

# リスクに基づく鉄道信号システムの改善効果の評価法

岩田 浩司\* 渡辺 郁夫\*\*

## A Risk Evaluation Method for the Improvement of Railway Signalling Systems

Koji IWATA Ikuo WATANABE

High-level safety is essential for the railway signalling systems, for which various measures are taken to prevent failures susceptible to accidents based on the fail-safe concept, in view of the fact that the failures of the systems will potentially cause serious accidents. An International Standard, requiring reliability, availability, maintainability, and safety of the railway signalling systems, has been more important recently. In these kinds of systems, safety is the most important matter. However, considering that current high-level of availability is also required, we try to show a case study on a risk evaluation, based on costs per hour, which can represent both safety factors and availability ones as the same measure.

キーワード：鉄道信号装置, リスク, 安全性, アベイラビリティ

### 1. はじめに

鉄道信号装置は、装置の障害が重大事故に直結する可能性が大きいことから信頼性ととも高い安全性が要求される。よって、鉄道信号装置内に故障が発生しても安全側に制御できる様に、「フェールセーフ」を基本に設計されている。鉄道信号装置の安全性評価には、マルコフモデル、FTA (Fault Tree Analysis), FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) などが用いられる。これら手法は不安全な事象の抽出と、これら不安全事象への対策の十分性確認を主目的とする。また、安全性対策による危険側障害の抑止効果とその限界を定量化する手法を提案し、システム全体の安全性確保を効率的に実現する手法に取り組んできた<sup>1, 2)</sup>。

一方、RAMS 国際規格も発行され<sup>3)</sup>、R (信頼性)、A (アベイラビリティ)、M (保守性)、S (安全性) を観点に、安全性だけでなくアベイラビリティの面からの解析・評価も求められつつある。そこで、筆者らは鉄道信号装置へ効率的にアベイラビリティ対策を適用するための評価法にも取り組んできた<sup>4)</sup>。

鉄道においては安全性の確保が最優先であるのは言うまでもないが、アベイラビリティについても同時に高いレベルが求められる昨今の状況に鑑み、安全性とアベイラビリティについて、リスクを単位時間あたりのコストという同一尺度で相互の関係を解析したケーススタディを行った。以下、その結果について述べる。

\* 信号通信技術研究部 (列車制御)

\*\* 信号通信技術研究部

### 2. リスク評価の考え方

鉄道信号装置のRAMS指標については、信頼性 (R) と保守性 (M) の向上がアベイラビリティ (A) と安全性 (S) の向上に関係すると考えると、アベイラビリティと安全性が鉄道利用者に直接関わる指標である。これら指標値は、鉄道信号装置が設置されている線区の重要性に基づき設定される。この重要性の評価指標としては、例えば、障害の発生頻度とその影響度の組み合わせで定義されるリスクが考えられる。この線区ごとのリスクの大きさにより、鉄道信号装置のアベイラビリティと安全性の目標値は定められる。

例えば、リスクを鉄道信号装置の障害の発生頻度とその障害に伴うコスト (損失) の積と定義する。安全側の障害  $i$  (列車は停止するものの死傷者を伴わない障害)、危険側の障害  $j$  (死傷者を伴う障害) の単位時間あたりの発生頻度は、それぞれ安全側障害発生頻度  $a_i$  ならびに危険側障害発生頻度  $s_j$  とする。また、安全側障害  $i$ 、危険側障害  $j$  の発生による人的損失、営業損失、物的損失の合計値である安全側障害による被害額、危険側障害による被害額  $j$  とすると、リスク (Risk) はそれぞれの発生頻度と影響度を積算した式 (1) で表すことができる。

$$Risk = \sum (a_i \times \text{被害額}_i) + \sum (s_j \times \text{被害額}_j) \quad (1)$$

なお、個々の安全側障害  $i$ 、危険側障害  $j$  は、FTA、FMEA により抽出する。

以下、この考え方にに基づき、ケーススタディを実施する。

特集：信号通信技術

3. ケーススタディ

3.1 システム構成

3.1.1 対象線区の定義

解析対象線区のモデルを表1に示す。区間は、区間A～区間Dの4つに区分した。折り返しは、区間A内の起点と区間D内の終点で、それぞれ行う。また、区間A～区間Cと区間Dで運転本数が異なることから、区間C内の終点方の1駅においても折り返し可能とした(図1)。なお、機器の障害発生頻度、障害に伴う停止時間は区間に依存しないとし、運転時間は19時間とした。

