

磁気浮上鉄道から通信線への電磁誘導 に対するCOMSOL解析

～線路構成依存性～

2020年12月4日

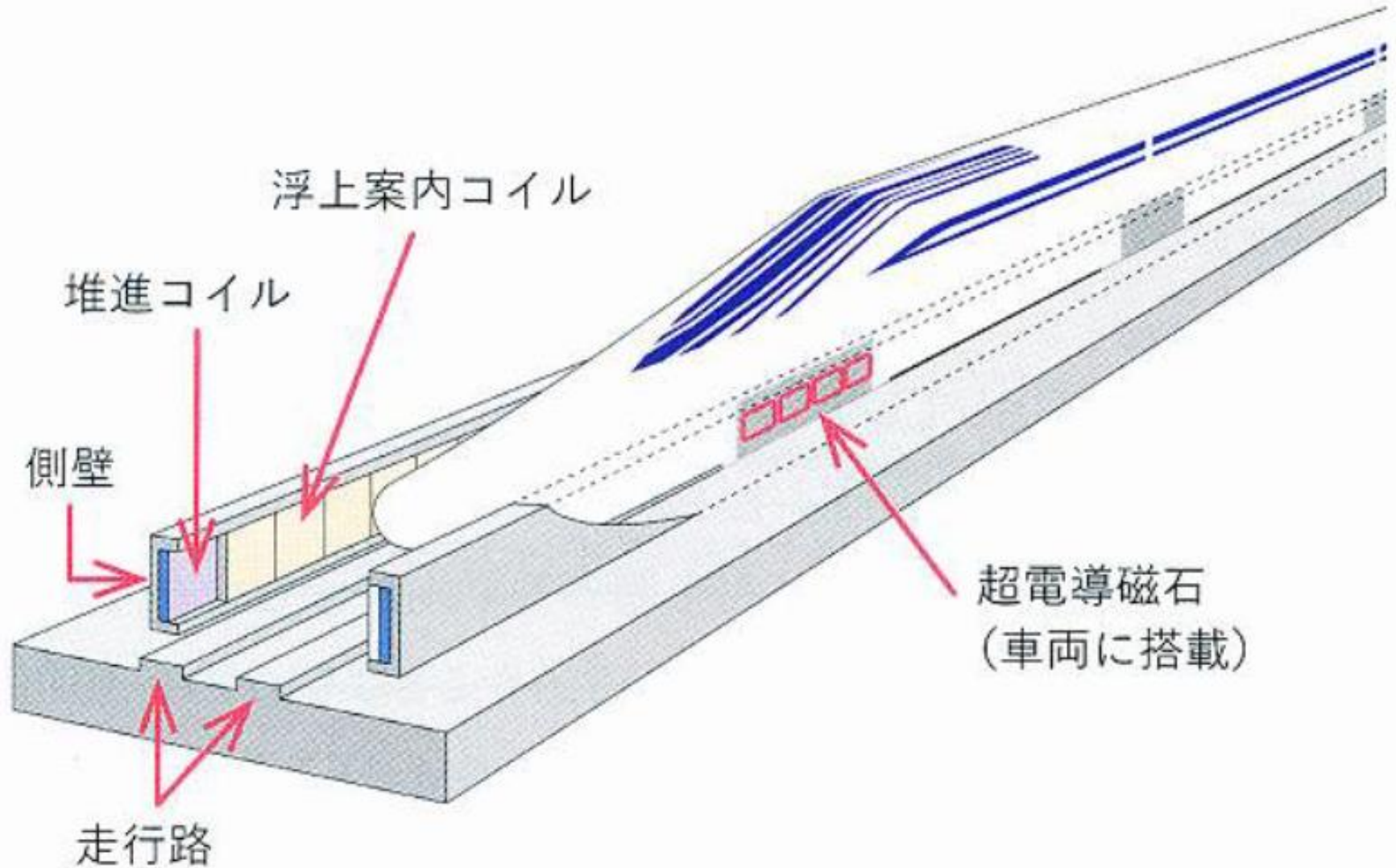
東京大学 徳田正満

東京工業大学 西方敦博

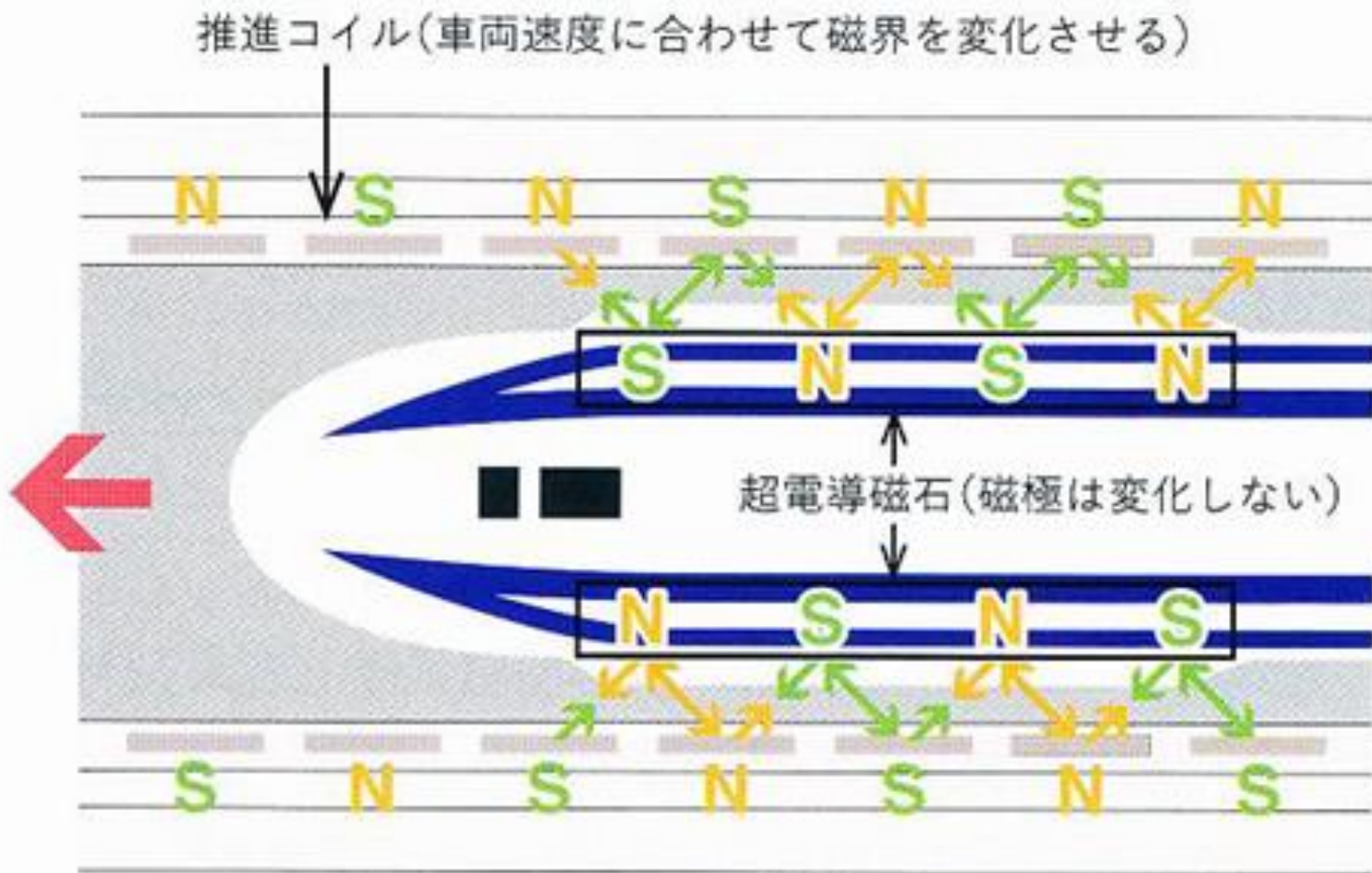
講演内容

- **磁気浮上鉄道の構成と通信線への電磁誘導**
- COMSOLによる電磁誘導計算法
- COMSOLとMATLABの比較
- COMSOLによる電磁誘導の線路構成依存性
(台車1台の場合)
- COMSOLによる電磁誘導の線路構成依存性
(台車2台の場合)

山梨実験線で使われている車両と線路の構成



推進コイルと超電導磁石の磁力による推進の原理



リニア中央新幹線における電磁誘導現象

超電導コイルがこの方向に移動すると、ファラデーの電磁誘導の法則により、通信線ループに誘導電圧が発生

超電導コイル

通信線における誘導電圧 U

ファラデーの電磁誘導の法則

$$U = - \frac{d\Phi}{dt}$$

超電導コイルからの磁束 Φ

通信線ループは通信線と大地で構成されるコモンモードを模擬

通信線ループ

COMSOLによる電磁誘導シミュレーション

COMSOLによる2次元解析では、 $U = -\frac{d\Phi}{dt}$ のファラデーの電磁誘導方程式で解析可能

COMSOLによる3次元解析では、COMSOLで使用しているベクトル要素がメッシュにおける不連続をサポートしていないため、3次元における磁界インターフェースを移動メッシュで形成できないことが判明

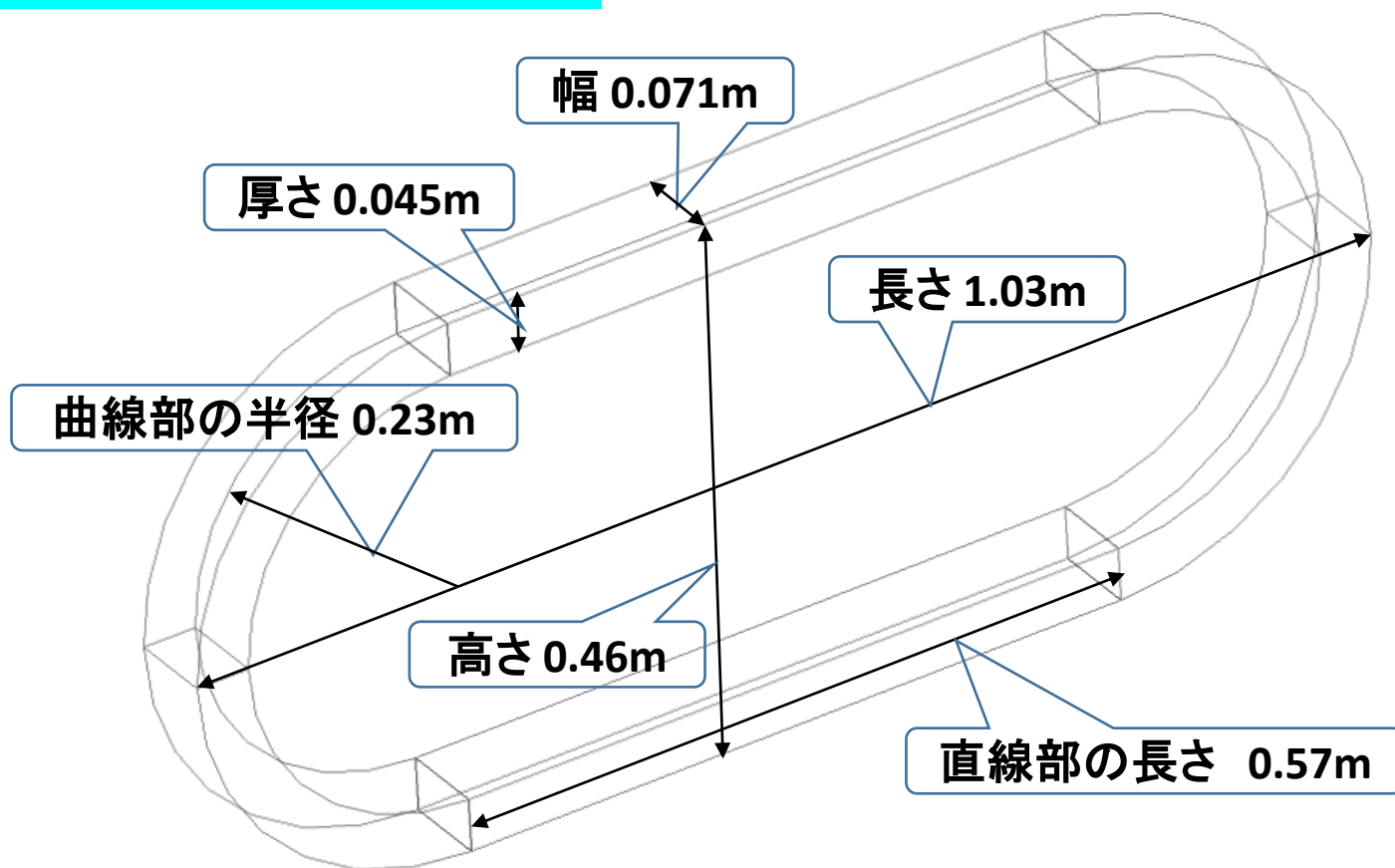
$U = -\frac{d\Phi}{dx} \frac{dx}{dt}$ のように鎖交磁束 Φ に対して位置座標 x をパラメータとした計算をすることにより、3次元解析のCOMSOLにおいても、ファラデーの電磁誘導法則により、通信線への誘導電圧が計算可能。

講演内容

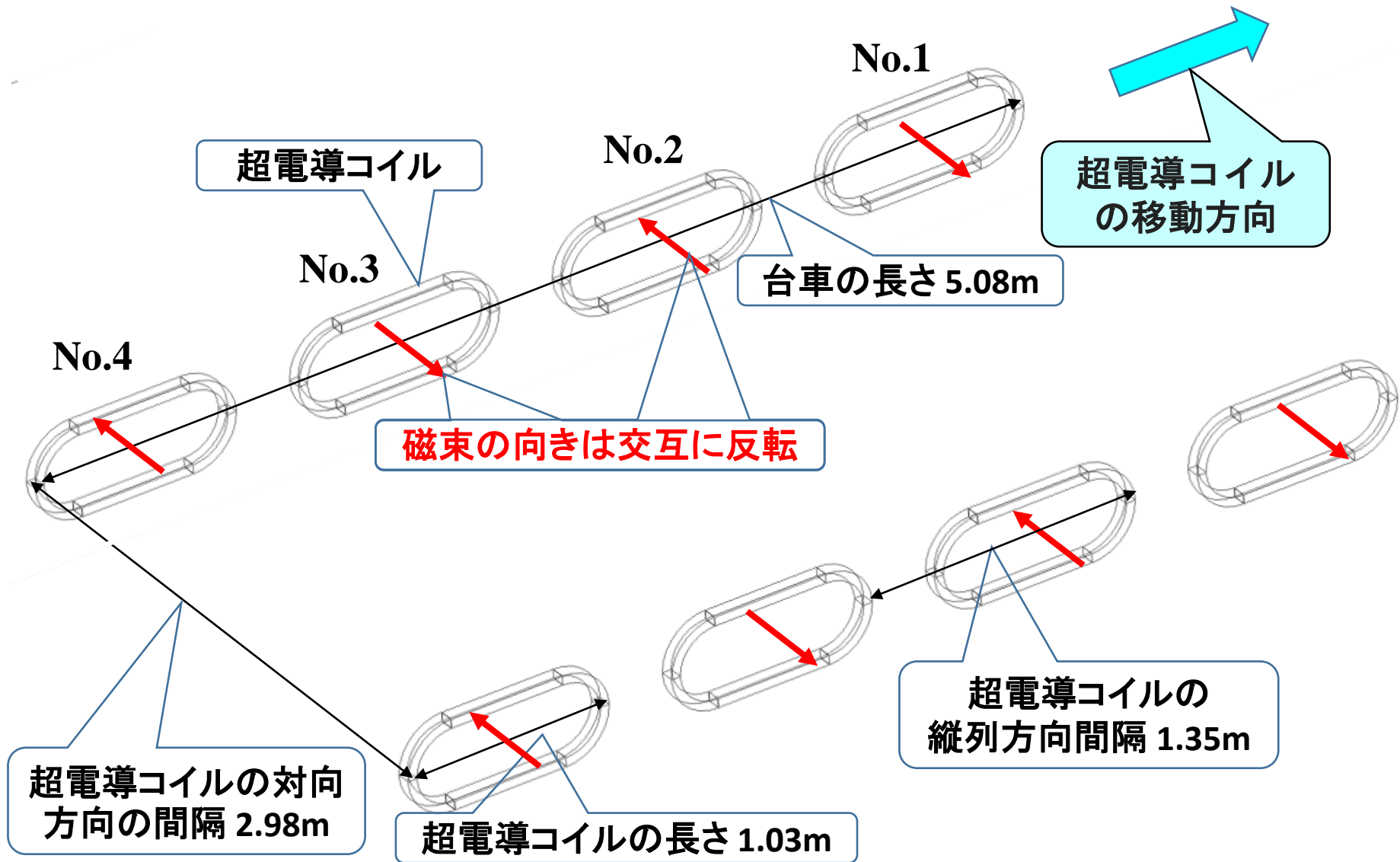
- 磁気浮上鉄道の構成と通信線への電磁誘導
- COMSOLによる電磁誘導計算法
- COMSOLとMATLABの比較
- COMSOLによる電磁誘導の線路構成依存性
(台車1台の場合)
- COMSOLによる電磁誘導の線路構成依存性
(台車2台の場合)

