

RAMS 指標に基づいた鉄道信号システムの構成法

平栗 滋人*

A Method of Designing Railway Signalling System Based on RAMS Indicators

Shigeto HIRAGURI

Since the IEC published RAMS Standard in 2002 objective to railways, its importance and an impact of the standard to Japan have been conspicuous. On the contrary, new various train control systems based on information technology are under active development. Considering such situations, we assume that it is essential to establish a method to design railway-signalling systems, which has an excellent balance to the RAMS indicators at low costs. We propose the basic method to evaluate the performance of signalling system by a cost indicator based on the concept of RAMS, and confirmed that the method can evaluate systems appropriately considering of grade of line, circumstances and other factors.

キーワード：RAMS, 信号システム, システム構成, コスト評価

1. はじめに

現在の鉄道信号システムは列車運行の安全確保に長年にわたる実績があるが、これらは必要な機能ごとにボトムアップ的に構築されてきた。

一方、2002年に鉄道を対象とするRAMSの国際規格IEC62278¹⁾(以下、RAMS規格)が発行された。RAMS規格は、信頼性(R)、アベイラビリティ(A)、保守性(M)、安全性(S)の各指標のバランスを経済性と照らし合わせて良好に維持することを基本概念としている。また、情報技術を積極的に利用した新しい信号システムの開発、導入の動きが国内外で活発化している。

このような状況を考慮すると、信号システムの構成について、本来、果たすべき機能の観点から改めて検討することが必要な時機にきていると言える。その際、RAMS指標に関してバランスに優れたシステムを低コストで構築することが重要と考えられる。

本稿では、RAMSの考え方を基本とするコスト指標によって、信号システムの各種構成案について検討する手法とそのケーススタディの結果について述べる。

2. 信号システムとRAMS指標

2.1 従来の信号システム構成方法

現在の信号システムは、線区の規模などによって幾つかの形態があるが、在来線の一般的な構成においては、軌道回路により列車検知を行い、信号機の現示によって運転士に対して運転指示を伝達する他、ATSによって停

止信号の冒進を防いでいる。また、駅構内では連動装置が軌道回路などの現場機器の状態を集約するとともに、信号機や転てつ機などを制御する。このようなシステムは、長年にわたる運用の過程で発生した課題や障害に対応して、必要な設備の導入や機能向上が必要の都度、図られてきたものである。

また、近年、国内においても情報技術を利用した新しい信号システムの開発や導入^{2), 3), 4), 5)}が行われている。これらは、どちらかと言うと高速、高密度路線を対象として高度な機能を実現するものであるが、ここ数年はいわゆる地方交通線向けのシステム開発^{6), 7)}にも注目が集まっている。

このような開発途上にあるものも含め、新規に信号システムを導入する際、これまでは、対象となる線区の輸送規模や輸送形態、駅の規模、導入コスト、保守コストなどの要素を考慮して、専門家の経験や知見によって適切な構成が判断される場合が多いと想定される。しかし、上記のような各種条件を反映して総合的に判断し得る指標については、明らかになっていないと言える。

一方で、RAMS規格はその発行以来、国内においても重要性や影響が指摘されてきている^{8), 9)}。RAMS規格は、RAMSの4つの指標について目標を定め、体系的なリスク分析などに基づいて、目標を達成していることを文書で立証するという考え方について規定している。RAMS規格の具体的な運用については、幾つかの課題が存在することも事実であるが、このような手法や考え方はシステムの信頼性や安全性を証明するための国際的に通用する方法論の1つと言うこともできる。さらに、近年の企業活動のグローバル化や説明責任に対する要求の高まりなどの社会的な背景も存在する。これらを考慮す

* 信号通信技術研究部(信号)

特集：信号通信技術

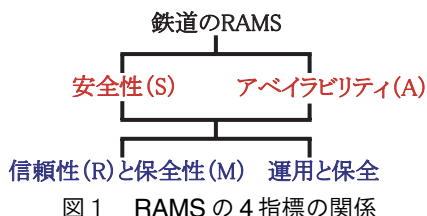
ると、信号システムの評価、開発に適用できる指標としてRAMSの考え方に基づくものが必要と考えられる。

