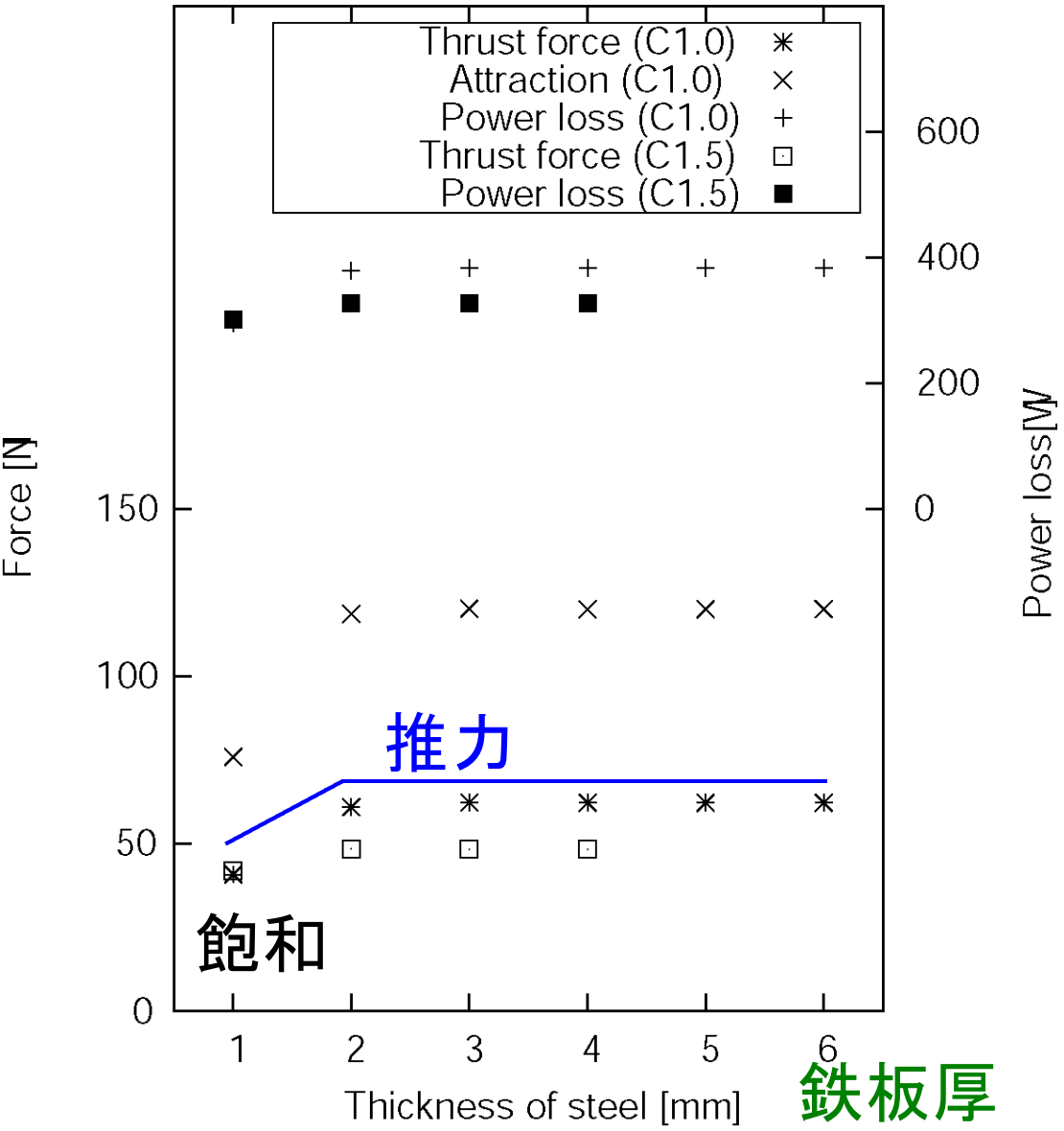
○ 電磁場シミュレーション：銅板厚

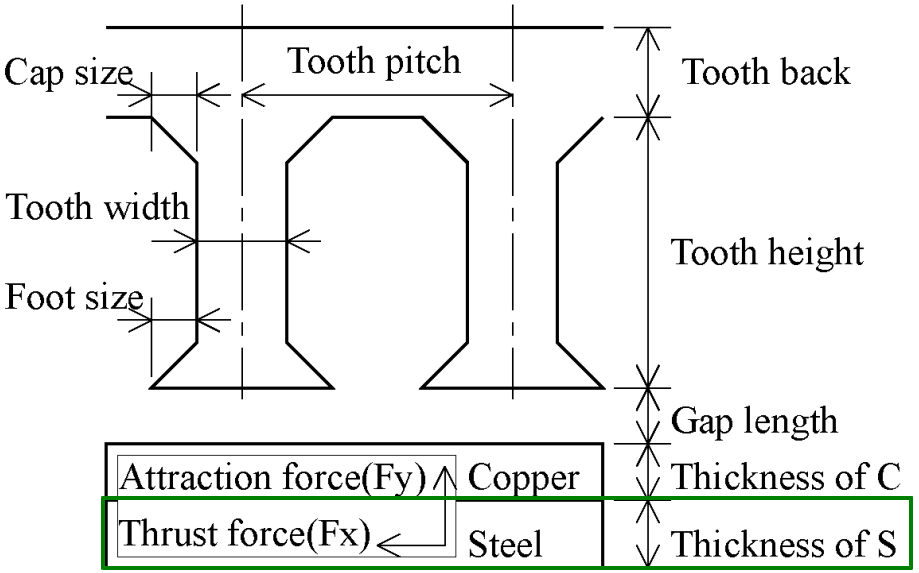




リニアモータ

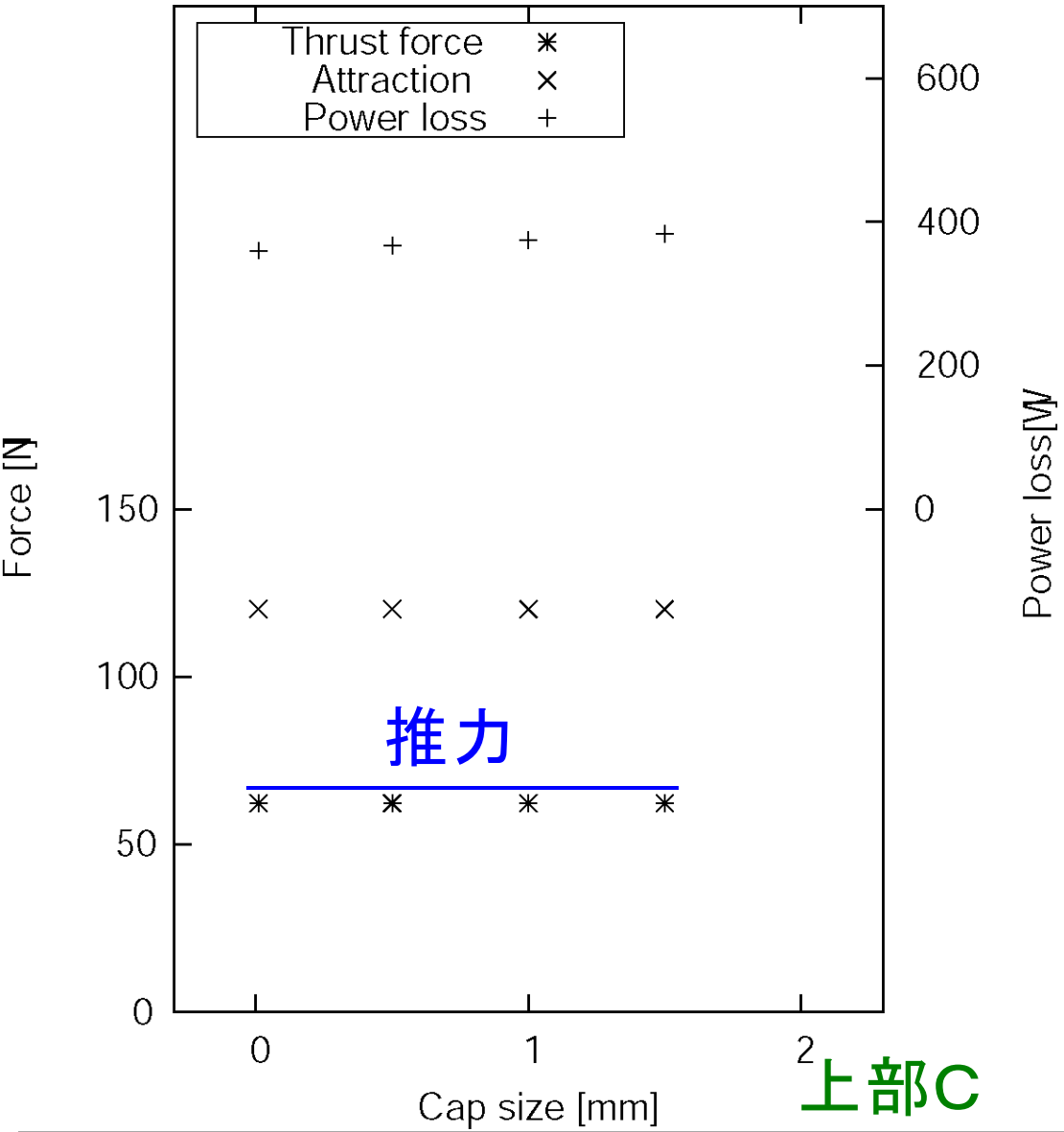
○ 電磁場シミュレーション：鉄板厚

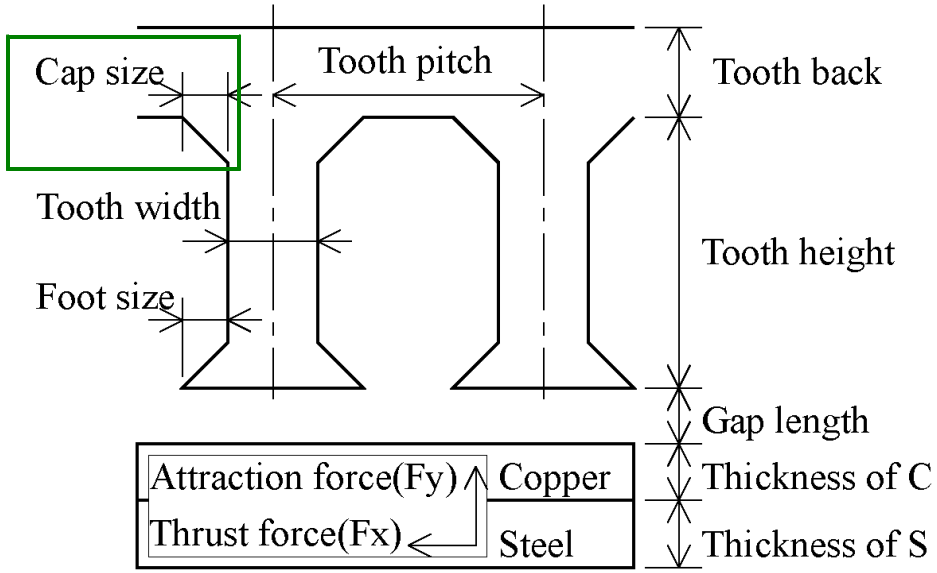




リニアモータ

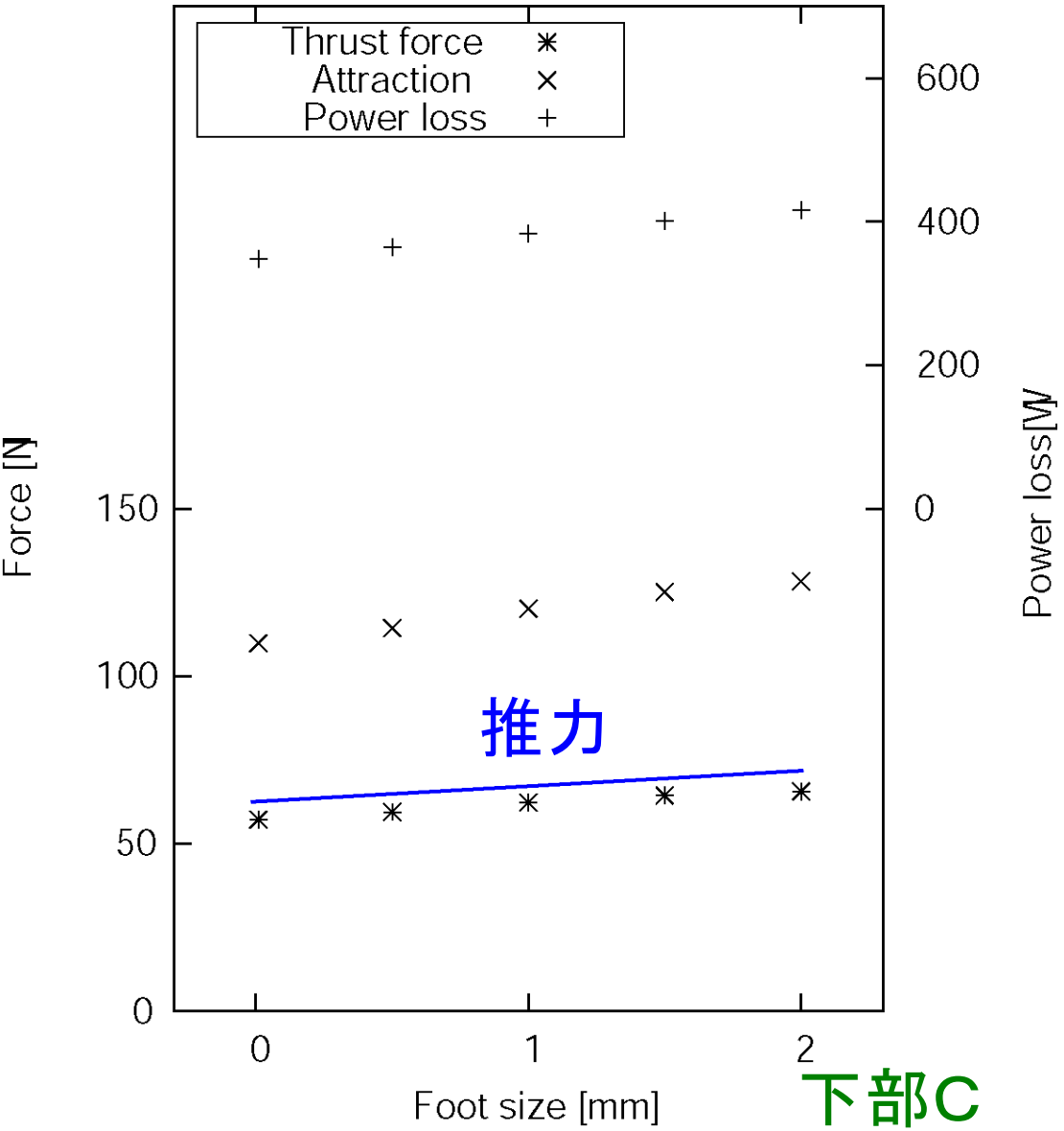
