

# 列車の安全運行を支える情報伝送

福田 光芳  
信号通信技術研究部  
(信号 主任研究員)

新井 英樹  
同  
(同 主任研究員)



## はじめに

列車を安全に運行させるための設備として信号設備があります。列車は信号機やATS(自動列車停止装置), ATC(自動列車制御装置)などの指示に従って走行します。この指示は全て様々な情報伝送によって行われます。

信号設備に関連する情報伝送は様々な種類があります。例えば、信号機も色によって進行の可否や許容速度の情報を伝えており、これも情報伝送の一種になりますし、地上設備の装置間の接続も情報伝送で行われます。ここでは、鉄道信号の分野で特徴的な情報伝送として、レールを用いた情報伝送と地上子とよばれる装置を用いた情報伝送についてお話しします。

## レールを用いた列車在線の判定

冒頭でお話しした信号機に信号を現示するには、列車の有無などの情報が必要です。特定区間の列車の有無を判別するために、軌道回路が用いられています。図1のように、軌道回路はレールに電流を流し、その電流が受信器に届いた場合に「列車無し」と判定します。列車が在線する場合は、輪軸によって左右レールが短絡され、電流が受信器に届かなくなるために、「列車有り」と判定できます。受信器では電流の有無で2つの情報が得られることになります。

また、受信器として2元3位式のリレーを用いると

3つの情報を伝送することが可能になります。2元3位式のリレーとは、2種類の電源(2元)を用いてリレーを動作させ、リレーの状態が3種類(3位)に変化するというものです。レールに流す電源の極性を反転させることにより、通常の極性のON, 反転させたON, さらにOFFの3種類の情報が得られます。この仕組みを図2のように駅間の信号機制御に適用すると、信号機間にケーブルなどの伝送路を設けることなく、3現示の制御が可能になります。

## レールによる車上への情報伝送

軌道回路の電流によって列車の有無や前方区間の情報を伝送できることを説明しましたが、車両にレールに流れている電流を検知するアンテナを取り付けることにより、地上から車上への情報伝送が出来るようになります。このアンテナは受電器と呼ばれ、図3のような形をしています。

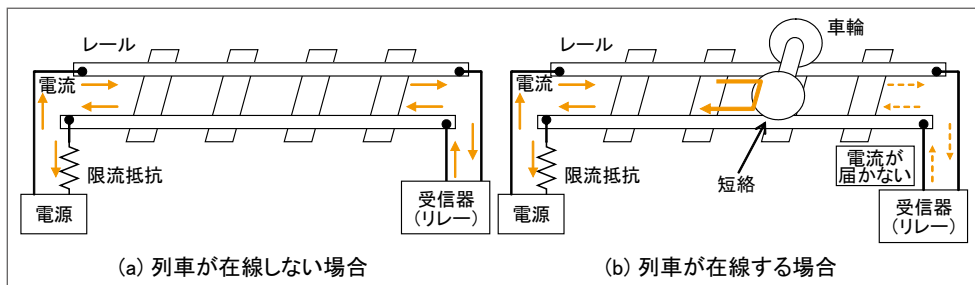


図1 軌道回路による列車在線の判定

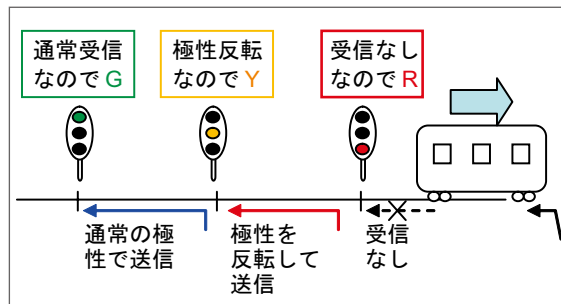


図2 3現示のイメージ



図3 受電器の写真(単体)