2.2 RAMS 指標の関係

RAMS規格では、RAMSの4つの指標の関係について図1のように述べられている。ここでは、鉄道のRAMSの構成要素は安全性(S)とアベイラビリティ(A)に分類されている。「アベイラビリティ」とは、「ある装置やシステムが要求された機能を所定の時間の間、果たすことができる能力」と言うことができ、その構成要素としては、「信頼性(R)と保全性(M)」および「運用と保全」が挙げられている。この内、信頼性は故障の発生率などであり、保全性は計画保全の時間や故障原因特定に要する時間、修理に要する時間などが挙げられる。一方、後者の「運用と保全」は、運転モードや保全の体制、ヒューマンファクタなどを指すとされており、定性的な要因と言える。また、これらの要素の内、システムの安全性に関わる事項やハザード(致命的な事象に至る可能性のある状態)が安全性に関するものとされている。

このように、RAMSの4つの指標の中では、安全性(S)とアベイラビリティ(A)の2つが主要な指標と位置付けられている。この内、安全性の分析や評価の方法について、信号分野においては、システムにとっての致命的事象(例：信号システムにおける信号機の錯誤現示)から原因事象へトップダウン的に展開するFTA(Fault Tree Analysis)や、システム構成要素の故障モードからシステム全体への影響を分析するFMEA(Failure Mode and Effect Analysis)などにより、システムの安全性に影響する要因を体系的に抽出し、その対策を検討する手法の適用事例が増えてきており、ある程度定着しつつある状況と言える。

一方、アベイラビリティを初めとするRAMの要素については、信頼性などの個別の値については議論されることがあるものの、システム全体としてどう評価するのか、という点については具体的な方法が明らかになっていない状況と言える。そこで、RAMの要素を中心に検討を行うこととした。



3. システム構成の検討方法

3.1 基本的な方針

2章で述べたように、RAMの指標の中ではアベイラビリティが主要な指標として挙げられている。そこで、シ

ステム構成を検討する際の指標として、システムの構成要素となる各機器が故障した場合に列車運行に及ぼす遅延などの影響をコスト(損失)に換算する手法を検討した。これに、システム導入時の初期コスト、保守コストを合わせることで、1つの尺度で新規に適用する信号システムの検討が可能となり、対象線区や駅的环境に応じた判断の指標となり得るものと考えられる。

これらのコスト要素の内、初期コストと保守コストについては、設備の構成などが決れば、それに依りて求めることが可能である。一方、装置故障などに起因する損失については、駅構内の配線、列車の運行形態、その他の環境を考慮して求める必要がある。以下では、この損失を求める手法について述べる。

3.2 損失の推定方法

3.2.1 基本的な考え方

損失推定の基本的な考え方は図2に示すとおりである。ある駅を想定すると、システムを構成する各装置が故障した場合に対して走行可能な進路が決定できる。これから、上り列車、下り列車別に運行が継続できない場合、運転時隔は延びるものの運行は継続できる場合に分類できる。後者については、想定する駅の設備条件によって、どの程度の時隔で運行が可能かが推定できる。これらを基に、故障発生から復旧までの間に、本来通過できた列車本数と故障時間中の列車本数の差を求め、これを運賃収入の差に換算することで故障が発生した場合の損失を推定する(図2の①)。