表1 解析対象線区

区間長	区間A	区間B	区間C	区間D
連動駅数	Type (a) 1駅 Type (b) 2駅 Type (c) 0 Type (d) 0 Type (e) 0	0 4駅 0 0 0	0 3駅 1駅 0 0	0 0 8駅 1駅
信号機間隔	0.44km	同左	同左	1.3km
列車本数	22本/h	同左	同左	5本/h
編成数	80編成	同左	同左	20編成
混雑率 ※定員 100人/両	150%	同左	同左	100%

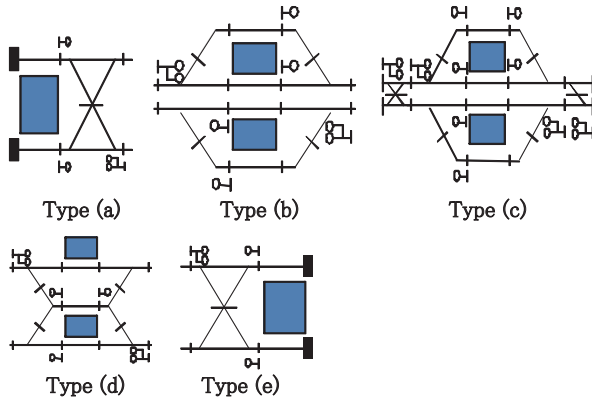


図1 連動駅の線形

3.1.2 対象装置の定義

解析対象装置は、運行管理装置、転てつ機、連動装置、信号機、軌道回路とした。各区間における装置台数を図2に示す。

3.2 鉄道信号装置の障害原因の特定

解析対象装置の故障モードは、FTAにより抽出した。FTAは、危険側と安全側の両面から実施し、危険側の頂上事象は衝突・脱線とし、安全側の頂上事象は停止現示・減灯とした。駅構内のFTAと駅中間のFTAは、要因が異なることから個別に作成した(図3)。

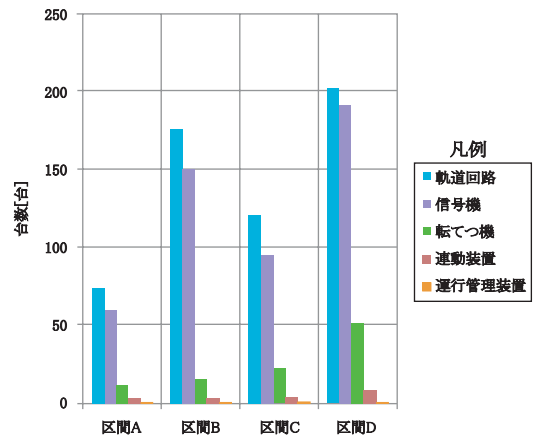


図2 モデル線における各区間の装置台数

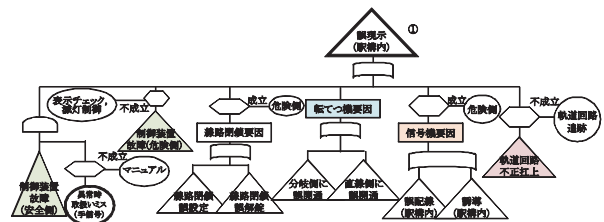


図3 駅構内における誤現示に関するFTAの例 (一部抜粋)

3.3 鉄道信号装置の障害による事故シーケンスの設定

鉄道信号装置は危険側障害の発生確率が十分小さくなる様に設計される。万一、鉄道信号装置に危険側障害が発生した場合においても、たとえば、先行列車の有無など、鉄道信号装置以外の要因により、衝突・脱線に至る事故の発生頻度ならびに影響度は低減される。これらの要因による事故の低減効果を評価するため、ETA (Event Tree Analysis) を適用する。

3.3.1 解析対象とする事象の設定

ETAを適用する障害は、FTAの結果を参考に表2のとおり定めた。FTAに示す事象との対応はIDで関連づけた。図4に示す誤現示のETAは、図3に示すFTAの頂上事象である「駅構内での誤現示」の影響解析結果の一部である。

