

高速道路上の交通規制材監視システムにおける危険度推定

岡井 貴之 (株式会社 CAE ソリューションズ フルイド事業部),
大屋 英稔 (徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部),
大畑 謙二 (西日本高速道路エンジニアリング四国株式会社 施設管理部)

Risk Estimation in Management Systems for Traffic Regulation Devices in Expressways
Takayuki OKAI (Fluid Division, CAE Solutions Co. Ltd.)

Hidetoshi OYA (The Institute of Technology and Science, The University of Tokushima)

Kenji OBATAKE (The Plant Maintenance Division, West Nippon Expressway Engineering Shikoku Co. Ltd.)

Abstract

This paper shows a risk estimation function in management systems for traffic regulation devices in expressways. Expressways mean Since expressways play the basis and very important roles in modern society such as transportation of various resources, travel and so on, good traffic environment in expressways have to be maintained. In order to maintain or fix expressways, it is necessary to regulate and/or control the traffic and a large number of traffic regulation devices are used. In this paper, we show an outline of the management system and the risk estimation function in the management system for traffic regulation devices in expressways.

キーワード：交通規制材，監視システム，危険度推定，可視化，高速道路

(Traffic Regulation Devices, State Management Systems, Risk Estimation, Visualization, Expressways)

1. はじめに

高速道路や一般道路において，工事や補修作業の際には，交通規制を行う必要がある．交通規制とは，供用中の道路上で工事等を施工する際，一般通行車両，及び作業員の安全を確保するため，交通監視員の配置や標識等の設置によって危険を知らせたり，交通を規制する作業のことである．また，交通規制の際には，該当する区間にラバーコーン（ロードコーンとも呼ぶ）などの規制材を設置しなければならない．

高速道路上の規制においては，ラバーコーンが，規制する区間の起終点，及び区間内に 20 [m] ~ 30 [m] 間隔で交通監視員によって設置される．標準的な規制区間は，2,000 [m] であるが，実際には，1,000 ~ 6,000 [m] まで様々であり，6,000 [m] の場合，200 ~ 300 個のラバーコーンが設置されることになる．更に，規制区間に設置されたラバーコーンは，風雨等のみならず，ドライバの運転操作ミス等により，自動車衝突することで設置位置から移動してしまう場合がある．ラバーコーンが設置位置からずれた場合，移動後の位置が規制車線にあれば，大きな問題とはならないが，走行車線にあった場合には，後続車両の事故に繋がる危険性があり，早急に対応する必要がある．従来は，設置後のラバーコーンについては，交通監視員が，適当な時間間隔で巡回し，その状態を監視する「人為的な監視手法」がとられていた．しかしながら，このような人為的監視方法では，ラバーコーンの設置状態に異常が生じても直ちに検知することは出来ない上，1,000 ~ 6,000 [m] の規制区間を巡回する監視員を割り当てなければならないなど，効率性・安全性の面からも問題点がある．

このような問題に対し，文献⁽²⁾では，規制区間に設置する個々のラバーコーンにセンサを付加することによって，ラバーコーンに異常が生じたか否かを検知するシステムが提案されている．しかしながら，文献⁽²⁾のシステムでは，異常を発生したラバーコーンが，規制車線にあるのか走行車線にあるのかを判定することはできない．また，高速道路においては，規制区間が長い（1,000 [m] オダ）ため，センサからのデータを送受信するためにラバーコーンに設置するセンサとは別にデータ中継システムが必要となる．

このような背景から，筆者らは，高速道路上の規制区間において，ラバーコーンに加速度センサ，マイコン等を設置し（以後，加速度センサ，マイコン等を含めて，ラバーコーンセンサと呼ぶことにする．），ラバーコーンの状態をオンラインで監視できる新しい交通規制材監視システムの設計・開発を進めてきた．具体的には，異常（何らかの外的要因により，設置位置から移動）を生じたラバーコーンが，設置位置からどのように変位したかを危険度として表示することができる監視システムである．また，設置位置からずれた場合の異常のみでなく，電池残量低下など，その他の異常についても検知することが可能であり，現在，特許出願中である⁽⁶⁾．本論文では，筆者らが開発している交通規制材監視システムにおいて，その概略とラバーコーンが何らかの要因によって設置位置からずれた場合の危険度推定・表示機能について報告する．