次に、これと装置の故障発生率の積をとることによって、装置故障によって見込まれる損失(図2の②)が得られる。

最後に各装置について得られた、見込まれる損失の総和をとることでシステムとして見込まれる損失(図2の③)を得る。

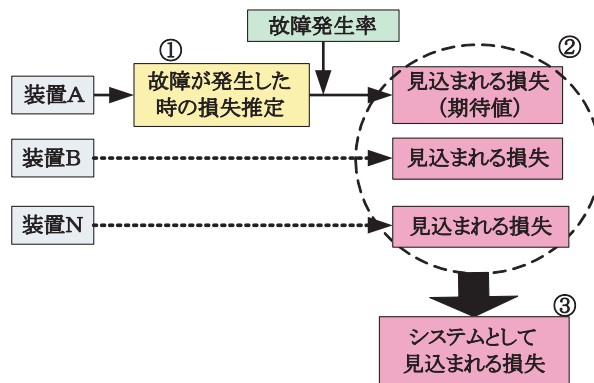


図2 損失推定の考え方

3.2.2 装置故障による損失の推定

故障が発生した場合の装置ごとの損失推定の手順を図3に示す。

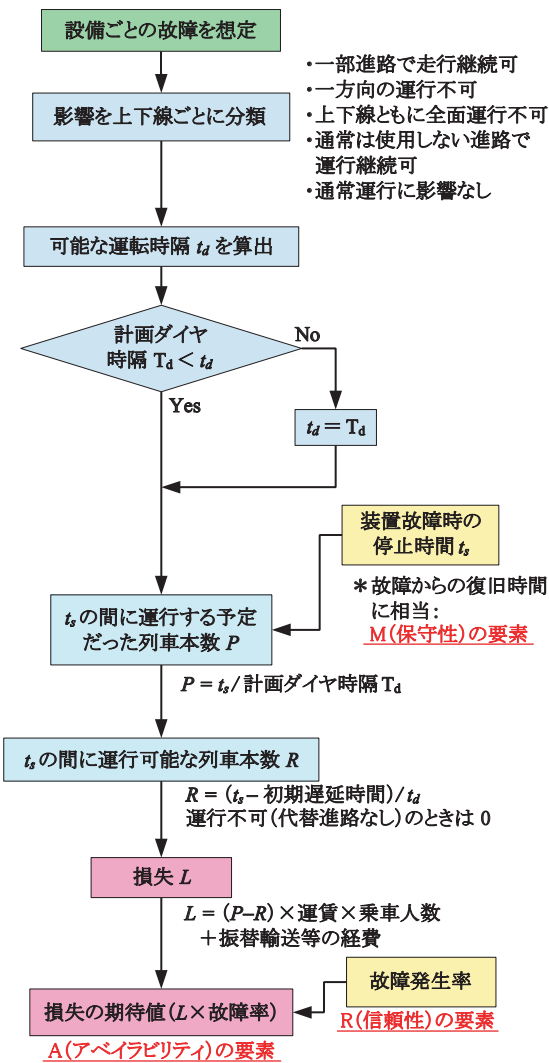


図3 装置故障に対する損失推定の手順

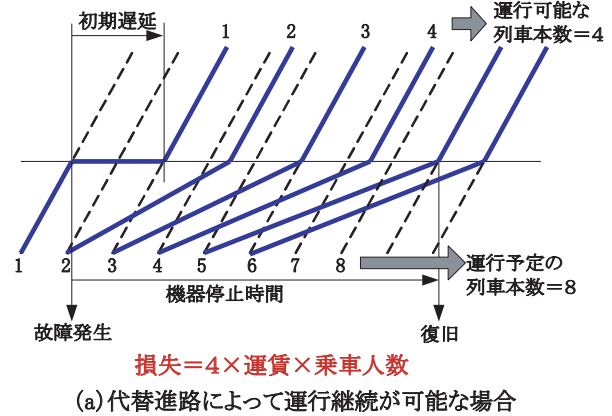
故障が発生した装置によっては、通行可能な進路が限定されたり、時隔が延びる場合があるものの、列車運行の継続が可能な場合もある。また、列車運行が出来なくなる場合もある。故障装置ごとに、これらの影響を分類し、各場合について運転可能な時隔を算出する。なお、今回の検討では簡略化するため、それぞれの故障パターンごとの運転可能な時隔の算出においては、列車は単純な一段階のブレーキパターンで減速するものとして算出した最小運転時隔を適用することとした。なお、この最小運転時隔が計画ダイヤの時隔より短い場合には、ダイヤ時隔をそのまま適用する。この他、列車運行が出来ない場合の値は無限大となる。

次に、装置故障時に上述のような列車運行が停止、あるいは一部進路での運行が可能（輸送力は通常より低下）な状態の継続時間 t_s をデータとして与える。これは、装置の復旧に要する時間でもあり、保守性 (M) の要素に相当するものと言える。この時間とあらかじめ定められた計画ダイヤ上の時隔から、通常の状態で行う

