

センサネットワークで 構造物を監視する

小林 裕介
構造物技術研究部
(鋼・複合構造 副主任研究員)

平井 力
輸送情報技術研究部
(運転システム 主任研究員)



こばやし ゆうすけ ひらい ちから

はじめに

近年、ユビキタス社会とか、ユビキタスコンピューティングという単語をよく耳にします。“ユビキタス”自体に厳密な定義はありませんが、何処にでもコンピュータが存在し(その存在を感じさせないくらい)、それらが自律的に連携して動作することによって、我々の生活を支援する技術や環境を意味します。この技術の一つにセンサネットワークと呼ばれるモニタリング技術があり、既に身の回りの色々な箇所で実用化されてきています。センサネットワークは鉄道構造物に対しても有効な監視(モニタリング)技術の一つであり、実用化への期待が高まっています。本稿では、センサネットワークの特徴や構造物の監視に適用した場合の利点を紹介するとともに、構築したプロトタイプシステムを鉄道地下トンネル(ロンドン地下鉄)に適用した事例について紹介します。

センサネットワーク

センサネットワークとは

センサネットワークには様々な形態がありますが、広義には「通信機能を持つ多数の小型センサによる自律的なネットワーク」というものです。個々の小型センサが、測

定したデータをセンサ同士でやりとりしたり、ゲートウェイまでリレーをして転送したりします(図1)。ここでいう通信は、一般的には無線を意味します。このセンサネットワークは様々な分野へ適用されはじめており、簡単な例では、図2に示すような空調管理が挙げられます。人間の傍のセンサが室温を測定しつつ、もう一つ別のセンサがエアコンの使用電力量も測定し、エアコンが双方のデータを無線により取得して最適な室温管理をしたりします。この他にも、工場におけるラインのモニタリングおよび制御、自然環境のモニタリングなどに利用されたりしています。

構造物モニタリングへの適用の利点

センサネットワークは“自律的な無線ネットワーク”を利用しており、“センサが小型”という特徴を有していますが、センサネットワークを構造物モニタリングに適用した場合にも、この特徴によってその利点を得ることができます。

構造物のモニタリングでは、一般的に多数のセンサを広範囲に設置することになりますが、センサ自体の設置以外にも、配線の敷設に多くの労力と費用を要します。センサネットワークでは、センサ同士が無線を利用して測定データをリレーしてゲートウェイまで伝送するため、上記のような配線は不要になります。また、自律的にネットワーク