○ 電磁場シミュレーション：上部形状



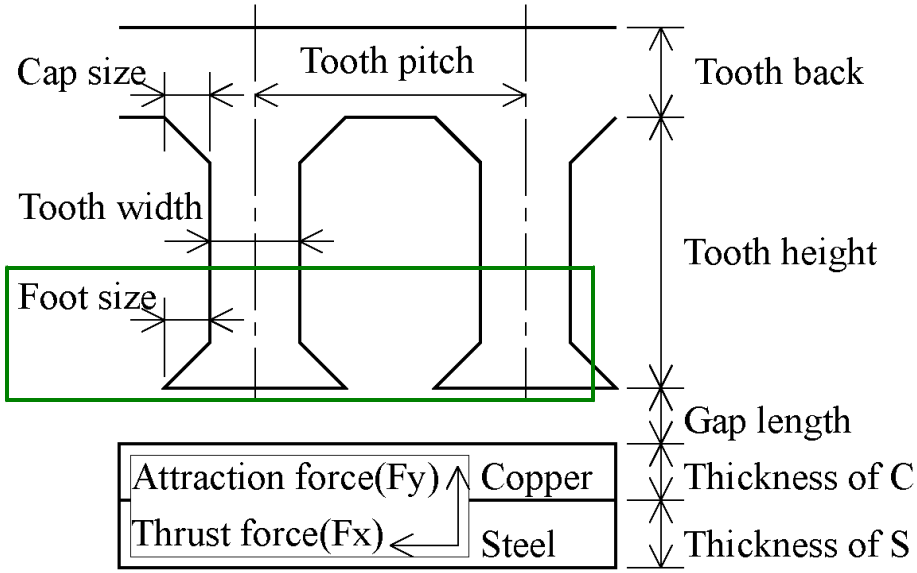


リニアモータ

○ 電磁場シミュレーション：下部形状

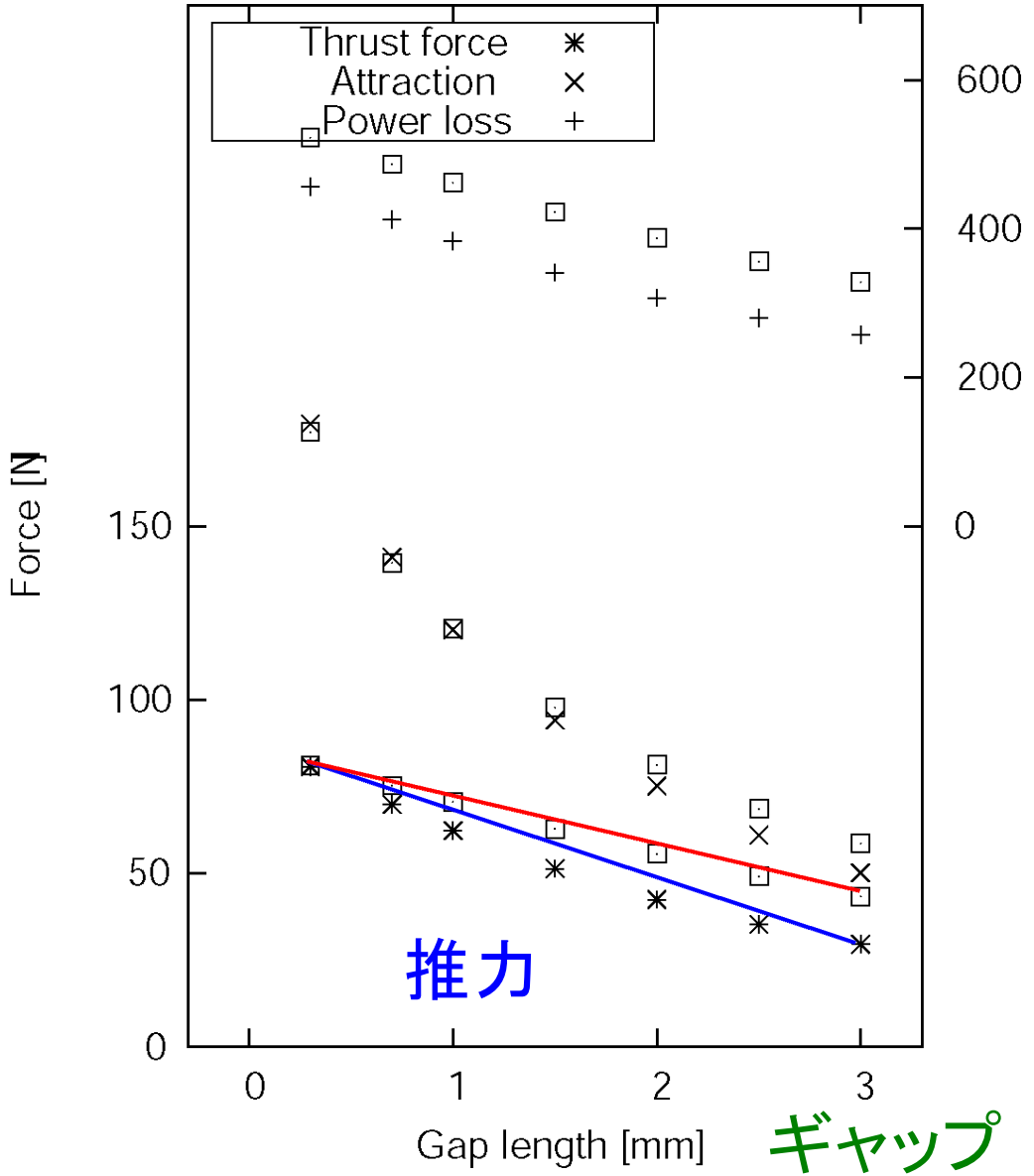


下部C



リニアモータ

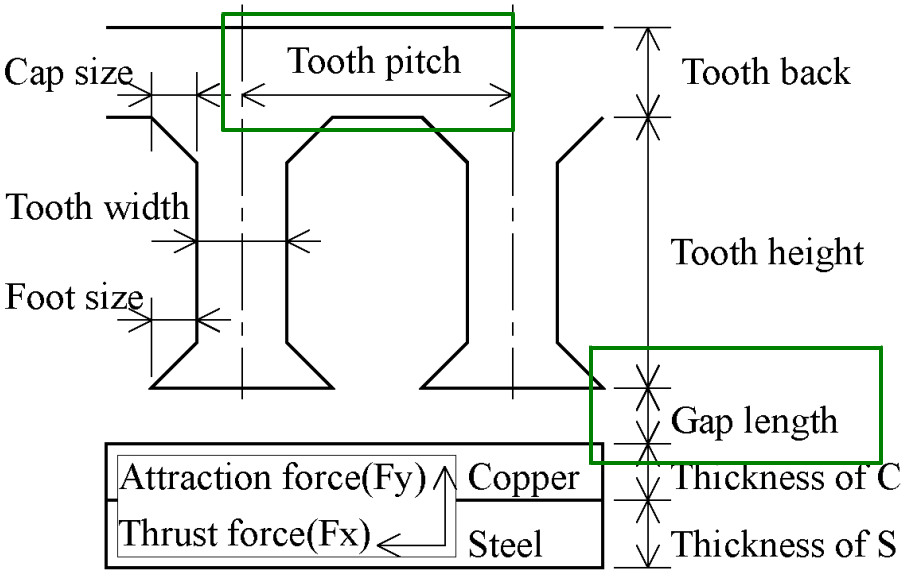
○ 電磁場シミュレーション：スロット数



幅10.0　15スロット　4コイル

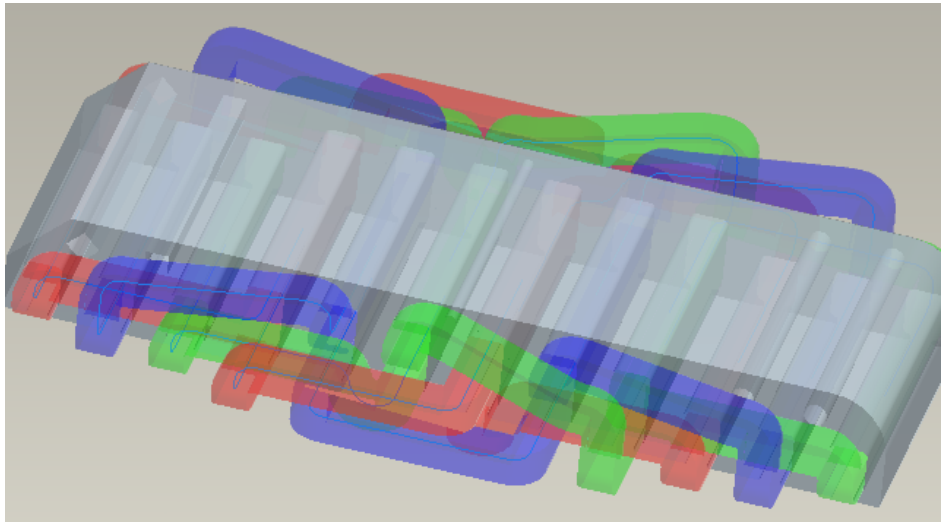
幅12.5　12スロット　3コイル