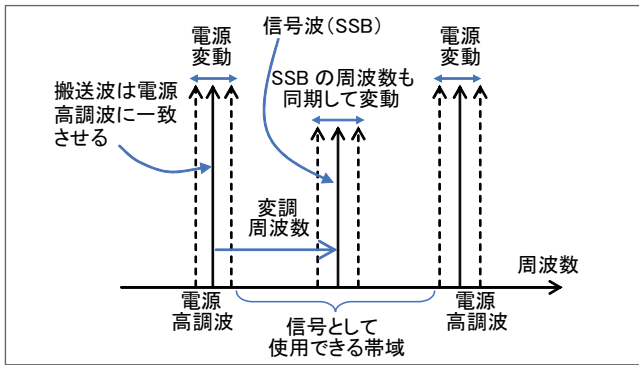


図4 電源同期SSB方式

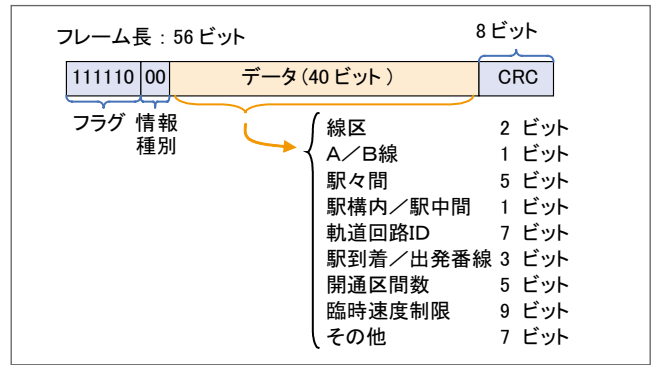


図6 伝送フォーマットの例

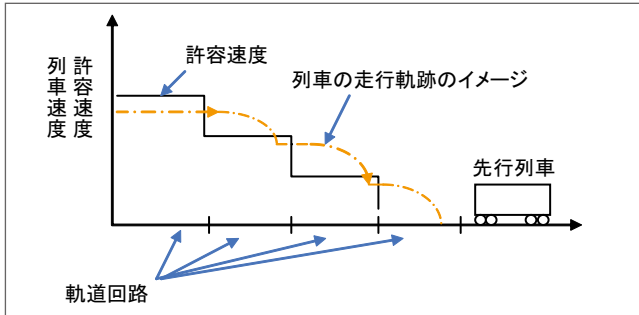


図5 階段状の許容速度によるATCの制御

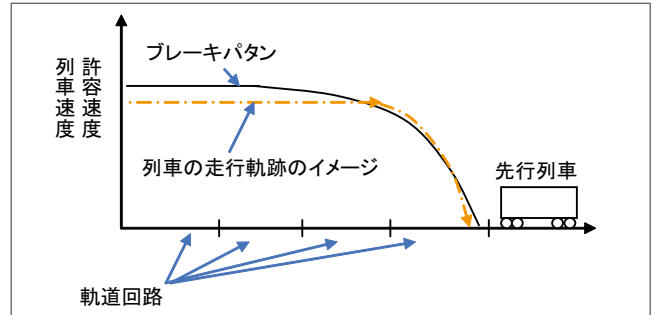


図7 車上に制御主体を持つATCの制御イメージ

この受電器は、先頭台車より前の位置で、左右のレールの上に位置するように取り付けられています。

地上から車上への情報伝送は、当初、軌道回路の電流を瞬間的にOFFにして1つの条件を伝達する程度でしたが、その後、東海道新幹線で電源同期SSB (Single Side Band) 方式と呼ばれるAM変調の一種が採用され、本格的な情報伝送が行われるようになりました。SSB方式は、図4のようにAM変調で発生する側帯波のうちの片方の側帯波だけを伝送する方式であり、少ない電力で情報を伝送できる特徴があります。搬送波との離隔が変調周波数に相当し、複数の変調周波数にそれぞれ情報(速度信号など)を割り当てます。

新幹線のような交流電気鉄道では、電源高調波が大きいいため、電源高調波の間の帯域を利用して伝送を行います。電源の周波数が変動すると、電源高調波の周波数も変動してしまうため、この変化を見込むと利用できる帯域が狭くなってしまいます。より広い帯域を確保するために適用されたのが電源同期方式であり、電源の周波数変動に合わせて軌道回路に流す電流の周波数も変動させます。車上の受信器では、パンタグラフから得られる電源周波数を用いて基準となる搬送波周波数を作り出し、復調を行うことにより、正確に情報を受け取ることが出来ます。

