

鉄道構造物ヘルスマonitoringにおける無線センサネットワークの総費用最小化計画

羽田 明生, 廣瀬 壮一

鉄道構造物の保守管理においては、近年、無線センサネットワークを利用したヘルスマonitoringシステムが注目されている。無線センサネットワークを利用すると、構造物に関する詳細な工学値データをリアルタイムに収集できることから、構造物の迅速な異常検知や的確な健全度判定が可能となる。本稿では、無線センサネットワークを利用したヘルスマonitoringシステムに関する最近の取り組みとして、ロンドン地下鉄における無線センサネットワークの導入事例と、その経済性を評価・検討する際に提案された無線センサネットワークの総費用最小化計画法について紹介する。

キーワード：センサネットワーク、鉄道構造物、ヘルスマonitoring、費用最小化

1. はじめに

鉄道構造物に対しては、定期的に全般検査が実施される。全般検査は、列車運行の安全性の確保を目的として鉄道構造物全般にわたって実施する検査であり、多くの場合、人手による目視検査や打音検査を中心に行われる [1]。しかし、数年に1度（通常は2年に1度）の全般検査では、ひび割れやはく落などの異常が発生した場合に即座にそれを検知することは難しく、危険な状態を長期間放置してしまう恐れがある。また、全般検査には目視や聴音に伴う人為的なミスが発生する、構造物の経年劣化傾向を正確に把握することができない、などの問題点も存在する。このため、鉄道構造物の保守管理においては、近年、無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network, WSN) を利用したヘルスマonitoringシステムが注目されており、ロンドン地下鉄、プラハ地下鉄、バルセロナ地下鉄の一部区間ではすでに WSN を利用したヘルスマonitoringシステムが導入されている [2][3]。そこで本稿では、ロンドン地下鉄に設置された WSN の概要と、その経済性を評価・検討する際に提案された WSN の総費用最小化計画法について紹介する。

2. WSN の導入事例

ロンドン地下鉄は世界で最も老朽化の進んだ地下鉄の1つであり、そのトンネルの多くが建設からすでに100年近くが経過している。このため、トンネル内のライニング劣化や土圧による経年変化などが懸念され、2007年にそれらを監視するための図1のような WSN が、ジュビリー線のベイクーストリート駅とボンドストリート駅間に設置された。

図1において、センサとゲートウェイはトンネル内の矢印で示した区間に設置されており、各センサで収集したデータはマルチホップ無線通信によりゲートウェイまで伝送される。ゲートウェイに伝送されたセンシングデータは、さらにイーサネットを経由して通気孔の地上部付近に設置した PC まで伝送されたあと、それに接続された GPRS 回線を介して管理サーバまで送信される。ここで、トンネル内部では GPRS 回線が利用できないことから、モデムを付置した PC をそれ

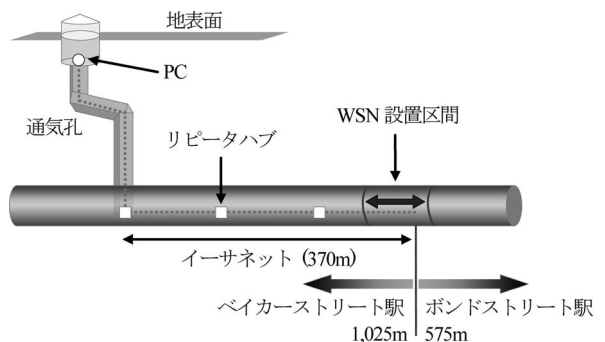


図1 ロンドン地下鉄に設置された WSN の概要

はだ あきお
公益財団法人 鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部
〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38
ひろせ そういち
東京工業大学 情報理工学研究所
〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 W8-22

が利用できる通気孔の地上部付近に設置している。また、WSN から PC までの距離が 370m 以上あることから、安定したデータ送信を確保するために約 100m 間隔でリピータハブを設置している。

