

鉄道沿線での簡易な無線通信システム構築手法の実験的評価

関 清隆*

Experimental Evaluation of Simple Construction Method for Radio Networks along Railway Lines

Kiyotaka SEKI

When we need to grasp situations of disasters or accidents which have happened or how existent telecommunications equipments are damaged, it is required to construct temporal telecommunications networks along railway lines easily even if they do not have enough quality. As ad hoc network technology is thought to be suitable for this purpose, we measured its transmission characteristics in the premise of our Institute and indicated that it has a possibility to be used for tentative radio networks which are more easily constructible than wireless local area networks and have faster transmission speed than cellular phones.

キーワード：無線通信，通信ネットワーク，アドホックネットワーク，沿線通信システム

1. はじめに

列車無線をはじめとする鉄道の通信システムは鉄道の運行を支える通信インフラであり、カバーエリア、サービス品質等の要求仕様を満たすよう、綿密な設計を行った上で、無線基地局、交換機、それらを接続する有線伝送路等の固定設備を配置してきている。そのため、一旦システムの導入が完了した後は長期間にわたって所望の通信品質を確保することができる反面、稼働開始までに要する時間やコストがきわめて大きなものになる。これに対して、災害時や事故時等に現場の状況を把握する場合や、破壊された通信設備を本格的に復旧するまで臨時通信回線を構成する場合等、十分な通信品質は保証されなくても簡便に臨時通信回線を鉄道沿線に構築したい場合がある。このような要求に応える技術として、近年アドホックネットワークと呼ばれる通信技術が登場してきており、規格化や製品化が進んでいる。

本稿では、アドホックネットワーク技術の概要を述べた後、鉄道沿線通信システムを想定した伝送特性を実験的に評価した結果を報告する。

2. アドホックネットワークの概要

2.1 アドホックネットワークの特徴

アドホックネットワークとは、通信インフラに依存せず通信端末のみが集まることによって構成されるネット

ワーク¹⁾であるというのが元々の意味であり、通信インフラのない場所での通信を可能とすることを目的としている。そのため、伝送路としては主に無線媒体が想定され、直接無線が届かない端末間でも通信を可能とするために、中間にいる他の端末を中継装置として利用する機能(マルチホップ通信機能)が必須機能とされている。マルチホップ通信を実現するためには、端末が移動して端末間の伝送特性に変化が生じた場合も含めて、自動的に通信相手となる端末までの伝送経路を発見する機能や、伝送経路にしたがってデータを中継する機能が、各端末に必要となる。最近では、マルチホップ機能をもつネットワークのことを、一部に有線伝送路や無線LANアクセスポイントのような固定的な設備を含んでもアドホックネットワークと呼ぶことが多い。

アドホックネットワークの特徴を生かす応用場面としては、下記のようなものが考えられている。

- 災害現場等の通信インフラが破壊された地域や元々通信インフラが存在しない地域で構築する臨時ネットワーク
- 自動車や歩行者がお互いに位置情報等を交換することで交通事故の減少を目指す、自動車相互間や自動車～歩行者間の通信
- 分散配置した多数のセンサからセンシングデータを収集して、状況の把握や機器の制御を行うセンサネットワーク
- 複数の迂回経路を持ち、伝送路の異常時には自動的に通信経路を再構成する可用性の高いネットワーク

* 信号通信技術研究部（通信）

特集：信号通信技術

2.2 アドホックネットワークの技術動向

2.2.1 標準化

アドホックネットワークを実現するための通信プロトコルはネットワーク層の機能と位置づけることができ、その標準化はインターネット技術の標準化団体であるIETF (Internet Engineering Task Force) で行われている。

IETF 中の MANET (Mobile Ad-hoc Networks) グループでは、通信経路の構成法に関する検討を続けてきており、現在は、OLSRv2 (Optimized Link State Routing version 2) と DYMO (Dynamic MANET On Demand) という2方式の標準化を進めている。一方 IETF 内の autoconf (Ad-hoc Network Autoconfiguration) グループでは、ノードへのアドレスの割当方法や重複検出、MANET とインターネットの接続方法等を検討している。

