

磁気抵抗形センサを用いたレール摩耗量の非接触測定*

渡 邊 誠 一**

Non-contact Measurement of Rail Wearing Depth Using Reluctance Sensor

Seiichi WATANABE

This paper deals with the non-contact measurement of rail wearing depth using reluctance rail sensor (RR sensor) for the ordinary railways and the *Shinkansen*. The RR sensor consists of a U-shape core (cut-core), two exciting coils and two detecting coils, each coil is wounded with 250 turns. The conclusions are as follows :

- (1) In the case of set lift-off $z_0 = 15$ mm, the detection sensitivity of rail wearing depth, Δw of the RR sensor is biggest with the location of sensor at $\Delta x = -15$ mm.
- (2) For lift-off, z_0 changed by ± 2 mm, the output voltage changing, ΔV , by influence of rail wearing depth, Δw , can be decreased at $\Delta x = 11$ mm.

キーワード：磁気抵抗形レールセンサ，JIS 6 kg レール，カットコア，レール摩耗量

1. まえがき

日本各地で整備新幹線の建設が進んでおり，地方自治体でも高速交通網時代に入った。新幹線のような高速鉄道を安全に運行するには，日頃からの軌道管理が重要である。そのため，日夜電気軌道総合試験車を走行させてレール左右変位量などの軌道状態の確認が行われている。現在，左右変位の測定には接触式の回転円盤や，非接触式の光学式あるいは電磁式センサが用いられている^{1) 2)}。

本論文では，空心コイルにカットコアを挿入した磁気抵抗形レールセンサ (Reluctance Rail Sensor, 以下 RR センサと略記) で，レール頭部側面の摩耗量の測定法について述べている。レール摩耗は，列車通過時のレールにかかる重量，惰性運転や速度変化，及び降雨や降雪，温度，湿度等の環境変化によって生じる³⁾。レール摩耗量が電気軌道総合試験車で測定できれば，人件費の削減や短時間で検査が行える等メリットは大きい。現在，スリット光を応用した

本研究の一部は平成 9 年度及び平成 10 年度長野高専教育研究特別経費の助成を受けて行われた。

* 1998 年 9 月 20 日 第 22 回日本応用磁気学会学術講演会で一部発表

** 電気工学科助手

原稿受付 1998 年 10 月 30 日

レール表面探傷の研究が進められているが，センサ部に着雪するとセンサが機能しないという欠点を有している⁴⁾。筆者は，非接触で天候の影響を受けにくい電磁式センサによるレール摩耗量の測定法を提案してきた^{5)~8)}。本論文では，磁気抵抗形センサに関する以下の事柄について述べる。

- (1) RR センサを 1 個用いた場合のレール摩耗量の測定
- (2) RR センサを 2 個用いた場合のレール摩耗量の非接触測定

2. 磁気抵抗形レールセンサの構造

図 1 に RR センサの構造を，表 1 には RR センサの仕様を示した。RR センサはカットコアの脚部に内側から検出コイル及び励振コイルを各 250 回両側に施し，それぞれ和動接続を行ったものである ($N_e = N_d = 500$ 回)。カットコアには方向性電磁鋼帯 23ZH90 を用いた。

いま，RR センサの励振コイル N_e を式 (1) に示す正弦波交流 i で励振する。

$$i = \sqrt{2}I \cos \omega t \quad [A] \quad (1)$$

ここに， I : 励振電流の実効値 [A]

ω : 励振角周波数 ($= 2\pi f$) [rad/s]

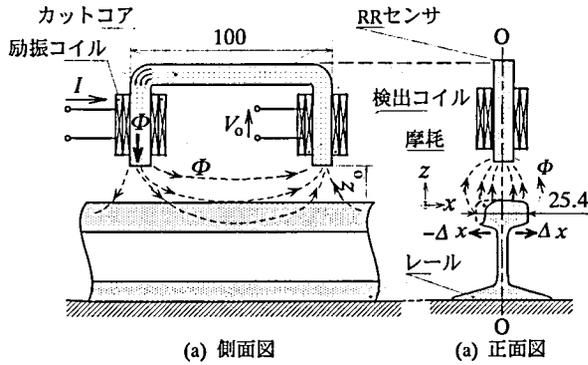


図 1 RR センサの構造 (単位: [mm])