超電導コイルの3Dモデル

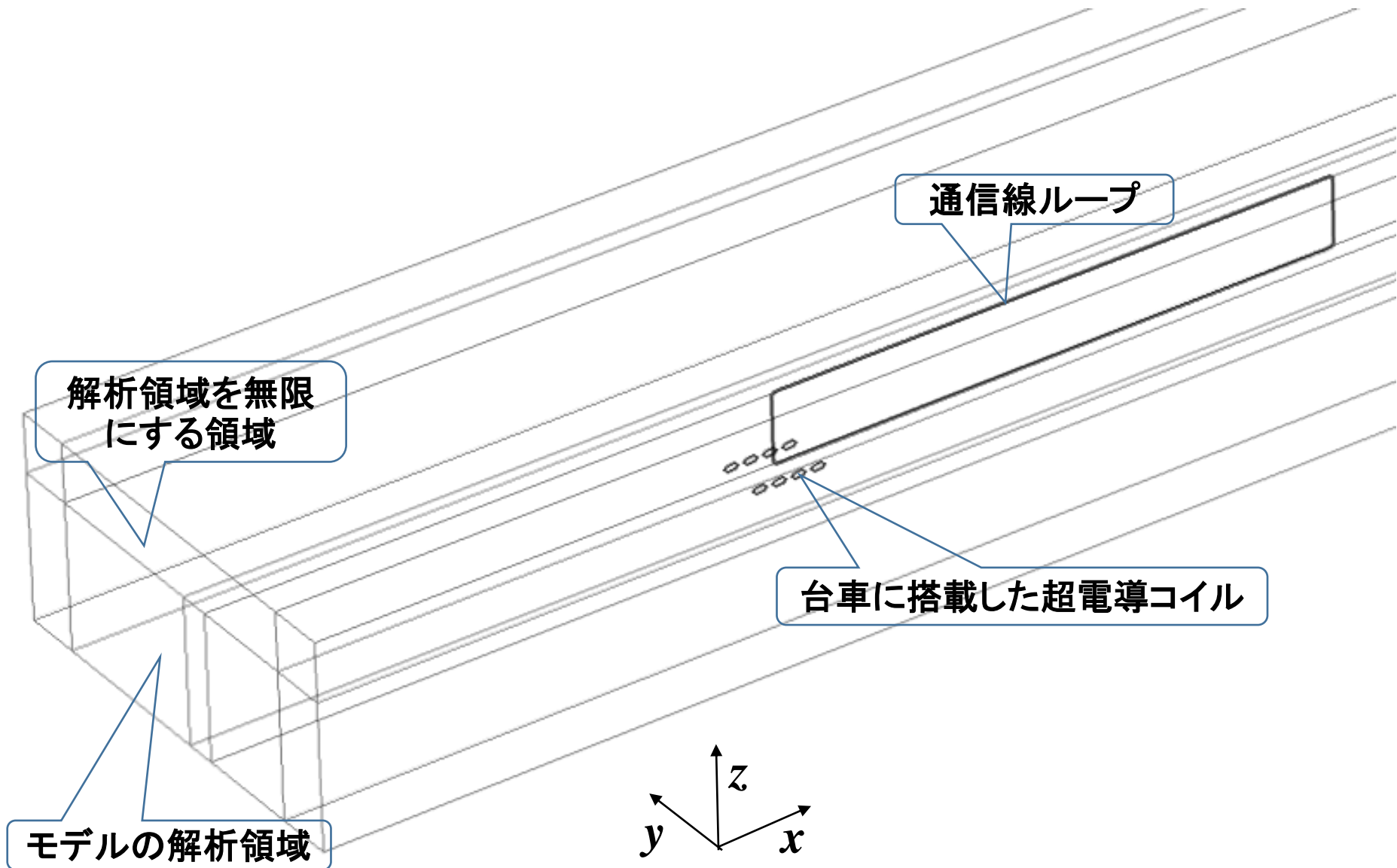
コイルの巻き数 1167回
コイルへの印加電流 600A
超電導コイルの起磁力 700kA



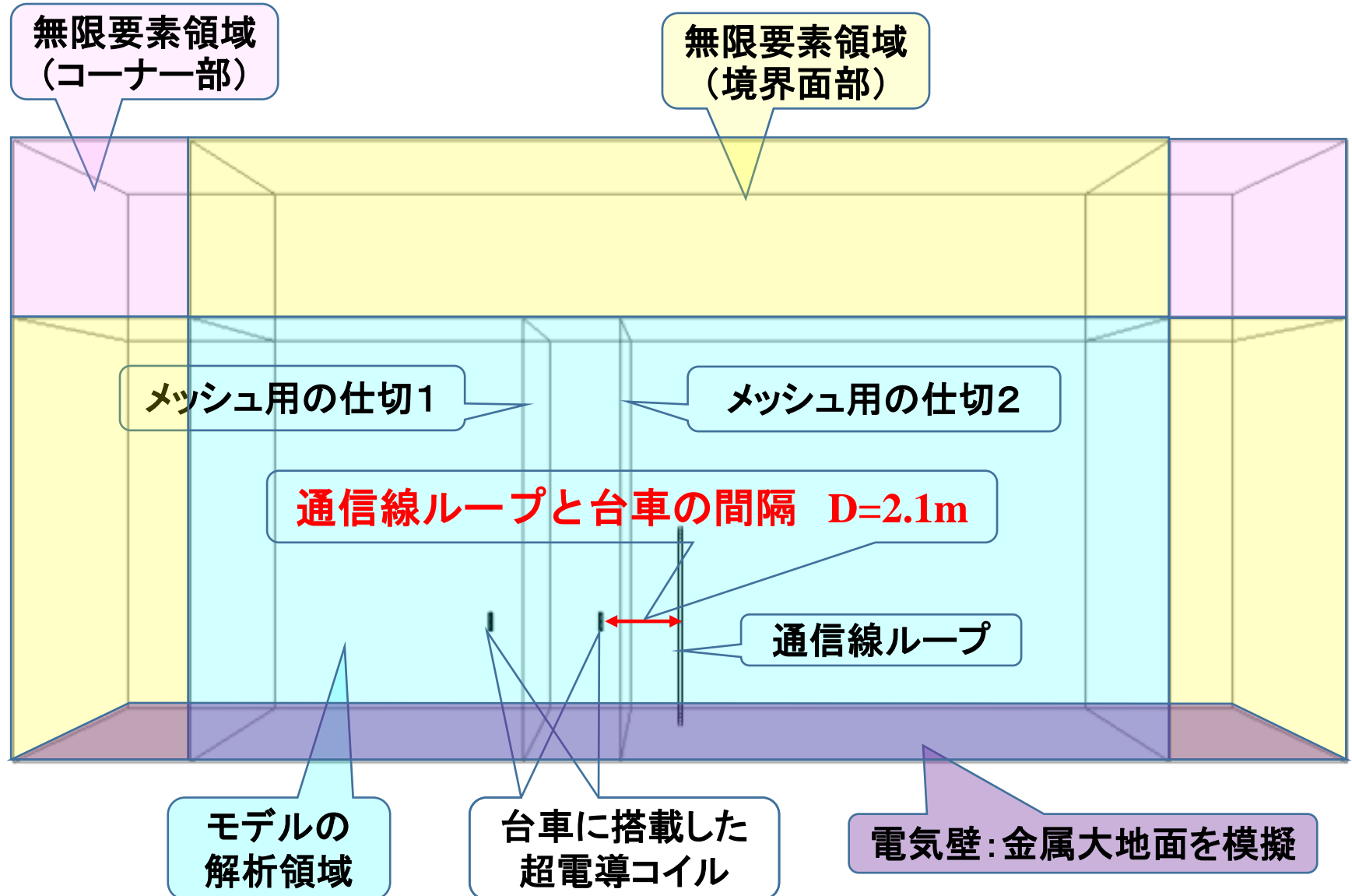
台車の3Dモデル



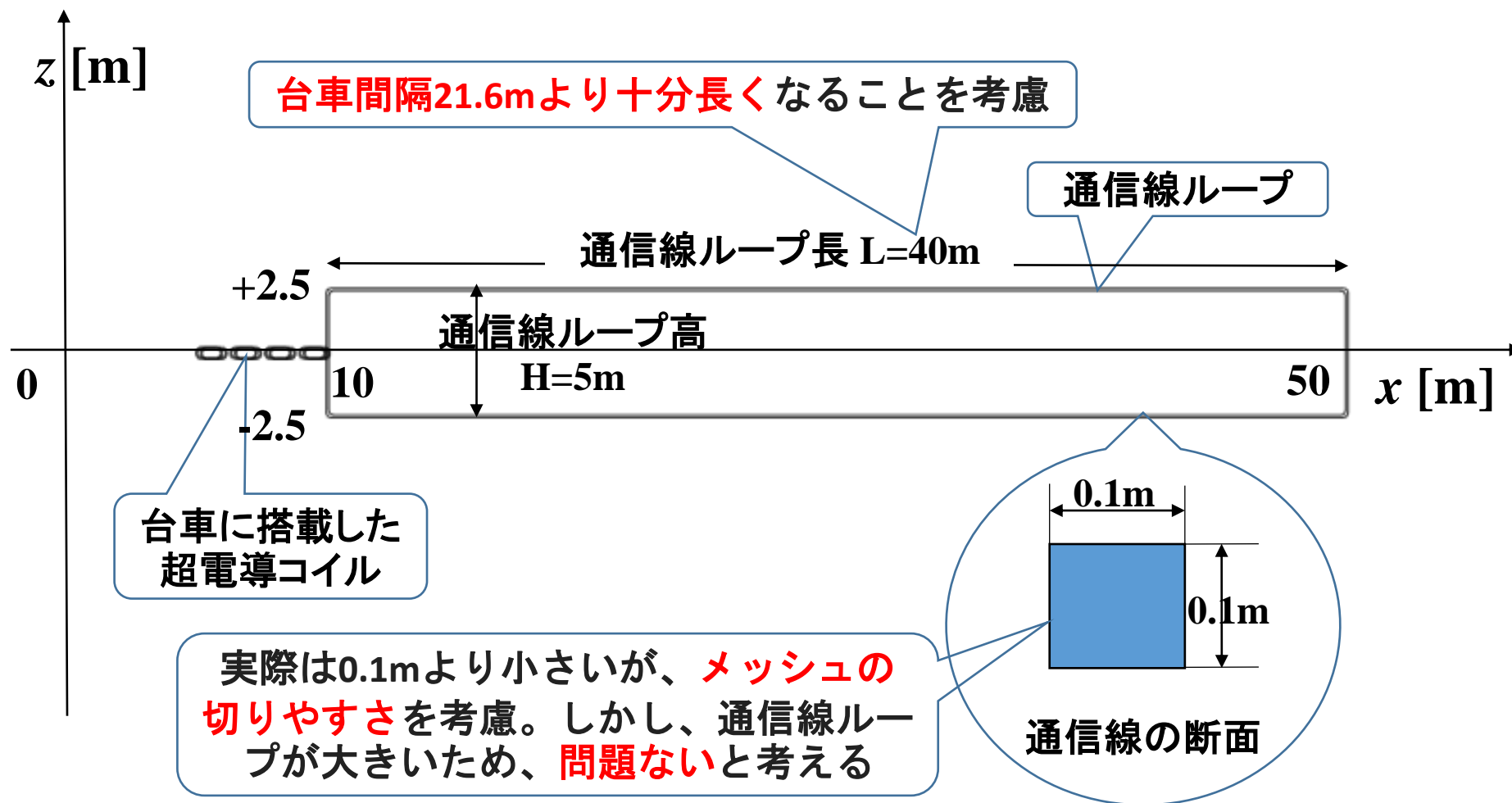
COMSOLによる3Dモデルの解析領域



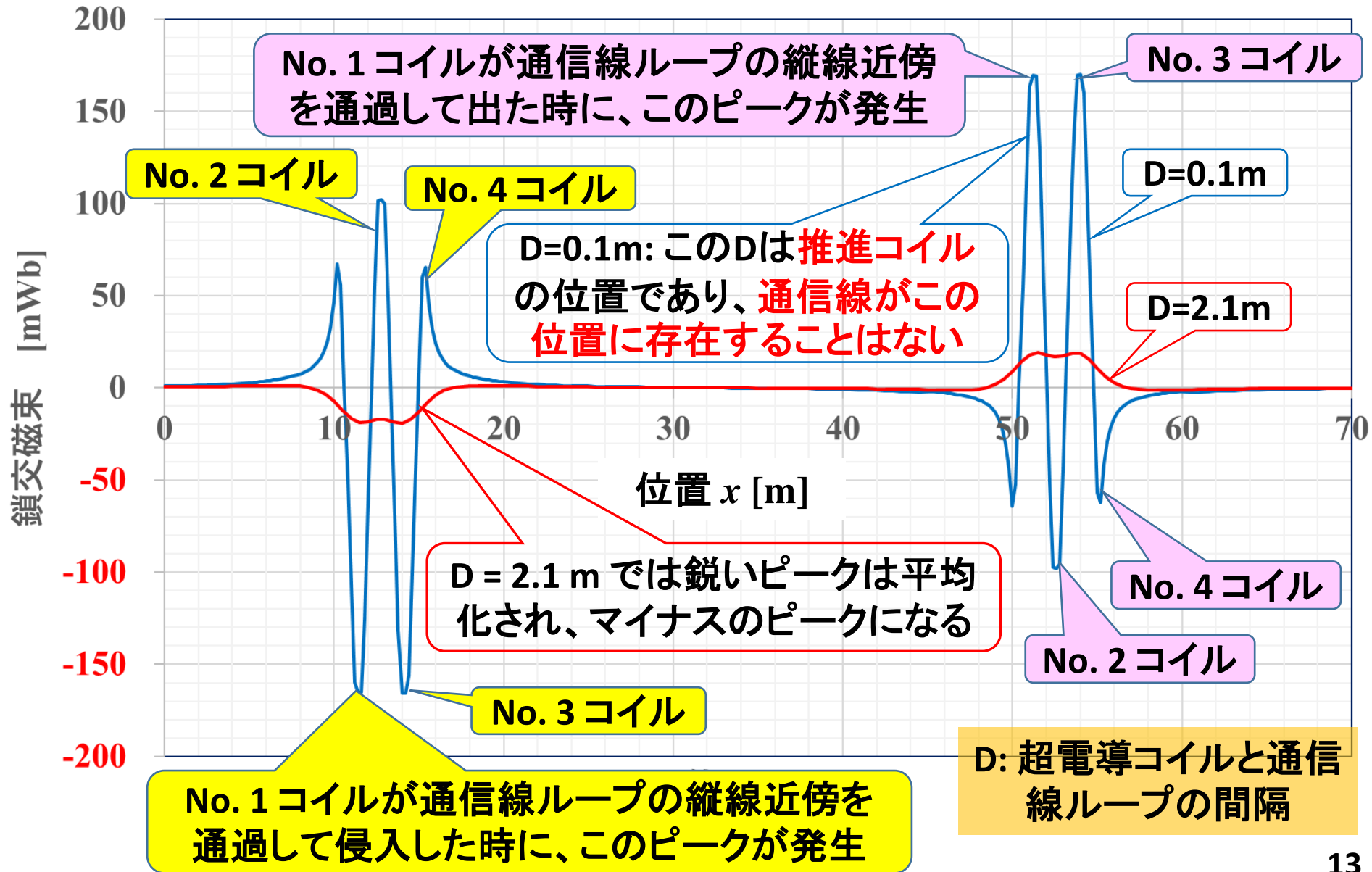
COMSOLによる3Dモデルの解析領域(zy図)