2.2.2 実装例

伝送媒体として無線 LAN (IEEE802.11g) を用い、DYMO の元となった AODV (Ad-hoc on-demand Distance Vector) プロトコルをその上で動作させることによりアドホックネットワークを構成する基板が販売されている。この基板を用いたルータ (メッシュルータ) (図1(a)) は、パソコン等の機器やインターネットと接続するための有線 LAN (100BASE-T) インタフェースと無線 LAN (IEEE802.11b/g) アクセスポイント機能を持っている。

また、IPカメラで撮影した画像やセンサ情報等を上記のアドホックネットワーク基板を用いて送信する、フィールドサーバーという装置がある。これは、独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構中央農業総合研究センターが作物の生育状況の監視等を行うために開発したもので、実験用機器が市販されている (図1(b))。



(a)メッシュルータ (b)フィールドサーバー
図1 市販機器の例

一方、デジタルディバイドの解消、ユビキタスサービスの実現、安全・安心な社会の構築等を目標とした実証実験が各地で進められており、そのための実験的な実装が行われている。なお、アメリカではメッシュ型無線 LAN を用いた自治体によるブロードバンドサービスが実

現されている。

3. アドホックネットワークを応用した鉄道沿線通信システム

アドホックネットワークの鉄道への応用例として筆者らはこれまでに、保守作業時の情報交換システムや沿線諸設備の情報収集システム等²⁾を提案してきた。前者は移動体端末間の無線通信を実現するシステムであり、後者は固定的な通信インフラに移動体がアクセスするシステムである。本稿ではさらに、沿線ネットワークに冗長性をもたせて可用性を向上させるシステムと、駅中間と最寄駅間で臨時に通信回線を構成するシステムへの応用を述べる。

3.1 冗長性をもたせた沿線通信システム

通常の固定通信システムでは、端末や中継装置等の通信ノード間の接続は固定的であるため、通信ノードに障害が発生した場合や通信ノードの増設を行う場合には機器ごとに接続相手等のパラメータを設定する必要があった。アドホックネットワークでは、通信ノード間の経路は自動的に構成されるので、自分自身のアドレス等最低限の設定をしておくだけで、機器の交換や故障時には迂回経路が構成される。このため、可用性や保守性の高い通信ネットワークを構成できる可能性がある。また、ノードが無線 LAN アクセスポイント機能を持てば、移動端末も収容可能である。システムの概念図を図2に示す。

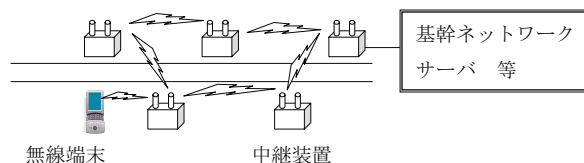


図2 冗長性をもたせた沿線通信システムの概念図

3.2 駅中間における臨時の通信回線構成

沿線での作業時に、作業員間だけでなく駅や指令等との間で情報交換を行う場合や、事故現場等に臨時にカメラ等を仮設し指令等で情報を収集する場合に、最寄り駅等の既設の通信回線が利用できる場所までの臨時通信回線を構成する目的でアドホックネットワークを活用することが考えられる。このような構成は、既存の無線 LAN のアクセスポイントを複数台配置して中継を行わせることによっても実現は可能であるが、無線 LAN の場合には各アクセスポイントに隣接アクセスポイントのアドレスを設定しなければならないため、事前にある程度の配置計画を検討する必要があり、また作業の移動に伴って通信エリアを変更する場合には設定の変更を要した。アドホックネットワークの場合には、これらの作業は不要

になり、作業効率の向上やネットワーク構築の柔軟性の向上が期待できる。システムの概念図を図3に示す。

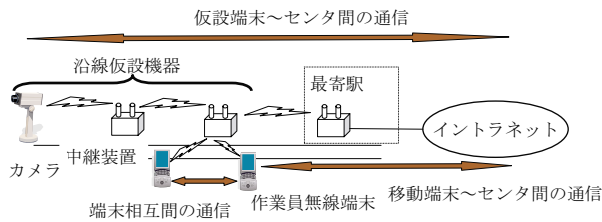


図3 臨時沿線通信システムの概念図

4. 沿線通信システムを想定した実験

鉄道沿線へのアドホックネットワークの適用を想定した所内実験を行い、性能を評価した。実験に使用した機器は、2章で述べたメッシュルータ及びフィールドサーバーである。

4.1 メッシュルータの基本性能

4.1.1 メッシュルータの設定項目と起動時間

メッシュルータは、自身のIPアドレスや無線チャンネル等の無線LANとしての基本的な設定を行うだけで、お互いを認識してアドホックネットワークを構成した。

メッシュルータの電源を投入してからネットワーク構成までに要する時間はおおむね1分程度であった。これにはメッシュルータのOS (Linux) 起動時間や隣接メッシュルータまでの経路発見時間を含んでいる。