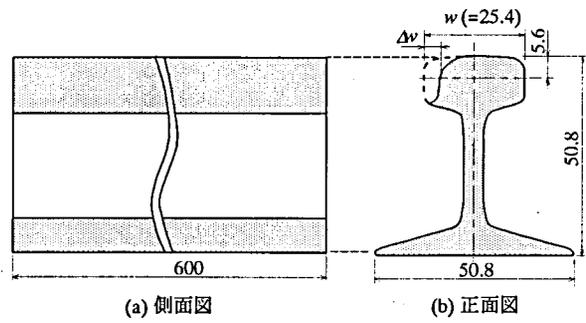


図 2 JIS 6 kg レールの形状 (単位: [mm])

表 1 RR センサの仕様

項目	項目	数値	[単位]
励振 コイル	巻数	N_e	500
	線径	d_e	0.2 [mm]
	直流抵抗	R_e	14.13 [Ω]
	インダクタンス*	L_e	15.36 [mH]
検出 コイル	巻数	N_d	500
	線径	d_d	0.2 [mm]
	直流抵抗	R_d	14.67 [Ω]
	インダクタンス*	L_d	14.76 [mH]
カット コア	材質		23ZH90
	平均磁路の長さ	l_c	173.1 [mm]
	断面積	A_c	100 [mm ²]
	占積率	ξ	0.96

*測定条件: $f = 1 \text{ kHz}$.

励振コイルから発生する磁束 Φ は式(2)で与えられる。

$$\Phi = \frac{L_e(z_o, \Delta x, \Delta w)i}{N_e} \quad [\text{Wb}] \quad (2)$$

ここに、 $L_e(z_o, \Delta x, \Delta w)$: 励振コイルのインダクタンス [H]

z_o : 設定リフトオフ [m]

Δx : レール変位 [m]

Δw : レール摩耗量 [m]

N_e : 励振コイルの巻数 回

励振コイルのインダクタンス $L_e(z, \Delta x, \Delta w)$ は、設定リフトオフ z_o 、レール変位 Δx 、レール摩耗量 Δw に依存する。 z_o 、 Δx 、 Δw がそれぞれ変化すると、センサとレールとの間の磁気抵抗 $R_m(z_o, \Delta x, \Delta w)$ が変化して $L_e(z, \Delta x, \Delta w)$ が増減する。 $L_e(z, \Delta x, \Delta w)$ は式(3)で示される。

$$L(z_o, \Delta x, \Delta w) = \frac{N_e^2}{R_m} \quad [\text{H}] \quad (3)$$

式(3)より、検出コイル N_d に発生する電圧 e は電磁誘導の式から式(4)で与えられる。

$$e = -N_d \frac{d\Phi}{dt}$$

$$= -\frac{N_d}{N_e} L_e(z_o, \Delta x, \Delta w) \frac{di}{dt}$$

$$= \frac{N_d}{N_e} L_e(z_o, \Delta x, \Delta w) \omega \sqrt{2} I \sin \alpha t \quad [\text{V}] \quad (4)$$

ここに、 N_d : 検出コイルの巻数 回

式(4)において $I = \sqrt{2} I \sin \omega t$ と置きなおし、検出コイルの出力電圧の V_o は式(5)で表される。

$$V_o = -N_d \frac{d\Phi}{dt} = \frac{N_d}{N_e} L_e(z_o, \Delta x, \Delta w) \omega I \quad [\text{V}] \quad (5)$$