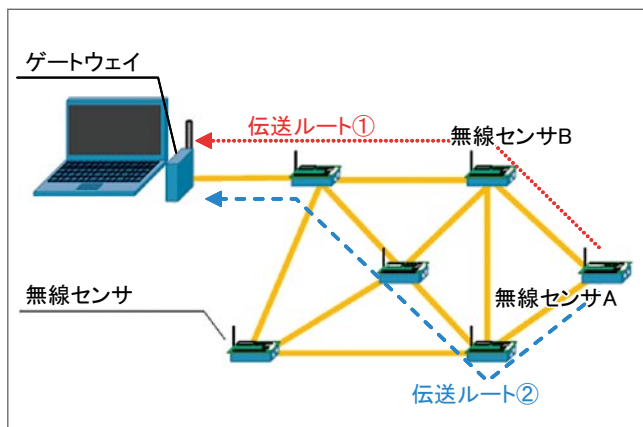


図1 センサネットワークのイメージ



図2 センサネットワークの適用例

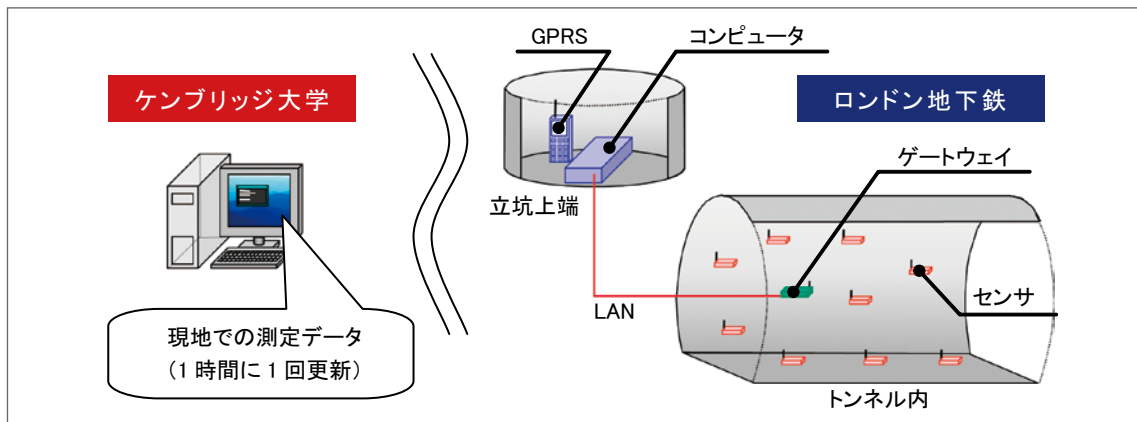


図3 プロトタイプシステムの構成

を構成していることから、図1のようにセンサAのデータをゲートウェイまで伝送しているときに(伝送ルート①)、センサBが故障した場合でも、代替ルートである伝送ルート②に自動で変更することが可能であり、冗長性の高いシステムとすることが可能です。

もう一つの利点は、センサが小型であることによります。近年、機械要素部品、センサ、アクチュエータ、電子回路を一つのシリコン基板上に集積化したMEMS (Micro Electro Mechanical System) と呼ばれるデバイスが多種多様に開発されており、これらを利用することで、一つ一つのセンサを数センチ角とすることができます。このように小型化されたセンサであれば、場所を選ぶこともなく好きな箇所に設置でき、多様なモニタリングをすることができます。

プロトタイプシステムの構成

ロンドン地下鉄に設置したプロトタイプシステムの構成を図3に示します。40m程度の範囲内にセンサを散在させ、その中心にゲートウェイを設置しています。全てのセンサでの測定結果は、センサ同士がリレーをすることによりゲートウェイに集約されます。一方、立坑と呼ばれる通気ダクトの上端には小型のコンピュータを設置し、このコンピュータがゲートウェイに集まったデータを吸い上げます。今回のプロトタイプシステムでは、コンピュータとゲートウェイとの距離は500mありましたが、この通信にはLANを利用しています。

本システムでは、コンピュータが吸い上げたデータは、GPRS (General Packed Radio Service) と呼ばれる携帯電話網を使ったデータ伝送を利用してケンブリッジ大学まで転送されます。コンピュータと携帯電話を立坑上端に設置したのは、地下トンネル内では携帯電話の電波を送受信できないためです。



図4 センサの設置状況(トンネル内)

設置センサ

プロトタイプシステムを設置したロンドン地下鉄構内断面は、直径3.75mのほぼ正円となっています。壁面には覆工と呼ばれる60cm四方のコンクリートパネルが敷き詰められています(図4)。

ロンドン地下鉄は世界で初めての地下鉄であり、その歴史は100年以上になります。また、ロンドンの地質は比較的柔らかいことから、長い年月の中でトンネルの断面形状が正円から楕円に変形しつつあります。プロトタイプシステムでは、この変形をモニタリングするためのセンサとして傾斜計と変位計を設置しました。一つの断面(円形リング)を1単位として傾斜計を4つ、変位計を1つ(場所によっては2つ)設置しています。傾斜計は覆工のパネルの中央に設置してその傾きの変化を計測し、変位計はパネルとパネルの間のギャップの変位やパネルに発生したき裂の開口変位を計測しています。また、傾斜計と変位計のセンサ基盤上には温湿度計も付いており、トンネル断面の温度や湿度に起因した変形についても分析ができるようになっています。

設置したセンサの例として、変位計を図5に示します。変位計は一つの測定点に対して二つずつ設置しています。一つはパネル間のギャップ変位を測定していますが、もう一つはコンクリートの温度変化による伸縮や、変位計自体の温度によるバラツキを補正するためのダミーセンサ（温度補償用）として用いています。

トンネル内での無線通信

センサネットワークの特徴の一つに、無線通信を使っていることが挙げられます。センサ同士が確実に通信し合えるためには、通信可能な距離を把握した上でトンネル内にセンサを配置させる必要があります。ここでは、トンネル内での無線通信について記載します。

トンネル内での電波干渉

電波は距離に応じて強度が低下していきます。したがって、センサ同士がある程度以上離れてしまうと、お互いに

通信することはできません。トンネル内では、この通信の限界の距離よりもはるかに短い所で、局部的に通信ができない（電波強度が低くなる）場所が存在します（図6）。

これは、トンネル壁面で電波が反射するためです。この反射した電波同士が重なり合い干渉という現象が生じますが、半位相ずれた状態で重なり合うと、反射してきた電波同士を打ち消し合うこととなってしまいます。この打ち消し合いによって電波強度が通信可能レベルよりも低くなると、通信の限界の距離よりもはるかに短い場所で局部的に通信ができなくなってしまいます。したがって、センサを配置する場合には、局部的に通信ができない場所を避ける必要があります。ただし、このような箇所は複数あり全てを厳密に把握することは困難なため、最初に現れるこのような場所（図6における①）を把握しておき、隣合うセンサ同士をこの距離よりも短い範囲で配置していくのが現実的な方法となります。