以下、表2に示す、信号保安装置に関する6つの要因を「事故要因」と呼ぶ。

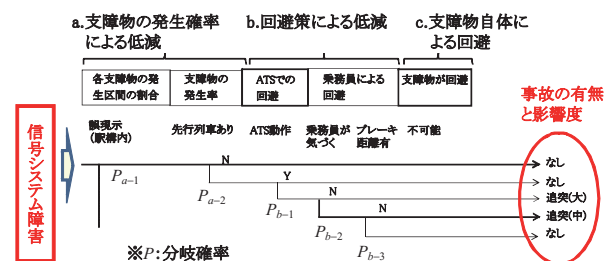


図4 誤現示に関するETAの例 (一部抜粋)

表2 事故要因

分類	ID	事故要因	発生可能性	
			駅中間	駅構内
危険側	①	誤現示	有り	有り
	②	途中転換	なし	有り
	③	接着保持不能	なし	有り
	④	異物挟み込み状態での引き残り	なし	有り
安全側	⑤	滅灯	有り	有り
	⑥	不正停止現示	有り	有り

3.3.2 発生頻度の算出

FTAに定める各事象の発生頻度は、鉄道総研 鉄道技術推進センターの鉄道安全データベース（2号様式）を参考に割り当てた。（表3）

具体的には、特定区間（約50km, 15連動駅）の約5年分の障害データを基本とし、同区間にて発生していない事象については、対象範囲を拡大（約17,000km, 約2,800連動駅）し、危険側障害は5年分、安全側障害は1年分の障害データをもとに発生頻度を割り当てた。仮に、対象範囲を拡大したエリア内の連動装置（約2,800台）において5年間に1回も発生しない場合、単位時間あたり

表3 障害発生頻度

	障害	発生頻度 [1/h]	平均停止時間 [h]	
①	構内 制御装置故障（安全側）、かつ、異常時取り扱いミス	$3.19 \times 10^8$	0.24	
	構内 制御装置故障（危険側）、かつ、安全側制御不可	$1.00 \times 10^{10}$	2.00	
	構内 転てつ機要因（危険側）	$9.09 \times 10^{10}$	3.48	
	構内 線路閉鎖要因（危険側）	$1.35 \times 10^8$	0.03	
	構内 信号機要因（危険側）	$1.00 \times 10^{10}$	2.00	
	構内 軌道回路要因、かつ、軌道回路追跡見逃し（不正扛上）	$4.27 \times 10^{10}$	0.92	
	中間 信号機要因（危険側）	$1.00 \times 10^{10}$	2.00	
	中間 軌道回路要因（不正扛上）	$1.00 \times 10^{10}$	2.00	
	②	構内 列車通過中の誤転換	$4.55 \times 10^{10}$	9.42
	③	構内 接着保持不能	$1.00 \times 10^{10}$	2.00
④	構内 異物挟み込み状態での引き取り（危険側）	$1.20 \times 10^{10}$	2.00	
	構内 制御装置故障（危険側）、かつ、安全側制御可能	$1.00 \times 10^{10}$	2.00	
⑤	構内 電源故障（滅灯側）	$1.90 \times 10^7$	1.40	
	構内 信号機故障（滅灯側）	$5.36 \times 10^9$	0.86	
	中間 信号機故障（滅灯側）	$1.84 \times 10^7$	1.94	
	中間 電源故障（滅灯側）	$2.76 \times 10^7$	0.97	
	構内 不正落下（進路に関わる軌道回路故障）	$3.16 \times 10^7$	1.39	
⑥	構内 電源断・低下（電子連動側のみ）	$3.81 \times 10^7$	0.83	
	構内 制御装置故障転てつ機（安全側）	$1.47 \times 10^6$	3.28	
	構内 制御装置故障信号機（安全側）	$1.47 \times 10^6$	3.28	
	構内 転てつ機故障（転換不能）	$5.88 \times 10^7$	0.60	
	構内 誤操作もしくは運行管理装置故障	$5.71 \times 10^7$	0.30	
	構内 システム端末故障もしくは誤操作	$3.81 \times 10^8$	0.00	
	構内 進路制御系停止もしくは誤制御	$1.47 \times 10^6$	0.57	
	構内 運行管理ネットワークノード停止	$9.68 \times 10^7$	0.78	
	構内 進路制御系一連動系間ネットワーク停止もしくは誤制御	$1.00 \times 10^{10}$	2.00	
	構内 線路閉鎖要因（安全側）	$1.47 \times 10^6$	0.68	
	構内 信号機要因（停止現示）	$1.04 \times 10^7$	0.78	
	中間 不正落下（閉そくに関わる軌道回路故障）	$1.98 \times 10^7$	0.29	
	中間 信号機要因（停止現示）	$2.69 \times 10^9$	0.46	