図2には測定に用いたJIS 6 kg レールの形状を示した。これは、材木運搬鉄道等に用いられる軽レールと呼ばれるものである。頭頂部の幅 w は25.4 mmで、在来線の軌道に用いられるJIS 50 kgN レールの頭頂部の幅の約38%の大きさである。レール摩耗量 Δw はJIS 6 kg レールにおいて頭面下5.6 mmの位置での偏摩耗の深さとした。これは、JIS 50 kgN レールにおいてレール摩耗量はレール頭面下14 mmにおける偏摩耗の深さと定義されており、縮尺距離を採用したものである。

摩耗形状は研削加工により $\Delta w = 1, 2.2, 4.4 \text{ mm}$ の摩耗レールを製作したが、加工したことによって一種の焼入れが行われ磁気特性が不均一なものになっていると考えられる。そこで、磁気特性の均一化及びレールの内部応力を取り除く目的でレールを真空一雰囲気焼戻炉で炉内温度650℃で4時間加熱した後炉冷を行った。

3. レール摩耗量の測定結果

3-1 RR センサの作る磁束分布

図3に示した測定系において、励振コイルに発振器(NF回路設計ブロック, 4191)で正弦波を発生して電力増幅器(ソニー, TA-N110)で増幅したものを励振コイルに印加して磁束を発生させる。RRセンサの作る磁束分布をガウスメータ(F. W. Bell,

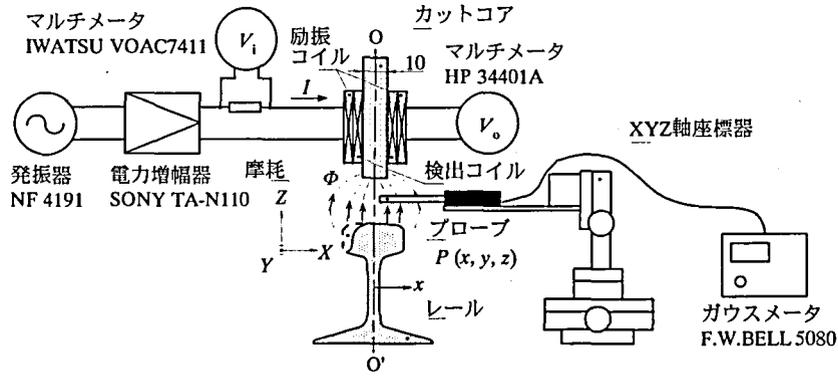


図3 RRセンサの測定ブロック (正面図, 単位:[mm])

5080) で測定した。

図4に測定対象を摩耗量 $\Delta w = 0, 1, 2.2, 4.4$ mmのJIS 6 kgレールとして, RRセンサを設定リフト $z_0 = 15$ mm, レール変位 $\Delta x = 0$ mmの位置に固定し, ガウスメータの測定プローブの位置を $y = 0$ mm, $z = 5$ mm一定で X 軸方向に移動させた際の垂直方向に通過する磁束 B_z を示した。プローブの位置が摩耗している上部にある場合では Δw が増加することで B_z は減少し, 摩耗していない上部にある場合には B_z は減少した。これは, 摩耗量 Δw が増加することによりセンサ・レール間距離が増加して磁気抵抗が大きくなったため磁束密度は減少し, 逆に摩耗のない部分に磁束が集中したために磁束密度が増加したと考えられる。

3-2 レール摩耗量と出力電圧との関係

図3に示した測定系において, 励振コイルに発振器(NF回路設計ブロック, 4191)で正弦波交流を発生して電力増幅器(ソニー, TA-N110)で増幅したものを励振コイル N_e に印加して, 検出コイル N_d の出力電圧 V_o をマルチメータ(Hewlett Packard, 34401A)で測定した。実際の軌道検測では, レール変位 Δx は2本のレールの中心からの偏差であるが, 実験ではレールの位置を固定しておき, センサの位置を X 軸方向に変化させた。