覆工種別とアンテナ種別

トンネル内での無線通信が可能な距離は、トンネル壁面を覆っている覆工の種類と、使用するアンテナの種類に大きく依存します。これらの種類に応じ実際の地下トンネルで図6における①を測定した結果を図7に示します。なお、実際のセンサの設置を想定して、アンテナは壁面から数センチの位置（屋外での試験では、コンクリート舗装から数センチの高さ）で試験をしました。

まず分かることは、アンテナ種別によって通信距離が2倍、3倍と違うことが分かります。また、同じ2dBi（dBiはアンテナの利得を示す）のアンテナでも屋外で使用した場合と、コンクリート覆工で使用した場合、鑄鉄の覆工で

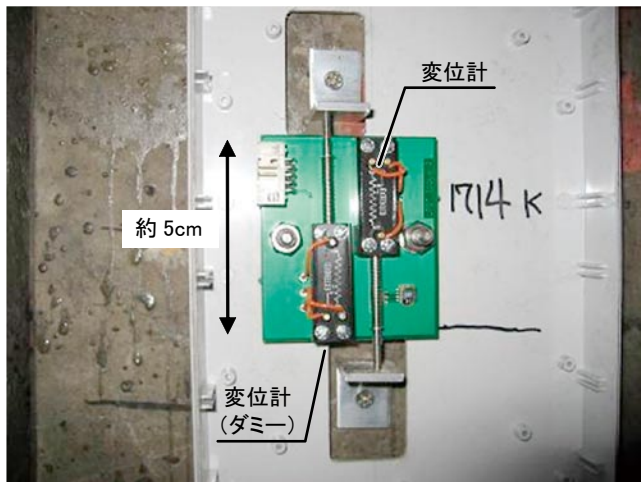


図5 変位計

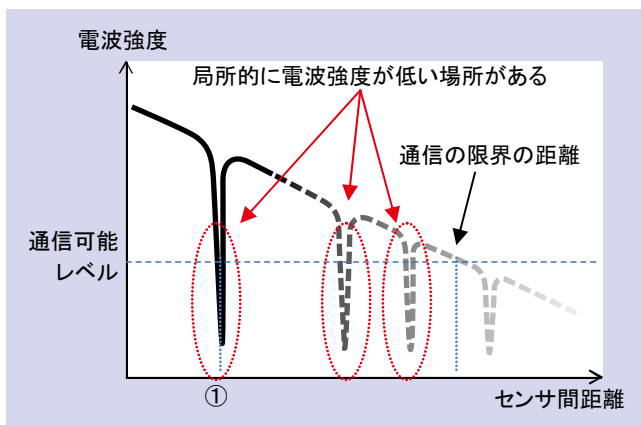


図6 トンネル内での電波強度と距離（イメージ）

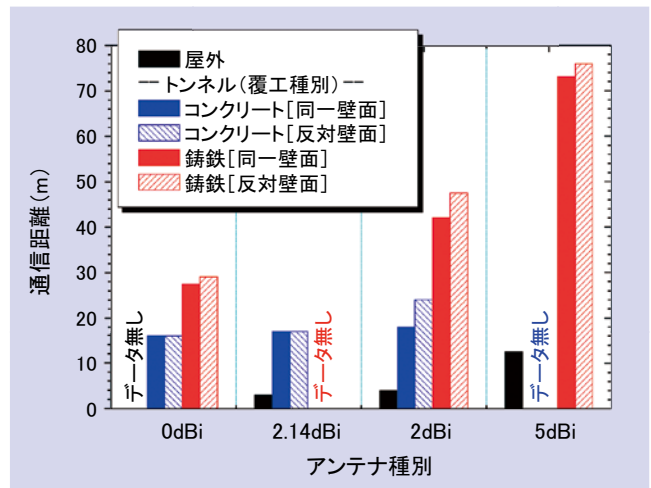


図7 覆工種別・アンテナ種別と通信距離

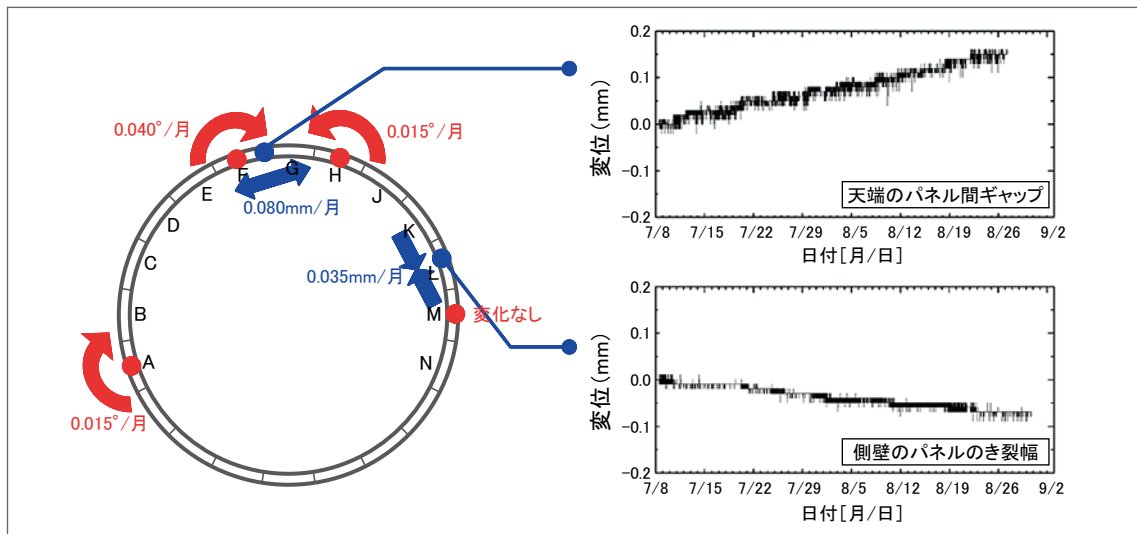


図8 センサネットワークによるモニタリング結果

使用した場合で、通信距離が大きく違うことがグラフから読み取れます。

屋内よりもトンネル内の方が通信距離が長いのは、前述のようにトンネル壁面で電波が反射することによります。干渉の仕方によっては電波を打ち消し合いますが、全般的には補い合う方向に働き、通信距離が長くなります。また、コンクリート覆工よりも鉄筋の覆工の場合の方が通信距離が長いのは、コンクリートは電波を全て反射せず一部は吸収してしまうのに対し、鉄筋はほぼ全ての電波を反射することができるためです。

プロトタイプシステムを設置したトンネル構内の壁面はコンクリート覆工で、センサに使用したアンテナは2dBiとしましたので、センサ同士の距離を概ね20m以下にすればよいことが分かります。プロトタイプシステムでは、4断面にセンサ群を配置しましたが、断面同士が上記の距離よりも離れている場合は、データのリレーだけを目的としたセンサ（測定はしていない）を間に配置して、確実な通信経路を確保しました。

