

アベイラビリティを観点とした 鉄道信号設備の評価法

岩田 浩司* 平栗 滋人** 渡辺 郁夫***

A Study on Evaluation Methods for Railway Signalling Systems
from the View Point of Availability

Koji IWATA Shigeto HIRAGURI Ikuo WATANABE

In recent years, RAMS international standards, relating to Reliability, Availability, Maintainability and Safety, have been established, and emphasis has come to be placed on availability as well as safety more than ever before. Therefore, in order to ensure the targeted availability of the railway signalling systems, we have studied a method of applying measures to the systems from the viewpoint of availability. As a result, we have found out that it is possible to identify effective measures to be applied to individual equipments constituting the systems to fulfill the target value, and also verified the effectiveness of the evaluation method constituted of recognition of present states, setting target values, and determination of measures to be applied to fulfill target availability.

キーワード：鉄道信号装置, アベイラビリティ, RAMS, 安定性, 安全性

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。しかし、これら手法は不安全な事象の抽出と、これら不安全事故への対策の十分性確認を主目的としており、安全性対策を効率的に適用する検討は容易でない。そこで、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^{1, 2)}。

一方、RAMS 国際規格も制定され³⁾、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、鉄道信号装置へ効率的に対策を適用するため、システムのアベイラビリティを観点とした評価法を検討している。本報告では、その評価方法ならびにケーススタディの結果を述べる。

2. アベイラビリティを観点とした評価法

2.1 目的

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もとづき設定される。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指標は定められる。

例えば、リスクを単位時間あたりのコスト (損失) と定義する。鉄道信号装置における安全側の故障モード i 、危険側の故障モード j の単位時間あたりの故障率をそれぞれ安全側故障率 a_i ならびに危険側故障率 s_j とした場合、リスク (*Risk*) は、故障モード i 、故障モード 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 _{i} 、危険側障害による被害額 _{j} 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、個々の故障モード i 、故障モード j は、FTA、FMEA により抽出する。

しかし、鉄道に対する安全の要求レベルは高く、この安全性をコストと比較することは困難である。よって、安全性については従来の評価方法を踏襲するとし、こ

* 信号通信技術研究部 (列車制御)

** 信号通信技術研究部 (信号)

*** 信号通信技術研究部

表1 アベイラビリティを観点とした鉄道信号装置の評価手順

【Step 1】 現状把握	【Step 2】 目標値設定	【Step 3】 目標アベイラビリティを達成するための適用対策の検討
<ul style="list-style-type: none"> ・現状のアベイラビリティ (発生頻度, 停止時間) ・現状の列車ダイヤへの影響 (運休, 遅延本数) ・現状のコスト 	<ul style="list-style-type: none"> ・目標アベイラビリティ ・目標とする運休, 遅延本数 ・目標のコスト 	<ul style="list-style-type: none"> ・改善対策機器の選定と効果 <ul style="list-style-type: none"> ・復旧時間の短縮効果 ・信頼度向上 (頻度低減) ・保守性向上 (頻度低減) (検出精度の向上として) ・システム全体としての効果 <ul style="list-style-type: none"> ・改善後の発生頻度 ・改善後の停止時間

でのリスクの目標値は安全側障害に伴う単位時間あたりのコストとする。この考え方にもとづき、以下、鉄道信号装置のアベイラビリティにもとづく評価を行う。

2.2 評価手順

アベイラビリティを観点とした評価は、表1に示す3段階に分けて実施する。アベイラビリティは様々な定義があるが、ここでは鉄道信号装置の平均故障間隔 (MTBF) と平均修復時間 (MTTR) を用いて定義される $MTBF/(MTTR + MTBF)$ とする。

(1) STEP1：現状把握

アベイラビリティに関わる現状の総停止時間は、障害発生後の機器の停止時間を総合計した値とする。システム全体のアベイラビリティは機器単位での総停止時間から算出する。コストは列車ダイヤへの影響 (運休・遅延本数)、影響人数から算出する。

