

# 浮上式鉄道実験線非接触集電方式

## On-board Power Supply System Utilizing Harmonic Magnetic Flux of Ground Coil for Levitation Linear Motor Car

最高速度500km/hで運転される浮上式鉄道では、車上電源を得るのに、従来のようにパンタグラフなどにより接触集電を行なうことは非常に難しい。そこで、地上コイルの発生する反作用高調波磁束に着目し、これを利用した非接触集電方式を提案した。この方式は、浮上車に集電用誘導コイル、整流装置、電力供給装置、補助蓄電池という既存技術のハードウェアを設置したものであるが、その組合せで新しい機能を生み出している。また、浮上式鉄道システムの特徴を生かし、環境上問題も少なく、高効率な方式で実用性が高い。そこで、宮崎実験線U形車に搭載可能な非接触集電装置を製作し、走行実験を行なって非接触集電方式の実用化の可能性を確認した。

岩花 武彦\* *Takehiko Iwahana*  
藤本 健\* *Tsuyoshi Fujimoto*  
佐々木拓二\*\* *Takuji Sasaki*  
高橋 宏\*\*\* *Hiroshi Takahashi*  
牧 直樹\*\*\*\* *Naoki Maki*

### 1 緒 言

環境上の問題も少なく、高効率な超高速鉄道システムとして、磁気反発浮上とリニアシンクロナスマータ推進を組み合わせた磁気浮上式鉄道の開発が、宮崎実験線で日本国有鉄道を中心に進められており、昭和54年12月には逆T形軌道により最高速度517km/hの走行試験に成功し、実用システム開発の見通しを明るいものとした。

宮崎実験線では、現在軌道形状をU形に改造し<sup>1)</sup>、新たに製作された浮上車を用いて実用化上の問題点の把握、解明を行っている。この浮上車の特徴としては、将来の実用車と同様に、車上超電導磁石の冷凍システムをもつとともに、補助機器などの車上負荷機器を数多く備えていることにある。そのため、将来の実用車の場合に備え、どのようにしてこれらの車上電源を得るかが重要な問題となる。

最高速度500km/hで浮上走行を行なう場合、従来鉄道で用いているパンタグラフなどによる接触集電は非常に困難となる。そこで、ガスタービンエンジンなどを用いた車上発電、電池、非接触集電などの各種電源方式について、実用性、技術的可能性、環境問題などに関する検討を行ってきた。

その中で、地上コイル反作用高調波磁束利用非接触集電方式(以下、「高調波集電方式」と略す。)が、磁気浮上列車に特有の方式として注目され、実車による集電試験が強く望まれてきた。

そこで、日本国有鉄道では数次にわたる原理確認等価試験を行ない、今回初めて実験線車両用非接触集電装置を開発し、日立製作所は、その詳細設計と、集電用誘導コイル、整流装置、平滑リアクトルなどの製作及び車両への饜装を担当した。

完成した非接触集電装置は、宮崎実験線U形車両に搭載され、昭和56年2月に行なわれた走行試験で当初の計画どおりの集電に成功し、その実用性を確認した。

### 2 車上動力源システムの構成条件

営業線を想定した浮上式鉄道では、1両あたりに要求される車上電源の負荷容量は、余裕を考慮して100kW程度を必要とする。また、この車上動力源システムは最高速度500km/hで運転される磁気浮上列車に使用されるため、次の条件を満た

す必要がある。

- (1) 高速浮上走行状態で使用可能なこと。
- (2) 騒音、振動、排ガス、電波障害などの環境上の問題が少ないこと。
- (3) 小形・軽量であること。
- (4) システムが単純で信頼性の高いこと。
- (5) 安全で取扱いが容易なこと。
- (6) 列車事故時にも使用可能なこと。

以上の各条件を考慮し車上電源方式を種々検討した結果、浮上式鉄道にふさわしい新技術であり、かつ環境上の問題も少なく、高効率な方式である高調波集電方式の開発を行なうこととなった。

### 3 高調波集電方式の原理及び特徴<sup>2)</sup>

図1に高調波集電方式の原理説明図を示す。地上に設置された浮上コイルが発生する空間磁束中を、車上に設置された誘導コイルが移動することにより、その高調波成分が誘導集電されるものである。

