

## S2-5-5. 新交通システム電車線の摩耗測定器の開発

[電] ○佐藤勇輔、[電] 島田健夫三 (鉄道総研)  
永谷勝博、角田 博 (株ゆりかもめ)

### Development of the Wear Measuring Device of Rigid Conductor Lines for New Traffic System

Yusuke Sato, Takefumi Shimada (Railway Technical Research Institute)

Katuhiro Nagaya, Hiroshi Kakuta (Yurikamome Inc.)

#### Abstract

In order to prevent aluminum in aluminum and stainless composite rigid conductor lines from wearing, stainless steel is stuck on the summit part of aluminum by pressure. Stainless steel is worn out by the contact of current collection equipment. Therefore, it is important to measure stainless thickness. This paper reports the measurement equipment which can measure stainless thickness using eddy current.

キーワード: アルサス剛体電車線、うず電流、摩耗測定器

(Aluminum and stainless composite rigid conductor lines, eddy current, wear measuring device)

#### 1. はじめに

新交通システムやモノレールに使用されているアルミ・ステンレス複合剛体電車線 (以下、電車線と称す) は、導体部であるアルミ合金の損耗を防ぐ目的でアルミ合金の頂上部にステンレスが圧着されている。そのため、車両の集電子と直接接触するステンレスの残存厚さを管理することは重要である。ステンレスの厚さを測定する方法にはノギスなどによる直接測定の他に、超音波やうず電流などを利用する方法がある。現在の摩耗測定の方法は目視による検査、ノギスや超音波による定点の摩耗測定等で、これらの方法では沿線に長く架設されている電車線の摩耗を測定するには多くの時間を要する。そこで、効率的にステンレスの残存厚さを測定でき、しかも連続測定の可能性のあるうず電流を利用した摩耗測定方式について検討した<sup>1)</sup>。本報告では、最適周波数の検討、ステンレス厚さの検出方法、および試作した摩耗測定器の検証試験について述べる。

#### 2. 周波数の検討

図 1 に電車線の断面形状を示す。電車線は、側面接触方式で、導体部であるアルミ合金の頂上部にステンレスが圧着されている。

うず電流によるステンレス厚さ測定を検討する場合、うず電流は測定対象物、周波数等により出力が変化する。そのため、測定対象物に対して出力電流が大きくなる周波数等を把握する必要がある。一般的にうず電流方式による探傷検出には、標準比較方式や自己比較方式等がある。ここでは標準比較方式を採用した。標準比較方式は空芯側コイルと検出側コイルの出力差で検出する。

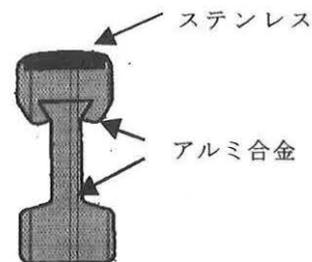


図 1 電車線の断面形状

#### 2.1 標準比較方式の等価回路

標準比較方式の等価回路を図 2 に示す。標準比較方式は図 2 に示す回路の 2 次側上部の電流 ( $I_{21}$ ) と下部の電流 ( $I_{22}$ ) の差分を出力する。上部の回路は空心状態で、下部の回路も空心の場合、2 次回路のインピーダンスは平衡している。測定対象物が下部の回路に接近する

と、電源側の周波数より測定対象物（金属）にうず電流が発生し、2 次回路の下部回路のインピーダンスが変化するため、2 次回路は不平衡となり、出力端子に出力電流  $I_2$  が流れる。図 2 の検出回路の電圧、電流、およびインピーダンスの関係は上部回路が式(1)、下部回路が式(2) で表される。

ここで、

2e : 電源電圧

$Z_1 (=R_1 + j\omega L_1)$ : 1 次側のインピーダンス

$Z_2 (=R_2 + j\omega L_2)$ : 2 次側のインピーダンス

$L_1$ : 1 次側の自己インダクタンス

$L_2$ : 2 次側の自己インダクタンス

$M_0$ : 1 次・2 次間の相互インダクタンス

$M_1$ : 1 次・金属間の相互インダクタンス

$M_2$ : 2 次・金属間の相互インダクタンス

Z: 金属のインピーダンス

$I_1$ : 1 次電流

$I_{21}$ : 2 次電流(上半分)

$I_{22}$ : 2 次電流(下半分)