(2) STEP2：目標値の設定

現状のコスト、改善目標とするコスト、運休・遅延本数を定め、目標アベイラビリティを設定する。

(3) STEP3：目標アベイラビリティを達成するための適用対策の検討

適用可能な対策を検討するとともに、対策適用時の障害発生頻度ならびに停止時間の改善効果に基づき、対策適用後の停止時間からアベイラビリティを算出す

る。目標アベイラビリティを達成するまで、対策を追加・変更し、実際に適用する対策を決定する。

3. 提案手法の現行システムへの適用

3.1 前提

解析対象とするモデル線区 (A線) は、区間長が約50km、連動駅数が15箇所、代表的な駅の一日あたりの上下線における列車発着本数は2,250本である。当該線区の障害データは、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) にもとづく。2号様式は運休が1本以上もしくは遅延時間が旅客列車は30分、貨物列車は1時間以上のものに対して記載が求められる。解析対象とする期間は、平成13年10月から平成18年11月まで約45,000時間である。

3.2 現状把握

3.2.1 現状のアベイラビリティの算出

現状のアベイラビリティは、線区内に設置された鉄道信号装置の障害に伴う停止時間により算出する。駅中間、駅構内における地上信号方式でのモデルを、それぞれ図1、図2に示す。システム全体としてのアベイラビリティを算出するための停止時間は、四角枠に示す各機

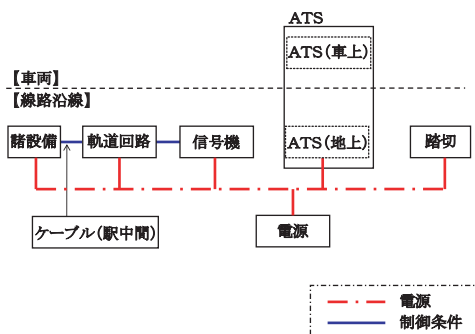


図1 駅中間モデル (地上信号式)

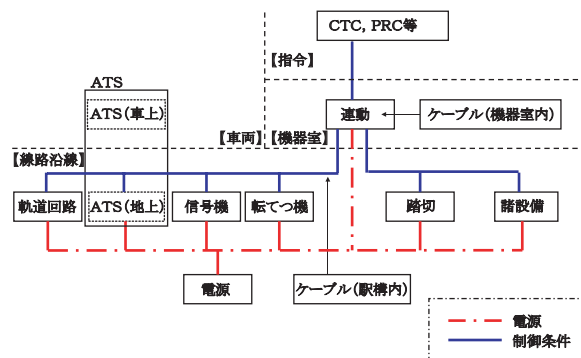


図2 駅構内モデル (地上信号式)

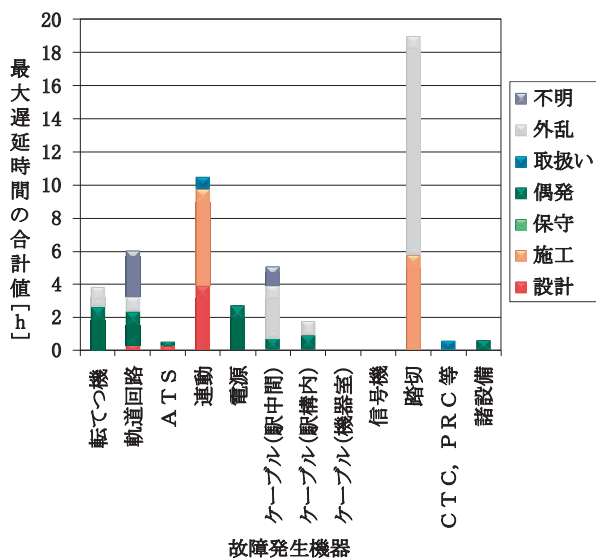


図3 各機器の最大遅延時間の合計値とその内訳 (A線、約5年間)