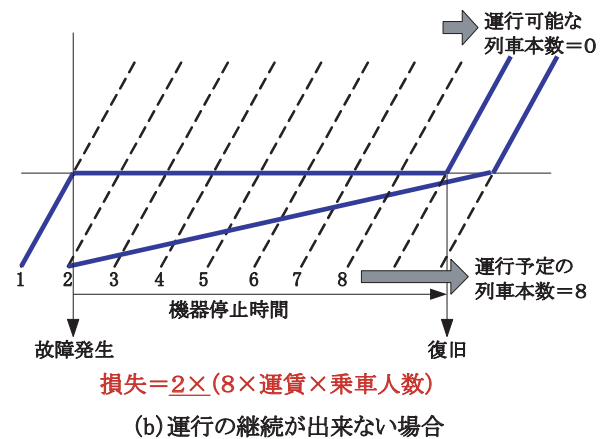
列車本数 P が得られる。さらに、先に求めた運行可能な時隔を使用して、故障した状態でこの間に運行可能な列車本数 R が得られる。

これらの値と、列車運賃、乗車人数などを用いて、装置の故障発生によって、得られなかった運賃収入や振替輸送などに要した経費を合わせて損失を推定する。なお、ここでは、簡略化するため後者の経費は得られなかった収入と同額とした。このときの損失推定の概念を図4に示す。

さらに、この損失に該当する装置の故障発生率を乗することで、該当する装置が故障した場合の、例えば1年間の損失の見込値を得る。この際、故障発生率は信頼性 (R) の要素である。また、損失の見込値は提供できなかった輸送サービスの程度を鉄道事業者の損失に置換えたものと同じと見ることができ、この観点からアベイラビリティを表すものの一種と捉えることもできる。



(a) 代替進路によって運行継続が可能な場合



(b) 運行の継続が出来ない場合

図4 運行状況に応じた損失推定モデル

4. 信号システムの機能分析

3章で述べたシステム構成の検討手法については、幾つかの構成案を対象としたケーススタディを行った。その結果は次章で述べるが、ケーススタディに先立ち、対象とするシステム構成について、既存のもの以外の新しい概念のシステム構成の可能性を、信号システムの機能

特集：信号通信技術

面から検討した。

信号システムに要求される機能は、間隔制御（列車を衝突する前に止める機能）と進路制御（走行したい進路に安全に進入させる機能）に大別される。現在、広く使用されている信号システムは、間隔制御のための基本情報の判定（列車が走行可能な区間の決定）、進路制御のための信号装置の状態認識や連動論理の判定などの機能を連動装置で集中的に行っている。

このような構成は、信号機や転てつ機など分散配置された多数の現場機器を、相互が連鎖関係を保って安全上、矛盾なく統括して制御するためには、妥当な構成であると言える。

その反面、核となる制御機能を持つ連動装置の故障時には、基本的には駅構内全ての列車運行を停止せざるを得ず、アベイラビリティ向上の点では改善の余地が残されている。さらに、図5に示すように個別の機能ごとに実現手段（機器）が割当てられているが、列車への指示や設備間の情報伝送については、統合的な手段を検討する余地があると考えられる。

そこで、将来の信号システムの1つのイメージとして、軌道回路、転てつ機、車上装置を端末と位置付け、無線LANなどの情報ネットワークを介して通信を行い、連動機能はこれら端末の自律的動作によって実現する構成を想定した。この場合、機能に対する実現手段の割当てを図6、新しいシステムの構成イメージを図7に示す。なお、図5には、図6との比較のため、従来のシステムにおける機能の割当てを示す。新しい構成では、連動機能が特定の装置に集中しないため、一部機器の故障が全ての列車運行に直結しない場合が増加する結果、アベイラビリティが向上することが期待される。また、一部の無

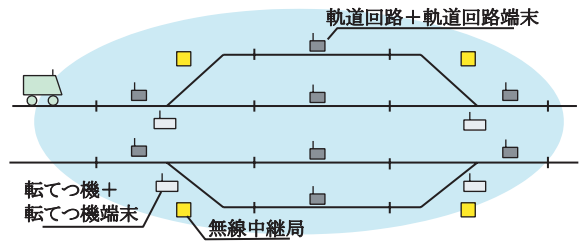


図7 新しいシステムの構成イメージ

線中継局故障時にも他の中継局が伝送をカバーできる構成とすることで、アベイラビリティの維持、あるいは向上も期待される。

5. ケーススタディ

3章で述べたシステム構成の検討手法について、4章で述べた新しい構成も含めて、幾つかの条件の下でケーススタディを行った結果を示す。なお、後述する各種の数値はあくまでも本ケーススタディ上での仮定である。