1相の浮上コイル群が発生する空間磁束密度は、

$$B = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{3} \cdot A_{2n-1} \cdot \cos(2n-1) \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot x \dots\dots\dots(1)$$

で表わされる。ここで、 $A_{2n-1}$ は定数、 $n$ は自然数、 $\tau$ はポールピッチ、 $x$ は任意の位置である。

いま、1相の浮上コイル群に正弦波電流が流れる場合、(1)式は、

$$B = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{3} \cdot A_{2n-1} \cdot \cos(2n-1) \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot x \cdot \sin \omega t \dots\dots(2)$$

と表わされる。ここで、 $\omega$ は浮上コイル電流の角周波数、 $t$ は時間である。

(2)式で表わされる一相当たりの空間磁束密度を三相分加えると次式が得られる。

$$B = \sum_{n=1}^{\infty} [A_{6n-1} \cdot \sin\{\omega t + (6n-1) \frac{\pi}{\tau} \cdot x\} + A_{6n-5} \cdot \sin\{\omega t - (6n-5) \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot x\}] \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 $A_{6n-1}$ 、 $A_{6n-5}$ は定数である。

\* 日本国有鉄道鉄道技術研究所    \*\* 日本国有鉄道車両設計事務所    \*\*\* 日立製作所日立工場    \*\*\*\* 日立製作所日立研究所

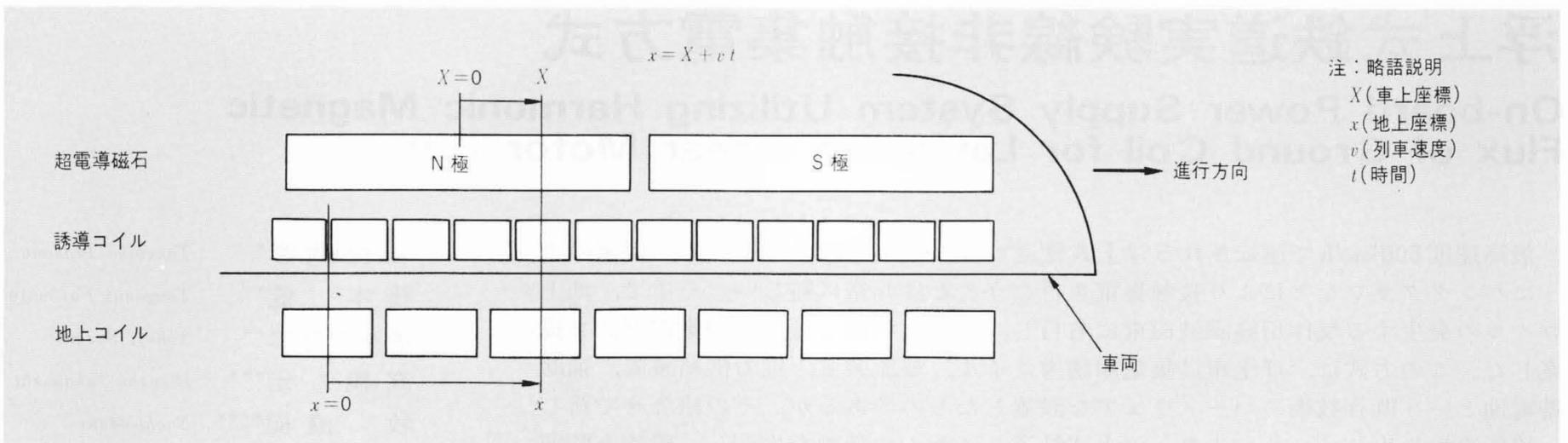


図1 原理説明図 車上超電導磁石と地上コイルの間の車両上に、集電用の誘導コイルを設ける。

(3)式は地上座標  $x$  で表わしたものであるが、これを車上座標  $X$  に変換すると  $x = X + vt$  ( $v = \frac{\tau}{\pi} \omega$  は同期速度) となり、これを(3)式に代入すると次式が得られる。

$$B = \sum_{n=1}^{\infty} [A_{6n-1} \cdot \sin\{6n\omega t + (6n-1)\frac{\pi}{\tau} \cdot X\} - A_{6n-5} \cdot \sin\{(6n-6)\omega t + (6n-5)\frac{\pi}{\tau} \cdot X\}] \dots(4)$$