器が1装置でも故障すれば、システム全体が停止して輸送障害となると考え、各機器の停止時間の総和とした。

各機器の停止時間は、ある線区(以下、A線という)の過去の障害データ(図3)をもとに算出した。機器復旧までの停止時間は、最大遅延時間と等しいと仮定した。A線での鉄道信号装置の約5年間における総停止時間とアベイラビリティは、それぞれ44.6[h]、約99.90%(24時間運転として算出)である。

3.2.2 現状のコストの算出

コストは、イニシャルコストとランニングコスト(メンテナンスコスト)に分けられる。ランニングコストの内訳としては、装置の保守費の他、障害が発生した場合の装置改修費用、振り替え輸送に伴うコスト、特急料金の払い戻しなどがあげられる。イニシャルコストとランニングコストの比較結果は、鉄道信号装置の設計を見直す判断材料になる。コストの算出結果は、目標アベイラビリティを達成するための対策の選定根拠となるものであり、適用した対策の費用対効果の確認に活用できる。

ここでのコストは、解析対象線区が開業していることからランニングコストを対象とする。また、簡単化のため、ランニングコストは障害に伴う影響人数と仮定し、影響人数からアベイラビリティ目標値を設定する。

(1) 影響人数の算出法

障害発生時の影響人数に関わる要因としては、最大遅延時間内の遅延本数、運休本数、最大遅延時間後の遅延本数が考えられる。ここでの影響人数は、最悪値であるピーク時の1列車内の乗車人数を列車本数と掛け合わせた最悪値として算出する。列車本数は、最大遅延時間内の列車本数に基づき算出する。当該本数には運休本数と遅延本数が含まれる。

故障発生時刻から最大遅延時間経過後に発生する遅延の影響は今後検討する。

(2) ケーススタディ

(a) ピーク時の最大輸送人数の算出

A線のピーク時の通過車両数は、 $10[\text{両}] \times 101[\text{本/h}] = 1,010[\text{両/h}]$ となる。ピーク時の運転本数は、簡単化のため、駅での折り返し運転はないものと仮定して、ピーク時の1時間あたりの上下発着本数の半分の値とした。また、A線の混雑率は200%、定員は約150[人/両]と仮定すると、ピーク時の1時間あたりの輸送人数 = $1,010[\text{両/h}] \times 150[\text{人/両}] \times 2[\text{混雑率}] = 303,000[\text{人/h}]$ と算出される。

(b) 影響人数

影響人数は停止時間に比例するとし、停止時間をもとに算出する。A線における現状の最大遅延時間の合計値は44.6[h](約5年間)である。よって、影響人数はピーク時の単位時間あたりの最大輸送人数が約30.3[万人/h]とすると、約1,350[万人](約5年間)となる。この結果、A線の1年あたりの鉄道信号装置に関する影響人数は、約260[万人]と算出される。

3.3 目標値の設定

3.3.1 A線の目標値

A線における鉄道信号装置の障害に起因した停止時間の実績値にもとづく影響人数を表2(A線)に示す。停止時間の実績値は最大遅延時間の合計値で算出すると8.63[h/年](約5年間平均)である。影響人数の目標値は、0にすることが望ましいが完全に0にするのは現実的には難しいので、ここでは停止時間の実績値にもとづく約260[万人]から約210[万人]への約50[万人]の低減とし、現状の約2割の削減と設定した。影響人数は停止時間と比例関係と仮定しているため、2割削減を目標

表2 影響人数の目標値を達成するための鉄道信号装置の許容停止時間と目標アベイラビリティ

		目標値を満たすための鉄道信号装置の許容停止時間と目標アベイラビリティ	
		A線	B線
影響人数の目標値	260[万人/年] (現状:A線の最大遅延時間の実績値(約5年間の平均)をもとに算出)	8.63[h/年](A線の最大遅延時間の約5年間の平均値) 99.90[%]	321.1[h/年] 96.3[%]
	210[万人/年] (現状の2割減)	6.91[h/年] 99.92[%]	258.1[h/年] 97.1[%]
	100[万人/年] (現状の6割減)	3.30[h/年] 99.96[%]	123.5[h/年] 98.6[%]
	10[万人/年] (現状の9割以上減)	0.330[h/年] 99.996[%]	12.35[h/年] 99.86[%]