図5に励振電流 $I = 0.5$ A, 励振周波数 $f = 400$ Hz, リフト $z_0 = 15$ mm一定の条件の下で, 摩耗量 $\Delta w = 0, 1, 2.2, 4.4$ mmのJIS 6 kgレールについてレール変位 Δx を変化させた場合の出力電圧 V_o を示した。 $\Delta w = 0$ mmレールでは, V_o は $\Delta x = 0$ mmで最大となり, 左右変位の増加で減少して対称の出力となった。 Δw が増加すると摩耗部分の上部では V_o は減少し, また, $\Delta x = 15$ mm以上では $\Delta w = 0$ mmの V_o に比べ大きい値となった。これは, 摩耗部分上部では見かけ上の z_0 が増加して磁気抵抗が大きくなるために出力電圧が低下し, また, 摩耗がある

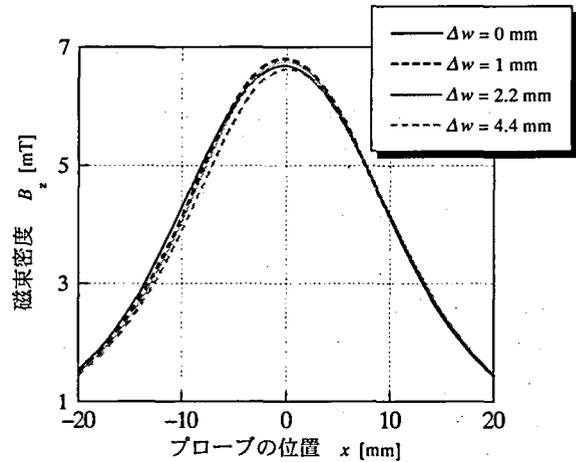


図4 磁束密度-レール変位特性
($f = 400$ Hz, $I = 0.5$ A, $z_0 = 15$ mm, $\Delta x = 0$ mm)

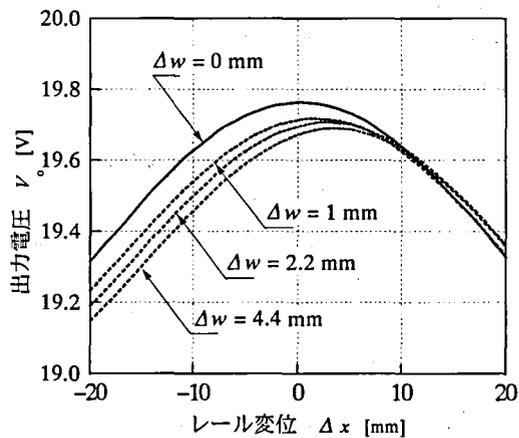


図5 出力電圧-レール変位特性
($z_0 = 15$ mm, $f = 400$ Hz, $I = 0.5$ A)

ことによって摩耗のない上部に磁束が集中して出力電圧が増加したと考えられる。

図5に示した出力電圧-レール変位特性から, 任意の摩耗量 Δw における場合に得られた出力電圧 $V_o(\Delta x, \Delta w)$ と摩耗のない場合($\Delta w = 0$ mm)の出

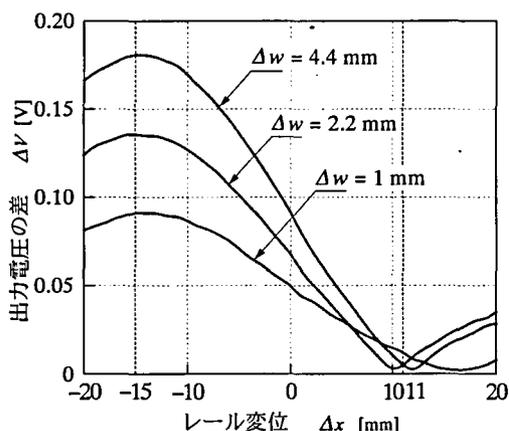


図 6 出力電圧の差-レール変位特性
($f = 400 \text{ Hz}$, $I = 0.5 \text{ A}$, $z_0 = 15 \text{ mm}$)