したがって、誘導コイルに誘起される電圧は次式で表わされる。

$$E = -N \frac{d}{dt} \left\{ \int_{X-\frac{\lambda}{2}}^{X+\frac{\lambda}{2}} K_{2n-1} B dX \right\} \\ = \sum_{n=1}^{\infty} N v \left[ \frac{6n}{6n-1} \cdot K_{6n-1} \cdot A_{6n-1} \cdot \sin\left(\frac{6n-1}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot \lambda\right) \cdot \cos\left\{6n\omega t + (6n-1)\frac{\pi}{\tau} \cdot X\right\} - \frac{6n}{6n-1} \cdot K_{6n+1} \cdot A_{6n+1} \cdot \sin\left(\frac{6n+1}{2} \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot \lambda\right) \cdot \cos\left\{6n\omega t + (6n+1)\frac{\pi}{\tau} \cdot X\right\} \right] \dots(5)$$

ここで、 $N$ は誘導コイルの巻数、 $\lambda$ は誘導コイルの進行方向長さ、 $K_{2n-1} \cdot K_{6n-1} \cdot K_{6n+1}$ はそれぞれ  $n$ 、 $6n-1$ 、 $6n+1$ 次調波に対する誘導コイルの幅方向等価長さである。

上記のように、誘起された電圧  $E$  は列車速度により周波数、大きさがともに変わるため、実使用ではいったん直流に変換してから負荷へ供給する必要がある。そのため、回路を図2に示すように構成する。このときに得られる直流電力は次の

ようになる。

(1)  $0 \leq \frac{2X_c I_d}{\sqrt{2} V_s} \leq 0.5$  のとき (整流器転流モードは第1モード)

$$P_d = \frac{V_s^2}{2\pi X_c} \left[ \frac{9}{3+2\pi r_c} - (3+2\pi r_c) \left\{ X_d - \frac{3}{3+2\pi r_c} \right\}^2 \right] \dots(6)$$

(2)  $0.5 \leq \frac{2X_c I_d}{\sqrt{2} V_s} \leq 0.866$  (整流器転流モードは第2モード)

$$P_d = \frac{V_s^2}{2\pi X_c} \{ 3\sqrt{3}\sqrt{1-X_d^2} - 2\pi r_c X_d \} X_d \dots(7)$$

(3)  $0.866 \leq \frac{2X_c I_d}{\sqrt{2} V_s} \leq 1.115$  (整流器転流モードは第3モード)

$$P_d = \frac{V_s^2}{2\pi X_c} \{ 6\sqrt{3} - (9+2\pi r_c) X_d \} X_d \dots(8)$$

(4)  $1.115 \leq \frac{2X_c I_d}{\sqrt{2} V_s}$  (常時三相短絡)

$$P_d = 0 \dots(9)$$

ここで、 $X_c$ は相当りの誘導コイルのリアクタンス、 $r_c$ はリアクタンス  $X_c$  と抵抗  $R_c$  の比 ( $X_c/R_c$ )、 $V_s$  は三相線間電圧実効値、 $X_d$  は  $\frac{2X_c I_d}{\sqrt{2} V_s}$ 、 $I_d$  は直流電流、 $P_d$  は得られる直流電力を示す。

以上の高調波集電方式の特徴をまとめると次のようになる。

- (1) 500km/h時の高速時にも容易に集電が行なえる。
- (2) 騒音、振動、排ガスなどの問題が少ない。
- (3) 地上コイル反作用磁束に基づく、超電導コイルの交流損失が減少する。
- (4) 超電導磁石、地上コイルなどの仕様により最大集電電力が決まる。
- (5) 電圧、周波数が列車速度により変化するため、コンバータ、インバータなどの電力変換器が必要である。
- (6) 低速時に出力容量が低下するので、蓄電池などの補助電源が必要である。
- (7) ハードウェア的に新技術を必要としない。
- (8) 比較的低コストで済む。