2. 交通規制材監視システム

筆者らが開発している交通規制材監視システムは，下記のもので構成されている．

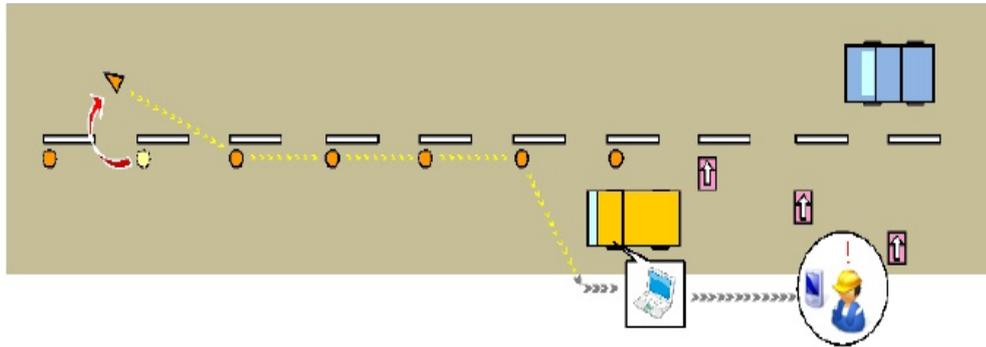


図 1 交通規制機材監視システムの概念図

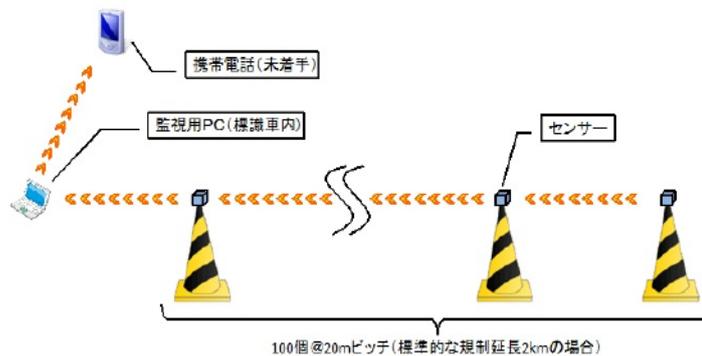


図 2 交通規制機材監視システムにおけるラバーコーンセンサ間のデータ伝送の概略

- (i) ラバーコーンセンサ
- (ii) 状態監視用コンピュータ

交通規制材監視システムの概念図を図 1 に示す。高速道路上の交通規制においては、ラバーコーンセンサは、20 ~ 30 [m] 間隔で設置される。一方、高速道路の維持管理のために行う規制については、標準的な区間が 2,000 [m] であることから、通常は、約 100 個のラバーコーンが設置されることになる。規制区間に設置されたラバーコーンが、何らかの要因で設置位置から移動した場合(図中、左から 2 つ目のラバーコーン)、異常が生じた際のデータを各ラバーコーンに設置されたラバーコーンセンサから順々に規制区間の端点(起点、あるいは終点)にある状態監視用コンピュータへ伝送し、状態監視用コンピュータで危険度を推定・表示を行う。各ラバーコーンセンサ間のデータ伝送、及びラバーコーンセンサの機能については、それぞれ図 2、及び 3 を参照されたい。

3. ラバーコーンセンサ

ラバーコーンセンサは、加速度を計測するためのセンサ、信号を送受信するための通信モジュール、駆動用の電池で構成されている。また、本論文では、複数あるラバーコーンセンサの中で、ある特定のラバーコーンセンサに着目した場合、“自ラバーコーンセンサ”と呼ぶ。更には、あるラバーコーンセンサに着目した場合、そのラバーコーンに隣接するラバーコーンで状態監視用コンピュータ側にあるも