$I_e$ : うず電流

とする。

また、 $M_0 = k\sqrt{L_1 L_2}$ 、 $k$  は結合係数である。

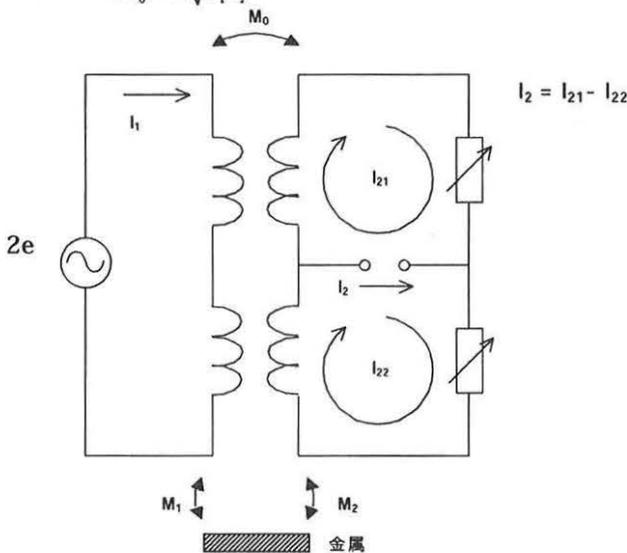


図 2 標準比較方式の等価回路

検出コイルは平型が測定時安定し、製作し易いことからコイル形状を長方形とした。そのため、 $M_1$  は細い電線からなる閉回路と閉回路の相互インダクタンスの場合を採用する。比透磁率  $\mu_s = 1$  とすると、 $M_1$  は式(3) で計算できる。さらに、1 次コイルと 2 次コイル（検出コイル）の形状と巻き数は同じであるため、 $M_1 = M_2$  とする。表 1 に計算に使用した値を示す。

$$\begin{bmatrix} e \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & -j\omega M_0 \\ -j\omega M_0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{21} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & -j\omega M_0 & -j\omega M_1 \\ -j\omega M_0 & Z_2 & -j\omega M_1 \\ -j\omega M_1 & -j\omega M_1 & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{22} \\ I_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_1 = 4 \times 10^{-7} \left\{ a \log \frac{(a+x)y}{(a+z)d} + b \log \frac{(b+y)x}{(b+z)d} + 2(z-x-y+d) \right\} \text{ [H]} \quad (3)$$

表 1 計算に使用した値

電源電圧		0.2(V)
1 次側コイル	抵抗	5 (Ω)
	インダクタンス	0.5 (mH)
2 次側コイル	抵抗	5 (Ω)
	インダクタンス	0.5 (mH)
コイル寸法	a	0.022 (m)
	b	0.01 (m)
コイル間隔	d	0.005 (m)
	x	$\sqrt{a^2 + b^2}$
	y	$\sqrt{b^2 + d^2}$
	z	$\sqrt{a^2 + b^2 + d^2}$

## 2.2 計算結果

式(1)および式(2)より求めた出力電流  $I_2$  と周波数の関係を図 3 に示す。周波数 2.5 kHz 時、出力電流が最も大きいことから、検出周波数は 2.5 kHz 付近が最適であると言える。

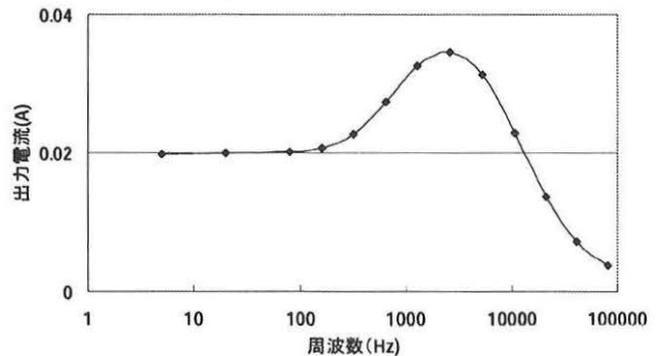


図 3 周波数と出力電流の関係

## 2.3 周波数の確認

ここでの対象物はステンレスとアルミ合金であるため、それらの出力、位相、および周波数の関係を把握する必要がある。そこで、ステンレスだけの試料（厚さ 1.5、3、4.5 mm）およびアルミ合金だけの試料の上にステンレスと同じ厚さの空隙を保持して、位相  $0^\circ$ （電源と同位相）を基準とした場合の周波数 2、3、4 kHz について、出力をそれぞれ求めた。同様に位