管理サーバに伝送されたセンシングデータは、Web 上に構築したデータ共有システムにアップロードされる。データ共有システムには、Web 上でのデータ閲覧機能に加えて、保守管理担当者への警告通知機能が備えられている。この警告通知機能では、事前に入力した閾値を用いて各データの異常判定を行い、異常と判定された場合には、保守管理担当者へ異常警告メールが自動送信される。したがって、この警告通知機能を活用すると敏速な異常検知が可能となり、早期補修による維持管理費用の低減や、異常状態の長期間放置に伴うリスクの軽減などが期待できる。また、データ共有システムでは、各種センシングデータを時系列的に表示できるので、経年劣化傾向や耐圧低下傾向のより正確な把握が可能となる。

ロンドン地下鉄の WSN には、傾斜計センサ 16 台、変位計センサ 6 台、環境センサ 4 台、ゲートウェイ 1 台が、図 2 に示す位置に設置されている。設置された傾斜計センサの分解能と測定範囲はそれぞれ 0.001° 、 $\pm 15^\circ$ であり、変位計センサの分解能と計測限界はそれぞれ 0.012 mm、12 mm である。また、環境センサでは温湿度に関するデータを収集する。

各センサでは 3 分に 1 回データを収集し、それをゲートウェイに伝送する。また、これらのセンシングデータ伝送とは別に、各センサでは 10 分に 1 回ヘルスパケットデータをゲートウェイに伝送する。このヘルスパケットデータには、送信可能性、受信強度、パケットロス率などの通信品質に関わる情報が含まれている。

図 3 は、ロンドン地下鉄に設置された WSN の現場写真である。ただし、図 3 における実線円と点線円はそれぞれ、そこに傾斜計センサ、変位計センサが設置されていることを示している。

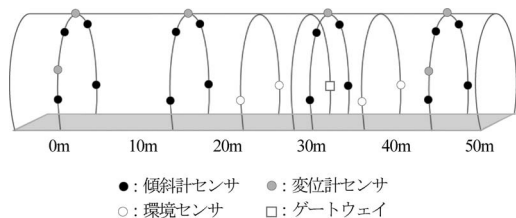


図 2 センサとゲートウェイの設置位置 [4]



図 3 WSN の現場写真 [4]

3. WSN の総費用最小化計画

3.1 総費用の最小化

鉄道構造物のヘルスマonitoringに用いる WSN は、通常、長期にわたる継続的な運用を前提としている。それゆえ WSN の導入に際しては、設置費用のみならず、長期にわたって発生する運用費用についても検討しておく必要がある。しかしながら、WSN を設置し運用する際に発生する諸費用は互いに密接に関係しており、それらの間にはさまざまなトレードオフ関係が存在する。例えば、リレーを多く設置すると、ネットワーク内の各電池の電力消費量が平準化され、電池交換のための巡回間隔を長くできる傾向にある。つまり、リレー設置の初期投資費用を多く（少なく）すると、電池交換のための作業費用は少なく（多く）なる傾向にある。加えて、各センサや各リレーの送信出力水準 (Transmission Power Level, TPL) の設定やセンシングデータを伝送するためのルート計画も、リレー設置費用や電力消費費用などに大きく関係する。このため、ロンドン地下鉄に設置された WSN においても、設置費用と運用費用の調整が主要課題の 1 つとなり、それらの総和を最小とするための方策が種々検討された。そしてそれらの検討を踏まえて、設置費用と運用費用の総和が最小となるように、WSN を総合的に計画するための数理モデルが提案された。そこで以下では、文献 [4] に基づいてその大要を紹介する。

3.2 問題の設定

いま、複数個のセンサと単一のゲートウェイがあり、それらの設置場所は与えられているものとする。また、リレーを設置できる場所はいくつかあり、これらの場所も与えられているものとする。さらに、各センサと各リレーにおいては TPL を数段階の水準の中の 1 つに設定でき、それらから送信できる範囲と送信のため

の電力消費量は設定した TPL に依存するものとする。加えて、各センサと各リレーの電源はそれぞれに搭載された電池であり、各電池は電力が枯渇する前に交換しなければならないものとする。このとき、鉄道構造物ヘルスマニタリングのための、以下のようなシステムについて考える。