のを”上流側ラバーコーンセンサ”(もう一方を”下流側ラバーコーンセンサ”)と呼ぶことにする。更に、ラバーコーンセンサには、個別識別するための管理番号(ID)が、状態監視用コンピュータ内で付与される。

ラバーコーンセンサは、ラバーコーンに異常(加速度の変化)が生じた場合、あるいはセンサ自身の異常状態を示すデータを送信する機能を有している。送信されたデータは、上流側ラバーコーンセンサで受信され、受信したデータを再度送信することで、順次、上流側ラバーコーンセンサが受信する。これを繰り返すことにより、最終的に状態監視用コンピュータへデータが送信される。ラバーコーンセンサの主な機能は、以下のとおりである。

- (i) 加速度データ取得機能

ラバーコーンの加速度情報を検出できる加速度センサを用いており、数サンプル ~ 数十サンプル分の加速度情報の履歴もあわせてラバーコーンセンサ内のマイコンにデータを転送できる機能を有している。

- (ii) データ送受信機能

状態監視用コンピュータとラバーコーンセンサ間、及びラバーコーンセンサ同士のワイヤレス通信が可能となっている。この際、前述の加速度情報や後述する受信信号の電界強度などを状態監視用コンピュータに通知することが出来る。これらの機能は、実用化に向けて有用な特長となると考えられる。

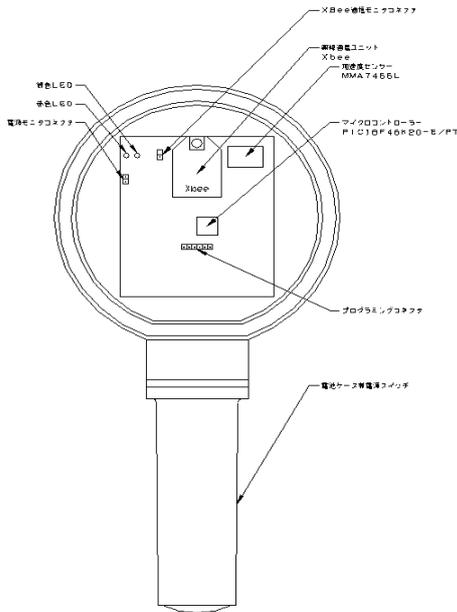


図3 ラバーコーンセンサの概観図

(iii) 電界強度測定機能

隣接するラバーコーンセンサからの信号を受信した際の電界強度を計測することが出来る。この機能を用いることで、状態監視用コンピュータにおいて、ラバーコーンセンサの設置位置、すなわち整列順を識別することが出来る。また、初期化の際に生成されるラバーコーン設置位置情報とこの機能と連携させる(機能拡張)ことによって、初期化動作の際の異常や復旧作業の際に新たに挿入したラバーコーンセンサを自動的に検出し、初期化することなく、継続した状態監視が可能なシステムにカスタマイズすることができる。

(iv) 電池残量監視機能

各ラバーコーンセンサには、電池残量を監視する機能があり、あらかじめ設定した閾値を下回ると異常状態と認識し、状態監視用コンピュータに通知する機能を有している。

ラバーコーンセンサの概観図を図3に示す。

4. 交通規制材監視システムにおける危険度推定

ラバーコーンセンサには、3軸の加速度センサが内蔵されており、加速度情報の変化が検出されると、直ちに状態監視用コンピュータへデータを送信する機能を有している。状態監視用コンピュータでは、ラバーコーンセンサから得られる加速度情報 ($a_x(k), a_y(k), a_z(k)$) を用いて、変位を推定するが、そのための方法としては、積分を用いる方法、ファジィ推論を用いる方法、ニューラルネットワークを用いる方法など、様々な方法が考えられる⁽³⁾⁽⁴⁾。本論文では、計算を容易にするため、ラバーコーンを剛体とみなし、外