ギャップ変化



リニアモータ

○ 最終設計

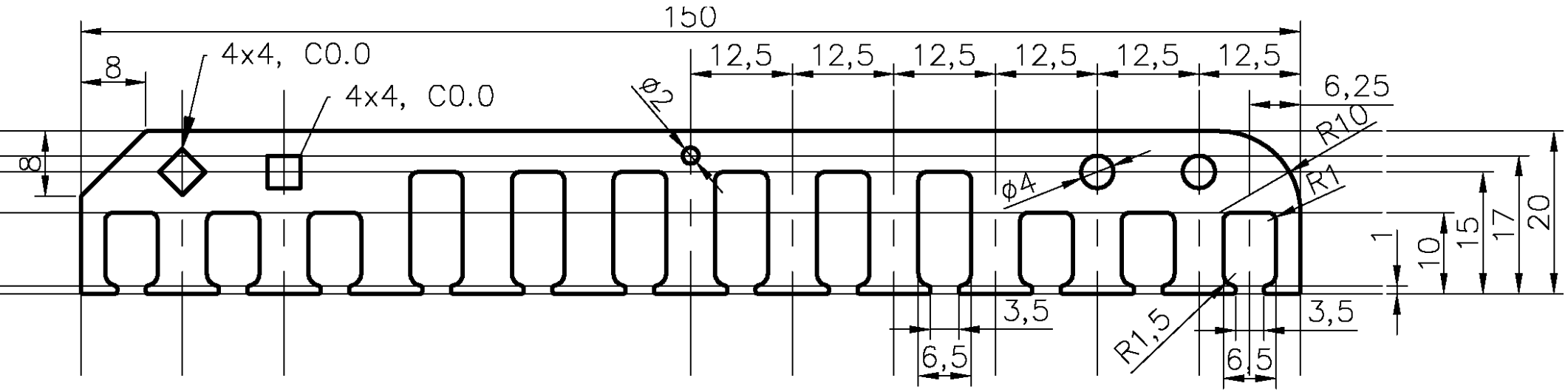


12スロット　3コイル/相

12.5mm ピッチ

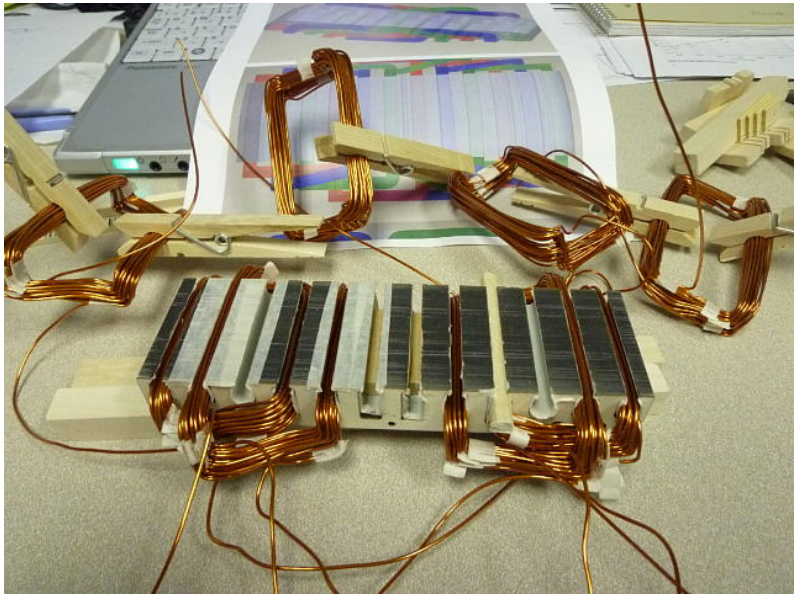
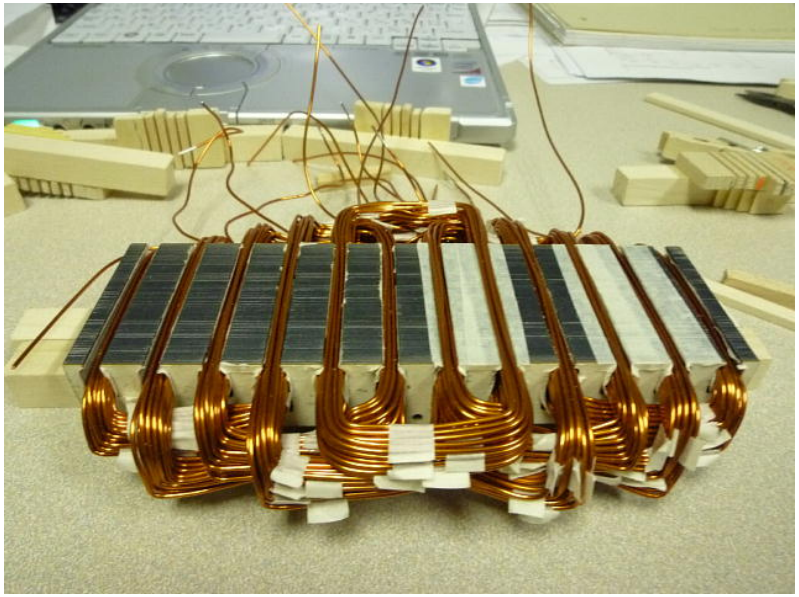
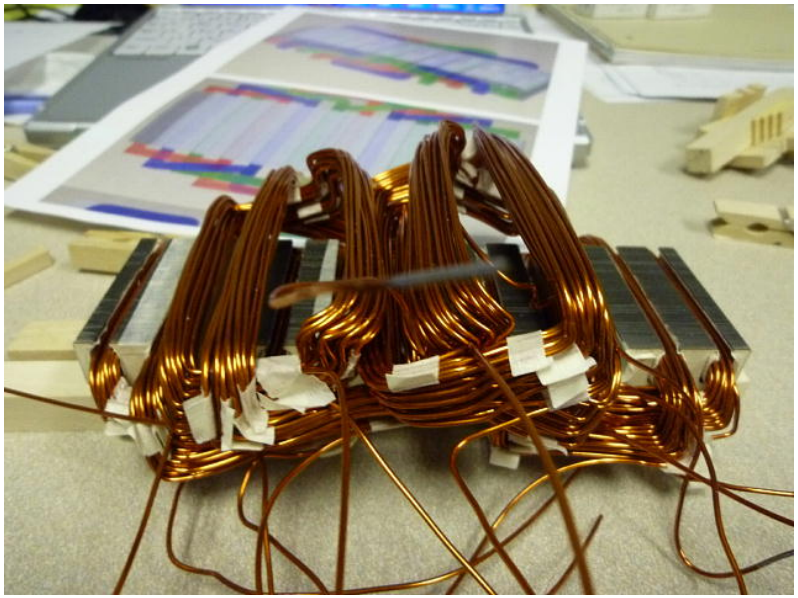
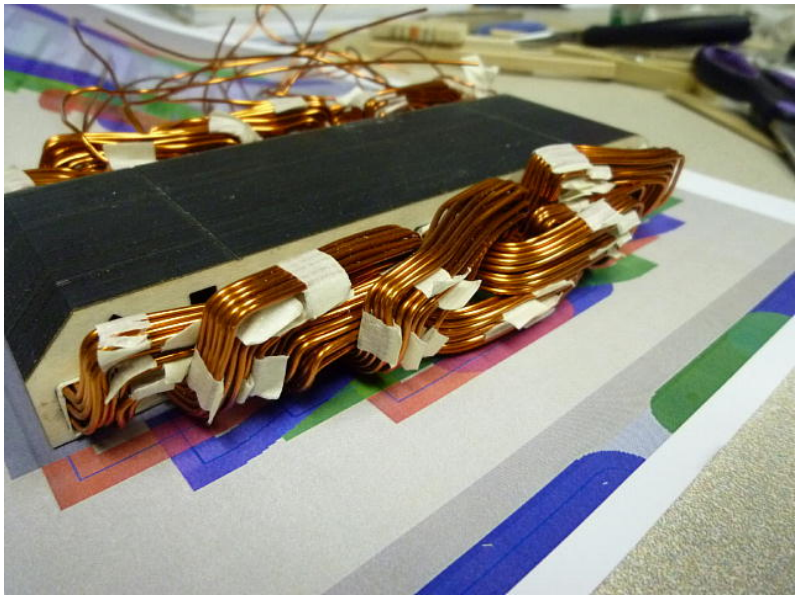
奥行き 44mm