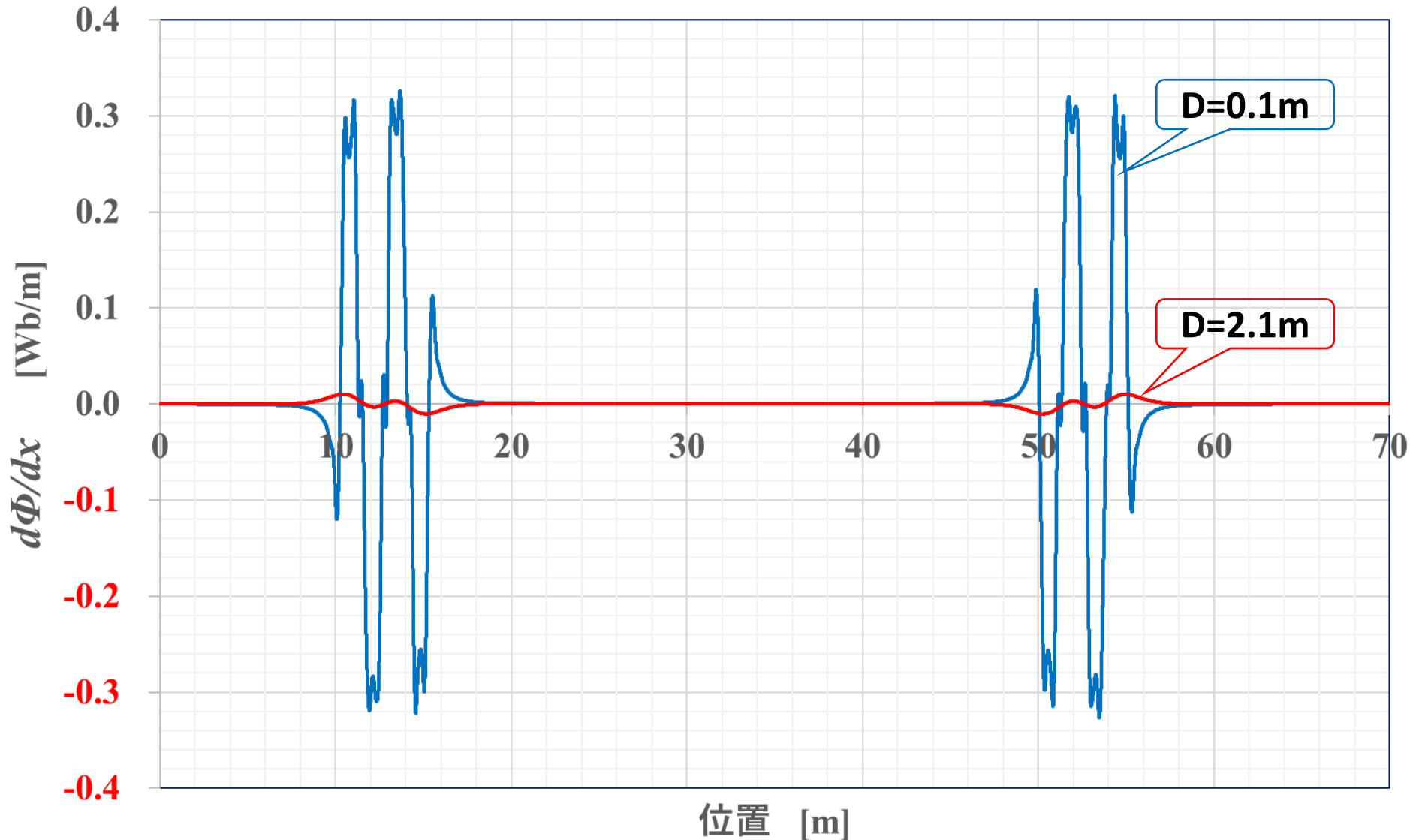
COMSOLによる3Dモデルの解析領域 (xz 図)



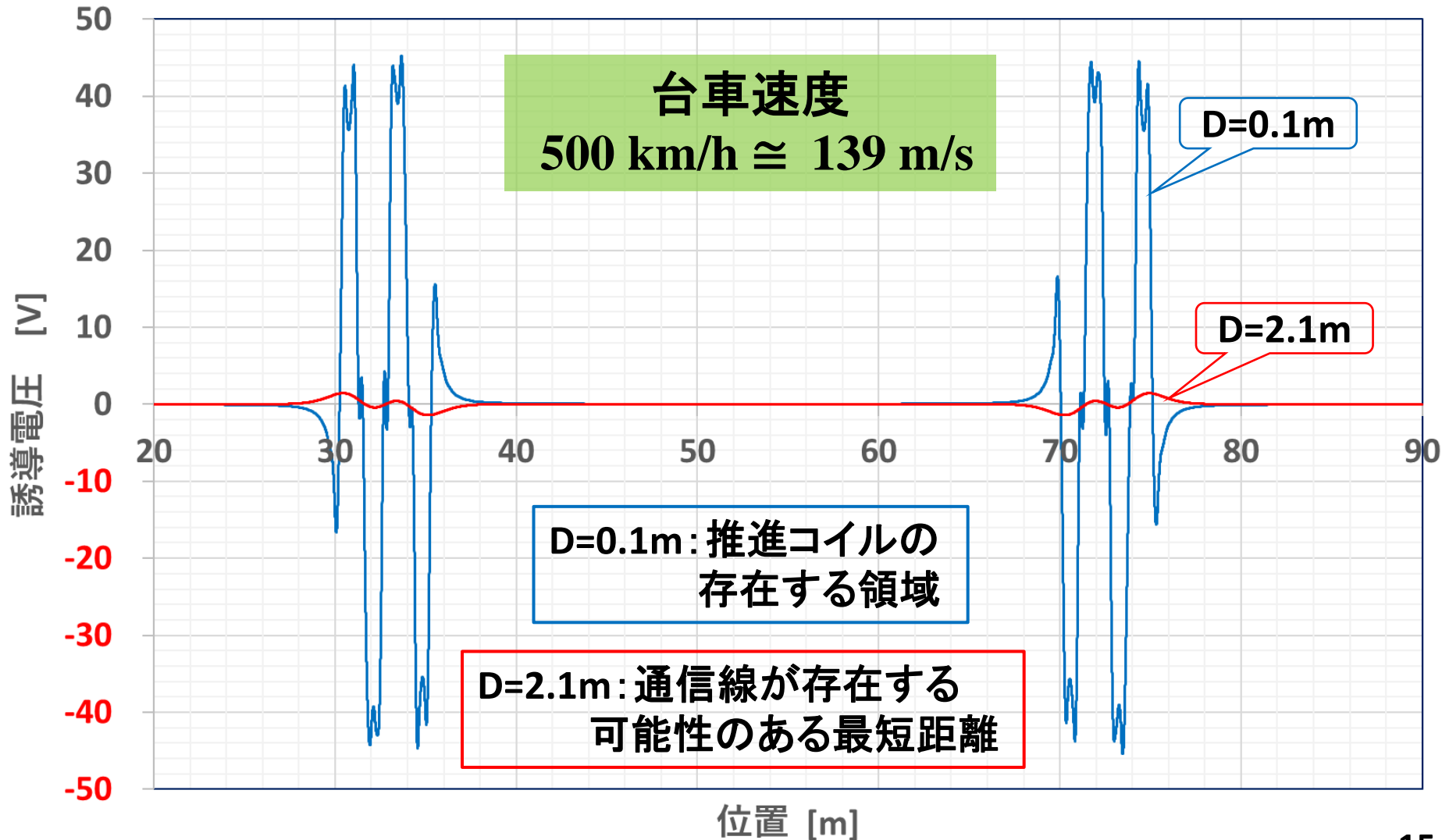
超電導コイルの磁束が通信線ループを鎖交する磁束に対する台車位置依存性



超電導コイルの磁束が通信線ループを鎖交する 磁束 Φ の位置 x に対する依存性の微分 $d\Phi/dx$



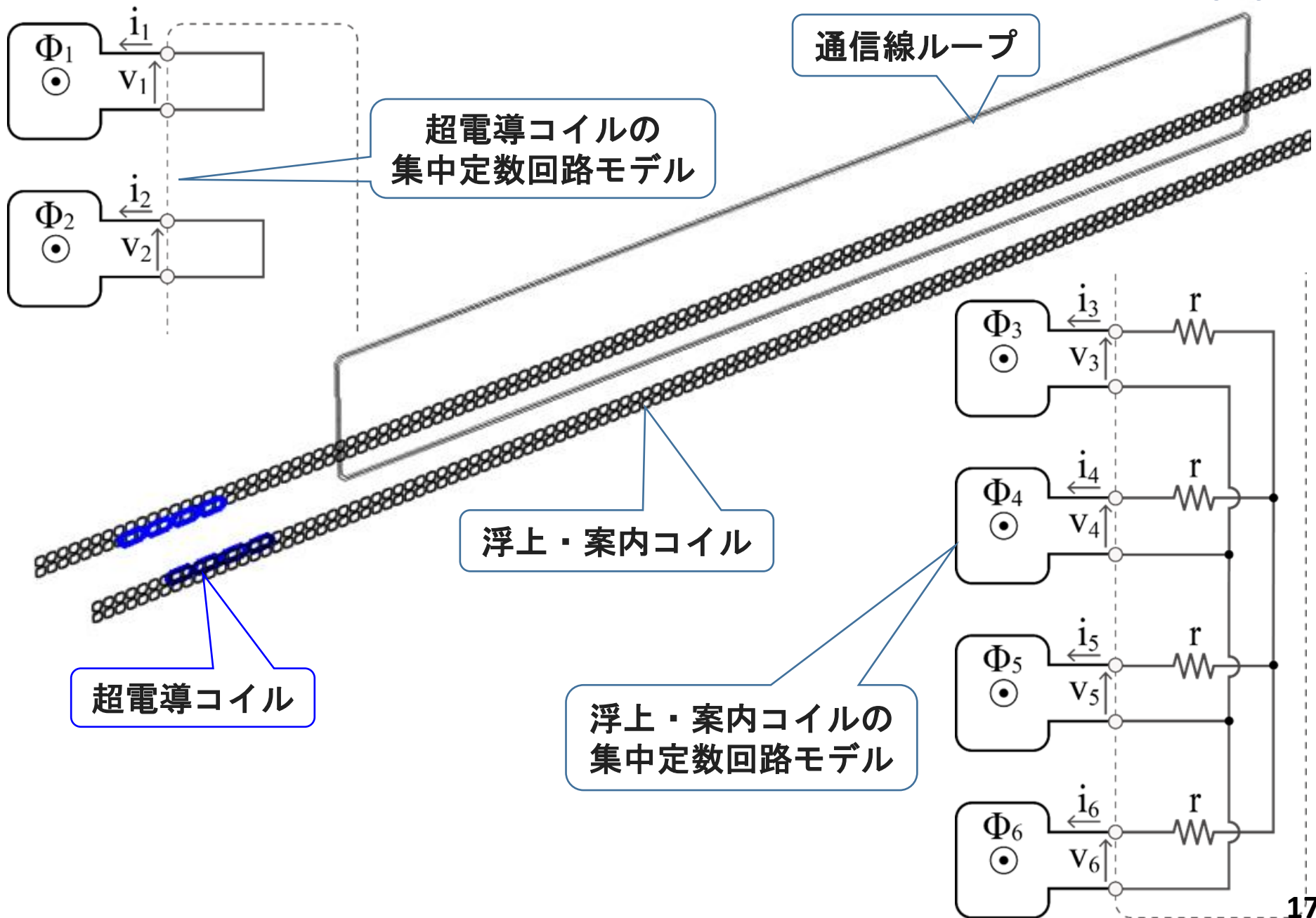
超電導コイルの移動により通信線ループに誘導する電圧に対する台車位置依存性



講演内容

- 磁気浮上鉄道の構成と通信線への電磁誘導
- COMSOLによる電磁誘導計算法
- **COMSOLとMATLABの比較**
- COMSOLによる電磁誘導の線路構成依存性
(台車1台の場合)
- COMSOLによる電磁誘導の線路構成依存性
(台車2台の場合)

集中定数回路モデルを用いたMATLAB計算法 (1)



集中定数回路モデルを用いたMATLAB計算法 (2)

$$\left\{ \begin{array}{l} v_1 = 0 \\ v_2 = 0 \\ (i_3 + i_4 + i_5 + i_5 + i_6 = 0) \\ i_3 + \frac{1}{r} \left(v_3 - \frac{v_3 + v_4 + v_5 + v_6}{4} \right) = 0 \\ i_4 + \frac{1}{r} \left(v_4 - \frac{v_3 + v_4 + v_5 + v_6}{4} \right) = 0 \\ i_5 + \frac{1}{r} \left(v_5 - \frac{v_3 + v_4 + v_5 + v_6}{4} \right) = 0 \\ i_6 + \frac{1}{r} \left(v_6 - \frac{v_3 + v_4 + v_5 + v_6}{4} \right) = 0 \end{array} \right.$$