注) B線は、A線の比較対象として記載。B線の最大遅延時間の約5年間の平均値(実績値)は3.19[h/年]、アベイラビリティは99.96[%]であり、現状でも目標値を達成している

特集：信号通信技術

とした許容停止時間は6.91[h/年]となる。

アベイラビリティについては、鉄道信号装置は24時間運転であるが、厳密には影響が発生するのは運転時間中のみと考えて22時間運転で計算すると、99.89[%]から99.91[%]への改善が目標となる。しかし簡単化のため、ここでは機器に適用する対策の検討においては24時間運転で行うこととし、99.90[%]から99.92[%]への改善を目標とする。

仮に、1路線あたりの鉄道信号装置に関する影響人数の目標値を1年間(8,760[h])に約3分の1の100[万人]までの減少とする場合、ピーク時間帯で影響人数を算出したA線の停止許容時間は100[万人]/30.3[万人/h]=3.30[h]となり、24時間運転での目標アベイラビリティは、(8,760-3.30)/8,760=99.96[%]となる。A線の運転時間が22時間運転であることを考慮しても、年間稼働時間は8,760×22/24=8,030[h]であり、(8,030-3.30)/8,030=99.96[%]が目標値となる。影響人数の目標値をさらに10分の1に低減した1年間に10[万人]とするには、停止時間を0.330[h]に抑える必要がある(表2)。この場合における停止時間の削減量(8.30[h])は、例えば軌道回路とケーブル(駅構内)に関する約5年分の障害(7.75[h])対策に相当する大きさである(図3)。

なお、影響人数にもとづく目標値(許容停止時間・アベイラビリティ)は、鉄道信号装置に関わる要因から設定した。全装置に関わる許容停止時間の目標値は、鉄道信号装置が占める障害の発生件数もしくは停止時間の実績値の割合(鉄道信号装置の障害件数が全体の約20[%]、停止時間は約27[%])から算出することもできる。

3.3.2 A線の重要性

A線の重要性を確認するため、運転本数が比較的少ないB線(距離約30km、連動駅数12箇所、代表的な駅のピーク時の1時間あたりの上下本数は9本、4[両/編成]、混雑率150[%]、定員150[人/両])における許容停止時間ならびに目標アベイラビリティ値(表2のB線)と比較する。B線の目標値は、ピーク時の1時間あたりの最大輸送人数は約8,100人として算出した。A線の輸送人数はB線の約37倍(30.3[万人/h]/8,100[人/h])に達するものであり、A線の目標値を高く設定する必要性がわかる。

3.4 目標アベイラビリティを達成するための適用対策の検討

3.4.1 適用対策の効果

効率的に目標アベイラビリティを達成するため、鉄道信号装置の各機器に適用する対策の適用法を検討する。機器に適用する対策のシステム全体(例えば、線区全体)としての効果は、対策適用前後のシステム全体のアベイラビリティの差であり、システム全体としての総停

止時間の削減量である。対策は、システム全体としての総停止時間にもとづくアベイラビリティを達成することを目標に選定する。

対策の適用による停止時間の削減は、故障率の改善による障害発生回数の低減と、故障発生後の停止時間の削減の組み合わせによる。1種類の対策で目標値を達成できない場合には、複数の対策を施す。

この適用対策の検討では、MTBFの定義から、単位時間あたりの障害発生頻度λは1/MTBFであることを用いて、アベイラビリティの定義式(3)を式(4)に変形し、障害発生頻度と停止時間は、アベイラビリティ一定のもとでは反比例の関係にあることに着目する。