#### 4 実験線車両用非接触集電装置

##### 4.1 概要

宮崎実験線U形車両は、将来の営業線建設時の各種の実用性試験を行なうものである。また、車両上には有人走行を行なうための各種補機や、超電導磁石の冷却機などの動力源が必要である。

そこで、実験線では走行時間が短いので車上の蓄電池により電力を供給しているが、将来の営業線での長時間走行では蓄電池だけによる電力供給は困難である。

そこで、営業線に最もふさわしいと考えられる高周波集電方式の実用化に対する問題を摘出するため、実験線車両用非

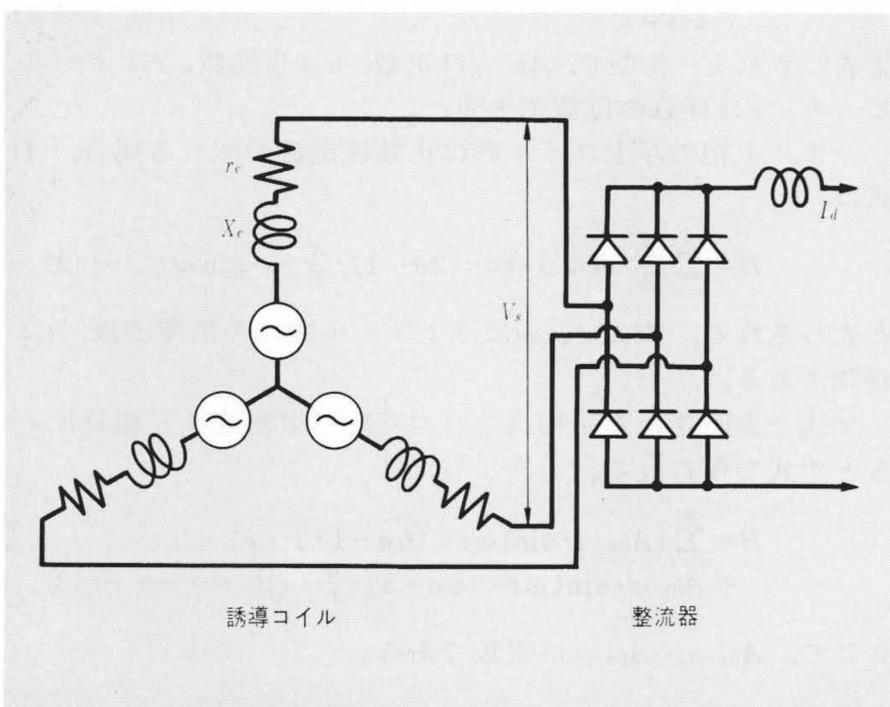


図2 誘導コイル回路 誘導コイルは三相Y結線とされ、集電された電力は直流に変換される。

接触集電装置を開発し、各種の試験を行なうこととなった。

図3に非接触集電装置の回路構成を、図4にその機器配置概要を示す。

図4から分かるように、集電用誘導コイルは車両下面の両側に取り付けられ、整流器、平滑リアクトル及び負荷抵抗器は車内に設置されている。

#### 4.2 集電用誘導コイル

集電用誘導コイルは、地上コイルの反作用高調波磁束を集電するためのもので、地上コイルと対向して設置する必要がある。そのため、車体下面に露出して艤装され、風雨にさらされての使用を考慮する必要がある。また、集電用誘導コイルを取り付けることで車両の浮上走行上支障を来すことがな