力によるインパルス応答として、変位を推定することとした(4.1参照)。ここで、加速度情報 a_x, a_y, a_z は、 N サンプル分得られる(サンプリング間隔毎に N セット)ことに注意する[†]。

4.1 危険度推定

ラバーコーンとラバーコーンセンサが一体化された装置のモデルを次式のような動的システムとして考える。

$$m\ddot{x}(t) = f(x, y, z, t) + \delta(t) \quad (1)$$

具体的には、実験によって得られるデータに基づいて、 $f(x, y, z, t)$ を決定し、変位量を求める。ここで、 $x(t)$ は、 x, y, z 方向の成分を表す3次元ベクトルである。ただし、厳密に $f(x, y, z, t)$ を求めるのは、容易ではない。そこで、簡単のために $f(x, y, z, t)$ を線形動的システムモデルとして、速度に比例した抵抗力が働くとする。また、各方向の相関は、十分小さいとして、無視することとした。したがって、(1)式は、次式のようになる。

$$m\ddot{x}(t) = -\alpha\dot{x}(t) + \delta(t) \quad (\alpha > 0) \quad (2)$$

ここで、(1)式と異なり、 x 方向のみ(1軸方向のみ)を表していることに注意されたい。

次に、(2)式を次式のように変形しておく。ただし、 $\delta(t)$ は、インパルス外乱なので、 $\delta_m(t) = \delta(t)/m$ もインパルス外乱とみなす。また、 $\alpha = a/m$ である。

$$\ddot{x}(t) = -\alpha\dot{x}(t) + \delta_m(t) \quad (3)$$

(3)式をラプラス変換して、 $X(s)$ を求めると

$$X(s) = \frac{1}{s(s + \alpha)} \quad (4)$$

となり、逆ラプラス変換すると、次式のようになる⁽⁵⁾。

$$x(t) = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (5)$$

$\alpha > 0$ であるので、十分に時間が経過すれば、変位 $x(t)$ は、

$$x(t) = \frac{1}{\alpha} \quad (6)$$

のように求められる(実際には、 α を実験によって求める)。

以上のことから、交通規制材監視システムにおいては、次のようにして変位を求めることとした。

変位推定アルゴリズム

- (i) ラバーコーンセンサから得られる各軸方向の加速度情報の定常値からの偏差を計算
- (ii) 得られた加速度の偏差とデータベースとを照合
- (iii) データベースファイルに近い結果を内挿し、変位を算出

ラバーコーンの変位は、加速度情報に基づき、上記のような手順で求められるが、データベースについては、4.2で述べる動作実験を通して作成した。

[†] N は、設計者によって設定可能なパラメータである。

表 1 実験データに基づき構成する平均変位, 及び分散のデータベースの一例

a_x	a_y	a_z	平均変位 x	平均変位 y	平均変位 z	分散
a_{x1}	a_{y1}	a_{z1}	$\bar{\mu}_{x1}$	$\bar{\mu}_{y1}$	$\bar{\mu}_{z1}$	σ_1
a_{x2}	a_{y2}	a_{z2}	$\bar{\mu}_{x2}$	$\bar{\mu}_{y2}$	$\bar{\mu}_{z2}$	σ_2
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
a_{xS}	a_{yS}	a_{zS}	$\bar{\mu}_{xS}$	$\bar{\mu}_{yS}$	$\bar{\mu}_{zS}$	σ_S