1. 各センサでは単位期間に 1 回データを収集する。
2. 各センサで収集したデータは、マルチホップ無線通信でゲートウェイに伝送される。
3. ゲートウェイに伝送されたデータは、インターネットなどの一般の通信手段を用いて管理サーバに転送される。

上記システムの構築においてはセンサ、ゲートウェイ、リレーを設置するための初期費用が発生する。しかし、センサとゲートウェイの設置場所は所与であることから、それらの設置費用は埋没費用であると見なすことができる。そこで、システムの初期費用としては残りのリレー設置費用だけを考慮することにする。また、このシステムの運用においては、システム内の電池を保守作業員が現場を巡回して交換する必要がある。よって、システムの運用段階においては電池交換のための作業費用が発生する。加えて、システムの運用段階においては、各電池の電力消費費用についても考慮する必要がある。したがって、このシステムの構築段階においてはリレー設置費用が、そして運用段階においては電力消費費用と電池交換作業費用が発生することになる。

他方、上記システムの設計においては、リレーの設置場所と TPL と伝送のためのルートを計画する問題が発生する。すなわち、リレーをそれらを設置可能な場所の中のどこに配置するかを決定する問題と、各センサと各リレーでの TPL を決定する問題と、各センサで収集したデータをゲートウェイに伝送するためのルートを決定する問題である。これら 3 つの問題は互いに密接に関係しており、各問題を個別に解いても総費用の最小化を保証することはできない。そこで以下では、リレー設置費用と電力消費費用と電池交換作業費用の総和が最小となるように、これら 3 つの問題を同時に解くことを考える。ただし以下では、(電池交換のための)ある巡回において交換する電池は、次の巡回までに電力が枯渇する電池だけで、次の巡回まで寿命のある電池は交換しなくてもよいものとする。

3.3 用語とネットワークの定義

センサの集合を $S = \{1, 2, \dots, |S|\}$ 、リレー設置候補場所の集合を $R = \{|S| + 1, |S| + 2, \dots, |S| + |R|\}$

とする。また、ゲートウェイを 0 で表し、 $M = S \cup R$ 、 $N = S \cup R \cup \{0\}$ とおく。ここで、 M や N について考える場合はそれらの要素を特にノードと呼ぶ。また、各電池で消費可能な電力量を電池容量と呼び、ノード $i \in M$ の電池容量を E_i とする。加えて、各センサと各リレーにおける TPL の集合を $P = \{1, 2, \dots, |P|\}$ とし、一般性を失うことなく送信出力は $1 < 2 < \dots < |P|$ の順序で大きいものとする。

あるノード $i \in M$ とあるノード $j \in N$ を考えると、ノード i からノード j へ (他のノードを経由しないで) 直接送信できるノード i における TPL $l \in P$ の集合が定まる。そこで、次を定義する。

P_{ij} : ノード $i \in M$ からノード $j \in N$ へ直接送信できる、ノード i における TPL $l \in P$ の集合

図 4 は、 $P = \{1, 2\}$ である場合に、ノード 1 から各 TPL で送信できる範囲を示している。ただし、図 4 と以下の図 5 と図 6 における点線と実線のアークは、それぞれ TPL 1, 2 で送信できることを示してある。また、図 4 と以下で示す図 5~8 の $\circ, \triangle, \square$ は、それぞれセンサ、リレー、ゲートウェイである。図 4 において、ノード 1 からノード 3、ノード 4 に送信できるのは TPL 2 だけであるから $P_{13} = P_{14} = \{2\}$ となり、ノード 1 からノード 2 へは TPL 1 と TPL 2 で送信できるので $P_{12} = \{1, 2\}$ となる。しかし、ノード 1 からノード 0 へは TPL 1 でも TPL 2 でも送信できないので $P_{10} = \emptyset$ となる。

上の例で示したように、 P_{ij} は空になる場合も当然存在する。そこで、 P_{ij} が $P_{ij} \neq \emptyset$ である場合に限定して