4.1.2 ノード移動に伴う通信経路の自動再構成

3台のメッシュルータMR1～MR3を用意し、MR1～MR2及びMR1～MR3の通信経路が構成されている状態に配置し、MR1とMR3との間でデータ通信を行わせた(図4上)。この状態からMR3をMR2の方向へ向け移動させると、しばらくはMR1～MR3の通信経路を使ってデータ通信が行われる。しかしMR3がMR2を越えてさらにMR1の遠方に移動すると、MR1～MR3の無線通信回線が維持できなくなり、アドホックネットワークによる通信経路の再構成機能が起動して、MR1とMR3の間で交換されるデータはMR1～MR2～MR3という経路で流れるようになる(図4下)。ここでMR3がMR1の方に向けて引き返すと、再度MR1～MR3の通信経路が再確立され、データは直接MR1とMR3の間で交換されるようになる(図4上)。

MR3からMR1に向けてpingコマンドによりEchoを送信しながらMR3を歩行速度で上記のように移動させた場合の、ping応答時間と応答状況の変化を図5に示す。MR1とMR3が遠ざかる方向への移動の場合には、移動開始時は1ホップでの接続で応答時間も約3msで安定しているが、1ホップ状態が維持できなくなると応答時間

が10～20msと増大し、一時的にパケットロスによるタイムアウト状態も発生する。一方、MR1とMR3が接近する方向への移動の場合には、パケットロスは発生せず不安定な状態にもなっていない。このように、経路の再構成が行われる前後のホップ数の増減の違いにより、経路切替時の特性が異なる。

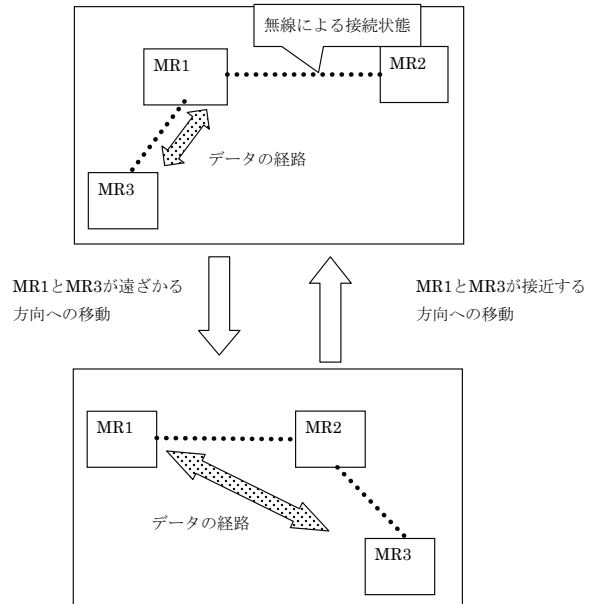
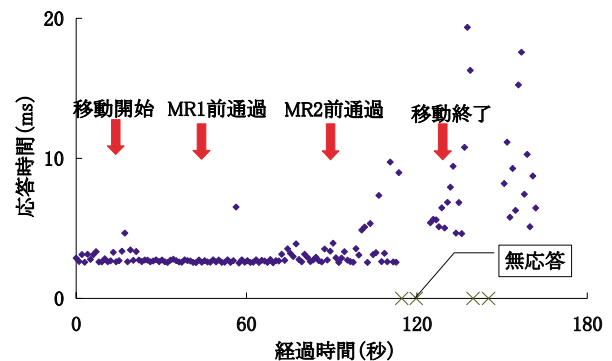
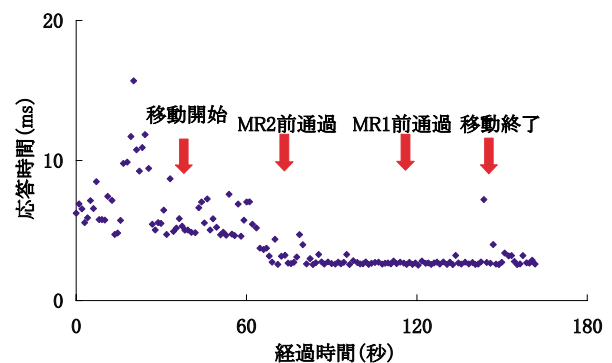