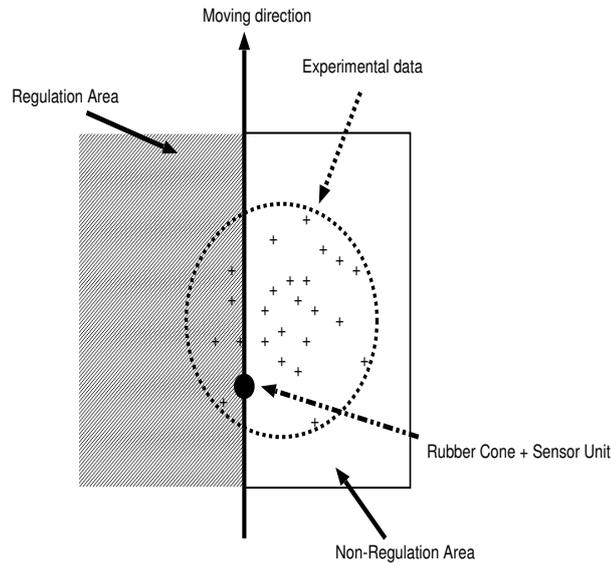


図 4 交通規制材監視システムにおける実験結果の一例 (サンプル)

4.2 危険度推定・表示

危険度推定・表示は, 変位推定結果と実験によって得られたデータをまとめたデータベースの情報に基づいて行う。具体的には, 正規分布に基づいて危険度を算出し, 危険度表示については, 2次元コンタマップとした。

正規分布に基づいた危険度推定・表示では, 実験データによって, 平均変位, 分散を求めておく。例えば, 実験によって, 図4のような結果が得られたとしよう。このとき, ラバーコーンの変位も実際に計測し, 実験毎に記録されていることに注意されたい。また, 加速度情報も同時に状態監視用コンピュータに記録される (N サンプル分) ため, 次のようにして, 平均変位, 分散を求めることが考えられる。

- (i) 記録された加速度情報が近いものを同一グループとして分類する。
- (ii) 同一グループ内のデータ (変位) から, ラバーコーンの平均変位を算出する。
- (iii) 得られた平均変位と実験データに基づき, 分散を求める。

実験データを増やし, このような平均変位, 及び分散の情報を含むデータベースを構築する。例えば, データベースとしては, 表1のようなものが考えられる^{††}。

^{††} 現在, 実験によって得られるデータにどの程度の偏りがあるかを表すパラメータの導入についても検討しており, あわせてデータベースのカスタマイズも行う予定である。

これらのことから, システム稼働中における危険度推定・表示は, 次のようにして行う。まず, ラバーコーンの状態が, 何らかの外的要因で変化すると, ラバーコーンセンサから, 加速度情報, 自局番, タイムスタンプ等を含めたデータが状態監視用コンピュータへ送信されてくるため, 局番から, 何番目のラバーコーンセンサからのデータであるのかを状態監視用コンピュータで認識することができる。また, 加速度情報から, 4.1 で述べた変位推定により, ラバーコーンの変位を推定する。次に, 加速度情報と表1のデータベースを照合し, 分散を算出する。この際, 加速度情報と誤差なく適合することは少ないため, 閾値を設定する, あるいは内挿, 外挿などの処理を含めて, 分散を決定する。分散が決定されると, 推定したラバーコーンの変位を中心に正規分布の等高線 (2次元コンタマップ) を描く。この際, 正規分布の広がりには, データベースの分散を用いる。危険度の表示において, 正規分布の等高線は, 予めユーザが指定できるようにすることも可能であるが, 本論文では, 3 ~ 4段階程度に設定した。また, ラバーコーン設置位置からの変位を鑑み, 正規分布を設置位置方向に伸長する。以上をまとめると, 次のようになる。

- (i) どのラバーコーンに異常が発生したかをチェック
- (ii) 加速度情報から, ラバーコーンの変位を推定
- (iii) 加速度情報と表1のデータベースを照合
- (iv) 分散を決定