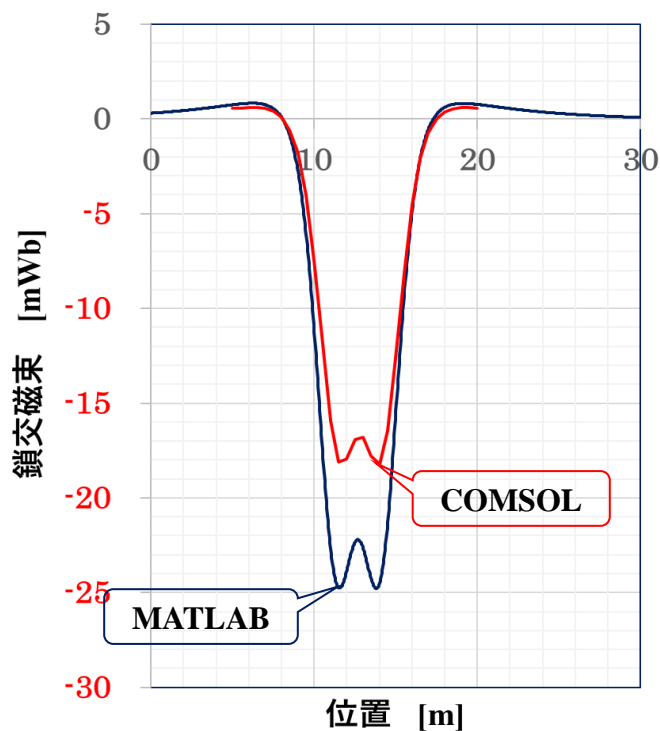
電流の係数行列

$$K \frac{d}{dt} \vec{\Phi} + RL^{-1} \vec{\Phi} = 0$$

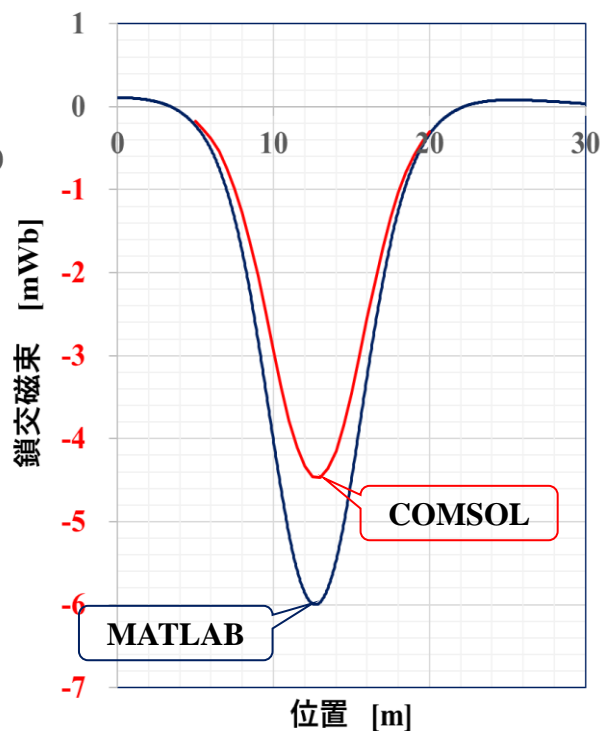
電圧の係数行列

インダクタンス行列

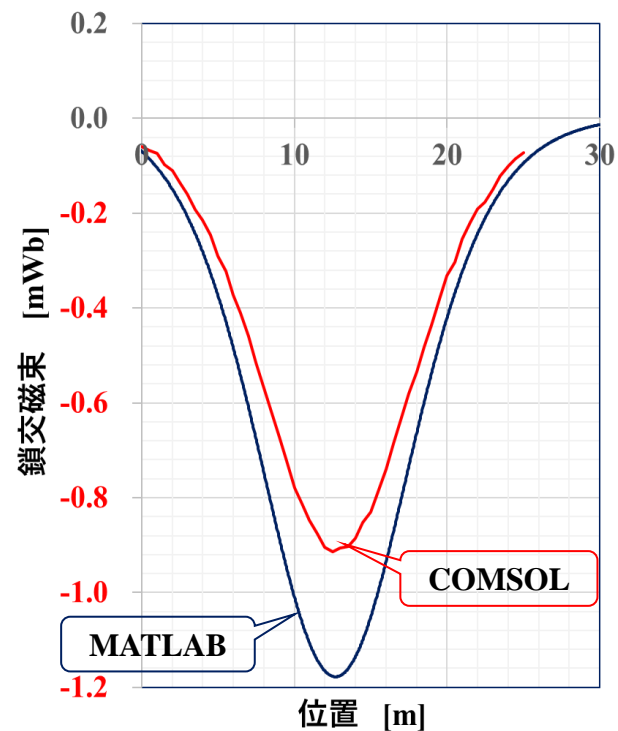
鎖交磁束に対するCOMSOLとMATLABの比較 (完全自由空間)



(a) $D=2.1\text{m}$



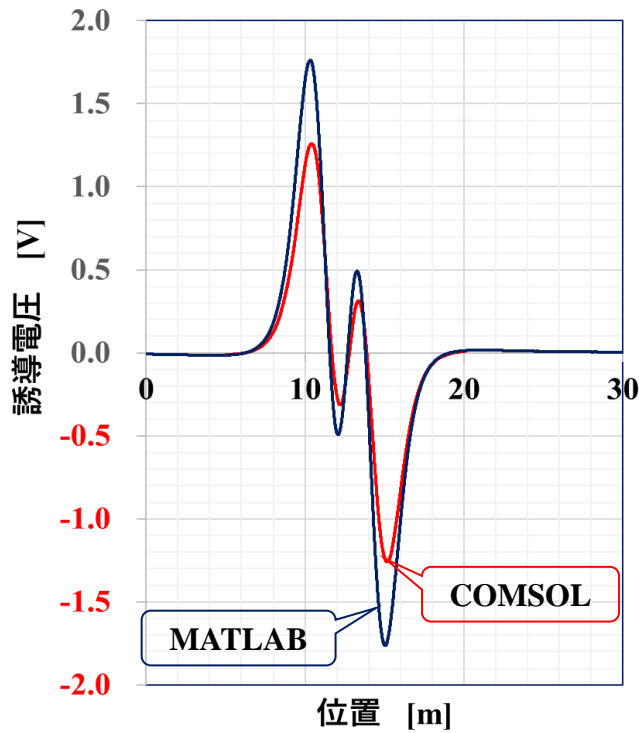
(b) $D=5.1\text{m}$



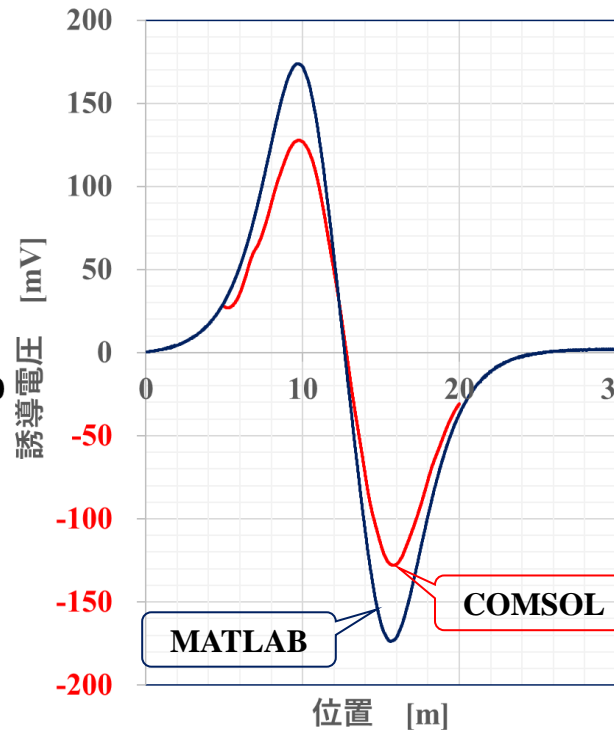
(c) $D=10.1\text{m}$

COMSOLとMATLABという全く異なる計算法にもかかわらず、3割程度の偏差で一致しているため、両方の計算法の妥当性が検証された

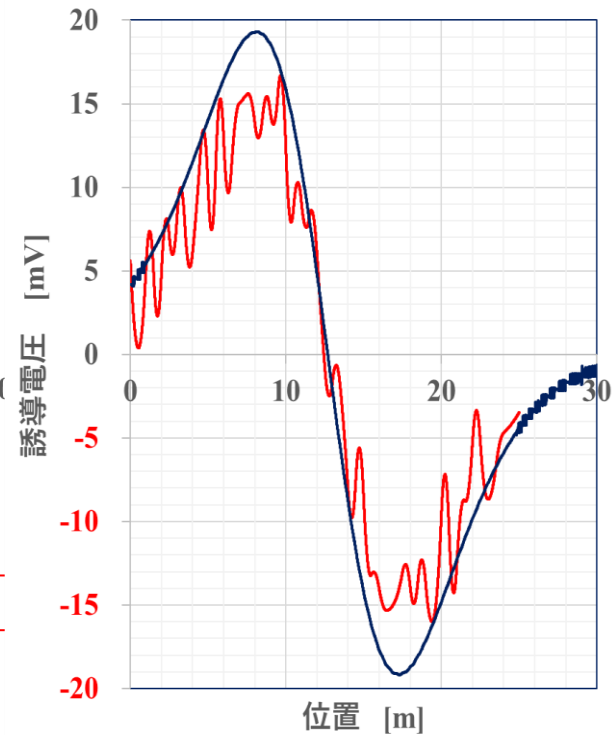
誘導電圧に対するCOMSOLとMATLABの比較 (完全自由空間)



(a) $D=2.1\text{m}$



(b) $D=5.1\text{m}$

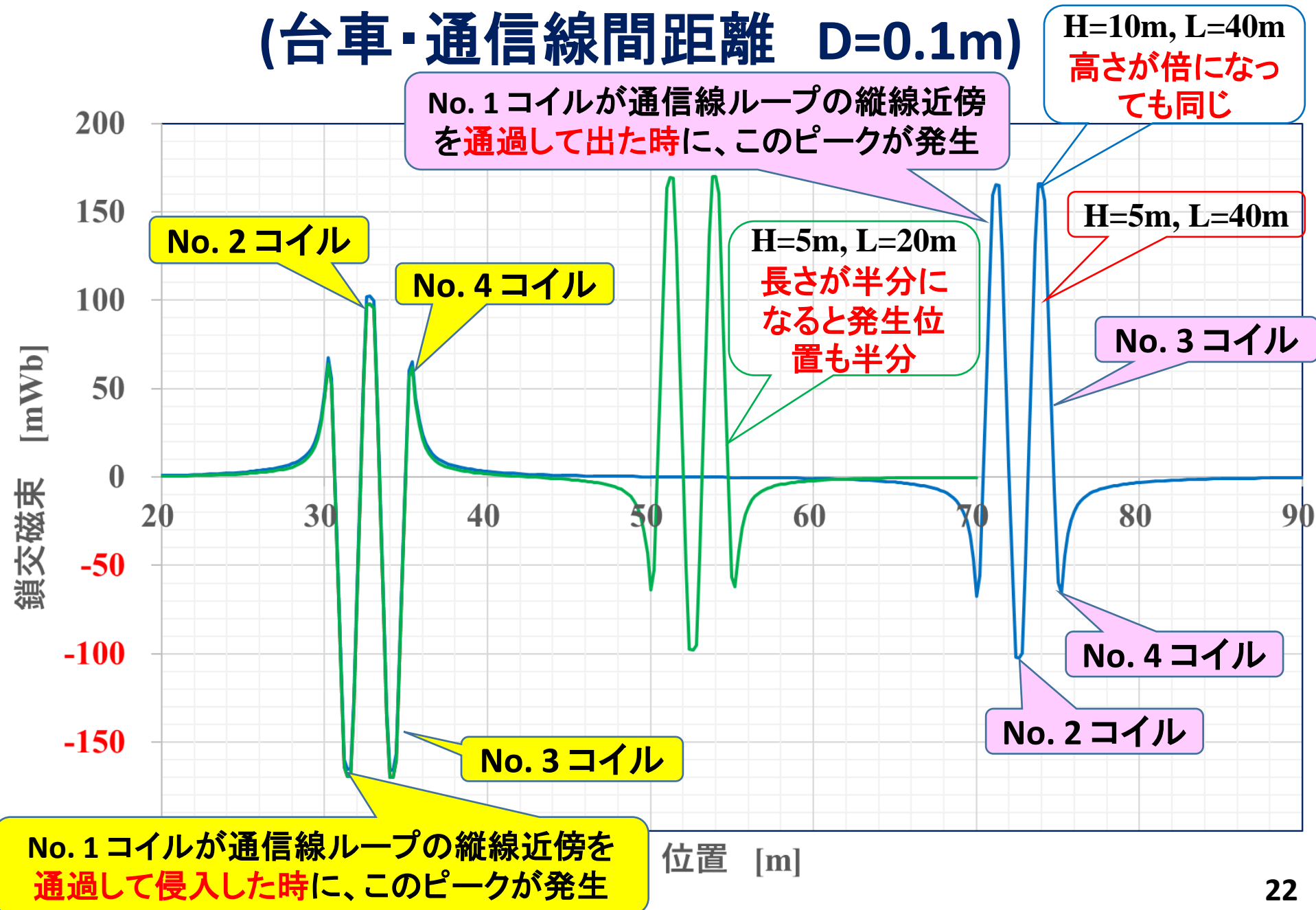


(c) $D=10.1\text{m}$

講演内容

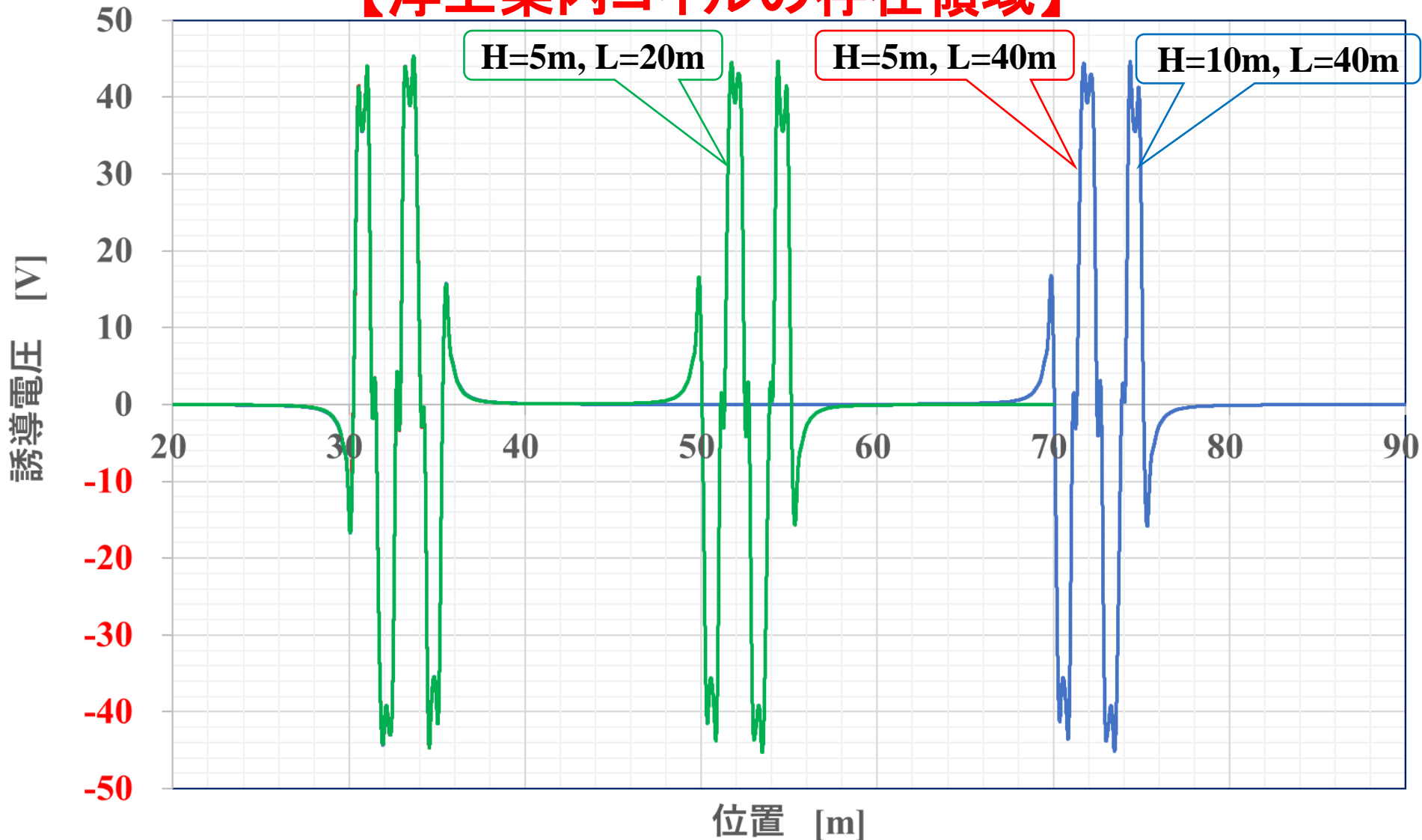
- 磁気浮上鉄道の構成と通信線への電磁誘導
- COMSOLによる電磁誘導計算法
- COMSOLとMATLABの比較
- **COMSOLによる電磁誘導の線路構成依存性
(台車1台の場合)**
- COMSOLによる電磁誘導の線路構成依存性
(台車2台の場合)

鎖交磁束の通信線構成依存性 (台車・通信線間距離 $D=0.1\text{m}$)