5.1 前提条件

路線の形態としては、上り、下り、それぞれの列車密度が30本/時、12本/時、3本/時の3種類を想定した。これらの3タイプの路線に対応する駅の形態として、図8～図10の形状を設定した。

ここでの例における、機器故障時に運行が可能な場合についての運転時隔を算出した。ここでは簡略化するため、列車は駅接近時には80km/hで定速走行するものとし、場内信号機の停止現示に対する制約のみを考慮した。この他、列車の加速度は2.5km/h/s、減速度は2.0km/h/s、ポイント分岐側の制限速度は45km/hと仮定した。

例えば、図8の構成の駅において、通常は本線と側線で交互に発着させることで120s（2分）の時隔で運行しているものとする。ここで、軌道回路1RTが故障した場合、側線（1R→5R）を使用しての運行はできないが、本線（2R→6R）を使用しての運行は可能である。このときの運転時隔は本線のみを使用する場合には146s、側線のみを使用する場合は159sとなる。

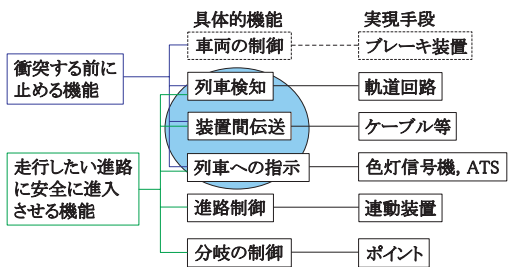


図5 従来のシステムの機能割当て

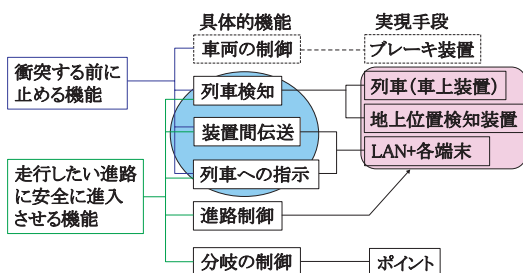


図6 新しい構成の機能割当て

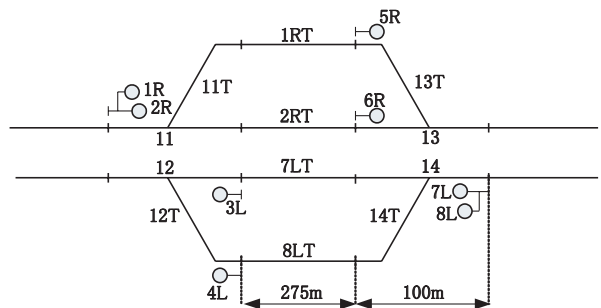


図8 列車密度30本/時の駅

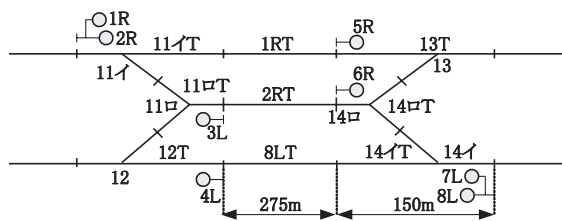


図9 列車密度12本/時の駅

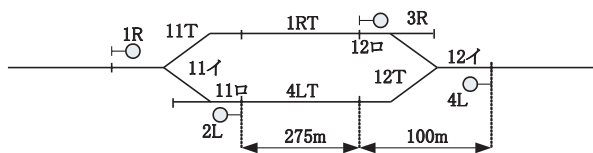


図10 列車密度3本/時の駅

この他、図9の構成の駅においては、本線のみに関係する設備が故障した場合、中線（2Rや7L）を使用しての運行継続が可能であるが、この場合の最小運転時隔は計画ダイヤの時隔（5分）を上回ることにはないので、ダイヤどおりの運行が可能であるとした。また、図10の構成の駅では運行継続が可能な進路は存在しない。

5.2 検討対象システム

ケーススタディにおいては、現在の在来鉄道におけるシステム構成、鉄道総研が開発を行ったCARAT⁴⁾などの無線によるシステム、図7に概念を示す新しいシステム構成の3つを対象とした。ケーススタディに使用した、それぞれのシステム構成を図11～図13に示す。