類似の技術として、在来線のATC等でAM変調(断続波)による情報伝送が実用化されています。

これらのAM変調方式(SSBも含む)で実現されたATCの制御を図5に示します。『xx km/h を yy Hz』のように許容速度を変調周波数に割り当て、階段状の許容速度に応じて制御されます。

その後、MSK変調方式のデジタル伝送の研究開発が進められました。現在では新しく導入される方式のほとんどがMSK変調方式になっています。AM変調方式(断続波、SSBなど)では、変調周波数に情報を割り当てていたため、10種類程度に情報が限定されていましたが、MSK変調方式の導入により、10~100bit程度まで情報量を増やすことができるようになりました。MSK変調方式は、FSK変調方式の一つで、特定の条件を満たす場合にMSK変調と呼ばれています。FSK変調方式の伝送の仕組みは次のようになります。中心となる周波数 $f_0$ (搬送波周波数)に対して偏移させる周波数 $\Delta f$ を決め、 $f_0 + \Delta f$ と $f_0 - \Delta f$ を切替えて送信するものです。それぞれの周波数に"0", "1"などの情報を割り当て、01010111...というようなデジタル電文を伝送します。電文フォーマットの例を図6に示します。車上に制御主体をもつ方式のデジタルATCでは、これらの情報から停止すべき位置までの距離とブレーキを動作させる速度の関係(ブレーキパターン)を作成し、許容速度がブレーキパターンを超過した場合にブレーキを動作させます(図7)。

伝送速度は、確保できる帯域幅にも依りますが、これま

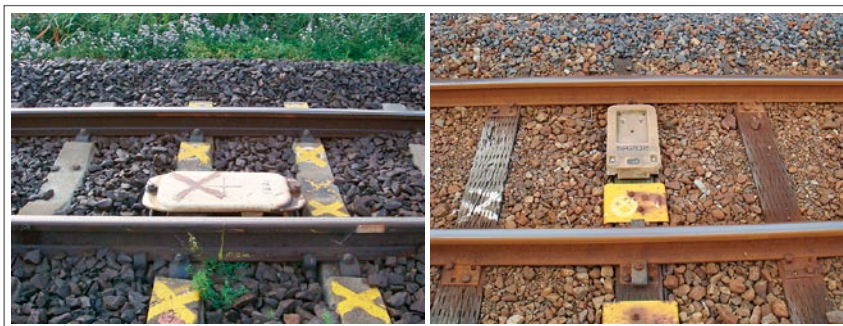


図8 地上子の写真

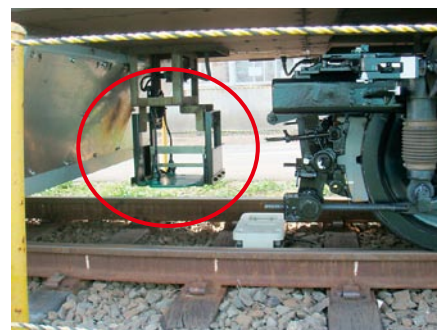


図9 車上子の写真

で開発されたシステムでは20～300bps程度になっていません。AM変調方式の場合と比べると格段に情報量が増えてはいますが、一般の伝送技術と比べると非常に小さい伝送速度です。これは、レールの電気的特性で高い周波数の電流を通しにくいこと、電車や変電所から流れる電流に含まれている様々な周波数成分(ノイズ)によって、十分な帯域幅が確保しにくいからです。

### 地上子を用いた情報伝送

地上-車上間の情報伝送手段には、先に述べた新幹線や在来線のATCのように、レールを用いた伝送もありますが、現在使用されているATSの大部分では、レール間に設置される地上子と呼ばれるコイルと先頭車両の床下に設置される車上子と呼ばれるアンテナを用いて、情報伝送を行っています。図8に地上子の写真を、図9に先頭車両の床下に取り付けられている車上子の写真を示します。

ここで、レールを介して地上-車上間の情報伝送を行うATSを連続制御式と言い、地上子と車上子を用いて情報伝送を行うATSを点制御式と言います。よって、現在使用されているATSの大部分は、点制御式のATSということになります。