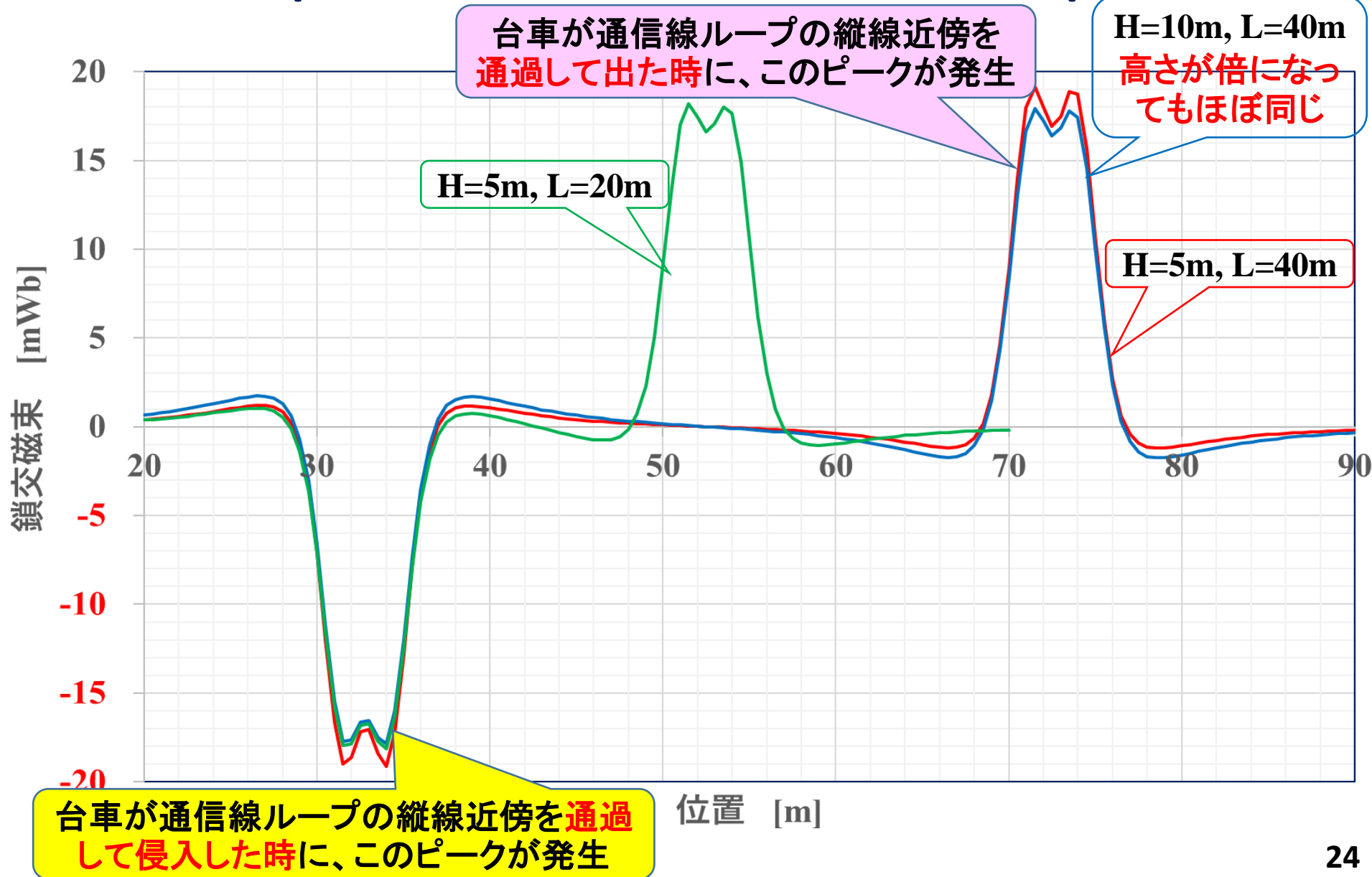


誘導電圧の通信線構成依存性 (台車・通信線間距離 $D=0.1\text{m}$)

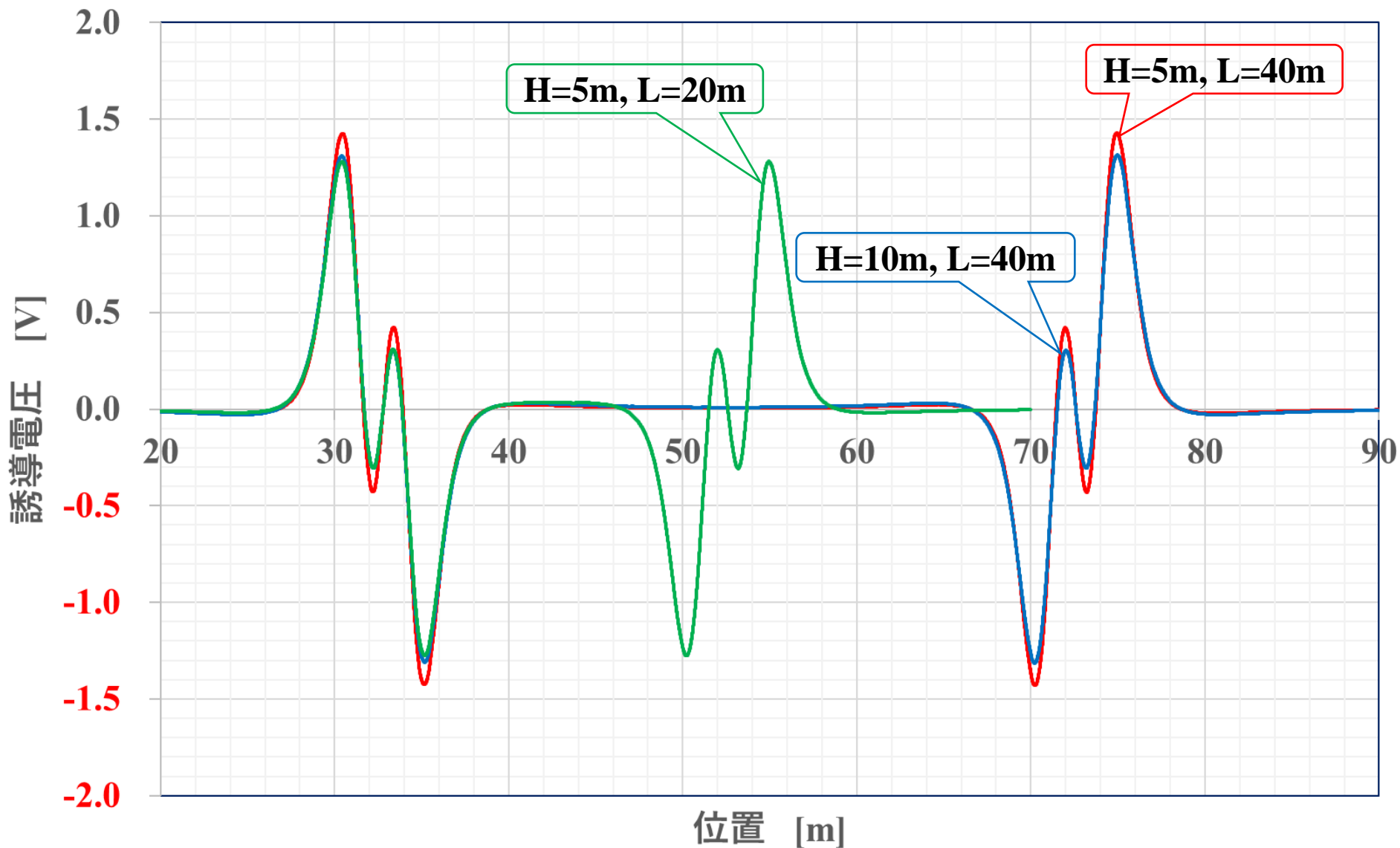
【浮上案内コイルの存在領域】



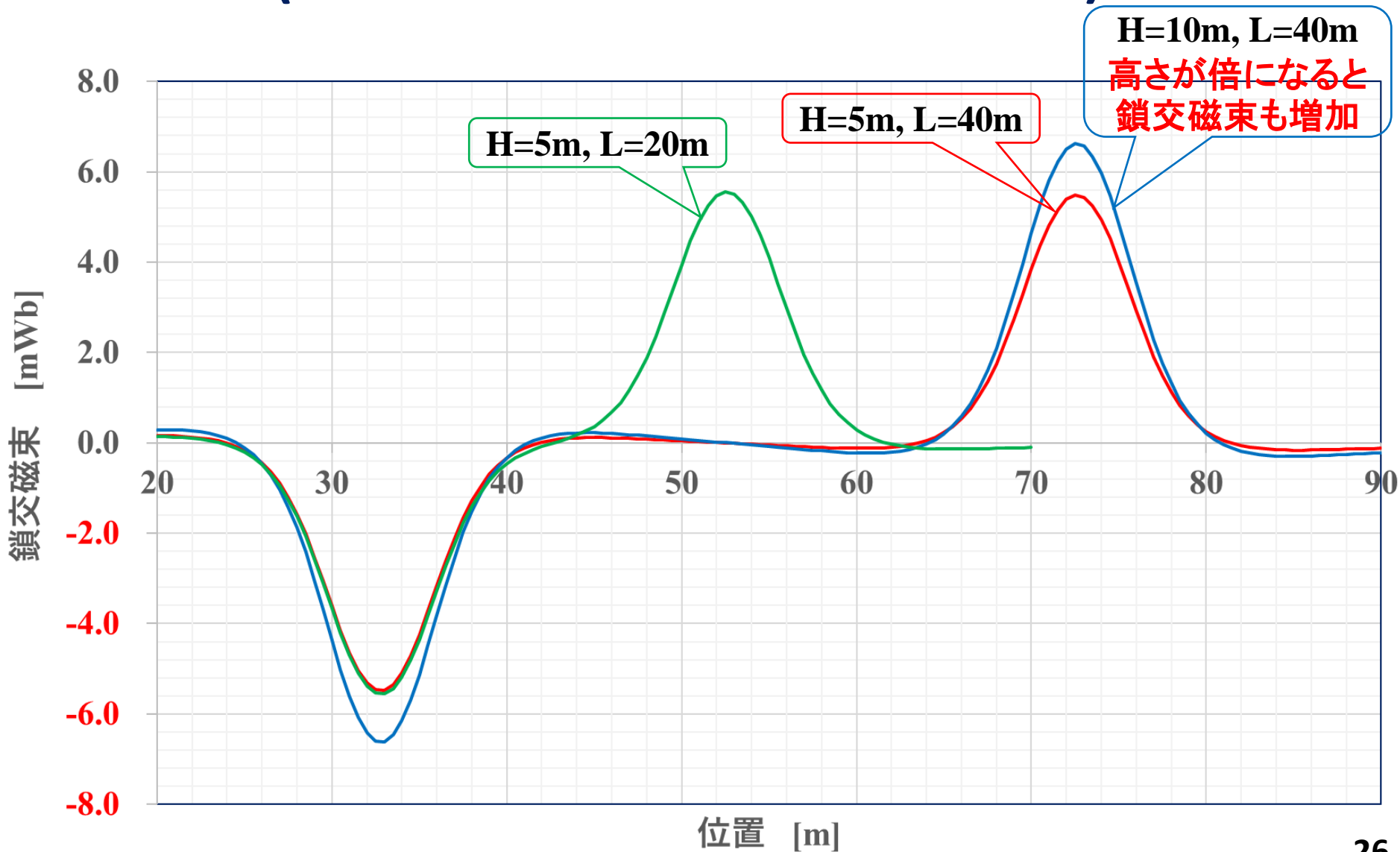
鎖交磁束の通信線構成依存性 (台車・通信線間距離 $D=2.1\text{m}$)



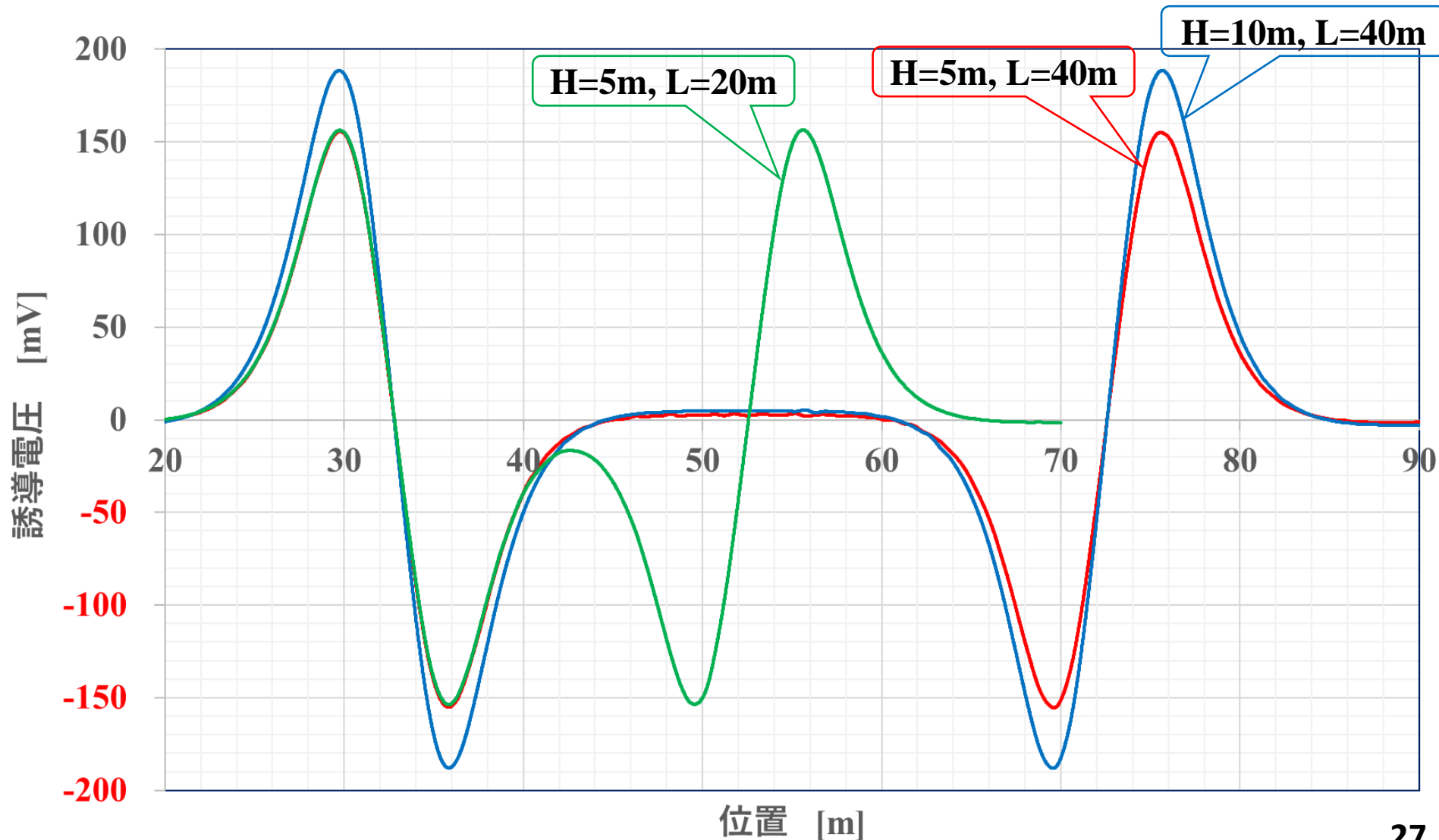
誘導電圧の通信線構成依存性 (台車・通信線間距離 $D=2.1\text{m}$)