図4 ノード移動に伴う通信経路の変化



(a) 遠ざかる方向への移動の場合



(b) 接近する方向への移動の場合

図5 ping 応答時間と応答状況

特集：信号通信技術

4.2 沿線通信ネットワークを模擬した実験

メッシュルータ及びフィールドサーバーを鉄道総研構内の実験線沿線に複数台配置し、動作や伝送特性を測定した。

4.2.1 実験の概要

図6に、メッシュルータを設置した箇所と本稿内で使用する名称を示す。1台の測定用PCを地点Aに設置したメッシュルータに、もう1台の測定用PCを別のメッシュルータに、それぞれ接続し、条件を変更しながら測定用PC間で以下の測定を行った。なお、地点の選定に際しては受信レベルの測定等の事前調査は行わず、両側の隣接ノードとの見通しがとれるような場所を適当に選択した。

(1) ping 応答時間

一方の測定用PCからもう一方の測定用PCに向けて、ping コマンドを100回実行し、応答の到着率及び応答遅延時間を測定する。

(2) ファイル転送スループット

一方の測定用PCでftpサーバを動作させ、もう一方の測定用PCでputコマンド及びgetコマンドを実行してファイル転送を行った場合の平均スループットを測定する。

(3) VoIP (Voice over IP) 特性

両方の測定用PCでVoIP特性評価ツールを実行し、VoIP測定を行う。

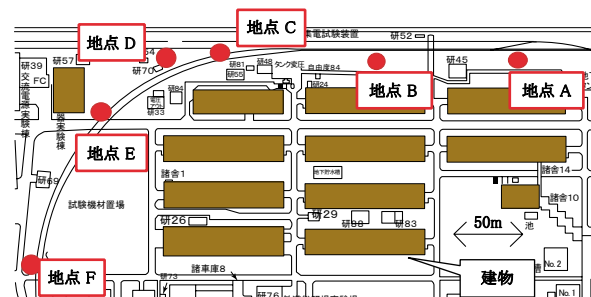


図6 機器設置場所と名称

4.2.2 実験結果

(1) 送受信端末の位置による伝送特性

地点Aのメッシュルータに接続した測定用PCでftpサーバを動作させ、もう一台の測定用PCを地点C～地点Fに設置した他のメッシュルータに順番につなぎかえていき、ping応答時間、ファイル転送スループット、VoIP特性を測定した。

(a) ping 応答時間

ping 応答時間の測定結果を表1に示す。

測定中のある瞬間のメッシュルータ間接続例を図7に示す。この状態では、地点A～地点C間は1ホップ、地点A～地点D間及び地点A～地点E間は2ホップ、地点A～地点F間は3ホップでつながっているが、無線の伝

表1 ping 応答時間の位置による差

測定区間	最小 (ms)	最大 (ms)	到着率 (%)
地点A～地点C	2	78	94
地点A～地点D	3	128	89
地点A～地点E	5	135	100
地点A～地点F	6	2086	90

送状態によりこの接続は変化する。一般的には、距離が離れるほどホップ数が増加し中継に伴う処理時間が累積されるため、応答時間も増加することになる。表1の各区間の最小応答時間を上記のホップ数で割ると、応答時間の増加は1ホップ当たり概ね2ミリ秒程度であると推定される。また最大応答時間はホップ数とともに大幅に増加している。これは、ホップ数が増えた場合には、遠方の通信ノードの送信状態が分からないために複数の通信ノードが同時に通信を開始して伝送エラーとなる「隠れ端末」現象が顕在化するためであると考えられる。一方、応答の到着率は、ホップ数が増えると低下する傾向にあるが、地点A～地点E間のように向上している場合もある。地点A～地点E間の最小応答時間が地点A～地点D間の最小応答時間よりも2ミリ秒大きいことから、この測定時には図7では直接接続している地点A～地点C間の伝送路が切れて地点A～地点B～地点D～地点Eのような3ホップで接続していた可能性がある。この構成では各無線区間長が短いため、むしろ伝送品質が安定していたと考えられる。