$A = \{(i, j, l) \in M \times N \times P \mid i \neq j, P_{ij} \neq \emptyset, l \in P_{ij}\}$ と定義する。そして、この A をアーク集合とし、 N をノード集合とする有向ネットワークを $G = (N, A)$ と

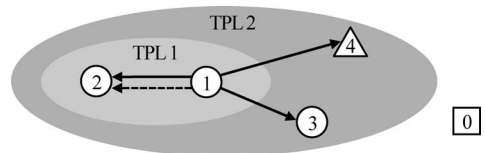


図 4 ノード 1 から送信可能な範囲

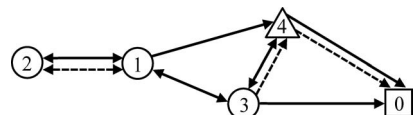


図 5 G に存在する多重アーク

する。ここで、 $|P_{ij}| \geq 2$ である場合は、 G にはノード i からノード j への $|P_{ij}|$ 本の多重アークが存在することに注意する。 G に多重アークが存在する状況を図 5 に示す。ただし図 5 は、図 4 のノード間に存在する全てのアークを図示した場合の例である。また図 5 の双方向アークは、その両端のノードは相互に送信可能であることを示している。

あるセンサ $i \in S$ を始ノードとし、ゲートウェイ 0 を終ノードとする $G = (N, A)$ 上のルートを特に伝送ルートと呼ぶ。このとき、 G のあるセンサを始ノードとする伝送ルートが存在しなければ、リレーをどのように配置しても、そのセンサからはゲートウェイにデータを伝送できないことになる。そこで、 G には各センサを始ノードとする伝送ルートが少なくとも 1 本は存在するものとする。

G のアーク $(i, j, l) \in A$ に $|S|$ 個の変数 $x_{ijl}^1, x_{ijl}^2, \dots, x_{ijl}^{|S|}$ を、そして G のノード $i \in M$ に $|P|$ 個の変数 $y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{i|P|}$ を付与して、

$$x_{ijl}^k = \begin{cases} 1, & \text{センサ } k \in S \text{ で収集したデータをノード } \\ & i \in M \text{ からノード } j \in N \text{ に TPL} \\ & l \in P \text{ で送信する場合,} \\ 0, & \text{その他,} \end{cases}$$

$$y_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{ノード } i \in M \text{ の TPL を } l \in P \text{ に設定} \\ & \text{する場合,} \\ 0, & \text{その他,} \end{cases}$$

と定義する。ここで、 G のノード i, j 間の変数 x_{ijl}^k の数は、全部で $(|P_{ij}| + |P_{ji}|) \times |S|$ 個となることに注意する。例えば、図 5 に示した G のノード 3, 4 間の変数 x_{ijl}^k の数は、図 6 のように全部で 9 個となる。

各センサでは単位期間に 1 回データを収集し、それを処理後ゲートウェイへ伝送する。そこで、各センサで単位期間に収集するすべてのデータを収集・処理、受信、送信するのに必要な電力量を次のように記す。

s^k : センサ $k \in S$ でデータを収集・処理するのに必要な電力量

r^k : センサ $k \in S$ で収集したデータを各ノードで受信するのに必要な電力量

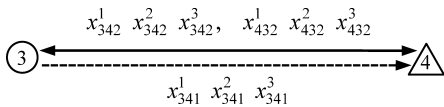


図 6 ノード 3, 4 間の変数 x_{ijl}^k

t_i^k : センサ $k \in S$ で収集したデータを各ノードから

TPL $l \in P$ で送信するのに必要な電力量

加えて、1 回当たりの電池交換作業費用を c_1 、1J 当たりの電力消費費用を c_2 、リレーを 1 個設置した場合の単位期間当たり費用を c_3 とする。ここで、容量が E_i である電池の価格を a_i とすると、 c_2 は $c_2 = a_i/E_i$, $i \in M$ (各電池における 1J 当たりの電力消費費用はすべて同一であるとしていることに注意) と算出される。また以下では、ある巡回で電池交換を行ってから、ネットワーク内のいずれかの電池の電力が枯渇するまでの期間をネットワーク寿命と呼ぶ。