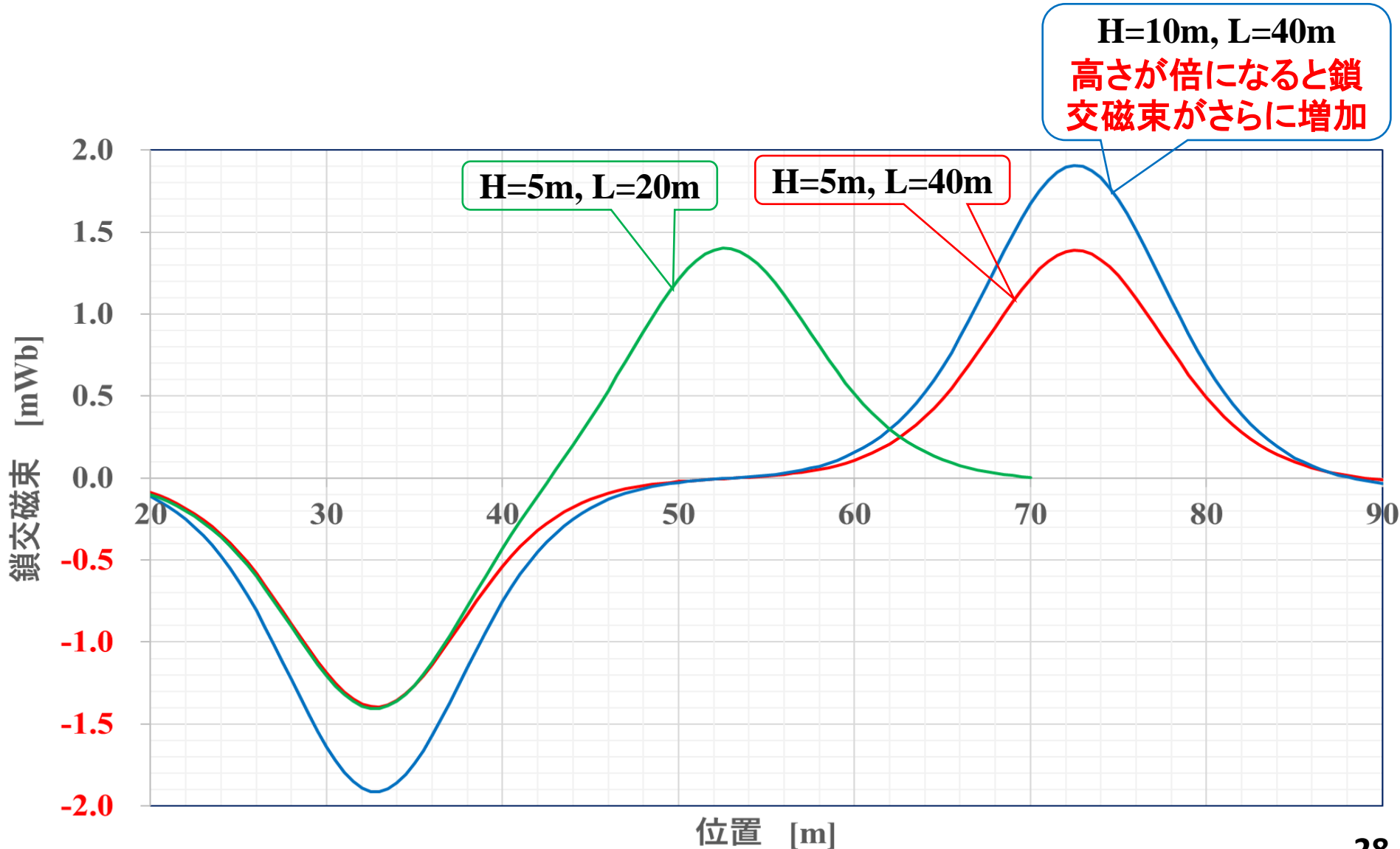
鎖交磁束の通信線構成依存性 (台車・通信線間距離 $D=5.1\text{m}$)



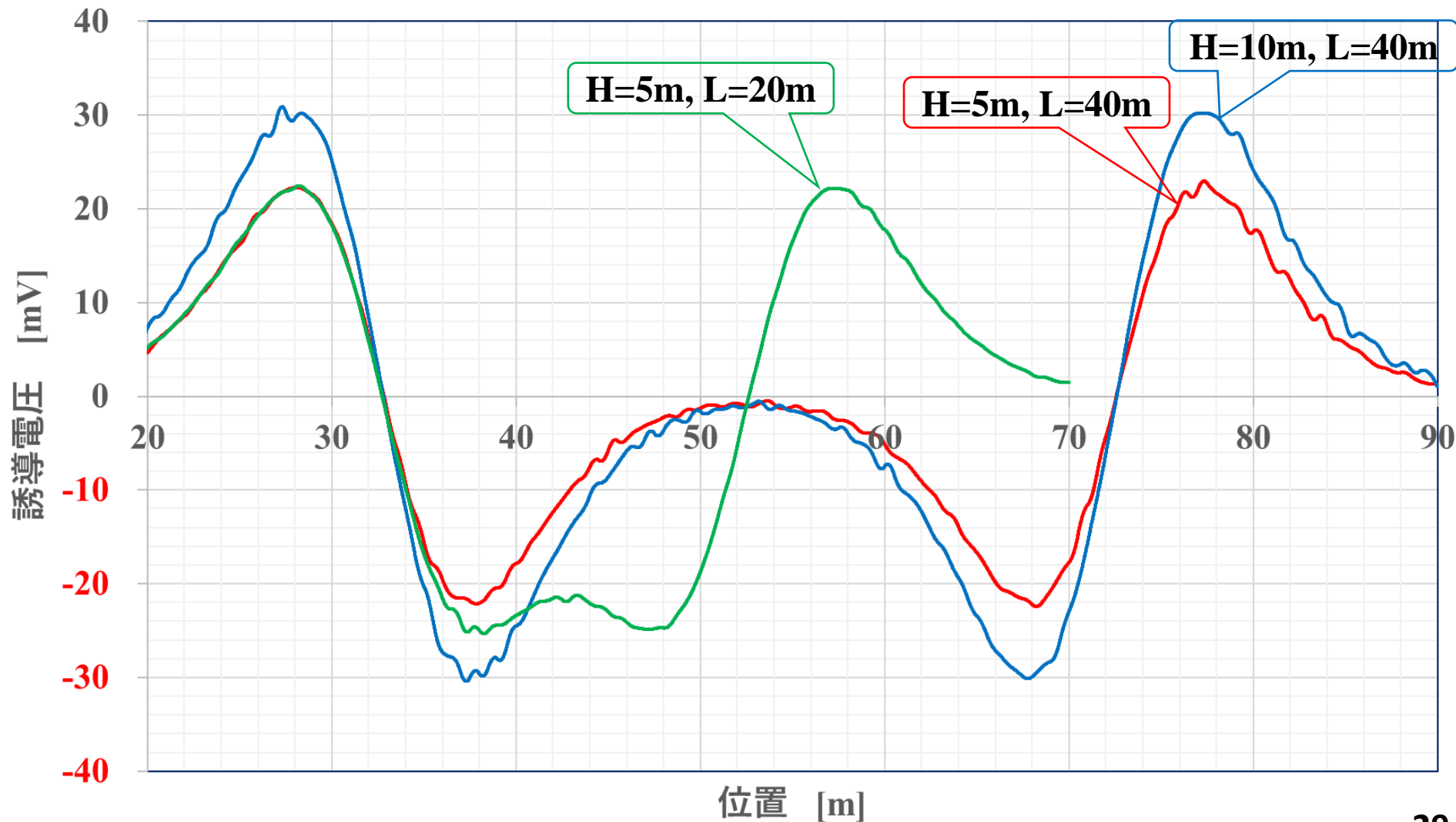
誘導電圧の通信線構成依存性 (台車・通信線間距離 $D=5.1\text{m}$)



鎖交磁束の通信線構成依存性 (台車・通信線間距離 $D=10.1\text{m}$)



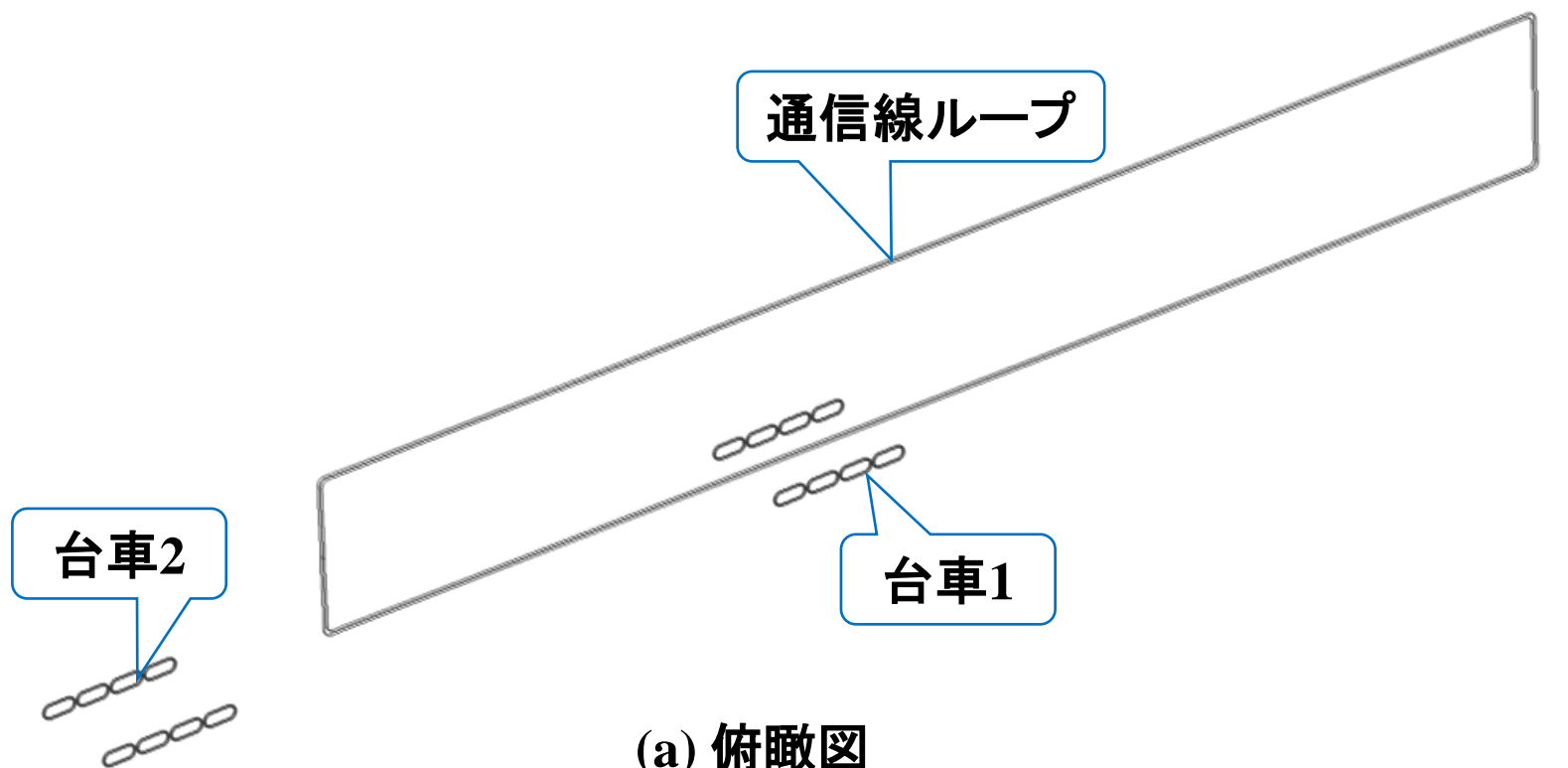
誘導電圧の通信線構成依存性 (台車・通信線間距離 $D=10.1\text{m}$)



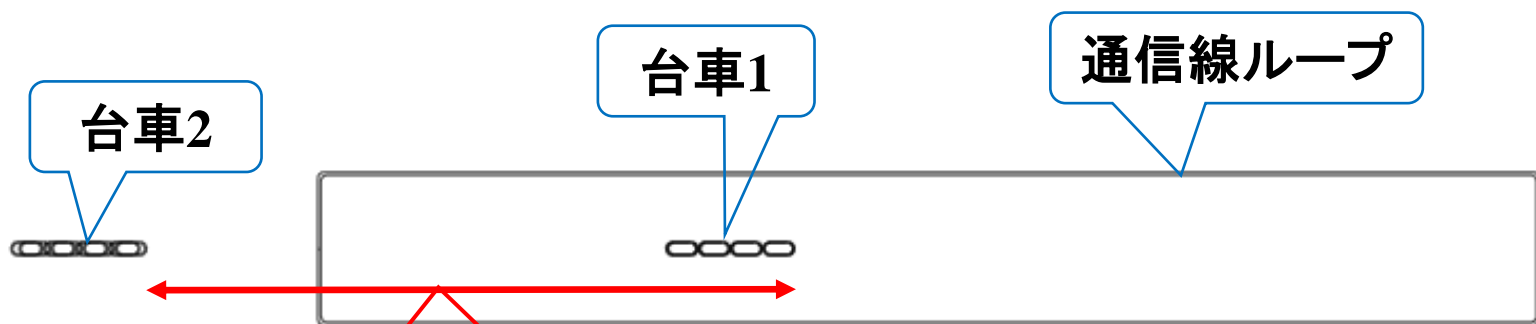
講演内容

- 磁気浮上鉄道の構成と通信線への電磁誘導
- COMSOLによる電磁誘導計算法
- COMSOLとMATLABの比較
- COMSOLによる電磁誘導の線路構成依存性
(台車1台の場合)
- COMSOLによる電磁誘導の線路構成依存性
(台車2台の場合)

超電導コイルを搭載した2台の台車モデルの構成



(a) 俯瞰図



台車間隔 21.6m

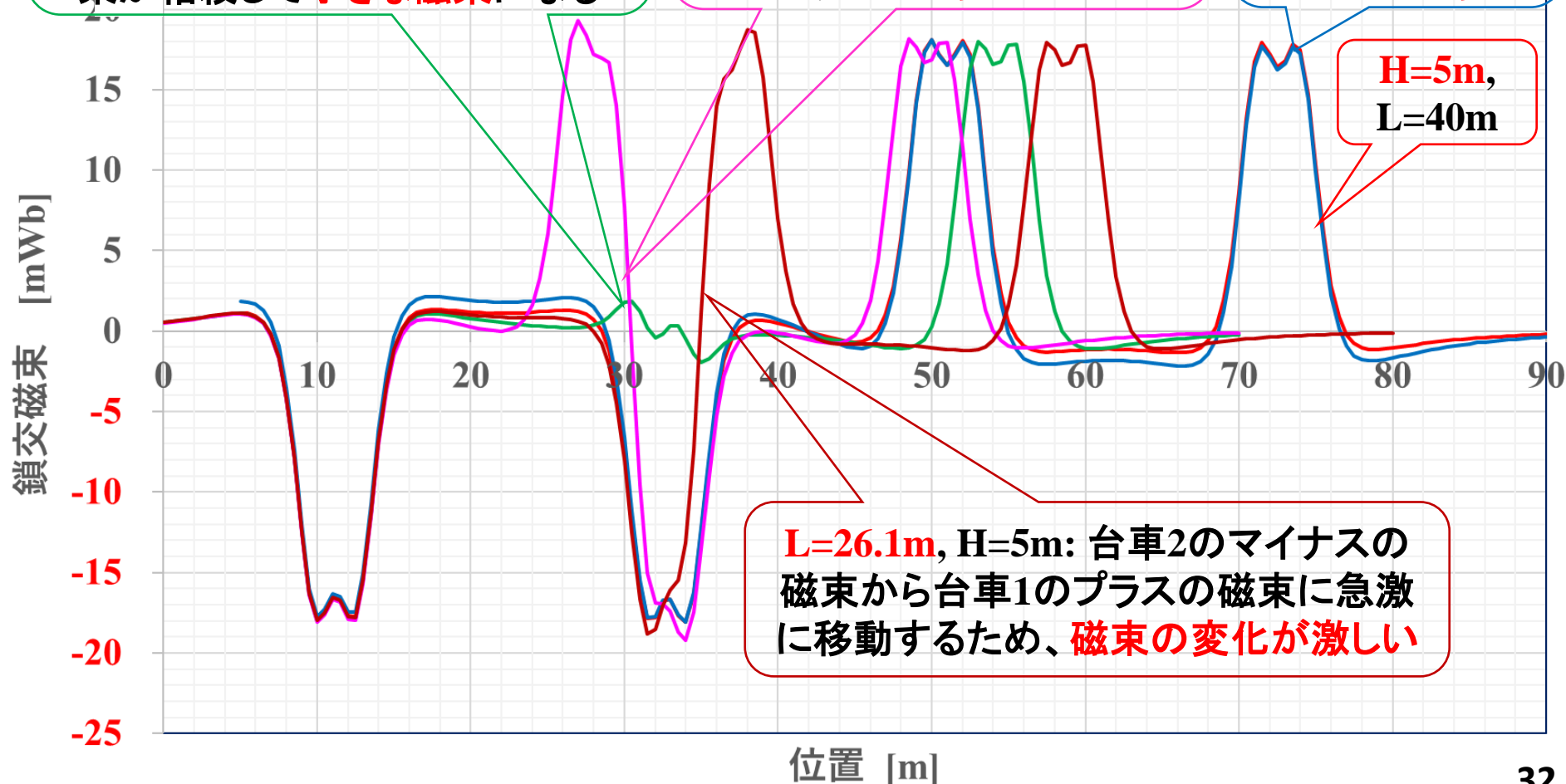
(b) 側面図

2台の台車に対する鎖交磁束 (台車・通信線間距離 $D=2.1\text{m}$)