φ約1mm 25巻き/コイル



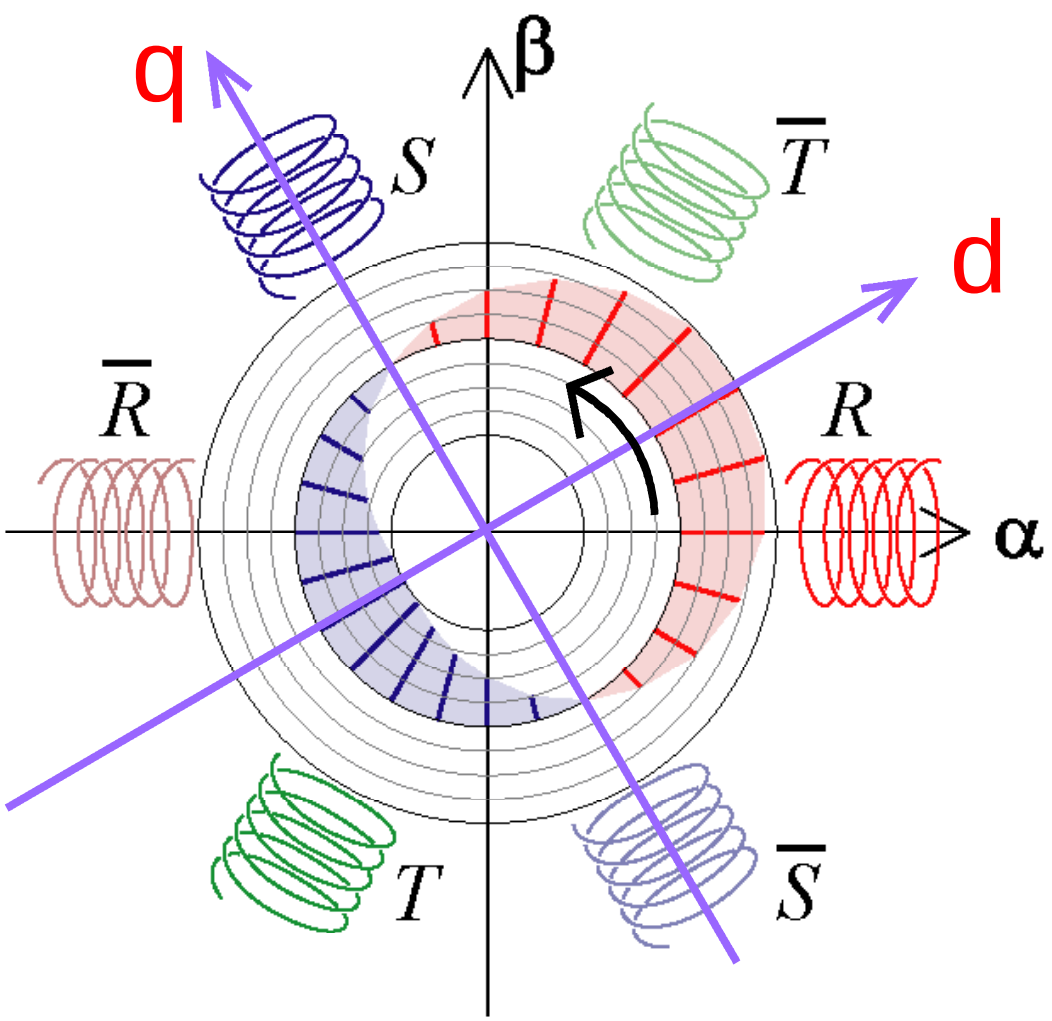
リニアモータ

○ 実 装

ベクトル制御インバータ

○ ベクトル制御の概念



- 回転・分布する物理量を回転する座標系d−q上で表現する.