3.4 定式化

以上を準備して、WSN を総費用が最小となるように計画する問題を定式化する。

データを収集・処理するのはセンサだけである。そこで、 e_i は $i \in S$ である場合は $e_i = s^i$ であり、 $i \in R$ である場合は $e_i = 0$ であるものとする、ノード $i \in M$ で単位期間に必要な電力量 $F_i(x)$ は

$$F_i(x) = \sum_{(i,j,l) \in A} \sum_{k \in S} t_i^k x_{ijl}^k + \sum_{(j,i,l) \in A} \sum_{k \in S} r^k x_{jil}^k + e_i, \quad i \in M$$

となる。ここで、上式の右辺第 1 項はデータの送信に、第 2 項はデータの受信に、そして第 3 項はセンサでデータを収集・処理するのに必要な電力量である。

各ノードで単位期間に必要な電力量が定まれば、それと各ノードの電池容量よりネットワーク寿命 $d(x)$ が次で定まる。

$$d(x) = \min_{i \in M} \{E_i/F_i(x)\} \quad (1)$$

ネットワーク寿命が $d(x)$ ならば、電池交換作業を $d(x)$ の間隔で実施しなければならない。よって、単位期間当たりの電池交換作業費用は $(c_1/d(x))$ となる。つまり、式 (1) より $1/d(x) = \max_{i \in M} \{F_i(x)/E_i\}$ であるから、単位期間当たりの電池交換作業費用は

$$c_1(1/d(x)) = c_1 \max_{i \in M} \{F_i(x)/E_i\} \quad (2)$$

となる。次に電力消費費用について考える。先に、ある巡回において交換する電池は、次の巡回までに電力が枯渇する電池だけで、次の巡回まで寿命のある電池は交換しないでよいものとした。したがって、ノード $i \in M$ の電池は $\lfloor (E_i/F_i(x))/d(x) \rfloor$ 回の巡回に一度の割合で交換すればよいことになる。ただし、 $\lfloor * \rfloor$ はフロア関数である。電池交換が必要となる巡回の回数が

求まれば、ノード $i \in M$ の電池の単位期間当たりの電力消費費用が次で求まる。

$$a_i / ([\{E_i/F_i(x)\}/d(x)] \cdot d(x)) \quad (3)$$

しかしながら、上式は煩雑でこのままでは取り扱いが困難である。そこでここでは、式 (3) のフロア関数を緩和し、式 (3) の分母は $((E_i/F_i(x))/d(x)) \cdot d(x)$ であるものと近似する。すると、ノード $i \in M$ の電池の単位期間当たりの電力消費費用は $a_i/(E_i/F_i(x)) = c_2 \cdot F_i(x)$ となる。そしてこれより、単位期間当たりの総費用を最小とするためには、次式を最小にすればよいことになる。

$$\begin{aligned} c_1 z + c_2 \sum_{i \in M} \left\{ \sum_{(i,j,l) \in A} \sum_{k \in S} t_i^k x_{ijl}^k \right. \\ \left. + \sum_{(j,i,l) \in A} \sum_{k \in S} r^k x_{jil}^k + e_i \right\} \\ + c_3 \sum_{i \in R} \sum_{l \in P} y_{il} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 z は次式を満たす変数である。

$$\begin{aligned} \sum_{(i,j,l) \in A} \sum_{k \in S} t_i^k x_{ijl}^k + \sum_{(j,i,l) \in A} \sum_{k \in S} r^k x_{jil}^k \\ + e_i \leq E_i z, \quad i \in M \end{aligned} \quad (5)$$