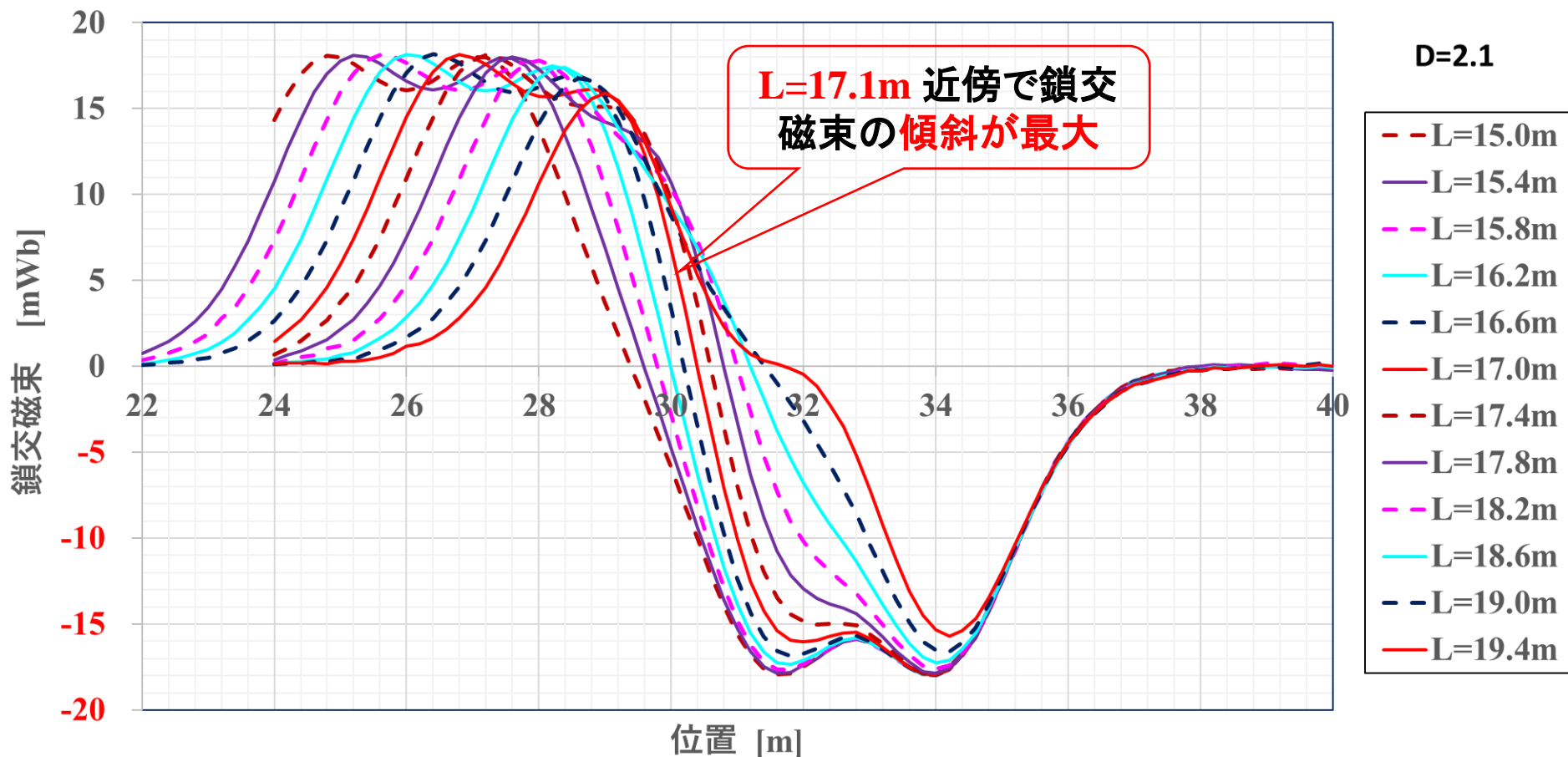
$L=21.6\text{m}$, $H=5\text{m}$: 線路長 L が台車間隔と等しくなると、台車2のプラスの磁束と台車1のマイナスの磁束が相殺して小さな磁束になる

$L=17.1\text{m}$, $H=5\text{m}$: 台車2のプラスの磁束から台車1のマイナスの磁束に急激に移動するため、磁束の変化が激しい

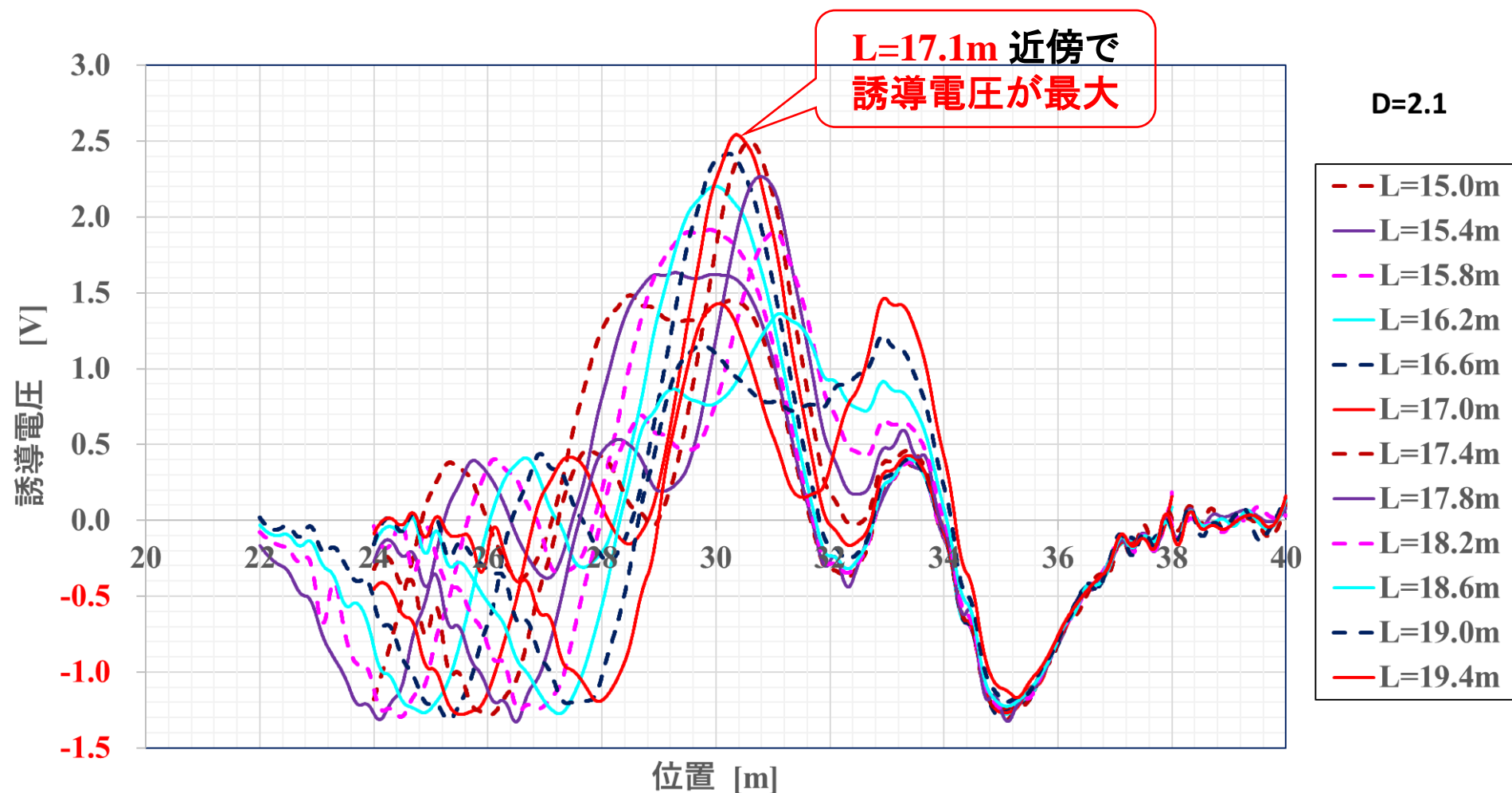
$H=10\text{m}$ $L=40\text{m}$: 線路高 H が2倍になっても磁束はほぼ不変



2台の台車に対する鎖交磁束 ～線路長 $L=17.1\text{m}$ 近傍の鎖交磁束～ (台車・通信線間距離 $D=2.1\text{m}$)

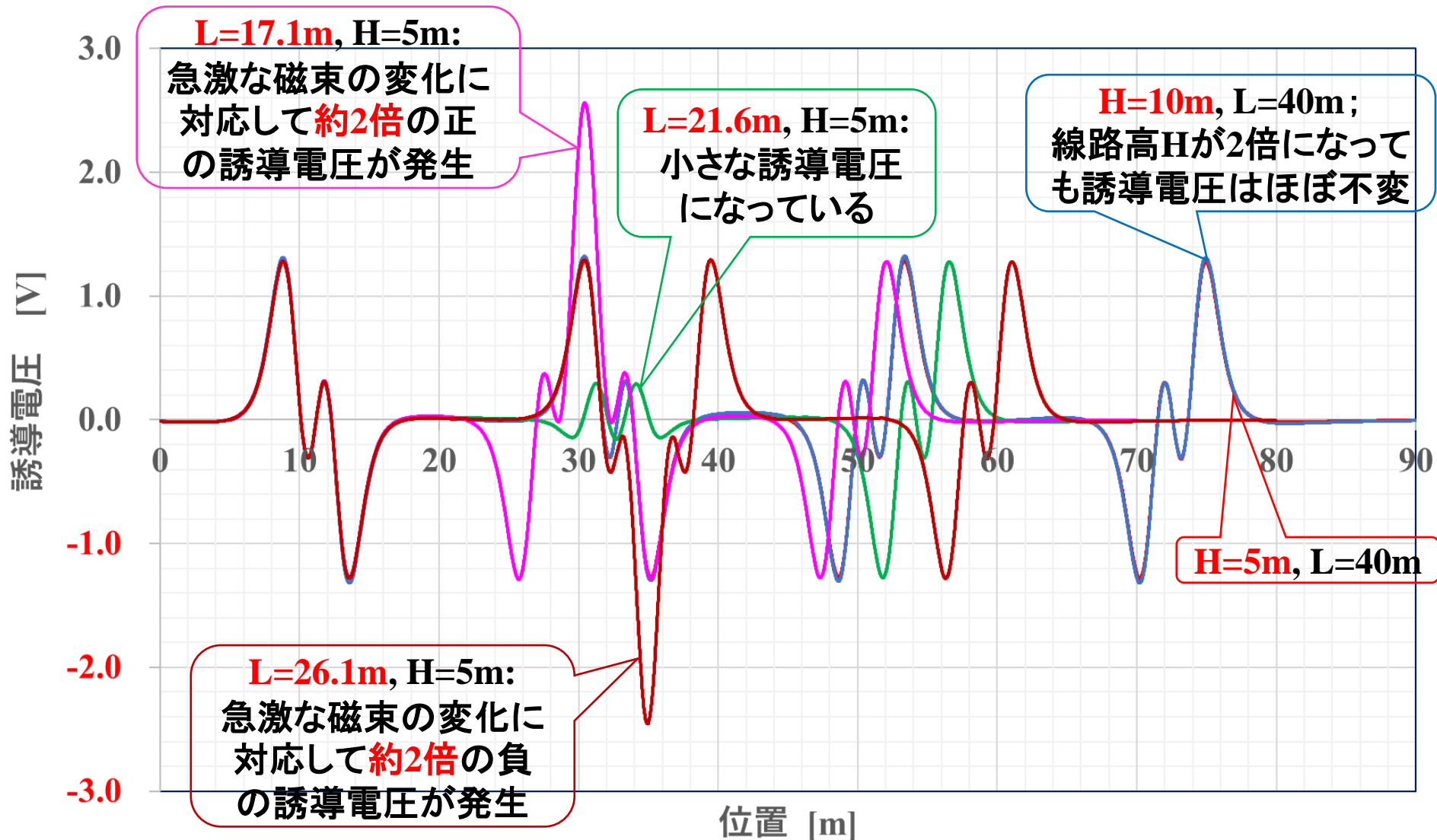


2台の台車に対する誘導電圧 ～線路長 $L=17.1\text{m}$ 近傍の誘導電圧～ (台車・通信線間距離 $D=2.1\text{m}$)



2台の台車に対する誘導電圧

(台車・通信線間距離 $D=2.1\text{m}$)



2台の台車に対する鎖交磁束

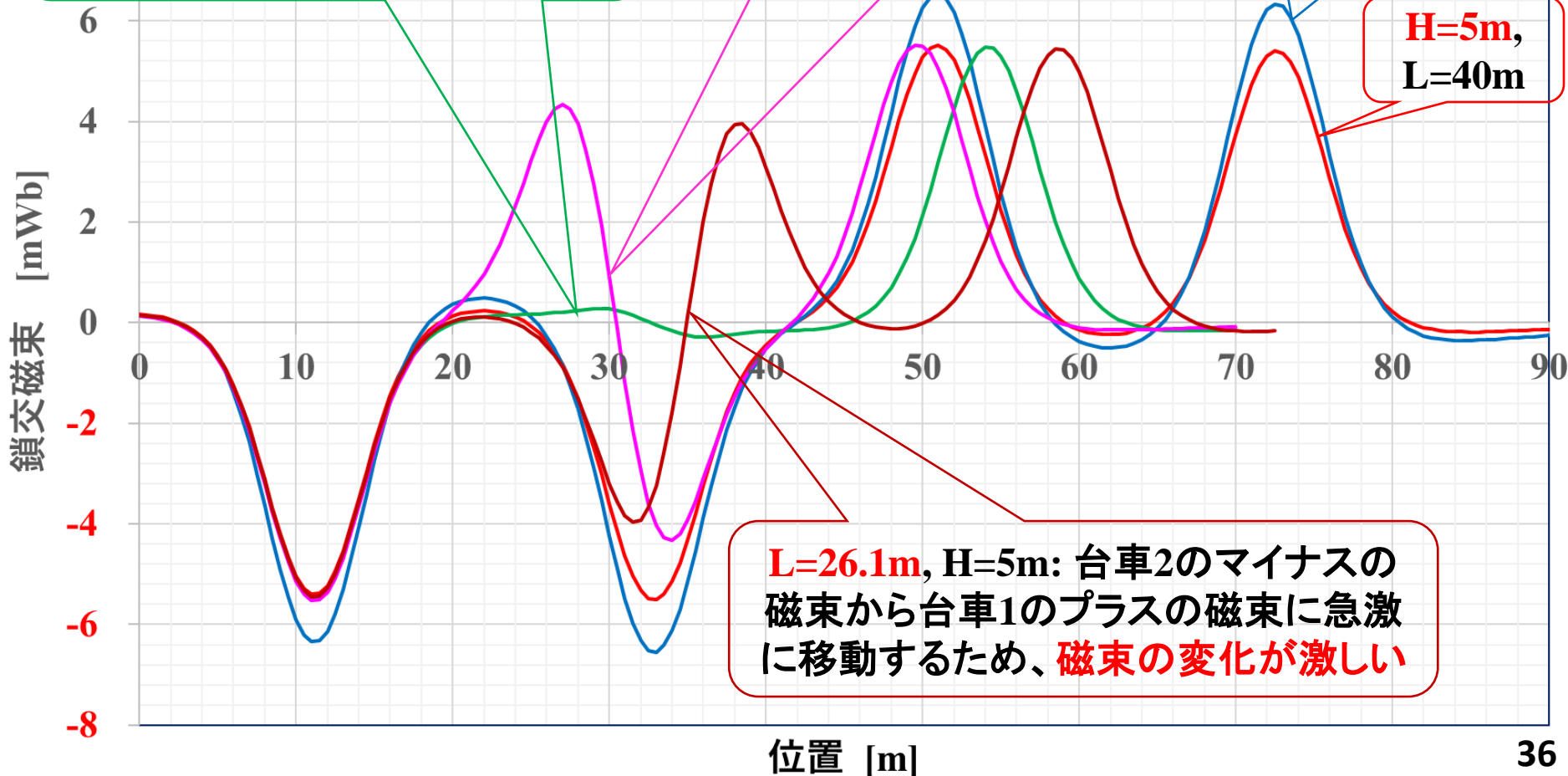
(台車・通信線間距離 $D=5.1\text{m}$)

