

交通システムにおける安全コストの総合的考察

山本 正宣* (シグナルコンサルタント)

孫 佳** 林 辰憲* 中村 英夫 ** (日本大学)

Conception of Safety Cost on the Transmission Systems

Masanori Yamamoto* (Signal Consultant Co.,LTD.)

Ka Son**, Tatsunori Hayashi**, Hideo Nakamura**, (Nihon University.)

The common concept of the Safety Cost has not identified on the safety related systems. It has not established the way of evaluating economically from the viewpoint of safety and the way of realizing optimization of the Safety Cost. This paper reports the concept of Safety Cost on the Railway transmission systems and proposes the concept of it. There are some cost differences between each traffic systems about the cost loss of traffic accidents and traffic services. About the railway systems, the cost loss is fewer than the more safety transportation facilities in signaling systems. So it is important to identify the concepts of the Safety Cost and to validate it by the Risk Assessment.

キーワード：安全コスト，交通システム，事故損失額，安全投資額，安全経済学

(Keywords : Safety Cost, Transit System, Accident Loss, Safety Investment, Safety Economics)

1. はじめに

輸送システムは、陸上、海上及び航空に区分され、陸上輸送は、道路交通と鉄道交通に区分するのが一般的である。鉄道交通の特徴は、定時性、大量高速輸送にあると言われているが、他の例えば安全性などの分野に関して総合的な比較評価は断片的であり、体系的に議論されていない。

本論では、まず道路交通、鉄道交通及び航空交通に関して総合的な費用と安全との関連を事例を基に評価する。

輸送システムのような安全に関連するシステム(以下「安全関連システム」)の評価は、その多くがリスクの観点から検討されており^{(1)~(3)}、システム安全の費用と有効性の検討は非常に少なく、安全関連システムの安全に係わるコスト(以下「安全コスト」)に言及している例⁽⁴⁾は非常に少ない。

安全関連システムの事例として、輸送システムに関して、期限を定めた総合費用額で安全との関連を評価した。その結果、安全投資額の比率に比べて事故損失額の比率が輸送システムの違いによって大きく異なることが判明した。

次に比較的的安全設備が明確に区分されている鉄道交通を例に、運転事故と輸送障害及び安全投資比率と修繕費比率の関連を評価した。その結果、安全性の高い設備でシステムを構築した場合、事故発生件数も少なく、収益に対する安全投資額と固定費に対する修繕費の比率も少ないことが

ら、鉄道交通では、リスクアセスメント(RA: Risk Assessment)の実施と安全コストを考慮した評価を各段階で行うことで、さらなる安全の達成度を高めることが経済的にも有効であることが想定された。

2. 安全関連システムの安全コストについて

システム安全の概念は、システムのライフサイクル(LC: Life cycle costing)の要求分析と定義、構想、設計、製造、設置、運用、保全、廃却にわたり、そのプロセスで所定の活動が終了するまで続けられる安全解析や危険源の制御をする活動である⁽⁵⁾。

筆者達が提案する安全コストの概念は、「安全関連システムの構築に際して、そのシステムのLCにわたって必要とする安全を確保するために必要な総コスト」と考える。

安全関連システムの安全性と費用との関係を分析する一例として、鉄道交通の規格である、IEC62278: Railway applications-Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability, and safety(RAMS)で考察する。一般にシステム、サブシステム、部品は、それぞれ固有の段階を経て具現化され⁽⁶⁾、これらを具現化する各段階において「人と物の移動」が伴うことになる。移動の機能の他に、移動される、あるいは、移動する人や物の安全を確保するために、RAに基づいた対応を行う必要がある。各