ここで式 (5) は、式 (4) の第 1 項は式 (2) の右辺と等価であることを保証する。よって、式 (4) の第 1 項は電池交換作業費用、第 2 項はネットワーク内の総電力消費費用、第 3 項はリレー設置費用となる。また、各センサで収集したデータをゲートウェイまで伝送するためには、各センサを始ノードとする $|S|$ 個の伝送ルートを生成する必要がある。つまり、 (x_{ijl}^k) は

$$\begin{aligned} \sum_{(i,j,l) \in A} x_{ijl}^k - \sum_{(j,i,l) \in A} x_{jil}^k \\ = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}, \quad i \in M, k \in S, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\sum_{(i,0,l) \in A} x_{i0l}^k = 1, \quad k \in S, \quad (7)$$

を満たす必要がある。ここで、右辺が 1 である場合の式 (6) は、センサ k が始ノードとなることを保証する。また、右辺が 0 である場合の式 (6) は保存方程式であり、センサ k 以外のノード $i \in M$ は入次数と出次数が等しくなることを保証する。そして式 (7) は、ゲートウェイが終ノードとなることを保証する。

また、ある伝送ルートがアーク (i, j, l) を含む場合

は、ノード i の TPL が l に設定されることを保証するためには次の式 (8) を、各ノードにおいて TPL が同時に 2 つ以上の水準に設定されないことを保証するためには次の式 (9) を満たす必要がある。

$$x_{ijl}^k \leq y_{il}, \quad (i, j, l) \in A, k \in S \quad (8)$$

$$\sum_{l \in P} y_{il} \leq 1, \quad i \in M \quad (9)$$

このとき、単位期間当たりの総費用が最小となるように、リレーの設置数とその設置場所、各センサと各リレーの TPL、伝送ルートを同時に計画する問題は、式 (5) から式 (9) の制約条件の下で、式 (4) の目的関数を最小化する問題 (P) に定式化される。文献 [4] にはこの問題の近似最適解を求めるアルゴリズムが提案されているが、ここでの説明は割愛する。

なお、ノード $i \in R$ には、それが生成されたいずれかの伝送ルートに含まれている場合に限りリレーを設置することになる。また、式 (2) より z の最小化は $d(x)$ の最大化と等価である。よって、上述の問題は $c_1 = 1$ とし、 $c_2 = c_3 = 0$ とすればネットワーク寿命を最大化する問題となる。また、 $c_2 = 1$ 、 $c_1 = c_3 = 0$ とし、 $E_i = \infty$ 、 $i \in M$ とすれば上述の問題はネットワーク内の総電力使用量を最小化する問題となる。

4. ロンドン地下鉄 WSN における検証

既述のように、上で述べた問題 (P) は、ロンドン地下鉄に設置された WSN の経済性を検証する際に提案された。そこでここでは、ロンドン地下鉄の WSN に問題 (P) を適用し、その経済性を検証してみる。ただし、ここでは単位期間は 5 秒とし、TPL は TPL 1 (-25 dBm)、TPL 2 (-10 dBm)、TPL 3 (0 dBm) の 3 水準とした。また、センサ $k \in S$ でデータを収集・処理するのに必要な電力量と、そこで収集したデータを各ノードで受信するのに必要な電力量はそれぞれ

$$s^k = 5.25 \times 10^{-3} (\text{J}), \quad r^k = 29.55 \times 10^{-3} (\text{J})$$

とし、センサ $k \in S$ で収集したデータを各 TPL で送信するのに必要な電力量は、それぞれ

$$\begin{aligned} t_1^k &= 6.0 \times 10^{-3} (\text{J}), & t_2^k &= 16.5 \times 10^{-3} (\text{J}), \\ t_3^k &= 26.1 \times 10^{-3} (\text{J}), \end{aligned}$$

とした。さらに、電池交換作業費用に関しては、設置センサ数が 26 個の場合は $c_1 = 200$ (£/回) とし、設置センサ数が 50 個の場合は $c_1 = 300$ (£/回) とし

た. 加えて, 各ノードにおける電力消費費用は $c_2 = 3.7 \times 10^{-4}$ (£/J) とし, リレー 1 個当たりの設置費用は $c_3 = 6.34 \times 10^{-6}$ (£/単位期間) とした. また, 各ノードの電池容量はすべて同一で, $E_i = 5.4 \times 10^6$ (J), $i \in M$ であるとした.