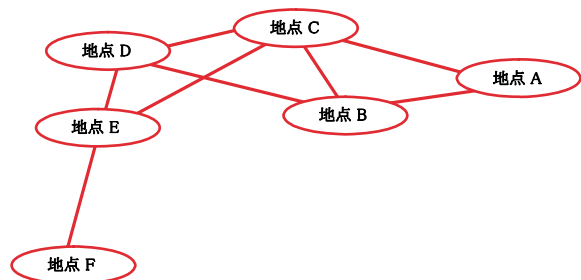


図7 無線接続状態例

(b) ファイル転送スループット

ファイル転送スループットの測定結果を表2に示す。概ねping応答時間測定における到着率が高いほうが、スループットも高い。地点A～地点C間のgetコマンド実行時のスループットが極めて低下しているのは、この測定時に地点A～地点C間の無線回線品質が劣化したためと考えられる。スループットが低い場合は、パケットロスにより再送待ちの無通信状態が発生していた。またパケットロスにより、最悪の場合はコネクションが切断することもあった。パケットロスの発生に伴うこのような傾向は、TCPを使う他のアプリケーションでも同様であ

表2 ファイル転送スループットの位置による差

測定区間	put (kB/s)	get (kB/s)
地点A～地点C	221.4	92.80
地点A～地点D	167.2	239.0
地点A～地点E	268.6	349.0
地点A～地点F	96.38	112.0

ると考えられる。

(c) VoIP 特性

VoIP 特性の測定結果を表3に示す。

地点Aと地点Fの間での通信を除いて、概ね携帯電話並の品質を満たすR値(R>70)が得られている。これは、VoIPがUDPを使っており、遅延がほとんどない場合には5%～10%程度のパケットロスに対しても大きなR値をとるためである。地点A～地点Fでは、パケットロスが大きいために品質も低下している。

表3 VoIP 特性の位置による差

音声の伝送方向	R 値
地点C→地点A	78.1
地点A→地点C	76.6
地点D→地点A	78.1
地点A→地点D	78.2
地点E→地点A	78.0
地点A→地点E	78.2
地点F→地点A	29.1
地点A→地点F	35.8

(2) 異常時の経路切替

地点Eに測定用PCを接続し、地点Aに向けて連続してpingコマンドを実行している状態で、中継ノードとして動作している地点Dのメッシュルータの電源オン/オフを行った場合のping応答時間の変化を、図8に示す。

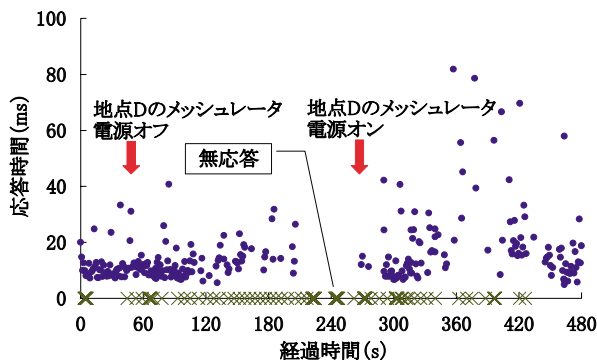


図8 経路切替時のping 応答時間

中継ノードがダウンした後でも、1回程度のパケットロスの発生後に別経路での伝送が継続していることが分かる。ただし、地点Cと地点Eとの間の伝送特性がよく

ないため、応答を受信しない場合が発生し、また応答時間がばらついていた。中継ノードが再度アップすると、適切な経路が再構成されて安定した。

次に、地点Aから地点Fに向けてpingを実行している間に、試験用電車(1両)を地点Aと地点Dの間で低速で往復させた。車両が地点D付近に停車し無線リンクを遮断すると、地点Cと地点E間の無線リンクが切断され、一時的に応答なし状態となったが、その後伝送は回復した。ただし車両が停車した後でも応答なし状態が散発しており、経路が不安定になっているものと考えられた。

(3) 他の通信トラフィックがある場合の特性

地点Fにフィールドサーバーを設置し、地点Aに向け画像転送を行った。画像転送速度は最大15フレーム/sに設定した。この状態で、地点Aと地点Dの間でping及びftpを実行した場合の測定結果を表4及び表5に示す。表には、画像転送を行っていない場合の測定結果も掲載している。他のトラフィックが増えると、特性が大きく低下することが分かる。ftp実行時には無転送に近い時間もあるが、平均的にスループットが低下していた。