段階で発生するこれらのコストを安全コストと考える。RAMS 規格の各段階の安全作業を基に安全コストとすべき作業内容事例を次に示す⁽⁷⁾。

- (1) 概念：以前に達成した安全性能の見直し、プロジェクトの安全上の意味の考慮及び安全方針と安全目標の見直し
- (2) システム定義と適用条件：過去の安全の経験データの評価、予備危険源分析の実施、安全計画（全体的）の確立、危険基準の許容性の規定及び既存設備などの制約条件の安全への影響の特定
- (3) 危険分析：システム危険源と安全危険分析の実施、危険源日誌の設定及び危険評価の実施
- (4) システム要求事項：システム安全要求事項（全体的）の指定、安全受入基準（全体的）の規定、安全関係機能要求事項の規定及び安全管理の確立
- (5) システム要求事項の割当：システム安全目標と要求事項の割当、サブシステム・コンポーネントの安全要求事項の指定と受入基準の規定、システム安全計画書の更新
- (6) 設計と実施：見直し、分析、試験及びデータ評価による安全計画書の実施、危険源日誌、危険源分析と危険評価、安全関係設計決定の正当化、プログラム制御の実施、安全管理、下請業者と供給者の管理、一般的安全事例の作成、一般的適用安全事例の作成
- (7) 製造：見直し、分析、試験及びデータ評価による安全計画の実施、危険源日誌の使用
- (8) 設置：設置プログラムの確立と実施
- (9) システム検定（安全受入と立上を含む）：立上プログラムの確立と実施、用途固有の安全事例の作成
- (10) システム受入：用途固有の安全事例の評価
- (11) 運転と保守：継続的安全関連保守の実施、継続的安全性能監視と危険源日誌の保守の実施
- (12) 性能監視：性能と安全統計の収集、分析、評価、使用
- (13) 改造と後付：改造と後付の安全上の意味の考慮
- (14) 使用停止と処分：安全計画の確立、危険源分析と危険評価の実施、安全計画の実施

安全関連システムの安全コストは、内容的に確立したわけではない。ここで提案する安全コストの概念を、システム安全を構築するために必要不可欠な事項としての認識を持って検討を深め、安全コストを明確化することで、より安全性を高める意思決定が容易になると判断する。

3. 輸送システムの事故損失コスト

〈3.1〉 輸送システムに係わる費用

総合費用である Lcc(Life cycle costing) を検討する際、例えば、自動車の新車購入から廃車までの費用と交通用具を用いて人や物を輸送する際必要な交通路施設、交通設備及び運営維持管理する組織や設備などの総合費用を評価対象に加える必要がある。しかし、交通用具以外は国の予算が多くを占め、かつ交通用具と交通路施設、交通設備の寿命が異なり管理も異なる。即ち交通用具の耐用年数に比較して、交通路施設、交通設備などは交通用具の発展、社会的進展に従っ

て改良、改修され、使用し続けられている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。よって、システム全体の評価では、一般に検討されているシステムの Lcc 評価のように、各施設、設備の個別で計画、設計、運用、廃棄の寿命的概念を評価するという考えを導入し難い。

この様なシステムの場合、寿命的概念について評価期間を限定して期間内に発生する費用の内容を区分して、Lcc を評価・検討することを試みた。即ち交通用具の購入、運用、維持、管理、廃却に係わる費用全体を1年間で算出し、また、交通路施設の建設、保全、修理、改修、さらに交通設備の設計、製造、設置、運用、廃却、また運営維持管理する組織体や設備の費用、並びに事故損失額の費用もそれぞれ1年間で算出して、それらの費用内容と金額で輸送システムを横断的に分析・評価することで Lcc の評価とした。各輸送システムに関する年間の費用は、国土交通白書⁽¹⁰⁾、交通安全白書⁽¹¹⁾及び事業者の決算報告などより算出した。算出数値は、平成18年度を用いたが、国家予算は補正予算などの修正を加えた（表1参照）⁽¹²⁾。

〈3.2〉 事故発生確率と安全性

表1の結果からそれぞれの輸送システムの違いについて、事故件数、安全投資額の割合、事故損失の割合などの数値比較を試みた。（表2参照）

事故件数に対する死傷者数は、道路、鉄道、航空交通ともほぼ同じであり、事故件数に対する死亡者数の割合は、道路交通が鉄道交通の2倍、航空交通は鉄道交通の3/5で

表1 輸送システムの費用

Table 1. Cost of Transportation System.

項目	道路交通	鉄道交通	航空交通
設備投資費用 注(2)	5兆9795億 (18.3%)	1兆8498億 (33.3%)	4825億 (12.1%)
運用費用 注(3)	9兆7726億 (29.8%)	1兆6937億 (30.5%)	2兆6502億 (66.2%)
安全投資額 注(4)	2兆0074億 (6.13%)	8769億 (15.8%)	4300億 (10.8%)
修繕・廃却・新車費用 注(5)	8兆2561億 (25.2%)	1兆0222億 (18.4%)	4355億 (10.9%)
事故損失額 注(6)	6兆7450億 (20.6%)	1143億 (2.06%)	15億 (0.038%)
合計	32兆7608億 (100%)	5兆5570億 (100%)	3兆9997億 (100%)

注(1) 表の数値は、国土交通省一般会計、平成18年度版国土交通白書及び交通安全白書などの数値を用いた。

(2) 平成18年度国土交通省道路関係予算の概要P30、道路関連予算、鉄道整備事業などより算出した。

(3) 揮発油消費、鉄道事業設備投資交通路施設などの費用。交通設備には防衛庁自衛隊の費用が一部含まれると考えられるが、費用配分が明確でなかったためにここでは含めない。