解析対象範囲内で発生していない障害

表4 支障物の種類と占有確率（暫定値）

支障物の種類	駅中間	駅構内
先行列車	0.98	0.49
対向列車	0.00	0.49
保守作業	0.02	0.02
合計	1	1

の発生頻度は、 $10^{-8}$ 程度となる。

なお、対象範囲を拡大したエリア内の装置数は、特定区間との「距離比（327倍）」もしくは「連動駅数比（185倍）」で換算した。また、当該エリアにおいても発生していない事象は、単位時間あたり $10^{-10}$ と仮定した。

3.3.3 事故シーケンスの特定

事故要因が発生しても、実際に事故に至るとは限らない。衝突・脱線に至る発生頻度を低減する各要因をETAにおける分岐条件とする。この分岐条件は「支障物の発生確率による低減」、「回避策による低減」、「支障物自体による回避」に分類し設定した（図4）。

(1) 支障物の発生確率による低減

支障物の発生確率は、「走行区間（中間・構内）における支障物の占有確率」と、「支障物自体の発生確率」で表わした。以下、モデル線区における設定値の概要を示す。

(a) 走行区間における支障物の占有確率

列車が中間もしくは構内を走行中に発生する支障物の種類は「先行列車」、「対向列車」、「保守作業」とした。中間もしくは構内の走行区間において各支障物が占める割合は表4のとおり仮定し、支障物は同時に発生しないと仮定した。各占有確率は、全区間において同値とした。これらはいずれも暫定値である。

(b) 支障物の発生確率

「先行列車」の発生確率：区間A～区間Cでは駅中間・駅構内ともに「列車あり」を0.8と仮定した。ただし、「⑥不正停止現示」の状態における「先行列車あり」は0.1とした。区間Dは列車本数が約1/4であることを考慮し0.2とした。

「対向列車」の発生確率：折り返し駅数/連動駅数とした。

「保守作業」の発生確率：区間A～区間Cは駅中間・駅構内ともに「保守作業あり」を0.1と仮定し、区間Dは列車本数が約1/4であることを考慮し0.025とした。

「分岐器上の列車の在線確率」：車両が分岐器上に存在する時間を考慮し、区間A～区間Cは0.093、区間Dは0.015とした。

(2) 回避策による低減

回避策は、ATSと乗務員を想定した。乗務員が気づいた時のブレーキ距離の有無も想定した。

ATSについては、機器の故障確率を暫定値として $10^{-6}$ 程度の値を割り当てた。

乗務員に関する分岐確率は、絶対値を適用するのは容易でないことから、値は0.5と仮定した。

(3) 支障物自体による回避

支障物自体による回避は、「対向列車・保守係員による回避」と、「分岐器が対向」を想定した。

これらの分岐確率は、絶対値を適用するのは容易でな

特集：信号通信技術

いことから、値は0.5と仮定した。

なお、一日あたりの列車の運転時間は19時間とし、ETAに定める各シーケンスの発生確率は、0.79倍(19時間/24時間)した。

3.3.4 障害発生後の危険側事故の低減要因分析

障害発生後における危険側事故の発生頻度の低減度は、危険側事故の発生頻度を表2に示す各事故要因の発生頻度で除して算出した。その結果を図5に示す。

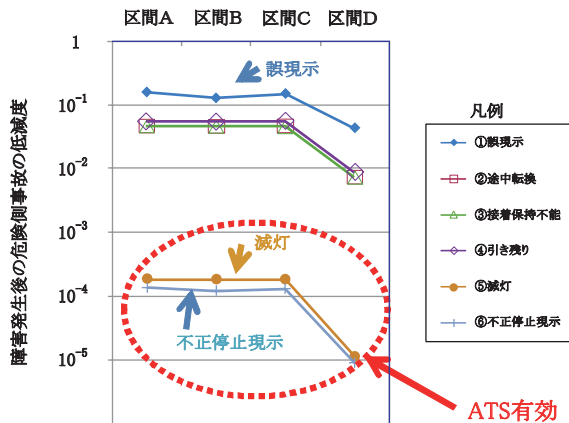


図5 障害発生後の危険側事故の低減効果 (暫定値に基づく結果)