図11は現在、在来線において一般的と想定される構成で、連動装置で信号機や転てつ機の制御を行い、列車に対しては地上信号機によって速度制御の指示を行う他、ATSを備えるものである。

図12は、鉄道総研が開発を行ったCARAT⁴⁾など車上で位置検知、無線による地上一車間での情報伝送を特徴とするシステムを想定した構成である。この構成では軌道回路は存在せず、現場装置として残るのは転てつ機である。なお、地上設備間の伝送については、今後、導入が予定されるシステムであることを考慮してネットワーク構成の伝送路が使用されるものとし、各現場装置（転てつ機）と間には伝送制御用の端末が設置されるものとした。

図13は4章で述べた新しい概念に基づく、システム構成である。各現場装置に付属する端末の他、駅構内を分割してカバーするように無線LANなどの中継局を設けることを想定した。図8の駅でこのシステム構成とする場合は図13中に示すように4台、図9の駅の場合は同じく4台、図10の駅の場合は2台の中継局を設置すると仮定した。

5.3 その他の前提

システムを構成する装置の故障発生率については、これまでの障害データなどを参考にして設定した。

装置故障による損失の他、初期コストや保守コストも含む全体のコスト推定に際しては、これまでに述べた他、以下に示すような仮定を行った。

線区規模に対する列車当りの乗車人数や1人当りの運賃、および車上装置の初期コスト推定の基礎となる車上装置数は表1に示すとおりである。なお、車上装置数は路線長と表定速度を仮に設定し、これから計画ダイヤの時隔から同時在線列車数を算出し、この値を2倍したものをそのまま用いた。

その他、ケーススタディでのコスト推定における共通の前提は以下のとおりとした。

- 地上設備のコストは1駅分のみ。
- 図11～図13に示す以外の機器（ケーブル類、電源装置など）は含まない。
- 初期コストに工事費は含まない。
- 保守コストは、従来の構成、無線によるシステム、

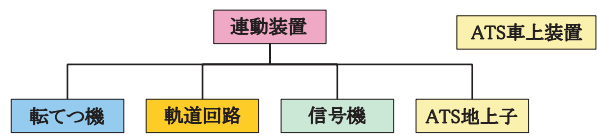


図11 従来の装置構成

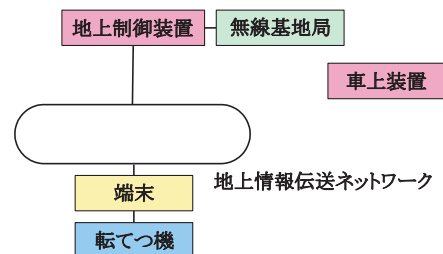


図12 無線による列車制御システムの装置構成

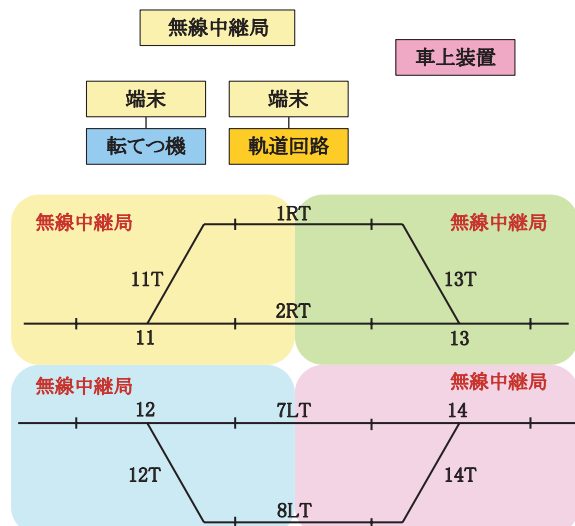


図13 新しいシステムの装置構成

特集：信号通信技術

表1 コスト推定の前提条件

列車密度	乗車人数／列車	平均運賃／人	車上装置数(台)
30本／時	1500	380	100
12本／時	900	400	40
3本／時	50	480	7.2

新しい構成の比率を1:0.4:0.5とし、線区規模による差は設定していない。

5.4 ケーススタディの結果

これまで述べてきた前提や仮定の下で、コスト推定を行った例を図14に示す。なお、コストは図8に示す駅において図11に示す現在のシステム構成を適用した場合の初期コストを1とした場合の比率で表現したものである。