(4) 交通安全白書 H20年版 道路予算配分 H18年 交通安全事業 pp12/44 などより算出。

(5) 施設・車両の修繕費及び自動車の廃却費用の算出は、自動車の台数÷耐用年数10年×廃却費用(10,000円)とし、新車販売高の推定は、(社)日本自動車販売協会連合会の資料によるディーラー新車売上高より算出した。

(6) 道路交通の事故による損失額は、交通事故の被害・損失の経済的分析に関する調査研究(平成19年3月内閣府政策統括官)による。道路交通以外の事故による損失額は、道路交通の死亡損失額と金銭的損出額を基に、それぞれの交通の死傷者数と死亡者数の割合から算出した。

表2 輸送システムの安全に関する評価

Table 1. Validation of Transportation System Safety

項目	道路交通	鉄道交通	航空交通
死傷者数/事故件数(人/件数)	1.25	0.86	0.78
輸送人キロ当たりの事故率(人キロ)	死傷者	1.8 ×10 ⁻⁶	0.16 ×10 ⁻⁹
	死亡者	0.77 ×10 ⁻⁹	0.047 ×10 ⁻⁹
総合計額に対する安全投資額の割合 (%)	6.13	15.8	10.8
輸送人キロ当たりの安全投資額 (万円/人キロ)	2.19	1.95	5.01
総費用に対する事故損失の割合 (%)	20.6	2.06	0.04
輸送人キロ当たりの死亡者の被害額 (千円/人キロ)	1792	1.95	12.1

注(1) 各数値は、平成18年版及び19年版の国土交通白書、交通安全白書による数値及びそれら数値からの算出である。

(2) 安全投資額の合計は、陸上交通共通及び輸送システム共通の費用は除いた。道路交通以外の事故による損失額は、道路交通の死亡損失額と金銭的損出額を基に、それぞれの交通の死傷者数と死亡者数の割合から算出した。

あった。輸送人キロ当たりの死傷者数は、道路交通が鉄道交通の6,670倍、航空交通が鉄道交通の0.089であった。輸送人キロ当たりの死亡者数は、道路交通が鉄道交通の9倍、航空交通は鉄道交通の0.06であった。道路交通は事故件数当たりの死傷者数、死亡者数ともに他交通より多く、特に輸送人キロ当たりの死傷者数が多い。

1年間の総合計費用に対する安全投資額の割合は、道路交通が鉄道交通の約0.4、航空交通が鉄道交通の約0.7であった。一方輸送人キロ当たりの安全投資額は、道路交通及び鉄道交通がほぼ同じ2万円/人キロで、航空交通は鉄道交通の2.6倍であった。総合計に対する事故損失額の割合は、道路交通が鉄道交通の10倍、航空交通は鉄道交通の1/50であった。これらより道路交通は人キロ当たりの安全投資額は他の交通とほぼ同じであるにもかかわらず、事故損失額は10倍多い結果となっている。

交通路施設の安全対策は、交通路施設を維持管理している所管部署ごとに行われており、交通ルールのマナー向上

等の教育、標識・表示などの充実に力点が置かれている傾向がある。他の輸送システムでは、交通路施設、交通設備に対して運転手、パイロット及び保守者などのヒューマンエラーを防止するための対策が過去の事故原因分析と併せて施設として設備されている。よって、道路交通の場合、他の輸送システムの特徴を踏まえてその違いを明確化し、交通具と交通路の一体とした事故を減じる施設、設備についての方策の調査・検討が必要である。

4. 鉄道交通の安全関連設備投資

〈4・1〉 安全関連設備と障害及び事故との関連

安全関連システムは、システム全体としての安全対策が有効であることが、各輸送システムの事故件数、設備投資額及び安全投資額の比率に関する評価から得られた。そこで鉄道交通の安全設備の違いによる障害及び事故との関連を評価する。

「第8次交通安全基本計画」(平成18年～22年度の5カ年計画)では、鉄道交通の安全に関する数値目標を、乗客の死亡者数ゼロ、踏切事故件数の約1割削減としている。鉄道交通の安全投資額の内容は、安全に関係する機器の設備投資額が主であり、システム全体の安全に関する安全コストが含まれているわけではない。

H19年度の安全関連設備と事故率、設備投資及び安全関連投資比率との関係について、鉄道事業者区分による比較・評価を行った(表3参照)。設備投資額は営業収益の18%～61%で、平均は23.4%である。安全関連設備投資は、営業収益の7.9%～16.6%で平均は11.3%である。