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \tag{3}$$

A:アベイラビリティ, MTBF:平均故障間隔, MTTR:平均修復時間

$$\lambda = \frac{1-A}{A} \frac{1}{MTTR} \tag{4}$$

λ:単位時間あたりの障害発生頻度

式(4)は、目標アベイラビリティを達成するための対策には、障害の発生頻度(λ)の低減と平均修復時間(MTTR)の改善の2種類の方向性があることを意味する。これにより、適用する対策は障害の発生頻度の低減策か停止時間の短縮策かを明確にすることができる。

例えば、故障の予兆をとらえるためのモニタリングを行う対策は障害の発生頻度を低減する対策であり、障害発生後の修復時間の短縮にはつながらないこと、また、障害箇所を迂回するためのルートを予め用意することは、障害発生後の修復時間の短縮になるが、障害の発生頻度の低減にはならないことが明確になり、適用対策の特徴を明確にできる。

具体的には、機器に適用する対策の効果は、図4に示すライフサイクルの各段階における「故障」や「誤り」に起因した停止時間の削減量で算出する。従来まで定量的に評価しにくかった、取扱い、ソフトウェアの誤りなどに対する対策の効果も、停止時間の削減量として同一の評価指標により評価可能になる。

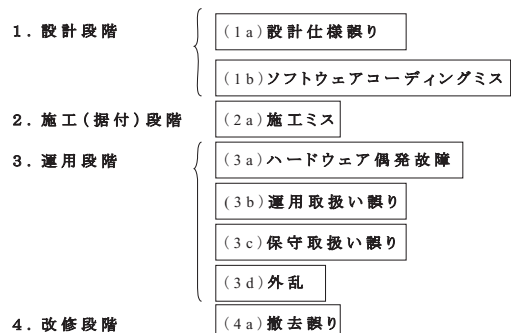
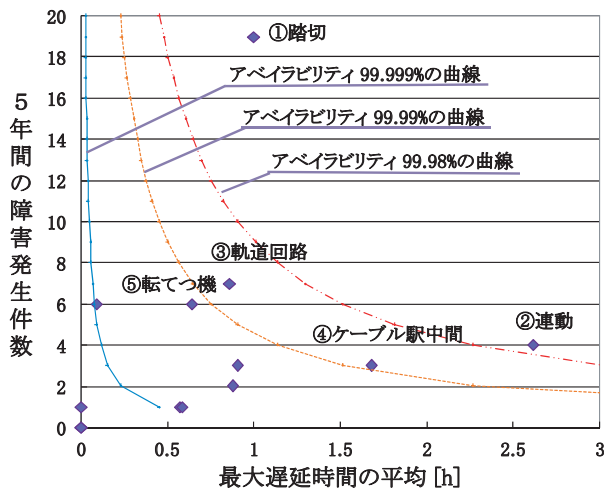


図4 鉄道信号装置のライフサイクルの各段階と誤りの例



注) ○数字は改善の優先順序を示す
図5 各機器のアベイラビリティ (A線)

3.4.2 対策を適用する機器の選定

A線における各機器のアベイラビリティを図5に示す。図5の縦軸は5年間の障害発生件数、横軸は最大遅延時間の平均値である。各プロットはA線内における各機器を示し、図内の曲線は同一のアベイラビリティである。図5の右上の領域にプロットされる機器ほどアベイラビリティは悪く、アベイラビリティが最も悪いのは踏切であり、続いて、連動装置、軌道回路、ケーブル駅中間、転てつ機の順である。この結果、改善対象の装置は踏切となる。しかし、本評価の目的が鉄道信号装置の改善であるので、踏切は外部要因(外乱)が多いため対象外とした。また、原因不明を更に除いて図3に示す最大遅延時間の合計値が大きい装置を選択した結果、連動装置と転てつ機を検討対象とした。なお、踏切については、外乱を除いた障害原因は、施工に関わる1件であり、これは連動装置の故障と同時に発生したものであることから、ここでは改善対象から除外している。