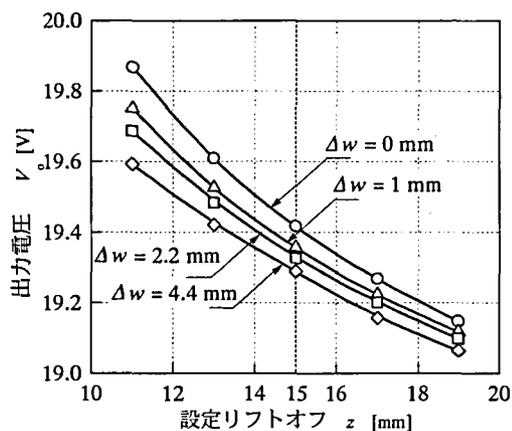


図 7 出力電圧の差-設定リフトオフ特性
($f = 400 \text{ Hz}$, $I = 0.5 \text{ A}$, $z_0 = 15 \text{ mm}$)

力電圧 V_0 ($\Delta x, \Delta w = 0$) との差 ΔV を式 (6) で定義し、以下 ΔV を出力電圧の差と呼ぶことにする。

$$\Delta V = |V_0(\Delta x, \Delta w) - V_0(\Delta x, \Delta w = 0)| \quad [\text{V}] \quad (6)$$

図 6 に出力電圧の差-レール変位特性を示した。 $-\Delta x$ 方向では Δw が増加するにつれて ΔV は増加して $\Delta x = -15 \text{ mm}$ で最大となった。また、 $\Delta x = 11 \text{ mm}$ 付近において ΔV は最小となった。このことから、RR センサの位置を $\Delta x = -15 \text{ mm}$ にすればレール摩耗量 Δw に対して検出感度を最大に、また、 $\Delta x = 11 \text{ mm}$ にすれば Δw に対して出力電圧の変化が最小にできる可能性があることがわかった。

図 7 に RR センサの位置が $\Delta x = -15 \text{ mm}$ における摩耗量 $\Delta w = 0, 1, 2.2, 4.4 \text{ mm}$ のレールの設定リフトオフ-出力電圧特性を示した。ここで、RR センサを軌道検測車に搭載して測定することを想定し、リフトオフ方向に $\pm 2 \text{ mm}$ 変化した場合、 $\Delta w = 0 \text{ mm}$ レールにおいて $z_0 = 13, 15, 17 \text{ mm}$ の場合に $V_0 = 19.610, 19.417, 19.269 \text{ V}$ となり、設定リフトオフ $z_0 = 15 \text{ mm}$ の場合に対して $z_0 = 13, 17 \text{ mm}$ で V_0 は $0.99, -0.76\%$ 変化した。同図はリフトオフ z_0 によって出力電圧が変化しており、 z_0 を検出してこの特性を補正する必要があることがわかった。

4. センサを 2 個用いた場合のレール摩耗量の非接触測定

4-1 2 個の RR センサの配置

図 8 に 2 個の RR センサの配置図を示した。図 6 で得られた結果より、レール摩耗量 Δw 検出センサとして $\Delta x = -15 \text{ mm}$ の位置にセンサ A を、リフトオフ z_0 検出用センサとして $\Delta x = 11 \text{ mm}$ の位置にセンサ B を配置した。センサ A とセンサ B の励振

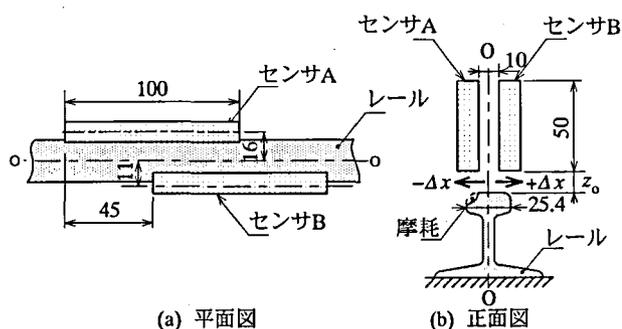


図 8 2 個の RR センサの配置 (単位: [mm])