保安装置としての機能は、ATC(自動列車制御装置: Automatic Train Control)がATS(自動列車停止装置: Automatic Train Stop)⁽¹³⁾より高い。さらに事故件数の詳細として、安全設備である信号保安装置の違いに関して、運転事故と輸送障害の関連を評価する。ATSを設備しているJR在来線7社と大手民鉄14社に対し、ATCを設備している公営交通10社の列車百万キロ走行当たりの踏切障害、人身障害などの運転事故件数と車両、鉄道施設などに起因する輸送障害件

表3 鉄道交通の安全関連設備投資など(H19年度)⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

Table 3. Transportation facilities investment for safety on railway systems

事業者 区分	営業収益	設備投資	安全関連設備投資	事故件数 百万キロ当たり⑥	保安装置		踏切数 (%)
	(百万円)①	(百万円)② (②/①%)	(百万円)③ (③/①%)		ATS (%)	ATC (%)	
JR 在来線	4,411,460	818,628 (18.6)	463,664(10.5)	0.62	98.6	1.43	21364(61.8)
JR 新幹線				0.01	0	100	0
大手民鉄	1,294,904	401,639(31.0)	214,971(16.6)	0.70	96.7	3.3	5808(16.8)
公営地下鉄	841,599	206,745(24.6)	69,884(8.3)	0.41	2.5	97.5	1
新交通・モノレール	75,004	13,389(17.9)	5,958(7.9)	0.15	0	100	0
中小民鉄	291,781	179,051(61.4)	24,844(8.5)	1.05	88.9	8.3	6918(20.0)
路面電車	109,395	26,541(24.3)	16,603(15.2)	4.73	—	—	456(1.32)
合計	7,024,172	1,645,992 (23.4)	795,925 (11.3)	0.66	23294km	3747.5km	34547(100)

(注) (1) 事故件数は、踏切障害(合計350件)、人身傷害(合計424件)、その他(118件)の発生件数の割合である。

(2) 事故件数のその他は、列車脱線(中小民鉄4、路面電車6、JR在来5、その他で合計は16)、道路障害(路面電車93、中小民鉄5の合計98)である。

(3) ATS、ATCの%は、各事業者の営業キロに対するATS、ATC設置距離の%比である。

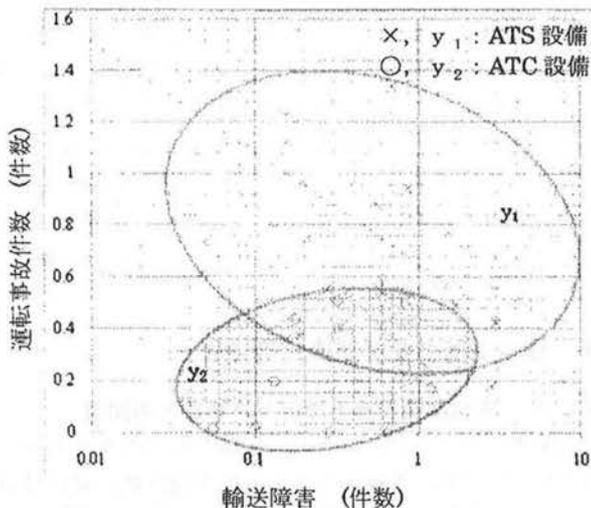


図1 ATS, ATC 設備事業者の列車百万キロ当たりの運転事故と輸送障害

Fig. 1. Operating accident and transport trouble of railway company on ATS, ATC.

数の散布図 (図1参照) から, ATSを設備している事業者は, 踏切道も多いことから, ATCを設備している事業者より運転事故が約3倍多く, 運転障害もATCを設備している事業者の方が約1/2少ない傾向にある。

(4.2) 安全投資比率と修繕費比率の関連

安全関連設備投資に関して, 鉄道事業営業費用に対する安全投資の比率と鉄道事業固定費に対する修繕費の比率を安全関連設備の違いにより評価を行う。JR7社のうち4社はATCが設備されている新幹線を保有しており, 7社とも在来線はATSを設備している。在来線と新幹線の費用内訳が区分されていないためにATS, ATC混在として評価する。大手民鉄15社中14社はATSを設備しており踏切も存在する。公営地下鉄10社とモノレール17社はATCを設備している。なお大手民鉄1社はATC設備率が64.7%なので, ATC設備事業者とした。これらの関連を評価すると安全投資比率は, ATS設備事業者がATC設備事業者より約3.3倍多く, 修繕比率はATS設備事業者がATC設備事業者より約1.6倍多い(図2参照)。即ち, 初期投資額は, ATCの方が多いが, その後の運営段階においては, 安全投資額と修繕費はATCの方が少なく済むことを意味している。