点制御式のATSでは、信号機や曲線等の速度制限区間の手前の1箇所あるいは複数箇所に地上子を設置します。車両がそれらの地上子上を通過した際に、地上子から送信されている情報を車上子で受信します。このように、地上子と車上子が電氣的に結合している瞬間で、情報伝送を行っています。つまり、点制御式のATSにおける地上-車上間の情報伝送は、間欠的に行われ、車上では次の地上子を通過するまで新たな情報を受信することができません。また、車両が高速で通過した場合でも、地上子からの情報を正常に受信する必要があります。このため、車両が通過する最高速度と地上-車上間の情報伝送の際に必要な時間(情報を確定するのに要する時間や伝送しなければならぬ情報量、伝送速度に応じて決まる時間)を考慮して、

車上子と地上子が電氣的に結合できるエリアが決められています。このエリアのことを「応動範囲(応動距離)」と言い、地上子と車上子を用いた情報伝送を行う上で、重要な指標となります。さらに、保安にかかわる情報を伝送するため、十分なS/N比が確保された伝送ができる条件での応動範囲であることが重要となります。一般に、地上子と車上子を用いた情報伝送では、応動範囲として、300～400mm以上が確保されています。

### アナログ情報に基づく制御

点制御式のATSでは、車上子と地上子間で情報伝送を行っていることを述べましたが、伝送できる情報として見た場合、アナログ情報を伝送するATSとデジタル情報を伝送するATSの大きく2つに分けることができます。

地上子から車上子へアナログ情報を伝送しているATSは、現在、JRや民鉄の在来線の大部分で使用されています。地上子からは、単一の周波数信号(60～150kHzの帯域を使用)が送信されており、車上子でそれを受信し、車上装置でどの周波数かを識別します。さらに、受信した周波数に応じて、所定の制御がなされます。

例えば、JR在来線の大部分の線区に導入されているATSでは、図10に示すように、停止信号機に付随する地上子から130kHzの周波数信号が送信されます。これを車上子で受信することにより、運転士に対して前方信号機が停止現示であることの警報が出力されます。さらに、警報後5秒以内に運転士による確認扱いが行われなかった場合には、自動的に非常ブレーキが動作する機能を有しています。また、130kHzの周波数信号に停止信号機接近警報の役割を持たせているほか、123kHzの周波数信号には、即時非常停止機能、108.5kHzの周波数信号には、速度制限機能を割り当てています。速度制限機能とは、図11に示すように、曲線区間手前などに108.5kHzの周波数信号を送信する地上子を2個1組で設置し、列車がそこを通過する際、車上で通過時間を計測します。通過時間が、車上タ