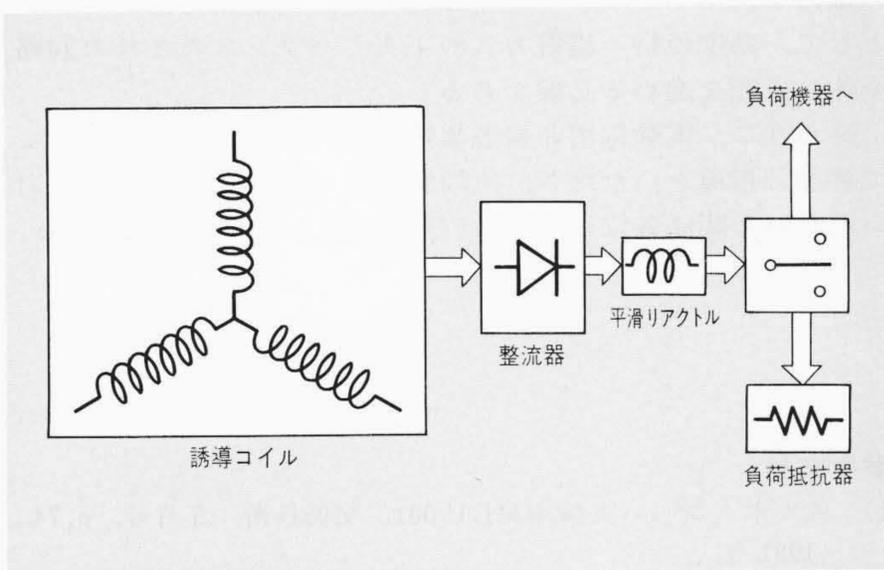


図3 非接触集電装置の回路構成 誘導コイルから集電された電力は、整流器、平滑リアクトルにより直流に変換され、試験用の負荷抵抗器、又は車上の各負荷機器へ供給される。