5. まとめ

安全関連システムの安全コストに関して概念を検討し, 各輸送システムの違いによるシステムのコスト比率を評価した結果, 事故損失コストが重要であることが判明した。さらに, 鉄道交通で各費用の数値的評価を行った。安全コストに関して, 鉄道交通は安全関連設備投資額を主としており, 他のコストとの区分が明確でない。また安全設備の違いによる運転事故, 輸送障害, 安全投資比率, 修繕比率の評価では, いずれも安全性の高い装置を設備している事業者の方が運転, 保守費用が少なく済む傾向にあった。

今後は, 安全コストの内容を通常発生するコストと区分

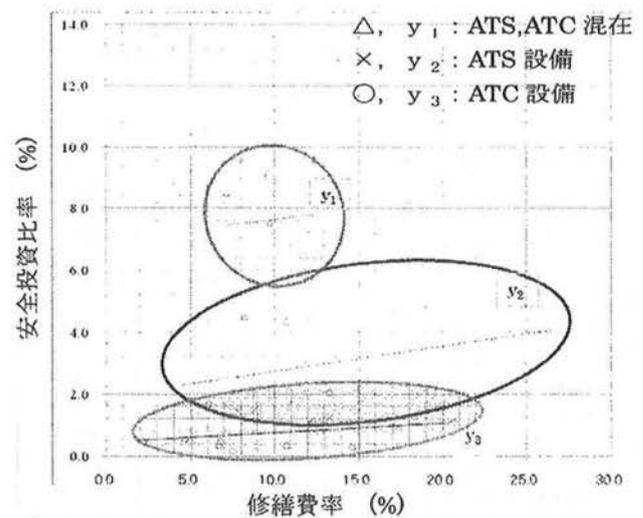


図2 設備別安全投資比率と修繕費率

Fig. 2. Safety investment and maintenance cost ratios by facilities differences.

できるような方法論を構築し, 多くの関連システムに応用して, 横断的な対応をすることにより, 安全関連システムの適切な安全コストと安全に関する対応策が有効に機能することになるものと確信する。

課題として, 輸送システムの環境問題をLccの評価に加えて再評価すること, また事故損失額をLcc評価の対象として, 安全対策の投資費用と事故損失額との相関を解明して, より有効な安全対策を早急に行う必要がある。

文 献

- (1) D.Mカーメル, D.Mハッセンザール, 中田俊彦訳, リスク解析学入門, シェブリンガー・フェアラーク東京, pp273-304 (2001.12)
- (2) John X. Wang & Marvin L. Routh, 日本技術士会訳, リスク分析工学, 丸善株式会社, pp155-182 (2003.12)
- (3) 足立芳寛, 松野康也, 醍醐一朗, 溝口博明, 環境システム工学, 東京大学出版会, pp83-147 (2004.4)
- (4) Nancy G. Leveson, SAFEWARE, System Safety and Computer, ADDISON-WESLEY, pp159-161 (1995.9)
- (5) Harold E. Roland, Brian Moriarty, System Safety Engineering and Management, John Willy & Sons, Inc., pp.8-10, pp29-61 (1990)
- (6) 富山哲男, 設計の理論, 現在工学の基礎 15, 岩波書店, pp25-31 (2002.12)
- (7) IEC62278. Railway applications: Specification and demonstration of reliability, availability, maintainability, and safety(RAMS)
- (8) 川上省吾, 松井寛, 交通工学 第2版, 森北出版, pp84-90, pp.184-196 (2005.9)
- (9) 笠原篤, 交通システム工学, 共立出版株式会社, pp144-146, pp168-179, pp150-162 (1993. 12)
- (10) 国土交通白書 平成18年版, 平成19年版, (2007, 2008)
- (11) 交通安全白書 平成18年版, (2007)
- (12) 夏目武編著, ライフサイクル コスティング, 日科技連, pp180-200 (2009.7.27)
- (13) 中村英夫, 列車制御, 工業調査会, pp88-117, (2010.6)
- (14) 交通安全白書 平成20年版, (2009)
- (15) 山本正宣, 中村英夫, 夏目武, 古野紀雄, 安全コストの考え方, 第22回秋季シンポジウム, 日本信頼性学会, pp77-80 (2009.11)
- (16) http://www8.cao.go.jp/koutu/kihon/keikaku8/8keikaku_h.html