相を基準より  $90^\circ$  進めた場合の周波数と出力を求め<sup>2)</sup>、位相  $0^\circ$  のときの値を  $x$  座標に、 $90^\circ$  のときの値を  $y$  座標にとり、ステンレス厚さの場合、アルミ合金までの距離の場合について、それぞれ同一平面上にプロットした。これらの結果を整理すると次のようになる。

- (1) ステンレスだけの厚さと出力は、どの周波数も直線的に変化する。但し、傾きは周波数により異なる。
- (2) 周波数 1kHz 以下および周波数 5kHz 以上では、アルミ合金までの距離と出力の関係は比例関係にない。周波数 3kHz ではアルミ合金までの距離と出力の関係は比例関係にある。測定器としてはアルミ合金までの距離と出力が比例関係にあることが必要であるため、周波数は約 3kHz が適当であると考える。

### 3. ステンレス厚さの検出方法

検討対象の電車線はアルミ合金とステンレスの 2 つの金属で構成されているから、アルミ合金までの距離の出力・位相およびステンレス厚さの出力・位相について、それぞれの相関関係を把握する必要がある。そこで、2.3 項で求めた結果を、同一平面上にプロットすると、第 1 象限にアルミ合金までの距離と出力変化、第 2 象限にステンレスだけの厚さと出力変化が描ける。

電車線は固定用にステンレスボルトが使用されている。ステンレスの厚さを測定対象にするとステンレスボルトの影響により測定誤差が発生する可能性があることから、ステンレス出力に影響しない方法でステンレス厚さを測定することとした。その方法は図 4 に示すようにステンレスが最も大きくなる位相  $\alpha$  と直角な位相を検出位相とする。その位相にアルミ合金の出力を射影する。そうすると、ステンレス成分の影響が少なくアルミ合金までの距離を検出できる<sup>2)</sup>。つまり、アルミ合金までの距離を求めることはステンレスの厚さとなる。

### 4. 摩耗測定器

周波数の検討結果を基に摩耗測定器を試作し、周波数の確認、改良、および実設備で性能を検証した。

#### 4.1 摩耗測定器の周波数確認

摩耗測定器の精度を検証するために、2、3、4 kHz の周波数において、検出位相で、実際の電車線のステンレス残存厚さを人為的に加工した試料について、ステンレスの残存厚さと出力の関係を求めた。結果を整理すると次のようになる。

- (1) ステンレス残存厚さと出力電圧の関係は曲線となる。
- (2) 上記ステンレス厚さと出力の関係を曲線近似し、

その近似曲線の値と測定値のばらつきを誤差とした場合、周波数 2、3、および 4 kHz の中で 2 kHz の誤差が最も少ない。

これらのことから、周波数は 2 kHz が最適であることを検証した。また、そのときの検出位相は  $16^\circ$  であることが分かった。

#### 4.2 摩耗測定器の改良および検証試験

摩耗測定器の発信周波数を 2 kHz とし、また 4.1 項の結果に示すように、ステンレス厚さと出力の関係が曲線となるため、これが直線的に変化するようにアナログ処理機能を処理器に施した。図 5 に摩耗測定器の外観を示す。摩耗測定器は検出コイルと処理器から構成され、電池あるいは AC100V で駆動する。また、測定器の出力は 1 V/mm である。図 6 にステンレスの残存厚さと出力の関係を示す。摩耗測定器の出力はステンレスの残存厚さが 3.3 mm まで一定の傾きで変化し、3.3 mm より厚くなると傾きは小さくなるが、傾き一定で変化している。

#### 4.3 実設備での摩耗測定器の性能確認

実設備では電車線の継ぎ目部に締結ボルト等を使用しているため、測定精度の確認試験を「ゆりかもめ」の電車線を使用して行った。測定状況を図 7 に、図 7 と同箇所連続測定した波形例を図 8 に示す。これらの結果を整理すると次のようになる。

- (1) 図 8 の波形の数カ所で市販の超音波厚さ計によりステンレスの残存厚さを測定した結果、同じ値であったことから、摩耗測定器の精度と連続測定の有効性を確認できた。
- (2) ステンレス製の締結ボルト等の付属設備に関しては測定への影響がないことを確認した。

### 5. まとめ

アルミ・ステンレス複合剛体電車線のステンレスの厚さを容易に、しかも連続測定ができることを目的として試作したアルミ・ステンレス複合剛体電車線用摩耗測定器は、現場設備で測定精度を検証した結果、有効性を確認できた。したがって、実用化の見通しが得られたと考える。