3.4.3 システム全体としての効果

A線における鉄道信号装置全体の目標値は、影響人数の2割削減とした場合、システム全体のアベイラビリティは先に述べた様に現状の約99.90[%]から99.92[%]への改善となる。以下、この効率的な実現のため、装置に適用する対策について、障害内容をもとに検討する。システム全体の目標アベイラビリティを達成するための改善対象装置は、上記の連動装置と転てつ機である。これら2装置に適用する対策の選定は、対策に要するコストにもとづくが、ここではアベイラビリティ値の改善方向の成分が長い対策ほど、少ない対策数で効率的に改善できる対策とする。適用する対策は、障害の発生を完全に防止できると仮定する。

(1) 改善対象装置における対策の選定

連動装置と転てつ機それぞれの装置における対策の

うち、最も効率的な対策を選定する。

連動装置に関する対策の候補としては、図6に示す様に、①異常時試験の十分性、②取扱い規定の遵守、③配線の簡略化、④システム仕様の明確化、が考えられる。これら対策による障害件数の低減効果は、いず

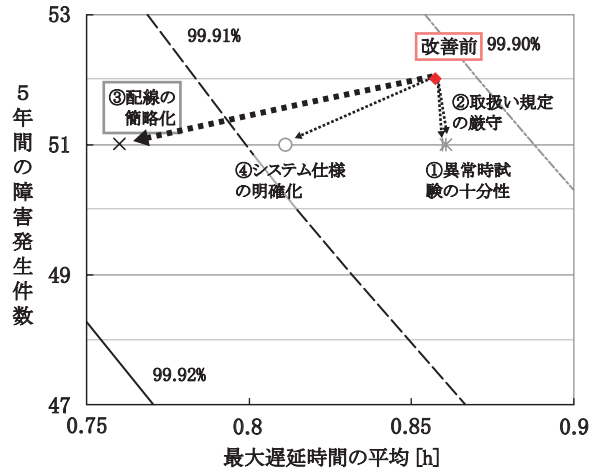


図6 連動装置についての適用対策の検討

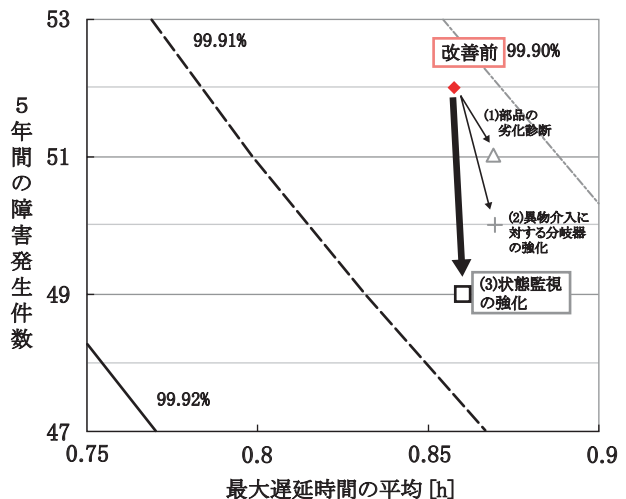


図7 転てつ機についての適用対策の検討

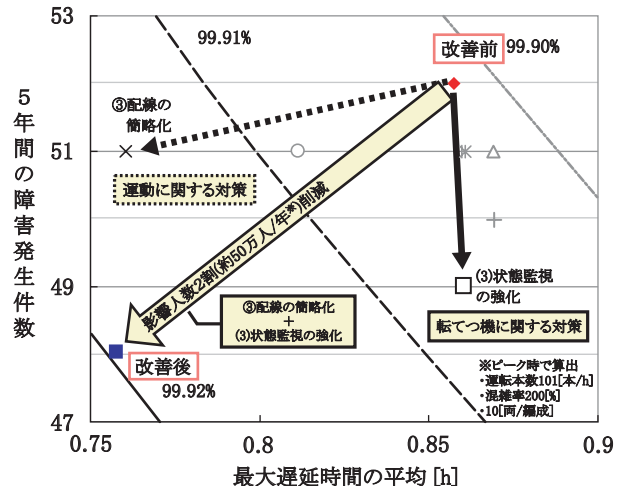


図8 複数装置間での適用対策の検討 (連動装置と転てつ機に関する対策の組み合わせ)