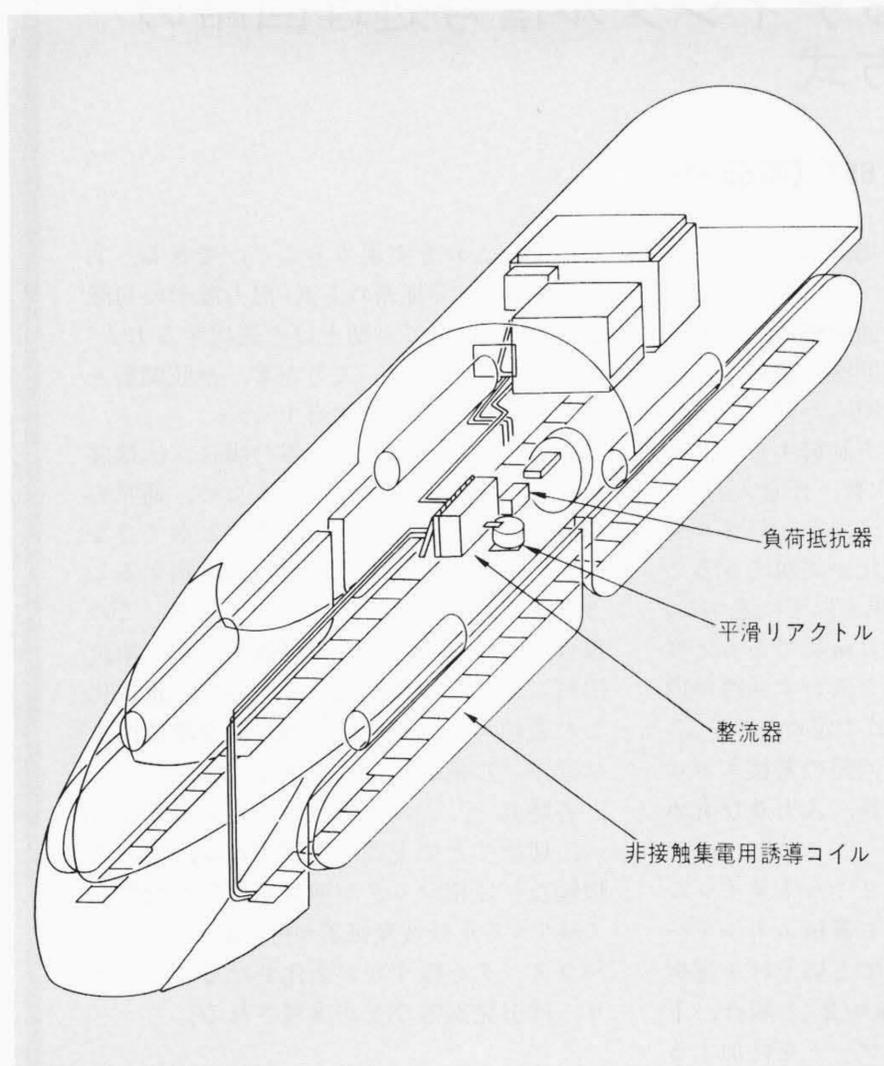


図4 機器配置概要図 誘導コイルは車体下面の両側に設置されており、集電された電力は車内の各機器へ供給される。

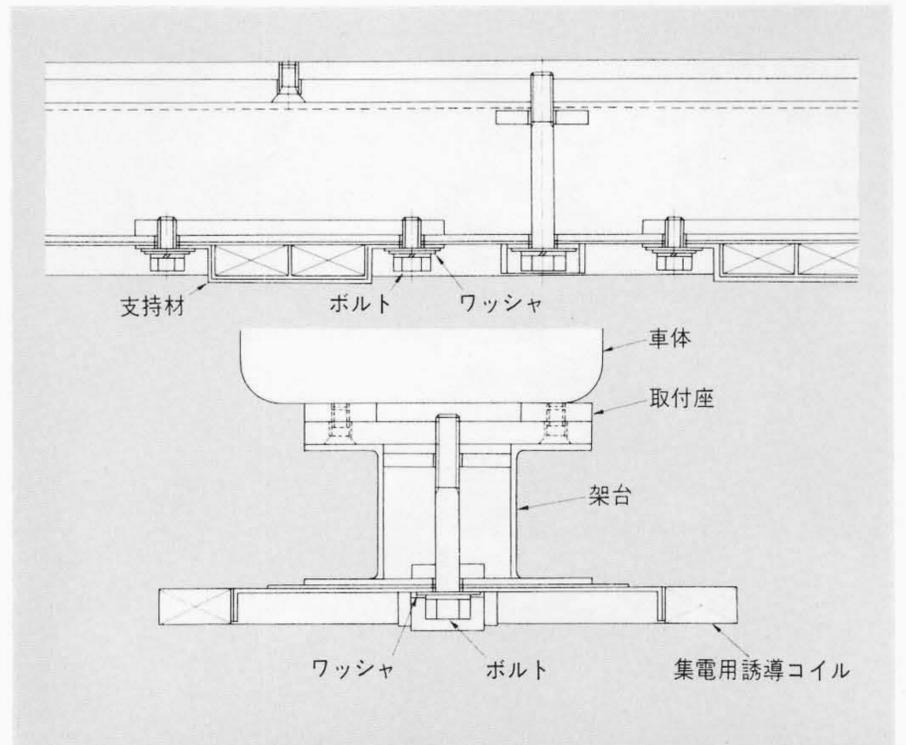


図5 集電用誘導コイル取付図 集電用誘導コイルは15個が一つの架台に取り付けられ、車体には架台ごと取り付ける。

く、集電試験を行なわないときは車体から取り外せる構造にする必要がある。その他、集電用誘導コイル製作上考慮した点をまとめると次のようになる。

- (1) コイル艤装時にコイル自体に外力が加わらないこと。
- (2) 雨天でも使用可能なこと。
- (3) 極力軽量にすること。
- (4) 取付け、取外しが安易なこと。
- (5) 電磁力、振動加速度に十分耐えること。
- (6) 使用する金属はすべて非磁性材とし、コイル周囲で電気的ループを形成しないこと。
- (7) 車両限界、車体各部の機器と干渉しないこと。

以上の各条件と、集電用誘導コイルの主要諸元から、コイルの艤装法を図5に示すように決定した。

集電用誘導コイルは15個ずつアルミ合金製の架台に取り付けておき、架台ごと車体へ取り付ける構造となっている。

集電用誘導コイルの架台への取付けは、電氣的に絶縁したSUS製のクリート及びボルトを用い、コイルと架台、クリート間を充填材と硬化性ワニスで完全に固定し、電磁力、振動及び加速度に対し十分な強度をもたせた。