#### 参考文献

- 1) 佐藤勇輔 他：うず電流方式による新交通システム電車線の摩耗測定の検討、平成 13 年電気学会産業応用部門、No.192、2001
- 2) 佐藤勇輔 他：新交通システム電車線用摩耗測定器の検討、平成 15 年電気学会全国大会論文集 No.5-241、2003.3

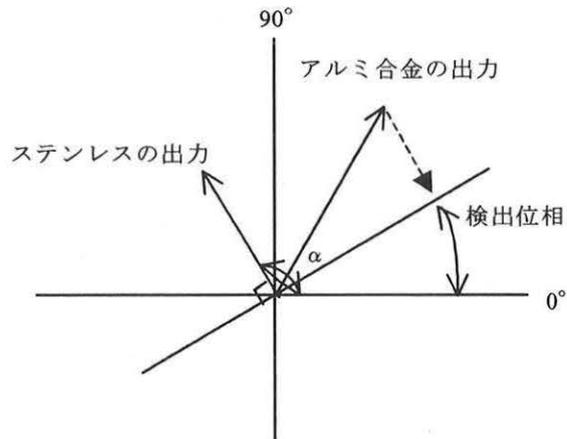


図 4 出力のベクトル図



図 5 摩耗測定器の外観

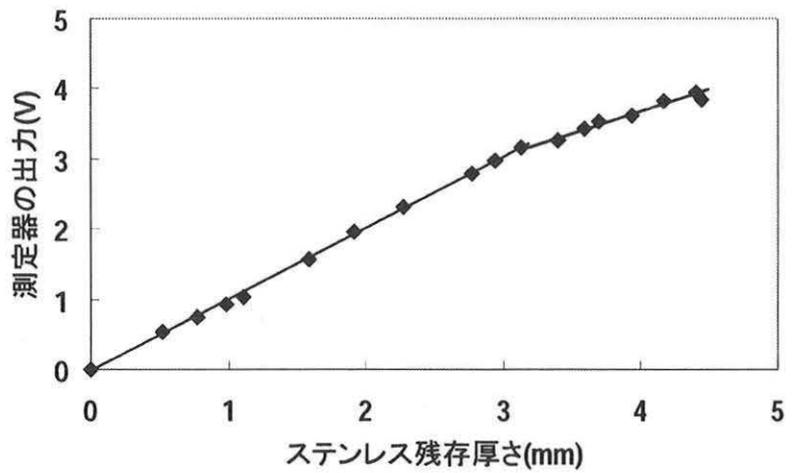


図 6 摩耗測定器の出力特性

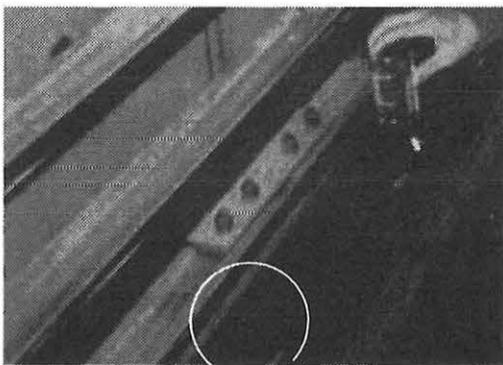


図 7 測定状況

摩耗の激しい箇所

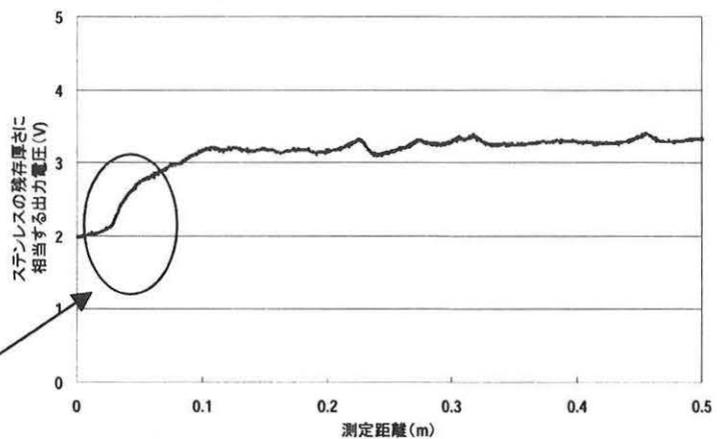


図 8 測定波形例