特集：信号通信技術

れも1件であり差はない。しかし、最大遅延時間の短縮効果は「③配線の簡略化」が最も大きく、アベイラビリティの改善効果が最も高い対策となる。

転てつ機に関する対策の候補としては、図7に示す様に、(1) 部品の劣化診断、(2) 異物介入に対する分岐器の強化、(3) 状態監視の強化、が考えられる。これらの対策による、最大遅延時間の低減効果に大きな差はない。しかし、障害件数の低減効果は、「(3) 状態監視の強化」が最も大きく、アベイラビリティの改善効果が最も高い対策となる。

(2) 複数装置間での対策の選定

連動装置と転てつ機の全対策を比較して最も効率的な対策を選定する。ここでは、アベイラビリティの改善方向の成分が長い対策を優先する。その結果、図8に示す様に、連動装置に関する「③配線の簡略化」と、転てつ機に関する「(3) 状態監視の強化」の2対策が抽出される。これら2対策により、図8の太矢印に示す様にアベイラビリティ値約99.92[%]まで改善できる。なお、連動装置の対策である「システム仕様の明確化(図6内④)」も対策候補となるが、ここでは装置を適用することによる改善を優先し、転てつ機に関する「状態監視の強化」を選択した。

この様に、本手法により、アベイラビリティにもとづく効率的な対策の選定が可能になり、効率良く目標値を達成できる。

実際に対策を適用する際には、さらに対策の適用箇所数、適用対策のコストも考慮して選定する。また、ここでは対策を適用することにより、完全に障害を防止できると仮定しているが、対策を適用した後の障害の発生頻度ならびに障害発生後の停止時間の改善効果を算出し、線区ごとに確認することになる。

3.4.4 運休本数の改善効果

A線の鉄道信号装置に対策を適用することにより期待できる運休本数の削減量は、障害データをもとに算出する。

上述の影響人数の2割削減を目標とした2対策(連動装置に関する配線の簡略化、転てつ機に関する状態監視の強化)の適用により、運休本数は約73[%](約5年間で642本の削減)に抑えられる(表3)。算出値は対策適

表3 対策による運休本数の改善(約5年間)

適用対策	運休本数の削減量
連動装置における配線の簡略化	477本
転てつ機における状態監視の強化	165本

用により関連する障害の発生を完全に防止できるとの仮定にもとづくものである。

4. 新規システムへの適用

新規システムについても表1の手順で実施するが、開業前で実績データのない新規システムにおいては、STEP1(現状把握)が課題となる。これに対しては、適用する機器のアベイラビリティならびに1年あたりの総停止時間を、線区内に設置する各機器の実績値と線区内の設置台数を積算することで概算できる。新規機器で障害データがない場合は、各部品の故障データで見積もることになる。

影響人数については、開業後のシステムと同様に、ピーク1時間あたりの輸送人数を設定して算出する。目標アベイラビリティを達成するための改善策としては、適用対策の検討の他、適用機器の種類そのものを変更する方法も考えられる。

5. おわりに

鉄道信号装置のアベイラビリティを観点とした評価方法を提案した。本手法は、目標アベイラビリティを達成するために鉄道信号装置へ適用する対策について、信頼性に関わる障害の発生頻度の低減効果と、保守性に関わる停止時間の短縮効果の両面から評価するものである。

目標アベイラビリティを、影響人数の低減度にもとづき設定したケーススタディの結果、本手法を適用することにより、システム全体の目標アベイラビリティを効率良く達成するための対策選定が可能であることを確認できた。

今後、鉄道信号装置に適用する対策の効果の詳細検討を実施するとともに、他線区にも適用し、鉄道信号装置の効果的な改善方法の提案に役立てる所存である。

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 -, 信学技法, Vol.99, No.490, 1999
- 3) IEC 62278. Railway applications - Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS), 2002.