↑ 回転座標変換

直交2相コイル α－β

↑ Clarke変換

三相RSTコイル

ベクトル制御インバータ

○ ベクトル制御の主要数式

$$i_{1d} = I_0(t) + \frac{L_2}{R}\frac{d}{dt}I_0(t)$$

$$I_0(s) = \frac{1}{1+(L_2/R)s} I_{1d}(s)$$

磁界の強さに関する関係式

$$i_{1q} = \frac{L_2}{R} I_0 \frac{d}{dt}\theta(t)$$

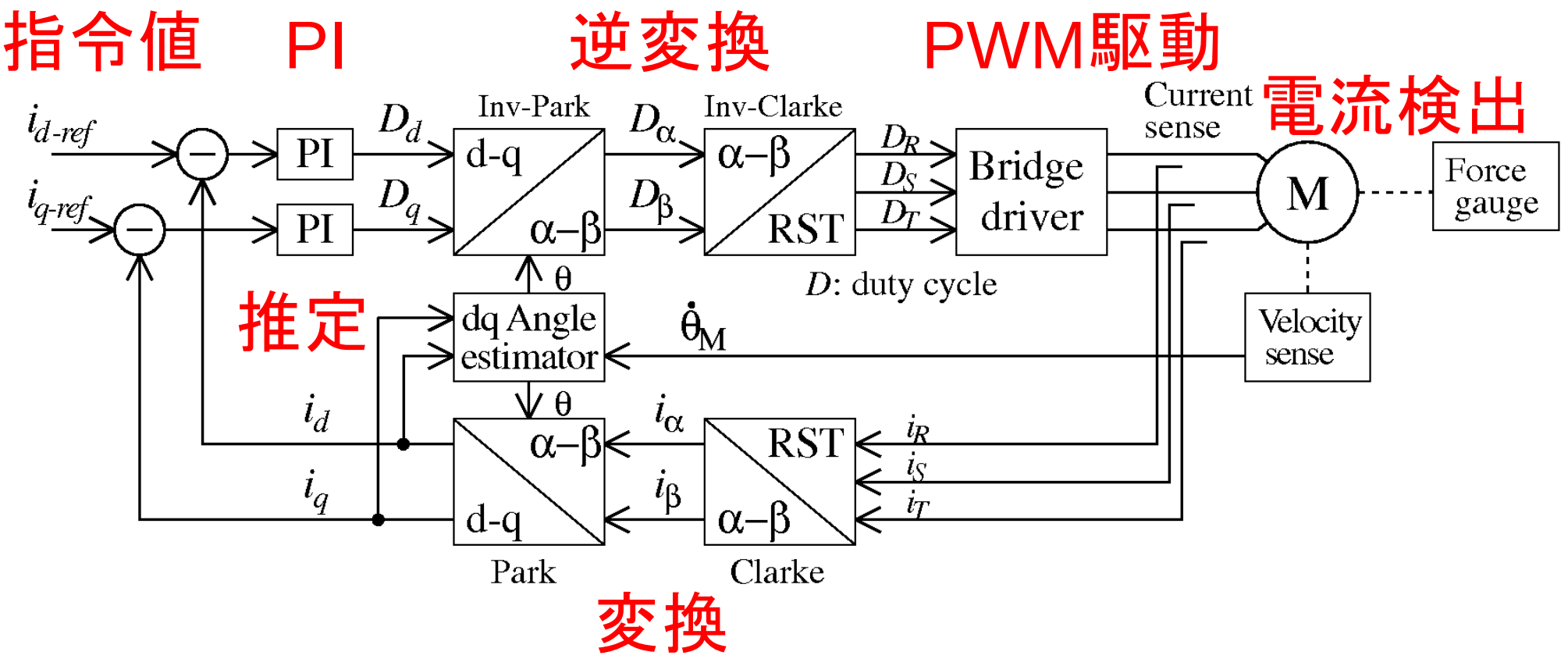
dq軸の角度推定に使用する式

トルク∝ $I_0 \cdot i_{1q}$

全電流＝ $\sqrt{(i_{1d})^2 + (i_{1q})^2}$

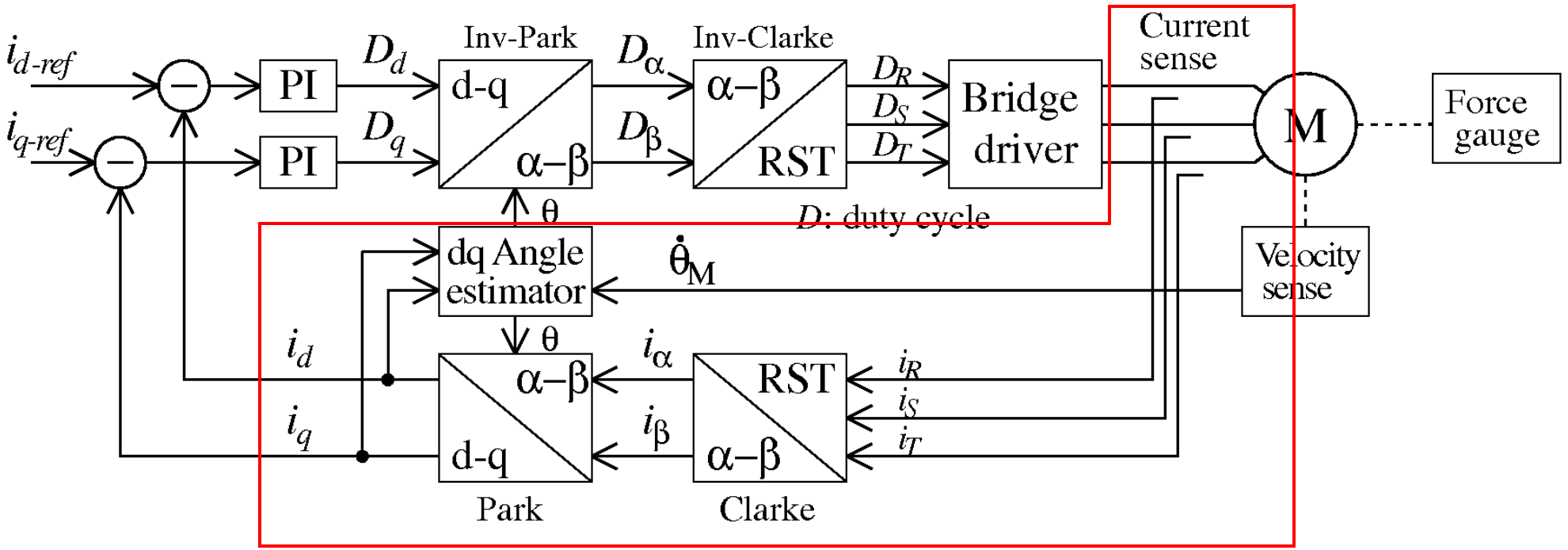
ベクトル制御インバータ

○ ベクトル制御の実装



ベクトル制御インバータ

○ ベクトル制御の実装

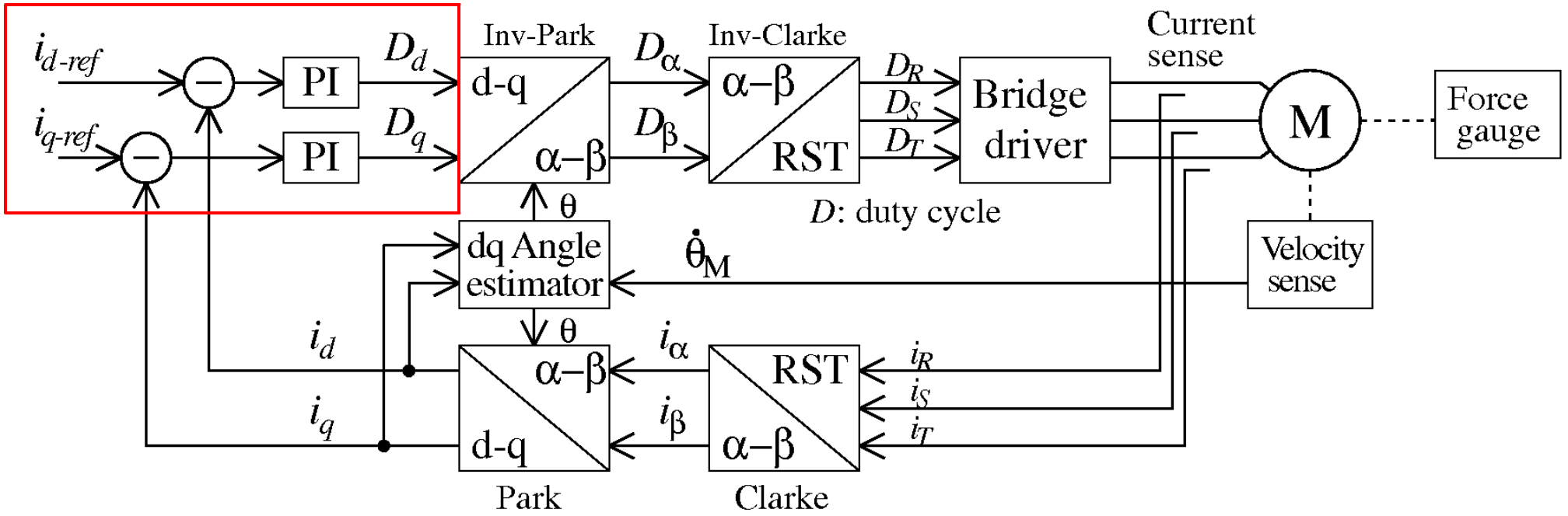


1： 一次側電流を計測して，変換

- i_{1d}，i_{1q} を求める．
- dq軸の角度θを推定する．

ベクトル制御インバータ

○ ベクトル制御の実装

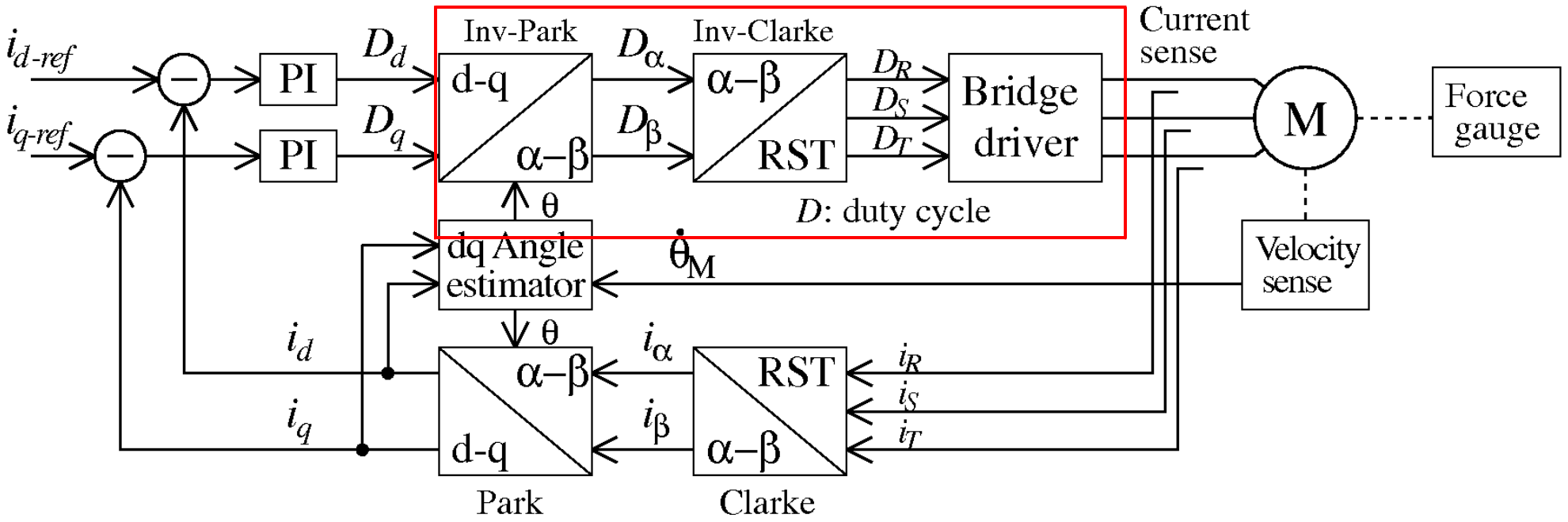


2： 目標とするi_{1d}, i_{1q} と比較してPI制御で，dq軸における電圧を算出する．

i_{1d}：一定値(磁束) i_{1q}：トルク・推力決定

ベクトル制御インバータ

○ ベクトル制御の手法



3： 逆変換してRSTの電圧(PWM)を決定.

ベクトル制御インバータ

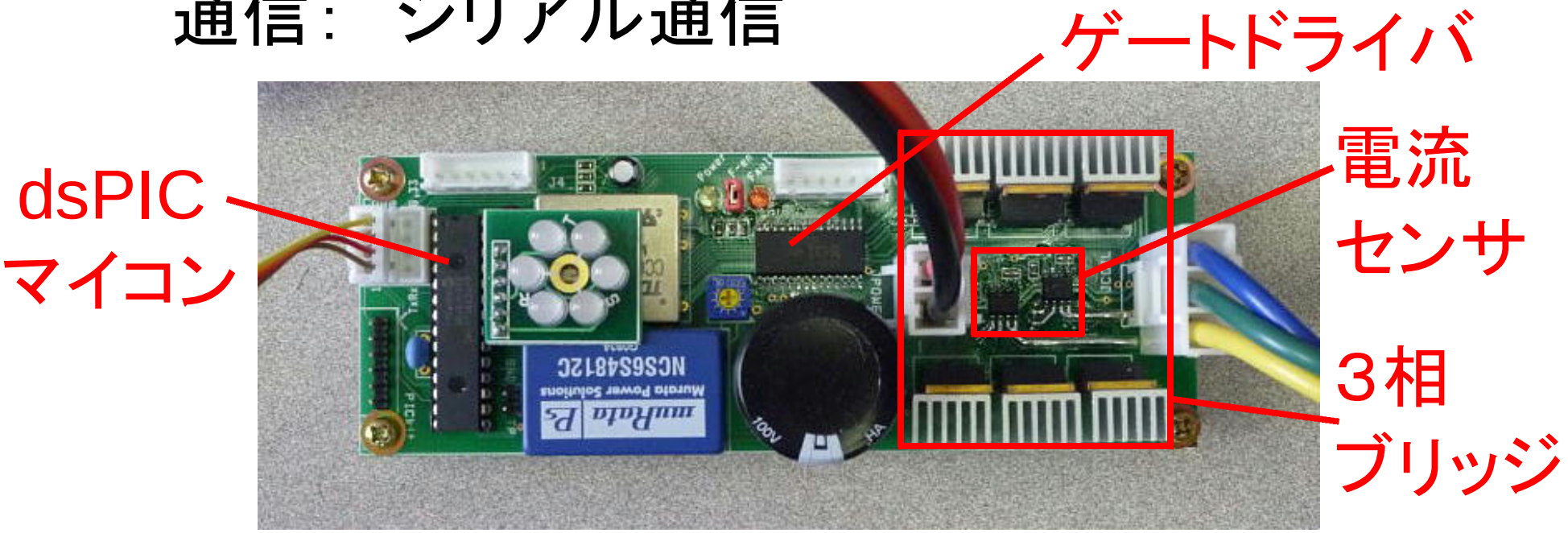
○ インバータ回路の実装

○ dsPICマイコンによる制御回路を実装.

電源： 50～75V （のみ，DC-DC搭載）

出力： ピーク電流 30A/相（電源電圧）

通信： シリアル通信



ベクトル制御インバータ

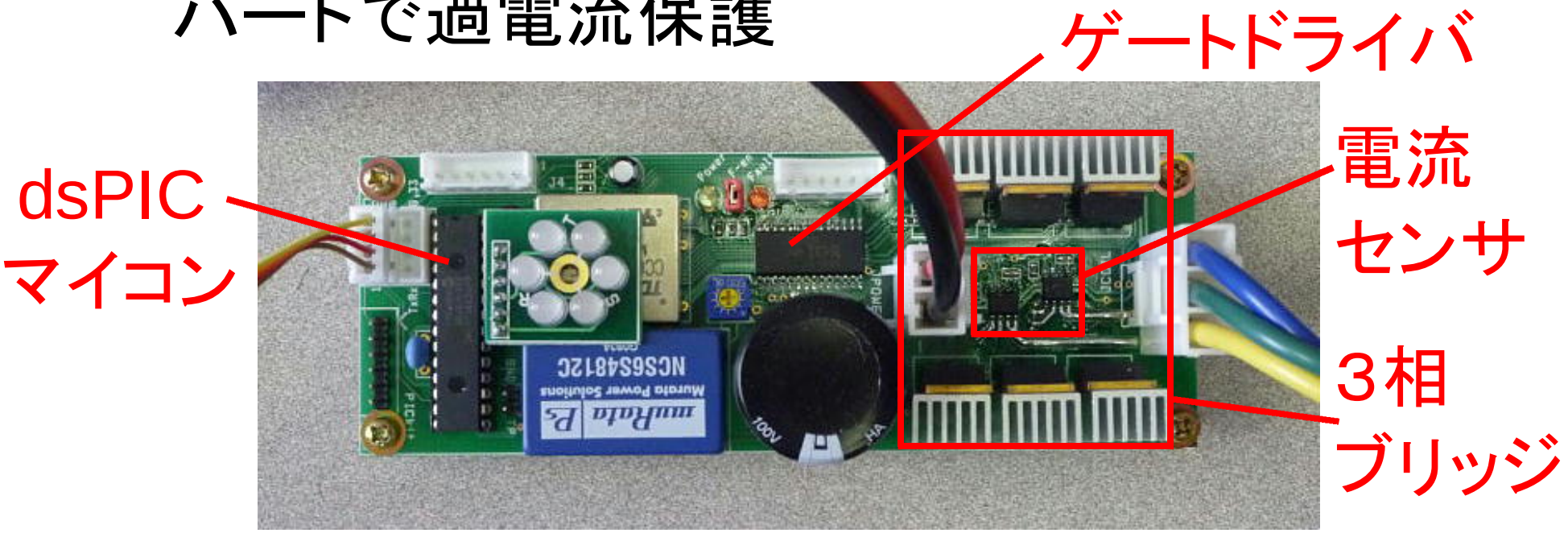
○ インバータ回路の実装

○ dsPICマイコンによる制御回路を実装.