モニタリング結果

本稿で紹介したプロトタイプシステムを用いてトンネルをモニタリングした結果の例を図8に示します。グラフは変位計の測定結果であり、天端のパネル間のギャップと側壁のパネルのき裂幅の変動について示しています。1か月半のモニタリング結果ですが、これらの変位には明確な傾向が見取れます。また、傾斜計からもパネルの傾きの変化を把握することができていますので、センサを配置した4断面のこのような傾向を長期的、かつ継続的にモニタリングしていくことで、地下トンネル全体が3次元的に

のように変形しているかを捉えることができます。さらに、その変形の程度や速度から、トンネル断面の補強の必要性や、補強する場合のタイミングについても判断することが可能になります。

このプロトタイプシステムでは、センサは乾電池を利用して動作しておりますが、乾電池の残量（電圧）についてもモニターしています。また、個々のセンサがどのセンサと通信しているかについても、データを取得しています。これらの情報から、他の多くのセンサのデータをリレーしなければいけない負荷の大きいセンサや、そうでないセンサが、どの程度の電力を消費しているかについても把握し、今後のシステム開発に役立てていく予定です。

おわりに

構造物のモニタリングを目的としたセンサネットワークについて紹介しました。本稿では、ロンドン地下鉄に設置した例を紹介していますが、このほかにも、プラハ地下鉄（チェコ共和国）やハンバークリッジ（イギリス）にも同様のシステムを設置しております。また、鉄道総合技術研究所においても、トンネル、橋梁、駅、軌道などの鉄道構造物を総合的に管理することが可能なシステムを開発しています。今後もこれらのシステムの稼働状況や、測定データを継続的に把握し、センサネットワークの有用性の検証や、より使い勝手のよいシステムとなるような改良を加え続けていく予定です。

最後になりましたが、ここで紹介したプロトタイプシステムの構築は、ケンブリッジ大学の曾我健一教授がマネージャーとなって進めている2つのプロジェクト（WINES、M3）に、筆者らが参画して実施したものであります。上記プロジェクト関係各位には、深く御礼申し上げます。RRR