「⑤滅灯」、「⑥不正停止現示」による危険側事故の発生頻度は、ATSによる低減効果が期待できることから小さい値になっている。一方、「①誤現示」については、ATSが信号現示に従い動作する仕組み上、期待できない結果となっている。

区間Dが、他の区間と比べて危険側事故の低減度が大きいのは、列車本数が少ない設定であることによる。

「②途中転換」、「③接着保持不能」、「④異物挟み込み状態での引き残り」は、転てつ機上の在線時間による低減効果である。

ETAの分岐確率は暫定値の箇所は多いものの、ETAの分岐条件として定めた各要因の低減効果の比較は可能であり、重要な要因を確認できる。

3.4 コストの算出

3.4.1 コストの算出式

コスト(損失)は、人的損失、物的損失、営業損失の3つに分類した。以下に算出式を示す。

$$(1) \text{ 人的損失} = (\text{死者一人に伴う損失額} \times \text{死者数}) + (\text{負傷者一人に伴う損失額} \times \text{負傷者数})$$

(ただし、従業員と一般人に分けて設定)

$$(2) \text{ 物的損失} = (\text{車両の全壊・半壊のコスト} \times \text{各両数}) + \text{信号設備復旧費} + \text{復旧費} + (\text{所持品保証費} \times \text{被害車両数内の乗車人数})$$

$$(3) \text{ 営業損失} = (\text{一時間あたりの損失額} \times \text{停止時間})$$

具体的な値は、ETAに定める各シーケンスが発生した場合における事故の規模(影響度)に基づき割り当てる。

3.4.2 事故の規模の定義

事故の規模は、シーケンス個別に「大」、「中」、「小」、「なし」の4段階として割り当てた(図4)。各シーケンス発生時の損失の大きさは、暫定的に定めた「損失の重み(表5)」と「事故の影響度(表6)」に基づき算出した。

「影響なし」となる安全側のシーケンスのコストは、営

表5 損失の重み(暫定値)

項目	費用
一般人	15,000/死者一人, 200/負傷者一人
従業員	10,000/死者一人, 200/負傷者一人
車両全壊	10,000/両
車両半壊	5,000/両
復旧費	区間A, C, D (2,000) 区間B (4,000) ※高架区間 ただし、対向箇所 (6,000)
信号設備復旧費	1,000
所持品保証費	10
一時間あたりの損失額	区間A (1,200) 区間B (1,200) 区間C (600) 区間D (100)

表6 モデル線区における事故の影響度の分類(暫定値)

支障種別	事故の影響度	車両全壊 [両]	車両半壊 [両]	従業員死者 [人]	従業員負傷者 [人]	被害両数 [両]	旅客死者数の割合	旅客負傷者数の割合	停止時間 [h]
先行列車 または 対向列車	大	2	1	2	0	2.5	0.2	0.8	1,200
	中	1	1	1	1	1.5	0.02	0.98	40
	小	0	1	0	2	0.5	0	1	5
	なし	0	0	0	0	0	0	0	機器ごとに設定(表3)
保守作業	大	2	1	10	0	2.5	0.05	0.95	24
	中	1	1	5	5	1.5	0.01	0.99	12
	小	0	1	0	10	0.5	0	1	3
	なし	先行列車/対向列車の行と同じ							

業損失のみで算出した。各機器の停止時間は、障害発生による最大遅延時間を停止時間と仮定し、約5年分の総停止時間を件数で割った平均値である（表3）。

障害発生時には、安全側・危険側の種別に関わらず、上下線ともに停止するとした。

### 3.4.3 コストにもとづく改善箇所の特定

改善箇所の特定は、リスク解析の結果として算出される1年あたりのコストが最大となる装置とする。各装置

のコストは、事故要因に関するFTAに示す各事象の1年あたりのコストを算出し、これらの各事象のコストを装置種別ごとに合算して算出する。

1年あたりの全損失（人的損失、物的損失、営業損失）が最も大きい装置は、図6の（a）に示す様に「連動装置」であり、その主原因は図6の（b）に示す様に異常時に関わる取り扱いである。なお、取り扱いに関する要因は、全損失の約半分を占める。