制御周期 10kHz（0.1ms）

整数演算（固定小数）

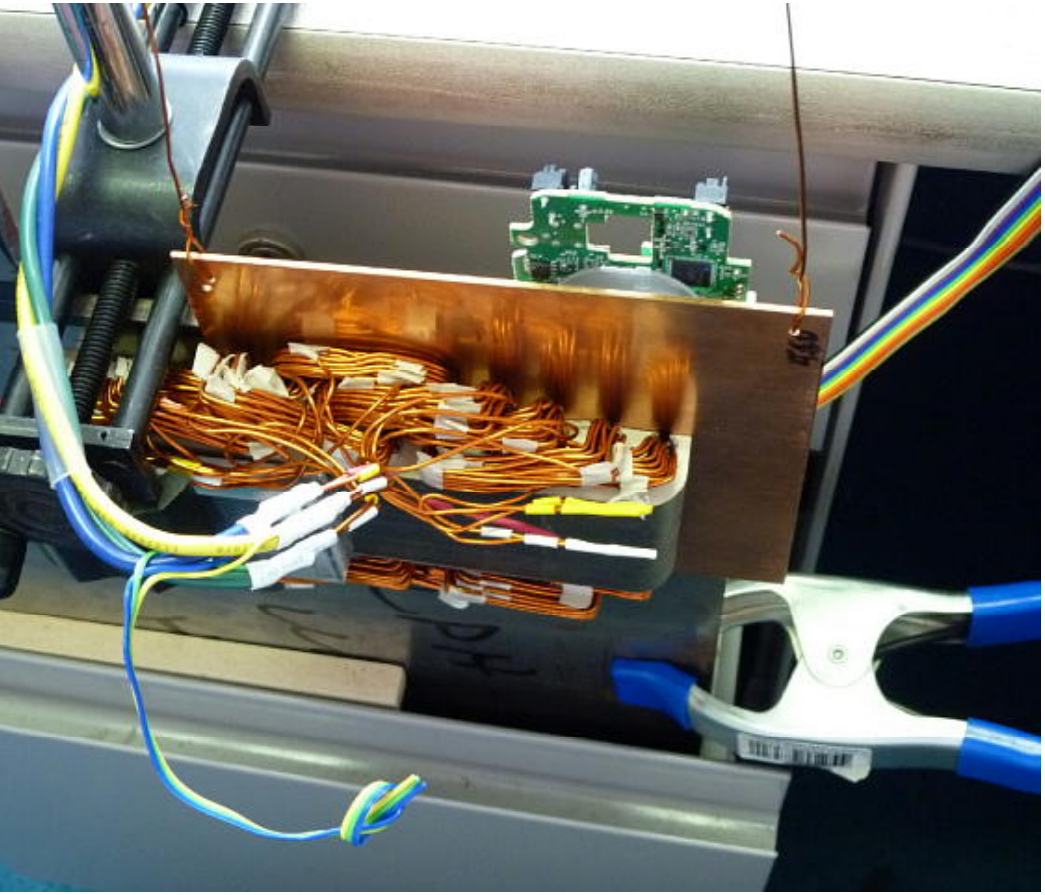
ハードで過電流保護

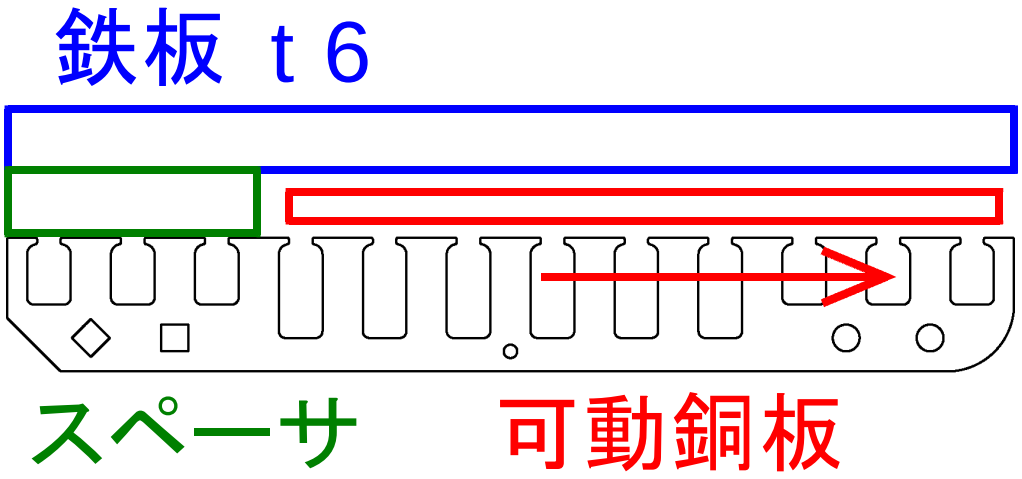


ベクトル制御インバータ

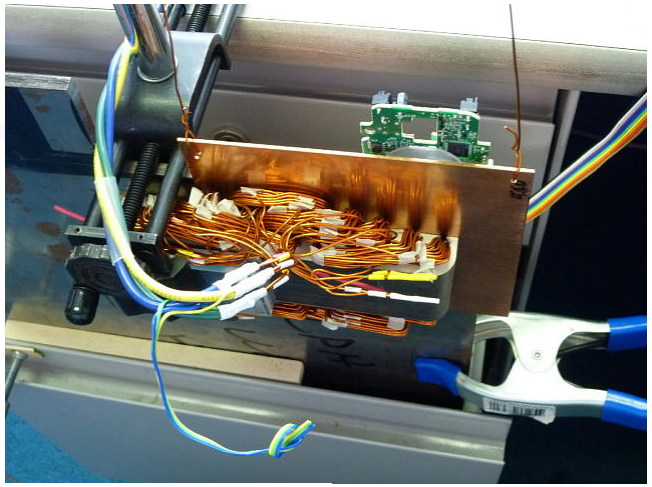
○ 性能評価

○ 電流に対する推力応答



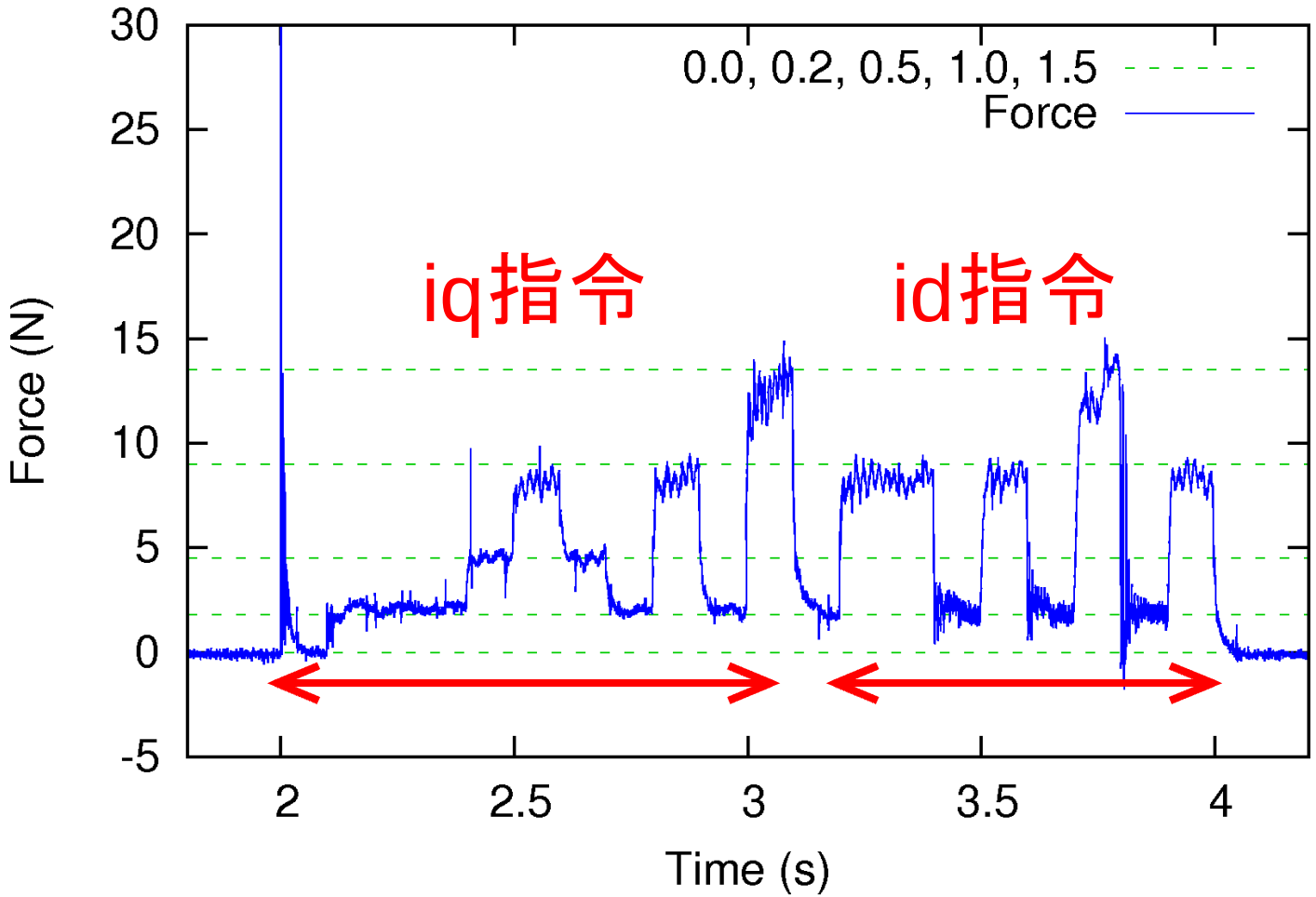


ベクトル制御インバータ

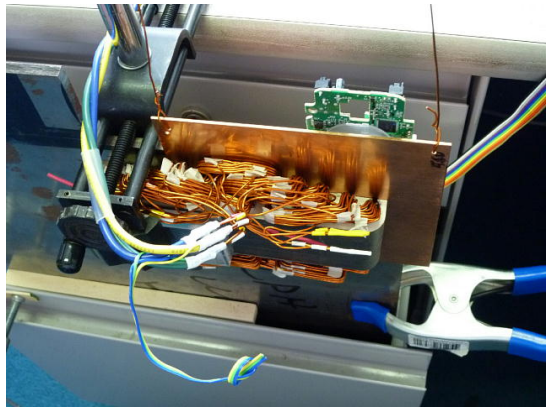


○ 性能評価

○ 電流に対する推力応答

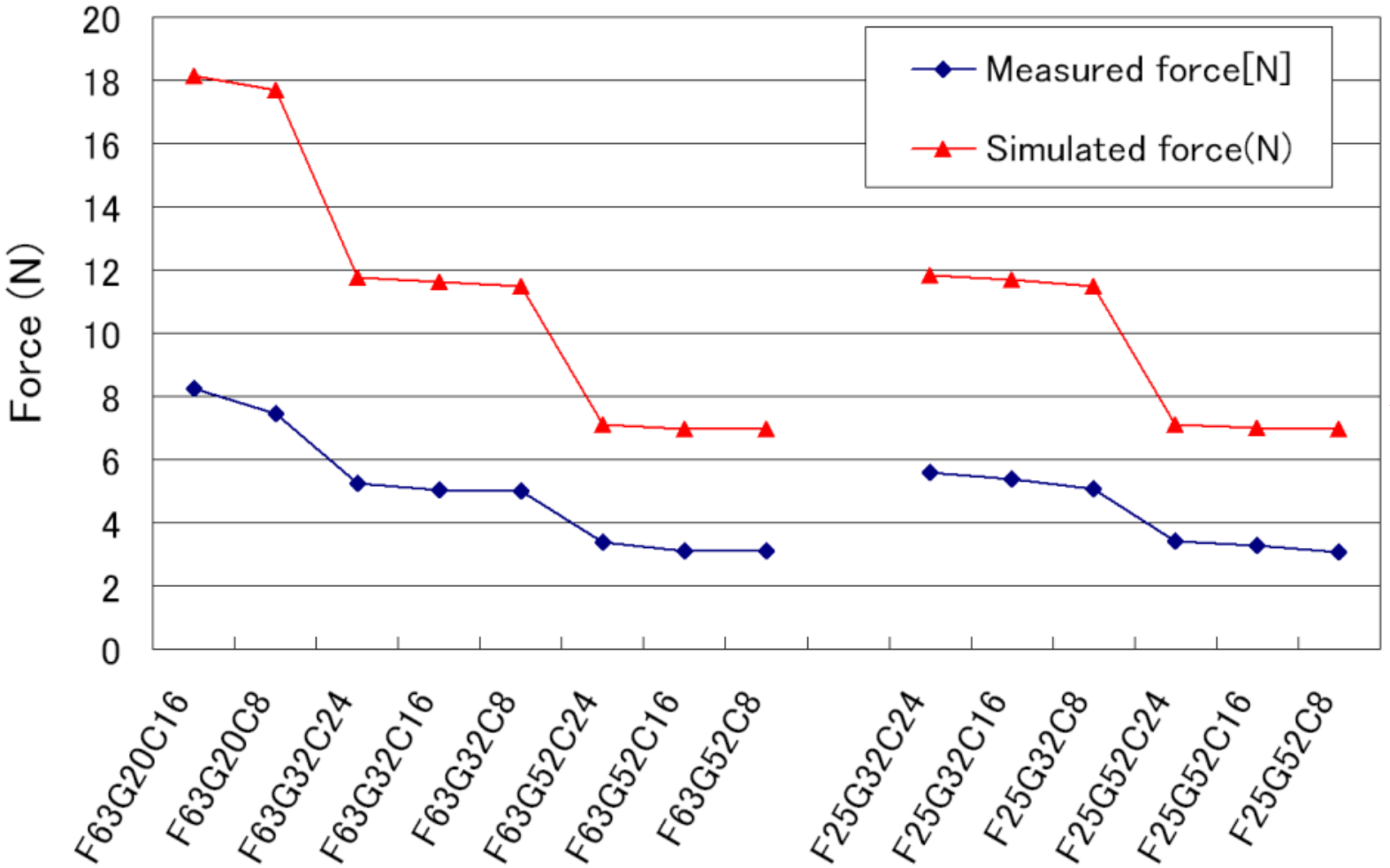