現在の WSN は, 問題 (P) の 1 つの可能解であると思なすことができる. そこで, 現在の WSN (図 2 参照) に対する問題 (P) の目的関数値を求め, それを年間に換算してみると £3,797 となる. 他方, 文献 [4] において提示されたアルゴリズムで問題 (P) の近似最適解を求めると, その目的関数値は年間で £3,282 となる. これより, 現在設置されている WSN は, TPL の設定やデータの伝送ルートを再検討すると, 総費用を年間で約 13.6% 削減できることが確認できる. 図 7 は, 問題 (P) を解いて得られた, 現在の WSN の改善案である. ただし, 図 7 と次に示す図 8 においては, 各ノードにおける TPL の違いを塗りつぶしの濃淡で区別しており, 白色, 灰色, 黒色のノードはそれぞれ TPL を 1, 2, 3 に設定することを示している.

なお, 現在の WSN には 26 台のセンサが設置されているが, それを 50 台に増やした場合と, 96 台に増やした場合の WSN 案を求めてみると, 年間の総費用はそれぞれ £11,250, £20,026 となる [4]. 図 8 は, 設置するセンサ数を 50 台に増やした場合の WSN 案である. 図 7 と図 8 を比較すると, 図 7 においてはリレーを使用していないのに対して, 配置センサ数がより多い図 8 においては, 全部で 9 台のリレーを使用して総費用の最小化を図っている.

5. おわりに

はじめに触れたように, 鉄道構造物の保守管理においては定期的に全般検査が実施される. それゆえ, WSN 内の電池交換作業を, その全般検査の際にあわせて実施できるように計画すると, つまりある全般検査から次の全般検査までの間に電力枯渇電池が発生しないように WSN を計画すると, 電池交換作業費用をさらに節減できる可能性がある. よって今後は, 電池交換作

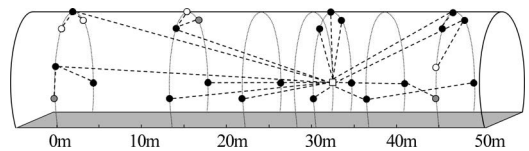


図 7 問題 (P) を解いて求めた WSN 案 (センサ 26 台)

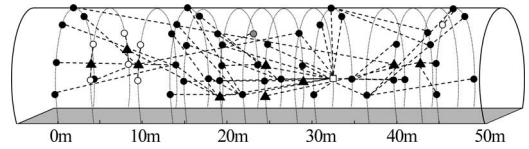


図 8 問題 (P) を解いて求めた WSN 案 (センサ 50 台)

業は全般検査とあわせて実施するという条件の下で, WSN を計画する問題についても研究を進める必要がある. また, 鉄道構造物の中には, インターネットなどの一般の通信手段を利用できない劣悪な通信環境に設置されているものも数多く存在する. よって今後は, 各センサで収集したデータを, ゲートウェイに付置したストレージに一定期間蓄積しておき後日それを回収する, いわゆる蓄積運搬型の WSN を総費用が最小となるように計画する方法についても研究を進める必要がある.

参考文献

- [1] 国土交通省鉄道局 (監修), 鉄道総合技術研究所 (編), 『鉄道構造物等維持管理標準・同解説 (構造物編) トンネル』, 23-25, 2007.
- [2] P. J. Bennett, K. Soga, I. J. Wassell, P. Fidler, K. Abe, Y. Kobayashi and M. Vanicek, “Wireless sensor networks for underground railway applications: case studies in Prague and London,” *Smart Structures and Systems*, 6 (5-6), 619-639, 2010.
- [3] A. Hada, K. Soga, C. Middleton, N. Hoult, P. Fidler, P. J. Bennett, K. Leung and A. Bachir, “Condition monitoring system for railway structures in Hammersmith,” *The 9th World Congress on Railway Research*, 2011.
- [4] A. Hada, K. Soga, R. Liu and I. J. Wassell, “Lagrangian heuristic method for the wireless sensor network design problem in railway structural health monitoring,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, 20-35, 2012.