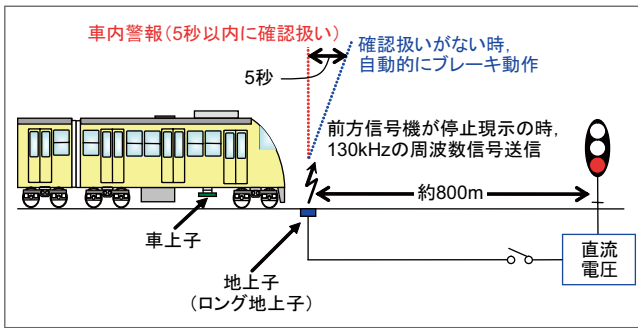


図10 アナログ情報伝送による停止信号機接近警報

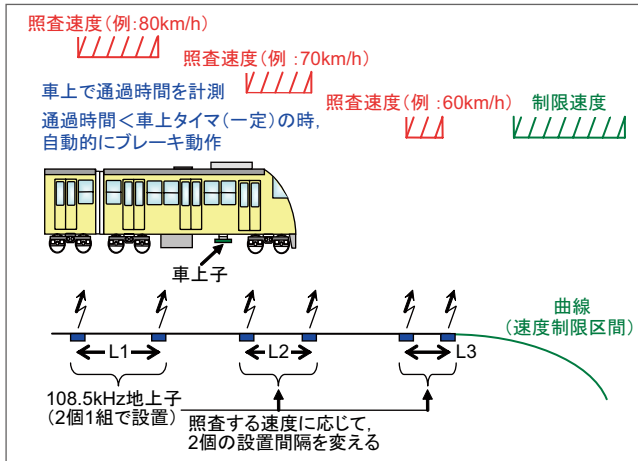


図11 アナログ情報伝送による速度制限

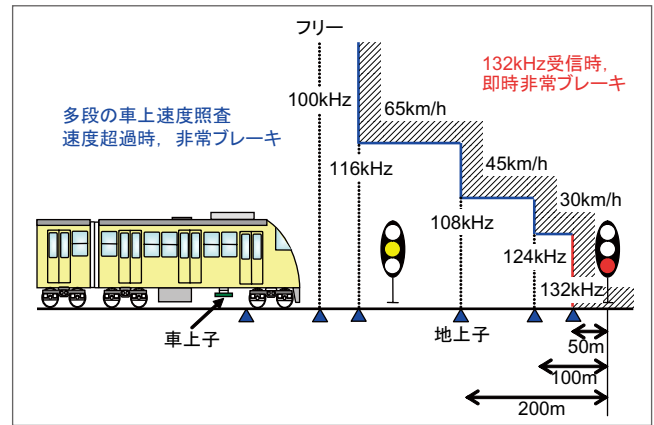


図12 アナログ情報伝送による車上速度照査

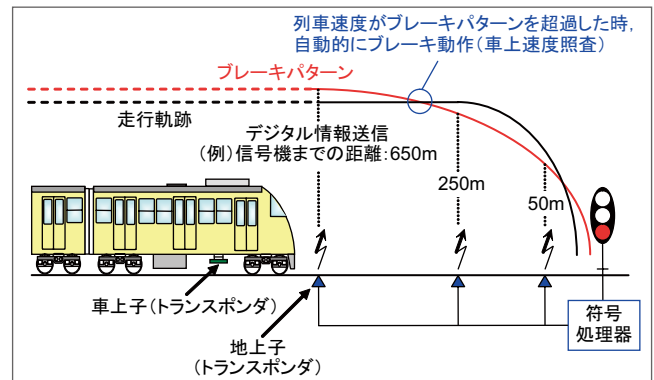


図13 デジタル情報伝送による車上速度照査

イマ(予め設定した標準時間)より短かった場合には、制限速度超過と見なし、自動的にブレーキを動作させます。2個の地上子の設置間隔を変えることで、照査する速度を変えることができます。

また、民鉄で多く用いられているATSでは、図12に示すように、信号機手前の複数箇所に設置された地上子より、複数の周波数信号を切り替えて送信するものもあります。周波数信号毎に列車の走行許容速度を割り当てることにより、車上で階段状の速度照査を実施しています。例えば、地上子より116kHzの周波数信号を受信した後に、列車速度が65km/hを超えた場合には、自動的にブレーキを動作させるといった具合です。

### デジタル情報に基づく制御

JR東日本やJR西日本の大都市通勤圏線区には、デジタル情報を伝送するATSが導入されています。図13に示すように、地上子(トランスポンダと呼ばれる伝送装置)より、停止信号機までの距離をデジタル情報として車上に伝送し、車上ではこの情報に基づき、自列車のブレーキ性能に応じたブレーキパターンを作成します。列車速度が、ブレーキパターンを超過した場合には、自動的にブレーキを動作さ

せます。同様に、曲線区間手前に地上子を設置し、車上速度照査に必要なデジタル情報を車上に伝送することにより、速度制限区間での速度超過を防ぐことができます。

デジタル情報伝送の仕組みについては、先にも述べられていますが、ATSでの伝送仕様としては、地上子から車上子に対する情報伝送では、搬送波周波数が1708kHz、偏移周波数が±32kHz、伝送速度が48kbpsのFSK変調波を用いています。また、車上子から地上子への情報伝送機能も持っており、搬送波周波数が3000kHz、偏移周波数が±32kHz、伝送速度が48kbpsのFSK変調波を用いて、列車番号等を伝送しています。デジタル情報伝送では、アナログ情報伝送と異なり、伝送できる情報量が格段に多くなるため、車上において、きめ細やかな制御が実現できます。

### おわりに

ここでは、列車の安全運行を支える信号設備での情報伝送について紹介しました。伝送される情報は、安全に直結していますので、「正確に伝わる」だけでなく、「誤って伝わらない」ことが求められます。そのため、信号設備での情報伝送では、耐ノイズ性に十分な配慮がなされています。[RRR]