$L=21.6\text{m}$, $H=5\text{m}$: 線路長 L が台車間隔と等しくなると、台車2のプラスの磁束と台車1のマイナスの磁束が相殺して小さな磁束になる

$L=17.1\text{m}$, $H=5\text{m}$: 台車2のプラスの磁束から台車1のマイナスの磁束に急激に移動するため、磁束の変化が激しい

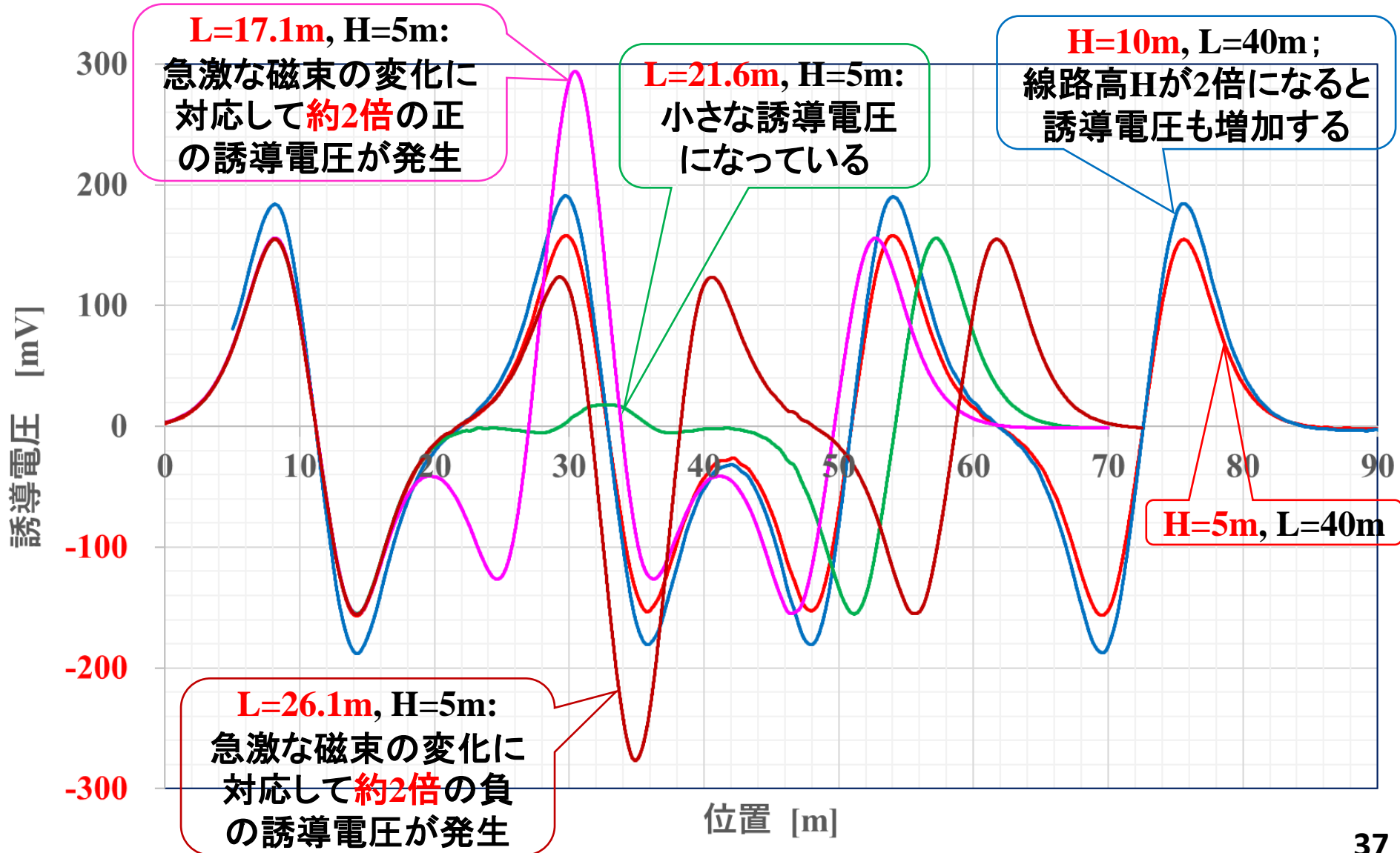
$H=10\text{m}$ $L=40\text{m}$: 線路高 H が2倍になると磁束は増加する

$H=5\text{m}$, $L=40\text{m}$



2台の台車に対する誘導電圧

(台車・通信線間距離 $D=5.1\text{m}$)



2台の台車に対する鎖交磁束

(台車・通信線間距離 $D=10.1\text{m}$)

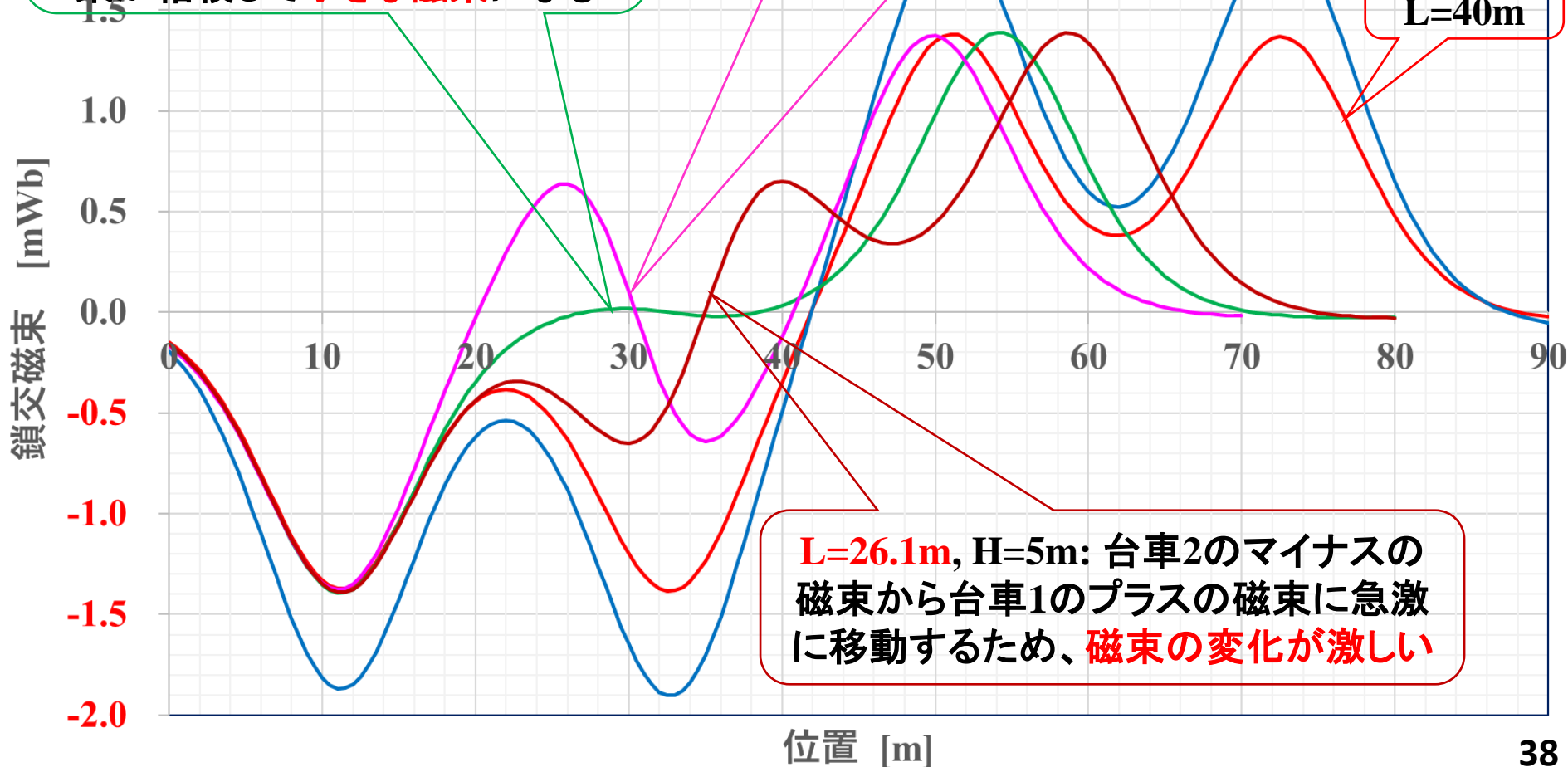
$L=21.6\text{m}$, $H=5\text{m}$: 線路長 L が台車間隔と等しくなると、台車2のプラスの磁束と台車1のマイナスの磁束が相殺して小さな磁束になる

$L=17.1\text{m}$, $H=5\text{m}$: 台車2のプラスの磁束から台車1のマイナスの磁束に急激に移動するため、磁束の変化が激しい

$H=10\text{m}$, $L=40\text{m}$: 線路高 H が2倍になると磁束はさらに増加する

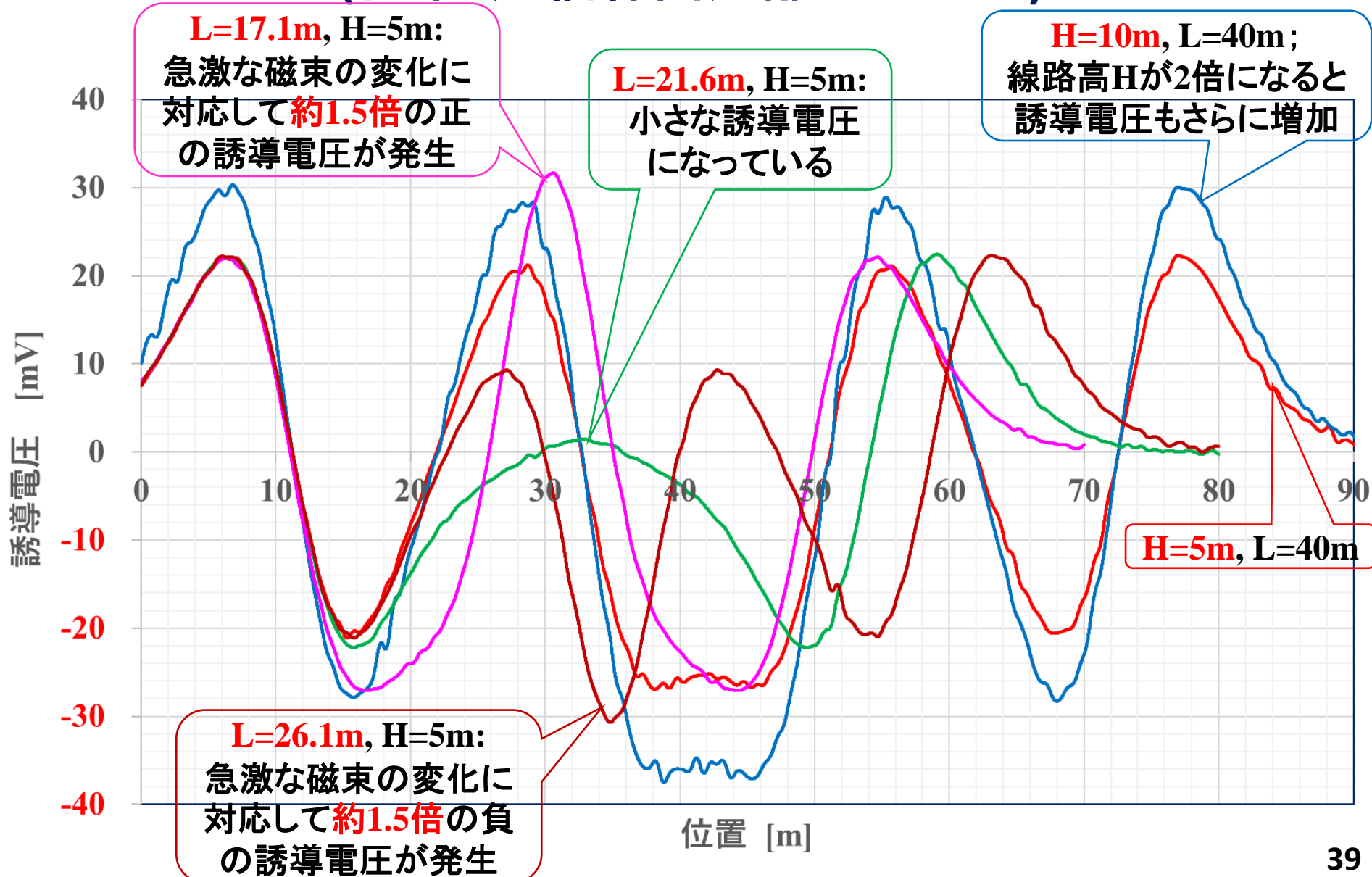
$H=5\text{m}$, $L=40\text{m}$

$L=26.1\text{m}$, $H=5\text{m}$: 台車2のマイナスの磁束から台車1のプラスの磁束に急激に移動するため、磁束の変化が激しい



2台の台車に対する誘導電圧

(台車・通信線間距離 $D=2.1\text{m}$)



引用文献

- ① 竹内恵一, 山内大介:「鉄道沿線の電磁誘導現象を探る」, RRR, Vol.73, No.8, pp.8-11 (2016)
- ② 大島浩:「IV 超電導リニア技術の概要」, 日本機械学会誌, 第120巻, 第1179号, pp22-29 (2017)
- ③ 酒井芳将, 西方敦博, 徳田正満:「磁気浮上鉄道による電磁誘導計算のための相対運動する磁気結合ループ系の解析法」, 信学技報, EMCJ2018-2, pp.7-12 (2018)
- ④ 徳田正満, 酒井芳将, 鎗田純輝, 西方敦博:「磁気浮上鉄道から通信線への電磁誘導に対するCOMSOL解析」, COMSOL Conference 2018 Tokyo, N2-1 (2018)
- ⑤ M. Tokuda, Y. Sakai, J. Yarita and A. Nishikata: COMSOL Analysis for Electromagnetic Induction to Telecommunication Line by MAGLEV Train, EMC Sapporo & APEMC 2019, Session 3 (Low Frequency EMC) (2019)
- ⑥ 徳田正満, 酒井芳将, 鎗田純輝, 西方敦博:磁気浮上鉄道から通信線への電磁誘導に対する有限要素解析, 電気学会論文誌A, 139巻, 12号, pp.663-671 (2019)
- ⑦ 徳田正満, 西方敦博:磁気浮上鉄道から通信線への電磁誘導における線路構成依存性, 電気学会論文誌A, 140巻, 12号, pp.549-556 (2020)

An aerial photograph of Mount Fuji, showing its iconic snow-capped peak and surrounding slopes. The mountain is partially obscured by a thick layer of white clouds. A bright cyan rectangular box is overlaid on the lower portion of the image, containing the Japanese text 'ご清聴ありがとうございました!!' in bold red characters.

ご清聴ありがとうございました!!