この結果、30本／時のような高密度線区では、新しい概念のシステム構成が初期コストは増加する反面、損失+保守コストの面では有利であるという結果となった。また、3本／時程度の線区ではCARATのような無線による列車制御システムが初期コスト、および損失+保守コストでも有利という結果である。

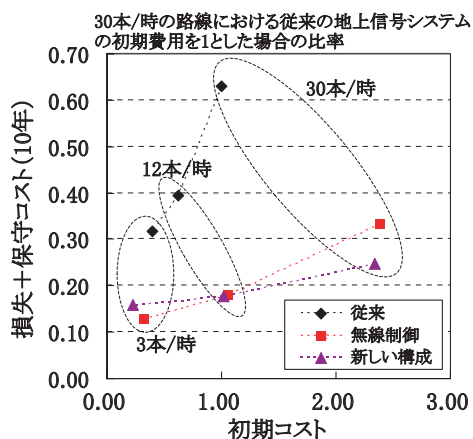


図14 コストの推定結果

6. 提案手法の利用

本稿で示した結果はあくまで、ある仮定に基づいたものであり、例えば各種機器の初期コスト、故障発生確率、列車遅延や運休時の損失の考え方、保守コストなどの諸条件の他、ケーススタディでは考慮していない要素を含めた場合には、その結果は異なる。また、得られた結果に対する評価については、例えば初期コストがある程度必要であっても損失の低減を重視するなど、線区を取り巻く環境や鉄道事業者の考え方に依存する。

しかし、これらの条件は、ここで示した手法自体を変

えるものではなく、本手法を適用することでシステムのアベイラビリティを反映したコスト指標により、個別の環境に応じたシステム構成の選択が出来るものと考えられる。また、例えば構成要素の故障発生率などはパラメータとして扱うため、許容される損失から機能や機器に対する要求性能を得ることも可能である。したがって、システムの概念設計段階において、機能を具体化する手法の検討、あるいは新たな考え方を要する機能の抽出などに適用可能であると考えられる。

7. おわりに

RAMの要素を反映したコスト指標によって、信号システムを導入する際に、線区の環境や条件に応じて各種の構成案を比較、検討できる手法について述べた。なお、今回の検討では簡易なモデルで故障の影響を推定したが、装置の故障発生時の列車の挙動については列車群の走行シミュレーションを実施することで、より実態に近い検討が可能になるものと考えられる。

今後は、新しい概念のシステム構成について、機能、装置構成の具体化を図るとともに、本稿で提案する手法についても深度化を図る予定である。

文献

- 1) “Railways applications - Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)”, IEC62278, 2002
- 2) 北村, 佐藤, 池田, 八木, 渡辺: 超高密度線区用車上主体型デジタルATCの開発と実用化, 鉄道と電気技術, Vol.16, No.10, pp.24-28, 2005
- 3) 村山, 西尾, 網谷, 嶋立, 幼方, 嶋田: 東北・上越新幹線用デジタルATCシステム, 鉄道におけるサイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, pp.437-440, 2001
- 4) 稲毛, 長谷川, 中村, 池田: 次世代運転制御システムCARATの現地実験システム, 鉄道総研報告, Vol.7, No.5, pp.17-24, 1993
- 5) 武内: 無線による列車制御システム(ATACS), 鉄道と電気技術, Vol.17, No.4, pp.24-27, 2006
- 6) 水間: GPSを利用した地方鉄道線区用列車制御システムの可能性, 平成20年電気学会全国大会, 5-S22-1, 2008
- 7) 山本(春), 関, 門脇, 石瀬, 山本(豊), 小林, 竹内, 貞莉, 村井: 汎用無線技術による低コストな無線式列車制御システム, 平成20年電気学会全国大会, 5-S22-4, 2008
- 8) 潮崎: 国際規格の重要性, 鉄道と電気技術, Vol.14, No.1, pp.7-10, 2003
- 9) 平栗: RAMS規格に関する動向と課題, 鉄道と電気技術, Vol.16, No.3, pp.21-25, 2005