コイルは和動接続した。検出コイルについては、和動及び差動電圧を測定できるようにするため、個々の電圧を測定できるようにした。ここで、センサ部の中心位置はセンサ A、センサ B からレール中心軸上に向かってそれぞれ 16 mm 、 11 mm の位置として、センサ中心とレール中心との偏差をレール変位 Δx とした。

4-2 レール摩耗量計測システムの構成

図 9 に 2 個の RR センサを用いたレール摩耗量計測システムの構成を示した。RR センサの検出コイルの出力電圧はバッファ回路と AC/DC 変換回路で構成される測定回路に入力される。センサ A 及びセンサ B の出力電圧 V_A, V_B は、AC/DC 変換回路によって交流から直流に変換した後、パソコン (EPSON, PC-386M) の外部拡張バスに挿入した A/D 変換ボード (Microscience, ADM-8698BPC) によって測定した。

図 10 には RR センサ出力電圧測定回路を示した。この回路はバッファ回路と AC/DC 変換回路で構成されている。AC/DC 変換回路では全波整流を行なうと同時に RR センサのゲイン補正を行なえるようにした。バッファ回路は AC/DC 変換回路の入力イ

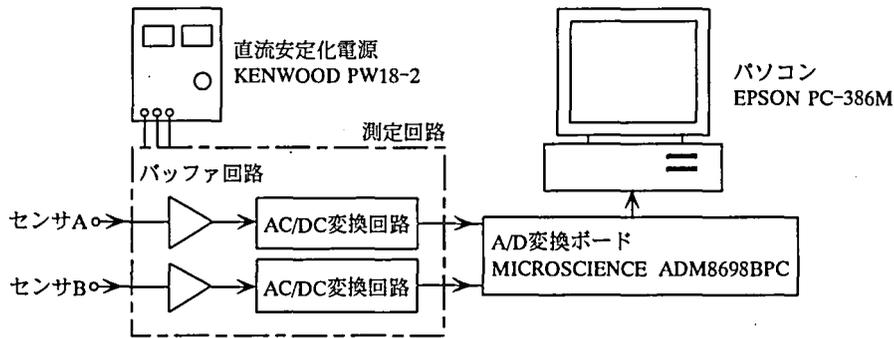


図9 2個のRRセンサを用いたレール摩耗量計測システム

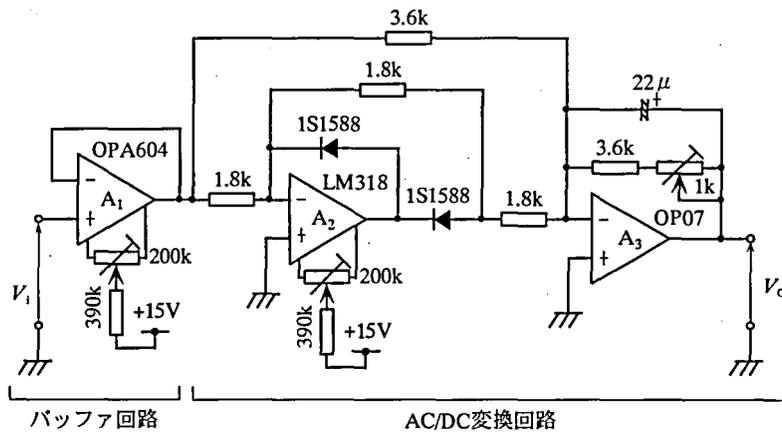


図10 RRセンサ出力電圧測定回路

ンピーダンスを大きくしている。

4-3 レール摩耗量の検出

図11には2個のセンサを用いた場合の出力電圧-レール変位特性を示した。ここで、励振電流はA/D変換ボードの入力範囲が±10Vであるため $I = 0.25$ Aとし、 $\Delta x = 0$ mmの場合に $V_A = V_B$ となるようにRRセンサ出力電圧測定回路のゲイン補正を行っている。