ベクトル制御インバータ



○ 性能評価

○ シミュレーションとの比較　推力

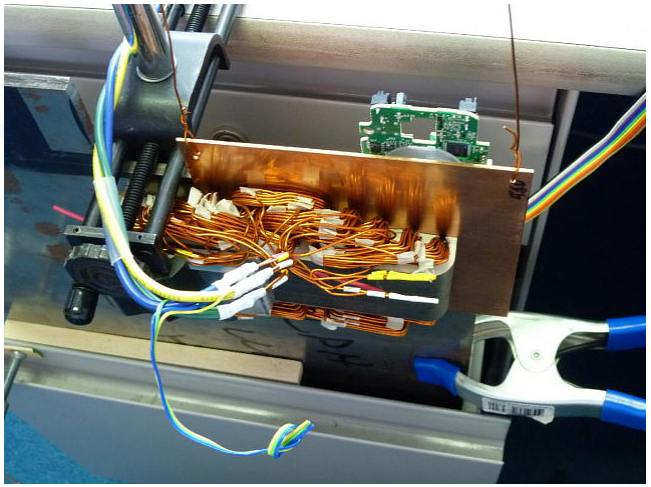


シミュ

実測

板・ギャップ条件

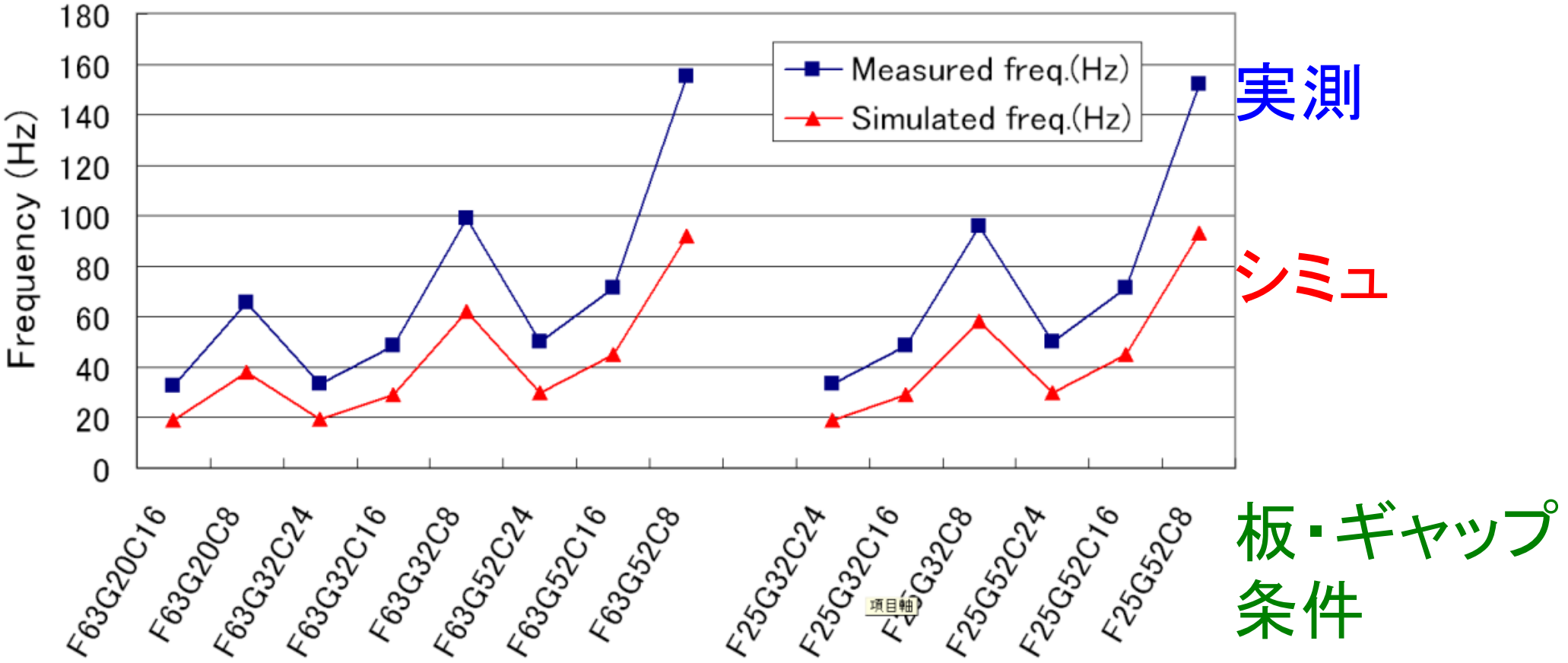
ベクトル制御インバータ



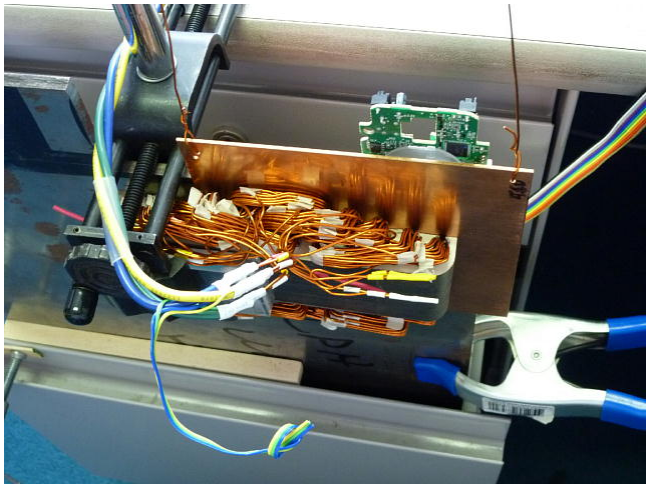
○ 性能評価

○ シミュレーションとの比較

推力最大となる周波数(id=iq)



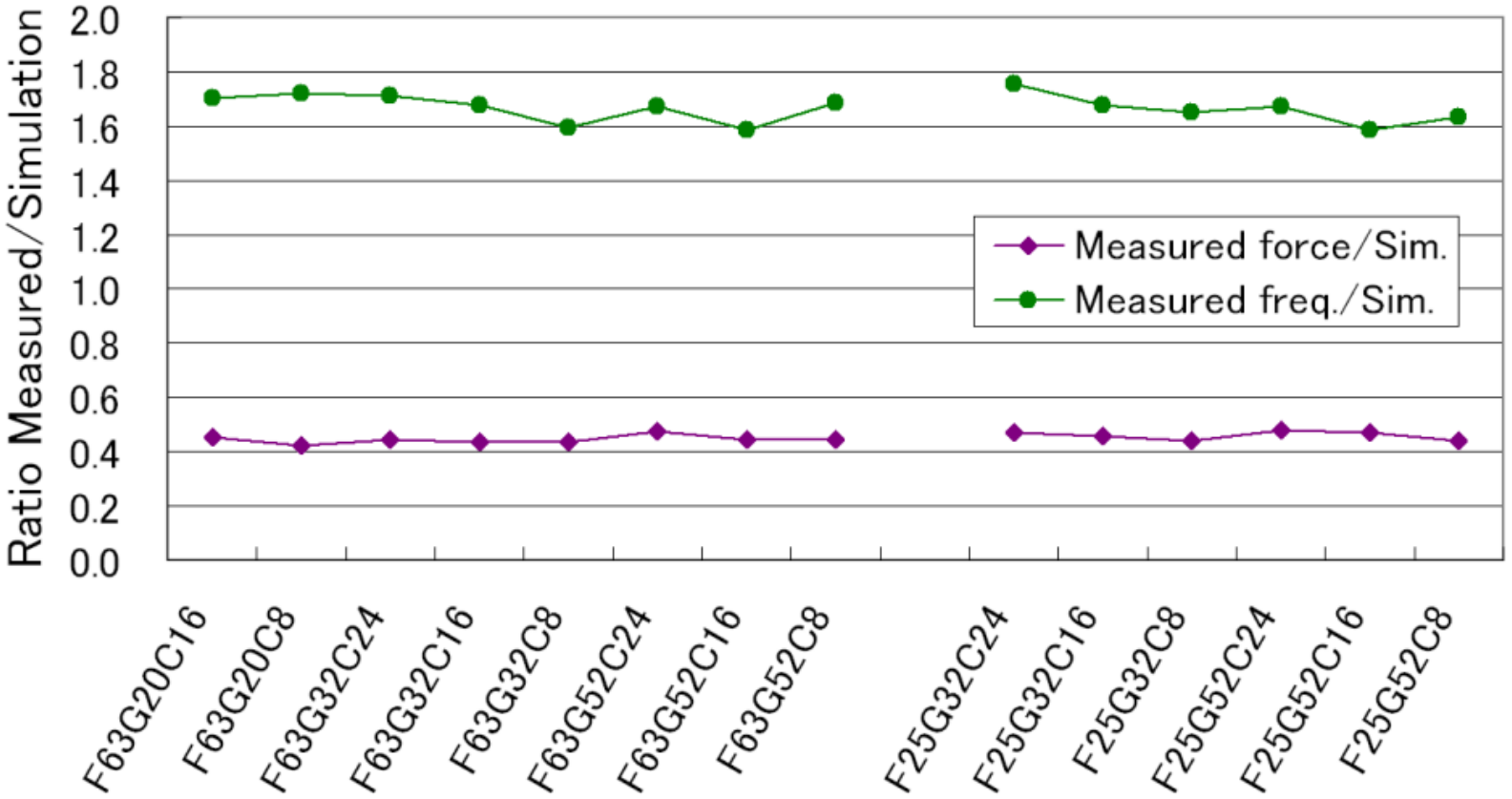
ベクトル制御インバータ



○ 性能評価

○ シミュレーションとの比較

推力最大となる周波数(id=iq)