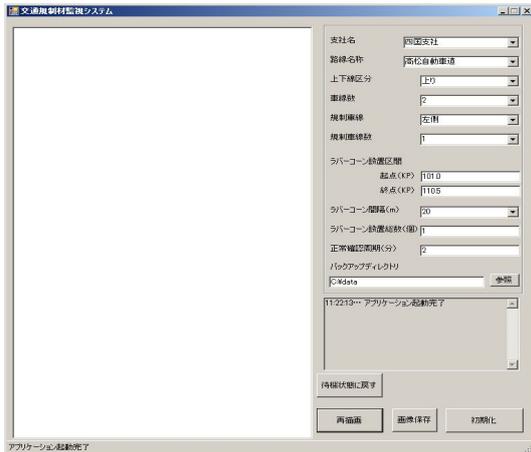


図 5 ソフトウェア起動画面

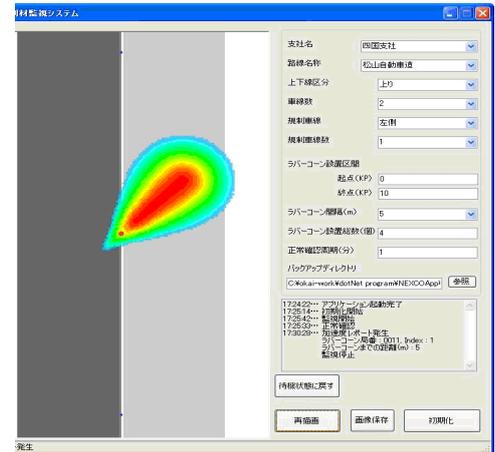


図 6 ラバーコーンに外力が加わった（加速度変化を生じた）場合の危険度表示の一例

(v) 推定した変位，分散（必要であれば，偏り等も含めて）に基づいて正規分布を調整

(vi) 得られた正規分布による 2 次元コンタマップを設置位置方向に伸長

5. 実験によるパラメータの選定

前述した変位推定・危険度推定においては，実験を行い，そのときに得られる加速度情報と実際に計測した変位を照合し，パラメータを適切に選定する必要がある．そこで，実際にラバーコーンに外力を加え，その際に得られる加速度センサ出力，及びラバーコーンの変位を測定した．実験の概略は以下のとおり．

(i) ラバーコーンに加える外力

(a) 外力

外力については，脚立に鉄パイプを固定し，鉄パイプに約 10 [Kg] の錘（砂袋）を吊るして，錘を持ち上げて自由落下させて発生させた．これは，同じ条件で実施することで可能な限り，同じ外力が繰り返し加えられるようにするためである．

(b) 外力の加わる位置

ラバーコーンが設置される現場では，大型車から小型車まで様々な車種が通行する．そのため，衝突する位置も異なると考えられる．そこで，外力を加える位置を次の 3 つとした．

- ラバーコーン上段部
- ラバーコーン中段部
- ラバーコーン下段部

(c) ラバーコーンの向き

ラバーコーンの向きとして，規制材の発光面に向けた方向を「0 度」とし，反時計まわりに 45 度ずつ回転させることとした．

(d) 外力の強弱

外力の強弱については，錘を持ち上げる高さを 3 段階（強，中，弱）に設定することで強

弱の差異をつけ，それによる加速度センサ出力，変位を測定した．

(ii) 変位の測定

変位の測定は，実際に巻尺を用いて，実験毎にミリメートル単位で測定した．

表 2，及び 3 に実験の際にラバーコーンセンサから得られたデータファイル，及び変位測定結果の一例を示す．以上のような実験から得られたデータを基にデータベースを構築し，危険度表示を行った．

6. 危険度推定・表示のための可視化ソフトウェア

危険度推定結果を可視化するソフトウェアは，交通監視員が現場で利用することを鑑み，操作が容易であることが要求される．そのため，GUI（グラフィカルユーザインターフェース）を用いて種々の設定をするようにし，交通監視員の入力作業を出来るだけ軽減するようなソフトウェアを開発した．

(i) GUI，及びソフトウェア起動時の画面を図 5 に示す．図 5 からわかるように，監視員は，下記の項目を選択・入力する．

- 支社名（プルダウン）
- 路線名称（プルダウン）
- 上下線区分（プルダウン）
- 車線数（プルダウン）
- 規制車線（左・右）（プルダウン）
- 規制車線数（プルダウン）
- ラバーコーン設置区間 [KP]
- ラバーコーン間隔 [m]（プルダウン）
- ラバーコーン設置総数
- 正常動作確認周期（分）
- データ格納ディレクトリ