センサAの出力電圧 V_A は、レール摩耗量が $\Delta w = 0, 1, 2.2, 4.4$ mmと変化した場合にレール変位 $\Delta x = 0$ mmにおいては $V_A = 9.233, 9.205, 9.196, 9.182$ Vとなり、 $\Delta w = 1, 2.2, 4.4$ mmの場合の V_A は $\Delta w = 0$ の場合の V_A と比較して-0.30, -0.40, -0.55%低下し、 $\Delta x = \pm 4$ mmの範囲内では比例推移した。また、センサBの出力電圧 V_B は、レール変位範囲を±2 mmとした場合、摩耗量 Δw が変化したときの V_B の変動は0.08%以下となり、摩耗量が変わってもリフトオフが測定できることがわかった。

図12に摩耗量 $\Delta w = 0$ mmにおけるセンサBの出力電圧-設定リフトオフ特性を示した。設定リフトオフ $z_0 = 13, 15, 17$ mmの場合に $V_B = 9.345, 9.233, 9.146$ Vとなり、 $z_0 = 15$ mmに対する変化率はそれぞれの1.21, -0.94%となった。よって、図12を

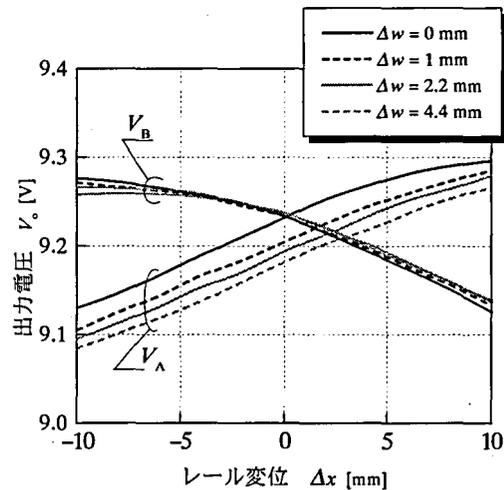


図11 出力電圧-レール変位特性

(RRセンサ2個使用, $f = 400$ Hz, $I = 0.25$ A, $z_0 = 15$ mm)

用いてセンサAのリフトオフ補正を行なうことができる。

図11に示した出力電圧-レール変位特性から、センサAとセンサBの差動出力電圧 V_{od} を式(7)で求める。

$$V_{od} = V_A - V_B \quad (7)$$

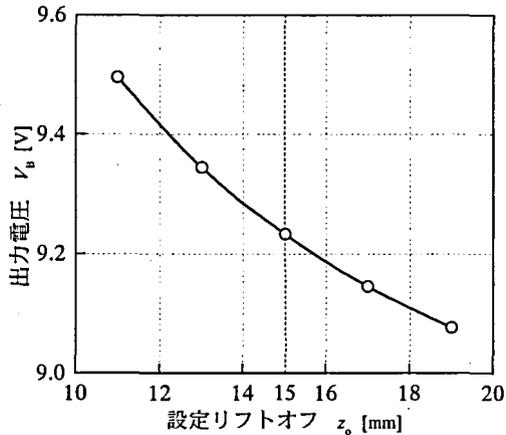


図 12 出力電圧-設定リフトオフ特性

(センサB, $f=400\text{Hz}$, $I=0.25\text{A}$, $\Delta x=0\text{mm}$, $\Delta w=0\text{mm}$)

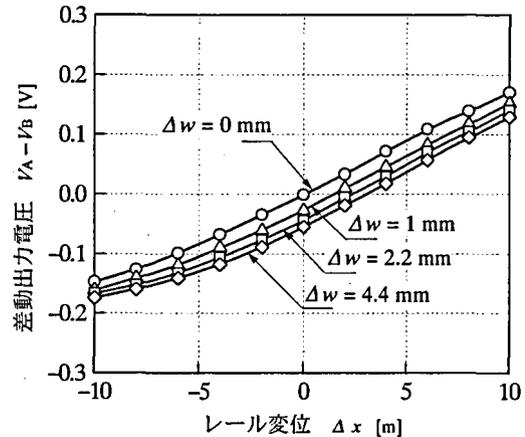


図 13 差動出力電圧-レール変位特性

(RR センサ2個使用, $f=400\text{Hz}$, $I=0.25\text{A}$, $z_0=15\text{mm}$)