各集電用誘導コイル口出端子は防水処理を施し、車体取付け時に各架台間の配線に防水構造の端子箱を用いた。

図6に集電用誘導コイルの完成写真を示す。

#### 4.3 整流器、平滑リアクトル

整流器、平滑リアクトルは、集電した交流電力を直流に変換するために用いており、実験線での使用条件を考慮して軽量化を図っている。

また、整流器には各種計測用センサが集中して取り付けてあり、計測時の配線の簡略化を考慮している。

#### 4.4 走行試験

実験線車両用非接触集電装置を用い、宮崎実験線で昭和56年2月に集電試験が行なわれた。その結果、ほぼ当初の計画どおりの集電に成功し、今後の実用化上非常に明るい見通しを得ることができた。

現在は軌道長さが4kmと短いため、低速走行による集電試験しか行なっていないが、今後軌道長さの延長に伴い、高速

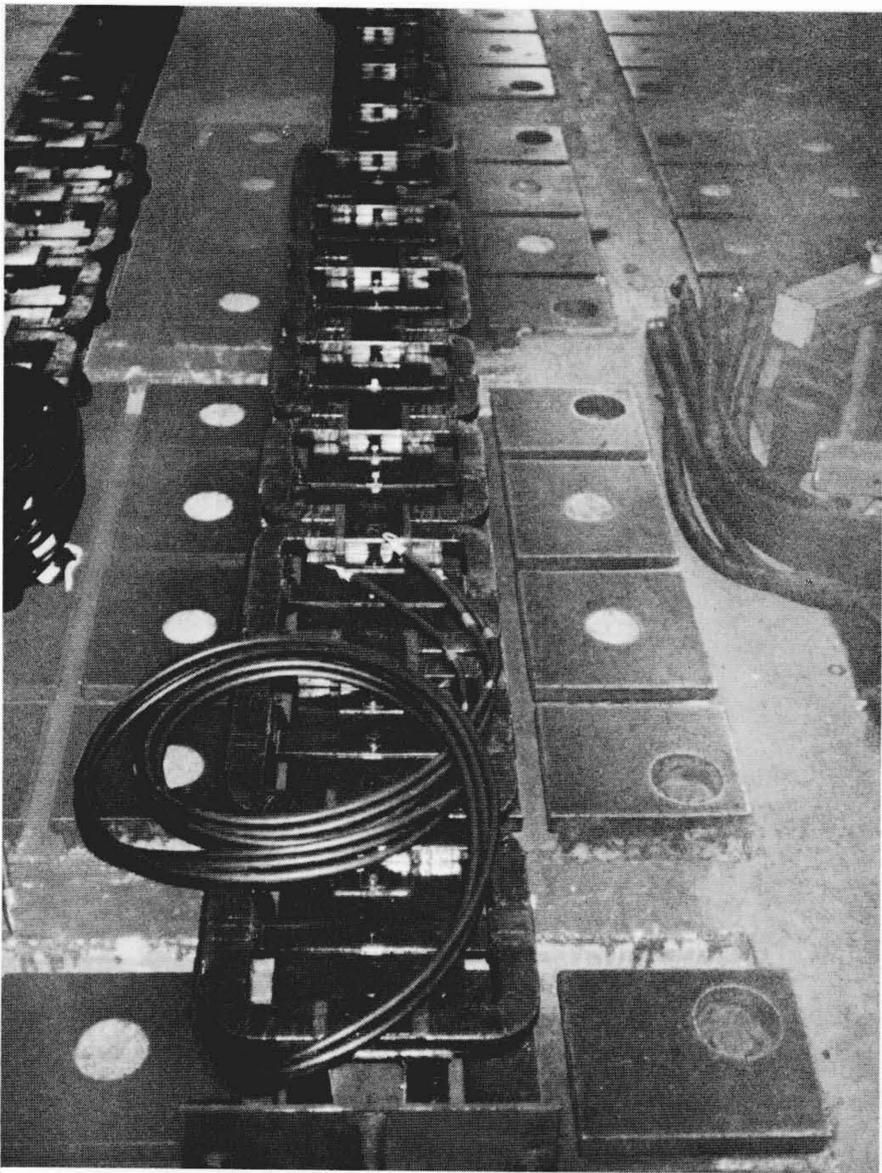


図6 誘導コイル完成写真 誘導コイルは、15個を一つのブロックとして車体へ取り付ける。

時での集電試験を行ない、より実用性の高い非接触集電装置の開発を進める予定である。

## 5 結 言

以上、地上コイルの反作用高調波磁束を利用する非接触集電方式の原理、特徴、機器構成及び試験結果について述べた。浮上走行する浮上式鉄道で、非接触で集電するという課題に対し、超電導磁石と地上コイル間の反作用磁束を利用する点に着目し、原理を検証する基礎実験を経て、走行実験により計画どおりの集電に成功した。このことは将来の実用化に対し一つの技術的難問を解決したことになる。