周波数

実測/シミュ

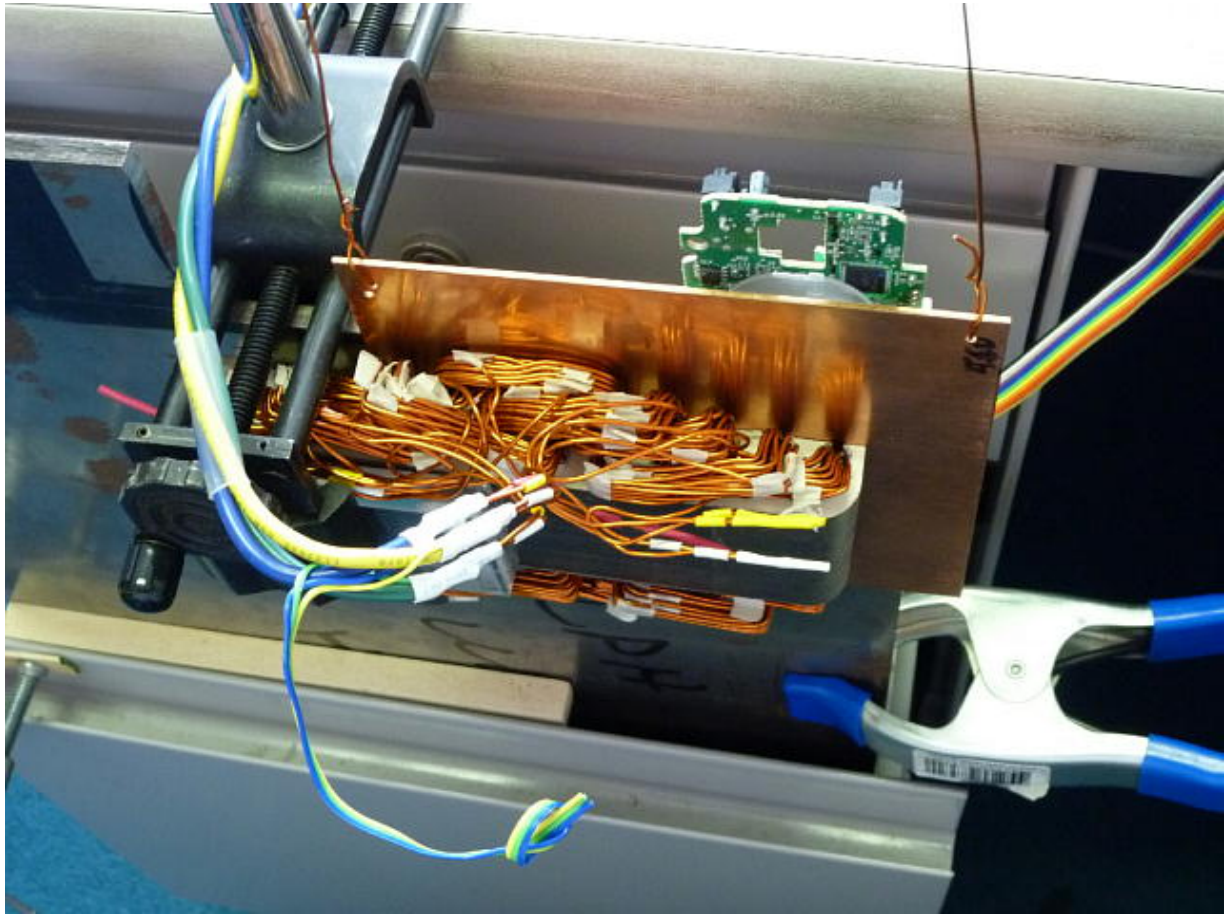
推力

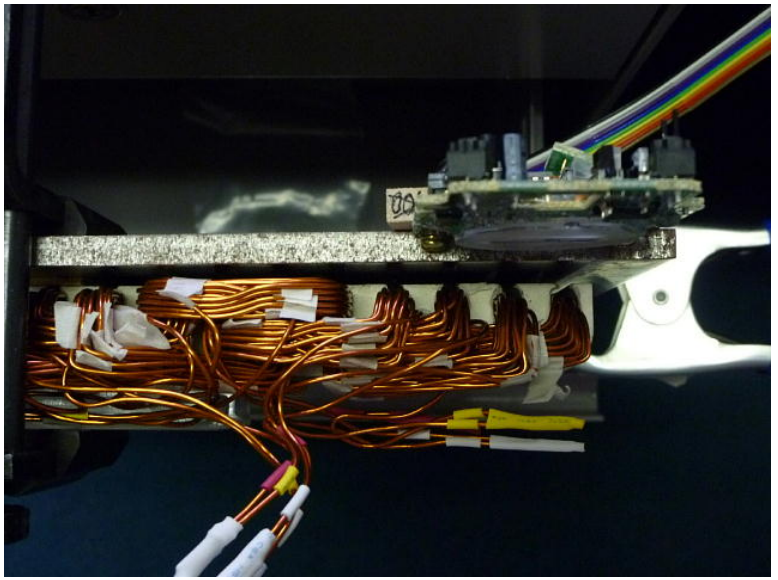
板・ギャップ条件

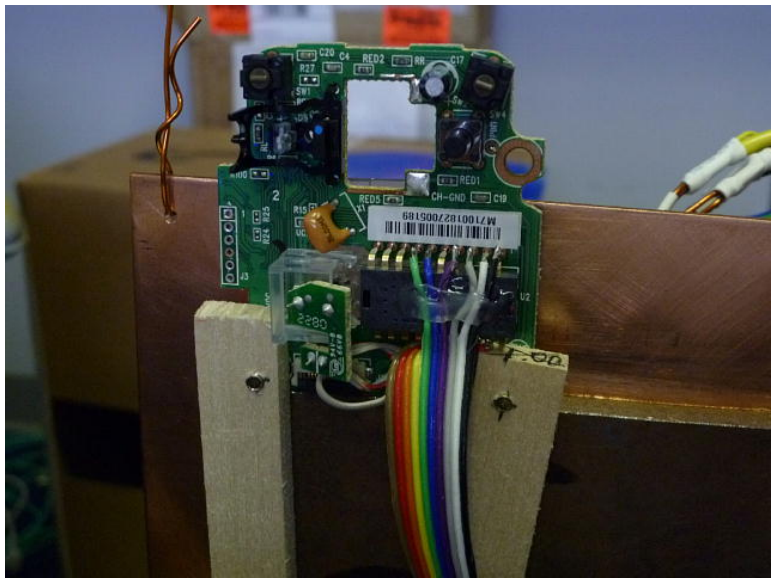
リニアモータの位置制御

○ 位置計測→PD→推力(iq)

○ 実験装置

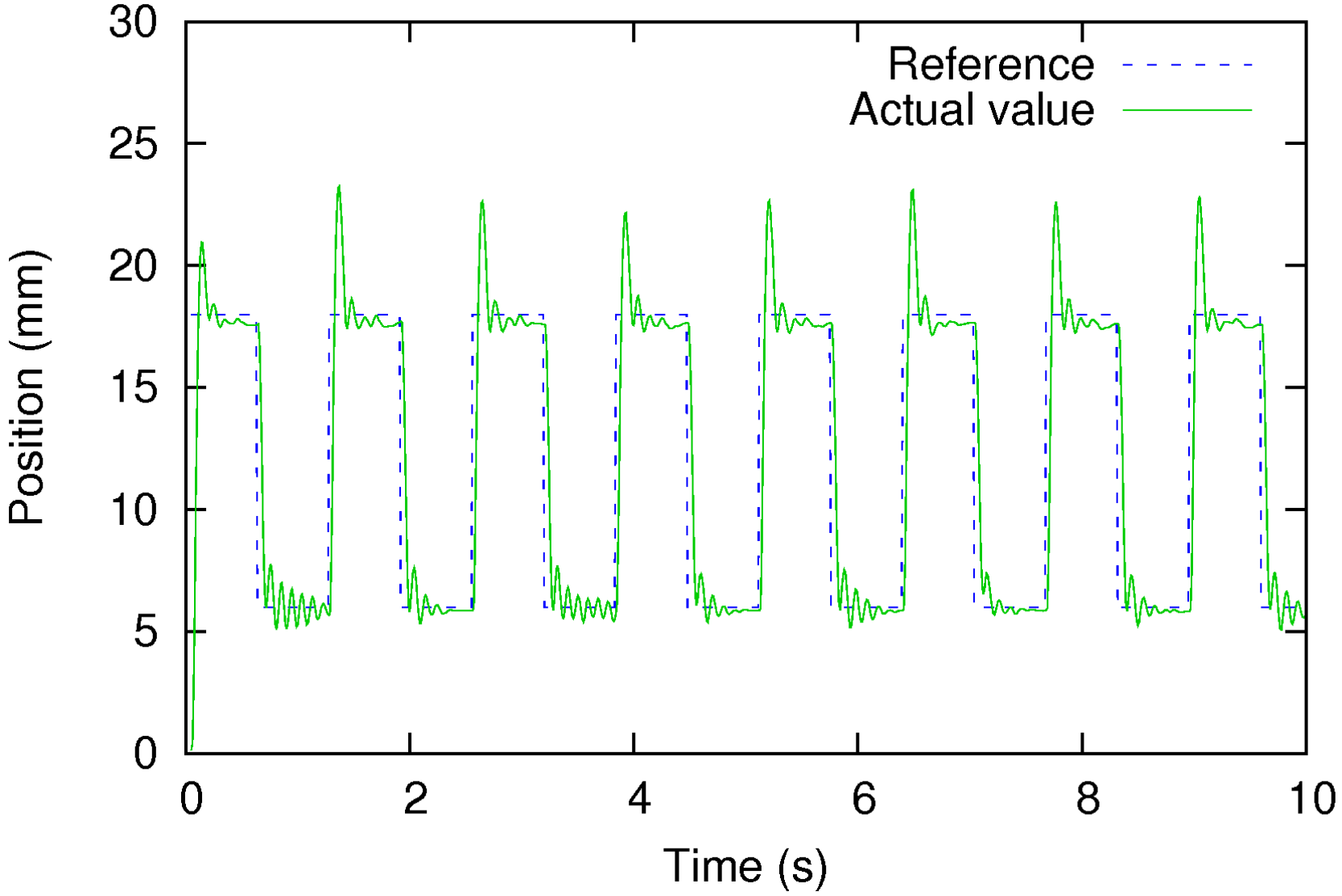






リニアモータの位置制御

○ 位置計測→PD→推力(iq)



おわりに

- 誘導リニアモータとベクトル制御回路を開発した.
- 設計の参考とするために電磁場シミュレータを用いて解析を行った.
  また，解析結果は，一定の比率で実機と一致した.
- リニアモータ＋ベクトル制御の応答試験で，5ms未満の応答速度を確認した.
- マウスセンサを併用した位置フィードバック実験で実証試験を行った.

謝　辞

本研究は平成２１年～２２年にわたる，
米カーネギーメロン大学ロボット研究所への
在外研究の一環として行った．

機会を与えてくださった，ラルフ　ホリス　教授と
東北学院大学に感謝申し上げます．