図 13 には図 11 に示した出力電圧-レール変位特性から求めた差動出力電圧-レール変位特性を示した。 $\Delta x=0\text{mm}$ の位置において, $\Delta w=0, 1, 2.2, 4.4\text{mm}$ と変化した場合の差動出力電圧はそれぞれ $V_{od}=0, -27, -45, -55\text{mV}$ となり, Δw の増加で V_{od} が低下した。これは, Δw の変化によって V_A が低下しているためである。 $z_0=0\text{mm}$, および $\Delta x=0\text{mm}$ の場合には差動出力電圧 V_{od} でレール摩耗量 Δw を求めることができる。しかしながら, 軌道検測車で測定する際には, 検測走行時にリフトオフ方向及びレール変位方向に変動が生ずるため測定誤差を生ずる。 V_A は $z_0, \Delta x, \Delta w$ の関数, そして V_B は $z_0, \Delta x$ の関数になっているので, レール摩耗量を測定するにはレール変位の影響を分離するための第 3 のセンサが必要になる。

5. まとめ

本論文で明らかになった事柄を以下にまとめる。

(1) 設定リフトオフ $z_0=15\text{mm}$ で, RR センサの位置を $\Delta x=-15\text{mm}$ とすることでレール摩耗量 Δw の検出感度が最大となり, Δw が検出することができた。また, RR センサの位置を $\Delta x=11\text{mm}$ とすることでレール摩耗量 Δw の影響が最小限でリフトオフ z_0 を測定することがわかった。

(2) 試作した RR センサを 2 個用いてレール摩耗量の非接触測定を試みた。その結果, レール変位 Δx の変化がない場合, レール摩耗量 Δw 及び設定リフトオフ z_0 を測定することができた。

参考文献

- 1) 岸本 哲, 安藤 義夫, 竹下 邦夫, 城田 靖: 鉄道試験車光学式測定装置の開発, 鉄道線路, 22, pp. 4-9, 1974.
- 2) 竹下 邦夫, 城田 靖, 成田 嘉衛: 東北・上越新幹線用電磁式軌道検測装置の開発, 鉄道総合技術研究所報告, No. 1352 (施設編第 596 号), 1987.
- 3) 杉田 征男, 長門 彰, 徳岡 研三, 三浦 重: 新しい線路, 社団法人日本鉄道施設協会, p. 485, 1997.
- 4) 高木 喜内, 竹下 邦夫: 光切断法によるレール断面測定装置の開発, 日本非破壊検査協会光を応用した表面探傷技術シンポジウム講演論文集, pp. 19-20, 1997.
- 5) 渡辺 誠一, 水野 勉, 竹下邦夫, 岸本哲, 木村俊宏, 山田一: 鉄心入り渦電流センサによるレール変位の検出特性, 第 21 回日本応用磁気学会学術講演概要集, 2pE-7, p. 100, 1997.
- 6) S. Watanabe, T. Mizuno, T. Takeshita, K. Kishimoto, and H. Yamada: Measurement of rail wearing depth using reluctance sensor with cut-core, Proceedings of 2nd. International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, IEEJ, AP-25, pp. 106-109, 1998.
- 7) 渡辺 誠一, 金城 智久, 水野 勉, 竹下 邦夫, 山田 一: 磁気抵抗形センサを用いたレール摩耗量の検出特性, 電気学会リニアドライブ研究会資料, LD-98-32, pp. 13-18, 1998.
- 8) 渡辺 誠一, 金城 智久, 水野 勉, 竹下 邦夫, 山田 一: レール摩耗量計測に用いる磁気抵抗形センサの出力特性, 第 22 回日本応用磁気学会学術講演概要集, 20pB-13, pp. 13-18, 1998.