しかし、現在高調波集電方式は開発段階途上であり、今後は要求される電力を、低速時から高速時まで均等かつ高品質の電力を供給できるようにするために、車上動力源システムとして、効率の良い集電方式の工夫とバランスのとれた回路全体の研究を進める必要がある。

終わりに、実験線用非接触集電装置の設計、製作に当たって終始御指導をいただき、宮崎実験線での走行実験に御協力いただいた関係各位に対し深く感謝の意を表わす次第である。

## 参考文献

- 1) 佐々木：新しい実験車MLU 001，交通技術，3月号，p.74 (1981-3)
- 2) 牧，外：地上コイル磁束利用車上電源システムとその特性，電気学会論文誌，101巻，B分冊1号，p.33 (1981-1)

## 論文抄録

# 時間領域におけるデジタル信号処理回路の丸め雑音の制御方式

日立製作所 宮田昌近

電子通信学会誌 63A-10, 657 (昭55-10)

デジタルフィルタ、デジタル変復調器、デジタル発振器などのいわゆるデジタル信号処理回路では、演算結果の丸めによって生ずる丸め雑音が問題となる。特に、演算結果が量子化ステップ幅と同程度に小さいときは、丸め雑音の自己相関や入力と丸め雑音の相互相関が強くなり、信号対雑音電力比や伝達関数の周波数特性が著しく劣化する。

極端な例として、デジタルフィルタの零入力リミットサイクルがある。これは、入力が零になっても、量子化ステップ幅の数倍の振幅をもった周期波形が出力に現われるという現象であり、本来線形であるべきフィルタが、粗い近似でさえ線形とみなすことができない状態で動作している。

微小信号時の強い非線形現象による特性劣化の一つの対策として、回路の内部状態に応じて切捨てと切上げを切り換える方式が提案されているが、その特性は定数入力の共振回路に対するリミットサイクルの抑

制という、極めて特殊な場合にしか明らかにされていない。

本論文では、一般的な回路構成、一般的な入力の場合について、回路の蓄積エネルギーと丸め雑音の関係を明らかにし、これによって切捨てと切上げを制御すれば、デジタルフィルタ(任意次数、任意入力)のリミットサイクルの抑制や、デジタル発振器(任意周波数)の安定化が実現できることを示している。主要な成果を以下に述べる。

伝達関数の分母多項式は $m$ 次であるとすると、過去の入力の影響を表わす回路の内部状態は、 $m-1$ 次の多項式で定められる。これを状態多項式と呼ぶ。回路の蓄積エネルギーは、状態多項式の係数、入力及び丸め雑音の二次形式となる。

デジタルフィルタのリミットサイクルを抑制するには、各時刻で蓄積エネルギーが減少するように、切捨てと切上げを選択すればよい。共振回路( $m=2$ )の場合、1個の係数乗算器と若干のゲートを付加する

だけで、これを実現することができる。共振回路に対する従来の方式(出力波形の勾配に応じて、切捨てと切上げを選択する方式)は、上記の方式で、入力を零、余弦関数を1で近似することに相当する。

デジタル正弦波発振器の場合、伝達関数の極が単位円上に存在するため、通常の構成では安定した出力を得ることができないが、切捨てと切上げを適当に選択することにより、安定化することができる。この場合、蓄積エネルギーは発散するが、単位円内に極をもつ共振回路について、正規化した蓄積エネルギーを求め、極を単位円上に近づけた極限值は収束する。

各時刻で、この極限性が一定になるように、切捨てと切上げを選択すれば、出力の振幅及び位相ジッタが演算語長に反比例して減少する正弦波発振器が得られる。また、パラメータを緩やかに変化させることにより、掃引発振器などが実現される。