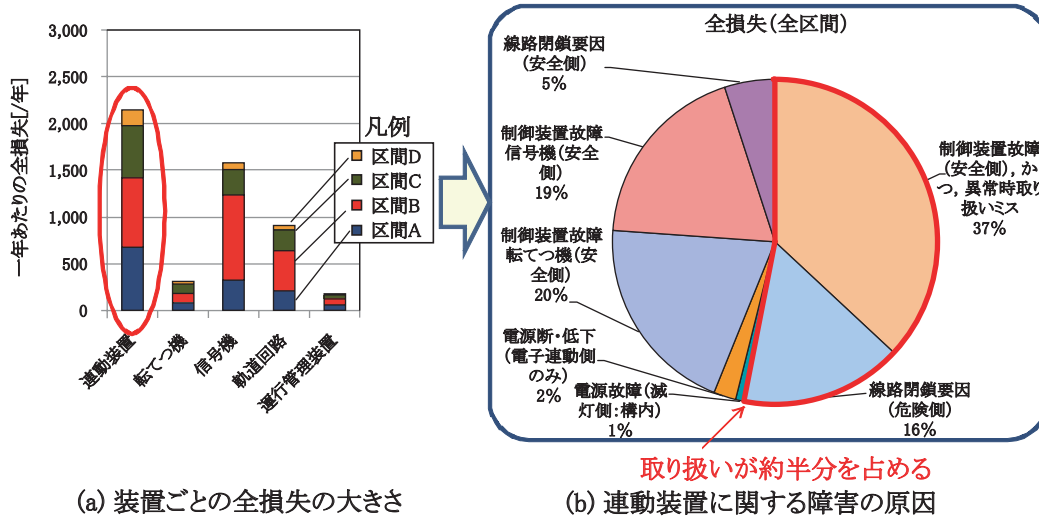


図6 モデル線区における各装置の1年あたりの全損失（人的損失、物的損失、営業損失）の大きさとその内訳（暫定値にもとづく結果）

## 4. リスク評価の試算結果

モデル線区内における鉄道信号装置ごとの安全性に関わる「不安全指標」、アベイラビリティに関わる「停止時間」、リスクの関係を図7に示す。

「不安全指標」は、鉄道信号装置の障害発生時における、事故の規模にもとづく1年あたりの死者数である。「不安全指標」ならびに「停止時間」は表6に示す仮定のもとで算出した。リスクは、障害の発生頻度と障害に伴うコストの積で算出した。

改善を優先すべき装置は、区間A、区間C、区間Dにおいては「不安全指標」と「停止時間」ともに連動装置となる。しかし、区間Bにおいては、「不安全指標」と「停止時間」では異なる結果となる。具体的には、「不安全指標」では連動装置となり、「停止時間」については信号機となる。この場合においては、円の大きさと表されるリスクをもとに判断することで、優先すべき改善対象は円の大きさが大きい信号機と判断できる。

以上から、鉄道信号装置における「不安全指標」が十分低い値に抑えられている条件下においては、障害の発生頻度と障害に伴うコストの積で算出した「リスク」で改善対象装置を特定する評価は、バランスのとれた

積極的な投資の実現に役立つ可能性のあることが確認できた。

## 5. まとめ

鉄道においては安全の確保が最優先であるが、近年同時に、高いレベルのアベイラビリティも要求される状況に鑑み、鉄道信号システムの安全性とアベイラビリティについて、リスクによる相互の位置づけを解析する手法を提案し、モデル線区を対象としたケーススタディを試みた。設定値は暫定値が割り付けられている箇所もあることから相対評価となるものの、1年あたりの損失の大きさ（リスク）にもとづく改善対象装置の特定が可能であることは確認できた。

## 6. おわりに

鉄道信号システム全体を観点としたリスク解析は、構成要素である各装置が故障した時の影響を明確化でき、投資効果の高い改善箇所の特定に役立つ。また、設定値が仮の数値であっても、定性的な解析結果のレビューとして有意義と考える。