なお、フィールドサーバーから転送されてきた画像は、1～4フレーム/s程度であり、ftp実行中とftp停止時では変化は見られなかった。

表4 他のトラフィックがある場合のping 応答時間

画像転送の状態	最小 (ms)	最大 (ms)	到着率 (%)
停止	2	68	99
転送	4	849	91

表5 他のトラフィックがある場合のファイル転送スループット

画像転送の状態	put (kB/s)	get (kB/s)
停止	224.0	341.2
転送	93.96	99.34

次に、地点B付近にメッシュルータと同一チャンネルを使うよう設定した無線LANアクセスポイントを2台設置し、アクセスポイント間通信を行わせた。この状態で地点Aと地点Dの間でpingとftpを行った場合の測定結果を表6及び表7に示す。ping 応答時間はアクセスポイントの動作状況によって変化は見られないが、ファイル転送スループットは大きく低下している。アクセスポイント動作時にftpを実行した場合には、パケットロスの発生が増え、無通信に近い状態が継続していた。

なお、地点Fに設置したフィールドサーバーからの画像を地点Aに転送させている状態でアクセスポイントの電源のオン/オフを行ったが、1～4フレーム/s程度の転送が継続しており、画像に変化は見られなかった。

特集：信号通信技術

表6 他の無線LAN動作時のping応答時間

他無線LANの状態	最小 (ms)	最大 (ms)	到着率 (%)
停止	2	68	99
動作	3	30	100

表7 他の無線LAN動作時のファイル転送速度

他無線LANの状態	put (kB/s)	get (kB/s)
停止	224.0	341.2
動作	144.7	120.5

4.3 考察

アドホックネットワークでは、自分自身のアドレス等基本的な情報を設定するだけでノード間の経路は自動的に構成されるとともに、機器の移動・交換・追加設置等が発生した場合に設定を変更する必要がない点は、従来の無線LANに比した利点である。一方、現在の機器の性能では、マルチホップ構成を含むネットワーク経路を構成するまでの立ち上げ時間は電源を投入してから1分程度の時間を要する。また、ノードの移動・故障や障害物による無線伝送路の遮蔽の影響により使用中の通信経路が使用不可能になる場合、数秒程度で別経路に切り替わるがその間は一時的にせよ通信不能となる時間が存在し、さらに経路再構成後も場合によっては数十秒程度に亘り通信状態が不安定になり伝送遅延時間が延びることがある。また、TCP伝送は中継段数の増加や伝送特性の劣化に大きく影響を受けるが、UDP伝送は比較的影響は少ない。

したがって、数ホップ程度の規模で沿線通信システムを構成する場合に、音声や画像のストリーミング等、ある程度のパケットロスに対して強い通信トラフィックを

中心とした伝送を行う用途に用いるときには、無線LANのアクセスポイントを並べるよりも簡便に、かつ公衆網よりも高速な通信回線を構築することが可能であるといえる。特に災害時等、緊急を要する場合に有用性が高いと考えられる。

5. あとがき

通信インフラのない場所で簡便に通信ネットワークを構築できるアドホックネットワーク技術を用いて、鉄道沿線に通信システムを構成する場合の特性を実験的に評価し、数ホップ程度の規模であれば実用的な特性が得られることを確認した。

伝送特性の低下をもたらす主な要因は、すべてのノードが同じ無線LANのチャンネルを使用していることにある。そのため、各ノードが複数の通信インタフェース(有線LAN, 異なる周波数の無線LANなど)をもち、自律的に使い分けることによって通信性能を確保するような研究開発も進められている。また、セキュリティやアドレスの付与方式など、実用的な運用をするために不可欠な技術の研究も進展しつつある。

今後は、これらの技術動向に留意しつつ、具体的な応用システムの検討を進める予定である。

文献

- 1) 小牧省三, 間瀬憲一, 松江英明, 守倉正博:無線LANとユビキタスネットワーク, 丸善, 2004
- 2) 関清隆, 川崎邦弘, 中村一城:無線ネットワーク技術の鉄道システムへの適用, 鉄道総研報告, Vol.19, No.8, pp.41-46, 2005