(ii) ラバーコーンセンサからのデータファイル取得
ラバーコーンセンサから得られるデータファイルは，インストールフォルダ内にある「Input」フォルダ

表 2 実験の際にラバーコーンセンサから得られたデータファイルの一例

```
0012,2011/11/09 19:16:03,, ← タイムスタンプ
0,-59,0, ← 各軸方向の加速度データ
0,60,1,
1,59,0,
-2,-60,-1,
20,57,50,
224,112,40,
39,103,-5,
∴ ∴ ∴
```

表 3 実験における変位測定結果の一例

変位 [mm] (1 回目)	変位 [mm] (1 回目)	変位 [mm] (1 回目)
1200	1240	1400
510	460	560
310	410	400

に記録されるようになっているため、Input フォルダを監視しておき、新規ファイルが記録された際にファイル名から、ポーリングレポート、加速度レポート、及びエラーレポート（付録参照）のいずれであるかを識別することができる。したがって、ポーリングレポート、加速度レポート、及びエラーレポートのそれぞれに応じた処理を行い、画面上に表示することになる。

- (iii) システムの初期化、及び正常確認信号送信命令可視化ソフトウェアでは、危険度等の情報を表示するのみでなく、ラバーコーンセンサへ初期化、及び正常確認信号送信の命令を実行する機能を有する。

7. むすび

本論文では、高速道路を規制する際に使用する交通規制材の状態（正常、あるいは設置位置からのずれ、電池残量等の異常など）をオンライン監視する交通規制材監視システムの概要、および危険度推定・表示機能について報告した。筆者らの開発している交通規制材監視システムは、従来⁽²⁾と異なり、ラバーコーンの変位位置を推定し、推定結果と実験結果に基づいた危険度を表示するという特長を有している。また、本交通規制材監視システムでは、小電力通信モジュールを用いているため、規制区間が長くなった場合でも従来のような中継システムを必要としないという点でも有用である。

今後の課題は、実用化に向け、危険度推定の精度向上のために、推定アルゴリズムのカスタマイズを行うことが挙げられる。また、長時間の運用に対応するための省電力化などにも取り組む予定である。

なお、本研究を進めるにあたり（株）江口電機の小原様、川上様に甚大なる御協力を頂いた。ここに謝意を記す。

参考文献

- (1) 越 正毅，“交通工学通論”，技術書院，1989。
- (2) オムロン株式会社，“標識器具及びそれを用いた状

態監視システム”，特開平 10 - 18242，特許庁

- (3) 太田 良巳，アイダンオメル，“加速度から変位を求める積分手法と実地震記録への適用”『海 - 自然と文化』東海大学紀要海洋学部，Vol.5，No.2，pp.1-12，2007。
- (4) 阿部 雅人，藤野 陽三，“不規則外力に対する加速度記録からの最大応答変位推定”，土木学会論文集，Vol.66，No.3，
- (5) 竹内 俱佳，萩野 剛二郎，“制御工学”，培風館，1998。pp.477-490，2010。
- (6) 西日本高速道路（株），西日本高速道路エンジニアリング四国（株），“標識具の状態監視システム”，特願 2012 - 112195

付 録

筆者らの開発している交通規制材監視システムにおいては、ラバーコーンセンサから送信されるデータとして、下記の 3 つのレポートがある。

(i) ポーリングレポート

状態監視用コンピュータから、定期的に正常に動作しているか否かを確認するリクエストが最も近いラバーコーンセンサへ送信され、下流側ラバーコーンへ順次伝送される。リクエストを受信したラバーコーンセンサが、正常であれば、その旨を状態監視用コンピュータへ通知する際のレポート（データ）。

(ii) 加速度レポート

加速度情報に変化を生じた際に加速度情報、自局番等を状態監視用コンピュータへ通知する際のレポート（データ）。

(iii) エラーレポート

電池残量低下、通信モジュールの異常などを通知するためのレポート。