特集：信号通信技術

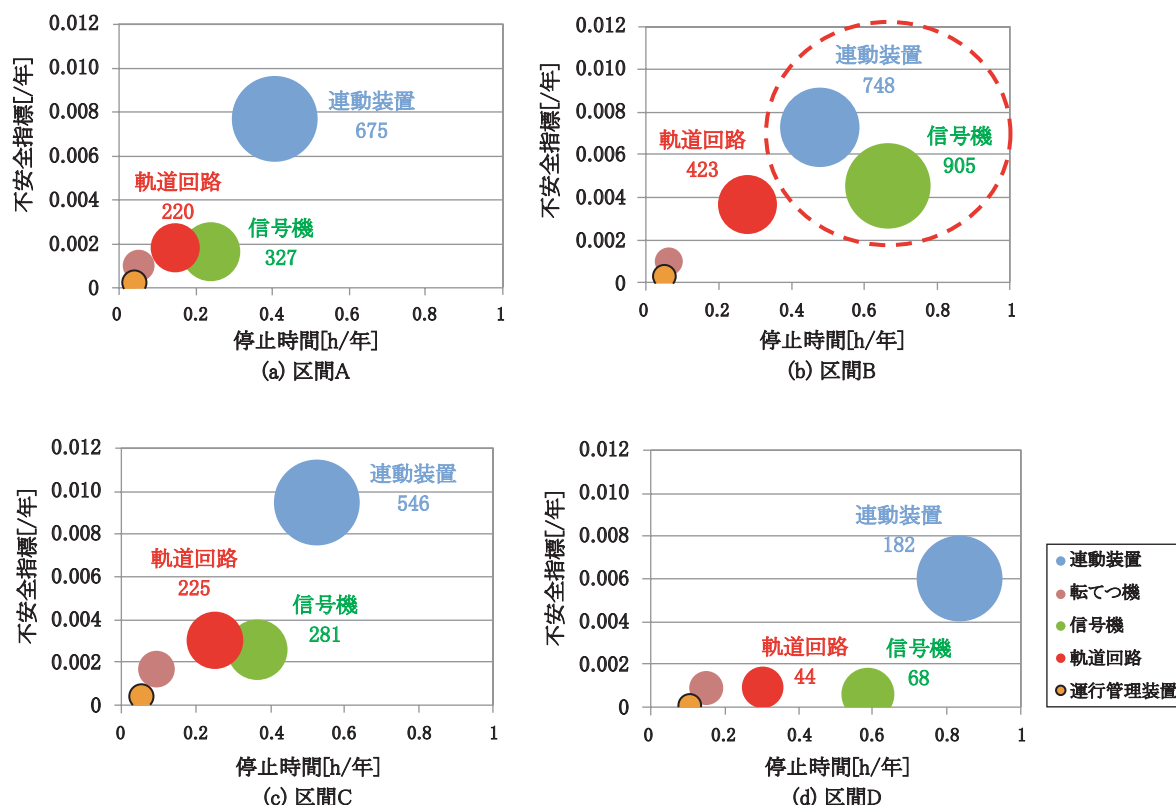


図7 モデル線区内における装置ごとの不安全指標、停止時間、リスク（暫定値にもとづく結果）  
 ※円の大きさは1年あたりの損失の重み（リスク）

しかし、より詳細な解析を行うためには、本解析において暫定値とした箇所に対して、設定データの充実をはかる必要がある。各故障モードの発生頻度をより適切に割り当てるためには、障害データの整備が必要であり、線区における導入装置の種別、装置台数、装置ごとの故障モードの管理が必要である。各装置の故障発生頻度を自動的に収集、解析する支援装置も有効と考える。

今後、鉄道信号装置の効果的な改善に役立つように精度を高め、安心して利用できる鉄道信号システムの構築に役立てたいと考える。

文献

- 1) 岩田浩司, 渡辺郁夫他: 鉄道信号システムの安全性の定量的評価方法の検討, 第34回信頼性・保全性シンポジウム発表報告文集, 2004
- 2) 岩田浩司, 中村英夫: 安全性解析の統一的手法 - フェールセーフCPUボードへの適用 -, 電子情報通信学会技術研究報告, FTS99-490, 1999
- 3) IEC 62278. Railway applications – Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS), 2002.
- 4) 岩田浩司, 渡辺郁夫他: 鉄道信号装置のアベイラビリティを観点とした評価法の検討, 第38回信頼性・保全性シンポジウム発表報告文集, 2008